



**IAEA**

国际原子能机构

国际原子能机构安全标准

第 SSG-26 (Rev.1) 号

保护人类与环境

# 国际原子能机构 《放射性物质安全运输 条例》(2018 年版) 咨询材料

特定安全导则

# 国际原子能机构安全标准和相关出版物

## 国际原子能机构安全标准

根据《国际原子能机构规约》第三条的规定，国际原子能机构授权制定或采取旨在保护健康及尽量减少对生命与财产之危险的安全标准，并规定适用这些标准。

国际原子能机构借以制定标准的出版物以国际原子能机构《安全标准丛书》的形式印发。该丛书涵盖核安全、辐射安全、运输安全和废物安全。该丛书出版物的分类是**安全基本法则、安全要求和安全导则**。

有关国际原子能机构安全标准计划的资料可访问以下国际原子能机构因特网网站：

[www.iaea.org/zh/shu-ju-ku/an-quan-biao-zhun](http://www.iaea.org/zh/shu-ju-ku/an-quan-biao-zhun)

该网站提供已出版安全标准和安全标准草案的英文文本。以阿拉伯文、中文、法文、俄文和西班牙文印发的安全标准文本；国际原子能机构安全术语以及正在制订中的安全标准状况报告也在该网站提供使用。欲求进一步的信息，请与国际原子能机构联系（Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria）。

敬请国际原子能机构安全标准的所有用户将使用这些安全标准的经验（例如作为国家监管、安全评审和培训班课程的依据）通知国际原子能机构，以确保这些安全标准继续满足用户需求。资料可以通过国际原子能机构因特网网站提供或按上述地址邮寄或通过电子邮件发至 [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org)。

## 相关出版物

国际原子能机构规定适用这些标准，并按照《国际原子能机构规约》第三条和第八条 C 款之规定，提供和促进有关和平核活动的信息交流并为此目的充任成员国的居间人。

核活动的安全报告以《安全报告》的形式印发，《安全报告》提供能够用以支持安全标准的实例和详细方法。

国际原子能机构其他安全相关出版物以《应急准备和响应》出版物、《放射学评定报告》、国际核安全组的《核安全组报告》、《技术报告》和《技术文件》的形式印发。国际原子能机构还印发放射性事故报告、培训手册和实用手册以及其他特别安全相关出版物。

安保相关出版物以国际原子能机构《核安保丛书》的形式印发。

国际原子能机构  
《放射性物质安全运输条例》  
(2018 年版) 咨询材料

国际原子能机构成员国

|            |           |               |
|------------|-----------|---------------|
| 阿富汗        | 冈比亚       | 北马其顿          |
| 阿尔巴尼亚      | 格鲁吉亚      | 挪威            |
| 阿尔及利亚      | 德国        | 阿曼            |
| 安哥拉        | 加纳        | 巴基斯坦          |
| 安提瓜和巴布达    | 希腊        | 帕劳            |
| 阿根廷        | 格林纳达      | 巴拿马           |
| 亚美尼亚       | 危地马拉      | 巴布亚新几内亚       |
| 澳大利亚       | 几内亚       | 巴拉圭           |
| 奥地利        | 圭亚那       | 秘鲁            |
| 阿塞拜疆       | 海地        | 菲律宾           |
| 巴哈马        | 教廷        | 波兰            |
| 巴林         | 洪都拉斯      | 葡萄牙           |
| 孟加拉国       | 匈牙利       | 卡塔尔           |
| 巴巴多斯       | 冰岛        | 摩尔多瓦共和国       |
| 白罗斯        | 印度        | 罗马尼亚          |
| 比利时        | 印度尼西亚     | 俄罗斯联邦         |
| 伯利兹        | 伊朗伊斯兰共和国  | 卢旺达           |
| 贝宁         | 伊拉克       | 圣基茨和尼维斯       |
| 多民族玻利维亚国   | 爱尔兰       | 圣卢西亚          |
| 波斯尼亚和黑塞哥维那 | 以色列       | 圣文森特和格林纳丁斯    |
| 博茨瓦纳       | 意大利       | 萨摩亚           |
| 巴西         | 牙买加       | 圣马力诺          |
| 文莱达鲁萨兰国    | 日本        | 沙特阿拉伯         |
| 保加利亚       | 约旦        | 塞内加尔          |
| 布基纳法索      | 哈萨克斯坦     | 塞尔维亚          |
| 布隆迪        | 肯尼亚       | 塞舌尔           |
| 佛得角        | 大韩民国      | 塞拉利昂          |
| 柬埔寨        | 科威特       | 新加坡           |
| 喀麦隆        | 吉尔吉斯斯坦    | 斯洛伐克          |
| 加拿大        | 老挝人民民主共和国 | 斯洛文尼亚         |
| 中非共和国      | 拉脱维亚      | 索马里           |
| 乍得         | 黎巴嫩       | 南非            |
| 智利         | 莱索托       | 西班牙           |
| 中国         | 利比里亚      | 斯里兰卡          |
| 哥伦比亚       | 利比亚       | 苏丹            |
| 科摩罗        | 列支敦士登     | 瑞典            |
| 刚果         | 立陶宛       | 瑞士            |
| 库克群岛       | 卢森堡       | 阿拉伯叙利亚共和国     |
| 哥斯达黎加      | 马达加斯加     | 塔吉克斯坦         |
| 科特迪瓦       | 马拉维       | 泰国            |
| 克罗地亚       | 马来西亚      | 多哥            |
| 古巴         | 马里        | 汤加            |
| 塞浦路斯       | 马耳他       | 特立尼达和多巴哥      |
| 捷克共和国      | 马绍尔群岛     | 突尼斯           |
| 刚果民主共和国    | 毛里塔尼亚     | 土耳其           |
| 丹麦         | 毛里求斯      | 土库曼斯坦         |
| 吉布提        | 墨西哥       | 乌干达           |
| 多米尼克       | 摩纳哥       | 乌克兰           |
| 多米尼加共和国    | 蒙古        | 阿拉伯联合酋长国      |
| 厄瓜多尔       | 黑山        | 大不列颠及北爱尔兰联合王国 |
| 埃及         | 摩洛哥       | 坦桑尼亚联合共和国     |
| 萨尔瓦多       | 莫桑比克      | 美利坚合众国        |
| 厄立特里亚      | 缅甸        | 乌拉圭           |
| 爱沙尼亚       | 纳米比亚      | 乌兹别克斯坦        |
| 斯威士兰       | 尼泊尔       | 瓦努阿图          |
| 埃塞俄比亚      | 荷兰王国      | 委内瑞拉玻利瓦尔共和国   |
| 斐济         | 新西兰       | 越南            |
| 芬兰         | 尼加拉瓜      | 也门            |
| 法国         | 尼日尔       | 赞比亚           |
| 加蓬         | 尼日利亚      | 津巴布韦          |

国际原子能机构的《规约》于1956年10月23日经在纽约联合国总部举行的原子能机构《规约》会议核准，并于1957年7月29日生效。原子能机构总部设在维也纳，其主要目标是“加速和扩大原子能对全世界和平、健康及繁荣的贡献”。

国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-26 (Rev.1) 号

国际原子能机构  
《放射性物质安全运输条例》  
(2018 年版) 咨询材料

特定安全导则

国际原子能机构  
2025 年·维也纳

## 版权说明

国际原子能机构的所有科学和技术出版物均受 1952 年（日内瓦）通过并于 1971 年（巴黎）修订的《世界版权公约》之条款的保护。自那时以来，世界知识产权组织（日内瓦）已将版权的范围扩大到包括电子形式和虚拟形式的知识产权。可以获得许可使用国际原子能机构印刷形式或电子形式出版物中所载全部或部分内容。请见 [www.iaea.org/publications/rights-and-permissions](http://www.iaea.org/publications/rights-and-permissions) 了解详情。垂询可致函：

Publishing Section  
International Atomic Energy Agency  
Vienna International Centre  
PO Box 100  
1400 Vienna, Austria  
电话：+43 1 2600 22529 或 22530  
电子信箱：sales.publications@iaea.org  
网址：<https://www.iaea.org/zh/chu-ban-wu>

© 国际原子能机构，2025 年  
国际原子能机构印刷  
2025 年 1 月 · 奥地利

## 国际原子能机构《放射性物质安全运输条例》 （2018 年版）咨询材料

国际原子能机构，奥地利，2025 年 1 月  
STI/PUB/1953  
ISBN 978-92-0-513223-5（简装书：碱性纸）  
978-92-0-513023-1（pdf 格式）  
EPUB 978-92-0-513123-8  
ISSN 1020-5853

## 前 言

### 拉斐尔·马里亚诺·格罗西总干事

国际原子能机构（原子能机构）《规约》授权原子能机构“制定……旨在保护健康及尽量减少对生命与财产的危险的的安全标准”。这些是原子能机构必须适用于其自身业务而且各国可以通过其国家法规来适用的标准。

原子能机构于 1958 年开始实施其安全标准计划，此后有了许多发展。作为总干事，我致力于确保原子能机构维护和改进这套具有综合性、全面性和一致性的、与时俱进的、用户友好的和适合目的的高质量安全标准。在利用核科学和技术的过程中正确地适用这些标准将为全世界的人和环境提供高水平的保护，并为持续利用核技术造福于所有人提供必要的信心。

安全是得到许多国际公约支持的一项国家责任。原子能机构的安全标准奠定了这些法律文书的基础，而且是有助于各方履行各自义务的全球基准。虽然安全标准对成员国没有法律约束力，但它们被广泛适用。对已在国家法规中采用这些标准以加强核能发电、研究堆和燃料循环设施中以及医学、工业、农业和研究领域核应用中的安全的绝大多数成员国而言，它们已成为不可或缺的基准点和共同标准。

原子能机构的安全标准以原子能机构成员国的实际经验为基础，并通过国际协商一致产生。各安全标准分委员会、核安保导则委员会和安全标准委员会成员的参与尤其重要，我向所有为这项工作贡献自己的知识和专长的人表示感谢。

原子能机构在通过评审工作组访问和咨询服务向成员国提供援助时，也使用这些安全标准。这有助于成员国适用这些标准，并使得能够共享宝贵经验和真知灼见。在安全标准的定期修订过程中，会考虑到这些工作组访问和服务的反馈，以及从使用和适用安全标准的事件和经历中汲取的教训。

我相信，原子能机构安全标准及其适用将为确保在使用核技术时实现高水平安全作出宝贵的贡献。我鼓励所有成员国宣传和适用这些安全标准，并与原子能机构合作，在现在和将来维护其质量。



# 国际原子能机构安全标准

## 背景

放射性是一种自然现象，因而天然辐射源的存在是环境的特征。辐射和放射性物质具有许多有益的用途，从发电到医学、工业和农业应用不一而足。必须就这些应用可能对工作人员、公众和环境造成的辐射危险进行评定，并在必要时加以控制。

因此，辐射的医学应用、核装置的运行、放射性物质的生产、运输和使用以及放射性废物的管理等活动都必须服从安全标准的约束。

对安全实施监管是国家的一项责任。然而，辐射危险有可能超越国界，因此，国际合作的目的就是通过交流经验和提高控制危险、预防事故、应对紧急情况和减缓任何有害后果的能力来促进和加强全球安全。

各国负有勤勉管理义务和谨慎行事责任，而且理应履行其各自的国家和国际承诺与义务。

国际安全标准为各国履行一般国际法原则规定的义务例如与环境保护有关的义务提供支持。国际安全标准还促进和确保对安全建立信心，并为国际商业与贸易提供便利。

全球核安全制度已经建立，并且正在不断地加以改进。对实施有约束力的国际文书和国家安全基础结构提供支撑的原子能机构安全标准是这一全球性制度的一座基石。原子能机构安全标准是缔约国根据这些国际公约评价各缔约国履约情况的一个有用工具。

## 原子能机构安全标准

原子能机构安全标准的地位源于原子能机构《规约》，其中授权原子能机构与联合国主管机关及有关专门机构协商并在适当领域与之合作，以制定或采取旨在保护健康及尽量减少对生命与财产之危险的安全标准，并对其适用作出规定。

为了确保保护人类和环境免受电离辐射的有害影响，原子能机构安全标准制定了基本安全原则、安全要求和安全措施，以控制对人类的辐射照射和放射性物质向环境的释放，限制可能导致核反应堆堆芯、核链式反应、辐射源或任何其他辐射源失控的事件发生的可能性，并在发生这类事件时减轻其后果。这些标准适用于引起辐射危险的设施和活动，其中包括核装置、辐射和辐射源利用、放射性物质运输和放射性废物管理。

安全措施和安保措施<sup>1</sup>具有保护生命和健康以及保护环境的目的。安全措施和安保措施的制订和执行必须统筹兼顾，以便安保措施不损害安全，以及安全措施不损害安保。

原子能机构安全标准反映了有关保护人类和环境免受电离辐射有害影响的高水平安全在构成要素方面的国际共识。这些安全标准以原子能机构《安全标准丛书》的形式印发，该丛书分以下三类（见图 1）。



图 1. 国际原子能机构《安全标准丛书》的长期结构。

<sup>1</sup> 另见以原子能机构《核安保丛书》印发的出版物。

## 安全基本法则

“安全基本法则”阐述防护和安全的基本安全目标和原则，以及为安全要求提供依据。

## 安全要求

一套统筹兼顾和协调一致的“安全要求”确定为确保现在和将来保护人类与环境所必须满足的各项要求。这些要求遵循“安全基本法则”提出的目标和原则。如果不能满足这些要求，则必须采取措施以达到或恢复所要求的安全水平。这些要求的格式和类型便于其用于以协调一致的方式制定国家监管框架。这些要求包括带编号的“总体”要求用“应当”来表述。许多要求并不针对某一特定方，暗示的是相关各方负责履行这些要求。

## 安全导则

“安全导则”就如何遵守安全要求提出建议和指导性意见，并表明需要采取建议的措施（或等效的可替代措施）的国际共识。“安全导则”介绍国际良好实践并且不断反映最佳实践，以帮助用户努力实现高水平安全。“安全导则”的建议用“应当”来表述。

## 原子能机构安全标准的适用

原子能机构成员国中安全标准的使用者是监管机构和其他相关国家当局。共同发起组织及设计、建造和运行核设施的许多组织以及涉及利用辐射源和放射源的组织也使用原子能机构安全标准。

原子能机构安全标准在相关情况下适用于为和平目的利用的一切现有和新的设施和活动的整个寿期，并适用于为减轻现有辐射危险而采取的保护行动。各国可以将这些安全标准作为制订有关设施和活动的国家法规的参考。

原子能机构《规约》规定这些安全标准在原子能机构实施本身的工作方面对其有约束力，并且在实施由原子能机构援助的工作方面对国家也具有约束力。

原子能机构安全标准还是原子能机构安全评审服务的依据，原子能机构利用这些标准支持开展能力建设，包括编写教程和开设培训班。

国际公约中载有与原子能机构安全标准中所载相类似的要求，从而使其对缔约国有约束力。由国际公约、行业标准和详细的国家要求作为补充的原子能机构安全标准为保护人类和环境奠定了一致的基础。还会出现一些需要在国家一级加以评定的特殊安全问题。例如，有许多原子能机构安全标准特别是那些涉及规划或设计中的安全问题的标准意在主要适用于新设施和新活动。原子能机构安全标准中所规定的要求在一些按照早期标准建造的现有设施中可能没有得到充分满足。对这类设施如何适用安全标准应由各国自己作出决定。

原子能机构安全标准所依据的科学考虑因素为有关安全的决策提供了客观依据，但决策者还须做出明智的判断，并确定如何才能最好地权衡一项行动或活动所带来的好处与它所产生的相关辐射危险和任何其他不利影响。

## 原子能机构安全标准的制定过程

编写和审查安全标准的工作涉及原子能机构秘书处及分别负责应急准备和响应（应急准备和响应标准委员会）、核安全（核安全标准委员会）、辐射安全（辐射安全标准委员会）、放射性废物安全（废物安全标准委员会）和放射性物质安全运输（运输安全标准委员会）的五个安全标准分委员会以及一个负责监督原子能机构安全标准计划的安全标准委员会（安全标准委员会）（见图2）。

原子能机构所有成员国均可指定专家参加安全标准分委员会的工作，并可就标准草案提出意见。安全标准委员会的成员由总干事任命，并包括负责制订国家标准的政府高级官员。

已经为原子能机构安全标准的规划、制订、审查、修订和最终确立过程确定了一套管理系统。该系统阐明了原子能机构的任务；今后适用安全标准、政策和战略的思路以及相应的职责。

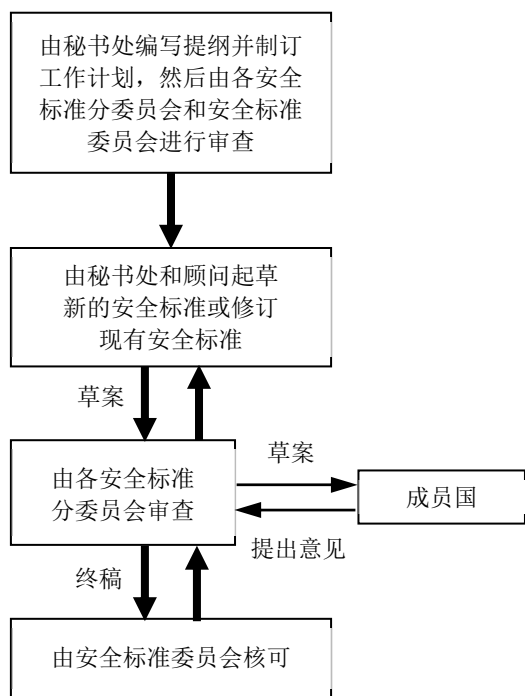


图 2. 制订新安全标准或修订现行标准的过程。

## 与其他国际组织的合作关系

在制定原子能机构安全标准的过程中考虑了联合国原子辐射效应科学委员会的结论和国际专家机构特别是国际放射防护委员会的建议。一些标准的制定是在联合国系统的其他机构或其他专门机构的合作下进行的，这些机构包括联合国粮食及农业组织、联合国环境规划署、国际劳工组织、经合组织核能机构、泛美卫生组织和世界卫生组织。

## 文本的解释

安全和核安保相关术语应理解为《国际原子能机构核安全和核安保术语》（见 <https://www.iaea.org/resources/publications/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary>）中的术语。就“安全导则”而言，英文文本系权威性文本。

原子能机构《安全标准丛书》中每一标准的背景和范畴及其目的、范围和结构均在每一出版物第一章“导言”中加以说明。

在正文中没有适当位置的资料（例如对正文起辅助作用或独立于正文的资料；为支持正文中的陈述而列入的资料；或叙述计算方法、程序或限值和条件的资料）以附录或附件的形式列出。

如列有附录，该附录被视为安全标准的一个不可分割的组成部分。附录中所列资料具有与正文相同的地位，而且原子能机构承认其作者身份。正文中如列有附件和脚注，这些附件和脚注则被用来提供实例或补充资料或解释。附件和脚注不是正文不可分割的组成部分。原子能机构发表的附件资料并不一定以作者身份印发；列于其他作者名下的资料可以安全标准附件的形式列出。必要时将摘录和改编附件中所列外来资料，以使其更具通用性。

# 目 录

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 第一节 导言 .....                             | 1  |
| 背景 .....                                 | 1  |
| 目的 .....                                 | 4  |
| 范围 .....                                 | 4  |
| 第一节 参考文献 .....                           | 9  |
| 第二节 定义 .....                             | 11 |
| 第二节 参考文献 .....                           | 29 |
| 第三节 总则 .....                             | 31 |
| 辐射防护 .....                               | 31 |
| 应急响应 .....                               | 34 |
| 管理系统 .....                               | 35 |
| 合规保证 .....                               | 36 |
| 不符合 .....                                | 38 |
| 特殊安排 .....                               | 39 |
| 培训 .....                                 | 40 |
| 第三节 参考文献 .....                           | 41 |
| 第四节 活度限值和分类 .....                        | 45 |
| 一般规定 .....                               | 45 |
| 放射性核素基本值 .....                           | 45 |
| 放射性核素基本值的测定 .....                        | 47 |
| 物质分类 .....                               | 50 |
| 货包的分类 .....                              | 63 |
| 第四节 参考文献 .....                           | 67 |
| 第五节 运输要求和控制 .....                        | 71 |
| 首次装运前要求 .....                            | 71 |
| 每次装运前要求 .....                            | 72 |
| 其他货物的运输 .....                            | 75 |
| 内容物的其他危险特性 .....                         | 75 |
| 污染和泄漏货包要求和控制 .....                       | 77 |
| 例外货包的运输要求和控制 .....                       | 82 |
| 工业货包或未包装的低比活度物质和表面污染物体运输的<br>要求和控制 ..... | 83 |
| 运输指数（TI）的确定 .....                        | 86 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 托运货物、货运集装箱和外包装临界安全指数的确定 .....       | 87         |
| 货包和外包装运输指数、临界安全指数和剂量率限值 .....       | 87         |
| 类别 .....                            | 88         |
| 标记、标签和标牌 .....                      | 90         |
| 托运人责任 .....                         | 96         |
| 在途运输和存储 .....                       | 98         |
| 海关作业 .....                          | 110        |
| 无法交付托运货物 .....                      | 111        |
| 承运人保持和提供运输单据 .....                  | 112        |
| 第五节 参考文献 .....                      | 112        |
| <b>第六节 放射性物质和包装及货包要求 .....</b>      | <b>117</b> |
| 放射性物质要求 .....                       | 117        |
| 对不属于裂变材料分类材料要求 .....                | 120        |
| 所有包装和货包一般要求 .....                   | 123        |
| 空运货包额外要求 .....                      | 127        |
| 工业货包要求 .....                        | 129        |
| 装有六氟化铀货包要求 .....                    | 133        |
| A 型货包要求 .....                       | 138        |
| B (U) 型货包要求 .....                   | 142        |
| B (M) 型货包要求 .....                   | 158        |
| C 型货包要求 .....                       | 159        |
| 装有易裂变材料货包要求 .....                   | 160        |
| 货包临界安全指数 (CSI) 的确定 .....            | 175        |
| 第六节 参考文献 .....                      | 176        |
| <b>第七节 试验程序 .....</b>               | <b>183</b> |
| 符合性的证实 .....                        | 183        |
| 特殊形状放射性物质试验 .....                   | 189        |
| 低弥散放射性物质 (LDRM) 试验 .....            | 191        |
| 货包试验 .....                          | 192        |
| 第七节 参考文献 .....                      | 219        |
| <b>第八节 批准和行政要求 .....</b>            | <b>225</b> |
| 一般规定 .....                          | 225        |
| 特殊形状放射性物质和低弥散放射性物质 (LDRM) 的批准 ..... | 227        |
| 货包设计的批准 .....                       | 228        |
| 过渡性安排 .....                         | 230        |
| 序列号的通知和登记 .....                     | 234        |

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 装运批准.....                                            | 235 |
| 根据特殊安排装运货物的批准.....                                   | 236 |
| 主管当局批准证书.....                                        | 237 |
| 批准的证书的内容.....                                        | 238 |
| 证书的验证.....                                           | 246 |
| 第八节 参考文献.....                                        | 247 |
| 附录 I    用于 $A_1$ 、 $A_2$ 值的计算及其应用的 Q 系统 .....        | 249 |
| 附录 II    放射性核素的半衰期和比活度、放射性核素的<br>剂量和剂量率系数以及比活度 ..... | 306 |
| 附录 III   确定最小隔离距离示例计算 .....                          | 343 |
| 附录 IV    运输过程中货包堆垛和保持 .....                          | 352 |
| 附录 V    货包抗脆性断裂的安全设计导则 .....                         | 363 |
| 附录 VI    临界安全评定 .....                                | 380 |
| 附录 VII   SCO-III 运输活度摄入量计算导则 .....                   | 406 |
| 附录 VIII  特定情况下运输 .....                               | 413 |
| 参与起草和审订人员 .....                                      | 417 |



# 表 目 录

|          |                                                 |     |
|----------|-------------------------------------------------|-----|
| 表 1.     | 各种货包和探测器尺寸修正系数.....                             | 16  |
| 表 2.     | 类别之间的隔离示例 .....                                 | 101 |
| 表 3.     | 阿斯顿等人推荐的四种体积泄漏试验方法的比较.....                      | 118 |
| 表 4.     | 按国家 VRI 代码清单.....                               | 239 |
| 表 I.1.   | 浸没剂量系数 .....                                    | 262 |
| 表 I.2.   | A 型货包内容物限值: $Q_A$ - $Q_F$ , $A_1$ 和 $A_2$ ..... | 273 |
| 表 II.1.  | 放射性核素的半衰期和比活度.....                              | 306 |
| 表 II.2.  | 放射性核素的剂量和剂量率系数.....                             | 324 |
| 表 II.3.  | 铀在不同浓缩度下的比活度值.....                              | 342 |
| 表 III.1. | 传输系数 .....                                      | 347 |
| 表 III.2. | 客机主甲板下单组货包隔离距离随运输指数的变化.....                     | 347 |
| 表 III.3. | 组合式货机主甲板堆垛隔离距离随运输指数的变化.....                     | 350 |
| 表 IV.1.  | 强度分析加速度值 .....                                  | 357 |
| 表 IV.2.  | 特定货包强度分析加速度值.....                               | 358 |
| 表 IV.3.  | 疲劳分析加速度值 .....                                  | 359 |



## 第一节 导言

### 背景

101.1. 辐射和放射性物质是环境自然的和永久的特点，因此，与辐射照射相关的风险只能受到限制，而不能完全消除。此外，人造辐射的使用也很普遍。辐射源对现代医疗保健至关重要。全世界对核能的使用及其副产品（即辐射和放射性物质）的应用持续增加。

101.2. 人们已经认识到，暴露于高水平的辐射会对人体组织造成损害，并且辐射照射有可能诱发潜在的恶性肿瘤。因此，涉及辐射照射的活动，例如运输放射性物质，必须遵守某些安全标准以保护受辐射照射的个人。原子能机构的辐射安全标准为此目的提供了理想的国际共识。

101.3. 社会是否接受与辐射相关的风险取决于从使用涉及辐射的应用中获得的收益。《放射性物质安全运输条例》（“运输条例”<sup>1</sup>）借鉴了科学和工程组织在国家和国际层面就辐射对健康的影响和货包运输安全设计的广泛研究和开发工作以及运输操作的经验所得出的信息。“运输条例”采用纯粹科学的考量，同时也对不同风险类型的相对重要性以及风险与收益的平衡做出了价值判断。

101.4. 可以肯定的是，某些辐射照射是由常规运输工况造成的，其强度是可预测的。此外，可以设想有可能发生照射但不能确定照射实际上是否发生的假想方案，该假想方案下的照射被称为“潜在照射”。如果意外情况确实发生，则“潜在照射”可能会成为“实际照射”。辐射防护最优化要求既要考虑到实际照射，又要考虑到潜在照射。如果可以预见此类情况的发生，就可以估计发生的概率和由此产生的辐射照射。在正常照射情况下，最优化需要考虑到个人剂量的预计大小和照射人数，此外，在潜在照射情况下，还要考虑到发生事故、事件或一连串事件的可能性。

101.5. “运输条例”规定的控制正常照射的手段是限制所接受的剂量。控制潜在照射的主要手段是设计运输货包和操作系统，以满足剂量率、潜在外部污染、活度排放和防止临界的要求。该手段还能够限制可能导致非计

---

<sup>1</sup> 在本出版物中，除非另有说明，提及“运输条例”时总是指最新版。

划照射事件发生的可能性，并限制发生该事件的情况下可能导致的照射剂量。

101.6. 放射性物质运输已成为国家和国际将放射性物质用于医药、农业、工业、研究和核能发电计划的必要部分。因此，普遍认为放射性物质运输是充分正当的。

101.7. 就公众个人而言，原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》[1]规定的剂量限值适用于人口中的代表人来自所有照射源的总个人剂量，不包括天然本底辐射和个人的医疗照射。实际上，为了考虑到其他照射源，“运输条例”的要求是根据代表人的照射条件定义中的保守假设制定的，以合理保证运输此类型货包的剂量不会超过剂量限值的某些部分。

101.8. 制定和优化操作程序以及遵守“运输条例”的责任主要由营运者承担。

101.9. 提供信息和培训是任何辐射防护系统不可或缺的部分。所提供的教学水平必须与所从事工作的性质和类型相称。

101.10. 培训规定见“运输条例”第 311—315 段。

101.11. “运输条例”要求的管理系统的制定和应用，应当在运输操作开始前及时进行。主管当局将酌情核实该管理系统是否遵守“运输条例”规定。

103.1. 在进行国内或国际装运时，有必要参考装运地国家所使用的特定运输方式的规章。虽然大多数主要模态要求与“运输条例”一致，但在特定行动的责任分配方面可能存在差异。对于空运，应当参考国际民用航空组织（ICAO）《危险货物安全空运技术指示》[2]和国际空运协会（IATA）《危险货物条例》[3]，特别要注意国家和营运者的差异。对于海运，应当参考国际海事组织（IMO）《国际海运危险货物（IMDG）规则》[4]。一些国家以参考方式引用了“运输条例”，而另一些国家则将这些条例纳入其国家条例，可能略有改动。

103.2. “运输条例”是原子能机构成员国与国际运输和标准化组织（包括国际海事组织、国际民用航空组织、联合国欧洲经济委员会、万国邮政联

盟和国际标准化组织）之间建立多年共识后制定的。这些机构在制定“运输条例”时使用了国际公认的科学原则、数据和研究。“运输条例”旨在向各国和各多式联运监管组织提供基于共识的运输要求，以保护工作人员、公众和环境的健康和安全，并允许国际贸易。

103.3. 虽然“运输条例”对各国的通过或执行不具约束力，但国际运输监管组织吸收和合并“运输条例”确实要求各国必须遵守。

103.4. 因此，“运输条例”所依据的假设是国家基础设施已经到位，使政府能够履行其运输安全责任。

103.5. 目前放射性物质运输的安全水平已在世界范围内达到，是通过国际、区域和模态条例中关于所有危险货物运输的“运输条例”实现的，其中放射性物质只是九类危险货物中的一种（第 7 类）。相关出版物解释了“运输条例”，并就如何适用这些条例提供了咨询意见，并在参考文献[5—8]更详细地涵盖了诸如应急响应、合规保证、管理系统和规定附表等专题。

103.6. 建议成员国在其危险货物运输的国家条例中也采用“运输条例”。即使是没有核电工业的成员国也需要制定安全控制医疗、工业或研究应用等常用放射性物质运输要求。

103.7. 国家基础运输安全的组成部分是：法律和法规、有权授权和视察受监管活动并执行法律和法规的主管当局、充足的财务资源、以及足够数量的训练有素人员。还应当提供解决社会关切的手段，例如超出授权运输放射性物质人员的法律责任。

103.8. 与 2012 年版（前版）相比，“运输条例”（2018 年版）（现版）主要变化如下：

- (a) 规定了存储后用于装运的货包（“两用桶”）要求；
- (b) 规定了第三类表面污染物体（SCO-III）的装运（即无包装大型物体的运输）；
- (c) 规定了货包设计应当考虑到老化机制要求；
- (d) 加强了六氟化铀（UF<sub>6</sub>）钢瓶塞保护要求；
- (e) 第三类低比活度物质（LSA-III 物质）要求中删除了浸出试验；

(f) 将另外 7 种放射性核素列入了“运输条例”表 2。

“运输条例”（2018 年版）为根据 1985 年版、1996 年版直到 2012 年版的“运输条例”设计的容器提供了过渡性安排，根据“运输条例”（1973 年版）设计容器的过渡安排已经过时。

## 目的

104.1. 总体而言，“运输条例”旨在提供与所运输放射性物质带来的固有危害相称的、统一的和充分的安全水平。在可行的范围内，要求在货包的设计中内置安全特点。通过货包的设计和准备，尽可能减少在运输过程中运输方（即由承运人）采取任何特别行动的必要性。尽管如此，出于安全的目的，仍需要进行一些操作控制。此外，应当作出适当安排，计划和准备应急响应，以缓解在发生可合理预见的事故（包括严重程度超过第 106.5 段所述运输事故工况的事故）时可能发生的放射性后果。

## 范围

106.1. 运输包括共同承运人或放射性物质所有人（或所有人的雇员）进行的运输，包括在使用放射性物质时附带进行的运输，例如由放射技师驾驶载有放射照相设备的车辆往返于操作现场，驾驶载有密度测量计的车辆往返于建造现场，以及携带含有放射性物质和油井注入中使用的放射性物质的测量设备的油井测井车。

106.2. 在途存储是受“运输条例”监管装运的一部分。在运输货包中密封存储放射性物质，可能超过几年或几十年的时间跨度，以便回收（乏燃料另见原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-15（Rev.1）号《乏燃料的贮存》[9]，放射性废物另见原子能机构《安全标准丛书》第 WS-G-6.1 号《放射性废物的贮存》[10]）。装运前的存储受国际、国家存储法规的监管，不在“运输条例”范围内。存储后的装运受“运输条例”监管，这是一种特定的装运操作，需要考虑货包部件的老化，以及运输规定和存储期间技术知识的变化。

106.3. 所谓“日常运输工况”是指在日常使用和运输货包时，货包没有发生轻微事故或损坏事故（无事故）的情况。但是，货包以及其内部和外部约束系统必须能够承受第 613.1 段所述运输加速度的影响（附录 IV 表 IV.1 和 IV.2 详细列出了可能应用的典型加速度。）

106.4. 所谓“正常运输工况”是指货包遭受严重程度达到相关货包类型（即 IP-2 型、IP-3 型或 A 型）的适用试验要求的事故或事件（轻微事故）的情况。例如，A 型货包自由跌落试验的正常工况是为了模拟货包从车辆平台上跌落或在装卸过程中跌落时所经历的事故类型。在大多数情况下，货包相对来说没有损坏，并在遭受这些小事故后能够继续运输。

106.5. 称为“运输事故工况”情况是指货包遭受严重程度介于“正常运输工况”所涵盖的严重程度之间的事故或事件的情况，最大严重程度为相关货包类型的适用试验要求所规定的最大严重程度（即根据“运输条例”第 726—737 段详细说明了运输事故工况的适用试验所产生的损坏严重程度）。假想 B (U) 型或 B (M) 型货包可能用于所有运输方式，则 B (U) 型或 B (M) 型试验要求考虑到陆、海和空运可能使货包暴露在剧烈的动力下，尽管试验标准所指示的严重程度并不代表最坏的事故工况。C 型试验要求考虑了空运事故中可能更剧烈的事效力。

107.1. “运输条例”不适用于：

- (a) 构成运输工具组成部分的放射性物质，如飞机上使用的贫化铀配重物或氙出口标记；
- (b) 用于医疗或兽医目的的人员或动物体内的放射性物质，如心脏起搏器或在诊断或治疗过程中引入人员或动物体内的放射性物质；
- (c) 因意外或故意摄入放射性物质或受到污染而被运送治疗人员体内或身上的放射性物质。

治疗医师、执业医师或兽医应当就放射安全提供适当意见。在运送人员之前应当考虑对其进行皮肤去污，并应当确保因去污而导致的延误不会对运送人员的健康造成额外的危害。

107.2. 消费品是向最终用户公众提供而不受进一步控制或限制的物项。这些消费品可能是含有少量放射性物质的设备，如烟雾探测器、发光刻度盘或离子发生管。消费品只有在销售给最终用户后才属于“运输条例”范围

之外。任何运输，包括制造商、分销商和零售商之间使用运输工具，都属于“运输条例”范围，以确保个别豁免的消费品不会以不受监管的方式大量运输。

107.3. 豁免原则及其对放射性物质运输的应用见“运输条例”第 402 段。

107.4. “运输条例”范围不包括矿石和含有天然放射性核素的天然或加工物质，前提是这些物质的活度浓度不超过豁免活度浓度值的 10 倍（“运输条例”表 2 或根据“运输条例”第 403—407 段计算）。天然物质和矿石是来自地下的任何实物物质，可以从中提取的矿物质也被认为是天然物质。天然物质和矿石的示例包括钽铁矿和锡渣、磷酸盐、钾盐、锆（锆英砂）和陶瓷工业的其他物质、石油和天然气开采工业的水垢、煤和煤灰、稀土开采的废料以及铀矿的矿石和废料。

原子能机构关于安全运输天然存在放射性物质（NORM）进行监管的协调研究项目（CRP）[11]得出的结论是，该排除并不取决于该物质的先前用途或预计用途（即是否用于其放射性、易裂变或可增殖放射性核素）。在该协调研究项目中，对实际运输假想方案的建模和分析发现，在对该物质适用 10 倍豁免活度浓度值的规定情况下，不受监管的物质运输产生的最大年剂量通常大大低于 1 毫希沃特。根据国际放射防护委员会第 104 号出版物[12]第 71 段，10 微希沃特的年剂量标准不适用于涉及天然源的照射情况，因为该数值至少比天然辐射本底的可变性低一两个数量级。GSR Part 3[1]规定了 1 毫希沃特的年剂量限值作为天然存在放射性物质的豁免。协调研究项目的结论是，基于辐射防护的考虑和风险监管的考虑，该排除是适当的，因为该物质在运输过程中的潜在剂量取决于该物质的活度浓度。“运输条例”第 403—407 段提供了确定活度水平和核素基本值的导则，供在使用“运输条例”表 2 时参考。

对于含有天然铀—镭/钍衰变链放射性核素的矿石和其他天然或加工物质，只有在放射性核素长期平衡的情况下，才能使用“运输条例”表 2 给出的铀（nat）和钍（nat）豁免活度浓度的基本核素值。如果情况并非如此，例如由于化学浸出或热处理等加工活动扰乱了天然放射性平衡，则必须应用“运输条例”第 405 段关于放射性核素混合物的公式来计算豁免活度浓度。

例如，就钍-232 衰变链而言，“运输条例”表 2 钍-228 豁免物质的活度浓度值比镭-228 低 10 倍，因此，豁免物质的总活度浓度值主要取决于核素混合物中钍-228 的比例。下面的示例进一步说明了该点：

- 在开采原油和天然气的过程中，生产管道内壁积聚了水垢。水垢由镭同位素（镭-226 和镭-228）共同沉淀的硫酸钡组成，父代核素（铀-238、钍-232）不存在于水垢中。因此，衰变链的长期平衡被打乱了；
- 铅-210 和钋-210 从镭-226 中缓慢向内生长（约 100 年后达到平衡），钍-228 也呈上升趋势，最终在几年内达到镭-228 活度浓度的 1.46 倍的平衡。例如，参考文献[13]所提供的测出活度浓度插入“运输条例”第 405 段公式，推导下列豁免活度浓度（总和活度）：

$$f(\text{镭-226})+f(\text{铅-210})+f(\text{钋-210})+f(\text{镭-228})=0.84, \text{ 和 } f(\text{钍-228})=0.16$$

式中  $f$  是每种放射性核素活度浓度的分数。

- 由此得出  $0.84/10+0.16/1=0.244$ ，即豁免活度浓度为  $1/0.244=4.1$  贝可/克，（即基于所有相关放射性核素活度之和，其中 10 贝可/克为镭-226、铅-210、钋-210 和镭-228 豁免物质的活度浓度限值，1 贝可/克为钍-228 豁免物质的活度浓度限值）。根据“运输条例”第 107 (f) 段，该值现在可以乘以 10，以确定排除的活度浓度。

存在活度浓度远高于豁免值的天然物质和矿石，这些矿石的运输可能需要考虑辐射防护措施。因此，选择了活度浓度豁免值的 10 倍系数，以便在辐射防护问题与监管大量天然放射性核素活度浓度低物质的实际不便之间取得适当的平衡。

107.5. 关于检查表面污染的豁免水平，见第 413.9 段。

108.1. 虽然“运输条例”规定了必要的运输安全，而不需要指定的路线，但一些成员国的监管当局已经对路线提出了要求。在规定路线时，应当考虑到正常风险和事故风险、辐射风险和非辐射风险以及人口因素。路线限制所体现的政策应当基于造成运输放射性物质总风险的所有因素，而不仅仅是对“最坏情况”（即“低概率/高后果”事故）的关注。由于国家、省

甚至地方各级当局可能参与了路线的决策，因此往往有必要向他们提供他们可以使用的评定替代路线的简单评价方法。

108.2. 在评定放射性危害和确保路线要求不会减损“运输条例”指明的安全标准方面，应当采用适当的风险评定代码进行分析。可以使用的一个这样的代码是 INTERTRAN[14]，这是基于计算机的环境影响代码可供成员国使用。尽管由于使用广义模式存在许多不确定性，并且难以为事故工况选择适当的输入值，但该代码可用于至少在定性的基础上计算和理解在确定涉及放射性物质运输的替代路线所造成的放射性影响方面的重要因素。这些因素是在任何路线决策中都应当考虑的重要方面。对于涉及单独运输方式的路线决策，可以做出许多简化的假设，并可以分配共同因素，从而相对容易的使用风险评价技术。

108.3. 托运人可能还需要提供证据，证实已采取措施遵守了符合与核材料运输相关的保障监督和实物保护要求（《核材料实物保护公约》INFCIRC/274/ Rev.1[15]）。

109.1. 监管机构可能需要采取额外措施，为放射性物质的运输提供适当的安保保障，并防止涉及接收、拥有、使用、转让、改变、处置或散布放射性物质的非法行为，这些行为可能造成人员死亡、严重伤害或财产重大损坏。见参考文献[15、16]、原子能机构《核安保丛书》第 13 号、《关于核材料和核设施实物保护的核安保建议》（INFCIRC/225/Revision 5）[17]、原子能机构《核安保丛书》第 26-G 号《核材料运输中的安保》[18]、原子能机构《核安保丛书》第 14 号《放射性物质和相关设施的核安保建议》[19]和原子能机构《核安保丛书》第 9-G（Rev.1）号《放射性物质运输中的安保》[20]、《放射源安全和安保行为标准》[21]和《放射源进出口导则》[22]。

109.2. 托运人可能还需要提供证据，证实遵守了满足某些放射性物质运输的任何安保要求而采取的措施。

110.1. 见第 506.1—506.2 段和第 507.1—507.9 段。

## 第一节 参考文献

- [1] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号，国际原子能机构，维也纳（2014 年）。
- [2] 国际民用航空组织《危险货物航空安全运输技术指引》（2021—2022 年版），国际民用航空组织，蒙特利尔（2020 年）。
- [3] 国际空运协会《危险货物条例》（第 48 版），国际空运协会，蒙特利尔（2012 年）。
- [4] 国际海事组织《国际海事危险货物（IMDG）规则》（2020 年版），国际海事组织，伦敦（2020 年）。
- [5] 国际原子能机构、国际民用航空组织、国际海事组织，《涉及放射性物质运输的核或辐射紧急情况准备和响应》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-65 号，国际原子能机构，维也纳（2022 年）。
- [6] 国际原子能机构《放射性物质安全运输的合规保证》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-78 号，国际原子能机构，维也纳（编写中）。
- [7] 国际原子能机构《放射性物质安全运输管理系统》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 TS-G-1.4 号，国际原子能机构，维也纳（2008 年）。
- [8] 国际原子能机构《国际原子能机构<放射性物质安全运输条例>（2018 年版）规定细目》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-33（Rev.1）号，国际原子能机构，维也纳（2021 年）。
- [9] 国际原子能机构《乏燃料的贮存》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-15（Rev.1）号，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。
- [10] 国际原子能机构《放射性废物的贮存》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 WS-G-6.1 号，国际原子能机构，维也纳（2006 年）。

- [11] 国际原子能机构《天然存在放射性物质（NORM）安全运输的监管控制》，国际原子能机构《技术文件》第 1728 号，国际原子能机构，维也纳（2013 年）。
- [12] 国际放射防护委员会《放射防护控制措施的范围》，国际放射防护委员会第 104 号出版物，爱思唯尔，牛津（2007 年）。
- [13] 核电厂和反应堆安全公司《德国天然存在放射性物质运输中工作人员的照射》，第 GRS-3541 号报告，核电厂和反应堆安全公司，科隆（2010 年）。
- [14] 国际原子能机构《INTERTRAN：放射性物质运输影响评定系统》，国际原子能机构《技术文件》第 287 号，国际原子能机构，维也纳（1983 年）。
- [15] 《核材料实物保护公约》，国际原子能机构《情况通报》第 INFCIRC/274/Rev.1 号，国际原子能机构，维也纳（1980 年）。
- [16] 《核材料实物保护公约》（修订版），《情况通报》第 INFCIRC/274/Rev.1/ Mod.1（修订版）号，国际原子能机构，维也纳（2016 年）。
- [17] 国际原子能机构《关于核材料和核设施实物保护的核安保建议》（《情况通报》第 INFCIRC/225/Revision 5）号，国际原子能机构《核安保丛书》第 13 号，国际原子能机构，维也纳（2011 年）。
- [18] 国际原子能机构《核材料运输的安保》，国际原子能机构《核安保丛书》第 26-G 号，国际原子能机构，维也纳（2015 年）。
- [19] 国际原子能机构《放射性物质和相关设施的核安保建议》，国际原子能机构《核安保丛书》第 14 号，国际原子能机构，维也纳（2011 年）。
- [20] 国际原子能机构《放射性物质运输中的安保》，国际原子能机构《核安保丛书》第 9-G（Rev.1）号，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。
- [21] 国际原子能机构《放射源安全和安保行为标准》（IAEA/CODEOC/2004），国际原子能机构，维也纳（2004 年）。
- [22] 国际原子能机构《放射源进出口导则》（IAEA/CODEOC/IMP-EXP/2012），国际原子能机构，维也纳（2012 年）。

## 第二节 定义

### A<sub>1</sub>和 A<sub>2</sub>

201.1. 见附录 I。

### 批准

204.1. 对“运输条例”批准要求采用了分级方法，以便这些要求与将要运输的放射性物质构成的危害或设计批准所涵盖的危害相称。批准旨在确保设计或装运符合相关要求，并确保安全所需的控制措施是适合该国和装运情况的。由于各国的运输操作和条件各不相同，采用“多边批准”的方法为每个主管当局提供了一个机会，以确保在适当考虑到任何特定国情的情况下正确执行装运。

204.2. 多边批准的概念适用于预计发生的运输，这意味着只有计划运输的货物通过其管辖范围的主管当局才参与批准。在运输过程中如果发生的意外偏差，导致货物进入一个以前没有批准运输的国家/地区，则需要单独处理。但是，如果运输的飞机计划在一国停留，多边批准应当包括该国主管当局的批准（见第 243.1 段）。

204.3. “运输条例”的使用者应当意识到，一个成员国可在其国家法规中要求其主管当局对在其领土上国内运输的任何特殊形状放射性物质、B (U) 型或 C 型货包给予额外批准，即使该设计已在另一个国家获得批准。

205.1. 对于单方面批准，“运输条例”考虑到了在任何国家可能遇到的运输工况。因此，只需得到设计原产国主管当局的批准。

### 承运人

206.1. “人”术语包括法人团体和个人（另见 GSR Part 3[1]第 3.7—3.9 段）。

### 主管当局

207.1. 主管当局是法律或行政当局界定的在涉及放射性物质运输的事项上代表一国行事的组织，或在此类事项上的国际当局。一国的法律框架决定如何指定一个国家主管当局，并赋予其确保实施“运输条例”的责任。在

某些情况下，根据运输方式（空运、公路、铁路、海运或内陆水道）以及货包和放射性物质类型（例外、工业、A 型、B (U) 型、B (M) 型和 C 型货包，特殊形状放射性物质，低弥散放射性物质，易裂变材料或六氟化铀），将“运输条例”不同方面的权力分配给不同的机构。在某些情况下，一个国家主管当局可将货包设计和某些类型装运批准委托给另一个具有必要技术能力的组织。国家主管当局也是该国符合任何关于放射性物质运输的公约或协定所述的主管当局。

207.2. 主管当局应当使托运人、承运人、收货人和公众了解其身份以及如何与之联系。为此，可公布组织身份（如部门、行政、办事处）的详细情况，并说明相关组织的职责和活动，以及邮寄地址、电话号码、传真号码和电子邮件地址。

207.3. 识别主管当局身份的主要来源是负责授权和批准放射性物质运输的国家主管当局清单，该清单由原子能机构保存<sup>1</sup>。每个国家应当确保所列信息是最新且准确的。原子能机构要求每年核实该信息，成员国的迅速反应将确保该清单持续有效。

207.4. 为了充分和适当地执行“运输条例”，政府必须设立一个主管当局来管理运输安全。这样一个主管当局应当拥有充分的权力和资源，以便进行有效的监管和执行，并应当独立于负责运输放射性物质的任何政府部门和机构。主管当局还应当独立于注册人、许可证持有人以及运输系统的设计人员和制造商。应当明确规定主管当局职能与任何其他各方职能之间的有效责任分工，以便监管机构作为安全主管部门保留其判断和决策的独立性。

207.5. 主管当局的一般职能包括：对货包设计批准申请进行评定，在符合某些规定条件的情况下发放批准证书并酌情批准装运，进行定期视察以核实是否符合这些条件，以及任何必要的执法行动以确保遵守“运输条例”。有效的合规保证计划至少应当包括与货包设计的评审和评定、批准证书的批准发放以及视察和执行相关的措施。

---

<sup>1</sup> 主管当局清单见

<https://gnssn.iaea.org/main/globaltransportnetworks/pages/competentauthorities.aspx>

207.6. 应当明确界定主管当局视察员的权力，并应当保持执法的一致性。主管当局可能需要就如何满足各种运输活动的某些监管要求提供指导。

207.7. 主管当局应当鼓励各方推广安全文化，其中包括：工作人员、管理层和监管者对安全作出个人和集体承诺，所有人员（包括高级管理层），在防护和安全方面的问责制，以及鼓励提问和学习的态度以及防止对安全自满的措施。

## **合规保证**

208.1. 见第 307.1—307.9 段。

## **密封系统**

209.1. 密封系统是将易裂变材料保持在单独货包的临界安全评定中假想配置所必需货包的一部分（见“运输条例”第 681 段）。密封系统可以是 (i) 具有限定尺寸的内部容器；(ii) 保持燃料组件外部尺寸和任何间隙固定毒物的内部结构；或 (iii) 完整的货包，例如没有内部容器的货包。密封系统由指定的包装部件和货包内容物组成。虽然密封系统可能具有与包容系统相同的边界，但情况并非总是如此，因为密封系统保持临界控制，而包容系统防止放射性物质泄漏。每个主管当局都必须同意临界安全评定中定义的密封系统适合货包设计，对于损坏和未损坏的配置都是如此（见“运输条例”第 681 段）。

## **包容系统**

213.1. 包容系统可以是整个包装，但更常见的是它构成了包装的一部分。例如，在 A 型货包中，包容系统可以被认为是包容放射性内容物的容器。该容器密封的铅罐屏蔽和纤维板盒组成了包装。包容系统不一定包括屏蔽。在特殊形状放射性物质和低弥散放射性物质的情况下，放射性物质可能是包容系统的一部分。

213.2. 货包设计的包容系统应当明确定义，包括系统的包容边界，特别是密封件和固定设备。包容边界系统应当考虑诸如排气口和排水口之类的特点，这些特点可以显示出包容系统的泄漏路径。对于具有双密封或同心密封的货包系统，也应当定义包容系统。用作产品容器或便于处理放射性物质的次级容器，如袋、箱和罐，应当不被视为遵守“运输条例”第 659 段

要求的包容系统的一部分。包容系统应当由工程特点组成，其设计在包装图纸中定义。

213.3. B (U) 型、B (M) 型或 C 型货包的包容系统密封性要求取决于放射性内容物的放射性毒性，例如，对于在事故工况下的 B (U) 型或 C 型货包，一周内放射性内容物的损失应当不超过  $A_2$  值（或氪-85 的  $10A_2$ ）。与  $A_2$  值的该联系意味着，对于钚和镅等剧毒放射性核素，允许的体积泄漏率将远低于低浓缩铀。但是，如果易裂变材料能够在事故工况下从包容系统逸出，则必须证实逸出的数量与适用“运输条例”第 685 (c) 段临界安全评定中假想数量一致（另见本“安全导则”第 685.2 段）。

## 污染

214.1. 污染包括两种放射性物质在表面或嵌入表面，即固定污染和非固定污染。固定污染和非固定污染之间没有明确的区分：为实际目的，对在常规运输工况下留在原地，因此不会引起摄入、吸入或扩散危害的污染（即固定污染）和可能导致这些危害的非固定污染作了区分。固定污染的唯一危害是外部照射，而非固定污染的危害还包括吸入和摄入的潜在内部照射，以及皮肤污染而产生的外部照射。然而，在事故工况下，以及在某些条件下，例如风化，固定污染可能变成非固定污染。

214.2.  $\beta$  和  $\gamma$  发射体以及低毒性  $\alpha$  发射体的污染水平不超过 0.4 贝可/平方厘米，或所有其他  $\alpha$  发射体的污染水平不超过 0.04 贝可/平方厘米，只能通过第 214.1 段所述的任何途径引起非显著照射。

214.3. 在适用“运输条例”时， $\beta$  和  $\gamma$  发射体和低毒性  $\alpha$  发射体的污染水平不超过 0.4 贝可/平方厘米或所有其他  $\alpha$  发射体的污染水平不超过 0.04 贝可/平方厘米的任何表面都被视为未受污染的表面。例如，表面污染水平低于上述水平的非放射性固态物体超出“运输条例”范围，对其运输不适用任何要求。

214.4. 为了检查污染水平，适用第 413.9 段提到的测量技术。

215.1. 见第 214.1—214.3 段。

216.1. 见第 214.1—214.3 段。

## 临界安全指数

218.1. 临界安全指数（CSI）是“运输条例”（1996 年版）首次定义术语。它是用于临界安全目的的主要原则，限制含有易裂变材料货包在运输和运输在途存储期间的积聚。

临界安全指数是用数字 50 除以 N 的值（见“运输条例”第 686 段）或使用第 674 段和第 675 段规定得出的值。临界安全指数总数必须按单独货包（见第 526 段）、托运货物（见第 525 段）、运输工具、货运集装箱和外包装（见第 566 (c) 段和第 567 段）以及在途存储（见第 568 段和第 569 段）进行控制。为了便于进行该监管，要求在标签上显示临界安全指数（见第 541 段和第 542 段），该标签是专门设计的，以表明货包、外包装或货运集装箱中含有“运输条例”第 417 段。规定非例外易裂变材料的情况下是否存在易裂变材料。

218.2. 在特殊情况下，在没有临界安全指数监管的情况下，对货包和托运物适用易裂变核素积聚质量限值（见“运输条例”第 417 (c) (d) 和 (e) 段），其安全裕度足以防止潜在的临界。

## 剂量率

220A.1. 与人照射相关的辐射防护限值之一是有效剂量（其他剂量相当于眼睛晶状体和皮肤的剂量，见 GRS Part 3[1]附表 III）。由于防护量不是直接可测量的量，所以产生了可测量的操作量。相关操作量为强穿透辐射的环境剂量当量和弱穿透辐射的定向剂量当量。剂量率应当酌情作为环境剂量当量或定向剂量当量的值。环境剂量当量用于控制有效剂量，定向剂量当量用于控制皮肤、手足和眼睛晶状体的剂量[2]。

220A.2. 在某些情况下，应当考虑到由于子核素在运输过程中积聚而导致剂量率增加的可能性。在该情况下应当进行校正，用以代表运输过程中假想的最高剂量率。

220A.3. 在混合  $\gamma$  和中子场中，可能需要进行单独的测量。应当确保所使用的监控仪器仪表适合放射性核素发射的能谱和剂量率。所使用的监控仪器仪表应当经过校准，仪器仪表的校准应当有效。

220A.4. 中子监控仪器仪表具有显著的能量依赖性，被测中子的能量分布会显著影响剂量率测定的准确性。理想情况下，用于校准的中子的能量分布和待测中子的能量分布应当是相似的。如果这些显著不同，并且如果仪器仪表的能量依赖关系和待测中子的能量分布已知，则应当使用相应的修正系数。

220A.5. “运输条例”要求在货包和外包装表面不超过特定剂量率。在大多数情况下，由于探测器体积的实物尺寸，用手持监控仪器仪表对着货包表面进行的测量表明了在一定距离外的读数。在可行的情况下，用于测量剂量率的仪器仪表应当相对于货包或外包装的尺寸较小。应当不使用相对于货包或外包装的实物尺寸较大的仪器仪表，因为它们可能低估表面剂量率。如果从源到仪器仪表的距离相对于探测器体积的尺寸很大（例如 5 倍），其影响可以忽略不计，否则，应当使用本“安全导则”表 1 的值来校正测量值。对于射线照相设备，源到表面的距离通常保持在最小，该影响通常是不可忽略的，应当考虑探测器体积的尺寸。

220A.6. 当监控翼片状瓶或其他货包时，应当注意可能遇到窄辐射束的地方。面积远大于待测光束横截面积的探测器将由于在更大的探测器面积上的平均，产生了剂量率的比例降低读数。应当选择适当的仪器仪表进行测量。

表 1. 各种货包和探测器尺寸修正系数

| 探测器中心与货包表面<br>之间的距离（厘米） | 货包半线性尺寸<br>（厘米） | 修正系数 <sup>a</sup> |
|-------------------------|-----------------|-------------------|
| 1                       | >10             | 1.0               |
| 2                       | 10—20           | 1.4               |
|                         | >20             | 1.0               |
| 5                       | 10—20           | 2.3               |
|                         | 20—50           | 1.6               |
|                         | >50             | 1.0               |
| 10                      | 10—20           | 4.0               |
|                         | 20—50           | 2.3               |
|                         | 50—100          | 1.4               |
|                         | >100            | 1.0               |

<sup>a</sup> 仪器仪表读数应当乘以修正系数，以估计货包表面的剂量率。

220A.7. 所确定的剂量率应当为绝对值（即仅来自放射性物质本身的剂量率）。因此，应当从测量值中减去测量区域内的本底剂量率。

## 独家使用

221.1. “独家使用”货物的特点是：由一个托运人装运货物，并通过与承运人的安排，单独使用运输工具或大型货物集装箱，所有托运货物的初始、中间和最后的装卸和装运必须严格按照托运人或收货人的指示进行。

221.2. 由于独家使用货物的运输途中不会发生装卸，适用于普通装运的一些要求可以放宽。鉴于对独家使用托运实行额外控制，对这些托运作出了特定规定，允许：

- (a) 低比活度（LSA）物质的低完整性工业货包类型的使用；
- (b) 装运表面剂量率超过 2 毫希沃特/小时（但不超过 10 毫希沃特/小时）或运输指数（TI）超过 10 的货包；
- (c) 在一些情况下，装有易裂变材料货包的临界安全指数总量增加 2 倍。

许多托运人认为，最好与承运人作出必要安排提供独家使用运输，以便托运人能够利用上述一项或多项规定。

221.3. 对于已包装的低比活度物质，“运输条例”考虑了独家使用运输产生的受控装载和卸载条件。在独家使用情况下所要求的额外控制应当符合托运人或收货人编写的指示，如果“运输条例”有此要求（两者都相关于货物及其潜在危害的全部信息），允许在一定程度上降低包装强度。由于在独家使用情况下不发生不受控制的货包装卸，通常低比活度包装装卸要求中体现的保守性已经放宽，但必须保持同等的安全水平。

221.4. 货包要求有适当的剂量率限值，以保护装卸它们的工作人员。强制规定独家使用条件和控制运输过程中的装卸有助于确保采取适当的辐射防护措施。通过对车辆周围的限制和对剂量率设置限值，可以在不显著增加危害的情况下增加货包周围的剂量率。

221.5. 由于独家使用用途控制有效地防止未经授权在托运货物中添加放射性物质，并对托运货物实行高度控制，因此在“运输条例”授权比普通托运更多的易裂变材料货包。

221.6. 对于独家使用运输工具或大型货运集装箱，单独使用要求和单独控制要求是决定因素。虽然车辆只能用于运输放射性物质，但这并不自动使托运货物符合独家使用条件。为了符合独家使用的定义，整个托运必须来自单独托运人或由单独托运人控制。这不包括承运人用同一车辆向几个托运人收取托运货物的实践。即使承运人将多个托运货物合并到一个车辆上，它也不是独家使用的，因为涉及到一个以上的托运人。然而，这并不排除将来自多个来源的货物合并装运的合格承运人或收货人承担托运人对这些货物的责任并被指定为托运人。

221.7. “运输条例”附件 III 列出了要求独家使用的托运货物清单。

### **易裂变核素和易裂变材料**

222.1. 裂变链是由中子传播的。由于链式反应取决于中子的行为，易裂变材料的包装和运输是按照要求设计的，目的是保持次临界，从而在运输中提供临界安全。

222.2. 大多数高原子质量的放射性核素可以受中子制造裂变，但许多核素只能在特殊设备和受控条件下艰难地裂变。定义中所列易裂变核素的显著特征是，它们只需积聚足够的质量，就能支持自持的热中子（中子能量小于约 0.3 电子伏特）链式反应。不需要其他行动、机制或特殊条件。例如，钚-238 不再列入定义，因为尽管它可以在严格的实验室条件下支持快中子链式反应，但以它在运输中实际的形状不具有该性质。钚-238 在任何情况下都不能支持由热中子进行的链式反应。因此，它是“可裂变的”而不是“易裂变的”。

222.3. 如第 222.2 段所述，为“运输条例”目的选择界定为裂变的核素所依据的依据是积聚足够的质量支持潜在的临界。其他具有潜在的临界核素将在参考文献[3]讨论。并规定了镎-237、钚-238、钚-240、钚-242、镅-241、镅-242m、镅-243、镅-243、镅-244、镅-245、镅-247、镅-249 和镅-251 等隔离单元的次临界质量限值。这些核素的预测次临界质量限值从几克（镅-251）到几十公斤不等。然而，由于缺乏临界实验数据、对这些核素在不同慢化剂和反射条件下的行为了解有限以及许多这些核素截面数据的不确定性，需要对可能存在足够数量的这些核素（或在运输前或运输过程中由衰变产生）的操作给予足够的关注（以及相关的次临界裕度）。在

运输显著量这些核素时，应当征求主管当局的意见，说明是否需要和如何根据“运输条例”第 673—686 段要求进行临界安全评定。

222.4. 易裂变材料是指含有任何易裂变核素的任何物质，但考虑到物理特性和目前的运输实践，临界危害被判断为不可信的情况除外。对于任何装有界定为易裂变材料物质的货包，必须适用“运输条例”第 417 段、第 418 段和第 673 段。

222.5. 含有小于 0.25 克易裂变核素的货包需要大量（几千个）积聚，临界才有理论上的可能性。此外，关于存在足够多的该型货包以影响受临界安全指数控制的含有易裂变货包托运货物的临界安全可能性被认为是不可信的。

222.6. 排除最大易裂变核素质量为 0.25 克货包的主要正当性是，装运几千个基本上“纯”（没有额外的中子吸收核素）易裂变材料的该型货包被认为是极不可能的。例如，将数千个铀-235 浓缩为 3.5% 的二氧化铀芯块（每个芯块含有约 0.25 克铀-235）装在单独货包中运输，每个货包中有一个芯块的设想是不可信的。今后任何改变实践的迹象都需要观察和讨论。如果符合每个货包的质量限值，即使数量很大，含有微量易裂变核素的货包（如废物）也不是临界安全问题。

222.7. 未经辐照或仅在热反应堆中辐照的天然铀和贫化铀不被界定为易裂变材料，但只有在货包中没有含有易裂变核素其他物质的情况下。天然铀和贫化铀中的易裂变核素可以装载有其他含有易裂变核素物质货包的中子倍增。因此，当货包设计或货包内容物已知含有天然铀或贫化铀时，必须在安全评定和批准要求中考虑到该点。现代轻水堆燃料常常是该情况，它可能含有带有天然铀或贫化铀的轴向端区。

222.8. 与其他易裂变材料分开，仅含有天然铀或贫化铀作为内容物货包的临界可能性被认为是不可信的。出于该原因，只有当货包中有其他易裂变材料时，天然铀或贫化铀才被定义为易裂变。

222.9. 在许多轻微放射性物质的运输中可以发现未经包装的天然铀和贫化铀。然而，将高纯度天然铀或贫化铀与装有易裂变材料货包在同一运输工具中运输—以及由于铀进入装有易裂变材料货包，与从这些货包中逸出的易裂变材料混合，分散在这些货包之间或放置在货包内的易裂变材料附近而引起的临界安全问题—被认为是不可信的。

222.10. 天然铀或贫化铀的辐照可增加该物质维持中子链式反应的可能性。在热反应堆中对辐照限制是为了避免该潜在的问题。操作人员希望使用“运输条例”第 222 段将辐照天然铀或贫化铀排除在易裂变材料的定义之外，应当确保辐照后的任何加工都不会增加其反应性。在辐照过程中，燃料棒表面的钚产量大于中心。表层的钚浓度将大大高于批量燃料的平均浓度，并可能具有类似于低浓缩铀的临界特征。如果该表面层已与燃料本体分离，则含有该表面层的物质（例如包壳残留物）可能不适合根据“运输条例”第 222 段排除。

222.11. “运输条例”第 222 (a) 和 (b) 段的例外规定，也适用于货包内含有未经辐照和辐照（仅在热反应堆内）的天然和/或贫化铀，例如作为屏蔽物质。

### 货运集装箱

223.1. 大约自 1965 年以来，运输装运货物的方法和系统发生了变化，货运集装箱在很大程度上取代了以前单独装载货包的分装货物或普通货物。已包装和未包装的货物由托运人装入货运集装箱，运输给收货人，无需中间装卸。以该方式降低了货包损坏的风险，无包装货物被合并成方便装卸的单位，实现了运输经济。集装箱可以执行“运输条例”第 629 段所允许的包装功能，货运集装箱的类型可包括以下几种：

- 标准或干货物：用底座、侧壁和顶盖完全密封；
- 敞开：有可拆卸的顶盖（帆布或金属）或没有顶盖；
- 平台：只有底座，没有侧壁或顶盖；
- 平架：有 4 个角柱或两个可折叠端架的平台。

平台式、平架式货运集装箱又称敞开式货运集装箱。

223.2. 对于平架式货运集装箱（见图 1），可将包围集装箱结构的矩形棱柱包围的体积用作内部体积。对于平台式货运集装箱（见图 1），可以使用环绕平台的矩形棱柱包围的体积和负载的高度作为内部体积。

223.3. 货运集装箱通常按照国际标准化组织标准[4]设计和试验。货运集装箱应当根据参考文献[5]进行批准和维护，以便利国际运输操作。然而，应

当注意的是，参考文献[5]规定的试验不等同于参考文献[4]规定的，如使用其他货运集装箱，应当咨询主管当局。

223.4. 此外，可由多式联运组织特定规定的特别规则。例如，《国际海运危险货物规则》[6]相关于海运集装箱内危险货物包括放射性物质运输的规定。

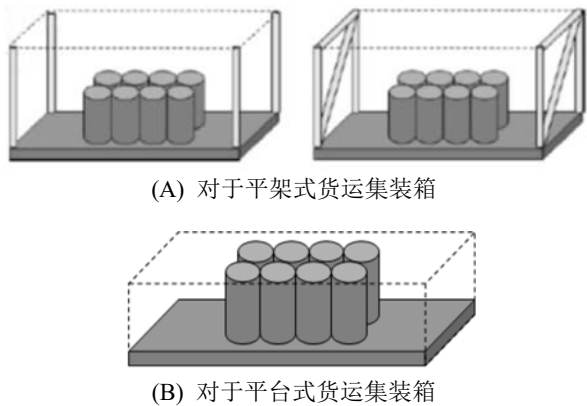


图 1. 敞开式货运集装箱的内部体积。

**低弥散放射性物质**

225.1. 低弥散放射性物质（LDRM）的概念只适用于对货包放射性内容物的鉴定，以豁免对空运中 C 型货包要求。

225.2. 低弥散放射性物质具有不会引起显著潜在排放或辐射照射的特性。即使受到高速撞击和热环境的影响，也只是一小部分物质会在空气中传播。事故附近人员吸入空气传播物质的潜在辐射照射将非常有限。

225.3. 低弥散放射性物质标准的推导方式与“运输条例”的其他安全标准一致，并以证实可接受放射性后果的既定方法为基准。“运输条例”要求证实低弥散放射性物质的性能，而不考虑运输低弥散放射性物质的 B (U) 型或 B (M) 型货包的任何信用。

225.4. 低弥散放射性物质可以是放射性物质本身，以不可分散固体的形状存在，也可以是含有放射性物质的高完整性密封胶囊，其中货包的物质基本上作为不可分散固体。粉末和类似粉末的物质不能被称为低弥散放射性物质。

## 低比活度物质

226.1. 将低比活度（LSA）物质纳入“运输条例”原因是存在某些固态物质，这些物质的比活度非常低，在运输过程中出现的情况下，极不可能将足够数量的此类物质带入人体造成显著辐射危害。铀和钍矿石及其物理或化学浓缩物属于该类物质。该概念在一个模式的基准上被扩展到包括其他固态物质，该模式假设一个人不太可能在尘埃大气中停留足够长的时间，从而吸入超过 10 毫克的物质。如果该物质的比活度是这样的，即摄入量所代表的活度不超过 A 型货包中值事故所涉人员的假想活度，即  $10^{-6}A_2$ ，则该物质在运输过程中不会比 A 型货包造成更大的危害。这导致低比活度物质限值为  $10^{-4}A_2/\text{克}$ 。

226.2. 考虑了在没有任何包装的情况下运输固态物体的可能性。该问题出现在混凝土块（在整个质量中都有活度）、辐照物体和固定污染物体上。在比活度相对较低并留在物体内部或固定在物体表面的情况下，可以将物体作为货包装卸。为了一致性和安全性，未包装物体表面的辐射限值应当不超过包装材料的限值。因此，据认为，如果超过了货包表面剂量率的限值（非独家使用 2 毫希沃特/小时，独家使用 10 毫希沃特/小时），则该物体应当包装在工业货包中，并在日常运输中确保屏蔽。对于确定未包装表面污染物体的表面污染水平也提出了类似的论据。

226.3. 低比活度定义的序言部分不包括 3 米处 10 毫希沃特/小时的非屏蔽剂量率限值（见“运输条例”第 517 段），因为这是一种放置在单独货包内的物质数量的特性，而不是物质本身的特性（尽管对于无法分割的固态物体，这是固态物体的特性）。

## 低毒性 $\alpha$ 发射体

227.1. 低毒性  $\alpha$  发射体的识别依据是放射性核素（或处于“装运时”状态的放射性核素）的比活度。为了一个核素比活度很低，由于其体积较大，不能合理地预计其摄入量会导致接近剂量限值的剂量。放射性核素铀-235、铀-238 和钍-232 的比活度比钷-238 或钷-239 低 4—8 个数量级（ $4 \times 10^3 - 8 \times 10^4$  贝可/克，而不是  $2 \times 10^9 - 6 \times 10^{11}$  贝可/克）。尽管钍-228 和钍-230 具有与钷-238 和钷-239 相当的比活度，但它们仅在矿石、物理和化学精矿中含有时才被允许作为“低毒性  $\alpha$  发射体”，这就内在地确保了低活度浓度。

## 管理系统

228.1. “管理系统”术语在原子能机构《安全术语》[7]有定义，反映并包括“质量控制”（控制产品质量）的概念及其通过“质量保证”（确保产品质量的系统）和“质量管理体系”（管理质量的系统）的演变。管理系统的目的是提供足够的信心，确保在实践中达到“运输条例”所规定的安全标准。

228.2. 除了相关质量管理体系的国际公认标准（例如 ISO9001:2015[8]）外，原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 2 号《安全的领导和管理》[9]确定了管理系统要求。

228.3. 原子能机构《安全标准丛书》第 TS-G-1.4 号《放射性物质安全运输管理系统》[10]提出了关于如何遵守“运输条例”相关管理系统要求的建议。

## 最大正常操作压力

229.1. 在第 229.2—229.4 段指出的条件下，最大正常操作压力（MNOP）是包容系统的最大内部压力与平均海平面气压之间的差值。

229.2. 在确定最大正常操作压力时，适用于货包的环境条件是“运输条例”第 656 段和第 657 段指出的正常环境条件，如果是空运，则是“运输条例”第 620 段指出的正常环境条件。在确定最大正常操作压力时要应用的其他条件是，货包假想在一年期间内无人看管，并受其最大内部热负载的影响。

229.3. 一年期限超过装有放射性物质货包的预计运输时间，除了提供相对于常规运输工况的相当大的安全范围外，它还解决了运输途中货包丢失的可能性。一年期限是任意的，但已被商定为货包在运输途中跌落不明的合理上限。由于假想货包在一年内无人看管，因此需要考虑到对包装或其内容物的任何物理或化学变化，这些变化在本质上是短暂的，并可能导致包容系统中的压力增加。应当考虑的瞬态工况包括散热能力的变化，由于辐解、腐蚀、化学反应或气体从燃料销或其他密封件排放到包容系统中而产生的气体积聚。一些瞬态工况可能会降低最大正常操作压力，例如由于内容物的放射性衰变导致内热降低而引起的压力随时间的降低。如有充分正当性，可考虑这些条件。

229.4. 在计算最大正常操作压力时，应当考虑装运前可能的压力积聚，例如在存储后装运的情况下。

## 外包装

230.1. 将托运货物从一个托运人运输到一个收货人，可通过将完全遵守“运输条例”要求包装多个货包或单独货包，例如一个箱子或袋子，以便利托运货物从一个托运人运输到一个收货人。外包装的特定设计、试验或批准要求是不必要的，因为它是执行保护功能的包装。外包装只是为了运输过程中的方便而使用的一个装卸单元。然而，外包装和货包之间的相互作用应当考虑在内，特别是在常规和正常运输工况下货包的热行为。

230.2. 为便于装卸而将货包硬封或整固，使所有货包的货包标签都能看得见，除非托运人利用直接测量剂量率来确定外包装运输指数的优势，否则不必认为是外包装。

## 货包

231.1. 术语“货包”和“包装”用于区分用于容纳放射性物质部件的组装（包装）与部件加内容物的组装（货包）。

231.2. 由于货包可以在有或无特定结构设备的情况下运输，在确定包装的适宜性和符合性时，可能有必要对这两种情况进行评价。

231.3. 如果在运输过程中为了装卸目的而附加了某些设备，也可能有必要考虑其在正常和事故运输工况下的影响。对于 B (U) 型、B (M) 型、C 型和设计用于运载易裂变材料货包，设计人员必须与主管当局达成协议。

231.4. 装有放射性内容物的罐式、密封式货运集装箱或中间散装集装箱，可作为“运输条例”规定的货包类型之一，但可能符合设计、试验和对该类型货包的任何适用的批准要求。或者，如果符合 IP-1 型要求以及“运输条例”第 627—630 段提到的其他要求，则装有放射性内容物的储罐、密封式货运集装箱或金属中间散装集装箱可用作 IP-2 型或 IP-3 型工业货包。

## 包装

232.1. 本定义中的其他安全功能（见第 231.1 段和第 231.2 段）包括屏蔽、临界控制、防止因热造成的损坏以及使货包遵守“运输条例”规定的适用于货包类型的常规、正常和事故运输工况的性能标准所必需的功能。

232.2. 为了设计和合规保证的目的，包装可以包括装卸或固定货包所必需的任何或所有结构设备，这些设备可以永久连接或组装作为包装的一个部件。

232.3. 为了确定哪些结构部件应当被视为包装的一部分，有必要从运输安全的角度检验此类设备的用途和目的。如果出于安全目的，包装只能与某些结构一起运输，那么将这些结构视为包装的一部分是正常的。这并不意味着在独家使用运输的情况下，拖车或运输车辆应当被视为包装的一部分。运输工具应当不被视为包装的一部分，即使是在独家使用运输的情况下。

## 放射性物质

236.1. GSR Part 3[1]定义的辐射防护标准用于确定用于运输目的的放射性核素特定豁免值（如“运输条例”表 2 所列）（见本“安全导则”第 402.3 段）。

236.2. 活度浓度值是一个货包或任何单独内包容系统或货包容器内放射性物质的活度浓度值。活度浓度是为放射性物质单独计算的，或者如果适用，为均匀整体分布在非放射性物质中计算的。浓度的计算应当不考虑任何货包材料的质量，也应当不考虑未与放射性物质混合或在常规运输工况下易与放射性物质分离的非放射性内容物。如果活度浓度在托运货物内的货包之间或在货包内的内部包容系统或容器之间变化，则最高活度浓度应当视为托运货物的活度浓度。

236.3. “运输条例”基础假设是，易裂变材料总是放射性物质。然而，易裂变材料的特征是基于与放射性物质的特性（活度、辐射类型和能量）完全不同的性质（裂变概率和中子多重性，但不是活度）。每当“运输条例”放射性物质的分类规范发生变化时，也要考虑到潜在临界危害。铀-235 的目前限值被认为是足够安全的。含有铀-235 以外易裂变核素的物

质，如果其活度浓度和总活度低于“运输条例”表 2 规定的值，则不可能潜在导致临界。

236.4. 放射性物质还指任何被放射性物质污染的物体，其污染程度超过第 214 段指出的水平，和托运货物的活度总量超过“运输条例”第 402—407 段指出的数值。

## 装运

237.1. 在放射性物质运输背景下，“目的地”术语是指货包被打开或可能被打开的旅程终点，但“运输条例”第 582 段所述的海关作业期间除外。

## 特殊安排

238.1. 只有在按照“运输条例”所有适用要求进行装运不切实际的情况下，才应当采用特殊安排。该类型的装运是为那些无法满足“运输条例”正常要求条件而设计的。例如，如果没有合理的方法将放射性物质装运到经批准的货包中，就可能需要作出特殊安排，以处置含有放射性物质的旧设备。与重新包装和装卸放射性物质相关的危害可能超过开发和使用经批准货包的收益，前提是可以提供合适的货包。另一个示例可能是根据以前的条例批准的货包设计，但不能满足当前的条例。在该情况下，将需要时间来修订货包设计（例如开发撞击减震器的新设计）和更新包装，因此，为了避免延误，在原有的货包设计下，可能需要对货包的运输进行特殊安排。特殊安排规定应当通过提供同等水平的安全来弥补未能满足“运输条例”所有要求。根据“运输条例”基本理念，在制定补偿性特殊安排措施时，应当尽量减少对行政措施的依赖。无论如何，特殊安排下的装运数量应当尽量减少。

## 特殊形状放射性物质

239.1. “运输条例”所依据的前提是，与非裂变放射性物质运输相关的潜在危害取决于 4 个重要参数：

- (a) 每单位摄入（通过摄入或吸入）放射性核素的剂量；
- (b) 货包内所含的活度总量；
- (c) 放射性核素的实物形状；
- (d) 潜在的外部剂量率。

239.2. “运输条例”承认，尽管直接放射性危害仍然存在，但不可分散形状或密封在坚固金属胶囊中放射性物质的污染危害最小。以该方式保护的物质在事故工况下不受分散风险的影响是指定为特殊形状放射性物质。可分散的放射性物质可以吸附、吸收或结合在惰性固体上，使其成为不可分散的固体（例如金属箔）。见第 603.1—603.4 段、第 604.1 段和第 604.2 段。

239.3. 除非货包的放射性内容物是特殊形状的，否则例外货包或 A 型货包可携带放射性物质的数量将限制在  $A_2$  或其倍数。例如，A 型货包仅限于  $A_2$ ，例外货包内容物仅限于  $A_2$  至低至  $10^{-4}A_2$  范围的值，如果通过邮递运输，则限于  $10^{-5}A_2$  的数值，这取决于物质是固态、液态还是气态，以及是否与仪器仪表或物体结合在一起。但是，如果物质是特殊形状的，货包限值从  $A_2$  变为  $A_1$  或其适当的倍数。根据所涉及的放射性核素， $A_1$  值与  $A_2$  值之间的差异从 1 至 10 000 不等（见“运输条例”表 2）。如果货包是特殊形状的，则在货包中装运增加数量的能力只适用于 A 型和例外货包。

**比活度**

240.1. 实践中比活度的定义涵盖了两种不同的情形。第一种是放射性核素比活度的定义，类似于国际辐射单位和测量委员会对元素比活度的定义。第二种，“运输条例”对物质比活度的定义，更准确地说是活度浓度（单位质量活度）。因此，对这两种情况都给出了比活度的定义，并取决于其在“运输条例”要求中的适用情况。“运输条例”某些段落也使用了“活度浓度”术语（例如，见“运输条例”第 402 段和相关的表 2）。

240.2. “运输条例”表 2 给出的每一种放射性核素的半衰期和比活度见附录 II 表 II.1。这些比活度值是用下列公式计算出来的：

$$\begin{aligned} \text{比活度 (贝可 / 克)} &= \frac{(\text{阿伏伽德罗数}) \times \lambda}{(\text{原子质量})} \\ &= \frac{4.17 \times 10^{23}}{A \times T_{1/2}} \end{aligned} \tag{2.1}$$

式中：

- A 是放射性核素的原子质量；
- $T_{1/2}$  是放射性核素的半衰期；
- $\lambda$  是放射性核素在每秒的衰变常数  $= \ln 2 / T_{1/2}$ 。

240.3. 附录 II 表 II.1 未列出的任何放射性核素的比活度均可使用公式 (2.1)。

240.4. 附录 II 表 II.3 列出了铀在不同浓缩度下的比活度。

240.5. 在确定分布放射性核素的物质的比活度时，需要将该物质或其子集的全部质量（即放射性核素的质量和任何其他物质的质量）包括在质量分量中。应当注意在低比活度物质的定义（见“运输条例”第 226 段）和本“安全导则”表 II.1 对比活度的不同解释。

## **储罐**

242.1. 列入 450 升的储罐容量下限是为了与目前的联合国建议[11]保持一致。

242.2. “运输条例”第 242 段包括储罐中的固态内容物，这类内容物一般呈粉末或颗粒状。

## **经过或进入**

243.1. 多边批准的定义仅限于托运货物经过或进入的国家，特别不包括飞机可以运载托运货物的国家，前提是飞机没有计划在该国停留。

## **运输指数**

244.1. 运输指数（TI）在“运输条例”有许多功能，包括为承运人将放射性物质与人员、未冲洗胶卷和其他放射性物质托运物隔离开来提供基础，并限制公众和运输人员在运输和在途存储期间的辐射照射水平。

244.2. 自“运输条例”（1996 年版）以来，运输指数不再为临界安全目的对控制含有易裂变材料货包的积聚作出任何贡献。临界安全积聚控制现在由单独的临界安全指数提供（见第 218.1 段和第 218.2 段）。虽然以前对辐射防护和临界安全采用单独控制值的实践提供了简单的操作应用，但目前使用单独的运输指数和临界安全指数消除了不含易裂变材料货包运输和过境存储中隔离的重大限制。保留临界安全指数的名称原因是，绝大多数放射性货物不包括易裂变材料，因此，“仅放射性”临界安全指数的新名称可能会造成混淆，因为需要引入和解释两个新名称。应注意不要混淆临界安全指数值的使用，并将临界安全指数值视为仅控制临界安全货包的堆积。

244.3. 见第 523.4—523.6 段、第 524.1 段和第 524A.1 段。

### 未辐照钍

245.1. 低比活度物质定义的“未辐照钍”术语旨在排除在核反应堆或其他中子源辐照的任何钍，以便将一些钍-232 转换为易裂变材料铀-233。该定义本可以禁止任何铀-233 的存在，但天然存在的钍可能含有微量的铀-233。每克钍-232 含有  $10^{-7}$  克铀-233 的限值旨在禁止任何辐照钍，同时认识到天然钍中存在微量铀-233。

### 未辐照铀

246.1. “未辐照铀”术语是指排除在核反应堆或其他中子源辐照，以便将一些铀-238 转换为钚-239，将一些铀-235 转换为裂变产物的任何铀。该定义本可以禁止任何钚或裂变产物的存在，但天然存在的铀可能含有微量的钚和裂变产物。每克铀-235 的钚含量为  $2 \times 10^3$  贝可，每克铀-235 的裂变产物为 9 兆贝可禁止任何辐照铀，同时认识到天然铀中存在微量钚和裂变产物。

246.2. 铀-236 的存在是中子通量照射的一个指标，每克铀-235  $\times 10^{-3}$  克铀-236 是根据参考文献[12]选择的用于浓缩商业级铀。该值反映了辐照铀微量污染的可能性，但确保该物质仍可被视为未经辐照的物质。本规范代表铀放射性核素的最大值，六氟化铀的  $A_2$  值可以证实为无限值。二氧化铀在  $A_2$  的差异被认为是微不足道的[13]。

## 第二节 参考文献

- [1] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号，国际原子能机构，维也纳（2014 年）。
- [2] 国际放射防护委员会《国际放射防护委员 2007 年建议书》，国际放射防护委员会第 103 号出版物，《国际放射防护委员会年刊》第 37 期第 2—4 页，（2007 年）。

- [3] 美国核学会《特殊钢系元素的核临界控制》，第 ANSI/ANS-8.15-1981 号报告，R1987，R1995，R2005，（R=重申），美国核学会，伊利诺伊州拉格兰奇帕克（2005 年）。
- [4] 国际标准化组织《货运集装箱系列 1—规范和试验—第 1 部分:通用普通货物集装箱》（ISO 1496—1 : 2013/AMD 1 : 2016），国际标准化组织，日内瓦（2013 年）。
- [5] 国际海事组织《1972 年安全集装箱国际公约》（1972 年版）（CSC）1993 年修订，国际海事组织，伦敦（1993 年）。
- [6] 国际海事组织《国际海事危险货物（IMDG）规则》（2020 年版），国际海事组织，伦敦（2020 年）。
- [7] 国际原子能机构《国际原子能机构核安全和辐射防护安全术语》（2018 年版），国际原子能机构，维也纳（2019 年）。
- [8] 国际标准化组织《质量管理体系：要求》（ISO 9001 : 2015），国际标准化组织，日内瓦（2015 年）。
- [9] 国际原子能机构《安全的领导和管理》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 2 号，国际原子能机构，维也纳（2016 年）。
- [10] 国际原子能机构《放射性物质安全运输管理系统》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 TS-G-1.4 号，国际原子能机构，维也纳（2008 年）。
- [11] 联合国《危险货物运输建议：示范条例》，ST/SG/AC.10/1/Rev.22，2 卷本，联合国，纽约和日内瓦（2021 年）。
- [12] 美国试验与材料学会《铀-235 浓缩至低于 5%的六氟化铀标准规范》（ASTM C996-15），美国试验与材料学会，宾夕法尼亚州费城（2015 年）。
- [13] 国际原子能机构《再加工铀安全运输暂行导则》，国际原子能机构《技术文件》第 750 号，国际原子能机构，维也纳（1994 年）。

## 第三节 总则

### 辐射防护

301.1. GSR Part 3[1]规定了计划照射情况的辐射防护要求，包括放射性物质的运输。计划照射情况下的辐射防护系统基于以下原则：

- (a) 除非产生积极的净收益，否则不得进行任何实践（要求 10：实践的正当性）。
- (b) 在考虑到经济和社会因素的情况下，所有照射应当保持在合理可达尽量低水平（要求 11：防护和安全的最优化）。
- (c) 工作人员和公众的照射应当分别保持在职业照射和公众照射的剂量限值以下（要求 12：剂量限值）。

301.2. 防护和安全最优化要求同时考虑到正常和潜在照射。正常照射是指在“运输条例”第 106 段所定义的常规和正常运输工况下预计会受到的照射。潜在照射是指预计不能确定地交付但可能由事故或概率性质的事件或序列事件（包括设备故障和操作错误）造成的照射。在正常照射情况下，最优化要求考虑到个人剂量的预计大小和照射人数。此外，在潜在照射情况下，还应当考虑到发生事故或事件或序列事件的可能性。执行最优化原则的安排应当见辐射防护计划：见原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-7 号《职业辐射防护》[2]、原子能机构《安全标准丛书》第 TS-G-1.3 号《放射性物质运输的辐射防护计划》[3]和参考文献[4]。

301.3. 在实际的辐射防护有必要根据剂量限值以外的数量建立操作标准。该类型的标准通常称为推导（或次生）限值，因为它们与由定义的模式确定的初始剂量限值。“运输条例”推导限值的示例包括最大活度限值  $A_1$  和  $A_2$ 、非固定污染的最大水平、货包表面及其附近的剂量率以及运输指数相关的隔离距离。“运输条例”要求进行评定和测量，以确保符合这些限值。

301.4. 设置剂量约束是最优化的一部分：见 GSR Part 3[1]第 3.25 段和参考文献[5]。GSR Part 3[1]所述的剂量约束应用于放射性物质的运输。公众照射的剂量约束应当考虑到与计划照射情况相关的其他源的照射。

302.1. 辐射防护计划对放射性物质运输的目标是：

- (a) 规定适当考虑运输中的辐射防护措施；
- (b) 确保充分实施辐射防护系统；
- (c) 加强放射性物质运输的安全文化；
- (d) 为达到这些目标提供切实可行的措施。

302.2. 辐射防护计划应当在适当的范围内包括以下内容：

- (a) 计划的范围（见第 302.3—302.5 段）；
- (b) 执行计划的角色和责任（见第 302.6 段）；
- (c) 剂量评定和最优化（见“运输条例”第 303 段）；
- (d) 表面污染评定（见“运输条例”第 508 段、第 513 段和第 514 段）；
- (e) 隔离和其他防护措施（见第 562.1—562.13 段）；
- (f) 应急安排（见“运输条例”第 304 段和第 305 段）；
- (g) 培训（见“运输条例”第 311—315 段）；
- (h) 管理系统（见“运输条例”第 306 段）。

TS-G-1.3[3]提供了关于上述 (a) — (h) 每一项要素的辐射防护计划制定和内容的更多详细指导。

302.3. 辐射防护计划的范围应当包括“运输条例”第 106 段所界定运输的所有方面。但是，它是公认的在某些情况下，在中转地的托运、接收或存储的应急计划中可能涵盖应急计划的某些方面。由于在应急计划中采用的措施的性质和范围将取决于照射的程度和可能性，因此应当采取分级方法。

302.4. 货包类型和货包类别都需要考虑。对于常规运输，外部照射是一个重要的考虑，货包类别为此提供了分类。然而，在事故工况下，重要的是货包类型（例外、工业、A 型、B (U) 型、B (M) 型或 C 型）。此外，工业和 A 型货包不需要承受事故。对于辐射防护计划中与运输事故工况相关的那些方面，需要考虑由于运输或装卸事故而从这些货包类型中泄漏的可能性。相比之下，B (U) 型、B (M) 型和 C 型货包可预计承受除最严重事故以外的所有事故。

302.5. 例外货包和 I 类—白色标签货包的外部剂量率足够低，可以不受限制地安全装卸，因此没有必要进行剂量评定。对辐射防护要求的考虑可限于将装卸时间保持在合理可达尽量低限值，并可通过避免货包在运输过程中与人和其他货物长时间直接接触来实现隔离。然而，需要对处理 II 类—黄色和 III 类—黄色标签货包人员进行剂量评定，并需要根据该点考虑隔离、剂量限值、约束和最优化。

302.6. 通过从事放射性物质运输的托运人、承运人和收货人的合作努力，建立辐射防护计划是最好的方法。托运人和收货人通常应当有一个适当的辐射防护计划作为固定设施操作的一部分。应当明确确定和说明参与执行辐射防护计划的不同各方和个人的角色和责任。应当避免责任重叠。根据辐射照射的程度和可能性，可将建立和实施辐射防护计划的总体责任分配给“合格专家”（即通过适当的委员会或协会的认证、专业执照或学术资格和经验，被适当承认在相关专业领域（如辐射防护）拥有专门知识的个人）[1]。

302.7. TS-G-1.3[3]和参考文献[6]就区域计划的制定和执行以及监控和评定辐射剂量。关于实施运输辐射防护计划的实际信息见参考文献[7—9]。

303.1. GSR Part 3[1]规定，公众的有效剂量限值为每年 1 毫希沃特，工作人员的有效剂量限值为每年 20 毫希沃特（连续 5 年平均，不超过每年 50 毫希沃特）。GRS Part 3[1]还规定了眼睛晶状体、四肢（手和脚）和皮肤以及 16—18 岁学徒的剂量限值，其中还包括对怀孕或哺乳工作人员照射的额外限值。剂量限值和限制适用于所有计划照射情况，但医疗照射除外，并应当在“运输条例”第 303 段要求的背景下加以考虑。

303.2. 监控和评定辐射剂量的三个类别来自“运输条例”第 303 段。第一类（低于第 303 (a) 段指出的水平）确定了一个剂量范围，在该范围内几乎不需要采取行动来评价和控制剂量。该范围的上限是每年 1 毫希沃特，这是为了与公众成员的剂量限值相一致而选择的。对于该类别，如果可以证实工作人员的剂量最不可能超过每年 1 毫希沃特，则不需要特别的工作模式、详细的监控、剂量评定计划或个人记录；第二类（第 303 (a) 段指出的水平）的上限为每年 6 毫希沃特，是工作人员有效剂量限值的 3/10（连续 5 年平均）。该水平代表了不太可能接近剂量限值的条件和可以接近剂量限值条件之间的合理分界线；第三类（第 303 (b) 段指出的水平）适用于职业

照射可能超过每年 6 毫希沃特的任何情况。还应当考虑潜在照射的可能性和可能程度。

303.3. 许多运输工作人员属于第一类（低于每年 1 毫希沃特），没有必要采取监控或控制照射的特定措施，对于属于第二类的个人（每年 1—6 毫希沃特），需要进行剂量评定计划。这可能基于个人监控或对工作场所的监控。在后一种情况下，工作场所监控通常包括在行程的某一特定阶段开始和结束时对居留区域的剂量率进行测量。然而，在某些情况下，也可能需要空气监控、表面污染检查和个人监控，第三类（每年 6 毫希沃特以上）需要单独监控。在大多数情况下，这将通过使用个人剂量计来实现，如胶片剂量计、热释光或光激发剂量计和必要时的中子剂量计（见 GSG-7[2]）。

303.4. 在特定操作中，工作人员所接受的剂量与运输指数之和之间存在着相关性。TS-G-1.3[3]给出了进一步的指导。

303.5. 鉴于在独家使用运输过程中允许相对较高的剂量率，这意味着相对容易超过 1 毫希沃特的剂量，因此应当采取额外的谨慎措施，以确保遵守“运输条例”第 303 段要求得到满足。通过采取关于监控或控制照射的特定措施。在评定总体个人照射时，应当考虑在运输阶段接受的任何照射，以及在其他地方接受照射，特别是在装载和卸载期间接受的照射。

## 应急响应

304.1. “运输条例”规定要求，如果货包设计人员、托运人、承运人和收货人符合，就能确保放射性物质运输的高度安全。但是，可能会发生涉及此类货包的紧急情况。“运输条例”第 304 段承认，必须进行计划和准备，以便对此类紧急情况作出充分和安全的响应。在大多数情况下，该响应将类似于对固定场址设施的核或辐射紧急情况的响应。因此，要求相关国家或国际组织制定应急程序，并在放射性物质运输过程中发生核或辐射紧急情况时遵守这些程序。

304.2. 托运人和承运人制定的安排包括应急计划和程序，以应当对放射性物质运输过程中的核或辐射紧急情况。在营运组织一级，它们可以遵守其他危险货物运输和常规紧急情况的计划和程序。它们可以与应当对其他紧

急情况的安排结合起来。原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 7 号《核或辐射应急准备与响应》[10]规定了应急准备和响应要求。进一步的建议和指导见参考文献[11—14]。

304.3. 托运人和承运人的应急准备和响应安排应当可供主管当局视察。它们应当确保参与应急响应的不同组织之间充分合作。应当优先考虑与国家当局建立联系，向它们提供技术信息，例如事故所涉货包和内容物的说明，并为应急工作提供支助。

305.1. 托运人和承运人应当根据分级方法，酌情为放射性物质运输期间的紧急情况制定安排。安排的内容应当与运输事件中可能出现的危害水平相称。在确定潜在后果时应当考虑运输方式。

305.2. 放射性危害可能不是货包内容物构成的唯一潜在危害。可能存在包括自燃性、腐蚀性或氧化性的其他危害，或者，如果排放，内容物可能与环境（例如空气、水）发生反应并产生危害物质。正是后一种现象，“运输条例”第 305 段旨在确保免受受化学（即非放射性）危害的适当安全。特别注意六氟化铀，因为它在某些条件下与空气中的水分和水反应，生成氟化氢和氟化铀（分别为 HF 和  $\text{UO}_2\text{F}_2$ ）。

305.3. 如果货包的包容系统破坏，空气和/或水可能会触及内容物，在某些情况下，会与内容物发生化学反应。对于一些放射性物质，这些化学反应可能产生腐蚀性、酸性、毒性或有毒物质，可能对人类和环境有害。在货包的设计、应急计划和应急程序中应当考虑到该问题，以减少此类反应的后果。在这样做时，所涉及的物质数量、潜在的反应动力学、反应产物的缓解效应（例如自熄灭、自堵塞、不溶解性）以及在环境中浓缩或稀释的可能性都应当予以考虑。该考虑可能导致对货包设计或使用的限制，超出了对内容物放射性性质的考虑。

## 管理系统

306.1. 管理系统本质上是一种系统化和文件化的方法，以确保所需的条件或安全水平得到持续的实现。任何系统的评价和文件的绩效判断一个适当的标准是一种形式的管理系统。对所有影响质量的活动采取严格的方法，

包括酌情规定和核实令人满意的绩效和/或实施适当的纠正措施，将有助于运输安全，并提供达到要求质量的证据。

306.2. “运输条例”没有规定详细的管理系统，因为每个成员国的操作需要多种多样，主管当局要求也各不相同。TS-G-1.4[15]提供了管理系统所依据的框架。管理系统的详细程度将取决于货包的寿命阶段和运输活动（例如运输方式、货包类型、运输频率），并应当采取遵守“运输条例”第104段分级方法。

306.3. “运输条例”要求的管理系统建立和实施，应当在运输操作开始前及时进行。主管当局将酌情确保实施该管理系统，作为及时通过和实施“运输条例”一部分。

306.4. 管理系统应当涉及所有特殊形状放射性物质的设计、制造、试验、文件编写、使用、维护和视察，以及根据“运输条例”第417(f)段批准的物质和货包运输及在途存储操作。特别是，制造商、托运人或用户应当准备好证实所用制造方法和物质符合批准的设计规范，所有容器都定期视察，必要时修理和保持良好状态，以便它们继续符合所有相关要求和规范，即使在重复使用后或在存储后装运时也是如此。

306.5. 符合 ISO 9001[16]等国际标准并经认可机构认证的管理系统可被接受，以满足“运输条例”第306段要求。

## 合规保证

307.1. 各成员国和所有相关国际组织应当在适当的时限内根据“运输条例”通过运输安全条例。应当强调及时执行系统的合规保证计划，以补充通过“运输条例”。

307.2. “运输条例”使用的“合规保证”术语含义广泛，包括主管当局为确保“运输条例”要求在实践中得到遵守而采取的所有措施。例如：

- (a) 使用适当和结实的货包；
- (b) 每个货包中放射性物质的活度不超过该物质和该货包类型的监管活度限值；
- (c) 货包表面的剂量率和污染水平不超过适当的限值；

- (d) 货包有适当的标记和标签，运输单据齐全；
- (e) 运输工具中含有放射性物质的货包数量在监管限值范围内；
- (f) 放射性物质货包在运输工具中，并与人和感光材料保持安全距离；
- (g) 在装载、运输和卸载放射性物质货包时，只使用经试验的堆垛和吊装设备；
- (h) 放射性物质货包有妥善固定以便运输；
- (i) 只有训练有素人员在运输过程中装卸放射性物质货包，包括也可以装载或卸载货包的车辆驾驶员。

307.3. 系统化合规保证计划的主要目标是：

- (a) 对“运输条例”使用者符合监管进行独立核实；
- (b) 向监管过程提供反馈，作为改进“运输条例”和合规保证计划的基础；

307.4. 有效的合规保证计划至少应当包括与以下方面相关的措施：

- (a) 评审和评定，包括发放批准证书；
- (b) 视察和执法。

307.5. 只有向参与放射性物质运输的所有各方（即设计人员、制造商、托运人、承运人）传达合规保证计划的范围和目标，才能执行该计划。因此，合规保证计划应当包括信息传播的规定。这应当使用户了解主管当局希望他们遵守“运输条例”方式以及监管领域的新发展。相关各方应当使用训练有素的工作人员。

307.6. 为确保特殊形状放射性物质（见“运输条例”第 239 段）和某些货包设计的充分性，主管当局必须对这些设计进行评定（见“运输条例”第 802 段）。通过该方式，主管当局可以确保设计符合监管要求，并确保不同用户以一致的方式应用这些要求。根据“运输条例”要求，还须对货物进行评审和批准，以确保为运输操作作出充分的安全安排。

307.7. 主管当局应当进行监查和视察，作为其合规保证计划的一部分，以确认用户遵守“运输条例”所有适用要求，并正在应用其管理系统。还必须进行视察，以查明不符合规定的情况，这可能需要用户采取纠正行动或

主管当局采取强制行动。执行计划的主要目的不是采取惩罚性行动，而是促进遵守“运输条例”。

307.8. 由于“运输条例”包括发生核或辐射紧急情况时的规定（见“运输条例”第304段），合规保证计划应当包括与应急计划和准备以及必要时的应急响应相关的活动。这些活动应当纳入适当的国家应急计划。适当的主管当局还应当确保托运人和承运人有充分的应急计划。

307.9. 进一步的建议见原子能机构《安全标准丛书》第SSG-78号《放射性物质的安全运输合规保证》[17]。

308.1. 主管当局的评定，包括考虑辐射防护计划的评定，也可用于评价“运输条例”有效性，并可作为SSG-78[17]详述的合规保证活动的一部分（另见第307.1—307.8段）。特别重要的是评定是否有效地防护和安全最优化。这也可能有助于取得和维持公众的信心。

308.2. 遵守“运输条例”第308段规定，应当酌情收集和评审相关工作人员和公众所受辐射剂量的信息。例如，如果运输模式发生重大变化或采用了与放射性物质相关的新技术，就应当进行评审。相关信息的收集可通过辐射测量和评定相结合来实现。除了常规和正常工况外，还需要对运输事故工况进行评审。

## 不符合

309.1. 由于不遵守“运输条例”对表面污染的要求，导致辐照燃料运输停止，原子能机构于1999年召开了两次顾问会议来处理该问题。随后于2000年3月举行了一次技术会议。在这些会议上，建议在“运输条例”增加关于不符合情形时所需采取行动要求的案文。此外，运输安全标准委员会建议原子能机构开展一个关于污染的协调研究项目，成果见参考文献[18]。

309.2. 托运人、承运人、收货人和运输过程中所涉及的任何组织遵守“运输条例”要求，就为放射性物质运输提供了非常高的安全水平。“运输条例”第309段承认可能会发生不符合的特定情况。国家和国际组织应当制定计划，调查和分析这些事件，并采取治理行动。

309.3. “不符合”术语的含义非常广泛，包括货物不完全符合适用的监管要求的所有情况（运输事故除外）。“本条例中适用于剂量率或污染的任何限值”术语是指“运输条例”载有剂量率或污染限值的所有段落，包括“运输条例”第 423 段、第 505 段、第 508 段、第 509 段、第 513 段、第 516 段、第 517 段、第 526—529 段、第 566 段和第 573 段。在一些国家，主管当局可能决定将该要求扩大到其他种类的不符合情形，以及要求报告的不符合情形的种类和严重程度。在任何情况下，托运人、承运人和运输过程中涉及的任何组织都负有避免再次发生不符合情形的首要责任。

309.4. “运输条例”第 309 段意图不是要求承运人或收货人在运输过程中测量污染和剂量率。

309.5. 有效的合规保证计划至少应当具有与发现和分析不符合相关的目标，包括：

- (a) 向监管过程提供反馈，作为改进“运输条例”和合规保证计划的基础（见“运输条例”第 307 段）；
- (b) 确保便利托运人、承运人、收货人、适当的主管当局和运输过程中可能受到影响的任何组织之间就任何不符合情形进行充分和适当的沟通和反馈，以确保今后消除此类情形。

## 特殊安排

310.1. “运输条例”第 310 段指出的意图，只有在特殊安排下才允许运输不符合所有特定适用要求的托运货物。总体安全水平至少相当于在满足所有适用规定的情况下提供的安全水平要求（见第 104.1 段）应当通过额外的操作控制或替代手段来实现。由于通常适用的监管要求没有得到满足，每一项特殊安排都必须得到所有相关主管当局的特定批准（即需要多边批准）。

310.2. 特殊安排的概念旨在使托运人能够灵活地提出替代安全措施，这些措施实际上相当于“运输条例”所规定的措施。这就有可能开发新的监管和技术，以满足工业长期的现有和不断变化的需要，也有可能对只有短期收益的特定货物采取的特殊操作措施。事实上，特殊安排作为引进和试验

新的安全技术的一种可能手段作用，对于进一步制定“运输条例”也是至关重要的。

310.3. 人们认识到，在运输过程中可能会出现非计划的情况，例如货包受到轻微损坏或以某种方式不遵守“运输条例”所有相关要求，这将需要采取行动。当没有直接的健康、安全或安保问题时，一项特殊安排可能是适当的。应当不要求作出特殊安排来处理可能需要立即运输的不符合情形，以便将不符合情形置于适当的健康和安全控制之下。据认为，原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-65 号《涉及放射性物质运输的核或辐射紧急情况准备和响应》[14]建议的应急程序和 SSG-78[17]建议的合规保证计划在大多数情况下为此类非计划事件提供了更好的方法。

310.4. 如果货物因与标准货包设计特点不同而需要以更严格的操作控制形式采取补偿性安全措施，则可根据特殊安排寻求批准。在实践中可为此目的使用的其他可能控制措施的详细情况见第 830.1 段。为支持同等安全论据而提供的信息可包括可用的定量数据，范围从基于相关经验深思熟虑的判断到概率风险分析。

## 培训

311.1. 提供信息和培训是任何辐射防护系统的一个组成部分。所提供的教学水平应当与所从事工作的性质和类型相适应。从事放射性物质运输的工作人员需要接受培训，了解其工作中的辐射风险以及如何在各种情况下尽量减少这些风险。

311.2. 培训应当涉及特定工作和职责、发生事故时应当采取的特定防护措施或特定设备的使用。它应当酌情包括与放射性危害性质相关的一般信息和关于电离辐射性质、其影响及其测量的知识。培训应当是在整个就业期间提供的持续承诺，包括初始培训和适当间隔的复训。应当定期检查培训的有效性。

311.3. 关于特定培训要求的信息已经公布[19、20]。

312.1. 放射性物质“运输条例”成功实施及其目标的实现，在很大程度上取决于所有相关个人对所涉风险的认识和对“运输条例”详细了解。要做

到该点就必须为所有与放射性物质运输相关的个人适当计划和维持初始和经常性的培训计划。

312.2. “运输条例”（2003年版）引入了第312段、第313段和第315段。在联合国建议[21]也可以找到类似要求，这些规定补充了危险货物运输培训的统一方法。

312.3. 只有经过适当培训人员才能从事放射性物质运输。托运人、承运人和收货人的组织说明中应当明确说明工作和相关的职责和责任。对于其他人员，如主管当局雇员、独立视察员和应急人员，也宜具体说明其职责和责任，以便确定和完成必要的培训。

312.4. 除了规定培训其本身人员外，主管当局还应当酌情规定并参与培训参与运输放射性物质的其他人员。此外，主管当局应当通过其合规保证计划和对管理系统的监控，确保承认和满足参与运输的组织的所有培训需求。

312.5. 关于培训所有参与放射性物质运输人员的进一步指导和信息见参考文献[22]。

314.1. 每个组织都应当保持培训计划和个别受训人员表现的充分记录。此外，应当根据适用的管理系统要求保存记录，并应当由主管当局定期检测或视察。这些记录的主要目的是：

- (a) 向主管当局或监管机构提供证据，证实其职责与安全相关的所有人员的适当资格，以及所需授权的证据；
- (b) 提供可用于培训计划评审的文件，以便采取必要的纠正措施。

### 第三节 参考文献

- [1] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号，国际原子能机构，维也纳（2014年）。

- [2] 国际原子能机构、国际劳工组织,《职业辐射防护》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-7 号,国际原子能机构,维也纳(2018 年)。
- [3] 国际原子能机构《放射性物质运输的辐射防护计划》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 TS-G-1.3 号,国际原子能机构,维也纳(2007 年)。(修订版编写中)
- [4] 国际原子能机构《放射性物质运输中辐射防护最优化的讨论和导则》,国际原子能机构《技术文件》第 374 号,国际原子能机构,维也纳(1986 年)。
- [5] 国际原子能机构《职业照射控制的辐射防护最优化》,《安全报告丛书》第 21 号,国际原子能机构,维也纳(2002 年)。
- [6] 国家辐射防护委员会《英国放射性物质运输的辐射防护计划导则》,国家辐射防护委员会,英国奇尔顿(2002 年)。
- [7] WILSON, C.K., “放射性物质的空运”,《辐射防护剂量学》第 48 1 期(1993 年)第 129—133 页。
- [8] WILSON, C.K., SHAW, K.B., GELDER, R., “放射性物质海运产生的辐射剂量”,《放射性物质包装和运输》第 89 期(国际研讨会论文集,华盛顿特区,1989 年),田纳西州橡树岭国家实验室(1989 年)。
- [9] FAIRBAIRN, A., “国际原子能机构放射性物质安全运输条例的制定”,《能源评论》第 11 4 期(1973 年)第 843 页。
- [10] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际民用航空组织、国际劳工组织、国际海事组织、国际刑警组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、全面禁止核试验条约组织筹备委员会、联合国环境规划署、联合国人道主义事务协调厅、世界卫生组织、世界气象组织,《核或辐射应急准备与响应》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 7 号,国际原子能机构,维也纳(2015 年)。

- [11] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、泛美卫生组织、世界卫生组织，《核或辐射应急准备和响应中使用的标准》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-2 号，国际原子能机构，维也纳（2011 年）。
- [12] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、泛美卫生组织、联合国人道主义事务协调厅、世界卫生组织，《核或辐射应急准备的安排》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-2.1 号，国际原子能机构，维也纳（2007 年）。（修订版编写中）
- [13] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际民用航空组织、国际劳工组织、国际海事组织、国际刑警组织、经济合作与发展组织核能机构、联合国人道主义事务协调厅、世界卫生组织、世界气象组织，《终止核或辐射应急的安排》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-11 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [14] 国际原子能机构、国际民用航空组织、国际海事组织，《涉及放射性物质运输的核或辐射紧急情况准备和响应》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-65 号，国际原子能机构，维也纳（2022 年）。
- [15] 国际原子能机构《放射性物质安全运输管理系统》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 TS-G-1.4 号，国际原子能机构，维也纳（2008 年）。
- [16] 国际标准化组织《质量管理体系：要求》（ISO 9001:2015），国际标准化组织，日内瓦（2015 年）。
- [17] 国际原子能机构《放射性物质安全运输的合规保证》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-78 号，国际原子能机构，维也纳（编写中）。
- [18] 国际原子能机构《货包和运输工具非固定污染的放射学方面》，国际原子能机构《技术文件》第 1449 号，国际原子能机构，维也纳（2005 年）。
- [19] 联合国欧洲经济委员会、内陆运输委员会，《欧洲国际道路运输危险货物协定》（2021 年版），联合国欧洲经济委员会，日内瓦（2020 年）。

- [20] RIDDER, K., “欧洲危险货物司机培训”, 《放射性物质包装和运输》第 95 期 (国际研讨会论文集, 拉斯维加斯 (1995 年), 美国能源部, 华盛顿特区 (1995 年))。
- [21] 联合国《危险货物运输建议: 示范条例》, ST/SG/AC.10/1/Rev.22, 2 卷本, 联合国, 纽约和日内瓦 (2021 年)。
- [22] 国际原子能机构《放射性物质安全运输》, 《培训教材丛书》第 1 号, 国际原子能机构, 维也纳 (2006 年)。

## 第四节

### 活度限值和分类

#### 一般规定

401.1. 每个联合国编号都与相应的适当装运名称有关联，具有识别危险货物的功能，既可作为明确界定的物质或物体的单独条目，也可作为明确界定的物质或物体类别的一般条目。联合国放射性物质编号是通过联合国经济及社会理事会危险货物运输问题<sup>1</sup>专家委员会和原子能机构之间的联合国国际合作商定的。数字识别系统比使用符号或语言的其他识别形式更可取，因为就国际承认而言，数字识别系统相对简单。该标记有多种用途。与其他危险货物协调一致的联合国编号，可以在一般危险货物的更广泛运输环境中迅速和适当地识别放射性货物。另一个示例是使用联合国编号作为应急响应行动的唯一标记。每个联合国编号通常与一个独特的应急响应信息表有关联，允许第一响应人在没有专家的情况下参考一般建议。在紧急情况的第一阶段，大量非专业应急响应人员可以更容易地获得这些准备好的信息（另见第 546.1—546.5 段）。

#### 放射性核素基本值

402.1. A 型货包（特殊形状物质为 A<sub>1</sub>，非特殊形状物质为 A<sub>2</sub>）内装任何放射性核素或放射性核素组合物的活度限值是根据事故后货包失效后的放射性后果在辐射防护原则范围内被认为是可接受的基准上推导出的。推导 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 值的方法在附录 I 给出。

402.2. “运输条例”没有规定限制运输工具上运输的 A 型货包的数量。A 型货包一起运输并不罕见，有时是大量运输。因此，在涉及这些货物的事故中，源项可能大于单独损坏货包的排放量。然而，通过限制运输工具上 A 型货包的数量来限制潜在源项的尺寸被认为是不必要的。大多数 A 型货包携带 A<sub>1</sub> 或 A<sub>2</sub> 数量的一小部分，事实上，只有一小部分 A 型货包的托运

---

<sup>1</sup> 2001 年，联合国经济及社会理事会危险货物运输问题专家委员会改组，更名为危险货物运输和全球化学品统一分类标签制度专家委员会，下设一个专门的危险货物运输问题专家委员会。

货物包含超过一个完整的 A 型货包的同等物。在英国进行的一项研究[1]发现，装有 A 型货包的运输工具最高装载量相当于不到 5 个完整的 A 型货包。经验还表明，A 型货包在许多事故工况下表现良好。综合美国[2]和英国[3]在大约 20 年期间的事件数据，提供了 22 起涉及多种 A 型货包托运事故的信息。在这些事件中，只有两次排放了放射性内容物。两者都导致了  $10^{-4}A_2$  量级的排放。另一个示例是 1983 年在美国发生的一起事故的描述[4]，当时一辆运输工具载有 82 个货包（A 型和例外），托运物的总活度量约相当于  $4A_2$ 。两个货包被破坏，排放物质的活度约为  $10^{-4}A_2$ 。

402.3. “运输条例”表 2 分别列有豁免物质和托运的活度浓度限值和活度限值，不受“运输条例”要求的限制，包括适用的行政要求。如果一种物质含有放射性核素，而其活度浓度或托运物的活度均低于“运输条例”表 2 的限值，则该物质的装运可豁免（即“运输条例”不适用（见“运输条例”第 236 段））。豁免的一般原则[5]是：

- (a) 被豁免的实践或源对个人造成的辐射风险应当足够低，以致不受监管关注；
- (b) 被豁免的实践或源的集体辐射影响应当足够低，以致在当时的情况下无须受监管关注；
- (c) 被豁免的实践和源应当具有内在安全性，不会出现可能导致不符合 (a) 和 (b) 标准的情况。

402.4. 活度浓度和活度方面的豁免值最初是为了列入 1996 年《基本安全标准》(BSS)<sup>2</sup> [6]而推导来的（通常，该放射性基本核素值在数值与 GSR Part 3[5]表 I.1 给出的数值相等）：

- (a) 正常工况下，个人有效剂量为每年 10 微希沃特；
- (b) 正常工况下，集体剂量为每年 1 人·希沃特。

402.5. 豁免值是通过使用各种照射假想方案和途径得出的，这些假想方案和途径没有明确涉及放射性物质的运输，针对运输特定假想方案进行了额外的计算[7]。然后将这些运输特定豁免值与 1996 年《基本安全标准》的

---

<sup>2</sup> 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、世界卫生组织，《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》，《安全丛书》第 115 号，国际原子能机构，维也纳（1996 年）。

值进行了比较（这些值在数字上与 GRS Part 3[5]表 I.1 给出的数值相等）。委员会的结论是，这两套标准之间的差异相对较小，并不构成将不同于“运输条例”（1996 年版）的豁免值纳入“运输条例”正当性，因为在不同的实践中使用不同的豁免值可能会在接口上引起问题，并可能造成法律和程序上的复杂情况。

402.6. 活度浓度和活度方面的豁免值是在 1996 年《基本安全标准》中得出的，并在 1996 年《基本安全标准》（通常，该放射性基本核素值在数值与 GSR Part 3[5]表 I.1 给出的数值相等）表 I-1 提供。同样的豁免值见“运输条例”表 2。

402.7. 对于未列入 1996 年《基本安全标准》的放射性核素，使用参考文献 [6]所述的相同方法计算了“运输条例”豁免值。

402.8. 活度浓度豁免值适用于货包内或运输工具内或运输工具上的放射性物质。

402.9. 为运输少量物质确定了活度豁免值，这些物质在一起运输时，其总量为即使超过了活度浓度的豁免值，活度也不太可能导致任何显著放射性照射。因此，活度的豁免值是根据每批货物而不是每个货包货物确定的。

402.10. 对于考虑到衰变链的放射性核素（见脚注 (b)），“运输条例”表 2 第 4 列和第 5 列中的数值涉及父代核素的活度或活度浓度。

402.11. 放射性物质的豁免水平已纳入“运输条例”第 236 段所载的放射性物质定义。

## 放射性核素基本值的测定

403.1. 对于未列入“运输条例”表 2 的个别放射性核素，豁免物质的活度浓度限值和豁免托运货物的活度限值是根据 GSR Part 3[5]规定的原则计算的。关于 GSR Part 3[5]附表 I 的方法，只要在所有合理可预见的情况下，任何公众成员在预计从豁免物质中产生的有效剂量在每年 10 微希沃特或以下，该物质即可获得豁免而无需进一步考虑。为了考虑到低概率假想方案，可以使用一个不同的标准，即任何公众成员在该低概率假想方案中预计产生的有效剂量不超过每年 1 毫希沃特。

403.2. 如果文书和规定遵守“运输条例”第 423 (c) 段要求，在多边批准的情况下，允许豁免托运的活度限值的替代基本核素值。

403.3. 文书或规定豁免托运的替代活度限值需要多边批准。要求向主管当局提交的信息列于“运输条例”第 817 段。此外，还应当包括以下信息：

- (a) 对仪器仪表或物体的预计用途和收益的说明，以及对放射性核素所起作用的说明。
- (b) 选择放射性核素的正当性，特别是与放射性毒性较低的其他放射性核素（例如，辐射穿透性较低和/或半衰期较短）相关的理由。选择放射性物质而不是非放射性替代物质的理由也应当是正当的。
- (c) 说明产品在正常使用中的完整性、误用和损坏的原型试验，以及这些试验的结果。
- (d) 产品产生的最大外部剂量率和为合规保证而采取的措施。

404.1. 如果需要计算  $A_1$  或  $A_2$  值，则应当使用附录 I 概述的方法。这里考虑两种情况。首先，对于含有衰变链的放射性核素，包括一个或多个处于平衡状态的放射性核素，其中所有后代（子代）的半衰期都小于 10 天，并且没有后代放射性核素的半衰期超过父代核素；第二，任何其他情况。在前一种情况下，只应当考虑父代放射性核素，因为在制定  $A_1/A_2$  值（见附录 I）时考虑了子代的贡献，而在后一种情况下，所有核素都应当根据“运输条例”第 405 段要求，作为放射性核素的混合物单独考虑。在钍（天然）、铀（天然）、铀（浓缩到 20%或更低）和铀（贫化）的特殊情况下，已经考虑了钍-232、铀-238 和铀-235 衰变链中所有核素的贡献，以确定“运输条例”表 2 赋予这些进入资格的“无限” $A_1/A_2$  值，而不考虑它们的半衰期。

405.1. 见附录 I。

405.2. 从低浓缩铀乏燃料（铀-235 含量低于 5%）回收的反应堆铀是每种成分具有已知特性和数量的放射性核素混合物的典型实例。根据“运输条例”第 405 段规定的活度限值与铀放射性核素的浓缩无关，燃耗在 10 000—40 000 兆瓦日每吨铀范围内，反应堆铀的值  $A_1=20$  太贝可和  $A_2=3 \times 10^{-3}$  太贝可在上述燃耗范围内使用，并考虑到镅-241 的积聚，最长可在回收后 5 年内使用。

强调指出这些值只能适用于从热堆乏燃料中分离出的铀，如果原始燃料含有铀-235 浓缩达到 5% 的铀，能耗不小于 10 000 兆瓦日每吨铀，不超过 40 000 兆瓦日每吨铀，并且进行了分离未满 5 年未完成运输操作的，还必须单独考虑铀中的其他污染物。

405.3. 只有在均匀混合物的情况下才允许计算豁免物质的活度浓度，因为确定这些活度浓度的模式是基于同位素在整个物质中均匀分布的假设。在第 409.1 段和第 409.10—409.15 段进一步讨论了均匀度。

406.1. 对于已知核素识别但不清楚其相对比例的核素混合物，给出了确定基本核素值的简化方法。这在混合裂变产物的情况下尤其有用，因为它们几乎总是含有一定比例的超铀核素。在该情况下，分组将简单地介于  $\alpha$  发射体和其他发射体之间，对两组中每组中的单独核素使用最严格的放射性基本核素值。了解总  $\alpha$  活度和残留活度对于确定内容物的活度限值是有必要的。通过对存在的特定裂变产物混合物使用该方法，可以同时考虑超铀元素和裂变产物本身的风险。相对风险将取决于混合物的来源（即可易裂变核素的来源、辐照时间、衰变时间以及可能的化学处理影响）。

406.2. 对于再加工铀， $A_2$  值可以使用第 405 段混合物公式计算。并考虑到在正常和事故工况下可能出现的物理和化学特征。还可以通过表明 10 毫克铀的活度低于该混合物的承诺有效剂量 50 毫希沃特的活度来证实  $A_2$  值是无限的。此外，在计算再加工铀的  $A_2$  值时，参考文献[8]信息可能有用。

407.1. “运输条例”表 3 提供了缺省数据，供在缺乏已知数据的情况下使用。这些值是  $\alpha$  或  $\beta$ - $\gamma$  亚组中可能的最低值。中子发射体如镭-252、镭-254 和镭-248 的  $A_1$  值也被考虑在内。

407.2. 在“运输条例”（1985 年版），该出版物表 II 列出的放射性内容物被分为两类：“已知仅存在发射  $\beta$  或  $\gamma$  核素”和“发射  $\alpha$  核素”已知存在核素或没有相关数据”。在“运输条例”（1996 年版），根据中子发射体的  $A_1$  值将放射性内容物分为“已知仅存在发射  $\beta$  或  $\gamma$  核素”、“已知仅存在发射  $\alpha$  核素或未获得相关数据”两组。然而，第二种描述并不精确，因为所有的  $\alpha$  发射体在发射  $\alpha$  粒子后都会发射  $\gamma$  射线或 X 射线。在“运输条例”（2005 年版），第二项和第三项描述分别修订为“已知存在发射  $\alpha$  核素但未发现中子发射体”和“已知存在中子发射核素或未获得相关数据”。

## 物质分类

### 低比活度 (LSA) 物质

409.1. 序言部分（见第 226.3 段）的低比活度物质定义不包括关于放射性核素在整个低比活度物质中基本均匀分布必要性的措辞。然而，它明确指出物质的形状应当是平均比活度可以有意义地分配给它。在考虑作为低比活度物质装运的实际物质时，决定分配的均匀程度应当视低比活度物质类别而异。因此，在必要时对每一种低比活度物质类别规定了统一程度（例如“运输条例”第 409 (c) (i) 段）。“整体分布”术语是指活度不集中在物质的一小部分，而是活度分布存在于整个物质或部分物质上，其方式是平均比活度（单位质量的活度）可以有意义地分配给它。“基本均匀分布”术语是指放射性核素在物质中的分布比“整体分布”更均匀，本术语适用于为固化而与固态致密粘结剂（如混凝土、沥青和陶瓷）混合的物质。这可能适用于本身不符合 LSA-III 分类要求的粉末或污泥等物质。在该情况下，混合技术的受控条件应当确保 LSA-III 的活度分布大致均匀。

409.2. LSA-I 是在“运输条例”（1985 年版）引入的，用于描述非常低的比活度物质。这些物质可以无包装装运，也可以装运在工业货包 1 型（IP-1 型），该包装是为了满足“运输条例”第 623 段规定要求而设计的。根据“运输条例”第 409 (a) (i) 段，LSA-I 可以由铀或钍精矿以外的矿石精矿（例如镭精矿）组成，如果它们不遵守“运输条例”第 107 (f) 段例外规定。在“运输条例”（1996 年版）对 LSA-I 类别进行了修订，以考虑到：

- (a) 根据“运输条例”第 107 (f) 段，澄清相关铀和钍矿石以外矿石的范围；
- (b) 根据第 417 段的一项规定，数量不属于易裂变材料货包要求的易裂变材料；
- (c) 根据第 236 段规定引入新的豁免水平。

LSA-I 的定义因此被修订为：

- (a) 包括含有不符合第 107 (f) 段豁免规定的天然放射性核素的矿石；
- (b) 不包括第 417 段（即第 409 (a) (iii) 段）所述数量非例外易裂变材料；

(c) 加上放射性物质的整体分布浓度高达豁免水平的 30 倍（第 409 (a)(iv) 段）。

认为合理的实践是，含有 30 倍于豁免水平的放射性核素物质可免于部分“运输条例”约束，并可与 LSA-I 类别有关联。选择 30 的系数是为了考虑到 GRS Part 3[5]推导豁免水平时使用的四舍五入程序，并合理保证此类物质的运输不会产生不可接受的剂量。

409.3. 低比活度物质分类组是在适当考虑物质放射性危害的情况下制定的。LSA-II 或 LSA-III 可能含有易裂变材料。LSA-I 只能含有“运输条例”第 417 段 (a) — (f) 项中的一项规定例外易裂变材料。

409.4. 预计作为 LSA-II 运输的物质可能包括未固化的核反应堆加工废物，如低活度树脂和过滤器污泥、吸收液体和来自反应堆运行的其他类似物质，以及来自其他燃料循环运行的类似物质。此外，LSA-II 可包括核设施退役后的许多活化设备。

409.5. 虽然一些被认为适合列入 LSA-III 类别的物质将被视为基本均匀分布（如混凝土基质中的浓缩液体），但其他物质，如固化树脂，整体分布基质中，但均匀程度较低。第 409.6—409.15 段提供了关于活度分布均匀程度的指导，这些活度分布的均匀程度是满足 LSA-III 类物质监管要求所必需的。

409.6. LSA-III 的规定主要是为了适应某些类型的放射性废物，这些废物的平均估计比活度超过 LSA-II 的  $10^{-4}A_2$ /克限值。LSA-III 的比活度上限为  $2 \times 10^{-3}A_2$ /克的正当性是：

- (a) 将这类物质限制在不容易分散的固体，因此明确排除粉末以及液体或溶液。
- (b) 要求在非独家使用条件下使用工业货包 3 型（IP-3）（“运输条例”第 625 段），这与 A 型固体货包基本相同。

409.7. LSA-II 液体的比活度限值为  $10^{-5}A_2$ /克，比固体的限制更严格，考虑到液体的浓度在运输过程中可能会增加。

409.8. 与低比活度物质混合的固态致密粘结剂，如混凝土或沥青，不被认为是外部屏蔽材料。在该情况下，粘结剂可以降低表面剂量率，并且在确定平均比活度时可以考虑。然而，如图 2 所示，如果放射性物质被外部屏蔽材料包围，而外部屏蔽材料本身不具有放射性，则在确定低比活度物质的比活度时应当不考虑该外部屏蔽材料。

409.9. 对于 LSA-II 固体和未掺入固态致密粘结剂的 LSA-III，“运输条例”要求活度整体分布物质中。这要求活度如何整体分布物质中（即活度不需要均匀分布）。然而必须认识到，如果在大量活度明显局限于该数量的一小部分，那么限制估计比活度的概念就没有意义。

409.10. 托运人应当确保活度在低比活度物质中的分布使得平均比活度能够有意义并且大部分活度并不局限于该体积的一小部分。有几种方法适合于此目的。方法的选择应当取决于对低比活度物质的了解，并考虑到物质以前的处理。

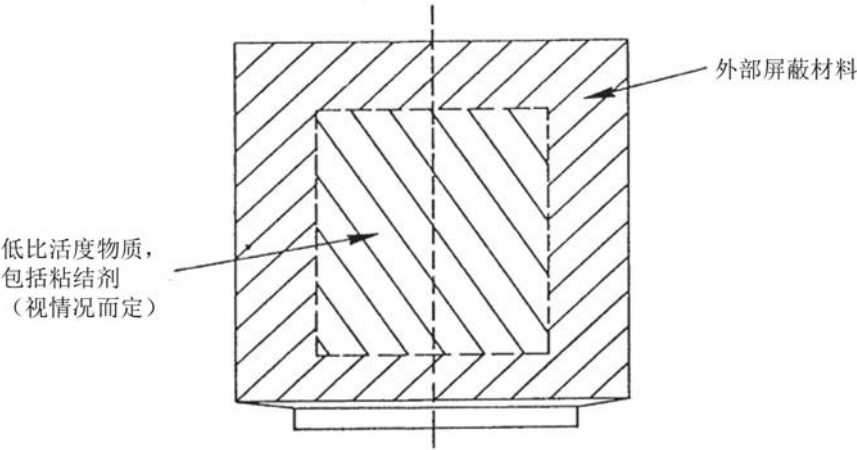


图 2. 低比活度物质被圆柱形体积的非放射性屏蔽材料包围。

409.11. 对于活度必须整体分布的物质（LSA-II 固体和 LSA-III 物质，为了使其固化而不掺入固态致密粘结剂），评定平均比活度的一个简单方法是将低比活度物质所占的体积分成确定的部分，然后评定和比较这些部分中每个部分的比活度。小于 10 的系数各部分之间的比活度差异应当不引起关注。应当证实各部分的分配是正当的，各部分内的物质符合“整体分布”的预期。但是，只要这些部分中的任何部分的估计最大平均比活度不超过

固体的比活度限值，就没有必要比较这些部分中的每一个比活度，这也适用于第 409.15 段。

409.12. 在选择要评定部分的尺寸时需要进行判断。对于体积超过 0.2 立方米的物质，建议将体积分成 10 个尺寸大致相等的部分，理由如下：在大多数情况下，遭受与 9 米跌落试验相当的严重撞击的 LSA-II 或 LSA-III 可能会在空气中排放可吸入颗粒物源自发生撞击货包的那些部分。因此，受到最大撞击力的部分体积内的平均比活度应当不大大超过 LSA-II 或 LSA-III 的比活度限值。否则，可以想象发生严重撞击的方式是，超过允许比活度限值的低比活度物质那一部分就是空气排放的来源。根据 9 米低比活度物质跌落到一个不屈靶上的实验经验，合理的假设是，大多数空气排放产生的临界体积尺寸约为货包中低比活度物质总量的 10%[9]。作用在低比活度物质上的局部撞击力随着货包内容物的总质量而增加。因此，与空气排放相关的体积与货包内容物的质量（体积）成比例[6]。

409.13. 根据托运人的判断，对于体积为 0.2 立方米或更小的物质，该方法可以合理地其他评定所取代，这些评定表明，该活度可以被认为是“整体分布”，并且在小体积中没有不可接受的活度浓度，以至于限制估计的平均比活度概念失去意义。

409.14. 对于由固态致密粘结剂中的放射性物质组成的 LSA-III，要求它们基本上均匀地分布在该粘结剂中。由于对 LSA-III 的“基本均匀分布”要求是定性的，因此有必要建立方法来判断是否符合要求。

409.15. 以下方法是 LSA-III 的一个示例，用于确定放射性物质是否基本上均匀分布在固态致密粘结剂中。该方法是将低比活度物质体积，包括粘结剂分成多个部分。至少应当选择 10 个部分，每个部分的体积不得超过 0.1 立方米。然后应当评定每一部分的比活度（通过测量、计算或其组合）。系数小于 3 部分之间的比活度差异应当不引起关注。应当证实各部分的分布是正当的，各部分内的物质符合“基本均匀分布”预计。该程序中的系数为 3 比第 409.11 段建议的系数为 10 更具有约束性。因为“基本均匀分布”要求比“整体分布”要求更具有约束性。

409.16. 根据低比活度物质的定义，规定了以下方面的额外要求：

- (a) 单独货包低比活度物质的数量，以非屏蔽材料的外部剂量率为基准（见“运输条例”第 517 段）；
- (b) 低比活度物质在任何单独运输工具中的总活度（见“运输条例”第 522 段和表 6）。

(a) 和 (b) 要求可能比“运输条例”第 409 段给出的对低比活度物质的基本要求限制性要大得多。从以下理论示例中可以看出该点：如果假设一个 200 升的桶装满一种固态可燃物质，其平均比活度估计为  $2 \times 10^{-3} A_2/\text{克}$ ，该物质可以作为 LSA-III 运输。然而，例如，如果物质的密度为 1 克/立方厘米，则桶中的总活度将为  $400A_2$ （ $(2 \times 10^{-3} A_2/\text{克}) (1 \text{ 克/立方厘米}) (2 \times 10^5 \text{ 立方厘米}) = 400A_2$ ），内陆水路  $10A_2$  和其他方式  $100A_2$  的运输限值将禁止作为 LSA-III 进行运输（见“运输条例”表 6）。（见第 522.2 段）

409.17. 既被活化又被污染的物体不能被视为表面污染物体（见第 413.1 段）。然而，这类物体可能符合低比活度物质的资格，因为一个物体的活度整体分布物体的表面，污染物分布在其表面可以被视为符合该活度整体分布物体要求。为了使这些物体符合低比活度物质的资格，有必要确定是否符合估计平均比活度的适用限值。在评定平均比活度时，必须包括物体的所有放射性物质（即分布活度和表面污染活度）。在适当的情况下，还需要满足适用于低比活度物质的额外要求。

409.18. 本身不具有放射性但在其表面污染物体（SCO）可以被称为 LSA-II，条件是由于它们的尺寸和在包装内的排列，该活度可以被认为是“整体分布”，并且可以故意为它们分配估计的平均比活度。这包括受污染的泵或其他大型受污染设备等部件被归类为 LSA-II。表面污染物体不得归类为 LSA-III，以排除货包内表面污染导致的不可接受活度水平的积聚。

409.19. 物质的压实应当不改变物质的分类。为确保该点，在确定压实物质的平均比活度时，应当不考虑用该物质压实的任何容器的质量。

409.20. 另见附录 I。

409.21. 如果低比活度物质的总活度不超过“运输条例”表 4 第 4 栏中规定例外货包的活度限值，则低比活度物质可以在例外货包中运输，前提是遵守“运输条例”第 424 段和所有适用的例外货包的运输要求和控制措施（“运输条例”第 515 段和第 516 段）。

411.1. 见第 517.1 段和第 522.1 段。

### 表面污染物体（SCO）

413.1. 根据定义，表面污染物体是指不具有放射性但其表面分布有放射性物质的物体。该定义的含义是，本身具有放射性的物体（例如活化物体）和受污染的物体不能被归类为表面污染物体。但是，只要遵守“运输条例”对低比活度物质要求，这类物体可被视为低比活度物质（另见第 409.17 段）。

413.2. 如果表面污染物体的活度总量不超过“运输条例”表 4 规定的例外货包活度限值，则可以按照第 423 段要求，以例外货包运输遵守“运输条例”第 424 段和所有适用的例外货包的运输要求和控制措施（“运输条例”第 515 段和第 516 段）。

413.3. 在 SCO-I 和 SCO-II 之间根据其污染水平进行了区分，这定义了用于运输这些物体的包装类型。“运输条例”为 SCO-I 物体的无包装装运或以工业货包（IP-1 型）装运提供了充分的灵活性。被归类为 SCO-II 的物体所允许的较高水平的非固定污染要求 IP-2 型工业货包所提供更高的容器标准。

413.4. 作为固定和非固定污染限值正当性的 SCO-I 模式基于以下假想方案，表面污染物体类别中的物体包括与一回路或二回路冷却剂或加工废料接触，导致混合裂变产物污染其表面的核反应堆或其他燃料循环设备的部件。根据  $\beta$  和  $\gamma$  发射体的允许污染水平，表面积为 10 平方米物体的固定污染可达 4 吉贝可，非固定污染可达 0.4 兆贝可。在例行运输期间，该物体可以无包装、专门装运，但必须确保该物体的安全（“运输条例”第 520 (a) 段），以确保不从运输工具中排放放射性物质。假设在事故中，SCO-I 物体和其他货物移动，这样 SCO-I 物体表面的 20% 被刮擦，20% 被刮擦表面的固定污染物被排放。此外，所有非固定污染物都被视为已排放。因此，对于固定污染，排放的总活度为 160 兆贝可，对于非固定污染，排放的总活

度为 0.4 兆贝可。使用的  $A_2$  值 0.02 太贝可的  $\beta$  和  $\gamma$  混合裂变产物，排放活度相当于  $8 \times 10^{-3} A_2$ 。该事故据认为只会发生在室外，因此，根据为 A 型货包制定的 Q 系统的基本假设（见附录 I），事故附近个人摄取  $10^{-4}$  的刮擦放射性核素是合适的。这将导致总摄入量为  $0.8 \times 10^{-6} A_2$ 。因此，这提供了与 A 型货包等效的安全水平。

413.5. SCO-II 物体的模式与 SCO-I 物体的模式相似，尽管固定污染可能是固定污染的 20 倍，非固定污染可能是固定污染的 100 倍。但是，SCO-II 物体的运输需要一个工业货包（类型 IP-2）。此货包的存在将导致事故中的排放分数接近 A 型货包的排放分数。使用  $10^{-2}$  的排放分数，会导致总排放出 32 兆贝可固定污染和 0.4 兆贝可非固定污染的  $\beta$  和  $\gamma$  放射性核素，相当于  $2 \times 10^{-3} A_2$ 。采用与前一段相同的摄入系数可导致  $0.2 \times 10^{-6} A_2$  的吸入量，从而提供与 A 型货包相当的安全水平。

413.6. 可接触表面是任何可以使用标准表面污染测量技术用手轻易擦拭的表面。由于设计特点、屏障或关闭在常规运输工况下仍然有效而无法进入的任何其他表面都是不可进入的表面。作为指导，如果一个人的手可以到达 300 平方厘米的区域，它被认为是一个可接近的表面。使用“手工”术语并不是要阻止使用伸缩取样仪器仪表等工具。“标准表面污染测量技术”术语是指类似于“运输条例”第 508 段用于证实符合货包污染限值的方法。

413.7. 可接近的表面可能会通过安全地关闭或封锁来使其无法接近以供运输，如以下示例：

- (a) 末端密封的大口径管道；
- (b) 密闭的工具箱或者其他维护设备；
- (c) 手套箱，该手套箱的进入端口被封锁；
- (d) 在适当坚固的中间容器内受污染的工具或其他设备。

413.8. 对于 SCO-III，外部不可接近的表面，如人孔盖和部件之间的狭窄间隙，通常用焊接材料、填缝料装填或关闭，以防止运输过程中污染物的泄漏，如图 3 所示。

413.9. 第 508.2 段和第 508.7—508.12 段描述了货包和运输工具的固定和非固定污染的测量技术。这些技术适用于表面污染物体。然而，为了正确地应用这些技术，托运人需要知道污染物的组成。

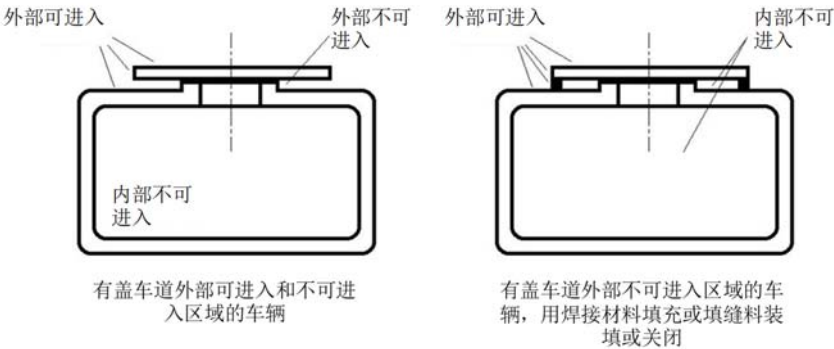


图 3. 外部可进入和不可进入区域的示例。

413.10. 关于核设施翻修或退役产生的大型物体，在成员国的特殊安排下进行了 100 多次装运[10—21]。这些物体一般都很大，例如直径 6 米、长度 20 米、重 400 000 公斤，不容易按照“运输条例”（2012 年版）之前所载的表面污染物体要求运输。虽然运输的大多数物体显然只含有表面污染物，但由于污染物沉积不均匀，不确定能否达到表面污染物体对无法进入区域的限值。如果不在现场拆除该物体，也不能方便地对内部区域进行勘察。这些物体在设计 and 构造上一般都很大，例如，根据作为压力容器使用所必需的相关规范进行设计和制造。如果物体需要以满足堆垛和自由跌落试验等试验的货包运输，那么由于被运输部件的尺寸和重量，这将在运输过程中产生严重的工程挑战、令人望而却步的成本或后勤困难。随着这类运输的经验不断增加，现在已变得更加常规，需要特定的监管要求以便允许大型物体的移动，而不需要特殊安排。根据该经验，原子能机构的“性能货包”概念制定了一套关于将大型物体作为表面污染物体（新的 SCO-III 分级）运输的监管要求，并已纳入“运输条例”（2018 年版）。

413.11. 就 SCO-III 而言，尽管开口通常是焊接封闭的，则可通过任何方法密封此类开口（“运输条例”第 413 (c) (i) 段），前提是有正当性防止放射性物质在常规运输工况和正常运输工况下的适用试验中排放（见“运输条

例”第 520 (e) (iv) 段)。开口应当密封,使其只能通过机械加工、锯切、钻孔或火焰切割等破坏性技术打开。

413.12. 虽然在“运输条例”第 413 (c) (ii) 段没有给出干燥度的阈值,排水、吹气和通风是为运输目的充分干燥物体而采用的程序。处置时可能需要更严格的干燥规范。

413.13. 就 SCO-III 而言,外表面固定污染水平没有特定限值,因为与货包类似,由此产生的外部照射将与内容物的穿透辐射结合在一起,总剂量率由其他特定要求控制。由于从大型物体发出的剂量率,固定污染可能无法测量。然而,如果假设外表面有明显的固定污染,则应当分别反映在运输计划或辐射防护计划中反映出来。在大多数情况下,该部件的大部分活度( $A_2$ 量)将是由于内表面的表面污染,而不是外表面的表面污染。

413.14. 就 SCO-I、SCO-II 和 SCO-III 而言,可通过保守估计和/或通过直接污染测量以外的方法进行分析来确定无法到达表面的污染。

413.15. 在 Q 系统(见附录 I),考虑了 5 种照射途径(即外部光子剂量( $Q_A$ )、外部 $\beta$ 剂量( $Q_B$ )、吸入剂量( $Q_C$ )、污染转移引起的皮肤和摄入剂量( $Q_D$ )和浸没剂量( $Q_E$ ))。其中,吸入剂量( $Q_C$ )可被视为发生事故时 SCO-III 的主要照射途径,因为大部分被分散的活度来自事故期间可能被划伤的外表面污染。如果 SCO-III 涉及事故,事故附近人员的最大活度摄入量应当不超过 A 型货包所接受的活度摄入量(见附录 VII)。

413.16. 反应堆容器等活化部件的运输不在表面污染物体的范围之内。

414.1. 见第 517.1 段和第 522.1 段。

## 易裂变材料

417.1. 第 417 段包含可将易裂变材料排除在“易裂变”类别之外的规定。这类例外易裂变材料必须符合各项规定的规范和第 570 段所要求最低限值的运输监管的运输规定,确保临界安全。相关适用这些规定的详细指导见参考文献[22]。第 417(a) 和 (b) 段的规定与前几版“运输条例”相同。第 417 (c) — (e) 段的规定与“运输条例”(2012 年版)相同,并对每个货包允许的质量和托运总量规定了比“运输条例”(2009 年版)允许的更严格的限值(见第 570 段)。例如,允许在任何 10 升体积中使用 5 克易裂变核

素的历史例外情况，不包括在规定体积内使用非裂变质量要求以帮助确保质量的稀释。例如，在含有聚乙烯的 10 升体积内装运的 5 克易裂变核素可能会对大人家运输造成潜在危害，聚乙烯也可能在潜在事故期间因火灾而容易丢失。“运输条例”第 417 (c) — (e) 段指出的当前例外情况，确实允许每个货包少量的裂变材料，并限制托运质量。然而，质量值大约比“运输条例”（2009 年版）允许值低 10 倍。该质量的显著减少被认为是适当地解决了托运人在没有通过使用临界安全指数进行控制的情况下可能实际应用的潜在积累的任何问题。“运输条例”第 417 (f) 段使个别成员国能够证实某一特定易裂变材料不属于易裂变材料。但是，该证书须经多边批准。

417.2. 托运人必须确保货包内装载的易裂变材料的质量在第 417 (c) (d) 或 (e) 段指出的质量限值之内。如果货包考虑被豁免在“易裂变”类别之外，则适用于“运输条例”。如果超过质量限值，则可根据第 674 段运输该物质（无需主管当局批准），但需要在标签上加上临界安全指数值，并使用适当的易裂变材料联合国编号进行运输。

417.3. “运输条例”第 417 (a) 段铀-235 的 1%浓缩限值是一个四舍五入的数值，略低于参考文献[23]铀和水无限均匀混合物的最低铀-235 临界浓缩度，最大浓缩度应当不超过 1.0%质量。第 417 (a) 段所述同质性的目的是防止微浓缩铀在慢化介质中的晶格化。一致认为，均匀混合物和浆料是指混合物中颗粒均匀分布且直径不大于 127 微米混合物和浆料[24、25]。对于粒径大于 127 微米的颗粒，在某些混合物中观察到了非均匀效应。因此，粉状体等物质的托运人在其粒度可能超过该数值时，应当考虑该例外是否适当。

417.4. “运输条例”第 417 (b) 段指出，铀-235 浓缩铀硝酸铀酰溶液的例外情况不超过铀质量的 2%。该限值略低于参考文献[23]报告的最小临界浓缩值。该例外取决于硝酸铀酰的适当包装是必要的，因为它的腐蚀特性。本质标准是在正常运输工况下，该物质应当受到环境影响的保护，这些影响会改变氮铀比（N/U 比）。

417.5. “运输条例”第 417 (c) 段旨在对数量有限的铀-235 浓缩铀规定一种分类例外，其浓缩铀的质量最多为 5%。根据历史实践，每个货包的质量限值将继续允许装运六氟化铀样品。假设每个样品管装 10 克六氟化铀，每个货包装 10 管，假设铀-235 的质量浓缩度为 5%或更少，则每个货包最大

质量值为 3.5 克。45 克的托运限值在“运输条例”第 570 (c) 段对这些货包的运输作了规定。该托运限值约为提供足够次临界裕度质量值的 1/20（见“运输条例”表 13），约为“运输条例”（2009 年版）规定托运限值的 1/10。本规定下的货包质量限值对应于临界安全指数值 1.0，第 674 (a) 段公式将适用。对应于临界安全指数值为 0.4，第 674 (b) 段公式将适用。然而，一批货物只允许装载 13 个最多 3.5 克的货包。

417.6. “运输条例”第 417 (d) 段遵守了与第 417 (c) 段相同的安全概念：每个货包 2 克的极小质量限值，以及第 570 (d) 段要求。规定每批货物的质量不得超过 15 克。本段旨在使未辐照或辐照易裂变材料（例如用于研究或试验目的的乏燃料）的小样品能够装运。装运含有数量不明易裂变材料的环境样品（小于 2 克）是需要该规定的另一个示例。每个货包 2 克的质量值与“运输条例”表 13 用作次临界质量值的一致质量值的相对比率一致。因此，该规定的 2 克与第 417 (c) 段 3.5 克的比率与“运输条例”表 13 提供的相应铀质量值的比率大致相同。货包质量限值对应的临界安全指数值范围为 0.4（第 674 (b) 段铀-235 公式）至 1.1（第 674 (a) 段铀-235 公式）。由于钚-239 的放射性特性，质量值大于 0.5 克的货物必须以 B (U) 型或 B (M) 型货包装运。因此，假设每个货包 2 克，则为较高的临界安全指数值，对应于第 674 (b) 段将为 0.7。因此，如果要装运的钚质量大于大约 0.5 克，根据对高完整性包装要求，允许对所有易裂变核素进行相同的限值是正当的。同样，第 570 (d) 段对托运人规定的托运限值为 15 克，将意味着一批货物中只允许装载 7 个货包，每个货包最多 2 克。

417.7. “运输条例”第 417 (e) 段给托运人可以获得一项例外，允许在一次运输中装运最多 45 克易裂变核素。对运输监管（独家使用）要求见第 570 (e) 段。该规定可用于已包装和未包装的物质，如小体积废物。这是“运输条例”唯一允许未包装易裂变材料的规定。独家使用规定大大限制了适用性（特别是在空运方面），因此有必要制定第 417 (c) — (d) 段。适用于本可使用第 417 (e) 段运输的大多数物质运输。

417.8. “运输条例”第 417 (f) 段是“运输条例”（2012 年版）引入的一个新概念，目的是向各成员国提供一项规定，规定明确界定的易裂变材料可免于被归类为“易裂变”，只要主管当局根据第 417 段要求证实该物质是安全的。第 606 段之所以需要该规定，是因为成员国开展的核燃料循环过程往往有很大不同，因此可以生产各种风险很低的易裂变材料。处理废物的

方法多种多样，提供了各种易裂变材料，这些物质具有非常不同的特征，但通常具有相同的低临界风险。过去二十年的经验表明，不可能制定能够适当涵盖已查明的低风险易裂变材料多样性的一般规范或要求。在“运输条例”为已知存在的大量例外情况中的每一种纳入规范都是禁止的。第 417 (f) 段所指例外物质的装运，由一个成员国向另一个成员国或通过另一个成员国运输时必须获得多边批准。参考文献[26]（见第 606.7 段）(b) 和 (c) 载有成员国特定例外情况的示例。

418.1. 临界安全可能对所含易裂变材料、任何固定中子毒物和/或其他非易裂变材料的数量、类型、形状和配置十分敏感。因此，装有易裂变材料货包内容物必须按照货包设计的特定规定，要么直接在“运输条例”（见“运输条例”第 222 段、第 417 段、第 570 段、第 674 段和第 675 段），要么在批准证书中。

418.2. 经批准的货包设计和物质遵守“运输条例”第 606 段要求。应当注意在授权内容物的描述任何物质（如内贮器、包装材料、空隙移位器）或可能（可能的或固有的）存在于货包内的重要杂质。符合规定数量的易裂变材料非常重要，因为任何变化都可能因易裂变材料更多而产生更高的中子倍增系数，或者在易裂变材料较少的情况下，可能会因改变最佳水慢化而产生更高的反应性（例如，证书可能需要要求完整的燃料组件完好无损地装运，不得拆下销钉）。在货包中加入未经批准的易裂变材料或其他放射性核素可能会对临界安全产生意想不到的影响（例如，用铀-233 取代铀-235 会产生更高的倍增系数）。同样，将相同数量的易裂变材料置于异质或均质分布中，会对倍增系数产生重大影响。对于低浓缩铀系统，非均匀晶格排列比均匀分布相同数量的物质具有更高的反应性。

## 六氟化铀

420.1. 为了防止在装填和排空过程中超压，规定了装载货包内六氟化铀的质量限值。质量限值应当基于钢瓶的最大六氟化铀工作温度、钢瓶认证的最小内部体积、最小六氟化铀 99.5%纯度以及在最高工作温度下六氟化铀处于液态时的最小 5%安全裕度自由容量[27]。商业六氟化铀的规范见参考文献[28、29]，这些规定六氟化铀的最低纯度为 99.5%。

420.2. 六氟化铀为固态形状，六氟化铀钢瓶内的内压在供运输时低于大气压要求被确定为一种安全的操作方法，并为运输提供最大可能的安全裕度。通常，在气态或液态条件下，在大气压以上的压力，钢瓶中装满六氟化铀。在六氟化铀冷却和凝固之前，钢瓶或相关工厂灌装系统中的包容系统发生故障，可能导致六氟化铀的危险排放。然而，由于六氟化铀的三相点在  $1.013 \times 10^5$  帕的常压下为  $64^\circ\text{C}$ ，如果六氟化铀在热稳定的固态条件下运输，在正常运输工况下不太可能超过三相点温度。

420.3. 满足六氟化铀为固态形状，钢瓶压力小于用于运输的大气压要求，可确保：

- (a) 在运输之前和之后的钢瓶处理以及在正常工况下的运输将以相对于货包性能的最大安全裕度进行。
- (b) 该货包的结构能力得到最大化。
- (c) 货包的包容边界操作正常。满足该要求就排除了在装填操作后没有适当冷却的钢瓶送交运输。

420.4. 世界上最常用的六氟化铀钢瓶的装填限值和特定装填限值的确定标准见参考文献[27]。对于任何其他六氟化铀钢瓶，应当根据这些标准确定装填限值，对于任何需要主管当局批准的钢瓶，应当在提交主管当局的安全文件中列入确定装填限值和装填限值数值的分析。一个安全的装填限值应当适应六氟化铀在加热液态形状时的内部体积，此外，还应当提供容器中液体上方的裕度（即气体体积）。

420.5. 六氟化铀在从固态到液态的相变过程中发生了明显的膨胀，膨胀幅度为 47%（0.19 立方厘米/克至 0.28 立方厘米/克）当从  $20^\circ\text{C}$  的固态变成  $64^\circ\text{C}$  的液态时。此外，液态六氟化铀在从  $64^\circ\text{C}$  加热到  $113^\circ\text{C}$  时，其固态体积将增加 10%（从三相点的 0.28 立方厘米/克增加到 0.3 立方厘米/克）。因此，在最低装填温度和更高温度之间，六氟化铀的体积可能会出现额外的大幅增加。因此，在装满六氟化铀钢瓶的设施中，设计人员和操作人员应当非常小心，以确保钢瓶的安全装填限值不被超过。该点尤其重要，因为如果不小心，可以添加到钢瓶中的物质数量可能大大超过六氟化铀通常被转移到钢瓶中的温度（例如，在  $71^\circ\text{C}$  左右的温度）下的安全装填限值。例如，一个 3964 升的钢瓶，装填限值为 12261 千克，在  $71^\circ\text{C}$  下最多可接受 14257 千克六氟化铀。当加热到  $71^\circ\text{C}$  以上时，液态六氟化铀将完全充满钢

瓶，并可能液压变形和破裂钢瓶。如果加热到 113°C 以上，六氟化铀的数量超过 14 257 千克就会使钢瓶破裂。液压破裂是一种很好理解的现象，应当通过符合既定的装填限值来防止该现象，所依据的装填限值是钢瓶认证的最小体积和所有钢瓶的六氟化铀密度为 121°C，或与钢瓶设计相关的最高温度[30]。

420.6. 在装运六氟化铀钢瓶之前，托运人应当通过使用压力表或其他适当的压力指示设备进行测量，核实其内部压力是否低于大气压。这与 ISO 7195[27]一致，该标准指出，应当使用大气下冷压试验来证实钢瓶是否适合六氟化铀的运输。根据 ISO 7195[27]，除非证实六氟化铀钢瓶的内部压力处于  $6.9 \times 10^4$  帕的部分真空下，否则应当不运输六氟化铀钢瓶。货包的操作程序应当规定以该方式测量的允许最大低于大气压的压力，这将是可接受的装运，该测量的结果应当包括在适当的文件中。装运前的试验也应当按照商定的管理系统程序完成。

420.7. 在“运输条例”引入 UN 3507 的原因是为了便利六氟化铀样品的装运。以前并不清楚在第 7 类或第 8 类的条件下应当执行这些货包的装运。

420.8. 如果六氟化铀的数量很少，通常是样品，少于 0.1 公斤，则允许用例外货包。此类少量六氟化铀的运输必须遵守“运输条例”第 419 (c) 段和第 420 段规定的要求。

## 货包的分类

### 例外货包的分类

422.1. 例外货包内容物的限值是与放射性物质全部排放相关的危害与 A 型货包排放部分内容物的危害一致（见附录 I）。

422.2. 可在例外货包中运输的非特殊形状固态物质的基本活度限值为  $10^{-3}A_2$ 。该限值是在假想 100% 的放射性物质可以排放的基础上得出的在发生事故时从例外货包中取出。在该情况下排放的最大活度（即  $10^{-3}A_2$ ）与用于确定  $A_2$  值的剂量模式中假想从 A 型货包排放内容物的分数（见附录 I）相当。

422.3. 在特殊形状固态物质的情况下，任何可弥散放射性物质排放的概率都很小。因此，如果放射性毒性是唯一要考虑的危害，对于特殊形状固态物质在例外货包内可以接受更高的活度限值。然而，特殊形状的性质并不提供任何额外的保护使其免受外部照射。因此，包含特殊形状物质的例外货包的限值是基于一值而不是二值。特殊形状固态物质的基本限值为  $10^{-3}A_1$ 。这将非屏蔽特殊形状物质的外部剂量率限值在用于确定一值剂量率的千分之一。

422.4. 对于气态物质，其论据与固态物质相似，因此，气态物质的基准例外货包限值也是非特殊形状的  $10^{-3}A_2$ ，对于特殊形状也是  $10^{-3}A_1$ 。应当指出，在元素气体的情况下，货包限值是极其悲观的，因为二值的推导已经包含了 100%扩散的假设（见附录 I）。

422.5. 氟气被单独列出，因为氟气的实际二值远高于 40 太贝可，这是二值普遍适用的最大值。与其他气体相比， $2 \times 10^{-2}A_2$  值是保守的，即使考虑到氟气转换为氟化水。

422.6. 就液体而言，由于认为在事故中发生泄漏的可能性更大，因此采用了 10 的额外安全系数。因此，液态物质的基准例外货包限值设定为  $10^{-4}A_2$ 。

422.7. 例外货包不能归类为易裂变。如果例外货包含有易裂变材料，则要求该货包遵守“运输条例”第 417(a) — (f) 段各项规定。

422.8. 对于小于 0.1 千克六氟化铀的装运，另见本“安全导则”第 420.7 段和第 420.8 段以及“运输条例”第 618 段。

423.1. 如果放射性物质被包装在仪器仪表或其他制造物体内，或构成该仪器仪表或制造物体的部件，并且在发生事故时提供了额外的保护以防止物质泄漏，则允许基本限值以外的限值。在大多数情况下，增加的保护程度被评定为 10 系数，从而导致对这些物项的限值是基本限值的 10 倍。在本示例中使用的 10 系数和其他对基本限值的变体都是实用制定的系数。

423.2. 对于气体没有额外的防护等级，因此含有气体源的仪器仪表和制成品的物项限值与含有未封闭在仪器仪表或物体中的气态物质的例外货包的限值保持不变。

423.3. 包装既减少了内容物损坏的可能性，也减少了固态或液态形状的放射性物质从货包内逸出的可能性。因此，包含固体或液体来源的仪器仪表和制成品的例外货包限值被设定为单独仪器仪表或物体的物项限值的 100 倍。

423.4. 对于含有气体源的仪器仪表和物体的货包，货包仍然可以提供一些防止损坏的保护，但它不会显著减少任何可能在其内部排放气体的逸出。因此，含有气体源的仪器仪表和物体的例外货包限值只被设定为单独仪器仪表或物体的物项限值的 10 倍。

423.5. “运输条例”第 423 (b) 段允许豁免每种消费品的单独标记。在该情况下，需要在货包内表面标记“放射性”，以便在打开货包时，放射性内容物的识别容易和清晰可见。

424.1. 见第 422.2—422.6 段。

426.1. 用天然铀或贫化铀制造的物体可归类为 LSA-I，因此可在工业货包中运输。但是，如果这些物质包含在由金属或其他坚固材料制成的非活化护套中，它们可以在例外货包内运输。该护套有望防止氧化或磨损，吸收所有  $\alpha$  辐射，降低  $\beta$  剂量率，并减少潜在的污染风险。

### **空包装的运输额外要求和控制**

427.1. 以下示例描述了潜在的替代装运方式，其中“运输条例”第 427 段不适用：

- (a) 由于损坏或其他机械缺陷而不能安全关闭的空货包，可采用遵守“运输条例”要求的替代方式，例如根据特殊安排装运。
- (b) 含有残留放射性物质或内部污染的空货包，超过“运输条例”第 508 段规定的非固定污染限值的 100 倍，只应当按照与残留放射性或污染的数量和形状相适应的货包类别装运。

427.2. 确定空包装内部的残留内部活度（见“运输条例”第 427 (c) 段）可能是一项困难的任务。除直接涂抹（擦拭）外，可使用的各种方法或方法组合包括：

- (a) 总活度测量；

- (b) 放射性核素直接测量；
- (c) 材料衡算，例如，通过根据内容物的活度或质量以及在清空货包后去除的活度或质量的结果“差异”计算得出。

无论使用哪种方法或方法组合，在测量过程中都应当注意防止人员过度和不必要的照射。当空包装的包容系统打开时，应当特别注意可能的高剂量率。

427.3. 六氟化铀容器中的残留物质在排空时往往会形成“残渣”。这些残渣通常不是纯六氟化铀，而是由不像六氟化铀那样容易升华的物质（杂质）组成（如氟化铀酰、铀子代、裂变产物、超铀元素）。清空时应当采取步骤以确保货包符合第 427 段要求，如果是作为空包装装运，并在重新装运时确保残渣局部的剂量率不过高，运输文件适当地说明残渣，并且六氟化铀含量和残渣的组合满足适当的物质要求。适当的评定为了满足相关的监管要求，在倒空或重新装入时进行清洁可能是必要的。关于进一步的情况，见参考文献[27、30]和第 546.5 段。

427.4. 标签的目的是提供当前货包内容物的信息。此前显示的任何标签可能给出错误的信息。

## A 型货包的分类

429.1. 见第 402.1 段。

430.1. “运输条例”第 430 段给出的公式，可用于放射性核素的混合物，也可用于单独 A 型货包内的单独放射性核素（见本“安全导则”第 1.79 段）。

## B (U) 型、B (M) 型或 C 型货包的分类

433.1. 非特殊形状物质的  $3000A_2$  限值是考虑到参考文献[31]风险分析工作而确定的。关于空运事故中 B (U) 型货包的性能。它也是要求 B (M) 型货包装运批准的阈值数量。

433.2. 关于特殊形状放射性物质的内容物限值，根据 Q 系统，这类物质采用  $3000A_1$  与  $3000A_2$  放射性物质内容物限值并行。然而，对于某些  $\alpha$  发射体， $A_1$  与  $A_2$  的比值可能高达  $10^4$ ，这将导致潜在的货包负载相当于  $3 \times 10^7 A_2$  不是分散形状的。这是不可取的，特别是如果特殊形状放射性物质

在非常严重的事故中部分破坏。特殊形状撞击试验与 B (U) 型或 B (M) 型货包撞击试验之间的相似性意味着, 与 B (U) 型或 B (M) 型货包相比, 特殊形状放射性物质的排放量可能比 B (U) 型或 B (M) 型货包低 100 倍, 允许内容物限值增加 100 至 300 000  $A_2$  倍。采用  $10^5 A_2$  值作为保守估计。

433.3. 非弥散形状或密封在坚固金属胶囊中放射性物质的污染危害最小, 尽管直接放射性危害仍然存在。研究表明, 根据现行标准批准的某些特殊形状放射性物质在发生空中事故后仍能保持其包容功能[31]。因此, 特殊形状放射性物质的定义所提供的额外保护足以用 B (U) 型或 B (M) 型货包空运活度达  $3000 A_1$  或  $10^5 A_2$  的特殊形状放射性物质。

#### 第四节 参考文献

- [1] AMERSHAM 国际公司《与国家辐射防护委员会沟通所供运输工具上货包的库存数据》(1986 年)。
- [2] FINLEY, N.C., McCLURE, J.D., REARDON, P.C., WANGLER, M., “A 型放射性物质货包联运事故后果分析”, 《放射性物质包装和运输》第 89 期(国际研讨会论文集, 华盛顿特区, 1989 年), 田纳西州橡树岭国家实验室(1989 年)。
- [3] GELDER, R., MAIRS, J.H., SHAW, K.B., “20 年期间英国运输事故和事件的放射性影响”, 《放射性物质包装和运输》第 86 期(国际研讨会论文集, 达沃斯, 1986 年), 国际原子能机构, 维也纳(1987 年)第 371—380 页。
- [4] MOHR, P.B., MOUNT, M.E., SCHWARTZ, M.E., “1998 年 12 月 31 日密西西比州布鲁克海文附近发生的一起涉及放射性药物的公路事故”, 加利福尼亚州大学辐射实验室第 53587 (NUREG/CR4035) 号报告, 核管制委员会, 华盛顿特区(1985 年)。
- [5] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织, 《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号, 国际原子能机构, 维也纳(2014 年)。

- [6] 欧洲委员会《确定低于欧洲指令报告中未作要求浓度和数量（豁免值）的原则和方法》，《辐射防护》第 65 号，Doc.X028/93，欧洲共同体官方出版物办公室，卢森堡（1993 年）。
- [7] FRANCOIS, P., 等，“放射性物质运输豁免值的应用”，国际放射防护协会第 9 期（国际放射防护协会第 9 届国际会议论文集，维也纳，1996 年）第 4 卷，国际放射防护协会，维也纳（1996 年）第 674 页。
- [8] 国际原子能机构《再加工铀安全运输暂行导则》，国际原子能机构《技术文件》第 750 号，国际原子能机构，维也纳（1994 年）。
- [9] NITSCHKE, F.等，“审查国际原子能机构运输条例 SSR-6 LSA II 和 LSA III 物质要求的安全概念”，《放射性物质包装和运输》第 2016 期（国际会议论文集，神户，2016 年），日本机械工程师学会，东京（2016 年）。
- [10] BECKER, D.L., BURGESS, D.M., LINDQUIST, M.R., “装运港反应堆压力容器和中子屏蔽罐部件可能的水上事故评定”，《放射性物质包装和运输》第 92 期（国际研讨会论文集，横滨，1992 年），科学技术局，东京（1992 年）。
- [11] CLOSS, J.W, “探路者退役：反应堆容器包装和运输”，《放射性物质包装和运输》第 92 期（国际会议论文集，横滨，1992 年），科学和技术局，东京（1992 年）。
- [12] POPE, R.B., 等，“在包装和运输过程中描述被 A<sub>2</sub> 值有限的放射性物质污染的大型物体的表征”，《放射性物质包装和运输》第 98 期（国际研讨会论文集，巴黎，1998 年），核安全和保护研究所，巴黎（1998 年）。
- [13] HILBERT, F., KUBEL, M., “两台蒸汽发生器从 KWO 核电厂运至 EWN 临时贮存地点”，《放射性物质包装和运输》第 2007 期（国际研讨会论文集，迈阿密，2007 年），核材料管理学会，伊利诺伊州迪尔菲尔德（2007 年）。

- [14] DYBECK, P., BROMAN, U., “瑞典堆芯部件和大型污染物体的运输”, 《放射性物质包装和运输》第 2007 期 (迈阿密国际研讨会论文集, 2007 年), 伊利诺伊州迪尔菲尔德核材料管理研究所 (2007 年)。
- [15] SVAHN, B., ZIKA, H., WELLEMAN, E., NILSSON, T., “从当局角度看瑞典大件物体运输经验”, 《放射性物质包装和运输》第 2007 年 (国际会议论文集。迈阿密, 2007 年), 伊利诺伊州迪尔菲尔德核材料管理研究所 (2007 年)。
- [16] NITSCHKE, F., FASTEN, C., “德国大型设备运输: 一些经验和监管方面”, 《放射性物质包装和运输》第 2010 期 (国际研讨会论文集, 伦敦, 2010 年), 运输部, 英国 (2010 年)。
- [17] KOMAN, S., DROSTE, B., WILLE, F., “大型核电厂部件运输机械设计评定经验”, 《放射性物质包装和运输》第 2010 期 (伦敦国际会议论文集, 2010 年), 英国运输部 (2010 年)。
- [18] SCHIFFER, W., HILBERT, F., “根据 TS-R-1 要求对装运的蒸汽发生器进行鉴定”, 《放射性物质包装和运输》第 2010 期 (国际会议论文集, 伦敦, 2010 年), 英国交通部 (2010 年)。
- [19] BOYLE, R.W., WILLIAMS, J.L., “美国大型设备的监管救济”, 《放射性物质包装和运输》第 2004 期 (国际研讨会论文集, 柏林, 2004 年), 拉姆特兰斯出版社, 英国阿什福德 (2004 年)。
- [20] 美国能源部《非反应堆核设施的空气排放分数/速率和可呼吸分数》(DOE-HDBK-3010-94), 美国能源部, 华盛顿特区 (1994 年)。
- [21] GRAY, I., “关于 LSA/SCO 材料运输的改进型放射性基准和修订后要求的制定”, 《放射性物质包装和运输》第 2004 期 (国际研讨会论文集, 柏林, 2004 年), 拉姆特兰斯出版社, 英国阿什福德 (2004 年)。
- [22] 国际原子能机构《国际原子能机构放射性物质安全运输条例中易裂变材料运输修订规定的应用》(2012 年版), 国际原子能机构《技术文件》第 1768 号, 国际原子能机构, 维也纳 (2015 年)。

- [23] PAXTON, H.C., PRUVOST, N.L., “含铀-235、钚-239 和铀-233 系统的临界尺寸”，第 L10860-MS 号报告，新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室（1987 年）。
- [24] 美国核学会《反应堆外钚—铀混合燃料的核临界控制与安全》，第 ANSI/ANS-8.12-1987 号报告；R1993；R2002（R=重申），美国核学会，伊利诺伊州拉格兰奇帕克（2002 年）。
- [25] 洛斯阿拉莫斯国家实验室《核临界安全导则》，第 L12808 号报告，新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室（1996 年）。
- [26] 美国核管制委员会《易裂变材料分级的豁免》，联邦法规第 10 篇第 71.15 部分，美国政府出版办公室，华盛顿特区（2013 年）。
- [27] 国际标准化组织《核能—六氟化铀运输包装》（ISO 7195:2020），国际标准化组织，日内瓦（2020 年）。
- [28] 美国试验与材料协会《六氟化铀浓缩标准规范》（ASTM-C787-15），美国试验与材料学会，宾夕法尼亚州费城（2015 年）。
- [29] 美国试验与材料学会《铀-235 浓缩至低于 5%的六氟化铀标准规范》（ASTM C996-15），美国试验与材料学会，宾夕法尼亚州费城（2015 年）。
- [30] 美国浓缩公司，参考号：USEC-651，美国浓缩公司，华盛顿特区（2006 年）。
- [31] HUBERT, P.等，“试验标准和概率方法规范：空运中钚的概率安全评定和风险管理案例”，PSA 87，TÜV 出版社，科隆（1987 年）。

## 第五节

### 运输要求和控制

#### 首次装运前要求

501.1. 放射性物质运输的托运人应当确保包装的制造符合设计规范和相关部门批准证书（见“运输条例”第 547 段关于托运人装运所需的证实或声明）。

501.2. 为了确保放射性物质的安全运输，“运输条例”规定了管理系统的一般要求（“运输条例”第 306 段）和合规保证（“运输条例”第 307 段）。还规定了特定的视察要求，以确保符合对货包完整性、辐射安全和临界安全有重大影响的包装特点（见“运输条例”第 501—503 段）。这些要求包括首批货物之前和以后每批货物之前的视察。

501.3. 在货包的设计阶段，应当准备文件以确定如何使每个制造包装完全遵守“运输条例”相关要求。每份文件都应当由每个制造阶段直接负责人授权（例如签署）。部件的视察结果（如尺寸、结构材料、泄漏率）应当记录下来，即使它们在规定的制造公差范围内。应当按照管理系统将填妥的文件存档（见“运输条例”第 306 段）。

501.4. 如果包容系统的设计压力超过 35 千帕，则应当确认包容系统处于“已制造”状态是足够的。例如，这可以通过试验来实现。对于带有充气阀和/或排气阀的容器，这些开口可用于将包容系统加压到其设计压力。如果包容系统没有该贯穿，容器及其密封可能需要使用特别夹具进行单独试验。在这些试验中，密封完整性应当使用为货包正常使用而建立的程序进行评价。

501.5. 在对容器进行制造后试验和视察，以评定 B (U) 型、B (M) 型、C 型和含有易裂变材料货包的屏蔽效能时，可通过对完成的组装进行辐射试验来检查屏蔽部件。该试验的辐射源不必是考虑运输的物质，但应当注意使屏蔽性能相对于能量、能谱和辐射类型进行适当的评价。还应当特别注意包装材料的均匀性和接头处局部剂量率增加的可能性。货包辐射屏蔽完整性的试验方法见参考文献[1、2]、第 659.16 段和第 659.17 段。

501.6. 容器的完整性应当通过适当的泄漏试验进行评定（见第 659.1—659.12 段和第 659.21—659.24 段）。

501.7. 包装传热特征的视察应当包括尺寸检查，特别注意通风孔、表面发射率和吸收率以及传导路径的连续性。证实试验通常只对原型货包是必要的，可使用电加热器代替放射源进行。

501.8. 对临界安全有重要意义的包装部件在制造后和首次装运前需要进行视察和/或试验。应当完成相关包装部件和焊缝的尺寸和材料视察，以确保包装部件按设计制造和定位。试验通常涉及对中子毒物的存在和分布的保证，如第 501.9 段所述。

501.9. 在临界安全取决于中子吸收体存在的情况下，优选中子吸收体是固体并且是包装的组成部分。吸收体溶液或水溶性吸收体不适用于此目的，因为无法保证其持续存在。确认程序或试验应当确保包装部件内中子吸收体的存在和分布与临界安全评定中假想一致。仅仅保证中子吸收材料的数量并不总是足够的，因为中子吸收体在包装部件内的分布，或者在包装内容物本身内的分布，对系统的中子倍增系数有显著的影响。在核实与临界安全评定的一致性时，应当考虑确认技术中的不确定性。

501.10. 相关进一步信息，见参考文献[3—5]。

## **每次装运前要求**

502.1. 运输放射性物质的托运人应当确保货包内容物遵守“运输条例”和相关批准证书的要求（见“运输条例”第 547 段关于托运人所需的装运证实或声明）。

502.2. 在包装用于非设计材料之前，必须对货包设计进行额外的评定，必须确认和记录此类材料的符合性，并在适当的情况下获得主管局的批准。

502.3. 对于乏燃料或放射性废物，并不总是有详尽无遗的放射性核素清单。然而，内容物应当符合货包设计的评定内容。

503.1. 在每次装运前，托运人应当确保按照“运输条例”相关要求和相关的批准证书（另见“运输条例”第 547 段关于托运人所需的装运批准或声明）准备装运货包。

503.2. 除了“运输条例”对某些货包在首次装运前（见“运输条例”第 501 段）和任何货包每次装运前（见“运输条例”第 502 段和第 503 段）规定要求之外，托运人应当确保在装运期间只使用适当的吊装附件，并应当核实是否符合热稳定性和压力稳定性要求（见第 503 (b) 段）。

503.3. 应当制定视察和试验程序，以确保满足包装要求。应当将合规情况记录在案，作为管理系统的一部分（见“运输条例”第 306 段）。如果装有放射性物质的货包已存储很长时间，则应当在装运前进行视察，以核实货包是否遵守“运输条例”和批准证书的相关要求。这些视察可以成为旨在定期监控货包在存储期间性能计划的一部分，这可能是几年到几十年。在存储前、存储期间和存储后装运前进行视察的示例见参考文献[6]。

503.4. 货包的批准证书是货包设计符合监管要求和货包可用于运输的证据。托运人有责任确保每个单独货包符合批准证书和“运输条例”相关要求。确认货包符合适用规定和运输准备状态的检查应当记录在案，并由直接负责此操作人员授权（如签字）。这些检查的结果（如泄漏率）即使在规定的公差范围内也应当记录下来，并与以前的试验结果进行比较，以便任何退化迹象都可能变得明显。应当按照管理系统将填妥的文件存档（见“运输条例”第 306 段）。

503.5. 装有易裂变材料货包的批准证书表明货包的授权内容（见“运输条例”第 418 段和第 838 段）。在每次装运前，应当核实易裂变材料内容物是否具有批准内容物清单所规定的特征。当证书明确要求可去除中子毒物或其他可去除临界控制特点时，应当酌情进行视察和/或试验，以确定这些中子毒物或控制特点的存在、正确位置和/或浓度。吸收体或水溶性吸收体的溶液不被认可用于此目的，因为不能确保它们的持续存在。确认程序或试验应当确保货包内中子吸收体或控制特点的存在、正确位置和/或浓度与临界安全评定中假想一致。仅仅核实控制物质的数量并不总是足够的，因为货包内的分布可以对系统的反应性产生重大影响。

503.6. 应当制定并遵守程序，通过测量一段时间内的温度和压力，确保装载的货包达到稳态工况。在任何试验的性能中，都应当确保所选的方法提供所需的灵敏度，并且不会降低货包的完整性。不符合批准设计要求的，应当充分记录并向批准该设计的主管当局报告。

503.7. 每一个 B (U) 型、B (M) 型和 C 型货包在关闭后和运输前都应当进行试验，以确保符合要求的密封性。一些国家主管部门可能允许先进行组装核实程序，然后进行不太严格的泄漏试验，以提供满足设计条件的同等信心。组装核实程序的一个示例是：

首先，全面视察和/或试验空包装的完整包容系统。然后，放射性内容物可装入包装，作为组装核实程序的一部分，只需视察和/或试验装入期间打开的关闭部件。

如果货包由特殊形状放射性物质提供包容，可通过持有根据管理系统编写的证实相关来源的密封性证书来证实合规性。如果设想采用该程序，应当咨询相关国家的主管当局。

503.8. B (U) 型、B (M) 型和 C 型货包的泄漏试验要求，包括所进行的试验、试验频率和试验灵敏度，是根据 ISO 12807[5]所述的正常和事故工况下货包的最大允许泄漏率和标准泄漏率计算的。对于某些 B (U) 型、B (M) 型或 C 型货包，可能没有必要进行高度敏感的装运前泄漏试验，这取决于例如所含物质和该物质的允许泄漏率。此类物质的一个示例可能是超过 LSA-II 的比活度限值但不符合 LSA-III 的条件。该物质的物理特征可能包括有限的活度浓度和降低物质分散性的实物形状。载有此类物质货包可能需要进行装运前泄漏试验，但试验可以是简单的直接试验，如参考文献 [4、5]所述的气体 and 肥皂泡定性试验或气体压降和压升定量试验。

503.9. “运输条例”第 677—685 段指出的测量方法，应当核实待运输的辐照核燃料符合临界安全评定中证实的条件，满足“运输条例”第 673—685 段标准。通常，建议用于已知浓缩的辐照核燃料安全评定的主要条件是能耗和衰变特征，因此，这些参数应当通过测量加以核实。测量技术应当取决于燃料误载的可能性以及由于辐照而产生的可用次临界裕度。例如，随着贮存在反应堆水池中的各种辐照状态的燃料元件数量以及排放和装运之间时间长度的增加，误载的可能性也随之增加。同样，如果在临界评定中使用 10 吉瓦日每吨铀 (GW·D/MTU) 的辐照，但组件设计证书不允许在

组件中装载低于 40 吉瓦日每吨铀的燃料，则使用具有很大不确定性的技术对辐照进行测量核实可能是足够的。然而，如果使用 35 吉瓦日每吨铀的辐照进行临界评定，核实辐照的测量技术应当更加可靠。允许装载和/或装运辐照物质所需满足的测量标准应当在批准证书中明确规定（获得相关使用中测量方法的信息见参考文献[7]）。

503.10. 批准证书应当确定由于临界安全评定中对单个隔离货包的泄漏所做的假设而需要关闭含有易裂变材料货包的任何要求（见“运输条例”第 680 段）。应当进行视察和/或试验，以确定已满足防止漏水的所有要求。

## 其他货物的运输

505.1. 这项规定的目的是防止其他货物受到放射性污染。（见第 513.1—513.4 段和第 514.1 段）

505.2. 以遵守第 508 段规定，污染限值应当适用于表面任何部分 300 平方厘米任何面积的平均值。

506.1. 如果允许危险货物相互接触可能会发生反应。例如，这可能是由于腐蚀性物质泄漏或导致爆炸事故造成的。为了尽量减少装有放射性物质的货包因与其他危险货物的相互作用而失去包容完整性的可能，要求在运输或存储过程中与其他危险货物隔离。该隔离的程度通常由个别国家或公认的运输组织（如国际海事组织、国际民用航空组织）确定。

506.2. 相关特定存储、堆垛和隔离要求的信息，如适用，见国际运输组织 [8—15] 和各国监管文件中的规定。由于这些国家法规和规定经常被修订，因此应当查阅现行版以确定最新要求。

## 内容物的其他危险特性

507.1. “运输条例”对与放射性物质的运输相关辐射和临界危害提供了可接受的控制水平。除了一个例外（六氟化铀，见“运输条例”第 631 段），“运输条例”不包括放射性核素运输的物理和化学形状可能造成的危害。在某些情况下，该附属危害可能超过放射性危害。因此，遵守“运输条例”要求并不免除其用户考虑内容物的其他潜在危害性质的需要。

507.2. “运输条例”（1996 年版）首次根据化学危害、放射性危害和临界危害对六氟化铀的包装要求作出规定。六氟化铀是唯一一种在制定“运输条例”要求时考虑到附属危害的商品（见“运输条例”第 631 段）。

507.3. 联合国建议[16]将所有放射性物质归类为第 7 类。在例外货包的放射性物质的情况下，其他危害性质可能优先考虑。联合国建议[16]规定了所有危险货物包装的性能试验，并将其分类如下：

第 1 类 — 炸药；

第 2 类 — 气体；

第 3 类 — 易燃液体；

第 4 类 — 易燃固体、容易自燃的物质、与水接触时会发出易燃气体的物质；

第 5 类 — 氧化性物质和有机过氧化物；

第 6 类 — 毒性和传染性物质；

第 7 类 — 放射性物质；

第 8 类 — 腐蚀性物质；

第 9 类 — 杂项危险物质及物体，包括对环境危害物质。

507.4. 除了满足“运输条例”对其放射性特性要求外，放射性托运物还必须符合相关国际运输组织规定要求和各国对任何其他危害特性通过的适用规定。例如，这包括关于标签和运输单据中应当提供的信息要求，还可能包括额外的货包设计要求和适当当局的批准。

507.5. 如果相关国际标准组织对附属危害所规定的包装要求比“运输条例”对放射性危害所规定要求更为严格，则对附属危害要求将优先[16]。

507.6. 对于在压力下运输的放射性物质，或在运输过程中可能产生内部压力的情况，或当货包在装填或排放过程中加压时，货包可能在相关成员国压力容器规则的范围內。

507.7. 联合国建议[16]规定了对具有放射性和易裂变特性以外危害性质的货物包装进行性能试验。

507.8. 应当按照适当的国家和国际“运输条例”规定，显示额外危害的标签。

507.9. 由于国际运输组织以及个别成员国颁布的条例经常被修订，应当查阅适用条例的现行版本，以确定对附属危害适用哪些补充规定。

## 污染和泄漏货包要求和控制

508.1. “运输条例”规定了在常规运输工况（见“运输条例”第 106 段）下货包和运输工具表面的非固定污染限值。货包表面的限值由参考文献[17]为“运输条例”（1961 年版）制定的放射学模式推导。总之，本模式所考虑的照射途径包括皮肤外照射、摄取和吸入再悬浮物质。考虑仅限于常用的最危害放射性核素，即  $\alpha$  发射体中的钷-239 和镅-241 以及  $\beta$  发射体中的锶-90/钇-90。这些推导的限值与实验室和电厂工作区普遍接受的数值相对应，因此对于运输货包来说是保守的，因为工作人员的照射时间和装卸时间预计要比实验室或活跃电厂的工作人员少得多。自该推导以来，尽管辐射防护参数发生了变化，但污染限值没有变化。

在第 309.1 段所述的污染问题之后。开发了一个基本模式来评价货包非固定表面污染对工作人员和公众的年剂量[18]。

参考文献[18]结论之一的污染限值在“运输条例”第 508 段是保守的，尤其是对辐照核燃料货包装运。然而，决定保留任何货包外表面非固定污染的现有保守限值。

508.2. 在货包被  $\alpha$  发射体污染的情况下，通常确定推导污染限值的照射途径是吸入从货包表面再悬浮物质。相关的再悬浮系数的值（以贝可/立方厘米每贝可/平方厘米为单位）受到很大的不确定性，但该领域的研究在参考文献[19]进行了回顾。报告的数值范围很广，涵盖原子能机构建议的一般使用数值[20]为  $5 \times 10^{-5}$ /米，它假设只有一小部分再悬浮的活度可能是可呼吸的。在大多数情况下，非固定污染水平是通过用滤纸或干棉絮或其他类似性质的物质擦拭已知区域来间接测量的。通常的实践是假设擦拭物上的活度只代表表面上总的非固定污染物的 10%。擦拭上的分数将包括最容易获

得再悬浮的活度。表面上残留的活度代表了不太容易重新被污染。适用于运输货包上非固定污染物总量的再悬浮系数的适当值为  $10^{-5}$ /米。在含有从被铯-239 污染的货包表面再悬浮污染的大气中，年照射时间为 1000 小时 0.4 贝可/平方厘米，再悬浮系数为  $10^{-5}$ /米，所承诺的有效剂量约为 2 毫希沃特。在被镭-226 污染的情况下，承诺的有效剂量为 0.1 毫希沃特。对于大多数  $\beta - \gamma$  发射体来说，皮肤基底细胞的照射是限制照射途径。2007 年国际放射防护委员会建议[21]建议了 7 毫克/平方厘米作为基底细胞的标称深度，但将深度范围扩大到 2—10 毫克/平方厘米。一些研究[22—24]提供了 7 毫克/平方厘米标称深度或 5—10 毫克/平方厘米范围内的剂量率换算系数。铯-90/钇-90 以 4 贝可/平方厘米的浓度污染皮肤，每工作日 8 小时，对皮肤产生的等效剂量约为每年 20 毫希沃特，与 GRS Part 3[1]规定的 500 毫希沃特的年限值相比[25]。这是假设货包表面和皮肤之间的传递系数唯一。

508.3. 在实践中，由于天气和/或装卸等因素的影响，看似固定的污染可能变得非固定。在大多数情况下，小货包的外表面受到轻微污染，污染几乎完全可以去除或非固定，测量方法应当反映该点。然而，在某些情况下，例如燃料瓶在装载辐照燃料时可能浸没受污染的冷却水池水中，情况不一定如此。诸如铯-137 之类的污染物可能会强烈地附着或渗透到钢表面。污染可能会在孔隙、细裂缝和缝隙中根深蒂固，尤其是在盖子密封件附近。随后的风化、暴露在雨水中，甚至暴露在潮湿的空气条件下，可能会导致一些固定的污染物排放出来或变得非固定。在出发前必须注意使用适当的去污方法来降低污染水平，以便在行程中预计不会超过非固定污染的限值。应当认识到，在某些情况下，在行程结束时可能会超过非固定污染限值。然而，由于在计算非固定污染的推导限值时使用了悲观和保守的假设，该情况通常不会造成显著危害。在该情况下，收货人应当通知托运人，以便托运人能够确定原因，并尽量减少今后此类事件的发生。

508.4. 在所有情况下，货包外表面的污染水平应当保持在合理可达尽量低水平。确保该点最有效的方法是防止表面被污染。应当不断评审卸载、装载和装卸方法以实现该点，在上述燃料瓶的特殊情况下，水池浸没时间应当尽量减少，并应当设计有效的去污技术。在可能的情况下，密封区域应当通过高压喷雾清理，并应当特别注意将瓶体和瓶盖之间的污染水降至最低。使用“裙边”来消除与冷却水池中受污染水的接触，可以防止瓶表面的污染。如果无法做到该点，则使用可剥离涂料、用清水预湿并尽快开始

去污，可大大减少污染。应当特别注意清除接头和密封区的污染。尽可能避免表面弄脏。擦拭脏的表面既能去除污垢，又能磨蚀底层的基质，特别是如果后者相对较软，例如油漆或塑料。因此，通过松散的污垢本身被污染，或者通过擦拭脏的表面从底层基质上产生松散的污染，污垢可以导致非固定的污染。油漆和塑料在阳光下会受影响。除其他作用外，紫外光会氧化油漆或塑料表面，从而增加阳离子交换容量。这使得暴露在环境中的表面越来越容易受到一些可溶性污染物的污染。

508.5. 应当记住，如果所有货包的污染接近限值，则在运输仓库、机场航站楼和铁路编组站等地对货包的日常装卸和存储可能会导致工作区域的污染积聚。应当进行检查，以确保任何此类积聚不会发生在定期装卸货包的地区。同样，建议检查例行装卸货包人员的手套或其他衣物。

508.6. “运输条例”对货包上的固定污染水平没有规定特定限值，因为由此产生的外部照射将与内容物的穿透辐射结合在一起，货包的总剂量率由其他特定要求控制。但是，对运输工具的固定污染设定了限值（见“运输条例”第513段），以尽量减少由于磨损和风化等原因而使其变得非固定的风险。

508.7. 在少数情况下，可以直接使用污染监控器进行污染测量。该测量将包括固定和非固定污染。只有在进行测量的装置本底辐射水平或货包内容物的剂量率不干扰的情况下才是可行的。在大多数情况下，必须通过用涂片擦拭已知区域并在不受其他源辐射影响的区域测量转移到涂片上的活度来间接测量非固定污染水平。

508.8. 推导的非固定污染限值适用于面积为 300 平方厘米的平均水平，或者适用于总表面积小于 300 平方厘米的整个货包。非固定污染的水平可以通过用滤纸、干棉絮或其他类似性质的物质手工擦拭 300 平方厘米的面积来确定。在较大包货包上采集的涂片样品的数量应当代表整个表面，并应当选择包括已知或预计比表面其余部分污染更严重的区域。对于一个大货包，如辐照燃料瓶的例行调查，通常的实践是选择大量固定的一般位置，以帮助确定模式和趋势。应当注意不要连续擦拭相同的位置，因为这将使大片区域不受检查，并将减少被检查区域的污染水平。

508.9. 涂片样品的活度可以用便携式污染监控仪或使用标准计数系统来测量。在将计数率转换为表面活度时必须小心，因为许多因素，如计数效率、几何效率、计数器校准和从表面移除到涂片样品的污染分数，都会影响最终结果。

508.10. 为避免低估活度，计数系统所用校准源的  $\beta$  能量应当不大于被测量污染物的  $\beta$  能量。实际上，通过擦拭试验去除的污染物比例可能在很大范围内变化，并取决于表面的性质、污染物的性质、擦拭时使用的压力、用于试验物质的接触面积、擦拭技术（例如 300 平方厘米区域的缺失部分或加倍擦拭它们）以及操作人员估计面积为 300 平方厘米的准确性。通常的实践是假想去除的分数是 10%。这通常被认为是保守的（即，它导致高估污染水平）。其他分数可以使用，但只有在实验确定的情况下。

508.11. 适用“运输条例”第 508 段，有必要了解放射性同位素组成的表面污染（见参考文献[18]）。

508.12. 用户应当开发与其特定情况相关的特定污染测量技术。这些技术包括使用涂片和适当的调查工具。所选择的仪器仪表和探测器应当考虑到可能要测量的放射性核素。当存在低能量的  $\beta$  或  $\alpha$  发射体时，在选择适当的能量依赖性的仪器仪表时应当特别小心。应当认识到，涂片的尺寸和探测器敏感区的尺寸是决定总效率的重要因素。

508.13. 操作人员应当接受充分的培训，以确保以一致的方式获得样品。营运商之间的比较在这方面可能是有价值的。提请注意，如果不同组织使用不完全兼容的技术，就会出现困难——特别是在将非固定污染水平维持在接近零值的情况下。

509.1. 见第 508.1—508.13 段。

510.1. 由合格人员进行视察的主要目的，是评定放射性内容物是否已发生或预计会发生泄漏或丧失屏蔽完整性，并保证货包是安全的，遵守“运输条例”要求，如果不是这样，则评定损坏或泄漏的程度以及放射性影响。在极少数情况下，可能有必要沿路线扩大调查和研究，包括运输工具和装卸设施，以查明和清理任何受污染的地区。研究可能需要包括评定外部剂量和运输工作人员和公众可能摄入的放射性物质。

510.2. 装有损坏货包的车辆，如似乎正在泄漏，或似乎严重凹陷或破裂，应当予以扣留和保护，直到合格人员宣布安全为止。

513.1. 在运输放射性物质的过程中，运输工具可能会因货包上的非固定污染而受到污染。如果运输工具的污染程度超过根据“运输条例”第 513 段的规定，应当对其进行去污，直到污染程度低于这些水平并尽可能低（见“运输条例”第 508 段）。该要求不适用于运输工具的内表面，前提是该运输工具仍专门用于运输放射性物质或独家使用的表面污染物体（见第 514.1 段）。

513.2. 还对固定污染设定了限值，以最大限度地减少因磨损和/或风化等原因而变为非固定的风险。

513.3. 如果运输工具上的非固定污染物超过“运输条例”第 508 段限值。运输工具应当进行去污，并在去污后对固定污染物进行测量。由表面固定污染物引起的剂量率可以使用放在运输工具表面附近的合适的便携式仪器仪表来测量。这些测量应当在运输工具装载之前进行。

513.4. 如果固定污染程度相对较高的货包由相同的运输工作人员定期处理，可能不仅需要考虑穿透辐射，还需要考虑来自该污染的非穿透辐射。工作人员从穿透辐射中接受的有效剂量可能足够低，以至于没有必要单独监控。如果已知固定污染水平可能很高，则应当谨慎地推导一个工作限值，以限制工作人员手的接触。

513.5. 关于表面剂量率的测量，见第 220A.1—220A.7 段。

514.1. 虽然尽快对货运集装箱或运输工具进行去污，使其能够用于运输其他物质通常是一种良好实践，但在某些情况下，例如铀或钍矿石的运输，运输工具基本上专门用于运输放射性物质，包括未包装的放射性物质，并且不断受到污染。在使用独家使用运输工具实践很普遍的情况下，只要这些货运集装箱或运输工具仍在独家使用用途中，就有必要对这些运输工具或货运集装箱进行快速去污（视适用情况而定）作出例外规定。每次使用后，内表面的去污可能会导致工作人员不必要的照射。另一方面，不断暴露在环境中的外表面通常更容易去污，应当在每次使用后去污到适用限值以下。

514.2. 当货运集装箱或运输工具用于运输放射性物质货包时，“运输条例”第 509 段和第 513 段要求完全适用，以避免货运集装箱或运输工具的内表面污染对货包造成污染。

## 例外货包的运输要求和控制

515.1. 例外货包是指放射性内容物限制在低水平的货包，其潜在危害低到不需要适用于其他类型货包设计的严格设计规定。除了例外货包的特定要求（见“运输条例”第 515 段）外，其他要求视例外货包内容物而定。例如，一个装有易裂变材料的例外货包有“运输条例”第 417 (a) — (f) 段所述的额外要求。

516.1. 例外货包表面的剂量率不得超过 5 微希沃特/小时的规定，是为了确保感光材料不会受损，对公众的任何辐射剂量都将微不足道。

516.2. 一般认为，不超过 0.15 毫希沃特不会导致未冲洗的照相胶卷产生不可接受的雾化。装有该胶卷的货包必须与照射时最大剂量率为 5 微希沃特/小时的例外货包保持照射 20 小时以上，才能接受 0.1 毫希沃特以上的辐射剂量（见第 562.11—562.13 段）。

516.3. 根据同样的论据，将例外货包与人员特别隔离是没有必要的。对公众的任何辐射剂量都是微不足道的，即使这样货包被携带在车辆的客舱内。

516.4. 为了测量剂量率，应当使用适当的仪器仪表（即应当对所测量的辐射类型敏感并进行校准）。在大多数情况下，只需要考虑穿透辐射（ $\gamma$  射线和中子）。为了确定货包表面的剂量率，通常在仪器仪表紧贴货包表面时，取仪器仪表上显示的读数就足够了。所用的仪器仪表应当尽可能与货包的尺寸相比较小。考虑到例外货包的尺寸通常较小，具有小检测室的仪器仪表（盖革—穆勒管、闪烁计或电离室）最适合用于此目的。仪器仪表应当可靠、状态良好、保养和校准得当。

516.5. 在确定最大剂量率时，应当考虑到潜在的显著放大现象，如放射性内容物的移动，或在装有液体货包的情况下，内容物状态的变化，包括放射性核素的分离和/或沉淀。这些现象需要通过对在货包外表面测量的最大剂量率应用修正系数或使用最大值来考虑。此修正系数或最大值应当在货

包使用说明中提供。在任何情况下应当在装运前进行剂量率测量，并应当通过考虑任何此类系数来确定最大潜在剂量率。

## 工业货包或未包装的低比活度物质和表面污染物体运输的要求和控制

517.1. “运输条例”对低比活度物质和表面污染物体的初始定义是，如果失去包装，在事故工况下，内容物产生的剂量率可能超过 A 型货包所认为可以接受的剂量率。由于用于运输低比活度物质和表面污染物体的工业货包不需要承受运输事故，在“运输条例”（1985 年版）启动了一项规定，将货包内容物的数量限制在将非屏蔽材料或物体在 3 米处的外部剂量率限值在 10 毫希沃特/小时的范围内。由于事故导致的低比活度物质或表面污染物体的几何变化预计不会导致该外部剂量率的显著增加。这将与低比活度物质和表面污染物体相关的事故后果限制在与 A 型货包相关的事故后果基本相同的水平，其中  $A_1$  值基于 A 型货包的未屏蔽内容物，在 1 米距离处产生 100 毫希沃特/小时的剂量率。

517.2. 如果固态放射性废物基本上均匀分布放置在厚壁混凝土货包内的混凝土基质中，该混凝土墙提供屏蔽，因此，“运输条例”第 517 段要求适用于没有该混凝土墙时的剂量率。然而，在离未屏蔽混凝土基质 3 米处的剂量率可能是通过直接测量混凝土包装的厚壁外进行评定，然后考虑混凝土壁的屏蔽作用进行校正。该方法也可以用于其他类型的包装。

520.1. 根据“运输条例”第 413 (a) (iii) 段和第 520 (c) 段，SCO-I 在无法到达表面上的非固定污染可能超过第 413 (a) (i) 段指出的值。设施退役后的管道等物体必须准备好进行无包装运输，以确保不会有放射性物质泄漏到运输工具中。例如，可以在管道两端使用端盖或塞子（见第 413.7 段）。

520.2. 允许无包装的表面污染物体运输的基本概念是，尽管无包装，但当外部包封（例如外壳）被视为包装时，该物体很可能符合适用的 IP 型货包要求。除了允许无包装运输外，可能需要排除对 IP 型货包的某些要求，前提是证实了以更严格的操作控制为形式的补偿性安全措施，以确保相同的安全水平。

520.3. SCO-III 的运输必须使用书面运输计划。运输计划应当包括权限、责任、要求、预防措施、先决条件、指示、人员限制、应急响应行动、包括任何运输转移的辐射防护计划以及与运输相关的事件序列。

520.4. 作为 SCO-III 运输计划的一部分，应当特别注意辐射防护计划，因为作为 SCO-III 的物体运输将以不同于常规货包运输的方式进行，可能涉及不熟悉放射性物质运输的工作人员。因此，它应当考虑到运输的所有步骤和活动以及所有相关的运输工作人员和公众。应当仔细评审来自物体的剂量率、运输和装卸方法—包括每项活动的工作人员与物体的持续时间和距离—并应当对工作人员和公众的剂量最优化。

520.5. 运输计划还应当涉及以下几点：

- (a) 对外表面的剂量率没有明确的限值（然而，在离物体 3 米处有 10 毫希沃特/小时的限值，在车辆外表面有 2 毫希沃特/小时的限值）。因此，由于尺寸与大多数货包相比，这些物体移动缓慢，运输计划应当包含特别预防措施，以确保保护工作人员和公众，包括在适用的装卸阶段，并控制接触该物体。
- (b) 没有义务给 SCO-III 贴上标签。因此，运输计划应当载有规定确保工作人员被告知物体附近的剂量率，以便他们能够采取行动，帮助自己的照射最优化。运输计划亦应当载有根据辐射防护计划通知公众的规定。
- (c) SCO-III 对装载、堆垛、运输、装卸或卸载的任何补充要求。

520.6. 对于 SCO-III，“运输条例”第 722 段自由跌落试验要求，应当适用于为运输而准备的 SCO-III，包括永久附着在部件上的部份，如密封和屏蔽，而无需任何固定设备或系统。

520.7. 如果运输计划中的条件有效地防止了 SCO-III 在运输过程中，包括装卸过程中，在某些方向朝上跌落或撞击，那么在评定最大破坏时可以忽略这些方向。证实可以遵守“运输条例”第 701 段提到的任何方法进行。

520.8. SCO-III 包括所有密封的开口和裂缝以及额外的屏蔽，应当能够承受在常规运输工况下可能产生的任何加速度、振动或振动共振的影响。这是为了遵守“运输条例”第 613 段规定的常规运输工况。

521.1. 低比活度物质和表面污染物体的潜在危害越高，货包的完整性就应当越高。在评定潜在危害时，“运输条例”已考虑到低比活度物质的实物形状。

521.2. 见第 226.1 段。

522.1. 低比活度物质和表面污染物体的运输活度限值考虑了液体、气体和可燃固体带来的更大危害，以及发生事故时可能的污染水平。

522.2. “运输条例”表 6 的“可燃固体”是指所有能够自行或在火灾中持续燃烧的固态形状的 LSA-II 和 LSA-III。

522.3. 就 SCO-III 而言，装运前安全评定应当表明，在事故附近人员摄入放射性物质的最大限值应当不超过 A 型货包所接受的水平（见附录 VII）。

522.4. 就 SCO-III 而言，允许内河航道船舶以外的运输超过  $100A_2$  的限值，或内河航道船舶的货舱或舱室超过  $10A_2$  的限值，条件是运输计划载有在运输过程中为获得至少相当于适用这些限值时所提供的总体安全水平而采取的预防措施。

- (a) 对于内河船舶来说，下沉时有活度积聚的风险，因为内河航道没有强烈的水流，航道附近也没有任何可能人员活动。每个货舱或舱室的总活度限值解决了该风险。运输计划可包括以下规定：
  - (i) 船舶上的预防措施，以尽量减少下沉的风险；
  - (ii) 指定一个能够在 SCO-III 下沉时将其从水中清除的组织；
  - (iii) SCO-III 的特定特点是在实际长时间浸没的情况下，将最大限度地减少向水中排放活度。
- (b) 对于内河航道船舶以外的运输工具，在密闭空间（例如隧道）发生事故时，存在活度积聚的风险。总活度限值解决了该风险。运输计划可包括以下规定：
  - (i) 使事故风险最小化的控制或特点；
  - (ii) 避开密闭空间的路径约束；
  - (iii) SCO-III 的特定特点是确保在密闭空间发生事故时，最大限度地减少向空气中排放活度。

## 运输指数（TI）的确定

523.1. 运输指数是一个指示物，包括货包、外包装、储罐、货运集装箱、运输工具、无包装 LSA-I、无包装 SCO-I 或 SCO-III 附近的剂量率，用于在运输过程中提供辐射防护措施。

- (a) 如果测量的剂量率包括一种以上的辐射，则运输指数应当基于每种辐射的所有剂量率的总和。
- (b) 铀、钍矿石及其精矿负载的运输指数无需测量剂量率即可测定。取而代之的是在距该负载外表面 1 米的任何一点上的最大剂量率可作为“运输条例”第 523 (a) 段指出的水平。在适用时，仍然需要 100 的倍增系数（第 523 (a) 段和货物最大横截面积的额外倍增系数（“运输条例”第 523 (b) 段和表 7））来确定该型货物的运输指数。

523.2. 对于用储罐、货运集装箱和无包装 LSA-I、SCO-I 和 SCO-III 运输的放射性物质，如果其内容物不能合理地作为点源处理，则负载外的剂量率不会随着距离的增加而减少，如平方反比定律所示。由于平方反比定律构成了计算隔离距离的基准，因此增加了一个适用于大尺寸负载的机制，以补偿距离负载大于 1 米处的剂量率将高于平方反比定律所表明的事实。“运输条例”第 523 (b) 段指出了“运输条例”表 7 的倍增系数，该段指出了一种机制，使所分配的运输指数在更远的距离上与有理由这样做的情况下的剂量率相对应。尽管由于不均匀的自屏蔽、源分布和散射的影响，实际辐射剖面更加复杂，但这些因素与将负载视为宽平面源或三维柱状源 [26] 而不是点源所适用的因素相似。由于在货包周围提供足够的屏蔽以符合运输指数限值（见“运输条例”第 527 段）货包周围的剂量率分布与使用点源模式获得的剂量率分布非常相似，因此不需要对货包应用乘法系数。

523.3. 运输指数应当通过扫描货包包括顶部和底部的所有表面，在 1 米的距离上确定。测量的最高值是确定运输指数的值。同样，储罐、货运集装箱和未包装的 LSA-I 和 SCO-I 物质的运输指数是通过在离表面 1 米处测量确定的，但为了确定运输指数应当根据负载的尺寸采用乘法系数。负载的尺寸通常被视为储罐、货运集装箱或运输工具的最大横截面积，但如果已知其实际最大面积，则可以使用该面积，但前提是该面积在运输过程中不会改变。

523.4. 如果外表面有突起，则在确定 1 米距离时应当忽略突起，但翼片货包除外，在该情况下，可以在距离货包外部包覆层 1 米的距离处进行测量。

523.5. 货包的运输指数应当根据测量的剂量率来确定，考虑货包是孤立的。

523.6. 在确定最大剂量率时，应当考虑到潜在的显著放大现象，如放射性内容物的移动，或在装有液体货包的情况下，内容物状态的变化，包括放射性核素的分离和/或沉淀。这些现象需要通过对距离货包外表面 1 米处测量的最大剂量率应用修正系数或使用最大值来考虑。此修正系数或最大值应当在货包使用说明中提供。在任何情况下，应当在装运前进行剂量率测量，并应当通过考虑任何此类因素来确定最大潜在剂量率。

524.1. 对于硬质外包装、货运集装箱和运输工具，增加运输指数反映了一种保守的实践，因为由于屏蔽和额外距离的影响，所载货包的运输指数总和预计将高于在距离外包装、货运集装箱或运输工具外表面 1 米处测量最大剂量率所得的运输指数。

524A.1. 在非硬质外包装的情况下，运输指数只能确定为所包含的所有货包的运输指数之和。这是必要的，因为外包装的尺寸不是固定的，不同时间的剂量率测量可能会产生不同的结果。

## **托运货物、货运集装箱和外包装临界安全指数的确定**

525.1. 含有裂变材料的所有货包，除“运输条例”第 417 段外，分配其适当的临界安全指数，并应当在标签上显示临界安全指数值，如“运输条例”图 5 所示。托运人应当小心确认每批货物的临界安全指数值与货包标签上提供的临界安全指数值之和相同。

## **货包和外包装运输指数、临界安全指数和剂量率限值**

526.1. 为了符合临界控制和辐射防护的一般要求，对货包和外包装的最大运输指数、最大临界安全指数和最大外表面剂量率设定了限值（见“运输

条例”第 527 段和第 528 段)。在独家使用运输的情况下, 由于额外的操作控制, 可能会超过这些限值(见第 221.1—221.6 段)。

527.1. 在确定最大剂量率时, 应当考虑到潜在的显著放大现象, 如放射性内容物的移动, 或在装有液体货包的情况下内容物状态的变化, 包括放射性核素的分离和/或沉淀。这些现象需要通过对在货包外表面测量的最大剂量率应用修正系数或使用最大值来考虑。该修正系数或最大值应当在货包使用说明中提供。在任何情况下, 应当在装运前进行剂量率测量, 并应当通过考虑任何此类因素来确定最大潜在剂量率, 另见第 526.1 段。

527.2. 对于已清空的六氟化铀钢瓶, 尚不确切知道任何残留放射性物质的数量、位置 and 同位素组成, 以证实遵守“运输条例”第 617 段要求, 并根据关于残留放射性物质的数量、位置 and 同位素组成的最坏情况(根据由钢瓶和残留放射性物质组成的货包设计第 617 段“最大放射性内容物”, 即所谓“后跟”), 计算可以确定一个保守值在钢瓶排空后的一段时间内, 货包周围的剂量率遵守“运输条例”。对于某一货物(即残留放射性物质的真实位置和成分), 可以根据对以前类似运输的剂量率测量结果的分析, 并通过在托运时进行剂量率测量证实遵守“运输条例”, 可以允许提前装运。

528.1. 见第 527.1 段。

528.2. 尽管货包或外包装的外部剂量率允许达到 10 毫希沃特/小时, 但在某些情况下, 对运输工具表面的最大剂量限值为 2 毫希沃特/小时, 或在距离运输工具表面 2 米处任何点的最大剂量限值为 0.1 毫希沃特/小时(见“运输条例”第 573 段)要求可能更加有限。关于子核素在运输过程中的积聚另见第 220A.2 段。

528.3. 见第 527.2 段。

## 类别

529.1. 所有货包、外包装和货运集装箱, 除了完全由例外货包组成的货包外, 都需要指定一个类别。这是贴标签和车辆标牌的先决条件。

529.2. 货包、外包装和货运集装箱，除完全由例外货包组成的货包外，必须被指定为 I 类—白色、II 类—黄色或 III 类—黄色类别之一，以协助装卸和堆垛。在某些情况下，货包运输指数或表面剂量率可能超过最高类别（即 III 类—黄色）的货包、外包装或货运集装箱通常允许的剂量率。在该情况下，“运输条例”要求托运货物在独家使用条件下运输。

529.3. 这些类别定义中固有的剂量率限值是根据假想货包和货物处理程序、运输工作人员的照射时间和照相胶卷的照射时间得出的。这些剂量率限值推导如下[27]:

- (a) 表面照射率为 0.005 毫希沃特/小时：该表面限值不是从辐射对人的影响中得出的，而是从对未冲洗照相胶卷的更有限影响中得到的。1947 年就辐射对敏感 X 射线胶卷影响的评价表明，阈值雾化将在 0.15 毫希沃特的照射下发生，“运输条例”（1961 年版）规定了 0.1 毫希沃特的限值，与 24 小时的标称最大照射时间相关。在后来的“运输条例”（1964 年版、1967 年版、1973 年版和 1973 年（修订版）），24 小时的周期被四舍五入为 20 小时，剂量率限值 0.005 毫希沃特/小时被作为一个朝下四舍五入的值，以在此类运输期间为未冲洗胶卷提供保护。该剂量率被用作 I 类—白色货包表面限值，这将确保胶卷受到辐射损害的可能性很小，或运输工作人员受到不可接受的剂量，而不需要隔离要求。
- (b) 1 米处 0.1 毫希沃特/小时的辐照率：为了限制对胶卷和人的辐射剂量，将上文 (a) 中讨论的 0.1 毫希沃特剂量与离货包 1 米处的辐照率和 1 小时的辐照时间相结合，得出“运输条例”（1964 年版、1967 年版和 1973 年版）的 10 倍运输指数限值。这是基于假想通过时间为 24 小时和常规的隔离距离，美国铁路快运公司在 1947 年使用的装有镭的货包之间 4.5 米（15 英尺）。上述限值将在 24 小时内的 4.5 米处产生约 0.1 毫希沃特的剂量。
- (c) 地表照射率为 2 毫希沃特/小时：除了上文 (b) 所解释的限值外，还适用了地表照射率为 2 毫希沃特/小时的单独限值，其依据是运输工作人员每天携带该型货包 30 分钟，紧贴身体，不得超过当时每 8 小时工作日 1 毫希沃特的允许剂量。虽然该剂量不再是可以接受的，但就辐射安全而言，目前的剂量率限值是适当的，这已得到若干调查的证

实，这些调查确定了运输工作人员的辐射照射情况[28—31]和原子能机构 1985 年进行的一项评定[32]。

人们认识到，货包和运输工具周围的允许剂量率并不能单独确保可接受的低剂量，因此，“运输条例”还要求建立辐射防护计划（“运输条例”第 302 段），并定期评定因运输放射性物质而对人员造成的辐射剂量（“运输条例”第 308 段）。

529.4. 货包类型应当根据测量的剂量率确定，并考虑隔离货包。

529.5. 载运独家使用大型货运集装箱的运输工具本身不必独家使用，但进入该大型货运集装箱的通道必须受到托运人或收货人的严格控制。

## 标记、标签和标牌

530.1. “运输条例”（1996 年版）的实施可能导致多重标签和标记，因为不同主管当局发放的批准证书之间存在差异。已知的情况是 B (U) 型与 B (M) 型，经批准的货包设计与特殊安排、A 型、易裂变 IP 型、易裂变。为了避免在过境点改变标记和标签，根据“运输条例”第 530 段确定只有一个联合国编号（UN 编号）。

## 标记

531.1. 为了保持识别失去正常控制（例如在运输途中丢失或放错地方）货包的收货人或托运人的可能性，需要在货包外部加上识别标记。该标记可以由托运人或收货人的名称或地址组成，也可以是标记包含该信息的单据或运输单据的号码。每个外包装也需要如此标记，除非所有内部货包上的标记在外包装清晰可见。

531.2. 关于遵守标记清晰耐用要求的一般建议，见第 533.2—533.6 段。

532.1. 在发生事件和事故时，货包上标有并在文件中标明的联合国编号提供了重要信息。与设计原产国主管当局发放的批准证书相对应的联合国编号提供了应急管理所需货包类型的信息。

532.2. 联合国放射性物质编号还用于与原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-33 (Rev.1) 号《国际原子能机构〈放射性物质安全运输条例〉(2018 版) 规定细目》[33]要求有关联。这已证实是一个优势，在确定适用要求，以特定的货包或物质类型。如果主管当局认为此申请有价值，联合国编号也可用于合规情况、绩效检查和控制、数据收集和其他统计目的。

532.3. 应当使用 UN 2977 和 UN 2978 取代低比活度物质装运编号，以帮助应急响应小组在发生涉及严重火灾的事故（即比其他低比活度物质发生火灾更严重的危害）[34]时处理六氟化铀造成的特定危害。还考虑到当发生涉及根据特殊安排运输六氟化铀的事故时，最好迅速通知应急响应小组六氟化铀涉及事故。

532.4. 关于符合标记清晰耐用要求的一般建议，见第 533.2—533.6 段。

533.1. 超过 50 公斤总质量的货包可能用机械而不是人工方式装卸，并要求在总质量上做标记，以表明可能需要机械装卸，并符合地面装载和车辆装载限值。然而，在实践中，即使是总质量高达 50 公斤的货包也应当不经常人工装卸。在定期手工装卸货包之前，应当制定一项程序以确保放射性后果尽可能低（见“运输条例”第 302 段）。在可行的情况下应当使用机械手段。为了在这方面有用，标记要求清晰和耐用。

533.2. 货包上的标记应当大字印刷，有足够的尺寸，位置合理，以便容易辨认，同时考虑到可能使用的装卸方法。对于可能使用叉车等机械手段密切接触的轻质货包（即高达几百公斤），应当将 12.5 毫米的字符高度视为适当的最小值。较重的货包将需要更多的“远程”装卸方法，字符尺寸应当相应增加，以允许操作人员在远处读取标记。对于从几十吨到一百吨的最大货包来说，65 毫米的尺寸被认为是足够的。为了确保易读性，如果货包的外部光洁度没有提供足够的对比度，则在标记前应当使用对比背景。白底黑字比较合适。如果货包有不规则的外表面（如翼片或波纹）或不适合直接应用标记的表面，可能需要提供一个平板或平台来放置标记，以提高易读性。

533.3. 标记应当是耐用的，至少可以抵抗正常运输的严苛性，包括风化和磨损的影响，而不会显著降低易读性。提请注意有必要咨询国家和多式联运条例，其中可能载有更严格要求。例如《国际海运货物规则》[8]要求在海洋浸没至少 3 个月后，货包上的所有永久性标记（和标签）都要保持可

识别性。当用板块或盘子来制作标记时，它应当以符合货包本身完整性标准的方式牢固地安装在货包上。

533.4. 标记的方式将取决于货包本身外表面的性质，从印刷标签（例如收货人或托运人的名称、联合国编号和适当的运输名称以及总质量）、用不褪色的油墨或油漆进行模板印刷或软冲压（适用于纤维板或木质包装），再到烙印（适用于木质包装）、用搪瓷或树脂基漆刷漆（适用于许多表面，特别是金属表面），再到金属外包装的硬冲压、压花或“铸入”标记（按耐久性顺序排列）。

533.5. 应当始终咨询适当的国家和多式联运条例，以补充第 533.2—533.4 段一般建议，因为详细要求可能有很大差异。

533.6. 容器所需的定期视察和维护计划应当包括视察所有永久性标记和修复任何损坏或缺陷的规定。这些视察的经验将表明是否在实践中达到了耐久性。

534.1. “运输条例”（1996 年版）引入了用标记识别工业货包要求。该标记的设计与其他类似标记一致，因为它包括“类型”术语以及适当的工业货包说明（例如，IP-2 型）。该标记的设计还避免了与其他“运输条例”缩写“IP”可能用于不同目的的潜在混淆。例如，国际民用航空组织“技术指令”[12]使用 IP 来表示内包装。例如，“IP.3”表示 10 种特定类型的内包装中的一种。

534.2. 关于符合标记清晰耐用要求的一般建议，见第 533.2—533.6 段。

535.1. 所有 B (U) 型、B (M) 型、C 型和易裂变材料货包设计都需要主管当局批准。该货包上的标记（通过识别标记）提供了单独货包与相应的国家主管当局设计批准之间的联系，以及关于主管当局设计批准种类的信息。此外，货包的标记为知识渊博的观察者提供了发生事故时的宝贵信息。

535.2. 有序列号的标记是必需的，因为操作管理系统活动和维护活动是针对每个货包的，并且相应地需要在单独包装的基础上执行和核实这些活动。序列号对于主管当局的合规保证活动和适用“运输条例”第 819 段和第 820 段也是必要的。

535.3. 第 533.2—533.6 段给出了关于标记的易读性、耐久性以及标记的视察和维护的一般建议。然而，只要有可能，主管当局的识别标记、序列号和 B(U) 型、B(M) 型或 C 型标记应当防止变得难以辨认、涂抹或移除，即使在事故工况下也是如此。在货包外表面的三叶形符号附近涂上这样的标记可能是方便的。例如，可以使用压花金属板来组合这些标记。

535.4. 批准的货包设计可以使得不同的内部部件可以与单独最外层部件一起使用，或者货包的内部部件可以在一个以上的最外层部件之间互换。在这些情况下，货包的每一个最外层的部件都具有唯一的序列号，将该货包标记为满足“运输条例”第 535 (b) 段要求的部件组装，但部件的组装必须符合主管当局批准的设计。在该情况下，托运人建立的管理系统应当确保正确识别和使用这些部件。

536.1. 在 B(U) 型、B(M) 型或 C 型货包上标有防水火影响的三叶形符号，是为了确保即使在发生严重事故后，该型货包仍能被明确识别为携带放射性物质。

536A.1. 在某些情况下，货包类型的标记可能与货包上显示的联合国编号不一致，因为联合国编号已经根据货包内容物进行更改。如果在运输过程中发生事故，该不一致可能会让第一响应人感到困惑。因此，任何与联合国编号无关的标记都应当移除或遮盖。

537.1. LSA-I 物质和 SCO-I 可以在“运输条例”第 520 段指出的条件下无包装运输。这些条件之一是为了确保在常规运输工况下不会丢失内容物。根据物质的特征，货包或类似的措施可能适合满足该要求。从实际角度来看，包装也可能是有利的，例如，能够贴上含有收货人或托运人兴趣信息的标签。如果希望清楚地识别托运货物是否载有放射性物质，“运输条例”明确允许在货包或容器上放置该识别标记。必须指出的是，“运输条例”并不要求该标记，然而，该选项可用于被认为有用的应用。

## 标签

538.1. 运输工作人员需要了解货包、外包装、储罐和货运集装箱中含有放射性物质的情况，并需要知道存在潜在放射性和临界危害。标签通过三叶形符号、颜色和类别（I 类—白色、II 类—黄色或 III 类—黄色）以及裂变标签提供该信息。通过标签，可以识别 (a) 与放射性内容物相关的放射性

或临界危害；以及 (b) 适用于货包、外包装、储罐或货运集装箱的存储和堆垛规定。

538.2. 放射性物质标签是国际上用来识别各类危险货物的一套标签的一部分。设立这套标签的目的，是透过符号使危险货物易于从远处辨认。为识别运载放射性物质的货包、外包装、储罐和货运集装箱而选择的特定符号是三叶形（见“运输条例”第 536 段和图 1）。

538.3. 货包、外包装、储罐或货运集装箱的内容物，除了其放射性性质外，在其他方面也可能是危害的，例如腐蚀性或易燃性。在这些情况下，必须符合与该额外危害相关的条例。这意味着除了放射性物质标签外，还需要在货包、外包装、储罐或货运集装箱上显示其他相关标签。

539.1. 对于储罐或货运集装箱，由于集装箱可能会被其他货运集装箱和储罐遮盖，标签需要在 4 个侧面都显示，以确保标签可以看到而不必搜索，并尽量减少标签被其他货物遮盖的机会。对于敞开式货柜，标签应当贴在平台或角柱的一侧，或贴在任何其他适当的表面上，标签在上面清晰可见。

### **放射性内容物标签**

540.1. 除了确定内容物的放射性性质外，标签还载有关于内容物的更特定的信息（即核素的名称，或在放射性核素混合物的情况下最具限制性的核素和活度）。在含有易裂变核素的情况下，可使用以克为单位的易裂变核素总质量或其倍数来代替活度。在发生事件或事故时，这些信息是重要的，因为可能需要关于内容的信息来评价危害。LSA-I 不需要关于内容物的更特定的信息，因为此类物质的放射性危害较低。

540.2. 黄色标签还显示货包、外包装、储罐或货运集装箱的运输指数。运输指数信息在存储和堆垛方面是必不可少的，因为它用于控制货物的积聚和分离。“运输条例”对货运集装箱和非独家使用运输工具中的运输保险总额给出了限值（见“运输条例”表 10）。

540.3. 在识别最具限制性的放射性核素时，目的是将放射性核素混合物识别为标签上的内容物，不仅应当考虑最低的  $A_1$  或  $A_2$  值，而且还应当考虑所涉放射性核素的相对数量。例如，识别最具限制性的放射性核素的一种方法是确定各种放射性核素的值：

$$f_i/A_i \tag{5.1}$$

式中

$f_i$  是放射性核素  $i$  的活度；

$A_i$  是放射性核素  $i$  的  $A_1$  或  $A_2$  值（视情况而定）。

最高值代表最具限制性的放射性核素。

**临界安全标签**

541.1. 临界安全指数是“运输条例”第 568 段和第 569 段所要求的用于控制临界安全目的货包堆垛的值。控制是通过将临界安全指数的总和限制在“运输条例”表 11 所列的数值来提供的。

541.2. 载有临界安全指数的标签应当按“运输条例”第 538 段要求出现在装有易裂变材料的货包上。临界安全指数标签是类别标签（类别 I 类—白色、II 类—黄色和 III 类—黄色）之外的额外标签，因为其目的是提供关于临界安全指数的信息，而类别标签提供关于运输指数和内容物的信息。临界安全指数标签还将货包标记为含有易裂变材料。

541.3. 与运输指数一样，临界安全指数提供了与存储和堆垛安排相关的重要信息，因为它被用来控制存储和确保适当分离含有易裂变材料货物。“运输条例”规定了货运集装箱和运输工具中临界安全指数总量的限值（见“运输条例”表 11）。

542.1. 见第 541.1—541.3 段。

**标牌**

543.1. 大型货运集装箱和储罐（以及公路和铁路车辆（见“运输条例”第 571 段）上使用的标牌，其设计方式与货包标签类似（尽管它们没有标明运输、内容物和活度的详细信息），以便明确识别危险货物的危害。在货

运集装箱和储罐的所有 4 个侧面展示标牌，确保从各个方向随时识别。标牌的尺寸是为了便于阅读，即使在远处也是如此。为避免需要过多的标牌和标签，放大的标牌只可用于同时具有标牌功能的大型货运集装箱和储罐上。

543.2. 对于敞开式货柜，标牌应当贴在平台或角柱的一侧，或贴在任何其他适当的表面，标牌在其上清晰可见。

544.1. 联合国编号的显示可提供关于所运输放射性物质类型的信息，包括其是否为易裂变材料，以及相关货包类型的信息。在发生导致放射性物质泄漏的事件或事故时，该信息很重要，因为它有助于负责应急响应人员确定适当的响应行动（见第 401.1 段）。

## 托运人责任

545.1. 托运人应当根据其管理系统采取适当行动，以确保能够证实遵守“运输条例”要求。这并不意味着放置车辆等行动必须由托运人自己进行。

## 托运的详情

546.1. 托运人为遵守“运输条例”第 546 段而提供的信息清单。目的是将托运货物的确切性质通知承运人和收货人以及其他相关各方，以便采取适当行动。在提供该信息时，还提醒托运人注意在整个运输和调度准备过程中适用于托运货物的监管要求（见第 532.1 段）。

546.2. “运输条例”表 1 列出了适当的运输名称和相应的联合国编号。

546.3. 请托运人注意“运输条例”第 546 (k) 段关于外包装、货运集装箱或运输工具中货包托运的规定。每个货包或货包组都需要有相应收货人的文件，这对于托运人的声明很重要。除托运人外，任何人都不能作此申报，因此，托运人必须确保为混合托运货物的所有部分准备适当的文件，以便这些货物在从外包装、货运集装箱或运输工具中取出后能够继续其行程。

546.4. 在从“运输条例”表 1 选择适当的运输名称时应当谨慎行事。非大写（即大写）字母的条目部分不被认为是正确运输名称的一部分。当正确的送货名称包含连词“或”时，则只应当使用可能的备选项之一。以下示例说明 UN 2909、UN 2915 和 UN 3332 条目的正确运输名称的选择：

UN 2909 放射性物质，例外货包—用天然铀制造的物体或贫铀或天然钍，正确的运输名称为下列适用说明：

UN 2909 放射性物质，例外货包—用天然铀制造的物体，放射性物质，例外货包

UN 2909 放射性物质，例外货包—用贫化铀制造的物体，放射性物质，例外货包

UN 2909 放射性物质，例外货包—用天然钍制造的物体，放射性物质，例外货包

UN 2915 的放射性物质，A 型货包，非特殊形状、非裂变或裂变例外，正确的运输名称为：

UN 2915 放射性物质，A 型货包。

UN 3332 的放射性物质，A 型货包，特殊形状，非裂变或裂变例外，正确的运输名称是：

UN 3332 放射性物质，A 型货包，特殊形状。

从 UN 3332 的示例可以看出，增加的特征（在本示例中是“特殊形状”）是正式运输名称的一部分，小写的“非裂变或裂变例外”不是正式运输名称的一部分。

546.5. 与联合国编号概念的解释和使用相关的另一个示例涉及以前装有放射性物质的空包装（即 UN 2908）。如果货包内有残留物或残渣，例如六氟化铀货包内，该包装应当不称为“空包装”，而应当作为货包装运（即不作为包装）。残留数量将决定货包类别（见第 427.3 段）。

546.6. 货物在运输过程中的最大活度要求在运输单据中特定说明（“运输条例”第 546 (g) 段）。在某些情况下，由于迁移过程中子核素的积聚，活度可能会增加。在该情况下，应用适当的校正来确定最大活度。

546.7. 关于最具限制性的核素鉴定的建议见第 540.3 段。适当的一般描述可包括相关的辐照（或废）核燃料或特定类型的放射性废物。

546.8. LSA-II 和 LSA-III 以及 SCO-I 和 SCO-II 必须以  $A_2$  的倍数表示总活度。对于 SCO-I 和 SCO-II，应当根据表面污染水平和受污染表面积的尺寸计算活度。在无法确定核素的情况下，应当使用可能的  $\alpha$  核素和  $\beta - \gamma$  核素中最低的  $A_2$  值来计算总活度。

### **提供给承运人的信息**

554.1. 关于 SCO-III 的装载、堆垛、运输、装卸和卸载，见第 520.4 段。

### **管有证书及指示**

561.1. 托运人除了拥有货包批准证书的副本外，还必须确保其有必要的指示，以适当地关闭和准备货包以便运输。在一些国家，托运人可能有必要向适当的主管当局登记为该证书的用户。

## **在途运输和存储**

### **运输和存储过程中的隔离**

562.1. 在放射性物质运输中应用的操作控制可包括使用隔离距离。隔离距离通常作为总运输指数的函数，以及一些时间依赖关系而制成表格。这些表格一般是在全球或国家一级得出的（例如国际民用航空组织的技术指示 [12]），其中包括许多托运人、装运人和承运人对照射最多的工作人员或公众的代表人。

562.2. 根据在推导隔离表时使用参数的历史，最初在每种情况下（工作人员和公众）都选择了剂量限值的一小部分，并使用被认为是现实的模式来推导每种运输方式的隔离距离。随着更真实的数据产生[35—37]，显然所使用的模式是非常保守的。因此，随着剂量限值的降低，模式和剂量标准被证实继续提供充分的隔离[38]。通过将实践的所有方面（而不仅仅是隔离）与运输的适当剂量限值（作为一个整体一而不仅仅是一个运输操作）进行比较，目前表格的使用被认为提供了足够的安全水平。

562.3. 在编写“运输条例”（1996 年版）期间进行了评审。考虑到剂量约束的发展哲学，研究了用于建立隔离距离的模式和剂量标准，如参考文献[39]所述。（原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-9 号《放射性流出物排入环境的监管控制》[40]采用的方法）。0.7 毫希沃特的剂量限值被认为适合于公众中的一个关键群体照射来自诸如运输放射性物质等实践的直接辐射。该限值被设想为一般适用于全球运输操作，而不是某一特定托运人的操作。在一系列的三次技术会议上，积极收集和评价了关于对公众成员的评定照射的信息。这表明，公众从这些操作中接受的照射远远低于模式中使用的剂量标准，也低于适当的剂量约束[37]。这些研究的结论是，现有的隔离表加上“运输条例”其他要求，规定了适当水平的辐射安全，并与使用适当的剂量约束相一致。

562.4. 使用隔离距离本身并不消除建立辐射防护计划和执行计划所采取措施的必要性，也不保证放射性物质运输适当的最优化。

562.5. 职业照射工作人员每年 5 毫希沃特的剂量标准，公众成员每年 1 毫希沃特的剂量标准（见“运输条例”第 562 (a) 和 (b) 段）被用来计算适用于整个运输操作的隔离表（即。在某些情况下，托运人和/或承运人可能宜制定适用于个别装运或运输活动的隔离表。对于这些计算，应当明确界定特征，因此模式可能更加现实。在这些情况下，公众照射的相关剂量标准将需要大幅下调（工作人员也可能如此），以考虑到其他运输操作照射（或工作人员的其他照射来源）的可能性。

562.6. 在计算隔离距离的模式中，应当考虑许多特定于运输模式的考虑和条件。其中包括考虑屏蔽和距离如何影响某一位置积聚的运输指数与居留地区剂量率之间的关系，以及工作人员和公众照射放射性物质的时间如何取决于他们与放射性物质一起旅行的频率和持续时间。这些可以通过使用问卷、调查和测量来确定。在某些情况下，在货包附近短时间照射，例如在海上航行的视察或维护工作期间，可能比在更经常居留区域以较低剂量率长时间照射更为重要。附录 III 给出了一个使用模式确定客运和货运飞机最小隔离和隔离距离的示例。

562.7. 不可避免地，该计算将基于在特定情况下可能与实际参数不同的假设。模式应当是健稳和保守的。应用所得的隔离距离导致可接受的低剂量比计算距离的基准更重要。然而，运输模式可能会发生变化，剂量应当不断评审。

562.8. 简朴的优点应当不被忽视。清晰和简单的需求比复杂和严格的需求更容易被遵守，也更有可能被遵守。《国际海运危险货物规则》[8]简化隔离表给出了不同类型船舶的实际隔离距离，以及营运商将《国际民用航空组织技术指示》[12]隔离距离转换为每次船舶的运输指数限值，都是这方面的良好示例。

562.9. 在计算运输区存储的隔离距离时，应当考虑货包的运输指数和最长居留时间。如果对距离的有效性有任何疑问，可以通过测量实际剂量率来进行检查。

562.10. 如果不同类别的危险货物一起运输，泄漏货包内的内容物可能会影响邻近的货物，例如，腐蚀性物质的泄漏可能会降低放射性物质货包的包容系统的有效性。因此，在某些情况下，发现有必要限制可能与其他类别附近运输的危险货物类别。在某些情况下，可以简单地说明哪些类别的危险货物需要与其他类别的危险货物分开。为了提供一个完整和简单的程序来理解必要的隔离，已经发现以简明的表格形式表示这些信息是有用的。作为一个示例，《国际海运危险货物规则》[8]第 7 部分的隔离表被复制为本“安全导则”表 2。

562.11. 虽然不是辐射防护问题，但在 1947 年对快速 X 射线胶卷的辐射照射影响的评价[41]确定，当照射在超 0.15 毫希沃特的 $\gamma$ 辐射剂量的情况下，胶卷在冲洗后可能会出现轻微的雾化。这可能会干扰胶卷的正确使用，并提供不正确的诊断解析。其他类型的胶卷也容易雾化，尽管所需的剂量要高得多。由于采用因胶卷类型而异的隔离程序是不可行的，“运输条例”规定旨在限制所有未冲洗胶卷在从托运人到收货人的任何行程中的照射量不超过 0.1 毫希沃特。

562.12. 海运（以天或周为单位）和空运或陆运（以小时或天为单位）所涉及的不同持续时间意味着使用不同的隔离距离表，因此在运输过程中，每种模式的总胶卷曝光是相同的。照相胶卷的分销和使用可能涉及一种以上的运输方式和一种以上的装运。因此，当为一种特定的运输方式建立隔离距离表时，只有“运输条例”第 562 段指出限值的一小部分，应当分配给该模式。在道路运输中，司机在停车时，可在车辆周围留出至少 2 米的空地，以确保与其他车辆所载的照相胶卷有足够的隔离。

562.13. 由于邮袋通常含有未冲洗胶卷，不会被识别为未冲洗胶卷，因此谨慎的实践是以识别未冲洗胶卷的方式保护它们。

表 2. 类别之间的隔离示例  
(摘自《国际海运危险货物规则》参考文献[8])

| 类别           | 1.1 | 1.3 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 3 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 5.1 | 5.2 | 6.1 | 6.2 | 7 | 8 | 9 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|
|              | 1.2 | 1.6 |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
|              | 1.5 |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 易爆           | 1.1 | *   | *   | 4   | 2   | 2   | 4 | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 2   | 4   | 2 | 4 | X |
|              | 1.2 |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
|              | 1.5 |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 易爆           | 1.3 | *   | *   | 4   | 2   | 2   | 4 | 3   | 3   | 4   | 4   | 4   | 2   | 4   | 2 | 2 | X |
|              | 1.6 |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 易爆           | 1.4 | *   | *   | 2   | 1   | 1   | 2 | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | X   | 4   | 2 | 2 | X |
|              |     |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 易燃气体         | 2.1 | 4   | 4   | 2   | X   | X   | 2 | 1   | 2   | X   | 2   | 2   | X   | 4   | 2 | 1 | X |
|              |     |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 无毒，不易<br>燃气体 | 2.2 | 2   | 2   | 1   | X   | X   | 1 | X   | 1   | X   | X   | 1   | X   | 2   | 1 | X | X |
|              |     |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 有毒气体         | 2.3 | 2   | 2   | 1   | X   | X   | 2 | X   | 2   | X   | X   | 2   | X   | 2   | 1 | X | X |
|              |     |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 易燃液体         | 3   | 4   | 4   | 2   | 2   | 1   | 2 | X   | 2   | 1   | 2   | 2   | X   | 3   | 2 | X | X |

表 2. 类别之间的隔离示例  
(摘自《国际海运危险货物规则》 参考文献[8]) (续)

| 类别                              | 1.1 | 1.3 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 3 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 5.1 | 5.2 | 6.1 | 6.2 | 7 | 8 | 9 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|
|                                 | 1.2 | 1.6 |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
|                                 | 1.5 |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 易燃固体 (包括自反<br>应和相关的物质和脱<br>敏炸药) | 4.1 | 4   | 3   | 2   | 1   | X   | X | X   | 1   | X   | 1   | 2   | X   | 3   | 2 | 1 | X |
| 易于自然的物质                         | 4.2 | 4   | 3   | 2   | 2   | 1   | 2 | 2   | 1   | X   | 1   | 2   | 1   | 3   | 2 | 1 | X |
| 与水接触会释放易燃<br>气体的物质              | 4.3 | 4   | 4   | 2   | X   | X   | 1 | X   | 1   | X   | 2   | 2   | X   | 2   | 2 | 1 | X |
| 氧化性物质 (试剂)                      | 5.1 | 4   | 4   | 2   | 2   | X   | 2 | 1   | 2   | 2   | X   | 2   | 1   | 3   | 1 | 2 | X |
| 有机过氧化物                          | 5.2 | 4   | 4   | 2   | 2   | 1   | 2 | 2   | 2   | 2   | 2   | X   | 1   | 3   | 2 | 2 | X |
| 有毒物质                            | 6.1 | 2   | 2   | X   | X   | X   | X | X   | 1   | X   | 1   | 1   | X   | 1   | X | X | X |
| 传染性物质                           | 6.2 | 4   | 4   | 4   | 4   | 2   | 2 | 3   | 3   | 2   | 3   | 3   | 1   | X   | 3 | 3 | X |
| 放射性物质                           | 7   | 2   | 2   | 2   | 2   | 1   | 1 | 2   | 2   | 2   | 1   | 2   | X   | 3   | X | 2 | X |

| 表 2. 类别之间的隔离示例<br>(摘自《国际海运危险货物规则》 参考文献[8]) (续) |     |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
|------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|
| 类别                                             | 1.1 | 1.3 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 3 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 5.1 | 5.2 | 6.1 | 6.2 | 7 | 8 | 9 |
|                                                | 1.2 | 1.6 |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
|                                                | 1.5 |     |     |     |     |     |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |
| 腐蚀性物质                                          | 8   | 4   | 2   | 2   | 1   | X   | X | X   | 1   | 1   | 2   | 2   | X   | 3   | 2 | X | X |
| 杂项危险物质和物体                                      | 9   | X   | X   | X   | X   | X   | X | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X | X | X |

数字和符号与参考文献[8]第7节定义的以下术语相关:

- 1 — “从离开”。
- 2 — “从隔离”。
- 3 — “被一个完整的隔间或货舱隔开”。
- 4 — “被一个完整的隔间或货舱纵向隔开”。
- X — 隔离 (如有) 见参考文献[8]的危险货物清单。
- \* — 见参考文献[8]第7.2.7.2段。

## 运输过程中堆垛及途中存储

564.1. 在“运输条例”范围内，“堆垛”是指相对于其他货物（放射性和非放射性），将装有放射性物质的货包放在运输工具内或运输工具上。关于托运货物的堆垛，“保持”是指在日常运输过程中，酌情使用衬垫、支撑、垫块或系带来限制货包，防止其在运输工具内或运输工具上移动。当货运集装箱用于运输包装好的放射性物质或用作外包装时，应当考虑将货包限制在货运集装箱内。在装卸或运输货运集装箱时，应当使用捆绑、抛网或分隔等保持方法，防止货包损坏。当货运集装箱或其他大型箱式集装箱用作包装时，应当考虑限制集装箱内的内容物，以防止集装箱在装卸和常规运输工况所产生的静态和动态应力下受到损坏，从而可能危及包容系统或屏蔽完整性。

564.2. 出于几种原因，需要将货包保持在运输工具内或运输工具上。由于运输过程中运输工具的运动，如果不加以约束，小型货包可能会在运输工具内或运输工具上跌落或滚动从而导致损坏。货包也可能从运输工具上跌落，导致其丢失或损坏。如果不适当地固定，沉重的货包可能会在运输工具内或运输工具上移动位置，这可能会使运输工具不稳定从而导致事故。货包也应当受到限制避免移动，以确保运输工具外部、司机或乘员受到的辐射剂量率不会增加。

564.3. 关于保持方法的更多指导见附录 IV。

565.1. 某些 B (U) 型、B (M) 型和 C 型放射性物质货包可能会发热。这是由于辐射能量被货包的部件吸收，并热传导至货包表面，然后传递至周围空气。在该情况下，散热能力被设计到货包中，并代表一种安全和正常的条件。例如，钴-60 每 40 太贝可产生大约 15 瓦。由于大部分热量被货包的屏蔽层吸收，总热负荷可达到数千瓦的数量级。如果货物中有几个类似的货包，问题可能会变得更加复杂。除了适当考虑货包旁边的物质外，还应当注意确保任何装有货包的隔间内的空气流通不会受到限制，以免导致货包附近区域的环境温度显著升高。承运人应当注意不要覆盖货包、与其他货物重叠或密闭包装，以降低货包的散热能力，因为这些可能起到隔热作用。当放射性物质货包散发大量热量时，托运人必须向承运人提供关于如何正确堆垛货包的指示（见“运输条例”第 554 段）。

565.2. 研究表明，如果货包内的产热率很小（相当于表面热通量小于 15 瓦/平方米），即使货包完全被散装货物包围，也可以仅通过热传导散热，温度也不会超过 50℃。货包之间的间隙允许通过空气对流进行足够的散热。

566.1. 限制成组、在运输工具或货运集装箱中堆积货包主要有两种原因。当货包放在很近的地方时，需要进行控制：

- (a) 以防止由于单独货包的组合剂量率而产生高于可接受的剂量率。对于非独家托运的货物，这是通过限制运输指数来实现的。经计算，距离运输指数为 50 的车辆表面 2 米处的理论最大剂量率是 0.125 毫希沃特/小时，因不太可能达到最大值，可认为是 0.1 毫希沃特/小时。实践认证了这些值的可接受性。
- (b) 通过限制含有易裂变材料的货包之间的中子相互作用来防止临界。在任何货包组内，临界安全指数的限值为 50（在独家使用条件下为 100），同时货包组之间的间距为 6 米，这些措施提供了保证。

566.2. 对于货运集装箱的运输，可适用“运输条例”表 10 或表 11 的一个以上条目。例如，在海轮上运载的大型货运集装箱，对整艘船的运输指数或临界安全指数都有限制，而对任何一个货舱、舱室或规定的甲板区域的运输指数和临界安全指数都有限制。还需要注意，脚注中提出的几项要求适用于某些装运。这些脚注是要求，不仅仅是为了信息。

566.3. 如果托运货物是以独家使用方式运输的，单次运输没有运输指数限值。同样，对于 LSA-I 的托运，单次运输没有运输指数限值。

567.1. 临界安全指数大于 50 的任何托运货物必须采用独家使用方式运输（见第 526.1 段）。“运输条例”第 684 段和第 685 段的临界评定中假想装载安排由相同货包的安排组成。参考文献[42]讨论了在阵列中混合货包设计的理论货包布置，并指出了与相同货包的布置相比，中子倍增系数有可能增加。虽然该安排在实践中不太可能，但在确定临界安全指数超过 50 的货物的装载安排时，应当谨慎行事。还应当注意确保混合设计的货包被适当安排，以保持安全的配置[43]。如果货物的临界安全指数超过 50，还要求获得货物批准（见“运输条例”第 825 段）。

## 与易裂变材料的过境运输和存储相关额外要求

568.1. 保持 6 米间距的要求是临界控制所必需的。如果两个存储区被墙、地板或类似的边界分隔，在分隔的实物边界的相对两侧存储货包、外包装和货运集装箱仍然必须满足 6 米隔离要求。

569.1. 见第 568.1 段。

570.1. 根据“运输条例”第 570 (a) 和 (b) 段，禁止在同一批货物中混合基于不同规定或批准的货包，因为混合物在运输事故工况下的安全性尚未得到证实。如果申请人希望在同一批货物中混合“运输条例”第 417 (f) 段批准证书的货包以及第 417 (f) 段批准另一证书的货包，则必须在批准证书中证实和指明该混合物在意外情况下的安全性。

570.2. “运输条例”第 570 (c) 和 (e) 段规定的 45 克托运限值的依据见第 417.5 段。规定 15 克的托运限值不是出于技术或安全原因，而是出于实际原因（就是该限值与另一领域已经存在的限值相同，即实物保护[44]）。

## 与铁路和公路运输相关额外要求

571.1. 见第 543.1 段和第 544.1 段。

572.1. 见第 544.1 段。

573.1. 在确定最大剂量率时，应当考虑到潜在的显著放大现象，如内容物的内部移动，或在装有液体的货包内，放射性核素的分离和沉淀。这些现象需要通过对在货包或外包装的外表面、表面和距离车辆 2 米处测量的最大剂量率应用修正系数或使用最大值来考虑。此修正系数或最大值应当在货包使用说明中提供。在任何情况下，应当在装运前进行剂量率测量，并应当考虑任何此类因素来确定最大潜在剂量率。见第 221.1—221.6 段的独家使用。

573.2. 在大多数情况下，货包外表面任何一点的剂量率限值在 2 毫希沃特/小时。对于公路和铁路运输，当独家使用条件下，如果限制进入车辆内的封闭区域，货包和外包装的剂量率允许超过 2 毫希沃特/小时。限制进入这些区域可以通过使用可锁定的密封车辆，或通过货包上栓接并锁定防护罩来实现。在某些情况下，带有侧壁的车辆敞口顶部可能会覆盖防水布，但该类型的外壳通常不足以防止进入。

573.3. 在运输过程中，应当不进入车辆的封闭区域。如果车辆在承运人的场地里停留了一段时间，它应当停在一个进入受到控制的区域，且人员不太可能长时间保持接近。如果需要对车辆进行长时间维护工作，则应当与托运人或收货人作出安排，以确保有足够的辐射防护，例如提供额外的屏蔽和辐射监控。

573.4. 必须确保货包或外包装的安全，以防止运输过程中可能导致剂量率超过相关限值或增加车辆司机受到的剂量。在正常运输工况下，应当确保用于公路运输的货包或外包装不受加速、制动和转弯产生的力的影响。对于铁路运输，货包也应当固定，以防止在调车过程中移动（见第 564.1—564.3 段）。

573.5. 在确定运输工具的剂量率时，可考虑在运输工具内额外屏蔽。然而，在常规运输过程中应当保持屏蔽的完整性，否则，可能无法保持符合运输剂量率的限值。

573.6. 虽然这是“运输条例”第 573 (a) (iii) 段的一项要求。以独家使用方式运输的货物在装载或卸载过程不得装卸，以允许在任何货包或外包装的外表面的任何点将剂量率限值扩大到 10 毫希沃特/小时，这并不排除来自多个地方的货物合并在一起的承运人承担合并货物托运人的角色和责任，并被随后指定为的独家使用。

573.7. 对于 SCO-III，适用“运输条例”第 573 (b) 和 (c) 段。SCO-III 表面剂量率受到“运输条例”第 517 段指出的限制。在 SCO-III 的表面剂量率大于 2 毫希沃特/小时的情况下，应当在运输计划中规定预防措施，以防止未经授权人员进入剂量率大于 2 毫希沃特/小时的区域，并确保物体安全，限制装载或卸载过程中的风险，以及任何其他相关预防措施。

574.1. 对被允许乘坐运载可能具有显著剂量率货包车辆人员的限值是为了防止不必要的或不受控制的人员照射。

574.2. “助理”术语应当解释为指任何工作人员，但须遵守“运输条例”第 303 段要求，其车辆业务涉及车辆本身或放射性托运物。例如，它不能包括任何公众成员或乘坐车辆的唯一目的是旅行的乘客。然而，可以包括一名履行职责的视察员或保健物理监控员。

574.3. 车辆的装载方式应当使居留位置的剂量率最小化。这可以通过将剂量率较高的货包放置在离居留区域最远的地方，以及将剂量率较低的重型货包放置在离居留位置更近的地方来实现。在装卸过程中，应当尽量减少直接装卸时间，并应当考虑使用诸如网或托盘之类的装卸设备，以增加货包与身体的距离。应当防止人员在存在显著剂量率的区域逗留。

### **与船舶运输相关额外要求**

575.1. 每种运输方式都有其独特之处。就海上运输而言，行程可能长达数周或数月，而且需要在整个运输过程中持续进行例行视察，这可能导致放射性物质在运输期间受到严重照射。仅仅使用货舱、隔间或特定的甲板区域，尤其是后者，并不能提供足够的保护免受高剂量率货包的影响。因此，对表面剂量率大于 2 毫希沃特/小时的货包实行了两项进一步的限制：(i) 它们在一辆载具中（或在载具上）；或 (ii) 它们在特殊安排下运输。因此，获得和剂量率受“运输条例”第 573 段的要求控制，或主管当局根据特殊安排规定的与特殊情况相关的控制措施。

575.2. 海上运输任何表面剂量率超过 2 毫希沃特/小时要求在特殊安排下完成，除非在独家使用载具中或在独家使用载具上运输，并遵守“运输条例”第 574 段的条件。但是，如果发生后一种情况，出于辐射防护的目的，最好由船长或相关主管当局为该载具分配一个特定的区域。这尤其适用于用滚装船（如轮渡）运输的载具。进一步的指导意见见《国际海运危险货物规则》[8]。

576.1. 作为限制辐射照射的一种手段，对货包堆垛的简单控制（“运输条例”第 566 段）可能不适用于专门运输放射性物质的船舶。由于船舶本身可能从不止一个托运人处运输货物，因此不能被视为独家使用，因此“运输条例”表 10 和表 11 要求可能具有不必要的限制性。

576.2. 用于海上运输放射性物质的特别用途船舶已经改装和/或专门用于该目的。涵盖此类船舶运输的辐射防护计划应当以预先计划的堆垛为基础特定于所涉船舶和所运载货包的数量和性质的安排。辐射防护计划应当考虑货包可能发出的辐射的性质和强度，基于计划最长航程持续时间的居留因素也应当考虑在内。该信息应用于确定与经常居留工作空间和住所相关的堆垛位置，以确保对人员进行充分的辐射防护。主管当局，通常是船舶船旗国的主管当局，可特定规定所允许的货包的最大数量、其识别和内容

物、应当遵守的精确堆垛安排以及关键位置允许的最大剂量率。辐射防护计划通常要求在完成堆垛期间和之后进行适当的监控，以确保不超过指定的剂量或剂量率。该调查结果的细节，包括对货包和货舱污染的检查，应当提供给主管当局。

576.3. 对于装有易裂变材料货包，该计划还应当适当考虑到临界控制的需要。

576.4. 虽然不是辐射防护计划的直接组成部分，但应当考虑与每个货包的热量输出相关的堆垛限制。为此，应评定自然和机械散热方式，必要时应指定单个货包的热输出。

576.5. 应当要求向主管当局提供每次航行期间所作测量的记录。这是确保辐射防护计划和任何其他控制措施充分发挥作用的一种方法。

576.6. “具备放射性物质运输资质的人员”应当理解为具有装卸放射性物质的适当专门知识人员。

576.7. 辐照核燃料、钚或高放射性废物的托运人和承运人如欲通过海上运输这些物质，请参照《船上经包装的辐照核燃料、钚和高放废物安全运输规范》（INF 规则）[9]。该规范根据可能运载的放射性物质的总活度，将运载这些物质的船舶分为三个级别之一，并规定了每一级别关于损坏稳定性、防火、货舱温度控制、结构考虑、货物安全安排、电力供应、辐射防护设备和管理、培训和船上应急计划的要求。

## **与空运相关额外要求**

577.1. 该要求涉及飞机上是否有乘客，而不是其载客能力。根据“运输条例”第 203 段，配备载客设备但在相关航班上没有载客的飞机可能符合货运飞机的定义，并可用于运输 B (M) 型货包和独家使用货物。

578.1. 空运的特殊条件将增加“运输条例”第 578 段所述货包类型的危害水平。飞机巡航高度处的环境气压可能会有相当大的降低。这可以通过增压系统部分补偿，但这样的系统从不被认为是 100%可靠的。

578.2. 如果允许通风，随着外部压力的降低将大大增加，并且很难设计出安全的通风方式。在正常和事故工况下，飞机的辅助冷却和其他操作控制将难以保障。

578.3. 任何液态易燃材料对飞行中的飞机构成特别危害，对此类物质适用严格限制。如果具有自燃性附属危害的放射性物质也是液态，则发生泄漏的可能性较大，因此禁止空运此类物质。

579.1. 对于表面剂量率大于 2 毫希沃特/小时的货包或外包装，在装载和装卸时必须更加小心。要求通过特殊安排运输该型货物，确保了主管当局的参与，并允许在装货期间、飞行中或任何中间转运点指定特别处理预防措施。

579.2. 特殊安排授权应当包括考虑装卸、装载和飞行中的安排，以控制乘员、地面支持人员和意外照射人员的辐射剂量。这可能需要对乘员作出特别指示，通知适当人员，如在目的地和中间点的终点站工作人员，并特别考虑转用其他运输方式。

### **与邮寄运输相关额外要求**

580.1. 通过邮政运输时，应当特别注意国家邮政条例，以确保国家邮政当局可以接收货物。

580.2. 对于邮寄运输，允许的活度水平仅为其他方式运输的例外货包的十分之一，原因如下：

- (a) 邮件中的大量信件和其他物项有可能被污染，这些物项随后会被广泛分发，从而增加受污染人数。
- (b) 该减少将导致失去屏蔽源的最大剂量率相应减少，与其他运输方式相比，这在邮政环境中被认为是适当保守的。
- (c) 一个邮袋可能包含大量这样的货包。

581.1. 当授权一个组织使用邮政服务时，该组织内应当任命一名知识渊博、负责任的人，以确保遵守正确的程序和限制。

### **海关作业**

582.1. 托运货物含有放射性物质该事实本身并不构成将该型货物排除在正常海关作业之外的理由。但是，由于检验含有放射性物质的货包内容物涉及放射性危害，所以对货包内容物的检验应当在适当的辐射防护条件下进行。必须有一名对装卸放射性物质有足够知识并能作出正确的辐射防护判

断人员在场，以确保在进行检验时海关工作人员或任何第三方不会受到不适当的辐射照射。

582.2. 运输安全在很大程度上取决于货包内的安全特点。因此，当货包随后被转发到目的地时，任何海关作业都应当不降低货包固有的安全性。同样，合格人员应当在场以帮助确保货包是否足以继续运输。在该情况下，“合格人员”指的是在适用运输管理要求以及准备含有放射性物质的货包以供继续运输方面具有专门知识人员。

582.3. 海关官员检验含有放射性物质的货包时：

- (a) 应当尽快办理清关手续，以消除可能降低贵重放射性物质有用性的清关延误。
- (b) 任何必要的货包内部视察都应当在具备足够设施和可由合格人员实施辐射防护措施的地方进行。

582.4. 海关官员应当记住，有些货包是反复使用的，因此，货包的外表面可能会出现一些老化，也可能出现因正常运输工况而造成的染色和小瑕疵。这并不意味着货包不能履行其安全功能。如果有任何疑问或注意到货包已经损坏，海关官员应当立即向合格人员提供必要的信息，并遵守该合格人员的指示。除非绝对必要，否则不允许任何人靠近货包（通常 3 米的隔离距离就足够）或触摸货包。如果必须装卸，应当使用某种形式的保护，以避免直接接触货包。装卸后以洗手为宜。

582.5. 必要时，货包应当放在隔离、安全的地方暂存。在此存储期间，货包与所有人之间的隔离距离应当尽可能大。货包和存储区域周围应当张贴警告标记。应当从托运人、收货人或主管当局获得进一步信息。

## 无法交付托运货物

583.1. 关于隔离，见第 562.1—562.13 段和第 568.1 段。

## 承运人保持和提供运输单据

584.1. “运输条例”第 584—588 段摘自《国际民用航空组织技术细则》(2012 年版)[12]第 7 部分第 1 章第 1.2 段。这些规定适用于尚未将多式联运条例纳入其国家条例、但已将“运输条例”作为其国家放射性物质安全运输条例实施的国家。

## 第五节 参考文献

- [1] 英国原子能管理局《放射性物质运输包装的屏蔽完整性试验：γ 屏蔽》，第 AECP1056 号报告第 1 部分，英国原子能管理局，英国哈德维尔（1977 年）。
- [2] 英国原子能管理局《用辐射源和探测器扫描检验包装辐射屏蔽的完整性》，第 AECS6067 号报告，英国原子能管理局，里斯利（1977 年）。
- [3] 英国标准协会《设计导则：放射性物质运输安全包装试验和使用》（BS 3895：1976），GR9，英国标准协会，伦敦（1976 年）。
- [4] 美国国家标准协会《美国放射性物质运输货包泄漏试验国家标准》，美国国家标准协会第 N14.5-2014 号报告，美国国家标准协会，纽约（2014 年）。
- [5] 国际标准化组织《放射性物质安全运输—货包泄漏试验》（ISO 12807：2018（E）），国际标准化组织，日内瓦（2018 年）。
- [6] 国际原子能机构《用于贮存和运输乏燃料两用容器的安全论证文件方法》，国际原子能机构《技术文件》第 1938 号，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。
- [7] ZACHAR, M., PRETESACQUE, P., “乏燃料运输至 COGEMA 雨果后处理厂的燃耗信用制”，《国际放射性物质运输杂志》第 5 2—4 期（1994 年）第 273—278 页。
- [8] 国际海事组织《国际海事危险货物（IMDG）规则》（2020 年版），国际海事组织，伦敦（2020 年）。

- [9] 国际海事组织《船上经包装的辐照核燃料、钚和高放废物安全运输规范》（INF 规范），MSC.178（79）决议，国际海事组织，伦敦（2004 年）。
- [10] 联合国欧洲经济委员会、内陆运输委员会，《欧洲国际道路运输危险货物协定》（2021 年版），联合国欧洲经济委员会，日内瓦（2020 年）。
- [11] 联合国欧洲经济委员会、内陆运输委员会，《欧洲国际内陆水道运输危险货物协定》（2021 年版），联合国欧洲经济委员会，日内瓦（2020 年）。
- [12] 国际民用航空组织《危险货物航空安全运输技术指引》（2021—2022 年版），国际民用航空组织，蒙特利尔（2020 年）。
- [13] 国际铁路运输政府间组织（OTIF）《国际铁路危险货物运输条例》（2021 年版）（RID），国际铁路运输政府间组织，伯尔尼（2020 年）。
- [14] 国际空运协会《危险货物条例（第 48 版）》，国际空运协会，蒙特利尔（2012 年）。
- [15] 万国邮政联盟《国际邮政里约热内卢公约》，万国邮政联盟，伯尔尼（1979 年）。
- [16] 联合国《危险货物运输建议：示范条例》，ST/SG/AC.10/1/Rev.22，2 卷本，联合国，纽约和日内瓦（2021 年）。
- [17] FAIRBAIRN, A., “运输容器和车辆放射性表面污染最大允许水平的推导”，《放射性物质安全运输条例》某些方面的说明，《安全丛书》第 7 号，国际原子能机构，维也纳（1961 年）。
- [18] 国际原子能机构《货包和运输工具非固定污染的放射学方面》，国际原子能机构《技术文件》第 1449 号，国际原子能机构，维也纳（2005 年）。
- [19] WRIXON, A.D., LINSLEY, G.S., BINNS, K.C., WHITE, D.F., “表面污染的导出限值”，哈德维尔，第 NRPB-DL2 号报告，英国文书局，伦敦（1979 年）。

- [20] 国际原子能机构《表面放射性污染监控》，《技术报告丛书》第 120 号，国际原子能机构，维也纳（1970 年）。
- [21] 国际放射防护委员会《国际放射防护委员 2007 年建议书》，国际放射防护委员会第 103 号出版物，《国际放射防护委员会年刊》第 37 期第 2—4 页，（2007 年）。
- [22] FAW, R.E., “皮肤对体表放射性核素源的吸收剂量”，《保健物理》第 63 期（1992 年）第 443—448 页。
- [23] TRAUB, R.J., REECE, W.D., SCHERPELZ, R.I., SIGALLA, L.A., “使用计算机程序 Varskin 计算皮肤污染的剂量”，第 PNL-5610 号报告，华盛顿州里奇兰巴特尔西北太平洋实验室（1987 年）。
- [24] KOCHER, D.C., ECKERMAN, K.F., “体表均匀沉积活动皮肤外照射的电子剂量率转换系数”，《保健物理》第 53 期（1987 年）第 135—141 页。
- [25] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号，国际原子能机构，维也纳（2014 年）。
- [26] LAUTERBACH, U., “低比活度物质在紧凑堆中的辐射水平”，《放射性物质包装和运输》第 80 期（国际研讨会论文集，柏林，1980 年），联邦材料试验研究所，柏林（1980 年）。
- [27] FAIRBAIRN, A., “国际原子能机构放射性物质安全运输条例的制定”，《能源评论》第 114 期（1973 年）第 843 页。
- [28] GELDER, R., “英国境内正常放射性物质运输的辐照”，第 NRPB-M255 号报告，国家辐射防护委员会，英国奇尔顿（1991 年）。
- [29] HAMARD, J., 等，“1981 年至 1990 年期间法国工作人员和公众在运输放射性物质过程中个人和集体接受剂量的估计”，《放射性物质包装和运输》第 92 期（国际研讨会论文集，横滨，1992 年），科技局，东京（1992 年）。

- [30] KEMPE, T.F., GRODIN, L., “加拿大核燃料废物管理计划对公共运输的辐射影响”, 《放射性物质包装和运输》第 89 期(国际研讨会论文集, 华盛顿特区, 1989 年), 田纳西州橡树岭国家实验室(1989 年)。
- [31] GELDER, R., “正常放射性物质运输的放射性影响”, 国家辐射防护和测量委员会第 M219 号报告, 国家辐射防护委员会, 英国奇尔顿(1990 年)。
- [32] 国际原子能机构《放射性物质运输的放射性影响评定》, 国际原子能机构《技术文件》第 398 号, 国际原子能机构, 维也纳(1986 年)。
- [33] 国际原子能机构《国际原子能机构<放射性物质安全运输条例>(2018 年版)规定细目》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-33 (Rev.1) 号, 国际原子能机构, 维也纳(2021 年)。
- [34] DOARE, O., DIESCHBOURG, K., HUET, C., SERT, G., “长时间火灾影响下六氟化铀容器的六氟化铀排放计算和放射性及环境影响”, 《放射性物质包装和运输》第 2001 期(国际研讨会论文集, 芝加哥, 2001 年), 能源部, 华盛顿特区(2001 年)。
- [35] WILSON, C.K., “放射性物质的空运”, 《辐射防护剂量学》第 48 1 期(1993 年)第 129—133 页。
- [36] WILSON, C.K., SHAW, K.B., GELDER, R., “放射性物质海运产生的辐射剂量”, 《放射性物质包装和运输》第 89 期(国际研讨会论文集, 华盛顿特区, 1989 年), 田纳西州橡树岭国家实验室(1989 年)。
- [37] WAMERJONES, S.M., SHAW, K.B., HUGHES, J.S., “最终报告: 放射性物质正常空运的放射性影响调查”, 第 NRPB-W39 号报告, 国家辐射防护委员会, 英国奇尔顿(2003 年)。
- [38] GELDER, R., SCHWARZ, G., SHAW, K., LANGE, F., “运输过程中货包的分隔”, 《放射性物质包装和运输》第 98 期(国际研讨会论文集, 巴黎, 1998 年)第 3 卷, 核安全与保护研究所, 巴黎(1998 年)。

- [39] 国际原子能机构《为公众制定与源相关的剂量限值：供评论的中期报告》，国际原子能机构《技术文件》第 664 号，国际原子能机构，维也纳（1992 年）。
- [40] 国际原子能机构、联合国环境规划署，《放射性流出物排入环境的监管控制》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-9 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [41] MIHALCZO, J.T., 等，“利用铟-252 频率分析技术对乏燃料进行次临界和无损分析测量的可行性”，《核电厂仪器仪表、控制和人机界面技术》（国际高层会议论文集，学院站，1996 年），第 2 卷，美国核学会，伊利诺伊州拉格兰奇帕克（1996 年）第 883—891 页。
- [42] MENNERDAHL, D., “混合货包设计：核临界安全”，《放射性物质包装和运输》第 86 期（国际研讨会论文集，达沃斯，1986 年），国际原子能机构，维也纳（1987 年）第 167—175 页。
- [43] BOUDIN, X., 等，“与易裂变单元平面阵列混合有关的规则”，《临界安全中的物理和方法》（高层会议论文集，纳什维尔，1993 年），美国核学会，伊利诺伊州拉格兰奇帕克（1994 年）第 102—111 页。
- [44] 国际原子能机构《关于核材料和核设施实物保护的核安保建议》（《情况通报》第 INFCIRC/225/Revision 5）号，国际原子能机构《核安保丛书》第 13 号，国际原子能机构，维也纳（2011 年）。

## 第六节

### 放射性物质和包装及货包要求

#### 放射性物质要求

##### 特殊形状放射性物质要求

602.1. 特殊形状放射性物质要求具有合理的尺寸，以便在事故或丢失后容易打捞或找到，因此限制了最小尺寸。考虑到通常被归类为特殊形状放射性物质的物质类型，5 毫米的数字虽然是任意的但实用合理。

603.1. “运输条例”力求确保在发生严重事故时，即使该包装可能被毁坏（见附录 I），装有特殊形状放射性物质的货包也不会排放或分散其放射性内容物（通过密封胶囊泄漏或放射性物质本身的分散或浸出）。这将最大限度地减少吸入或摄入放射性物质或被放射性物质污染的预期危害。因此，特殊形状放射性物质必须能够经受类似于 B (U) 型货包严格的机械和热试验，在其工作寿命期间的任何时候都不会有放射性物质的不当损坏或扩散。

603.2. 申请人应当证实在浸出试验中评价物质的溶解度等于或大于将要运输的实际放射性物质的溶解度。如果在试验中使用放射性内容物减少的物质，也应当外推结果，在该情况下，应当证实外推的有效性。申请人应当不仅仅因为一种物质是惰性的，就认为它不会被货包就能通过浸出试验。例如，裸货包的铯-137 颗粒未能通过浸出试验[1]。浸出值应当扩大到反映总活度和将被运输形状的值。在 ISO 2919[2]第 3.4 段，在 50℃下维持 4 小时，如果在 100 毫升静水中排放物质的数量大于 0.1 毫克/克，则将该密封源定义为可浸出，试验工况应当为 ISO 9978:2020[3]第 5.1.1 段所述。对于密封在密封容器中的物质，可以使用适当的体积泄漏评定技术，如真空气泡或氦气泄漏试验方法。在该在评价特殊形状放射性物质的潜在放射性物质损失时，需要对影响灵敏度的所有试验参数进行彻底的规定和考虑。

603.3. “运输条例”允许对密封胶囊进行替代泄漏评定试验。经相关主管当局同意，胶囊设计的性能试验不含放射性内容物时，可采用体积泄漏法进行泄漏评估。在大多数情况下，不可浸出的固态内容物的速率为  $10^{-5}$  帕立方米每秒（帕立方米每秒），对于可浸出的固体、液体和气体的速率为

10<sup>-7</sup> 帕立方米每秒，可被视为相当于“运输条例” [3]第 603 段指出的 2 千贝可的排放限值。体积泄漏法适用于检测密封源泄漏，这些物质及其敏感性都列在本“安全导则”表 3。

603.4. 当使用非放射性物质作为替代物时，泄漏物质的测量应当与“运输条例”第 603 (c) 段规定的 2 千贝可限值相关。

604.1. 如果密封的舱体构成特殊形状放射性物质的一部分，则应当确保舱体不可能通过正常的装卸或卸载措施被打开。否则，就有可能在没有防护舱的情况下装卸或运输放射性物质。

**表 3. 阿斯顿等人推荐的四种体积泄漏试验方法的比较 [4]**

| 泄漏试验方法      | 灵敏度<br>(帕立方米每秒)  | 胶囊最小空隙<br>(立方毫米) |
|-------------|------------------|------------------|
| 真空气泡        |                  |                  |
| (i) 乙二醇或异丙醇 | 10 <sup>-6</sup> | 10               |
| (ii) 水      | 10 <sup>-5</sup> | 40               |
| 异丙醇加压气泡     | 10 <sup>-8</sup> | 40               |
| 液氮气泡        | 10 <sup>-8</sup> | 2                |
| 氦气加压        | 10 <sup>-8</sup> | 10               |

604.2. 只有通过破坏技术才能打开的密封源通常被认为是焊接结构的源。只有通过机械加工、锯切、钻孔或火焰切割等方法才能打开它们。例如，带有螺纹端盖或塞的胶囊，可以在不破坏胶囊的情况下打开是不可接受的。

**低弥散放射性物质要求**

605.1. 将距离无屏蔽的低辐射危险区 3 米处的外部剂量率限制在 10 毫希沃特/小时，可确保潜在的外部剂量与涉及工业货包严重事故的潜在后果相一致（见“运输条例”第 517 段）。

605.2. 气动等效直径约为 10 微米的颗粒<sup>1</sup>是可吸入的，可以到达肺部较深的区域，那里的清除时间可能很长。气动等效直径在 10 微米至 100 微米之间的颗粒对吸入途径的影响不大，但它们在沉积后会对其他照射途径产生影响。气动等效直径大于 100 微米的颗粒沉积速度非常快。虽然这可能导致事故附近的局部污染，但这并不代表内部照射的重要机制。

605.3. 对于低弥散放射性物质，当对内容物（以 B (U) 型或 B (M) 型货包设计包括所述低弥散放射性物质的形状运输）进行机械和热试验时，气态或颗粒形状的空气排放量限制在 100A<sub>2</sub>。此 100A<sub>2</sub> 限值指的是空气动力学当量直径达 100 微米的所有粒径。空气中的排放可能导致飞机事故地点下风方向人员通过几个照射途径受到辐射照射。主要关注的是通过吸入短期摄入放射性物质。其他途径不太重要，因为它们的贡献只与长期停留相关，可以采取治理行动来限制照射。对于吸入途径，气动等效直径约 10 微米以下的颗粒占主导地位，因为它们是可呼吸的。不过，在 100A<sub>2</sub> 的限值下，谨慎选择了 100 微米的上限。其理由是，通过该方式可以确保吸入途径或沉积后的其他照射途径都不会导致不可接受的辐射剂量。

605.4. 当低弥散放射性物质进行高速撞击试验（见“运输条例”第 737 段）时可产生颗粒物，但在高达 100 微米的气载颗粒物中，预计只有一小部分（小于 10%）在 10 微米以下的可吸入尺寸范围内。因此，若遵守“运输条例”第 605 (b) 段指出的 100A<sub>2</sub> 上限，可吸入颗粒物的空气排放量预计将小于 10A<sub>2</sub>。已经表明，对于大约 100 米的参考距离和广泛的大气扩散条件，这将导致有效剂量低于 50 毫希沃特。

605.5. 对于进行撞击试件，应当考虑源结构和构成低弥散放射性物质的单独物质成分之间的物理相互作用。这些相互作用可能导致低弥散放射性物质形状的实质性变化。例如，单独燃料颗粒在高速撞击后产生的可分散物质的数量可能与将同一颗粒与其他颗粒合并到燃料棒中的数量不同。重要的是，被试件要代表将要运输的低弥散放射性物质。

---

<sup>1</sup> 气载颗粒的气动等效直径（也称为气动直径）是单位密度的球体在空气中沉降时需要具有的直径，以便与感兴趣的颗粒具有相同的终端速度。

605.6. 在强化热试验的情况下（见“运输条例”第 736 段），由于燃烧等热过程通常会产生小颗粒，因此低弥散放射性物质的气载排放量可能高达  $100A_2$ ，为气态或粒径主要较小（ $<10$  微米气动等效直径）的颗粒。在强化热试验过程中，应当注意物质潜在的化学变化，这些变化可能导致气溶胶的产生，例如燃烧产物引起的化学反应。在飞机事故后发生火灾的情况下，热气体的浮力效应将导致地面空气浓度和潜在的有效吸入剂量，在大范围的大气扩散条件下，有效吸入剂量也将保持在 50 毫希沃特以下。

605.7. 放射性物质的浸出限值适用于低弥散放射性物质，以消除放射性物质溶解和迁移的可能性，即使低弥散放射性物质在严重事故中完全从货包内排放出来，也会导致土地和水道的严重污染。浸出的  $100A_2$  限值与因火灾或高速撞击而排放的空气中物质的限值相同。

605.8. 对于浸出试验，试件应当包含低弥散放射性物质的代表性样品，该样品已进行了强化热试验和高速撞击试验。每个试验可以使用单独的试件，在该情况下，两个样品将进行浸出试验。例如，在在撞击试验的情况下，物质可以破碎或以其他方式分离成各种固态形状，包括沉积的粉末状物质。这些形状构成了低弥散放射性物质，应当进行浸出试验。

605.9. 尤其重要的是，空气中排放物和浸出物的测量是可重复性的。

## 对不属于裂变材料分类材料要求

606.1. “运输条例”第 805 段允许申请人请求多边批准将某一特定易裂变材料视为次临界材料，而无需在运输过程进行积聚控制和其他控制，也无需特定包装。理想情况下，这些易裂变材料将是无限值的次临界（即  $K_{\infty} < 1$ ）。根据“运输条例”第 417 (f) 段，该实践与第 417 (a) 和 (b) 段现有规定是一致的。申请人将需要确保指定的易裂变材料具有（或将具有）适当的表征。必须准备一份安全分析报告（见第 805 段），并详细说明“运输条例”规定的物质在常规、正常和事故工况下仍处于次临界状态正当性。正当性应当酌情提及计算、取样（例如废物流）、物质样品试验、记录（例如易裂变材料清单）和合理的论据。如果可能，应当遵守“运输条例”第 606 (b) 段规定的要求，只有“裸”易裂变材料才能满足，而不能从运输易裂变材料包装类型的特征中获得任何好处。

606.2. 可以认为适当的示例是物质的  $k_{\infty}$  足够次临界，或者造成临界危害所必需的物质的质量和/或体积太大而不具有实际意义。

安全将得到确保，因为易裂变核素分布在显著非易裂变材料中。

应当证实，在常规、正常和事故运输工况下可能合理地发生的易裂变核素分布变化（例如易裂变与非裂变的比例）不会损害临界安全。

“运输条例”第 673 (a) 段所列条件，在评定物质的安全性时必须考虑，特别是需要考虑从外部来源添加水。

物质的运输应当在“运输条例”第 679 段指出的温度范围内是安全的。否则，应当实施操作控制，将运输限值在指定的环境温度内。

包含“运输条例”第 417 (f) 段规定以外物质的货包应当在没有积聚控制的情况下是安全的，这应当通过证实物质的  $k_{\infty}$  低于 1 来满足。或者，应当提出一个论据，即尽管  $k_{\infty}$  等于或大于 1，但获得不安全  $k_{\text{eff}}$  所需的物质数量不可能在运输过程中发生，这与第 686 段是一致的。它允许 N “实际上等于无穷大”，而不是要求它真正无限大。

如果物质的放射性性质要求使用某种最小货包类型（如 A、B (U) 或 B (M)），则可将其归因于此。或者，可以指定使用某个货包类型（但不是设计）。只有“运输条例”第六节中对所用货包类型的那些包装要求才可以提出要求。如果有必要声称某一特定货包或设计的特定特点，则该物质的例外情况是不适当的，应当申请批准易裂变材料的货包设计。货包设计批准要求包装的详细规范，与本段相反，这是两类批准的本质区别。

606.3. 证实多边批准某一特定易裂变材料免于易裂变分类申请的安全分析应当包括：

- (a) 易裂变核素和非易裂变材料的规范；
- (b) 易裂变核素在非易裂变材料中的分布（例如同质性和均匀性）；
- (c) (a) 和 (b) 项在常规、正常和事故工况下（例如实物形状、易燃性、溶解度、可分离性）如何变化，以及随后对非易裂变材料稳定性要求（例如固体、不易燃、不溶解、不分离）。

606.4. 关于“运输条例”第 606 (b) 段, “运输条例”第 684 (b) 段和第 685 (b) 段提到的“货包”应当解释为易裂变材料以及正常和事故工况下放射性安全所需的任何货包[5]。

606.5. 一个可以符合第 606 段要求物质的简单示例。可燃烧的吸收体颗粒和棒, 其中至少 2% 质量的  $Gd_2O_3$  与低浓缩铀氧化物混合, 然后在装运前压制和烧结。

606.6. 应当不被视为符合第 606 段指出物质的一个示例。浓缩铀六氟化铀, 因为临界安全依赖于慢化控制。防止化学和放射性危害也需要密封的论据应当不被用来将临界安全评定限制在六氟化铀的干式用途上。

606.7. 一个示例可以在参考文献[6]找到。其中允许对含有下列物质的物质作例外处理:

- (a) 每 1 克易裂变核素对应 2000 克非易裂变材料, 条件是该物质符合同质性规范;
- (b) 每 1 克易裂变核素含 200 克非易裂变材料, 另加 15 克易裂变核素的货包限值。

初始考虑将这些规定纳入“运输条例”。然而, 未能就如何特定说明易裂变材料分配给非易裂变材料的确切措辞达成共识。

对这些例外情况进行了安全论证文件研究[7]。托运人可在个别成员国内要求类似的例外情况[8], 但须按照“运输条例”第 606 段要求对物质进行多方批准。证实多方批准申请的安全分析应当包括:

- (a) 与第 606.3 段信息相同;
- (b) 参考文献[7]的安全论证文件是否充分, 或是否需要进一步评定, 以使主管当局确信该例外将提供充分的安全。

606.8. 如果易裂变材料的体积或质量远低于达到临界所需的数量, 则可以考虑到货包内易裂变材料的有限体积或质量, 这与第 417 (b) 段等规定是一致的。这些规定在“运输条例”已经存在了很长时间。硝酸铀酰溶液无限值的次临界适用于硝酸铀酰完全结晶的情况, 但如果化学转换为氧化物形式可能时则不适用。在 30 分钟的火灾中, 从一个单独储罐中转换大量溶液, 然后与水混合, 然后在临界构型中收集, 该过程被认为太不可能了,

即使理论上存在可能性。据了解，需要有一个最小的体积来防止该情况。此外，如果成千上万的货包内的物质需要转换、与水混合并组装到临界配置，则每个货包的体积很小在实践中可能被认为是次临界的。对于一项新的规定，可以特定禁止一定范围的体积或易裂变核素质量。类似的论证可以用来支持对不同物质的批准。多边批准确保了足够的安全性。

606.9. 如果包装的存在能够得到保证，则可以归功于其效果。例如，运输  $k_{\infty} < 1$  但每个货包含有几克以上钚的易裂变材料，出于放射性安全的原因，需要 B (U) 型或 B (M) 型货包。在评定该物质时，允许考虑 B (U) 型或 B (M) 型货包在正常和事故工况下的一般性能。

606.10. 在“运输条例”增加该规定的一个特定原因是，可以考虑到一个国家、区域或设施类型的本地条件。在废物流的来源得到充分了解的情况下，可以调整核实要求以适应特定应用，并且可以考虑到实际易裂变材料和其他物质的已知特性。

## 所有包装和货包一般要求

607.1. 货包在运输工具内或运输工具上的固定（保持）方式方面的设计只考虑常规运输工况（见“运输条例”第 613 段）。

607.2. 关于在运输工具内或运输工具上保持货包方法的补充导则，见第 564.1 段和第 564.2 段以及附录 IV。

608.1. 在选择用于吊装附件的物质时，应当考虑在正常操作中预计负载范围内不屈的物质。如果发生过载，那么货包的安全应当不受到影响。此外，还应当考虑磨损的影响。在包装投入使用前试验吊装点，然后在维护期间控制吊装点被认为是良好的实践。

608.2. 在设计多次吊装货包的连接点时，应当考虑其疲劳性能，以避免故障裂纹的产生。在假想存在疲劳故障时，则设计应当考虑到这些裂纹可通过非破坏性手段检测到，并应当将适当的试验列入货包的维护计划。

608.3. 起重机起重的加速度负载系数（通常被索具和装卸人员称为“抓取系数”）应当与预计参与这些活动的起重机的预计起重特征相关。除了这些加速度负载系数外，设计人员还应当对结构屈服参数应用可接受的设计

安全系数[9—11]，以确保在起重机吊装过程中货包的任何部分都没有塑性变形。

608.4. 应当特别注意在核设施中装卸货包的吊装附件。除了对货包本身造成损坏外，将沉重、坚固的货包跌落到敏感区域可能导致设施内其他来源的放射性物质排放，导致临界事故或其他可能影响设施安全的事件。对于这些连接点，可能需要比正常工程实践更高的安全裕度[9—11]。

609.1. 此要求旨在防止意外使用不适合于装卸操作的货包功能。

610.1. 该要求是因为货包外部的突出特征在装卸和运输附带的其他操作过程中容易受到撞击。该撞击可能会在包装结构中造成高应力，导致包容系统损坏。

610.2. 在确定货包设计和完成的可行性时，首要考虑的应当是不减损任何特点的有效性，这些特点是遵守其他特点所必需的“运输条例”要求。例如，为安全装卸、操作和堆垛而提供的特点应当在设计上使其在根据“运输条例”适当要求履行其基本功能的同时，尽可能减少任何突出物和潜在的去污困难。

610.3. 成本也是可行的合理决定因素。为遵守“运输条例”第 610 段而采取的措施，不需要涉及不适当或不合理的费用。例如，任何特定包装材料和建造方法的选择应当以该类型货包的公认良好工程实践为指导，同时适当考虑到第 610 段，并不需要采取代价昂贵的措施。

610.4. 具有低孔隙率光滑光洁度的外表面有助于去污，与粗糙的表面相比，它天生不容易被污染物吸收和随后的浸出（“隐藏”）。

610.5. 如果设计货包使其易于去污是不切实际的，则应当将防止污染的其他措施（“清洁过程”）作为货包设计安全论证文件的一部分。这些措施可能需要得到主管当局的批准，并可在货包设计的操作说明中加以考虑。还应当考虑适当的管理系统措施。

611.1. 该要求是因为在货包外部收集和保持水（来自雨水或其他来源）可能会由于生锈或长时间浸没破坏货包的完整性。此外，该保持的液体可能会浸出任何表面污染物，并将其扩散到环境中。最后，从货包表面降水，如雨水，可能被误解为从货包泄漏。

611.2. 为了符合第 611 段规定。应当适用与第 610.2—610.4 段类似的考虑。

612.1. 该要求旨在防止以任何方式在货包上或附近放置装卸工具、辅助设备、运输框架或备件，从而在正常运输或发生事故时损坏包装部件的预计功能。

613.1. 包装部件，包括与包容系统、吊装附件和保持系统相关的部件，可能由于加速度、振动或振动共振而松动。在货包设计中应当注意确保任何螺母、螺栓和其他保持设备在常规运输工况下保持安全。

613.2. 对于用作运输重型货物的工业货包的货运集装箱，设计集装箱以及集装箱内货物的包装或栓系系统对于在常规运输工况下遇到的加速度是至关重要的。这是为了防止内容物的移动，从而防止对集装箱的损坏，这可能会损坏工业货包的包容或屏蔽完整性。

613A.1. 包装部件和货包内容物受到退化机制和老化过程的影响，这取决于部件和内容物本身及其操作工况。因此，如第 613A.2—613A.6 段所述，货包的设计应当考虑到与货包的预计用途及其操作工况相称的老化机制。货包设计人员应当评价随着时间的推移潜在的老化现象，如腐蚀、磨损、疲劳、裂纹扩展、热负载或辐射引起的物质成分或机械性能的变化、分解气体的产生，以及这些现象对安全功能的影响。

613A.2. 对于一次运输使用过一次且不考虑在存储后装运的包装，在使用前进行视察可能就足够了。该型货包可包括例外货包、IP-1 型、IP-2 型、IP-3 型和 A 型货包（如纤维板箱、桶）。如果该型货包涉及存储后装运，第 613A.4 段应当予以考虑。

613A.3. 对于考虑重复使用的包装，应在设计阶段评价老化机制对货包的影响，以证明遵守“运输条例”。根据这一评价，应制定一项视察和维护计划。该计划的结构应使用于证明货包符合性的假设（如容器壁厚度、渗透性、中子吸收器有效性）在货包的使用寿命期间均被验证有效。参考文献[12]提供了一个为 B (U) 型货包提供老化管理计划的示例。

613A.4. 在设计考虑用于存储后装运的货包时，考虑老化机制很重要，因为在存储后装载和装运结束之间的时间很长，存储条件（尽管“运输条例”不适用于货包的存储），以及对装载放射性物质的货包进行视察（以

检测老化影响)和维护方面的困难。此外,还应当认识到新的技术知识、货包设计的变化、“运输条例”适用于货包设计的新要求或用于识别和评定老化影响的新技术等因素。

613A.5. 在货包设计方面,第 613A.1 段所述的老化对货包的影响考虑应当得到老化管理计划的支持。该计划应当处理老化影响,包括预防、缓解、状况监控和性能监控(见参考文献[13]),以证实老化机制的设计考虑是正当的。该计划还应当包括间隙分析计划(见第 809.3 段和第 809.4 段),以考虑技术知识的变化、货包设计的状况和“运输条例”要求。特别是,老化管理计划应当考虑到设计人员规定的存储期限和条件,以及在存储期间和存储后装运前安排的任何监控、视察和维护。应当为考虑用于存储后装运的所有货包设计制定老化管理计划和间隙分析计划。对于 B(U)、B(M)和 C 型货包的设计,要求在申请批准存储后装运的货包时列入这些计划(见“运输条例”第 809(f)和(k)段)。在运输前编写视察计划时,应当考虑到老化管理计划和间隙分析计划的结果。

613A.6. 对于按照 ISO 7195[14]或 ANSI N14.1[15]进行维护和视察的六氟化铀钢瓶,不需要进一步评价潜在的退化或老化机制。

614.1. 在考虑放射性内容物与包装材料的化学相容性以及包装部件不同材料之间的化学相容性时,应当考虑到腐蚀、脆化、弹性体和橡皮圈的加速老化和溶解、溶解物质的污染、引发聚合、热解产生的气体和化学性质的改变等影响。

614.2. 相容性考虑应当包括制造、清洗或维护包装可能留下的物质,如清洁剂、油脂和油,还应当包括货包以前内容物的任何残留物。

614.3. 对实物相容性的考虑应当考虑到物质和放射性内容物在相关温度范围内的热膨胀,以便涵盖物质的尺寸、硬度、实物状态和放射性内容物的变化。

614.4. 在液态内容物的情况下观察到实物相容性的一个方面,在允许的温度范围内,需要提供足够的裕度,以避免由于内容物及其包容系统的不同膨胀率而导致的液压故障。提供足够空隙的空隙体积值可从具有类似性质的其他危险货物的运输条例中得出。

615.1. 锁可能是防止阀门擅自操作的最佳方法之一，它们可以直接用于锁定阀门关闭，也可以用于防止接近阀门的盖子或盖子上。虽然密封可以用来表明阀门尚未使用，但不能依靠它们来防止未经授权的操作。

616.1. 对于表面传输方式，通常可以接受 60—101 千帕的环境压力范围和-40℃至 38℃的环境温度范围。对于例外货包、IP-1 型、IP-2 型和 IP-3 型工业货包和 B (M) 型货包表面移动，仅在特定国家内或仅在特定国家之间，可以假想环境温度和压力条件以外的其他条件，只要这些条件是正当的，并且有适当的控制措施将货包的使用限制在相关国家。

617.1. 第 617 段意图是通过计算或其他方法证实货包的设计是正确的，以运输最大允许的内容物，而不超过“运输条例”规定的剂量率限值。

617.2. 见第 527.2 段。

## 空运货包额外要求

619.1. 表面温度限值是必要的，以保护邻近的货物免受潜在的损坏，并保护装卸过程中货包装卸人员。由于货包周围难以提供足够的自由空间，该要求对空运的限制特别大。为此，“运输条例”第 619 段始终适用于空运，而对于其他运输方式，可在独家使用条件下适用限制性较小的表面温度限值（见“运输条例”第 654 段和第 655 段以及第 654.1—654.3 段和第 655.1—655.3 段）。如果在运输过程中，环境温度在极端条件下超过 38℃（如“运输条例”第 620 段），则可接触表面温度限值不再适用。

619.2. 可以考虑旨在保护人员的障碍或屏障，而无需对障碍或屏障进行任何试验。

620.1. -40℃—55℃的环境温度范围涵盖了空运过程中预计会遇到的极端情况，是国际民用航空组织要求货包除“例外数量的危险货物”以外的任何空运危险货物的范围[16]。

620.2. 在设计容器时，应当考虑环境温度限值对最终表面温度、内容物、热应力和压力变化的影响，以确保放射性物质的容器。

621.1. 这是一项类似于国际民用航空组织[16]对装有某些液态危险货物货包的空运要求。在“运输条例”（1996年版），对货包承受 95 千帕压差而不损坏或扩散放射性内容物要求扩大到包括所有形状的放射性物质。

621.2. 飞行过程中会遇到由于高度引起的压力降低（见第 578.1 段）。在货包设计中应当考虑在高度增加时产生的压差。95 千帕的压差加上最大正常操作压力（见第 229.1—229.4 段）是货包设计所需的压差，不会从包容系统中损坏或扩散放射性内容物。本设计规范是考虑到飞机在最大民航飞行高度下的降压，以及货包内已有的任何压力的安全裕度。在固态物质的情况下，应当遵守“运输条例”第 621 段规定，可以使用抗压以外的其他手段来证实符合性。如果能够证实，当货包在飞行过程中暴露在预计压差下时，包容系统中的放射性内容物没有损坏或扩散，即使内压不保持也可以考虑货包设计满足要求。在评价压差时，应当考虑以下相关压力变化的信息：

- (a) 在正常飞行条件下，受压飞机在爬升过程中客舱和货舱内的压力下降可能达到 150 帕/秒（2500 英尺/分钟），在飞机降落过程中压力上升可能达到 90 帕/秒（1500 英尺/分钟）。
- (b) 纯货机的设计和操作可能使货舱在飞行中不受压力：对于这类飞机，货物所经历的正常压力变化率是与飞机爬升和降落相关的实际变化率。
- (c) 在正常飞行条件下，飞机机舱和货舱内的压力可能从海平面大气压力（约 100 千帕）下降到加压飞机的 75 千帕，而非加压飞机的 25 千帕。
- (d) 在紧急情况下，加压飞机的客舱和货舱内的压力可能突然下降到飞机外部存在的压力（快速减压）：在这些紧急飞行条件下，认为客舱和货舱压力可能在 1 秒内从最小正常等效高度 6000 英尺（即巡航飞行时的最大正常压力为 81 千帕）线性下降到 45 000 英尺高度的标准环境压力 15 千帕。

621.3. 如果在最大正常操作压力的定义中，“与环境条件相对应的温度和太阳辐射条件”术语被解释为包括考虑空运中的特定条件，那么最大正常操作压力确实为特定规定该要求提供了适当的基准。如果“运输条例”第 620 段给出的温度范围。使用 62°C（-40°C—55°C），考虑货包内容物的自加热，因为货包在飞机内太阳辐射输入被视为零，因此最大正常操作压力与国际民用航空组织的方法一致。

## 工业货包要求

### 工业货包-1 型（IP-1 型）要求

623.1. 三种工业货包类型具有不同的安全功能，因为它们是为不同类别的低比活度物质和表面污染物体设计的。IP-1 型货包在常规运输工况下仅含有放射性内容物，而 IP-2 型货包和 IP-3 型货包则在正常运输工况下防止其内容物的损坏或扩散和剂量率的增加（见第 624.4 段），根据定义（见“运输条例”第 106 段）包括轻微事故，只要试验要求代表这些条件。此外，IP-3 型货包具有与 A 型货包相同的货包完整性。

623.2. “运输条例”工业货包设计要求和联合国第 III 组货包设计要求都没有将货包视为压力容器。根据联合国建议[17]，只有容积小于 450 升（液态内容物）或小于 1000 升（气态内容物）的压力容器才能被视为货包。体积较大的压力容器被定义为储罐，“运输条例”第 627 段和第 628 段为其提供了类似的安全水平。如果将压力容器用作工业货包，在材料选择、设计规则和计算方法以及货包制造和使用的管理系统要求（如由独立视察员进行压力试验）时，应当考虑压力容器相关规范的设计原则。压力容器相对较大的壁厚通常被预见为在内部压力（使用条件和试验压力）方面提供安全。如果设计压力高于满足使用条件所需的压力，并且与温度上限下的蒸汽压力相对应，则需要较大的壁厚，从而可提供防止事故甚至意外的安全裕度。在该情况下，可能不需要通过跌落和堆垛性能试验来证实安全性，而是通过压力试验来证实安全性。然而，相关的服务设备（如阀门）在机械负载下的安全性需要得到保证，例如，通过使用额外的保护结构。

623.3. 对于液态内容物体积小于 450 升或对于气态内容物体积小于 1000 升且设计压力为 265 千帕的压力容器（见“运输条例”第 627 (b) 段）可提供足够的安全水平，因此可能不需要进行 IP 类型试验。据了解，相关压力容器规定的所有预防措施对压力容器的使用规范进行了考虑，并酌情加以应用。

623.4. 该应用的一个示例是用于六氟化铀运输的压力容器。这些钢瓶的设计压力远高于正常运输和使用条件下的压力。因此，它们天然就受到机械负载的保护。

623.5. 对于工业货包，没有特定规定空舱要求（见“运输条例”第 649 段）。但是，对于液态内容物（或固态内容物，如六氟化铀，在加热时可能变成液态），如第 649 段所述，应当提供足够的贮液量以防止容器破裂。该破裂可能发生在容积不足的情况下，特别是由于温度变化导致内容物膨胀。

## **工业货包-2 型（IP-2 型）要求**

624.1. 见第 623.1 段。

624.2. 考虑从 IP-2 型货包中排放内容物，对正常运输工况下的货包施加了包容功能。由于一些低比活度物质和表面污染物体内容物相当固定，比活度和表面污染有限，所以可以简化证实内容物没有损失或分散。（见第 648.2—648.5 段）

624.3. 用于运载液体的 IP-2 型货包，见第 623.2—623.5 段。用于携带气体的 IP-2 型货包，见第 623.2—623.4 段。对于考虑携带 LSA-III 的 IP-2 型货包见第 409.6 段。

624.4. 在正常运输工况下剂量率增加 20%的限值是核实屏蔽设计适当性的设计要求。对该要求的遵守可以通过屏蔽分析、模拟货包的变形以及酌情模拟放射性内容物的移动和内容物状态的变化，包括由于正常运输工况造成的放射性核素的分离和/或沉淀来证实。在货包的设计和准备装运时，应当考虑在常规运输工况下由于内容物状态的变化和/或内容物的移动而引起的剂量率增加（见第 527.1 段和第 573.1 段）。因此，由于这些原因引起的剂量率增加可排除在正常运输工况下剂量率增加的证实之外。

## **工业货包-3 型要求（IP-3）**

625.1. 见第 623.1 段。

625.2. 考虑到 IP-3 型货包内容物的排放，对 IP-3 型货包施具有与固体 A 型货包相同的包容功能，同时考虑到可能在 IP-3 型货包中运输的比活度值较高，以及在非独家使用用途运输中缺乏操作控制。在液体低比活度物质的情况下，应当提供足够的裕度，以避免包容系统的水力失效。这些要求与“运输条例”第 648.2—648.5 段分级方法是一致的。

625.3. 用于运载液体的 IP-3 型货包见第 623.2—623.5 段。用于运载气体的 IP-3 型货包见第 623.2—623.4 段。对于考虑运载 LSA-III 的 IP-3 型货包见第 409.6 段。

### **工业货包-2 型和 3 型的替代要求（IP-2 型和 IP-3 型）**

626.1. 允许适用联合国包装的替代方法，因为联合国建议[17]要求具有可比性的一般设计要求和性能试验，这些要求和试验被认为具有相同的安全水平。虽然密封性也是联合国建议中的性能试验标准之一，但“运输条例”的屏蔽要求却不是这样，在使用联合国包装时需要特别注意这些要求。

626.2. 由于与 IP-2 型包装相比，联合国第 I 组和第 II 组包装要求相同甚至更严格的性能试验标准，所有联合国第 I 组和第 II 组包装自动符合 IP-2 型试验要求，但第 626.3 段所述除外。这意味着，按照联合国系统标有 X 或 Y 的包装，在不需要特定屏蔽的情况下，可能适合运输需要 IP-2 型货包的低比活度物质和表面污染物体。对于这些货包，所装运的内容物与在联合国试验中试验的内容物之间应当保持一致，包括考虑最大相对密度、总质量、最大总压、蒸气压和内容物的形状。

626.3. 联合国第 I 组和第 II 组包装（即符合联合国建议[17]第 6.1 章规定的规范的包装）可用作 IP-2 型货包，条件是在联合国试验期间或之后内容物没有损坏或扩散。然而，应当指出，根据联合国标准，如果没有进一步泄漏，则允许在撞击时从封堵器中略微排放。该排放不能满足内容物不损失或不扩散要求。此外，预计内容物应当与特定货包中允许的内容物一致，并且应当不要求特定的屏蔽。适用的限制可以从联合国规范包装上要求的联合国标记中确定。

626.4. 见第 648.4 段。可用于检查遵守“运输条例”第 626 (c) (i) 段指出的方法示例。

627.1. 根据国际和国家条例设计用于运输危险货物的便携式储罐已被证实 在装卸和运输方面是安全的，在某些情况下甚至在严重事故工况下也是如此。

627.2. 如果结构设备（框架）是按照 ISO 1496-3[18]设计的，则可符合便携式储罐在安全装卸、堆垛和运输方面的一般设计标准。ISO 1496-3[18]规定了一种结构框架，在该结构框架中，储罐的连接方式应当使装卸、堆垛和运输的所有静力不会对储罐壳体产生不适当的应力。

627.3. 在常规运输工况下的动态力在附录 IV 考虑。

627.4. 对于放射性物质（没有其他危害性质），按照 ISO 1496-3[18]设计的便携式储罐被认为至少相当于按照联合国建议[17]关于多式联运储罐运输建议第 6.7 章规定的标准设计的储罐。

627.5. 如果在试验之后，屏蔽材料保持在原位，没有显示出明显的裂纹，并且允许通过计算和/或评价的剂量率不超过 20% 的增加，则符合屏蔽保持要求“运输条例”第 627 (c) 段所述条件下的测量。对于带有国际标准化组织框架的便携式储罐，剂量率计算或测量可将框架表面作为相关表面（见第 624.4 段）。

628.1. 以解释第 627 段各项要求之间的等同性。对于便携式储罐（涉及联合国建议[17]第 6.7 章）和为储罐制定的其他设计标准，应当参照《欧洲国际公路运输危险货物协定》（ADR）[19]和《国际铁路运输危险货物条例》（RID）[20]，在相应的第 6.7 章中引入了相同的标准，但在第 6.8 章中单独引入了公路罐车、铁路罐车和罐式集装箱的同等标准，其中规定了可接受的同等安全水平。

629.1. 按照 ISO 1496-1[21]设计和试验并根据《1972 年国际集装箱安全公约》（CSC 公约）[22]批准的货运集装箱已经通过数百万个箱的使用证实，能够在常规运输工况下提供安全的装卸和运输。然而，应当指出，ISO 1496-1 涉及与集装箱设计和试验相关的问题，而 CSC 公约主要涉及确保集装箱运输安全、得到充分维护并适合所有水陆运输方式的国际运输。CSC 公约中规定的试验与 ISO 1496-1 规定的试验不相等。

629.2. 按照 ISO 1496-1[21]设计和试验的货运集装箱仅限于运输固体，因为它们被认为不适用于自由液体或未鉴定货包内的液体。应当考虑集装箱的构造细节，以确保能满足“运输条例”的密封要求。例如，焊接接头如果可见，就更容易进行泄漏试验。只有密封类型的货运集装箱才能用来证实符合 IP-2 型和 IP-3 型集装箱要求，即放射性内容物没有损失或扩散，为了证实该点，有必要在试验期间和之后进行监控。

629.3. 货运集装箱在常规运输过程中发生的加速过程中，应当显示出能够保持和容纳其内容物，因为国际标准化组织标准对货运集装箱的试验不包括动态试验。在实践中，这可能需要在考虑到要运输内容物的情况下，在下列阶段对密封性进行证实：

- (a) 根据 ISO 1496-1[21]进行原型试验（在施加试验负载之前，当容器静态装载时，以及当试验负载被移除时）；
- (b) 各单位生产；
- (c) 维护；
- (d) 维修。

629.4. 应当注意确保容器内用于固定物体的附件能够承受常规运输工况下的典型负载（见附录 IV）。

629.5. 关于防止内容物损失或扩散和最大表面剂量率增加的导则，见第 624.1—624.4 段。

630.1. 按照联合国建议[17]第 6.5 章的规定批准的中间散装集装箱被认为等同于按照 IP-2 型和 IP-3 型要求设计和试验的货包，但任何屏蔽要求除外。中间散装集装箱的替代用途仅限于金属设计，因为它们与 IP-2 型和 IP-3 型货包要求最匹配。无法确定是否需要其他设计类型，它们似乎不适用于放射性物质的运输。

630.2. 除任何屏蔽要求外，对于符合联合国建议[17]第 6.5 章规定的中间散装集装箱，可证实其符合 IP-2 型和 IP-3 型设计和性能试验要求，以及对容量超过 0.45 立方米的中间散装集装箱的额外要求，以便在最具破坏性的位置（而不仅仅是在底座上）进行跌落试验。这些建议包括可比的设计和性能试验要求以及主管当局的设计批准。

## 装有六氟化铀货包要求

631.1. 六氟化铀是具有重大化学危害的放射性物质，然而，联合国建议[17]要求该物质的放射性优先，化学危害应当视为次要危害。根据浓缩度和存在的裂变铀的数量，六氟化铀可以以例外、A 型、B (U) 型或 B (M) 型工业货包运输（即根据放射性危害）。然而，ISO 7195[14]和“运输条例”

关于六氟化铀运输的许多要求并不涉及六氟化铀造成的放射性和临界危害，而是涉及物质的物理性质以及在排放到大气中并与水或水蒸气发生反应时的化学危害。此外，由于这些容器在装卸操作期间是加压的，所以它们必须遵守压力容器条例，尽管它们在正常运输工况下不是加压的。“运输条例”第 631—634 段指出要求侧重于这些关切，而不是辐射和临界危害。与包装和运输中的六氟化铀的放射性和临界危害相关的其他适用要求在“运输条例”其他地方有所规定，遵守这些要求对于在装卸和运输过程中提供适当的安全至关重要。

631.2. 在 ISO 7195[14]于 1993 年首次发布之前，ANSI N14.1[15]是整个工业使用的六氟化铀钢瓶标准。ISO 7195 是作为 ANSIN14.1 的国际替代标准发布的，无意制定或引入新的或额外的规定。按照 ANSI N14.1[15]制造、试验和维护的六氟化铀钢瓶，可视为符合 ISO 7195[14]，以遵守“运输条例”。

632.1. 0.1 千克的豁免水平是考虑到六氟化铀的小型裸露钢瓶的爆炸[23]。根据参考文献[24、25]确定的化学危害，0.1 千克的水平远低于 10 千克的质量限值。

632.2. “运输条例”第 632 (a) — (c) 段的规定视乎货包所处环境的类型而有所不同。对于六氟化铀货包的压力试验（“运输条例”第 718 段），可通过对钢瓶进行水压试验来满足无泄漏和无不可接受应力的验收要求，在水压试验中，可通过寻找钢瓶泄漏的证据来检测泄漏。阀门和其他服务设备不包括在此压力试验中（ISO 7195[14]）。

632.3. 对于跌落试验（“运输条例”第 722 段），可通过执行符合 ISO 7195[14]阀门泄漏试验规定的程序、压力和灵敏度的气体泄漏试验来证实接受。

632.4. 对于热试验（“运输条例”第 728 段），试验期间或之后的验收标准以防止钢瓶壳体撕裂的需要为基准。六氟化铀钢瓶壁撕裂或重大故障是不可接受的，但经主管当局批准，通过阀门或阀门周围的微小泄漏或其他工程设计的渗入钢瓶壁的情况也是可以接受的。

632.5. 即使不是不可能，也可能很难证实遵守了“运输条例”第 632 段要求，通过在容器中使用六氟化铀进行试验，因为存在重大的环境、健康和安全问题。因此，符合性证实可能需要依赖于使用六氟化铀替代品的试验，同时参考以前令人满意的试验、实验室试验、计算和合理的论据，如“运输条例”第 701 段所述。

632.6. 用于证实装有六氟化铀货包遵守“运输条例”第 632 (c) 段要求。设计人员应当考虑在热试验中遇到的条件下可能改变六氟化铀和/或包装的瞬态热物理条件参数的影响。设计人员至少应当考虑以下几点：

- (a) 货包最严重的方向：改变货包的方向可能导致六氟化铀在货包内的固、液、气三相分布不同，并可能对内部压力产生不同的影响[26、27]。
- (b) 允许装填比例的全部范围：钢瓶内的压力可能以复杂的方式依赖于它被装填的程度。例如，对于非常小的装填比，固态六氟化铀可以更快地熔化和蒸发，从而加速货包内的压力增加[28]。
- (c) 结构材料在高温下的实际性能：例如，大多数钢的抗拉强度在温度超过 500℃时大幅度下降[29]。
- (d) 结构材料中的冶金缺陷会导致货包破裂，这将是缺陷尺寸的函数。最大设计缺陷尺寸应当从设计分析、制造工艺和视察验收标准中得出。

钢瓶壁或其他包装部件因腐蚀而变薄可能会导致性能下降。设计人员应当确定可接受的最小壁厚，并应当制定和应用确定在役钢瓶壁厚的方法，包括未装填和装填钢瓶[30、31]。

632.7. “运输条例”第 632 (b) 和 (c) 段指出的试验，可以单独货包进行。

633.1. 之所以包括这一规定，是因为不太可能提供足够可靠的泄压设备，以确保在压力降至可接受水平后达到所需的排放水平并随后关闭。

634.1. 经主管当局批准，可授权使用设计用于装载 0.1 公斤或更多六氟化铀货包，其设计不能承受 2.76 兆帕压力试验，但设计能承受至少 1.38 兆帕压力试验。这是为了允许使用旧的货包设计，这些设计可以证实是安全的，使主管当局满意，但须经多边批准。货包设计人员应当准备一个安全论证文件来证实该认证的正当性。

634.2. 装有六氟化铀的超大型货包，如设计可容纳 9000 公斤或以上六氟化铀，且未在热防护外包装内运输，则被认为可能具有足够的热质量，可经受第 728 段的热试验。在包容系统不破裂的情况下。经主管当局批准，这些包装可在多边基础上进行装运认证，货包设计人员应当准备一份安全证实，以证实该认证的正当性。

634.3. 六氟化铀货包设计和批准要求的图形表示如图 4 所示。在所有情况下，适用与货包内容物的放射性和易裂变特性相关的其他要求。

634.4. 另见第 632.5 段。

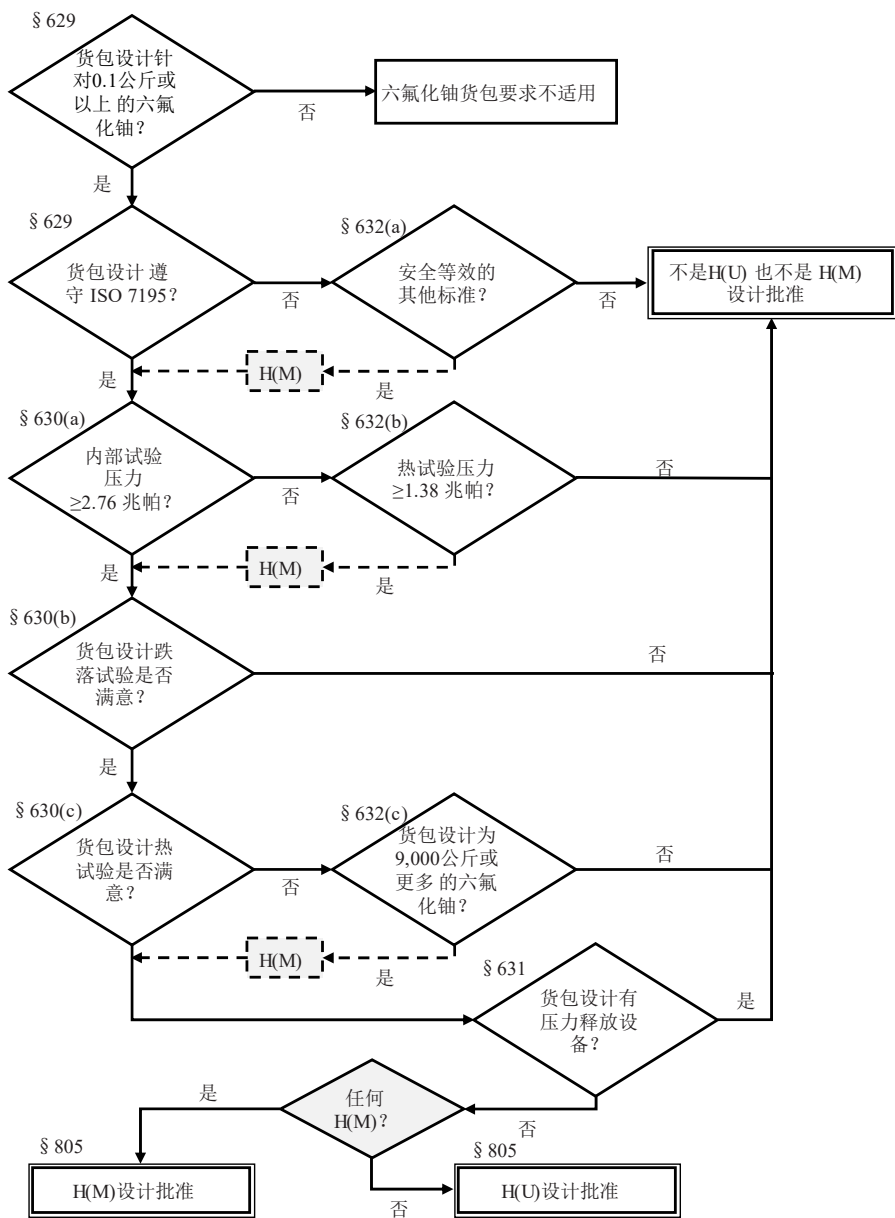


图 4. 六氟化铀附加货包设计和核准要求的图示。

## A 型货包要求

636.1. 采用 10 厘米的最小尺寸有几种原因。一个很小的货包可能会放错地方或塞进口袋里。为了符合国际运输实践，货包标签必须是 10 厘米见方。为了充分显示这些标签，货包的尺寸要求至少为 10 厘米。

637.1. 要求货包密封既是为了防止篡改，也是为了确保货包的收货人知道在运输过程中内容物和/或内部包装是否被篡改或移走。在封条完好无损的情况下，收货人得到保证，内容物是标签上所述的一致，如果密封损坏，收货人将被警告，在装卸过程中，特别是在打开货包时需要格外小心。

637.2. 使用的安保密封的类型主要取决于货包的类型和质量，但设计人员应当确保密封的类型不会在运输中正常装卸货包时受到损坏。

637.3. 有许多密封方法，但以下是放射性物质货包上使用的典型方法：

- (a) 当包装是纤维板纸箱时，可以使用胶粘或自粘带，这些胶粘或自粘带不能重复用于重新密封包装（即外包装和/或胶带在打开时应当有效地毁坏）。
- (b) 卷曲金属密封可用于铅罐和钢罐、圆桶和小盒子的密封。密封件卷曲在适当的花边或锁线的末端，并用识别图案浮雕。用于确保关闭本身的方法应当独立于安保密封。
- (c) 挂锁可用于木料箱，也可用于钢和/或铅货包。例如钻柱的特点可以结合到盒子或货包设计中，以便当挂锁通过钻孔安装时，不可能打开货包。

638.1. 除了用作包装的储罐或货运集装箱外，一般来说，相对于运输工具的质量而言，具有相当大质量货包的固定将使用适用于限制如此大质量的标准设备来完成。由于保持系统在正常和事故装载条件下“不得损坏”货包的功能，因此可能有必要设计保持系统与货包的连接以便它将首先失效（通常称为“薄弱环节”）。这可以实现，例如，通过设计连接点使其只适应卸扣销的特定最大尺寸，或者由在指定应力下会剪断的插销或会断裂的固定螺栓。

638.2. 吊装点可以用作保持系统附件，但如果使用，它们应当为两个任务专门设计。单独的吊装点和保持系统附件应当明确标明其特定用途，除非它们的设计使其无法替代使用，例如，钩型保持系统附件通常不能用于吊装目的。

638.3. 还应当考虑保持系统的潜在方向性故障，以便在发生正面撞击时保护运输工作人员，同时保护货包免受侧面撞击造成的过重侧面负载[32]。相关货包及其保持系统的推荐设计考虑事项的详细信息见附录 IV。

639.1. A 型货包部件的设计温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}$ — $70^{\circ}\text{C}$ ，对应于车辆或其他外壳内可能的环境温度，或货包暴露在阳光直射下时的货包温度。该范围涵盖在日常运输和在途存储中可能遇到的条件。如果在运输或装卸过程中可能遇到更宽的环境温度范围，或者如果内部产生大量热量，那么在设计中应当考虑到该点。可能需要考虑的一些物项是：

- (a) 部件相对于结构或密封功能的膨胀和收缩；
- (b) 极端条件下部件材料的分解或状态变化；
- (c) 拉伸、延展特性和货包强度；
- (d) 屏蔽设计。

640.1. 现有许多国家和国际标准（如参考文献[3、14、18、21、33—36]），涵盖了极其广泛的设计影响和制造技术，如压力容器规范、焊接标准或密封标准，可用于货包的设计、制造和试验。设计人员和制造商应当尽可能地按照这些既定标准工作，以促进和证实在货包的总体设计和制造中的充分控制。使用该标准还意味着，参与运输各个阶段所有相关人员（有时在不同地点和不同成员国）更容易理解设计和制造过程，最重要的是，货包完整性不太可能受到损坏。

640.2. 如建议采用新的设计、制造或试验技术，而现在并无适当的标准，设计人员可能需要与主管当局讨论该建议以获得接受。设计人员、主管当局或其他负责机构应当考虑制定一个可接受的标准，涵盖任何新的设计概念、制造或试验技术或使用的材料。

641.1. 可能适用的正紧固设备的示例有：

- (a) 焊接；

- (b) 螺纹；
- (c) 扣合盖子；
- (d) 卷曲；
- (e) 轧制；
- (f) 喷丸；
- (g) 热收缩材料；
- (h) 胶带或胶水。

其他方法可能是合适的，这取决于货包设计。

642.1. 如果特殊形状放射性物质构成包容系统的一部分，则应当考虑特殊形状物质在适用的常规、正常和事故运输工况下的适当性能。

644.1. 某些物质可能与 A 型货包内的某些物质发生化学反应或辐解反应。可能需要进行试验来确定物质的适宜性，以确保包容系统既不容易受到反应本身引起的恶化，也不容易受到这些反应引起的压力增加的损坏。

645.1. 该要求是为了防止在海平面（或海平面以下）装满并通过地面运输送到更高海拔的货包中因压差过大而造成的包装失效。该要求相当于海拔 4000 米的地面移动引起的气压变化。如果货包可以在海平面或以下并在陆地上运输到该高度时，货包必须承受高度变化造成的超压，并能够承受其内容物可能产生的任何超压。

645.2. 关于放射性内容物保持要求的导则，见第 648.2—648.5 段。

646.1. 为了防止内容物通过阀门泄漏造成污染，“运输条例”要求这些阀门有一个辅助设备或外壳。根据特定设计，该设备或外壳还可有助于防止未经授权操作阀门（见“运输条例”第 615 段）。

646.2. 可能适用的外壳的示例有：

- (a) 使用垫片的螺纹阀门上的空帽；
- (b) 使用垫片的法兰阀门上的空法兰；
- (c) 专门设计的阀门盖或外壳使用密封垫，设计用于防止任何泄漏。

其他方法可能是合适的，这取决于货包设计。

647.1. “运输条例”第 647 段要求的主要目的是确保放射性物质周围不断保持辐射屏蔽，以最大限度地减少货包表面剂量率的任何增加。当辐射屏蔽是一个单独的单元时，正紧固设备确保包容系统不会被释放，除非是故意的。

647.2. 可能适用的正紧固设备的示例有：

- (a) 盖上铰链操作的联锁设备；
- (b) 辐射屏蔽周围的螺栓、焊接或挂锁框架；
- (c) 螺纹屏蔽塞。

其他方法可能是合适的，这取决于货包设计。

648.1. A 型货包内容物限值本质上限制了放射性危害。“运输条例”第 648 段对货包设计提出了额外要求，以确保在正常运输工况下的安全。

648.2. A 型货包正常运输的最大允许泄漏率在“运输条例”从未定量定义，但在实际意义上一直是有要求的。

648.3. 实际上，很难就一种能够令人满意地纳入现有大量包装及其内容物的单一试验方法提出建议。可采用定性方法，取决于所考虑的包装及其放射性内容物。在应用首选试验方法时，所用的最大压差应当是由内容物和预计环境条件引起的压差。“运输条例”第 621 段、第 624 (a) 段、第 648 (a) 段和第 651 段目的是确保在正常运输工况下，货包的放射性内容物不能大量泄漏，从而造成放射性或污染危害。

648.4. 对于固态、颗粒和液态内容物，满足“无损失或扩散”要求的一种方法是在完成真空试验或其他适当试验时监控货包（包含非活化，控制物质），以直观地确定是否有任何内容物逸出。对于液体，一种吸收材料可用作试验指示剂。此后，对货包进行仔细的目视视察可以确认其完整性得到保持，并且没有发生泄漏。在某些情况下可能适用的另一种方法是在真空试验之前和之后称重货包，以确定是否发生了任何泄漏。

648.5. 对于气态内容物，目视监控不太可能令人满意，可以使用具有容易识别的气体（或提供气态的挥发性液体）的抽吸检测或加压方法。此外，仔细目视视察包装可以确认其完整性已经保持，并没有逃逸路径存在。另一种检测方法是简单的气泡试验。

648.6. 关于增加最大表面剂量率的建议，见第 624.4 段。

649.1. 空舱是货包内可用的充气空间，用于容纳因环境和运输工况变化而导致的货包内液态内容物的膨胀。足够的容积确保包容系统不会由于纯液系统的膨胀而承受过大的压力，纯液系统通常被认为是不可压缩的。

649.2. 在确定空舱规范时，可能有必要考虑货包材料温度的两个极端，即-40°C和 70°C（见“运输条例”第 639 段）。在较低的温度下，由于物质从液态转变为固态的过渡温度下的膨胀，压力可能会增加。在较高的温度下，由于液态内容物的膨胀或汽化，压力可能会增加。还需要考虑确保不提供过大的空舱，因为这可能会在运输过程中在货包内产生不可接受的动态涌动。此外，在涉及大量液体的灌装操作中，可能会发生涌动或搭接，设计人员可能需要在某些货包设计中考虑这方面的问题。

650.1. B (U) 型货包、B (M) 型货包或 C 型货包的用户可能希望使用该货包装运少于 A<sub>2</sub> 量的液体，并在装运文件上指定该货包为 A 型货包运输。这就减轻了托运人和承运人的一些管理负担，而且由于货包比标准 A 型货包具有更大的完整性，安全性不会降低。在该情况下，不需要添加吸收材料或次级外部密封部件。

651.1. 对压缩或未压缩气体的 A 型货包进行额外试验的原因与对液体 A 型货包进行额外试验的原因相似。然而，由于在气体的情况下，容器的失效总是 100% 排放，因此需要进行额外试验，以降低容器在给定严重事故下失效的可能性，从而达到与设计用于运载可分散固体的 A 型货包相比的风险水平。

651.2. 含氟或惰性气体的货包不受“运输条例”第 651 段要求的限制。是基于这些材料的剂量学模式（Q 系统，见附录 I 的讨论）。

651.3. 关于气态放射性内容物无损失或扩散要求的指导意见，见第 648.5 段。

## **B (U) 型货包要求**

652.1. B (U) 型货包的概念是，它能够承受运输中的大部分严重事故工况，而不会丧失密封或增加外部剂量率，以至于危及公众或参与应急响应

行动或恢复。应当是安全的可回收（见“运输条例”第 509 段和第 510 段），但不一定能够重复使用。

653.1. 尽管“运输条例”第 639 段要求适用于 A 型货包，旨在涵盖可能导致包装失效的大多数情况，而 B (U) 型货包在特定设计的基础上需要额外考虑包装部件温度。这通常是因为 B (U) 型货包可能是为产生大量热量的内容物而设计的，该设计的部件温度可能超过 A 型货包的 70℃要求。为货包设计考虑，指定 38℃的环境温度是为了确保设计人员适当地装卸包装部件的温度以及这些温度对几何构型、屏蔽、效率、腐蚀和表面温度的影响。此外，要求货包能够在 38℃的环境温度和太阳能加热的情况下无人看管一周，目的是确保货包处于或接近平衡条件，并确保在这些条件下，货包能够经受“运输条例”第 719—724 段试验所证实的正常运输工况，而不丧失密封或减少辐射屏蔽。

653.2. 对环境温度条件的评价必须考虑内容物产生的热量，这可能使某些货包部件的最高温度大大超过 A 型货包设计规定的 70℃的最高温度。

653.3. 另见第 639.1 段、第 655.1 段、第 655.2 段、第 657.1—657.9 段和第 666.1—666.3 段和附录 V。

653.4. 在正常工况下，通过模拟内容物放射性衰变所产生的热量，可以使用实际试验来确定货包的内部和外部温度。这样就可以对热源进行控制和测量。此类试验应当在均匀和稳定的热环境中进行（即恒定的环境温度、静止的空气和来自外部来源如阳光的最小热输入）。货包及其热源应当在试验中保留足够的时间，以使兴趣温度达到稳定状态。应当测量试验环境温度和内部热源，并将所有测量的货包温度线性调整到 38℃环境温度所对应的温度。

653.5. 对于在不受控制的环境（如室外）进行的试验，环境变化（如昼夜变化）可能使其不可能达到恒定的稳态温度。在该情况下，应当测量周期性准稳态温度（包括环境温度和货包温度），允许在环境温度和货包平均温度之间建立关联。这些结果连同内部热源的数据，可用于预测与稳定的 38℃环境温度相对应的货包温度。

653.6. 在某些情况下，国家标准和/或货包内容物的技术规范规定了最高允许温度，这些内容物的温度限值应当遵守。

654.1. 装有发热放射性物质的货包表面温度将高于环境温度。表面温度限值是必要的，以保护邻近的货物免受潜在的损坏，并保护装卸过程中装载和卸载货包人员。

654.2. 在 38℃ 的最高环境温度下，表面温度限值为 50 最，其他货物不会过热，任何人装卸或接触表面都不会烧伤。在独家使用情况下允许较高的表面温度（空运除外）（见“运输条例”第 655 段和第 655.1—655.3 段）。

654.3. 对于可接触表面的温度可以忽略日晒，只考虑内部热负载。该简化的正当性是，任何有或没有内部热的货包在日晒时都会经历类似的表面温度升高。

655.1. 对于可以很好地控制对邻近货物的潜在损坏的独家使用 B (U) 型货包，要求其表面温度限值为 85℃，以防止因偶然接触货包而对人员造成伤害。“运输条例”第 655 段提到的障碍或屏障。不被视为货包的一部分，因此，它们被排除在与货包设计有关联的任何试验之外。

655.2. 容易接近的表面不是一个精确的描述，但在这里被解释为指那些可能与运输操作无关人员可以随意接触的表面。例如，使用梯子可能使表面容易接近，但这并不是认为表面容易接近的原因。在同样的意义上，紧密间隔翼片之间的表面不会被认为是容易接近的。如果翼片的间距很大，比如说人手的宽度或更宽，那么翼片之间的表面可以被认为是容易接近的。

655.3. 屏障或屏风可用于防止较高的表面温度，但仍保留 B (U) 型批准类别。一个示例是装有吊装耳轴的紧密翼片货包，在使用耳轴时，需要将翼片局部切向耳轴，从而将货包的主体作为一个可接近的表面暴露出来。保护可以通过使用屏障来实现，例如在日常运输过程中有效防止人员接触或接触货包扩大的金属屏障或外壳。然后，这些屏障将被视为可接触表面，因此将受到适用的温度限值的限制。隔板或隔板的使用应当不损坏货包满足传热要求的能力，也应当不降低其安全性。

656.1. 见第 666.1 段。

657.1. 在运输过程中，货包可能受到太阳能加热。太阳能加热的作用是提高货包温度。为了避免难以准确地考虑到许多变数，国际上商定了日照值（见“运输条例”表 12）。日照值指定为 12 小时的均匀热通量，然后是 12 小时的零日晒。假想货包是在露天存放的，因此，既不考虑遮阳，也不考

虑来自相邻结构的反射。“运输条例”表 12 显示了朝上的水平表面的最大日照值和不接受日照的朝下的水平表面的最大日照值。一个垂直的表面被假想只加热半天，并且只有效地加热一半，因此，一个垂直表面的日光照射的表值被给出为一个朝上的平面的最大值的四分之一。曲面上的位置在水平和垂直方向之间变化，对于朝上的水平表面，明智地分配最大值的一半。这些商定值的使用确保了任何安全评定的一致性，为计算提供了共同的基准。

657.2. “运输条例”表 12 提供的日照数据是均匀热通量。它们将在规定的水平下照射 12 小时（日光），然后 12 小时不照射（夜间）。应用表示日照的循环阶跃函数，直到兴趣温度达到稳定的周期行为条件。

657.3. 评价日晒影响的一个简单但保守的方法是以“运输条例”表 12 所述的值连续施加均匀热流。该方法的使用避免了进行瞬态热分析的需要，只进行了简单的稳态分析。

657.4. 对于一个更精确的模式，一个与时间相关的正弦热流密度可以用来表示在白天对平面和曲面的日照。日出和日落之间对表面的综合（总）热输入要求等于表值在 12 小时内总热的适当值（即，将表值乘以 12 小时以获得总热输入（以瓦/平方米））。日落和日出之间的时间给出了该模式的零热流密度。应当应用循环日照模式，直到兴趣温度达到稳态周期行为的条件。

657.5. 图 5 显示了具有平坦表面的货包的水平横截面。“运输条例”表 12 的数值适用如下：

- (a) 对于任何水平朝下的平面，不能接受任何阳光照射（情况 1），适用“运输条例”表 12 的零值。
- (b) 对于任何水平朝上的平面（情况 2），适用“运输条例”表 12 的 800 瓦/平方米的值。
- (c) 对于任何垂直平面（情况 3，即垂直平面  $15^{\circ}$  以内）和任何朝下倾斜的平面（情况 4），适用“运输条例”表 12 的 200 瓦/平方米的值。
- (d) 对于任何朝上倾斜的平面（情况 5，所有其他表面），适用“运输条例”表 12 的 400 瓦/平方米的值。

657.6. 图 6 显示了具有曲面和平竖直面的货包的垂直横截面。“运输条例”表 12 的数值适用如下：

- (a) 对于任何垂直平面（情况 3，即垂直方向 15° 范围内），适用“运输条例”表 12 中垂直运输的平面值 200 瓦/平方米。
- (b) 对于任何朝下的曲面（情况 4），适用“运输条例”表 12 的另一个朝下的表面值 200 瓦/平方米。
- (c) 对于任何朝上的曲面（情况 5，所有其他表面），适用“运输条例”表 12 的 400 瓦/平方米的值。

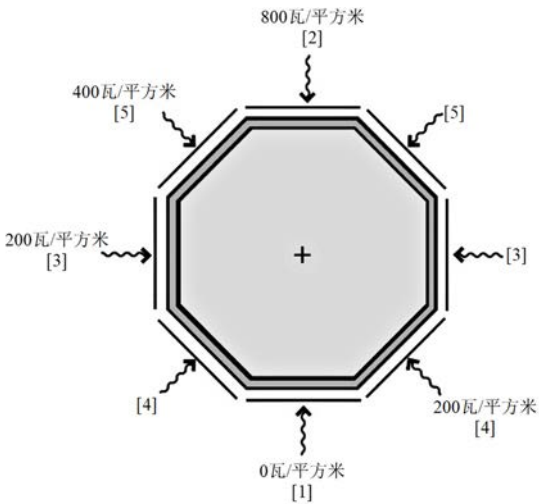


图 5. 平表面货包的水平横截面（编号[1]—[5]表示“运输条例”表 12 所示的情况）。

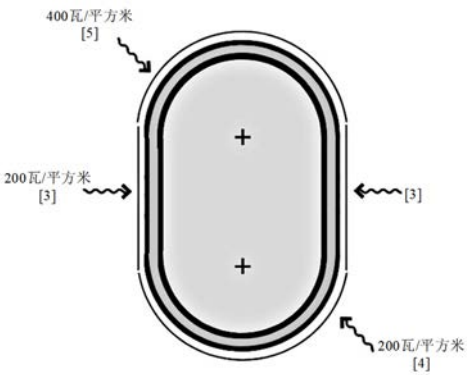


图 6. 具有曲面货包的垂直横截面（编号[3]—[5]表示“运输条例”表 12 所示的情况）。

657.7. 可在热评价中考虑减少任何表面日晒（即为货包表面提供阳光遮蔽）的货包部件。如果由于货包在正常运输工况下进行试验，其有效性会降低，则任何假想为减少日晒的此类部件都应当不包括在热评价中。

657.8. 由于辐射换热取决于表面的发射率和吸收率，因此可以考虑这些特性的变化。这些表面性质与波长相关。太阳辐射对应于高温和短波长的辐射，而来自货包表面辐射对应于相对较低的温度和较长波长的辐射。在许多情况下，吸收率将低于发射率，因此当目标是散热时，对两者使用较高的值将提供更大的安全裕度。在其他情况下，可以利用这些性质中自然发生的差异，或者可以对表面进行处理，以利用这些差异来减少日晒的影响。当表面性质的差异被用作减少日晒影响的热防护手段时，应当证实热防护系统的性能，并应当证实该系统在正常运输工况下保持完好。已发表的数据来源多种多样，列出了物质在特定温度范围内的特定性能，从而提供了发射率和吸收率的实际值，例如参考文献[37]。

657.9. 对货包温度的评价可以通过分析或试验来完成。如果使用试验，应当在足比例模型上进行。如果辐射源不是太阳光，则应当考虑太阳波长与光源波长之间的差异。试验应当继续进行，直到达到热平衡（恒定稳态或稳态周期状态，取决于来源）。必要时，应当对环境温度和内部热量进行校正。

658.1. 一般来说，热防护涂层分为两类：在热存在下发生化学变化的涂层（如烧蚀和膨胀）和提供固定隔热屏障的涂层（包括陶瓷材料）。

658.2. 两组都易受机械损坏。烧蚀型和膨胀型的材料是软的，会因滑动到粗糙的表面（如混凝土或砾石）或坚硬的物体对其移动而损坏。相比之下，陶瓷材料很硬，但通常很脆，在不开裂或压裂的情况下无法吸收撞击。

658.3. “运输条例”第 722—727 段所要求的试验无法模拟的、可能对热防护材料造成损坏的常见事件包括：运输过程中货包与车辆接触面之间的相对移动，在路面嵌有碎石的道路上打滑，滑过损坏的铁轨或靠在金属构件的边缘，靠着相邻构筑物或者设备的螺栓头吊装或者跌落，其他货包（不一定含有放射性物质）在堆垛或运输过程中的影响。通过简单跌落试验的货包不会受到与通常与车辆事故相关的滚动和滑动作用相同的表面损坏，

并且随后进行热试验的货包可能具有在实际事故工况下可能被损坏的涂层。

658.4. 热防护涂层的损坏可能会降低涂层的有效性，至少在部分表面上。货包设计人员应当评定该损坏的影响。

658.5. 使用年限和环境条件对热防护材料的影响也需要考虑在内。某些材料的性质随时间、温度、湿度或其他条件而变化。

658.6. 涂层可以通过添加防滑层或缓冲层来保护，以防止其他表面滑动或摩擦材料。耐用的金属外皮或外包装可以提供良好的保护，但可能会改变货包的热性能。货包的外表面也可以设计成能够在凹槽内施加热防护。

658.7. 经主管当局同意，可对货包的热防护材料进行任意损坏的热试验，以显示热防护的有效性，即使这些材料受到损坏，如果可以表明该损坏会产生保守的试验结果。

659.1. “运输条例”（1967 年版）首次引入了根据与规定试验工况相关的活度损失为大型放射源货包的规定包容标准的概念。

659.2. B (U) 型货包在经过试验以表明其承受正常运输工况的能力后，排放速率限值不超过每小时  $10^{-6} A_2$ ，最初是出于对最不利的预计条件的考虑。这是为了对应一名工作人员暴露在放射性物质在密封车辆道路运输过程中从货包中泄漏。“运输条例”所体现的设计原则是，应当避免从 B(U) 型货包中排放放射性物质。然而，由于不能保证绝对包容，规定最大允许“活度泄漏”率的目的是允许指定与可接受的辐射防护标准相关的适当和实际的试验程序。在推导每小时  $10^{-6} A_2$  的排放速率时所用的模式，以及在氡-85 情况下的特别规定在附录 I 讨论。

659.3. “运输条例”（1973 年修订版）规定，如果 B (U) 型货包含有特定的放射性核素，在离货包表面 1 米处的剂量率应当不超过事故工况试验前存在的剂量率的 100 倍。对于旨在运载其他放射性核素的货包，该要求构成了不切实际的设计约束。因此，自“运输条例”（1985 年版）以来，无论放射性核素如何，都规定了 10 毫希沃特/小时的特定最大剂量率。

659.4. 在进行模拟运输事故工况的试验时，氙-85 的排放限值不超过  $10A_2$ ，所有其他放射性核素在一周内的排放限值不超过  $A_2$ ，这是对“运输条例”（1973 年版）规定的简化。之所以作出该改变，是因为与动力堆场址普遍适用的安全标准相比，B (U) 型限值似乎限制过严[38、39]，特别是对于预计极少发生的严重事故工况。B (U) 型货包在事故工况下排放  $A_2$  的放射性影响已在其他地方详细讨论[40]。假设在 B (U) 型试验中模拟的严重事故将导致损坏货包附近的所有人员迅速撤离，或者在保健物理监督和控制下工作，事故现场附近人员的照射不太可能超过 GSR Part 3[41]规定的工作人员年剂量限值。氙-85 是经辐照核燃料运输中唯一具有实际重要性的惰性气态放射性核素，对氙-85 的特别规定是对暴露于放射性羽流的剂量学后果进行特定考虑的结果，而在推导非气态放射性核素  $A_2$  值时使用的模式是不适当的[42]（另见本“安全导则”第 I.74 段）。

659.5. “运输条例”第 659 段排放限值的优点是，根据主要关注的参数（即货包中特定放射性核素的潜在危害）来表示所需的容器性能。该方法的缺点是直接测量通常是不切实际的，特别是如果需要对机械、热和浸没试验后预计物理和化学形状的每一个放射性核素应用该方法。使用完善的泄漏试验方法如气体泄漏试验（见 ANSI N14.5[35]和 ISO 12807[36]）更为实用。一般来说，泄漏试验测量通过容器边界的物质流量。所述流量可包含示踪物质，例如气体、液体、粉末或实际或替代内容物。因此，应当确定一种方法，将测量的流量与参考条件下预计放射性物质泄漏相关联。然后，可以将该泄漏量与“运输条例”所允许的最大放射性物质泄漏率进行比较。如果示踪材料是气体，则可以确定以质量流量表示的泄漏率。如果示踪材料是液体，可以确定以体积流量表示的泄漏率或以体积表示的总泄漏量。如果示踪材料是粉末，则可以确定总泄漏量，以质量表示。最后，如果示踪材料具有放射性，则可以确定以活度表示的泄漏量。液体的体积流量和气体的质量流量可以用建立的公式计算。如果将粉末作为液体或气溶胶来计算，其结果将非常保守。

659.6. 将测量流量与放射性物质泄漏相关联的基本计算方法涉及两个参数的知识，即货包内容物的放射性浓度及其体积泄漏率。这两个参数的乘积应当小于单位时间内以  $A_2$  的分数表示的最大允许泄漏率。

659.7 对于含有液态或气态放射性物质的货包，确定放射性浓度是为了在等效运输工况下将贝可/小时（活度泄漏率）换算为立方米/秒（体积泄漏率）。当内容物包括放射性核素（R1、R2、R3、Rn 等）的混合物时，“运输条例”第 405 段指出的“统一规则”使用如下：

$$\frac{\text{R1的潜在排放}}{\text{R1的允许排放}} + \frac{\text{R2的潜在排放}}{\text{R2的允许排放}} + \frac{\text{Rn的潜在排放}}{\text{Rn的允许排放}} \leq 1 \tag{6.1}$$

659.8. 由此，假设在所考虑的时间间隔内有均匀的泄漏率，则要求货包中气体或液体的活度和体积泄漏率满足下列条件：

对于“运输条例”第 659 (a) 段条件：

$$\sum_i \frac{C_{(Ri)}}{A_2(Ri)} \leq \frac{10^{-6}}{3600L} = \frac{2.78 \times 10^{-10}}{L} \tag{6.2}$$

$$\sum_i \frac{C_{(Ri)}}{A_2(Ri)} \leq \frac{1}{7 \times 24 \times 3600L} = \frac{1.65 \times 10^{-6}}{L} \tag{6.3}$$

式中

$C_{(Ri)}$  是在标准温度和压力条件（STP）下，液体或气体中每种放射性核素浓度，以太贝可/立方米为单位；

$A_2_{(Ri)}$  是“运输条例”表 2 对该核素规定的限值，以太贝可为单位；

$L$  是在标准温度和压力条件中，液体或气体的允许泄漏率，以立方米/秒为单位。

量  $C$  也可以推导如下：

$$C = GS \tag{6.4}$$

式中

$G$  是在标准温度和压力条件时，液体或气体中放射性核素的浓度，以千克立方米为单位

S 是核素的比活度，以太贝可/千克纯核素为单位（见附录 II）

或者

$$C = FgS \quad (6.5)$$

式中

F 是元素中存在的放射性核素的分数（百分比/100）

g 是在标准温度和压力条件下，液体或气体中该元素的浓度，以千克/立方米为单位。

659.9. 应当指出，正常运输工况下试验后的允许活度排放量以  $A_2$ （太贝可/小时）表示，事故工况下试验后的允许活度排放量以  $A_2$ （太贝可/周）表示。事故发生后的任何泄漏都不太可能以统一的速度发生。兴趣值是一周内发生的总泄漏量，而不是一周内任何时间的泄漏率（即，在暴露于事故环境后的短时间内，货包可能以高泄漏率泄漏，然后在一周的残余时间内基本上没有排放，只要每周的总排放量不超过  $A_2$ ）。

659.10. 然后，考虑到压力、温度和粘度，通过层流和/或分子流条件的公式，可以将计算出的放射性液体或气体的允许泄漏转换为参考条件下的等效试验气体泄漏量，ANSI N14.5[35]或 ISO 12807[36]给出了这些公式的示例。在高压差可能导致高允许气体速度的情况下，湍流可能是更大的限制量应当考虑在内。计算应当考虑根据“运输条例”第 645 段减少的 60 千帕的环境压力。

659.11. 根据放射性核素的  $A_2$  值及其在货包中的浓度，用上述方法测定的试验气体泄漏量可从约 1 帕立方米每秒 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 到小于  $10^{-10}$  帕立方米每秒不等。通常，在实践中，对于  $1 \times 10^5$  帕的压差，试验的灵敏度不需要超过  $10^{-8}$  帕立方米每秒就可以确定货包是密封的。当估计允许的试验泄漏率超过  $10^{-2}$  帕立方米每秒时，推荐的限值为  $10^{-2}$  帕立方米每秒，因为在实际情况下很容易达到。

659.12. 货包设计的包容系统应当明确定义，包括系统的包容边界。包容系统的定义见“运输条例”第 213 段，同时第 213.1—213.3 段提供了补充信息。容器边界应当考虑诸如排气口和排水口以及可能出现包容系统泄漏路径的贯穿等特点。对于具有双密封或同心密封的包容系统，应当定义包

容系统密封。货包的泄漏试验应当针对所有包容系统密封件（即主密封、通风口、排水口）。包容系统应当由工程特点组成，其设计在包装图纸中定义。为满足“运输条例”第 659 段要求而依赖的包容系统部件。应当包括在对货包进行的任何物理试验或工程评价中，包括正常运输工况和事故工况（如适用）。装卸仅用作产品容器或便利处理放射性物质的袋、箱和罐等物项，应当考虑其对货包性能的潜在负面影响，包括结构和热影响。

659.13. 当货包被设计为携带固态颗粒物质时，关于固体通过离散泄漏路径或密封运动的试验数据可以用来建立试验气体条件。这通常会给出比假设颗粒物质表现为液态或气溶胶更高的允许体积泄漏率。在实际应用中，即使是最小粒径的粉末也不会泄漏到密封中，密封已经用氦气进行了试验，压差为  $1 \times 10^5$  帕，试验值大于  $10^{-6}$  帕立方米每秒。

659.14. 在货包设计中，最大剂量率是在货包表面（“运输条例”第 527 段和第 528 段）和离货包表面 1 米处（“运输条例”第 523 段和第 526 段所暗示的）确定的。然而，在对事故工况进行试验后，允许增加剂量率，条件是当货包以其最大允许活度装载时，不超过距离表面 1 米处 10 毫希沃特/小时的限值。

659.15. 当 B (U) 型货包设计需要屏蔽时，屏蔽可能由多种材料组成，其中一些材料可能在事故工况的试验中丢失。这是可以接受的，前提是放射性内容物留在货包中并保留足够的屏蔽，以确保在离货包“新”（试验后）外表面 1 米处的剂量率不超过 10 毫希沃特/小时。

659.16. 在适用的试验后，可以通过不同的方法证实符合本验收标准，即在离 B (U) 型货包外表面 1 米处不超过 10 毫希沃特/小时，例如，通过计算、对货包的模型、零件或部件的试验、对原型的试验或这些试验的组合。在核实符合性时，应当注意通过裂缝或间隙增加局部剂量率的可能性，这可能是设计或制造缺陷，也可能是在试验期间由于机械或热应力而发生的，特别是在排水沟、通风口和盖子中。

659.17. 如果符合性核实是基于全尺寸试验，则可通过在试件中放置适当的放射源并用适当的探测器（例如薄膜、盖革—穆勒探针或闪烁探针）监控整个外表面来评价屏蔽失效。对于厚屏蔽，通常使用闪烁探针，例如铊活化的小直径（约 50 毫米）碘化钠，因为它允许使用低活度源，通常是钴-60，而且它的高灵敏度和小有效直径允许容易和有效地检测增加的局部

剂量率。如果测量是在货包表面附近进行的，则应当注意适当地测量剂量率（见第 220A.5 段和第 220A.6 段）。然后需要进行计算，将测量的剂量率调整到距离货包外表面 1 米处。最后，除非在试验中使用货包所设计的放射性内容物，否则将需要进一步的计算，以调整测量值，使之与使用设计内容物时本来应当存在的值相一致。

659.18. 使用铅作为屏蔽材料需要特别小心。它的熔化温度低，膨胀系数高，因此应当保护它不受热试验的影响。如果它包含在相对较薄的钢包覆盖层中，在撞击试验中可能会被破坏，如果铅在火灾中熔化，它可能会从货包内逸出。此外，由于其较高的膨胀系数，铅在热试验中可能会破裂包覆盖层而逸出。在这两种情况下，热试验后剂量率可能过高。为了克服膨胀问题，可能会留下空隙以允许铅向其中膨胀，但应当认识到，当铅冷却时将存在空隙，其位置可能难以预测。另一个问题是，由于包装结构和火灾环境中的不均匀性，铅的均匀熔化可能不一定发生。在该情况下，局部膨胀可能导致包覆盖层被击穿，随后铅流失，从而降低货包的屏蔽能力。

659.19. 见第 624.4 段。

659.20. 关于试验辐射屏蔽完整性的额外导则见参考文献[43—47]。

659.21. 为运输辐照燃料而设计的货包造成了一个特别的问题，因为活度浓度在辐照前密封的燃料销钉中的裂变产物。在装入货包时完好无损的销钉在正常运输工况下通常会保持该活动。

659.22. 在运输事故工况下，辐照燃料销钉可能失效，随后放射性物质排放到包容系统中。因此，需要关于燃料裂变产物库存、销钉包壳的可能失效率以及失效销钉向包容系统的活度转移机制的数据，以便能够评定物质从货包中的排放情况。

659.23. 评定货包密封性的方法一般有两种：

- (a) 当货包为特定功能而设计时，放射性内容物有明确的定义，并可在设计阶段建立密封标准。
- (b) 当一个已知的密封标准的现有货包用于其设计目的以外的目的时，必须确定允许的最大放射性物质内容物。

659.24. 在 B (U) 型货包泄漏的放射性核素混合物的情况下, 有效  $A_2$  可按“运输条例”第 405 段方法计算。使用放射性核素分数  $f(i)$  的分活度, 这些分活度适用于实际可以通过密封泄漏的混合物。这不一定是在货包本身的分数, 因为部分内容物可能是固体离散的碎片太大, 无法通过密封间隙。一般来说, 对于液体和气体的泄漏, 分数量与气态或溶解的放射性核素相关。然而, 考虑到细小的、悬浮的固态物质是必要的。

659.25. 如果货包有弹性密封, 气体或蒸气的渗透可能会导致相对较高的泄漏率。渗透是液体或气体通过固体屏障 (没有直接泄漏路径) 的过程吸收扩散过程。如果放射性物质是气态的 (例如裂变气体), 渗透泄漏的速率由气体的分压而不是由包容系统中的压力决定。弹性体材料吸收气体的倾向也应当考虑在内。

659.26. 应当指出的是, 对于一些大型货包, 放射性物质长时间的微小泄漏可能导致外表面污染。在这些情况下, 可能有必要减少正常运输工况下的泄漏 (“运输条例”第 659 (a) 段), 以确保不超过表面污染限值 (“运输条例”第 508 段和第 509 段)。

660.1. 多年来, 对海上运输放射性物质进行了各种风险评定, 包括参考文献[48、49]记载的风险评定。这些研究考虑了一艘载有放射性物质货包的船舶在不同位置下沉的可能性, 事故假想方案包括碰撞后下沉, 或碰撞后起火后下沉。

660.2. 一般而言, 调查发现, 如果在事故发生后没有回收货包, 大多数情况下对环境的损坏可以忽略不计, 对人员的辐射照射也很小。但得出的结论是, 如果一个 (或多个) 大的辐照燃料货包丢失在大陆架上, 可能会通过海洋食物链长期接触到人。在较大深度丢失辐照燃料货包或在任何深度丢失其他放射性物质货包所造成的辐射影响比这些数值低若干数量级。后来的研究收集在参考文献[50]。考虑到越来越多地通过海上大量运输的其他放射性物质, 如钚和高放射性废物损失所造成的辐射影响。根据这些研究, “运输条例” (1996 年版) 扩大了强化浸没试验要求的范围, 以涵盖任何大量运输的放射性物质, 而不仅仅是辐照核燃料。

660.3. 对活度超过 37 皮贝可的辐照燃料货包进行 200 米浸没试验要求最初是增加到“运输条例” (1985 年版)。从 1996 年版开始, 定义“大量”阈值已修订为  $A_2$  的倍数, 这是一个更适合涵盖所有放射性物质的标准, 是基

于对事故导致人员受到的外部和内部照射的考虑。200 米的深度大约相当于大陆架和第 660.2 段所述研究的深度，表明放射性影响可能是显著的。从该深度回收货包是可能的，而且通常是可取的。尽管如风险评定所示，预计向环境排放放射性物质的影响是可以接受的，但“运输条例”第 660 段要求的实施是因为如果包容系统没有破裂，事故发生后将有助于打捞，因此没有固态内容物从货包中排放。因此，其他试验工况的特定排放速度限值（见“运输条例”第 659 段）在此不适用。

660.4. 在 B (U) 型货包设计的许多情况下，由于需要满足“运输条例”其他部分，因此包容系统完全不会因浸没在 200 米深的水中而受到损坏。

660.5. 在容器效率受损的情况下，确认有可能泄漏到货包中并随后从货包中泄漏。

660.6. 在容器受损的情况下，目的应当是确保只排放溶解的放射性物质。固态放射性物质在货包中的保留减少了打捞货包的问题。

660.7. 由于长时间浸没和“运输条例”第 660 段要求，包容系统可能会退化。应当保守地认为适用于大约一年的浸没期，在此期间，货包的回收应当随时完成。

661.1. 为确保遵守“运输条例”第 653 段和第 659 段而实施的过滤器和机械冷却系统复杂性的增加，以及与过滤器和机械冷却系统相关的任何额外不确定性和可能的不可靠性都不符合 B (U) 型指定（单方主管当局批准）的基本理念。一种既不使用过滤器也不使用冷却系统的更简单设计方法具有更广泛的可接受性。这并不排除在容器上使用冷却系统。

663.1. 货包关闭后，内部压力可能会上升。有几种机制可能导致该上升，包括：货包暴露在高环境温度下，暴露于太阳加热（即日晒），内容物的放射性衰变、内容物的化学反应或（在充水设计的情况下）辐解产生的热量，或其组合。的所有这些潜在压力贡献者的总和在正常操作工况下可以预计产生的最大值称为最大正常操作压力（见第 229.1—229.4 段）。

663.2. 该压力可能会对货包的性能产生不利影响，因此在评定正常操作工况下的性能时需要考虑。

663.3. 同样，在评定承受事故工况的能力时（“运输条例”第 726—729 段），存在预先存在压力可能会造成更苛刻的条件，要求在此条件下证实令人满意的货包性能，因此，在定义试验前条件时需要假想最大正常操作压力（见第 229.1—229.4 段）。如果正当，可以使用不同于最大正常操作压力的压力，前提是对结果进行校正以反映最大正常操作压力。

663.4. B (U) 型货包通常不是压力容器，不容易适用于涵盖此类容器的各种法规和规章。为了核实 B (U) 型货包承受正常和事故运输工况的能力，需要在最大正常操作压力条件下进行评定。在正常的运输工况下，主要的设计考虑是提供足够的屏蔽，并在适度的内部压力下限制放射性泄漏。事故工况代表了一个单独的极端事件，之后的重复使用不被视为设计目标。该极端事件的表征是，在正常工作温度下的机械试验期间，单次、短时间的高应力循环，然后是由热试验期间产生的温度和压力引起的单次、长时间的应力循环。这两种应力循环都不符合压力容器的典型装载模式，压力容器的设计涉及蠕变、疲劳、裂纹扩展和腐蚀等随时间变化的退化过程。由于该原因，在“运输条例”没有包括对允许应力水平的特定提及。相反，包容系统中的应变被限制在不会影响其满足适用要求的能力的值。虽然其他标准最终可能具有重要意义，但包容系统的存在是为了包容放射性物质。在发生断裂之前，包容系统很可能会泄漏，特别是在具有机械密封接头的可重复使用的容器中。因此，应当确定各种部件中的应变在多大程度上扭曲了包容系统并损坏了其密封完整性。需要评定在热瞬态过程中，由于螺栓延伸和由于撞击和密封面旋转而造成的局部损坏所带来的密封压缩的减少。一个评定技术是直接来自有代表性的比例模型上的跌落试验中预测撞击变形，并将这些变形与使用公认和验证的计算机代码在热试验中计算产生的变形结合起来。总变形对密封完整性的影响可以通过适当减少密封压缩的代表性密封接头的实验来确定。

663.5. 最大正常操作压力应当根据“运输条例”第 229 段给出的定义确定。

663.6. 在最大正常操作压力的正常运输工况下，包容系统中的应变应当在弹性范围内。运输事故工况下的应变应当不超过允许泄漏率大于“运输条例”第 659 (b) 段所述的应变，也不得将外部剂量率提高到超过第 659 段要求的程度。

663.7. 当分析用于评价货包性能时，应当将最大正常操作压力作为计算正常运输工况下的试验效果的边界条件和计算事故运输工况下试验效果的初始条件。

664.1. 最大正常操作压力应当不超过 700 千帕表压要求是 B (U) 型货包可接受的单方面批准的规定限值。

665.1. 在正常和事故运输工况下，应当特别注意低弥散放射性物质与包装之间的相互作用。该相互作用应当不损坏包封物、包覆物或其他基体，也应当不导致物质本身粉碎到会改变“运输条例”第 605 段要求所表明特征的程度。

666.1. 较低的温度很重要，因为冻结时膨胀的物质（如水）会增加压力，许多金属（包括一些钢）在降低温度下可能发生脆性断裂，以及密封材料可能失去弹性。在这些影响中，只有材料的断裂才会导致不可逆的损坏。一些具有良好高温性能的弹性体（例如氟碳化合物，如氟橡胶化合物）在-20℃或更低的温度下失去弹性。这可能会导致由不同的热膨胀引起的几微米的狭窄间隙金属构件和弹性体。该影响是完全可逆的。此外，任何潮湿内容物的冻结和低温下的内部压降可以防止容器泄漏。因此，在某些情况下，使用该弹性密封件是可以接受的（进一步信息见参考文献[51、52]）。温度下限-40℃和温度上限 38℃是大多数地理区域在一年中大多数时间运输放射性物质时可能经历的环境温度的合理限值。然而，应当认识到，在世界某些地区（极端北纬和南纬地区冬季和干燥沙漠地区夏季），极端气温可能低于-40℃和高于 38℃。然而，从区域和时间的平均值来看，温度下降到-40℃至 38℃范围以外的情况预计很少。

666.2. 相关防止脆性断裂的运输货包安全设计导则见附录 V。

666.3. 在评定货包低温性能设计时，应当忽略放射性内容物的加热效应（即可防止货包的温度降至最低限值环境设计温度-40℃）。这将允许评价货包在低温下的响应（包括结构和密封材料性能），用于装卸、运输和在途存储条件。相反，在评价货包设计的高温性能时，应当同时考虑放射性内容物的最大可能加热、日晒和 38℃环境设计温度最大限值的影响。

## **B (M) 型货包要求**

667.1. 其目的是对 B (M) 型货包要求，在设计和使用时，提供了与 B (U) 型货包相同的安全水平。

667.2. 在某些情况下，在相关主管当局的同意下，可以接受偏离“运输条例”第 639 段、第 655—657 段和第 660—666 段指出的情况。这方面的示例可以是，如果 B (U) 型要求被认为不适用，环境温度范围和用于设计目的的日晒值降低（第 639 段、第 655—657 段和第 666 段），或考虑到放射性内容物的加热效应。

668.1. 对于某些货包内容物，由于第 663.1 段所述的机制，压力往往会增加，如果不减轻，最终可能导致货包失效或因为疲劳减少货包的使用寿命。为了避免该情况，“运输条例”第 668 段允许货包设计包括间歇排气的规定。“运输条例”要求该通风货包应当作为 B (M) 型货包运输。

668.2. 为了提供与 B (U) 型货包所能提供的安全水平相当的安全水平，设计可规定只允许排放气态物质，使用过滤器或替代容器，或排放只能在合格的保健物理专家的指导下进行。

668.3. 允许间歇排气以便使货包能够消除在正常运输工况下（见“运输条例”第 719—724 段）或在货包进行热试验时（见“运输条例”第 728 段）可能导致其不遵守“运输条例”要求的压力积聚。但是，在正常工况下和在不用操作控制的事故工况下，放射性内容物的排放受到“运输条例”第 659 段要求的限制。

668.4. 由于在使用操作控制的情况下，对于间歇排放的放射性排放没有特定的限制，应当使用尽可能与货包排放的实际情况密切相关的模式，向主管当局证实运输工作人员和公众照射的剂量不会超过国家条例规定的限值。当间歇排气操作是在具有辐射防护资格人员的控制下进行，排气量可根据他们的建议而改变，并考虑到操作期间为确保工作人员和公众成员得到充分保护而进行的测量。

668.5. 在考虑间歇排气引起的照射时，应当至少考虑以下因素：

(a) 由于正常放射性泄漏和来自货包的外部辐射而照射；

- (b) 与操作人员的工作位置和其他工作人员及公众距离相关的排气孔位置和方向；
- (c) 工作人员和公众人员的居留因素；
- (d) 所排放物质的物理和化学性质，例如，气态（卤素、惰性气体）、颗粒、可溶性或不可溶性；
- (e) 工作人员和公众接受的其他剂量。

668.6. 在评定间歇排气操作是否充分时，应当考虑到保留和处置排放的放射性物质而不是让其扩散可能造成的损坏。

## C 型货包要求

669.1. 与 B (U) 型或 B (M) 型货包类似，C 型货包的概念是，它能够承受空运中的严重事故工况，而不会丧失包容或增加外部剂量率，以至于危及公众或参与救援或清理行动人员。货包可以安全地恢复，但不一定能够重新使用。

669.2. 批准证书上规定的 C 型货包内容物限值考虑到了 C 型货包试验要求，这些要求反映了在严重的空运事故中可能遇到潜在的非常严重事故工况。还要求内容物的物理和化学性质与包容系统相容（“运输条例”第 614 段）。

670.1. 坠机后的潜在假想方案之一是货包掩埋。高速撞击中涉及的货包可能被碎片覆盖或埋在土壤中。如果其内容物产热量的货包被埋起来，可能会导致货包温度和内部压力的增加。

670.2. 遵守“运输条例”第 670 段指出要求。关于掩埋条件的应当使用保守的计算或经验证的计算机代码来证实。对掩埋地货包状况的评价应当根据“运输条例”第 659 (b) 段指出要求，考虑屏蔽和包容系统的完整性。因为这是运输规定第 670 段所要求的，评定认为绝热保持完好，应当特别注意散热能力和掩埋条件下内压的变化。

671.1. C 型货包对空运中过程中的严重事故提供了类似程度的保护，与其他运输方式中严重事故所涉及的 B (U) 或 B (M) 型货包提供了类似程度的

保护。为了实现该点，在事故工况下的 B 型和 C 型货包试验中，对增加的外部剂量率和内容物损失提出了相同要求。

671.2. 关于也适用于 C 型货包的剂量率和物质排放限值要求的进一步解释材料见第 659.1—659.26 段。

672.1. 由于 C 型货包可能浸没在湖泊、内海或大陆架上，如果有可能回收，所有 C 型货包都必须进行强化浸没试验，而无论货包中的总活度如何。

672.2. 在水上发生空中事故时，货包可能会被浸没一段时间等待回收。根据浸没的深度，可以对货包施加较大的静水压力。主要关注的是包容系统可能破裂。另一个考虑是在严重腐蚀之前回收货包。

672.3. 200 米的深度要求大约相当于大陆架的最大深度。从该深度回收货包是可能的，也是可取的。浸没试验的验收标准是包容系统没有破裂。进一步的建议见第 660.2 段、第 660.3 段和第 660.5—660.7 段。

672.4. 由于海洋比陆地具有更软的撞击表面，浸没试验作为一项单独的证实要求就足够了，也就是说与其他试验无关。

## **装有易裂变材料货包要求**

673.1. 装有易裂变材料货包要求的额外要求是以确保装有易裂变材料货包在正常和事故运输工况下仍然处于次临界状态，还应当满足“运输条例”所有其他相关要求。“运输条例”第五节规定了在运输中实施临界控制的系统。该控制还基于第六节的设计要求和规范、根据第八节发放的批准证书以及根据“运输条例”第四节进行的分类。

673.2. 装有易裂变材料货包的设计和运输方式必须避免意外临界。如果链式裂变反应由于中子产生和系统吸收和泄漏造成的中子损失之间的平衡而变得自给自足，则会发生临界状态。货包设计涉及对影响中子相互作用的许多参数的考虑（见附录 VI）。临界安全评定必须考虑这些不同的参数，并确保系统在正常和事故运输工况下都保持次临界状态。评定应当由在临界安全物理方面经验丰富的合格人员进行（见附录 VI）。

673.3. “运输条例”第 673 (a) 段讨论的意外情况是典型和可能很重要，应当在临界安全评定仔细考虑。根据货包设计和运输或装卸中预计任何特殊情况，可能需要考虑其他意外情况，以确保在所有可信的运输工况下保持次临界。例如，如果试验结果显示易裂变材料或中子吸收体材料在货包中移动，那么在临界安全评定中应当考虑限制该移动的不确定性限值。应当考虑到，用于试验的原型可能在细节、制造方法和制造质量上与生产模式不同。为了检查公差对试验的影响，可能需要知道原型的竣工尺寸。需要考虑试验模式和生产模式之间的差异。目标是获得最大可信的中子增殖，并确认在这些条件下确保次临界。

673.4. 水在几个方面影响临界安全。当它添加到易裂变材料中或从易裂变材料中移除时，由此产生的中子慢化可大大减少实现临界所需的易裂变材料数量。作为中子的反射体，水可以增加或减少中子倍增系数。货包之间厚的全密度水层（~30 厘米）将阵列中的中子相互作用降低到微不足道的水平[53、54]。临界评定应当考虑货包几何构型或条件的变化，这些变化可能导致水主要作为慢化剂、反射层或吸收体。应当考虑所有形状的水，包括雪、冰、蒸汽、蒸气和喷雾。这些低密度形状的水可能产生（特别是在考虑货包之间的间隙水时）比全密度水更高的中子倍增（见附录 VI）。需要考虑低密度形状的水，并不意味着如果假设不可信，就必须考虑到它们。例如，根据特定的设计，选择性地水淹燃料组件可能是可信的或不可信的。

673.5. 除了水漏进或漏出货包外，还需要考虑在内腔运输之前货包中残留水的存在—例如，在排水和/或干燥操作之后，在破损的销钉和水阱中。同时，通过独立核实，防止干燥过程中发生人为失误，保证干燥效率。

673.6. 有时在包装和/或内容物中使用中子吸收体，以减少慢化的影响和由于货包之间的相互作用而对中子增殖的贡献（见第 501.8 段）。用于临界控制的典型中子吸收体材料在同时存在中子慢化剂以降低中子能量时最为有效。由于腐蚀和/或再分布，或者由于含有粉末的情况下的沉降，中子吸收体的效率丧失，会对中子倍增系数产生显著影响。

673.7. “运输条例”第 673 (a) (iii) 和 (iv) 段述及因运输过程中货物尺寸变化或移动而产生的意外情况。在确定次临界范围时，必须考虑对包装或内容物进行可行的重新安排，包括由于正常或事故试验而进行的重新安排。

试验期间尺寸变化的迹象应当使评价人员评定这些变化对 neutron 增殖的影响。“运输条例”第 685 段所述的一系列货包材料中易裂变材料的损失，需要限制在一个次临界数量，该次临界量应当与内容物的类型、最佳的水分慢化和 20 厘米全密度水的反射相一致，除非货包内已经存在更有效的慢化剂。由于在运输过程中可能对货包造成损坏，货包之间的间距减小，将对货包之间的 neutron 相互作用产生直接影响，因此需要加以考虑。应当考虑公差对尺寸和物质组成反应性的影响。特定的尺寸或组成是否应当最大化或最小化，或者它们如何结合在一起影响 neutron 倍增系数，这并不总是显而易见的。可能需要进行许多计算，以便确定系统的最大 neutron 倍增系数，或者为这些意外事件制定适当的容差。

673.8. 需要评审温度变化（“运输条例”第 673 (a) (vi) 段）对易裂变材料稳定性和/或 neutron 相互作用性质的影响。例如，以极低能（热）neutron 为主的铀系统，随着温度的降低，neutron 倍增增加。温度变化也可能影响货包的完整性。应当考虑的温度包括“运输条例”第 679 段所述的环境条件产生的温度（“运输条例”第 728 段或第 736 段，视情况而定）。

674.1. “运输条例”第 674 段指出了使用货包设计运输易裂变材料的标准，而货包设计不必经主管当局证书即可装载易裂变材料。相反，如果易裂变核素的质量限值在规定的数量，并且该货包符合第 674 (a) (b) 或 (c) 段标准，则该货包将在临界安全指数积聚控制下安全运输。这些规定已纳入“运输条例”（2012 年版），其技术背景和详细的应用导则见参考文献 [55]。成员国进行的安全评定[56]假想遵守第 674 (d) 段规定的质量限值的易裂变材料，当装在遵守第 674 (a) (b) 或 (c) 段要求的货包时，也遵守“运输条例”第 676—686 段要求，即使在事故工况下货包完全丢失的情况下也是如此。安全评定表明，次临界将得到确保，而经主管当局认证的装有易裂变材料货包的安全裕度与预计安全裕度相同。未指定要使用的实际包装（例如，IP 型、A 型、B (U) 型、B (M) 型）。然而，在装运前需要确认包装要求。

674.2. 根据“运输条例”674 段得出的临界安全指数值，使用方式与主管当局批准的易裂变材料货包设计所衍生的临界安全指数相同。货物可由任何临界安全指数受控货包的组合组成，而不论临界安全指数是如何产生的，但只受“运输条例”第 566 (c) 段对临界安全指数总和的限制。每个货包将使用“易裂变”联合国编号和“运输条例”表 1 与其放射性特性相适

应的适当运输名称（低比活度、表面污染物体、A 型、B (U) 型、B (M) 型）进行分类。不是认为有必要对符合第 674 段货包实行额外的易裂变材料的分类。因为放射性危害用联合国编号表示，而“易裂变”术语连同临界安全指数标签表明需要控制积聚。

674.3. “运输条例”第 674 段的临界安全指数公式与“运输条例”第 686 段相同，但其表述方式清楚地表明了货包临界安全指数与货包易裂变材料质量之间的关系，即“运输条例”表 13 安全次临界质量限值 (Z) 的一小部分。易裂变材料可以任何适合其放射性特性的货包运输，而无需获得主管当局关于易裂变方面的批准。但是，由于它们的放射性特性，可能需要批准。积聚控制是通过使用第 674 段公式为每个货包计算的临界安全指数来实现的。根据存在的易裂变核素、其质量以及货包尺寸和完整性，如第 674 (a) — (c) 段所要求。可运输的临界安全指数总量与符合主管当局批准货包设计的货包临界安全指数总量相同。

674.4. 低中子吸收慢化剂如铍、氘和石墨或碳的质量限值和规范是为了确保它们对中子增殖的影响可以忽略不计[55、56]。在装载货包时必须符合这些货包限值。“运输条例”第 674 (d) 段“任何 1000 克物质中的 1 克”术语“物质”原意，是装填材料中含有的矿物物质，如废物货包内的混凝土、岩石或沙子，然而，从参考文献[57、58]分析模式来看，它涵盖托运货物中的每一种物质，包括容器和放射性内容物。铍在铜合金中的掺入量达到合金重量的 4%时，对中子增殖的影响也可以忽略不计[59]。

674.5. “运输条例”表 13 的数值为次临界质量值，被选定为假想易裂变材料达到最佳慢化和 20 厘米水反射的计算临界质量值的约 85%。“运输条例”表 13 的数值被成员国临界专家接受为协商一致的质量值[55、56]。

674.6. “运输条例”第 674 (a) 段并不要求使用在正常运输工况下能保持其内容物的货包，因此“2N”事故工况阵列以“5N”正常运输工况阵列为界。因此，通过限制总临界安全指数为 50 至 1/5 的任何货包组中的易裂变核素的总质量来确保安全次临界质量，以便提供与符合主管当局批准的货包设计的货包相同的安全标准。

674.7. “运输条例”第 674 (b) 段要求，在正常运输工况下，货包应当保持其内容物。它将易裂变核素的总临界安全指数限值在 50 至 1/2 次临界质量货包组的总质量，这是为了提供足够的次临界裕度而商定的。使用半个次

临界质量将确保事故工况下的安全，因为两个这样的货包组将是次临界的，与“运输条例”第 685 段要求类似，规定“2N”货包在发生事故后是次临界的。按照第 684 段要求确保 5 组货包在正常运输工况下的安全，有必要限制任何一个货包内易裂变核素的质量，并规定在正常运输工况下进行试验后保持的最小货包尺寸。在推导“运输条例”表 13 值的计算[56]表明，如果对所有货包规定最大临界安全指数为 10 来限制货包质量，则要求最小 30 厘米的货包尺寸以确保次临界。

674.8. “运输条例”第 674 (c) 段涵盖了以下情况：第 674 (b) 段所述在正常运输工况下 30 厘米的最小货包尺寸不适用或不能保证。15 克的单独货包限值被故意选择为与“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) 段相同的限值，以促进从以前的规定过渡，其中 15 克易裂变材料例外情况由托运限值补充。第 674 (c) 段不允许对浓缩铀含量较低的情况给予置信，要求使用“运输条例”表 13 关于 100%浓缩铀的参数，无论实际浓缩度如何。如果有必要对较低的浓缩铀信用，则根据第 684 段和第 685 段规定，应当根据与第 674 段指出相同的原则，很容易获得货包设计批准。

674.9. 第 674 段没有多边批准要求。“运输条例”第 674 段意味着规范和要求须经托运人自评定。为第 674 (b) 和 (c) 段目的，这包括核实在正常工况试验后，每一货包都保持其易裂变内容物，并保持所要求的最小外部尺寸。该自评定要求在选择和装载货包时保持警惕，并符合适当的管理系统。

与以前关于未经主管当局批准货包设计而运输易裂变材料的规定相比，“运输条例”第 674 段将托运人应当遵守的托运限值，替换为临界安全指数控制的运输限值（确切地说，对货包组的限值），并由临界安全指数在货包上的标签强制执行。这解决了在一个运输工具上装载几批托运货包和超过运输工具上最小临界质量的问题。

此外，“运输条例”第 674 段对一个货包中的易裂变核素的总质量给出限值。在“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) (ii) 和 (iii) 段，每个货包易裂变核素的质量仅受运输限值的限制。人们发现，对任何货包的临界安全指数应用限值所提供的控制比“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) (i) 段所要求要多。

此外，作为易裂变材料的分类不允许使用例外货包，从而加强了运输过程中的控制。

新要求有一个坚实的技术基准（为今后的开发创造了可能性），“运输条例”毫不含糊要求所有必要的安全特点。每个货包的特性（正常工况下的容器和最小外部尺寸）以前是假设的，不是必需的。需要对托运中的货包进行积聚控制，但该方法留给了主观实施，每批托运的主观实施可能有所不同。对多批货物的积聚控制根本不需要但假想存在。重要的是要认识到，在确定要求时已经考虑到了货包的失效，适用“运输条例”第 674 段，不能导致可信的临界。这方面的技术基准可见参考文献[58]。

关于控制临界安全指数积聚要求允许在独家使用运输工况下运输更多的易裂变材料（见“运输条例”表 11），但须经多边运输批准（因为单独集装箱或单独运输工具中的货包临界安全指数的总和将超过 50，见“运输条例”第 825 (c) 段）。在该情况下，主管当局可以选择仔细评审适用“运输条例”第 674 段时使用的规范。

674.10. “运输条例”第 674 段指出，用于允许运输易裂变材料，而无需获得主管当局对特定货包设计的批准。任何形状的易裂变材料均可根据第 674 段规定运输，唯一必要的是知道货包里的易裂变核素的质量。可能使用第 674 段两个示例如下所述：

(i) 以前根据“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) (i) 段发运的货包。

该示例包括运输少量“纯”易裂变材料，如无毒、浓缩铀燃料芯块。该材料不能被排除在第 417 (a) 或 (b) 段指出的易裂变类别之外。也永远不可能获得第 417 (f) 段下的例外情况。因为没有足够数量的非易裂变材料在不控制积聚的情况下保持次临界（见“运输条例”第 606 段）。极少量的材料可不列为第 417 (c) 或 (d) 段所指的易裂变材料。但是，如果不满足这些条件，则要求将该材料归类为易裂变材料，并对每个货包材料的质量和/或可运输货包数加以限制。

以前，该材料可以作为易裂变材料装运，但使用 15 克货包限值加上“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) (i) 段的托运限值除外。该例外货包包括在“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) (i) 段，因严重的安全原因而被撤回。“运输条例”第 674 段将提供一种无需获得主管当局批准运输该方法。

每个货包中易裂变核素的质量应当用于计算其临界安全指数。货包将贴上适当的易裂变联合国编号和临界安全指数标签，并在“运输条例”表 11 规定的临界安全指数总量限值的前提下运输。

使用“运输条例”第 674 段特定分段将取决于货包的类型，如下所示：

- (a) 如果货包类型为 IP-2 或以上，并且托运人能够证实在正常运输工况下最小外部尺寸为 30 厘米，则临界安全指数可以使用第 674 (b) 段规定计算。对于 5%浓缩铀，允许的最大临界安全指数为 10 意味着每个货包限值为 85 克铀-235。“运输条例”表 11 的临界安全指数限值意味着在运输工具上总共可以运输 425 克铀-235（即，在总临界安全指数为 50 的货包组中），否则，850 克铀-235 可以在独家使用情况下运输，运输时的总临界安全指数为 100。相比之下，之前的货包限值为 15 克，托运限值为 290 克（如果只假设水慢化，则为 400 克）。
- (b) 如果托运人无法证实在正常运输工况下的包容性，则适用第 674 (a) 段规定，这将导致临界安全指数高于第 674 (b) 段。如果 IP-2 型货包根据第 626 段指出的替代试验获得批准，情况就会如此，而托运人不能（或选择不）证实在正常运输工况下的包容性。对于 5%浓缩铀，最大临界安全指数为 10 的情况下，铀-235 的货包质量限值为 34 克，铀-235 的运输限值为 170 克，或者在独家使用情况下为 340 克，运输工具上的总临界安全指数为 100。
- (c) 如果能证实货包在正常运输工况下保持其内容物，但没有保持 30 厘米的最小尺寸，则第 674 (c) 段将用于明确的货包质量限值 15 克铀-235，但最小外部货包尺寸为 10 厘米。对于 5%浓缩铀，运输限值为 225 克铀-235 或独家使用情况下为 450 克，运输工具上的总临界安全指数为 100。

这些货包质量限值等于或大于以前的 15 克例外限值，而不管使用了“运输条例”第 674 段的哪一项。这对于已经按照以前的 15 克例外情况装载的货包来说很重要，因为它们可以在不重新包装的情况下发货。在某些情况下，运输工具上可能运输的易裂变材料质量会减少。然而，有一种共识是，允许每批货物达到临界质量，而对运输工具上的货物数量没有控制，这是不安全的，旧的 15 克例外情况就是如此。应当指出，如果独家使用情况，则可在运输工具上运输两倍质量的易裂变核素（“运输条例”表

11)，但须经多边运输批准（因为单独集装箱或单独运输工具中货包的临界安全指数总和将超过 50，见“运输条例”第 825 (c) 段）。

在以前的裂变例外情况下，LSA-I 过去通常以 IP-1 货包运输。但应当指出，“运输条例”第 674 段不能用于这些材料，因为这些材料被归类为易裂变材料，不允许运输易裂变材料 LSA-I。

如果铀浓缩度为 1.5%或更低，则货包和运输限值将明显高于本示例。

对于浓缩度超过 5%以上的铀浓缩，货包和运输限值将较低。对于 100%浓缩铀，“运输条例”第 674 (a) (b) 及 (c) 段货包质量限值为 18 克、45 克和 15 克。运输限值为 90 克、225 克和 225 克，总临界安全指数为 50 克，而在独家使用情况下，总临界安全指数为 100 克，运输限值分别为 180 克、450 克和 450 克。应当指出，使用第 674 (b) 和 (c) 段运输限值在本示例中是相同的。

(ii) 以前根据“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) (iii) 段发运的货包。

该示例包括被易裂变核素污染的非易裂变材料（例如废物），这些物质以前本应当作为易裂变材料运输，但使用“运输条例”（2009 年版）第 417 (a) (iii) 段“10 升内 5 克”例外情况。人们一致认为，该例外没有提供足够的安全保障，因此已将其撤回。与易裂变核素的质量相比，符合以前“10 升内 5 克”例外规定的货包可能（但不确定）含有的非易裂变材料质量要高得多。因此，在许多情况下，第 417 (f) 段指出的易裂变材料分类的例外情况很可能出现。然而，对于某些物质，这是不可能或不可行的，因为：

- (a) 托运人不希望向主管当局证实遵守“运输条例”第 606 段要求。
- (b) 物质不能充分表征以证实遵守“运输条例”第 606 段要求，否则需要这样做的努力是过度的。对于已经按照以前的“10 升内 5 克”例外规定装载的货包，以及除易裂变材料外内容物可能不确定的货包将特别相关。
- (c) 单独货包所含易裂变材料的数量足够少，可不列入第 417 (c) 或 (d) 段指出的易裂变材料的分类范围。然而，这些限值非常低，这是不太可能的。在这些情况下，“运输条例”第 674 段指出了一种无需获得主管当局批准即可运输物质的机制。

所得到的质量限值将与上例 (i) 中相同。按照以前的“10 升内 5 克”例外规定装载的货包可能含有大量的易裂变核素。使用“运输条例”第 674 段造成的货包质量限值可能会受到限制，尤其是对更高的浓度度。

674.11. 重要的是要认识到识别标记“F”与临界安全或应急准备没有直接关系。这只是一个指标，表明托运货物在每个国家的领土上都获得了货包设计的多边批准证书。联合国编号分类“易裂变”载有与临界安全和应急准备相关的信息。在常规运输工况下，装有易裂变材料货包托运可能接近（约 85%）临界质量，而没有任何货包带有识别标记“F”（见“运输条例”第 674 段）。“运输条例”（2009 年版）及更早版本没有任何联合国分类号、临界安全指数标签或识别标记，以表明对此类托运货物进行临界安全控制的必要性。后来版本要求联合国将其归类为“易裂变”，并为此类托运的货包贴上临界安全指数标签。

675.1. “运输条例”第 675 段所述铀的运输处于次临界状态。是通过临界安全指数控制要求来保证的。临界安全指数公式将限制运输 1 千克规定的物质，由于铀的性质，这些物质将包含在 B (U) 型或 B (M) 型货包中。蒙特卡洛分析表明，需要 6.8 公斤重量百分比为 80% 的铀-238 和 20% 的铀-239 的材料，才能提供完全水反射金属球的临界质量（见参考文献[60]）。

### 含有易裂变材料货包设计的评定规范

676.1. 如“运输条例”第 673—685 段所述，要求适当选择未知或不确定参数的值，以产生用于评定的最大中子增殖系数。在实践中，可以通过在验收标准中适当的容差来考虑这些不确定性的影响来满足该要求。含量界定不清的混合物往往是生产操作的副产品（如受污染的工作服、手套或工具、化学分析和操作的残留物、地板清扫）和废物加工操作的直接产品。确定产生最大中子倍增的参数组合是很重要的。因此，临界安全评定应当识别未知参数，解释参数之间的相互关系及其对中子增殖的影响。应当确定每个参数的可能值范围（根据现有信息并与所涉物质的性质相一致），并应当显示参数值的任何可能组合的中子倍增系数，以满足验收标准。该原则应当也适用于用于测定辐照核燃料同位素组成的辐照特征。

676.2. 如果可能的参数数目很大，那么在正常或事故运输工况下，这些参数都达到其最大反应值的可能性可能极小。在该情况下，如果主管当局确信临界安全已得到充分证实，则可能没有必要进行临界安全评定来评定所有可能的排列。

677.1. 对辐照核燃料进行临界评定要求见“运输条例”第 677 段。主要目标是确保安全评定中使用的放射性核素含量与货包中的实际装载量相比，提供了中子增殖的保守估计。易裂变材料的辐照通常会耗尽易裂变核素含量，并产生锕系元素，锕系元素有助于中子的产生和吸收，裂变产物有助于中子的吸收。该同位素组成变化的长期综合效应是使反应性从未照射状态降低。然而，对于短期辐照而言，含有固定中子可燃毒物的反应堆燃料设计可使反应性增加，其中由于固定中子毒物耗尽而引起的反应性增加大于由于燃料成分变化而引起的反应性丧失。如果评定所使用的同位素组成不符合大于或等于辐照历史期间最大中子倍增的条件，则应当证实易裂变材料的假想组成为已知的辐照核燃料的特征提供了保守的中子倍增，如装在货包内。

677.2. 除非在临界评定中能够证实，在可信的辐照历史期间提供了最大中子倍增，否则需要进行装运前测量，以确保易裂变材料的特征符合评定中规定的标准（例如，总辐照量和衰变量）（见第 503.8 段）。装运前测量要求与确保存在用于临界控制的固定中子毒物（见第 501.8 段）或可移除中子毒物（见第 503.4 段）要求是一致的，如果货包设计批准证书有要求的话。在辐照核燃料的情况下，易裂变放射性核素的耗尽以及中子吸收锕系元素和裂变产物的积聚可能提供临界控制的内在措施。如果依靠该点来确定次临界，则应当确保足够的燃耗。

677.3. 最大中子倍增常发生在未辐照状态。然而，延长易裂变材料在反应堆中的有用停留时间的一种方法是添加一种分散的、固定的中子可燃毒物，使易裂变核素的初始含量比其他情况下更大。这些带有可燃毒物的反应堆燃料设计在短期辐照下可以经历反应性的增加，在短期辐照下，由于固定中子毒物的耗尽而增加的反应性大于由于燃料成分变化而丧失的反应性。如果该燃料在临界评定中被视为未辐照和未中毒，则不需要进行装运前测量，因为这将提供辐照历史期间最大中子倍增的保守估计。因此，适用“运输条例”第 677 (a) 段要求，而不适用第 677 (b) 段规定。此外，增

殖反应堆燃料和生产反应堆燃料可能具有倍增系数，该倍增系数可能随着辐照时间的延长而增加。

677.4. 辐照核燃料中子倍增系数的评价必须考虑与未辐照核燃料相同的性能标准（见“运输条例”第 680—685 段）。然而，对辐照核燃料的评定需要确定同位素组成和分布，以符合关于辐照历史的现有信息。反应堆中特定燃料组件的同位素组成在不同程度上取决于初始放射性核素浓缩度、比功率、反应堆运行历史（包括慢化剂温度、可溶性硼和反应堆部件位置）、可燃毒物或控制棒的存在以及排放后的冷却时间。安全分析人员很少知道所有的辐照参数。因此，“运输条例”第 676 段要求，关于未知参数的必须加以考虑。辐照核燃料表征的典型可用信息是初始燃料成分、组件平均燃耗和冷却时间。关于运行历史、轴向燃耗分布和可燃毒物存在的数据通常应当基于所考虑的辐照核燃料的反应堆性能的通用知识。第 676 段要求，利用已知和假想辐照参数和衰变时间确定的放射性核素组成和分布，在考虑到偏差和不确定性后，将提供中子倍增系数的保守估计。保守性可以通过忽略全部或部分裂变产物和/或钢系吸收体或假设比实际情况低的燃耗来证实。辐照燃料组件的轴向放射性核素分布非常重要，因为与假想平均燃耗为整个轴向高度的同位素组成。参考文献[61—64]可获得更多关于该专题的信息。

677.5. 用于确定中子倍增的计算方法应当得到验证，最好对照适用的测量数据（见附录 VI）。对于辐照核燃料，该验证应当包括与测量的放射性核素数据进行比较。在确定通常与计算中子倍增相关的不确定性和偏差时，应当包括该验证的结果。裂变产物截面在辐照核燃料的临界安全分析中可能是重要的。裂变产物截面的测量和在宽能量范围内的评价还没有像钢系元素截面那样得到重视。因此，安全分析人员应当考虑并证实在评定中使用的裂变产物截面是否正当。

## 几何构型和温度要求

678.1. 该要求适用于正常运输工况下货包的临界评定。当使用“鸟笼”型货包打开时，防止 10 厘米立方体进入是一个值得关注的问题。该要求也可以被看作是为评价货包外容器的完整性提供了一个标准。存在与鸟笼设计具有类似特点的货包，但其在货包的密封外壳（“鸟”）之外的突起不是为了提供阵列中单元之间的间距，而是为了限制撞击的影响。如果在单元

间距上没有考虑到这些特点，则凸起后面或之间的 10 厘米立方体（但在包装的密封外壳之外）应当不被认为已经“进入”货包。

679.1. 在某些情况下，经主管当局同意，偏离-40 某至 38 些的温度范围是可以接受的。如果对货包裂变方面的评定与其对监管试验的响应相关，会受到环境温度的不利影响，主管当局应当在批准证书中具体说明批准货包的环境温度范围。

### **单独对单独货包的评定**

680.1. 由于水可对易裂变材料的中子倍增产生重大影响，因此，对货包的临界评定要求考虑货包内所有空隙空间中存在的水引起最大中子倍增的程度。在运输事故工况下，由特殊部件保护的空隙空间可排除水的存在，这些部件在运输事故工况下仍保持水密。应当考虑可靠的运输工况，该条件可能会优先水淹货包，导致中子倍增的增加。

680.2. 为了防止与临界安全相关的水的内漏或外漏而被视为“水密”，需要考虑正常和事故工况试验的影响。每一货包设计的多边批准申请中应当确定水密性的泄漏标准，并由主管当局接受。这些标准应当在试验和生产模式中被证实是可以实现的。

680.3. 六氟化铀货包的中子倍增对货包内氢气的含量非常敏感。由于该敏感性，已仔细注意限制水泄漏到货包的可能性。负责试验、制备、维护和运输这些货包人员应当意识到六氟化铀中的中子倍增对少量水的敏感性，并应当确保严格符合此处定义的特点。

680.4. 对于装有六氟化铀货包，其最大铀浓缩度为铀-235 的质量百分比为 5%时，应当满足第 680 (b) (ii) 段要求。可在整个灌装过程中使用六氟化铀货包灌装系统或采用主管当局可接受的其他试验来满足“运输条例”要求。

680.5. 应当明确定义用于维护临界安全的包装部件。用于维持易裂变材料的包容和几何控制的包装部件应当包括设计在包装图纸中确定的工程特点。在正常运输工况和假想事故工况下对货包进行的任何物理试验或工程评价中，应当酌情包括这些部件（见第 681.1 段）。装卸物项，如仅用作产品容器或便利处理放射性物质的袋、箱和罐，应当评定对货包性能的任何潜在负面影响，包括结构安全、热安全和临界安全。

680.6. 任何数量的均质六氟化铀，其最大铀浓缩度为 5%铀-235 且杂质少于 0.5%（考虑到含氢物质），均属于次临界。根据 ASTM-C996-90 标准[65]（另见第 420.1 段），商用六氟化铀浓缩铀中的杂质限制在 0.5%以内。

680.7. 不仅要防止泄漏，而且要防止阀门和塞阀的实物接触，这是基于临界安全考虑，并与高度的质量控制相结合，被认为是一种特别特点。

681.1. 需要仔细考虑构成密封系统的货包部分和内容物（见第 209.1 段和第 680.5 段），以确保该系统包括保持易裂变材料形态的货包部分。水因其相对较好的反射性能和天然浓缩度，在“运输条例”被指定为反射体材料。20 厘米水的规范被选为实用值（额外 10 厘米水的反射将使无限大的铀-235 板的反应性增加不到 0.5%），这几乎代表了运输中典型的最差反射条件。评定应当考虑由 20 厘米全密度水反射的密封系统和由包装周围材料反射的密封系统。产生最高中子倍增的情况应当作为确保次临界的依据。这两种情况都需要考虑的原因是，在日常装载操作期间或事故发生后，密封系统可能在货包外面并被水反射。

681.2. 至少，“运输条例”第 681 段和第 682 段要求在常规、正常和事故工况下，单独货包的全水反射次临界。“运输条例”第 680 段还要求遵守关于货包内存在水的规定。主管当局还可要求在常规运输工况下，内包装部件与单独货包的易裂变材料一起具有次临界，并具有充分的水反射。这是为了涵盖内包装部件和易裂变材料可能从货包内移除的情况，也适用于具有多重屏障的系统。

682.1. 为了确定正常和事故运输工况下的最大中子倍数，规定了证实单独货包次临界要求。在评定中，适当考虑需要考虑“运输条例”第 684 (b) 段和第 685 (b) 段所要求的货包试验结果，以及“运输条例”第 680 段所述假设不存在泄漏的条件。

682.2. “次临界”是指通过包括计算偏差、不确定性和次临界裕度而适当调整的最大中子倍数应当小于 1.0。关于评定程序和确定次临界上限的建议见附录 VI。

683.1. 空运方式的事故可能比地面运输方式严重得多。认识到该点，“运输条例”（1996 年版）对易裂变材料空运货包提出了更严格要求。

683.2. 对空运货包要求特别涉及单独评定单独货包的临界。“运输条例”第 683 (a) 段要求, 在“运输条例”第 734 段 C 型试验要求之后, 一个没有泄漏水的单独货包必须是次临界的。提供该要求是为了防止由于单独货包内潜在的几何变化而可能出现的快速向临界进展, 因此, 不考虑泄漏水。假想至少 20 厘米的水在全密度下的反射条件, 因为这提供了可能遇到的反射条件的保守近似。由于不假想泄漏水, 因此只需考虑货包和内容物在指定试验后的几何条件。在第 734 (a) 和 (b) 段试验之后, 在临界评定中, 对货包条件的几何条件规范可以适当考虑。在货包的单独试件上。条件应当保守, 但与试验结果一致。如果不能证实试验后的货包状况, 则应当考虑到货包的所有慢化部件和结构部件, 对货包和内容物的几何排列作出最坏情况假设。假设应当符合机械和热试验的潜在最坏情况影响, 分析时应当考虑所有货包方向。次临界需要在适当考虑慢化剂的效率、中子吸收体的丧失、包装部件和内容物的重新排列、几何变化和温度影响等方面后进行论证。应当考虑由于货包慢化剂的丧失而可能发生的潜在反应性增加。当在第 734 段的 C 型试验要求之后关于货包条件的信息不足时。应当考虑被证实提供保守反应性的配置, 可以考虑的配置示例包括:

- (a) 货包内容物的球形体积被 20 厘米的水包围;
- (b) 货包内容物的球形体积被包装材料包围并被 20 厘米的水反射;
- (c) 货包内容物和包装材料的球形混合物被 20 厘米的水包围。

可能存在其他更保守的示例。

683.3. “运输条例”第 683 (b) 段要求, 对于单独货包, 除非在第 733 段和第 734 段试验后证实多个水屏障是水密的, 否则应当对进出货包的泄漏问题。因此, 对于空运的货包, 在确定第 680 (a) 段检验所要求的水密性时, 第 685 (b) 段试验被第 683 (b) 段试验所取代。

683.4. 总之, “运输条例”第 683 (a) 段指出了对空运货包的额外评定。第 683 (b) 段是对第 680 (a) 段补充, 适用对第 682 段空运货包的评定。

### 正常运输工况下货包阵列的评定

684.1. 该评定要求在确定次临界的 5 乘以 N 的货包数时考虑所有的货包安排, 因为在三维上, 阵列货包之间发生的中子相互作用可能不相等。

684.2. 评定可能涉及缺乏实验数据的大型有限阵列的计算。因此，除了通常允许的对中子倍增系数计算值的随机和系统影响的其他裕度之外，还应当有一个特定的额外裕度。

684.3. “次临界”是指通过包括计算偏差、不确定性和次临界裕度而适当调整的最大中子倍数应当小于 1.0。见附录 VI 提供的关于评定程序和确定次临界上限的建议。

684.4. 喷水试验后，水可能会泄漏到货包的空隙中。在确定货包阵列的最大中子倍增系数时，应当考虑已泄漏的水量。

### 运输的事故工况下货包阵列的评定

685.1. 从“运输条例”（1996 年版）开始，对运输事故工况的试验包括第 727 (c) 段粉碎实验。适用于轻质（<500 公斤）和低密度（<1000 公斤/立方米）货包。与第 727 (a) 段跌落试验相反，调用粉碎实验的标准。与内容物（特殊形状放射性物质除外）大于 1000A<sub>2</sub> 的货包所用的货包相同（见“运输条例”第 659 (b) 段）。

685.2. “运输条例”第 685 (c) 段对允许在事故工况下货包逸出的任何易裂变材料作出了严格限制。应当采取一切预防措施，防止易裂变材料从包容系统中逸出。从包容系统逸出的易裂变材料可能有各种构型，以及随后发生化学或物理变化的可能性，要求从货包阵列中逸出的易裂变材料总量小于该易裂变材料类型的最小临界质量，并具有最佳慢化剂条件和 20 厘米全密度水的反射。此外，应当考虑事故工况下逸出的易裂变材料与货包阵列之间的中子相互作用。应当假想从阵列中的每个货包中逸出等量的物质。困难在于证实能从包容系统中逸出的最大数量。根据界定包容和密封系统的包装部件，易裂变材料有可能逸出包容系统，但无法逸出密封系统。在该情况下，可能有足够的机制来控制临界。但是，第 685 (c) 段意图是为了确保适当考虑易裂变材料可能从必须假想失去临界控制的货包中逸出的任何情况。

685.3. 所考虑的评定条件还应当包括那些由比试验工况更不严重的事件所产生的条件。例如，一个货包在 9 米跌落后可能是次临界的，但在与较轻撞击一致的条件下可能是临界的。

685.4. 见第 684.1—684.3 段。

685.5. 浸没试验后，水可能会泄漏到货包的空隙中。在确定货包阵列的最大中子倍增系数时，应当考虑已泄漏的水量。

## 货包临界安全指数（CSI）的确定

686.1. “运输条例”第 686 段指出了获得货包临界安全指数的程序。用于确定临界安全指数的 N 值必须是这样的，即在“运输条例”第 684 段和第 685 段条件下，基于该值的货包组将是次临界的。假定一个条件如果单独对另一个条件进行了详细的分析就会得到满足是错误的。任何一项规定试验的结果都可能导致包装或内容物的变化，从而影响系统的慢化和/或货包之间的中子相互作用，从而导致中子倍增系数的明显变化。因此，在对正常工况或事故工况进行评定之前，不能假想限值 N 数是正常工况或事故工况的限值 N 数。

686.2. 为了确定正常运输工况下（见“运输条例”第 684 段）和事故运输工况下（见“运输条例”第 685 段）阵列的 N 值，可以使用 N 的暂定值。任何由 5 乘以 N 的货包组成的阵列，每个货包都符合第 684 (b) 段指出的条件。需要试验它是否是次临界的，以及任何 2 乘以 N 的货包阵列，每个货包都符合第 685 (b) 段条件。需要进行试验。如果这些阵列是次临界阵列，则可以使用所选值 N 来确定货包的临界安全指数。如果评定表明 N 的选定值在所有要求的条件下都不产生次临界阵列，则应当减小 N，并重复第 684 段和第 685 段评定，以确保次临界。另一个更彻底的方法是确定分别满足第 684 段和第 685 段要求的 N 的两个值，然后使用这两个值中较小的一个来确定临界安全指数的值。后一种方法被认为更彻底，因为它为每个阵列条件—正常和意外—提供了有限的评定。

686.3. 货包、外包装或货运集装箱的临界安全指数应当四舍五入到小数点后第一位。例如，如果 N 数是 11，那么  $50/N$  是 4.5454，该值应当四舍五入以提供 4.6 的临界安全指数。临界安全指数应当不四舍五入。为了避免该四舍五入的缺点，结果是只能运输数量较少的货包（在给定的示例中，数量为 10），可以使用临界安全指数的确切值。

## 第六节 参考文献

- [1] GORDON, G., GREDINGH, R., “根据国际原子能机构特殊形状试验程序对 6 个铯-192 颗粒进行浸出试验”, 加拿大原子能控制委员会第 Info-0106 号报告, 原子能控制局, 渥太华 (1981 年)。
- [2] 国际标准化组织《辐射防护—密封放射源—一般要求和分类》(ISO 2919:2012), 国际标准化组织, 日内瓦 (2012 年)。
- [3] 国际标准化组织《密封源防护: 泄漏试验方法》(ISO 9978:2020), 国际标准化组织, 日内瓦 (2020 年)。
- [4] ASTON, D., BODIMEADE, A.H., HALL, E.G., TAYLOR, C.B.G., “国际原子能机构运输条例中指定为‘特殊形状’放射源的规范和试验”, 欧共体理事会研究合同 XVII/322/80.6, 第 EUR8053 号报告, 欧共体理事会, 卢森堡 (1982 年)。
- [5] WOODCOOK, E.R., PAXTON, H.C., “易裂变材料运输的临界性”, 《核能进展》第 IV 系列第 4 卷, 培格曼出版社, 牛津和纽约 (1961 年) 第 401—430 页。
- [6] 美国核管制委员会《易裂变材料分级的豁免》, 联邦法规第 10 篇第 71.15 部分, 美国政府出版办公室, 华盛顿特区 (2013 年)。
- [7] PARKS, C.V., HOPPER, C.M., LICHTENWALTER, J., “联邦法规第 10 篇第 71 部分中易裂变材料货包豁免和一般许可证的评定和建议”, 第 NUREG/CR-5342 (ORNL/TM-13607) 号报告附录 C、D 和 E, 核管制委员会, 华盛顿特区 (1998 年)。
- [8] REICHE, I., KRÖGER, H., “嵌入低中子吸收材料中的各种低浓度浓缩铀的临界计算”, 核临界安全国际会议论文, 圣彼得堡 (2007 年)。
- [9] COOKE, B., “乏燃料元件运输桶的耳轴”, 《放射性物质包装和运输》第 89 期 (国际研讨会论文集, 华盛顿特区, 1989 年), 田纳西州橡树岭国家实验室 (1989 年)。

- [10] 美国国家标准协会《美国 10000 磅（4500 千克）或以上核物质运输集装箱专用吊装设备国家标准》，美国国家标准协会第 N14.6-1978 号报告，美国国家标准协会，纽约（1978 年）。
- [11] 核技术委员会《核电厂装载点》（KTA3905），KTA 业务部门，联邦辐射防护办公室，德国萨尔茨吉特（2012 年）。
- [12] SULLIVAN, G. J. , STAHRMER, U .和 FREEMAN, E. L ., “B 型运输货包的老化管理评定”，第 14 届放射性物质包装和运输国际研讨会（PATRAM 2004 年），德国柏林，2004 年 9 月 20—24 日。
- [13] 国际原子能机构《用于贮存和运输乏燃料两用容器的安全论证文件方法》，国际原子能机构《技术文件》第 1938 号，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。
- [14] 国际标准化组织《核能—六氟化铀运输包装》（ISO 7195:2020），国际标准化组织，日内瓦（2020 年）。
- [15] 美国国家标准协会《核材料—六氟化铀—运输包装》，美国国家标准协会第 N14.1-2012 号，美国国家标准协会，纽约（2012 年）。
- [16] 国际民用航空组织《危险货物航空安全运输技术指引》（2021—2022 年版），国际民用航空组织，蒙特利尔（2020 年）。
- [17] 联合国《危险货物运输建议：示范条例》，ST/SG/AC.10/1/Rev.22，2 卷本，联合国，纽约和日内瓦（2021 年）。
- [18] 国际标准化组织《货运集装箱系列 1，规范和试验，第 3 部分：液体、气体和加压干散货罐式集装箱》（ISO 1496-3 : 1995），国际标准化组织，日内瓦（1995 年）及后续修订 1 : 2006 年。
- [19] 联合国欧洲经济委员会、内陆运输委员会，《欧洲国际道路运输危险货物协定》（2021 年版），联合国欧洲经济委员会，日内瓦（2020 年）。
- [20] 国际铁路运输政府间组织（OTIF）《国际铁路危险货物运输条例》（2021 年版）（RID），国际铁路运输政府间组织，伯尔尼（2020 年）。

- [21] 国际标准化组织《货运集装箱系列 1—规范和试验—第 1 部分:通用普通货物集装箱》(ISO 1496-1:2013), 国际标准化组织, 日内瓦(2013 年)和后续修订(2016 年)。
- [22] 国际海事组织《1972 年国际集装箱安全公约》(CSC 1972 年)(2014 年版), 国际海事组织, 伦敦(2014 年)。
- [23] MALLETT, A.J., “ORGDP 容器试验和开发计划: 六氟化铀填充气瓶的燃烧试验”, K-D-1984, 联合碳化物公司, 田纳西州橡树岭(1966 年)。
- [24] RINGOT, C., HAMARD, J., “六氟化铀运输中的毒性和辐射风险等效方法”, 《六氟化铀: 安全处理、加工和运输》(会议论文集, 橡树岭, 1988 年), 橡树岭气体扩散厂, 田纳西州(1988 年)第 29—36 页。
- [25] BIAGGIO, A.L., LOPEZVIETRI, J.R., “六氟化铀运输事故”, 《放射性物质包装和运输》第 86 期(国际研讨会论文集, 达沃斯, 1986 年), 国际原子能机构, 维也纳(1987 年)第 381—387 页。
- [26] SAROUL, J., 等, “火灾条件下的六氟化铀运输容器: 实验结果”, 《六氟化铀: 加工、吊装、包装、运输》(第 3 届国际研讨会论文集, 帕杜卡, 1995 年), 核材料管理研究所, 伊利诺伊州北布鲁克(1995 年)。
- [27] PINTON, E., DURET, B., RANCILLAC, F., “TEN3 实验解释”, 同上。
- [28] WILLIAMS, W.R., ANDERSON, J.C., “使用 FIRE 6 估算火灾中的破裂时间: 集总参数六氟化铀气缸瞬态热传递/应力分析模式”, 同上。
- [29] WATARU, M., 等, “天然六氟化铀运输集装箱的安全性分析”, 同上。
- [30] Lykins, M.L., “在 10 吨和 14 吨低碳钢贫铀六氟化铀储罐上发现的腐蚀类型”, 同上。
- [31] BLUE, S.C., “六氟化铀柱体的腐蚀控制”, 同上。

- [32] CHEVALIER, G., 等, “在意外情况下堆垛放射性物质货包”, 《放射性物质包装和运输》第 86 期(国际研讨会论文集, 达沃斯, 1986 年), 国际原子能机构, 维也纳(1987 年)。
- [33] 美国浓缩公司, 参考号: USEC-651, 美国浓缩公司, 华盛顿特区(2006 年)。
- [34] 英国标准协会《设计导则: 放射性物质运输安全包装试验和使用》(BS 3895: 1976), GR9, 英国标准协会, 伦敦(1976 年)。
- [35] 美国国家标准协会《美国放射性物质运输货包泄漏试验国家标准》, 美国国家标准协会第 14.5-2014 号报告, 美国国家标准协会, 纽约(2014 年)。
- [36] 国际标准化组织《放射性物质安全运输—货包泄漏试验》(ISO 12807: 2018 (E)), 国际标准化组织, 日内瓦(2018 年)。
- [37] HOLMAN, J.P., 《热传递》第 7 版, 麦格劳·希尔, 纽约(2009 年)。
- [38] MACDONALD, H.F., “辐照核燃料运输中产生的个人和集体剂量”, 《放射性物质包装和运输》第 80 期(国际研讨会论文集, 柏林, 1980 年), 联邦材料试验研究所, 柏林(1980 年)。
- [39] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., “放射性物质运输用 B 型货包允许放射性泄漏率的剂量测定特性”, 《辐射防护剂量学》第 2 期(1982 年)第 75 页。
- [40] MACDONALD, H.F., “辐照核燃料运输的放射性限值”, 第 TPRD/B/0388/N84 号报告, 中央电力局, 英国伯克利(1984 年)。
- [41] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织, 《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号, 国际原子能机构, 维也纳(2014 年)。

- [42] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., “国际原子能机构放射性物质安全运输条例中  $A_1$  和  $A_2$  值计算的 Q 系统”, 第 TPRD/B/0340/R83 号报告, 中央电力局, 英国伯克利 (1983 年)。
- [43] 英国原子能管理局《放射性物质运输包装的屏蔽完整性试验:  $\gamma$  屏蔽》, 第 AECP1056 号报告第 1 部分, 英国原子能管理局, 哈德维尔 (1977 年)。
- [44] 英国原子能管理局《用辐射源和探测器扫描检验包装辐射屏蔽的完整性》, 第 AESS6067 号报告, 英国原子能管理局, 里斯利 (1977 年)。
- [45] 美国国家标准协会, “美国核反应堆工厂生物屏蔽试验程序国家标准”, 美国国家标准协会第 N18.9-1972 号报告, 美国国家标准协会, 纽约 (1972 年)。
- [46] JANARDHANAN, S., 等, “用  $\gamma$  密度测定法试验大体积铅容器”, 《工业同位素射线照相》(国家研讨会论文集), 巴拉特重型电力公司, 印度蒂鲁吉拉伯利 (1976 年)。
- [47] KRISHNAMURTHY, K., AGGARMAL, K.S., “辐射测量技术在射线成像实践中的补充作用”, 同上。
- [48] NAGAKURA, T., MAKI, Y., TANAKA, N., “日本海上燃料运输安全评价和全尺寸容器试验方案”, 《放射性物质包装和运输》第 78 期 (国际研讨会论文集, 新奥尔良, 1978 年), 新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室 (1978 年)。
- [49] HEABERLIN, S.W., 等, “轻水堆乏燃料和钚海运货包假想损失的后果”, 第 BNWL-2093 号报告, 华盛顿州里奇兰巴特尔西北太平洋实验室 (1977 年)。
- [50] 国际原子能机构《放射性物质海上运输事故的严重性、概率和风险: 1995 年至 1999 年协调研究项目最终报告》, 国际原子能机构《技术文件》第 1231 号, 国际原子能机构, 维也纳 (2001 年)。
- [51] HIGSON, J., VALLEPIN, C., KOWALEVSKY, H., “放射性运输容器泄漏评定用流动方程信息综述”, 《放射性物质包装和运输》第 89 期 (国际研讨会论文集, 华盛顿特区, 1989 年), 田纳西州橡树岭国家实验室 (1989 年)。

- [52] BURNAY, S.G., NELSON, K., “-40℃ 下缓慢热循环过程中运输集装箱密封件泄漏”，《国际放射性物质运输杂志》第2期（1991年）。
- [53] 日本原子能研究所《核临界安全手册》，日本科学技术局（1988年）（日语）。英译：日本原子能研究所一评论 95-013号，日本原子能研究所，东京（1995年）。
- [54] 原子能委员会《临界导则》，第 CER-3114 号报告，国际原子能委员会，巴黎（1967年）。
- [55] 国际原子能机构《国际原子能机构放射性物质安全运输条例中易裂变材料运输修订规定的应用》（2012年版），国际原子能机构《技术文件》第1768号，国际原子能机构，维也纳（2015年）。
- [56] DARBY, S., BARTON, N., NUTTALL, M., MENNERDAHL, D., “可裂变异常—基于临界安全系数控制的一般货包方案”，《放射性物质包装和运输》第2010期（国际研讨会论文集，伦敦，2010年），运输部，英国（2010年）。
- [57] ITO, D., 等，“易裂变材料货包中含氙和铍的临界效应研究”，《核科学技术杂志》第446期（2007年）第869—874页。
- [58] PARKS, C.V., HOPPER, C.M., LICHTENWALTER, J., “联邦法规第10篇第71部分中易裂变材料货包豁免和一般许可证的评定和建议”，第 NUREG/CR-5342 (ORNL/TM-13607) 号报告附录 C、D 和 E，核管制委员会，华盛顿特区（1998年）。
- [59] DESNOYERS, B., “放射性废物和裂变异常”，《放射性物质包装和运输》第2010期（国际研讨会论文集，伦敦，2010年），运输部，伦敦（2010年）。
- [60] BARTON, N.J., WILSON, C.K., “审查国际原子能机构条例中的裂变例外标准”，《核临界安全》，ICNC'95（第5届阿尔伯克基国际研讨会论文集，1995年），第2卷，新墨西哥大学，阿尔伯克基，（1995年）第915—972页。
- [61] TAKANO, M., OKUNO, H., “经济合作与发展组织核能机构燃耗信用制临界基准，IIA阶段结果”，第 NEA/NSC/DOC (96) 01 号报告，日本原子能研究所，东京（1996年）。

- [62] DeHART, M.D., PARKS, C.V., “燃耗信用制应用中临界安全分析相关的问题”, 《核临界安全》, ICNC’ 95 (第 5 届国际研讨会论文集, 阿尔伯克基, 1995 年), 新墨西哥大学, 新墨西哥州阿尔伯克基 (1995 年) 第 26—36 页。
- [63] BOWDEN, R.L., THORNE, P.R., STRAFFORD, P.I., “英国核燃料公司在临界安全评定中对反应堆燃料燃耗申请信用制时采用的方法”, 同上, 第 1B.3—10 页。
- [64] PARKS, C.V., GAULD, I.C., MUELLER, D.E., WAGNER, J.C., “美国燃耗信用制监管导则技术基础的发展”, 《放射性物质包装和运输》第 2010 期 (国际研讨会论文集, 伦敦, 2010 年), 运输部, 伦敦 (2010 年)。
- [65] 美国试验和材料学会《铀-235 浓缩至低于 5% 的六氟化铀标准规范》(ASTMC996-90), 美国试验和材料学会, 宾夕法尼亚州费城 (1991 年)。

## 第七节 试验程序

### 符合性的证实

701.1. “运输条例”要求是性能标准，而不是特定的设计要求。虽然这对设计人员来说意味着更大的灵活度，但在获得批准方面却存在更大的困难。其目的是允许申请人使用公认的工程实践来评价货包或放射性物质（例如特殊形状放射性物质）。这可能包括对全尺寸货包试验、比例模型、货包特定部分的模拟、计算和合理的参数，或者这些方法的组合。无论采用何种方法，文件都应当充分完整和适当，以使主管当局确信已考虑了所有所需的安全方面和故障模式。任何假设都应当明确说明并充分判断。

701.2. 由于放射性危害，试验含有放射性物质的货包是一项特别的挑战。虽然使用放射性物质进行所要求的试验可能不可取，但有必要使主管当局相信已经达到了监管要求。在确定是否在试验中使用放射性物质时，应当进行放射性安全评定。

701.3. 在证实符合性时还应当考虑许多其他因素。这些因素包括但不限于货包设计的复杂性、需要调查的特别现象、设施的可用性以及准确测量试验响应和/或评价缩放影响的能力。

701.4. 如果“运输条例”要求符合特定的泄漏限值，设计人员应当在设计中采用一些方法，以方便地显示所需的泄漏程度。一种方法是包括某种类型的取样室或试验端口，可以在装运前方便地检查。

701.5. 试验模型应当准确地代表预计设计，其制造方法和管理系统类似于预计成品。应当把重点放在原型机上确保试件是产品的真实代表。如果使用模拟放射性内容物，这些内容物应当在质量、机械刚度、密度、化学成分、体积和任何其他重要特征方面真实地代表实际内容物。内容物应当模拟任何撞击负载的内表面的货包和任何密封盖，包括内部碰撞影响的情况下，内容物没有固定到位。在可能的事件或事故下，内部碰撞的强度特别取决于内容物和包封结构之间的初始间隙。因此，应当考虑货包腔内内容物的最大损坏位置，要么直接在跌落试验中模拟，要么适当地纳入结构分析[1、2]。模型中的任何缺陷或差异都应当在试验前记录下来，并且应当

进行一些评价来确定这些缺陷和差异是如何影响试验结果的，无论是积极的还是消极的。

701.6. 试验中使用的试件数量将与待试验的设计特点和评定的期望可靠性相关。可以用不同的试件重复试验，以考虑由于材料规范或设计公差中的性能范围而引起的变化。

701.7. 试验结果可能需要增加试件数量，以满足试验程序关于最大损坏要求。可以使用计算机代码模拟来减少所需的试验次数。

701.8. 在计划比例模型试验或全尺寸试验的仪器仪表和分析时必须小心。应当确保提供足够和正确校准的仪器仪表和试验设备。仪器仪表、试验设备和电气连接应当不以使试验结果无效的方式进行干扰。试验工况和结果应当记录在案并加以验证。

701.9. 当使用加速度传感器评价货包的撞击性能时，应当考虑截止频率。截止频率的选择应当符合货包的结构（形状和尺寸）。对于带有撞击减震器的质量为 100 吨的货包，初始考虑的截止频率可为 100—200 赫兹，对于较小的货包，该截止频率应当乘以系数  $(100/m)^{1/3}$ ，其中  $m$  为货包的质量（以吨为单位）。该初始考虑应当得到核实。当货包包括保证撞击下安全所必需的部件，并且这些部件具有基本谐振或第一模态时超过截止频率的频率，则可能需要调整截止频率，以便消除的信号部分对评定这些部件的力学性能没有重大影响。在这些情况下，模态分析可能是必要的。这类部件的示例包括脆性断裂评价中的壳体和保证次临界所需的内部布置结构。当在分析评价中处理该问题时，计算方法和模式应当允许对这些动态影响进行相关的评定。这可能需要将时间步长和网格尺寸调整到与计算中使用的频率一致的低值。

701.10. 在许多情况下，与使用比例模型或通过计算和合理的论证来证实符合性相比，试验全尺寸模型可能更简单，成本更低。完全依赖试验的一个缺点是，将来对内容物或货包设计的任何更改都可能更加困难或无法判断。在实际的基准上，除非构建货包的成本非常低，并且试验了几个货包，否则通常需要额外的工作来证实试验态度的正当性。

701.11. 在考虑提及以前令人满意的类似性质的证实时，应当考虑这两套方案之间的所有相似之处和不同点。存在差异的领域可能需要修订证实结果。差异和相似性对前一次证实结果的定性方式和程度取决于它们的效果。在一种极端情况下，一个包装可能在几何构型上与批准的货包内使用的包装相同，但由于新包装内的物质变化，引用以前的证实将不相关，因此应当不使用。

701.12. 另一种证实符合性的方法是通过计算，或合理的论证，当计算程序和参数被普遍认为是可靠或保守的时。无论选择哪种鉴定方法，都可能需要进行一些计算和合理的论证。规范中的物质特性通常提供给不低于 95% 至 98% 强度的概率。当试验用于确定物质特性数据时，应当考虑数据中的离散性。除非所有的计算都是基于可能尺寸的最差组合，否则也有必要考虑由于物质和制造公差而引起的数据离散。在使用计算机程序时，应当明确所用公式适用于有限变形（即不仅适用于大位移，而且适用于大应变）。在大多数情况下，特别是那些涉及意外撞击的试验，由于可能造成的严重损坏，将需要有限应变公式，忽略这些细节可能会导致显著错误。任何合理的论据都应当以工程经验为基准。在使用理论时，应当适当考虑可能修订一般理论结果的设计细节，例如不连续、不对称、不规则几何构型、不均匀或可变的物质特性。应当避免根据主观材料提出合理的论据。

701.13. 许多计算可能需要使用商业上可用的计算机代码。应当考虑所选计算机代码的可靠性和适当的验证。首先，代码是否适用于预计计算？例如，对于机械评定，它能接受影响计算吗？它是否适用于计算塑性和弹性变形？第二，为了符合要求，计算机代码是否充分代表了评审中的包装？为了满足这两个标准，用户可能需要操作“基准试验”问题，它使用代码来建模和计算结果已知问题的参数。选项设置可能对正在解决的基础研究的有效性有很大的影响。在机械规范中，选项和模型考虑包括货包材料在动态条件下的特性、弹性和塑性变形、部件之间的详细连接（如螺钉和焊缝）以及考虑摩擦、流体动力、滑动和阻尼效应。用户在正确选择代码选项、材料属性和网格选择方面的经验会影响结果。基础研究还应当考虑结果对参数变化的敏感性。从简单到复杂，系统地对标可以增加信心。对于其他用途，检查输入和输出在负载或能量上的平衡可能是必要的。当所使用的代码尚未被广泛使用和知晓时，还应当给出理论正确性的证明。

701.14. 符合性的证实可以通过适当比例模型进行试验，其中包括与所调查物项相关的重要特点，并且当工程经验表明该试验的结果适合于设计目的时。当使用比例模型时，需要调整某些试验参数，如穿透器直径或压缩负载应当考虑在内。然而，某些试验参数不能调整—例如，时间和重力加速度—因此将有必要通过使用比例系数来调整结果。比例模型应当通过计算或使用基于计算机货包进行计算机模拟来支持，以确保存在足够的安全裕度。

701.15. 当用比例模型来确定损坏时，应当适当考虑影响能量吸收的机制，因为摩擦、破裂、破碎、弹性、塑性和不稳定性可能因试验参数的不同而具有不同的比例系数。此外，由于符合性的证实需要三项试验的结合（例如 B (U) 型和 B (M) 型货包的穿透、跌落和热试验），试验参数的相互冲突的标准可能需要折衷，这反过来又会给出需要比例分解的结果。总之，应当考虑所有差异领域的缩放效果。

701.16. 经验表明，比例模型的试验，特别是机械试验，对于证实是否遵守“运输条例”某些特定要求可能非常有用。试图使用比例模型进行热试验是有问题的（见第 728.23 段和第 728.24 段）。在机械试验中，相似条件的建立相对简单，只要对模型使用与对全尺寸货包使用相同的材料和适当的建造方法（见第 701.17 段）。因此，以一种经济的方式，有可能研究货包方向与由此产生的损坏和货包整体变形之间的关系，并获得相关货包部件减速的信息。此外，许多设计特点可以通过模型试验进行优化。

701.17. 模型中应当包括的细节是一个判断问题，并取决于模型所要进行的试验类型。例如，在确定端部撞击的结构响应时，从比例模型中省略侧向散热片可能会导致更严重的损坏。该类型的考虑可以简化模型的构造，而不损坏其有效性。只需要包括可能影响试验结果的相关结构特点。然而，重要的是，用于建造比例模型和全尺寸货包的材料是相同的，并使用合适的建造和制造技术。从该意义上说，应当使用将复制全尺寸货包的机械性能和结构响应的构造和制造技术，同时考虑到诸如机械加工、焊接、热处理和粘接等过程。建筑材料的应力—应变特征应当不依赖于应变速率而使模型结果失效。该点需要强调，因为模型中的应变率可能高于全尺寸货包中的应变率。

701.18. 在某些情况下，精确地缩放货包的所有部件可能并不实际。例如，考虑撞击减震器的厚度与货包的总长度相比。在模型中，厚度与总长度之

比可能与实际货包的厚度与总长度之比不同。其他示例包括金属板规、垫圈或螺栓尺寸，这些尺寸可能不是标准尺寸或可能不容易获得。当实际货包和待试验模型之间存在明显的几何差异时，应当通过计算机代码分析比较两者在接受 9 米跌落试验时的行为，以确定几何差异的影响是否是一个重要的考虑。所使用的计算机代码应当通过适当的基准试验来核实。如果差异的影响不显著，该模型可以被认为适合于比例模型跌落试验。这适用于 1:4 比例模型或更大的模型。

701.19. 为模型选择的比例系数是需要做出判断的另一个领域，因为比例系数的选择取决于确保可接受的全尺寸货包表示所需的精度。与全尺寸的偏差越大，引入的误差就越大。因此，对整个货包变形的研究比试验货包的某些部分的缩放可能更大，在某些情况下，所选择的缩放系数可能由正在进行的特定类型的试验决定。在“运输条例”第 727 (b) 段和第 735 段指出的某些试验中，如渗透试验、机械试验中的跌落 II 和穿孔/撕裂试验，棒或探针应当缩放。在其他情况下，当包装可能被相当厚的可变形结构保护或当穿孔杆可能发生显著变形时，可能需要校正跌落高度[3、4]。修正应当考虑到由于货包重心在撞击时间内的运动而产生的额外势能。跌落高度校正对于跌落 I（9 米）试验和跌落 II（1 米穿孔）试验都有影响，但对于跌落 II 试验通常更重要。

701.20. 一般情况下，应当使用 1:4 比例模型或更大的模型。对于这样的模型，应变率对材料力学性能的影响可以忽略不计。应当检查典型材料（如不锈钢）的应变率相关性的影响。

701.21. 由于以下模型法的结果，跌落试验的缩放是可能的（考虑到第 701.22—701.25 段），这些模型法在保持原始跌落高度的情况下是有效的，原始和模型具有相同的跌落高度物质特性和货包和/或穿孔杆的变形相对于跌落高度可以忽略不计：

加速度：  $a_{\text{模型}} = (a_{\text{原始}}) / M$

力：  $F_{\text{模型}} = (F_{\text{原始}}) M^2$

应力：  $\sigma_{\text{模型}} = \sigma_{\text{原始}}$

应变：  $\epsilon_{\text{模型}} = \epsilon_{\text{原始}}$

其中 M 是比例比（即模型尺寸与全尺寸货包的比例）。

701.22. 对于轻质模型，在跌落试验期间模型的姿态或速度可能会受到诸如“脐带”摆动、加速度传感器或应变计的电线或风的影响等因素的影响。经验表明，对于质量达 1000 公斤的货包，应当使用全尺寸模型进行试验，否则，应当与轻质比例模型一起使用特殊的导则。

701.23. 当货包设计的批准申请在任何程度上基于比例模型试验时，该申请应当包括所用比例方法有效性的证实。该证实应当包括：

- (a) 比例系数的定义；
- (b) 证实所构建的模型充分准确地再现了待试验的货包或包装部件的细节；
- (c) 模型中没有复制的部分或特点清单；
- (d) 删除模型中部分或特点的正当性；
- (e) 所用相似标准的正当性。

701.24. 在对比例模型试验结果进行评价时，应当考虑包装所受的损坏。在某些情况下，还应当考虑货包内容物的损坏，特别是当涉及以下方面的变化时：

- (a) 排放速率势能；
- (b) 影响临界的参数；
- (c) 屏蔽效能；
- (d) 热行为。

701.25. 可能很难将涉及密封和密封表面的比例模型试验结果外推到全尺寸货包内预计响应。虽然可以用比例模型获得关于密封表面变形和位移的有价值的信息，但对密封性能和泄漏的外推应当谨慎（见第 716.7 段）。当用比例模型试验密封时，应当考虑表面粗糙度、密封性能随材料厚度和类型的变化等因素的可能影响，以及与根据比例模型结果预测泄漏率相关的问题。

702.1. 任何用于确保符合性的试验后评定方法都应当包括以下技术，以适用于所检验的货包类型：

- (a) 目视检验；
- (b) 变形评定；

- (c) 所有封盖的密封间隙测量；
- (d) 密封泄漏试验；
- (e) 破坏性和非破坏性试验和测量；
- (f) 破坏材料的显微检验。

702.2. 在评价跌落试验后货包的损坏时，应当考虑次级撞击造成的所有损坏，但运输跌落试验 II 的事故工况除外，其目的仅限于证实货包在局部撞击下的性能（见第 727.16 段）。次级撞击包括在初始撞击之后，货包和靶之间的所有其他撞击。对于基于数值方法的评价，还需要考虑次级撞击。因此，应当在考虑到次级撞击和初始撞击的情况下确定产生最大损坏的货包的姿态。经验表明，对于细长和坚硬的货包，次级撞击的影响往往更为严重，包括：

- (a) 宽高比（长径比）大于 5，但有时甚至低至 2 的货包；
- (b) 9 米跌落后预计会出现大幅反弹的大货包；
- (c) 内容物坚硬而细长，特别容易受到侧向撞击的货包。

## 特殊形状放射性物质试验

### 概述

704.1. 撞击、冲击、弯曲和热试验旨在模拟特殊形状放射性物质从其货包内排放时可能暴露的机械和热效应。

704.2. 在第 704.1 段所列的每项试验之后，要求对试件进行浸出评定或体积泄漏试验，以确保因事故而浸入液体的特殊形状放射性物质遵守“运输条例”第 603 段标准。

704.3. 胶囊设计的试验可以用模拟放射性物质进行。“模拟”术语是指放射性密封源的仿真件，其胶囊具有与所代表的密封源相同的结构和材料，但含有一种机械、物理和化学性质尽可能接近放射性物质的物质，并且只含有示踪剂的放射性物质，以代替放射性物质。根据 ISO 2919[5]，示踪剂的形状应当是可溶于不侵蚀胶囊的溶剂中的。在可能的情况下，应当使用短寿命的放射性核素。然而，如果使用浸出评定技术，在解释结果时需要小心。必须考虑结垢的影响，其重要性将取决于胶囊内所含的最大活度和

预定胶囊内容物的实物形状，特别是预定胶囊内容物与示踪放射性核素相比的溶解度。如果使用体积泄漏试验，这些问题可以避免（见第 603.3 段和第 603.4 段）。通常，特殊形状放射性物质的试验是在全尺寸密封源或不可分散固态物质上进行的，因为它们不昂贵，试验结果易于解释。

## 试验方法

705.1. 由于该试验与 B (U) 型货包 9 米跌落试验类似（见第 603.1 段），因此应当将试件跌落，以使其遭受最大的损坏。

706.1. 应当特别注意冲击试验工况，以便得到所需的最大损坏。

706.2. 如果在高于环境温度的温度下用试件进行冲击试验，应当采取特别预防措施，以免铅片过热和软化。

709.1. 认识到“运输条例”第 705 段、第 706 段和第 708 段所述的试验并不是唯一的，其他国际公认的试验标准也可以同样接受。国际标准化组织规定的两项试验已被确定为密封容器中的放射性物质的适当替代品。

709.2. “运输条例”第 709 (a) 段所述的替代试验，是质量小于 200 克的特殊形状放射性物质的 ISO 2919[5]4 类撞击试验和质量大于 200 克但小于 500 克的特殊形状放射性物质的 ISO 2919[5]5 类撞击试验。它们包括以下步骤：将试件放在钢砧上，并将锤子从 1 米的高度落在试件上。锤子 4 类质量 2 公斤，5 类质量 5 公斤，平击面直径 25 毫米，边缘圆至半径 3 毫米。铁砧 4 类质量至少 20 公斤，5 类质量至少 50 公斤，并有足够大的平面来容纳整个试件。铁砧要求刚性安装。这些试验可用来代替撞击试验（“运输条例”第 705 段）和冲击试验（“运输条例”第 706 段）。

709.3. 根据“运输条例”第 709 (a) 段所提议的备选试验中，试件的方向应当选择为造成最大损坏。

709.4. “运输条例”第 709 (b) 段提出的备选检验标准，是 ISO 2919[5]6 级温度试验，包括将试件置于-40℃的最低温度下 20 分钟，并在不超过 70 分钟的时间内从环境温度加热到 800 时时，然后将试件在 800 后将下保存 1 小时，然后在 20，的水中进行热撞击处理。

## 浸出和体积泄漏评定方法

711.1. 浸出评定与适用于不可分散固态物质的方法相似（见“运输条例”第 710 段），只是试件初始未在水中浸没 7 天。然而，其他步骤保持不变。

711.2. “运输条例”第 711 (b) 段指出的替代体积泄漏评定，包括 ISO 9978[6]规定的主管当局可接受的任何试验。这些试验通常允许缩短试验周期，此外，其中一些试验是针对非放射性物质的。体积泄漏评定选项提供了在整个试验序列中所涉及时的减少，并且可以包括在试验期间使用屏蔽室时间的减少。因此，体积泄漏评定选项可大大降低成本。

## 低弥散放射性物质（LDRM）试验

712.1. 低弥散放射性物质要求在不产生大量可分散物质的情况下，满足与 C 型货包相同的抗撞击和耐火性能标准。

712.2. 对于低弥散放射性物质，需要进行三项试验：90 米/秒对不屈靶的撞击试验、强化热试验和浸出试验。撞击和热试验是非连续的。对于浸出试验，要求物质的形状代表了“运输条例”第 605 (b) 段要求的任何试验之后的物质特性。如果用货包内容物的一个代表性部分获得的结果可以适当扩展到整个货包内容物，则用于证实低弥散放射性物质性能的试验不必用整个货包内容物执行。例如，如果货包内容物由几个相同的物项组成，该情况就是这样，并且可以表明，将为一个这样的物项建立的排放乘以货包中这样物项的总数，从货包的全部内容物中得到排放的较高估计。对于大型物项，也可以仅用物项的一个基本部分或一个比例来执行试验，只要确定以该方式获得的试验结果如何可以外推到货包的整个内容物的排放行为。

712.3. 90 米/秒撞击试验要求，在未受包装保护的情况下，整个货包内容物以至少 90 米/秒的速度撞击到不屈靶时，会导致气载放射性物质以气态或颗粒形状排放，空气动力等效直径达 100 微米，小于 100A<sub>2</sub>。气溶胶粒子的气动力等效直径可以通过各种气溶胶测量仪器仪表和技术来确定，如撞击器、光学粒子计数器和离心分离器（旋风分离器）。可以使用各种实验试验程序。一种可能的方法是将水平飞行的试件撞击到具有所需的不屈靶属性的垂直壁。空气动力当量直径低于 100 微米的所有颗粒物质都可以

通过适当速度的朝上气流朝上输送，然后通过既定的气溶胶测量技术根据颗粒尺寸进行分析。朝上速度约为 30 厘米/秒的气流将起到分离器的作用，因为空气动力等效直径<100 微米的颗粒将保持在空气中，而较大的颗粒将被清除（即因为它们的沉降速度超过 30 厘米/秒）。

712.4. 更多信息见第 605.5 段、第 605.6 段、第 605.8 段、第 605.9 段和第 704.3 段。

## **货包试验**

### **试验用试件的准备**

713.1. 除非试件的实际情况在试验前已记录下来，否则很难在试验后确定是否有缺陷是由试验造成的。

714.1. 由于在某些情况下，组成包容系统的部件可能以不同的方式组装，因此为了试验目的，必须明确规定试件和组装方法。

### **试验包容系统和屏蔽的完整性，并评定临界安全**

716.1. 为了确定经过第 719—733 段指出试件的性能，可能有必要进行一项调查计划，包括视察和进一步的辅助试验。通常，第一步将是对试件进行目视检验和照相记录。此外，其他视察可能是必要的。如果试验是用含有放射性痕量物质的试件进行的，擦拭试验可以测量泄漏。可通过遵守第 648.3—648.5 段概述的程序（IP 型、A 型、B (U) 型、B (M) 型）来评价泄漏性。同样，屏蔽完整性可以通过使用放置在包装内的微量放射性物质来评价。在检验外部完整性后，应当拆卸包容系统，检查内部情况：胶囊、玻璃、瓶的完整性；几何隔间的稳定性，尤其是在预定内容物是易裂变的情况下物质；吸收材料的分布；屏蔽的稳定性和机械部件的功能。调查计划应当旨在检验三个特定领域：

- (a) 包容系统的完整性；
- (b) 屏蔽的完整性；
- (c) 在适用的情况下，保证易裂变内容物或中子毒物的重新排列或慢化程度没有对临界评定的假设和预测产生不利影响。

716.2. 包容系统的完整性可以通过多种方式进行评价。例如，包容系统的放射性排放量可以根据体积（例如气体）排放量来计算。

716.3. 对于代表全尺寸包容系统的试件，可以对试件进行直接泄漏测量。

716.4. 试验结束后，需要注意以下几个方面：

- (a) 密封系统的性能；
- (b) 可能发生在包容系统其他地方的泄漏。

716.5. 根据“运输条例”，容器涉及如此多的变量，以至于单独的标准试验程序是不可行的。

716.6. ANSI N14.5[7]可接受的泄漏试验方法，按在一般情况下提高灵敏度的顺序列出，包括：

- (a) 气体压降；
- (b) 水浸没或肥皂泡；
- (c) 乙二醇；
- (d) 气体压力升高；
- (e) 真空气泡；
- (f) 卤素检测器；
- (g) 氦质谱仪。

716.7. 参考文献[7]还：

- (a) 将放射性物质容器的监管要求与实际可检测的质量流量泄漏率联系起来；
- (b) 用体积流量定义术语“密封”；
- (c) 作出一些简化、保守的假设，以便将许多变量合并；
- (d) 描述了一个排放试验程序；
- (e) 描述了特定的体积泄漏试验。

716.8. ISO 12807[8]规定了气体泄漏试验标准和试验方法，以证实 B(U) 和 B(M) 型货包在设计、制造、装运前和定期核实方面遵守“运输条例”容器完整性要求。ISO 12807[8]所描述的首选泄漏试验方法包括：

(a) 定量方法:

- 气体压力下降;
- 气体压力升高;
- 充气包封式气体探测仪;
- 真空封套气体探测仪;
- 带背压的真空封套。

(b) 定性方法:

- 气泡技术;
- 肥皂泡;
- 示踪气体嗅探技术;
- 示踪气体喷雾法。

716.9. 参考文献[8]主要基于以下假设:

- (a) 放射性物质可能以液体、气体、固体、液态和固态悬浮液或气态（气溶胶）形状的颗粒固体或这类形状的任何组合形状从货包中排放出来;
- (b) 放射性排放或泄漏可以通过以下一种或多种方式发生：粘性流动、分子流动或渗透;
- (c) 放射性内容物的排放速率通过测量（非放射性）气体流量的等效气体泄漏试验间接测量的;
- (d) 排放速率可以与单个直毛细管的直径在数学上相关，在大多数情况下，保守地认为这代表了一个或多个泄漏。

716.10. 参考文献[8]考虑的主要步骤，用于确定正常和事故运输工况下的泄漏情况如下:

- (a) 允许放射性排放率的测定;
- (b) 标准化泄漏率的确定;
- (c) 确定每个核实阶段允许试验泄漏率;
- (d) 选择适当的试验方法;
- (e) 试验的性能和结果的记录。

716.11. 如果用于试验目的的试件小于全尺寸，直接测量密封后的泄漏可能是不可取的，因为并不是所有与密封后泄漏相关的参数都很容易缩放。在该情况下，由于密封丧失通常与密封压缩丧失相关，例如，密封盖螺栓的永久延伸，建议进行详细的测量，以确定机械试验后试件上螺栓延伸和密封面变形的程度。基于详细测量的数据可以缩放，并确定全尺寸的等效变形和螺栓延伸。通过对全尺寸密封件的试验，并使用缩放的测量数据，可以确定全尺寸货包的性能。

716.12. 关于评价屏蔽完整性，如果使用放射源来确定事故后试验工况，则由于插入源而对试验后货包配置造成的任何损坏或改变都可能使所获得的结果无效。

716.13. 如果已使用全尺寸试件进行试验，证实屏蔽完整性的一种方法是在试件内部放置适当的源，并使用 X 射线胶卷或适当的辐射探测器视察试件的整个表面，以确定是否有屏蔽失效。如果有证据表明试件表面的任何一点失去了屏蔽，则剂量率应当通过实际测量和计算来确定，以确保遵守“运输条例”第 648 段、第 653 段、第 659 段和第 671 段。详情见第 648.1—648.5 段和第 659.14—659.19 段。

716.14. 或者，可以对那些有助于屏蔽性能的参数进行仔细的维度调查，以确定它们没有受到不利影响，例如，可能导致辐射普遍增加或局部剂量率增加的铅从屏蔽层跌落或失效。

716.15. 试验可以证实在临界安全评定中使用的假设是无效的。包装部件或内容物的几何构型或物理或化学形状的改变可能影响货包内或之间的中子相互作用，任何改变都应当遵守“运输条例”第 673—685 段规定的临界安全评定中所作的假设。如果试验后的条件与临界安全评定的假设不一致，则可能需要修改评定。

716.16. 虽然可以用模拟内容物进行全尺寸或较小尺寸的货包试验，从中可以获得用于定位内容物的任何篮筐或废料桶行为的一些数据，但在实践中，最终几何构型将取决于实际物质（其机械性能可能不同于模拟内容物）与篮筐或废料桶和包装其他部件的相互作用。

## 跌落试验用靶

717.1. 跌落试验用靶被指定为一个基本不屈的表面。该不屈表面对货包造成的损坏相当于或大于运输过程中可能发生的对实际表面或结构的撞击所预计损坏。指定用靶还提供了一种方法，以确保分析和试验能够进行比较，并在必要时准确地重复。即使用一般术语描述，不屈靶也可以重复构造，以相对于被试验的货包提供相对大的质量和刚度。所谓“真正的”靶，如土壤、软岩和一些混凝土结构不那么坚硬，在给定的撞击速度下，可能对货包造成更少的损坏[9]。此外，构造能给出重复性试验结果的屈服面更加困难，而被跌落物体的形状会影响表面的屈服特性。因此，如果使用屈服靶，试验结果的不确定性将增加，计算与试验的比较将更加困难。

717.2. 满足“运输条例”要求的不屈靶，在干燥过程中将 4 厘米厚的钢板浮在混凝土块上，这是安装在坚实的土壤或基岩。钢和混凝土的组合质量应当至少是“运输条例”第 705 段、第 722 段、第 725 (a) 段、第 727 段和第 735 段试件的 10 倍，以及第 705 段、第 722 段、第 725 (a) 段、第 727 段和第 735 段试件的 100 倍。“运输条例”第 737 段，除非有不同的价值可以证实是正当的。钢板下表面应当有突出的固定钢结构，以保证与混凝土紧密接触。在试验具有硬表面的货包时，应当考虑钢的硬度。为了最大限度地减少弯曲，混凝土应当足够厚，但仍然允许样品的尺寸。参考文献[10—14]描述了已使用的其他靶。因为要避免靶的弯曲，尤其是在垂直方朝上，建议靶在形状上接近立方，靶的深度与宽度和长度相当。

## 装有六氟化铀容器包装设计试验

718.1. 对于水压试验，只对钢瓶进行试验，阀门和其他服务设备应当不包括在这次泄漏试验中。阀门和其他服务设备应当按照 ISO 7195[12]进行试验。

## 证实承受运输的正常工况能力试验

719.1. 货包在正常运输环境中可能受到的气候条件包括湿度、环境温度和压力的变化，以及暴露在太阳能加热和雨水中。

719.2. 低相对湿度，特别是如果与高温有关联，会导致包装的结构材料，如木材，干燥、收缩、分裂和变脆，货包中午前后几个小时左右直接暴露在阳光下可能导致表面温度远远高于环境温度。极冷使某些物质变硬或脆

化，尤其是用于连接或缓冲的材料。温度和压力的变化会导致“呼吸”和货包外部部分湿度的逐渐增加，如果温度降得足够低，它会导致货包内部的水凝结。船舱内的湿度通常很高，温度下降会导致货包外表面大量凝结。如果发生凝结，为降低外部剂量率而提供的纤维板外壳和间隔物可能会坍塌。当货包在等待装载或被移动和装载到运输工具上时，可能会暴露在雨中。

719.3. 在正常运输过程中，货包也可能受到动态和静态机械效应的影响。前者可包括有限冲击、重复碰撞和/或振动，后者可包括压缩和拉伸。

719.4. 在装卸过程中，货包可能会受到自由跌落到表面的有限冲击。粗鲁的装卸，特别是圆柱形货包的滚动和矩形货包的翻滚，是有限冲击的另一个常见来源。它也可能由于横截面积相对较小物体的贯穿或另一货包的角或边缘的打击而发生。

719.5. 陆路运输经常造成反复颠簸，所有形式的运输都会产生振动力，这些振动力会导致金属疲劳和/或螺母和螺栓松动。运输货包的堆垛和运输过程中由于速度的快速变化而引起的任何负载移动都可能使货包受到相当大的压缩。由于高度的变化而引起的吊装和环境压力的降低使货包暴露在张力之下。

719.6. 为了再现暴露于这些气候和装卸/运输工况和应力下可能造成的损坏类型而选定的试验是喷水试验、自由跌落试验、堆垛试验和渗透试验。任何一个货包都不可能遇到 4 个试验要求所代表的所有粗鲁处理或小故障。意外排放部分内容物，尽管非常不希望，但应当不是一个重大灾难，因为 A 型货包内容物受到限制。三个试件中的一个分别进行自由跌落、堆垛和渗透试验就足够了，在每种情况下都进行喷水试验。然而，这确实排除了一个试件用于所有试验。

719.7. 试验不包括 A 型货包可能面临的传输环境的所有方案。然而，当考虑到与运输环境相关的其他一般设计要求时，如环境温度及其变化、操作和振动，这些要求被认为是足够的。

720.1. 如果从 4 个方向同时喷水，则应当注意喷水试验与后续试验之间的 2 小时间隔。该间隔是指水从货包的外部逐渐渗入货包内部并降低其结构强度所需的时间。如果在此间隔后不久，货包再进行自由跌落、堆垛和渗

透试验，它将遭受最大的损坏。但是，如果连续地从 4 个方向中的每一个方向喷水，从每一个方向将水浸入货包内部，并从货包外部将水干燥，将在 2 小时内逐步进行。因此，在喷水试验的结论和随后的自由跌落试验之间应当不允许间隔。

721.1. 喷水试验主要用于依赖于吸水或被水软化的物质或由水溶性胶水粘合物质的包装。外层完全由金属、木材、陶瓷或塑料或这些材料的任何组合组成的容器，可表明通过合理的论证进行试验，前提是它们不保持水并显著增加它们的质量。

721.2. 一种进行喷水试验的方法，它被认为满足“运输条例”第 721 段指出的条件如下：

- (a) 试件以最有可能对货包造成最大损坏的方向放置在平坦的水平表面上。一个均匀分布的喷水从 4 个方向中的每一个方向以直角指向货包表面 15 分钟，应当尽快改变喷水方向。可能需要试验不止一个方向。
- (b) 建议考虑下列额外试验工况：
  - (i) 喷水锥顶角足以包住整个试件；
  - (ii) 从喷嘴到试件上最近点的距离至少为 3 米；
  - (iii) 相当于规定降雨率 5 厘米/小时的用水量，即在撞击试件点处和垂直于喷水锥中心线处喷水锥面积的平均值；
  - (iv) 水随着输送而迅速流失。
- (c) “运输条例”第 721 段要求的目的是提供最大的表面湿润，这可以通过将喷水朝下以与水平面成 45°的角度来实现，如下所示：
  - (i) 对于矩形试件，喷水可以指向 4 个角的每一个；
  - (ii) 对于站在一个平面上的圆柱试件，喷水可以从 4 个方向中的每一个方向以 90°的间隔施加。

721.3. 货包应当直接放在表面上，以考虑到可能被困在货包底部的水。

722.1. 自由跌落试验模拟了如果货包从车辆平台上跌落或在装卸过程中跌落，货包将经历的撞击类型。在大多数情况下，货包会在该撞击后继续行进。由于较重的货包在正常处理过程中不太可能暴露在大的跌落高度下，所以本试验的自由跌落距离取决于货包的质量。如果一个沉重的货包经历

了显著跌落，应当仔细检验它是否损坏或丢失内容物或屏蔽。轻型货包由纤维板或木材等材料制成，需要额外的跌落以模拟由于装卸而造成的反复撞击。

722.2. 任何跌落试验都应当模拟货包内物体的最大重量进行。一次以上的跌落可能是评价所有可能的跌落姿态所必需的。还可能需要试验货包的特定特点，如铰链或锁，以确保保持包容、屏蔽和核临界安全。

722.3. 要试验的特点取决于要试验货包的类型。这些特点包括旨在防止放射性物质损失或扩散或屏蔽材料损失的结构部件、材料和装置（例如整个包容系统，如盖子、阀门及其密封件）。对于装有易裂变材料货包，其特点除上述外，还可包括维持次临界的部件，如燃料保持架和中子吸收体。

722.4. “最大损坏”是对货包完整性的最大损坏。为了对大多数货包产生最大的损坏，试件应当以一种或多种姿态跌落，以使所考虑的部件的撞击加速度和/或变形最大化。大多数容器都有一些不对称性，这给出了不同的抵抗撞击的能力。在任何调查中，应当考虑足够的结构元素，以允许吸收货包的所有动能。对于撞击点和质量集中之间的各种元素在吸收能量、产生内负载、扭曲、塌陷或折叠以及这些行为的后果方面的损坏，应当提出论据。

722.5. 如果能保持所需的姿态，小质量的货包可以用手举在靶上方并扔下。在所有其他情况下，应当设计机械设备，以期望的撞击姿态保持和释放货包。这可以是一个简单的释放机构悬挂在一个架空结构，如顶盖构件或起重机，或一个专门为跌落试验设计的塔。独家使用跌落设施的设计有4个主要要素：支撑、释放、导轨（通常不用于直接跌落）和靶，这在“运输条例”第717段有定义。支架中需要有足够的高度，以容纳释放机构、支撑电缆或线束以及试验物项的全部深度，并仍有可能在货包底部和靶之间达到正确的姿态和跌落高度。在货包具有撞击的情况下减震器，撞击减震器的最低点将用于确定跌落高度。自由跌落试验的释放机构应当允许容易设置和瞬时间释放，但应当不对试件的姿态产生不良影响，也应当不增加试件的机械损坏。可以使用各种类型的机构，如机械或电磁机构，或机构的组合。参考文献[13、14]描述了许多试验设备。

722.6. 在正常运输工况下进行跌落试验时，没有必要考虑所有可能的跌落试验方向。如果在正常工况下，货包不可能以某些方向跌落，则在评定最大损坏时可以忽略这些方向。根据设想，该放宽应当只允许具有大尺寸和/或大宽高比的货包，并需要货包设计人员提供文件正当性。

722.7. 比例模型技术可能有助于确定最具破坏性的落点姿态（见第 701.7—701.25 段）。由于传感器的频率和安装可能会在所获得的数据中产生误差，因此在选择和使用仪器仪表时应当小心。

723.1. 堆垛试验的目的是模拟长时间施加在货包上负载的影响，以确保屏蔽和包容系统的有效性不会受到损坏，并且在内容物为易裂变材料的情况下，不会对结构产生不利影响。该试验期限符合联合国建议[15]要求。

723.2. 任何货包的正常顶面（即与它正常放置的表面相对的一面）是平行的和平坦的都可以堆垛。此外，堆垛可以通过增加脚、延伸垫或框架的货包与凸面。表面凸起的货包不能堆垛，除非提供延伸垫或脚。

723.3. 试件应当放置在基本平坦的表面上，如平坦的混凝土地板或钢板。必要时，应当在试件上表面放置一块有足够面积覆盖试件上表面的平板，以便负载可以均匀地施加于试件上表面。板的重量应当包括在被应用的总堆垛重量中。如果许多相同种类的货包是可堆垛的，一个简单的方法是在试验试件的顶部建立一个 5 个货包的堆垛。或者，可在货包上放置重量为货包 5 倍的钢板或其他方便材料。

724.1. 渗透试验旨在确保如果细长物体如一段金属管或自行车车把撞击并贯穿包装的外层，内容物不会从包容系统中逸出，或屏蔽或密封系统不会受损。

## **为液体和气体设计 A 型货包额外试验**

725.1. 对于设计用于容纳液体或气体的 A 型货包，实施这些额外试验是因为液态或气态放射性物质比固态物质有更大的泄漏可能性。这些试验不需要首先进行喷水试验。

## **运输的事故工况证实能力试验**

726.1. “运输条例”规定的事故试验初始是为了满足两个目的而开发的。首先，它们被认为对货包造成的损坏相当于非常严重的事故（但不一定是

所有可以想象的事故)所造成的损坏。其次,对试验进行了阐述,为设计提供了工程基准。由于分析是鉴定设计的一种可接受的方法,试验是以工程术语规定的,可以作为这些计算的明确、量化的输入。因此,在制定试验要求时,注意到这些试验可复制的程度(例如,见第 717.1 段)。

726.2. “运输条例”(1961 年版)是基于保护货包内容物免受“最大可信事故”后果的原则。该术语后来被删除,因为它没有提供一个独特的标准来工作,这是确保单方面批准设计的国际可接受性所必需的。对事故及其后果的统计性质的认识现在隐含在要求中。货包试验的一个主要目标是国际上的可接受性、一致性和重复性,试验的设计是为了在任何国家都可以很容易地复制这些条件。试验工况旨在模拟严重事故对货包的破坏作用。它们所造成的损坏将超过绝大多数记录在案的事故所造成的损坏,而不论这些事故所涉及的货包是否含有放射性物质。

726.3. 机械试验(“运输条例”第 727 段)和随后进行的热试验(“运输条例”第 728 段)的目的是造成与货包发生严重事故时所造成的损坏相当的损坏。试验的顺序和类型被认为与真实的运输事故(即机械撞击后的热暴露)相对应。试验顺序还确保在进行热试验之前对货包造成机械损坏,因此,货包最容易受到最大的热损坏。对同一试样依次进行力学和热学试验。浸没试验(“运输条例”第 729 段)可以在单独的试样上进行,因为事故造成的浸没与规定的机械和热条件一起发生的可能性极低。

727.1. 由于 B(U)型和 B(M)型货包由所有运输方式运输,B(U)型和 B(M)型试验要求旨在考虑到可能使货包暴露在严重动态力下的大范围事故。事故的力学效应可分为三类:撞击负载、粉碎负载和穿孔负载。虽然试验要求初始不是直接从事故分析中得出的,但随后的风险和事故分析表明,这些要求代表了非常严重的运输事故[16—21]。

727.2. 在跌落 I,9 米的跌落高度、不屈靶和最具破坏性姿态的结合产生了一种状态,在该状态下,大部分的跌落能量被包装的结构吸收。在实际的运输事故中,诸如土壤或车辆等靶会屈服,吸收部分撞击能量,只有较高速度的撞击才可能造成等效的破坏[19—21]。

727.3. 薄壁货包设计或夹层壁设计可能对破坏容器完整性、隔热丧失或破坏密封系统的穿孔负载敏感。即使是厚壁设计也可能有弱点,如排水孔和阀门的关闭。由于撞击表面通常不是平坦的,在事故中可能会出现穿孔负

载。为了提供对这些负载的安全性，介绍了对刚性杆的 1 米跌落试验。跌落高度和穿孔几何参数是基于工程判断而不是事故分析。

727.4. 由于其物理特征，大多数货包将接受 9 米跌落（撞击）试验，而不是粉碎实验（跌落 III）。对于轻、低密度货包，9 米跌落试验提供的严重程度较小与重型、高密度货包相比，这是因为降低了撞击能量，并增加了撞击相对不屈的“靶”可能性[19—25]。这样的货包也可能对粉碎负载很敏感。事故分析表明，在陆路运输事故中，由于轻质货包数量较多或与其他货包一起运输，动态粉碎负载的概率高于撞击负载[16—18]。此外，装卸和堆垛事故可能导致不适当的静态或动态粉碎负载。因此，“运输条例”（1985 年版）引入了粉碎实验（跌落 III）。含有大量  $\alpha$  发射体的货包，由于其有限的屏蔽，通常是轻质、低密度的货包。例如，这包括氧化钚粉末和硝酸钚溶液，它们是具有高度潜在危害的放射性物质。

727.5. 撞击试验（跌落 I）或粉碎实验（跌落 III）和贯穿试验（跌落 II）的货包姿态要求在考虑热试验的情况下产生最大损坏。此外，进行试验的顺序是最具破坏性的顺序。在评定最大损坏时，应当关注货包内放射性物质的密封性、保留足够的屏蔽以将剂量率保持在规定的限值内，以及在易裂变材料的情况下保持次临界。任何会导致剂量率增加或包容丧失，或在热试验后影响密封系统的损坏都应当予以考虑。损坏可能使货包不适合重复使用，但不影响其满足这些安全要求的能力，应当不成为将试样归类为已损坏的理由。

727.6. 由于机械试验的结果，可能会出现不同的损坏模型。在任何分析评定中都有必要考虑这些模型的结果，以证实符合适用要求。基本部件的断裂或包容系统的破裂可能使放射性物质逸出。变形可能损坏辐射或热屏蔽的功能和/或可能改变易裂变材料的结构，这应当反映在临界评定的假设和预测中。由于随后的热试验，屏蔽的局部损坏可能会导致热防护和辐射防护的恶化。因此，在对称性不占上风的情况下，研究应当包括应力、应变、不稳定性及局部效应的所有跌落姿态。

727.7. 由于先前的损坏，对同一试件进行多次跌落也可能不可行。可能需要使用不止一个样品或使用基于工程数据的分析和推理论证来预测最具破坏性的高度，并在不损害安全的情况下取消对这些高度的试验。

727.8. 对于圆柱形或立方体对称包装，最严厉的态度通常可以通过使用已发布的信息来确定[24、26]。不对称，特别是在发生突出物的地方，当用作撞击点时往往是敏感的。吊装和装卸设备，如滑板或附着点，通常相对于货包的相邻部分具有不同的强度或刚度，应当视为可能的撞击点。

727.9. 不连续结构，如盖子或其他贯穿附件，可能使局部刚性结构单元强度有限，可能因邻近结构变形或其保持质量上的高负载（由于减速）而失效。

727.10. 薄壁货包，如圆桶，应当考虑塑性变形的可能性，要么导致密封丧失，要么使盖子附件扭曲到足以导致失去盖子。

727.11. “运输条例”第 673 段要求对易裂变材料进行临界分析，包括机械和热试验造成的损坏。在该分析中应当考虑慢化剂的效率、中子吸收体的丧失、货包内容物的重新排列、几何变化和温度效应等方面。在临界分析中所作的假设应当与机械和热试验的影响相一致，分析时应当考虑所有货包的方向。

727.12. 货包的跌落（跌落 I 和跌落 II）或 500 公斤质量的跌落（跌落 III）应当是重力作用下的自由跌落。然而，如果使用某种形状的导向，重要的是撞击速度应当至少等于货包或质量在自由跌落下的撞击速度（跌落 I 和跌落 III 约为 13.3 米/秒）。

727.13. 对于跌落 II，所需的穿透杆的最小长度为 20 厘米。当货包外表面与任何对货包安全重要的内部部件之间的距离大于 20 厘米或当型式方向需要时，应当使用较长的杆长。对于具有大撞击限制设备的试件尤其如此，那里的穿透可能是相当大的。钢筋结构的材料是低碳钢。该材料的最小屈服应力应当不小于超过 150 兆帕也不超过 280 兆帕。屈服与限值应力比应当不大于 0.6。在杆可能弯曲的情况下进行试验可能很困难。在该情况下，应进行杆长度的调整，以获得对试件的最大损坏。

727.14. 对于跌落 II，最具破坏性的货包方向不一定是对杆顶表面的平面撞击。对于某些货包设计，已经表明在 20°—30°范围内的倾斜方向会造成最大的损坏，因为杆角会开始穿透到货包的外部包壳中。

727.15.仅为初始设计的目的，对于钢-铅-钢货包的外壳，可使用下列公式来估算当货包经受贯穿试验时防止失效所需的外壳厚度：

$$t = 2148.5 \left( \frac{w}{s} \right)^{0.7} \tag{7.1}$$

式中

- t 是外壳厚度（厘米）；
- w 是货包的质量（公斤）；
- s 是外壳材料的抗拉强度（帕）。

公式 (7.1) 是基于使用退火的含铅软钢的试验[26]。使用不同物理性能材料的货包可能需要不同厚度的钢外壳以满足要求。对于小直径（小于 0.75 米）的货包，或者使用不同物理性能的材料，或者对于几何构型变化附近或倾斜姿态的撞击，初步估计可能不保守[26]。

727.16. 对于跌落 II，杆必须安装在靶上，如“运输条例”第 717 段所述。由于跌落到平面上造成的损坏预计用跌落 I 来评定。因此，第二次跌落（跌落 II）没有必要引起额外的损坏。杆周围的表面不需要满足第 717 段指出要求。然而，杆周围的表面应当不减少货包对杆的撞击所吸收的能量。

727.17. 对于粉碎试验（跌落 III），包装应当以这样一种方式停留在靶上，使其稳定在选择的方朝上以引起最大的损坏。为了做到该点，可能有必要提供支撑，在该情况下，支撑的存在应当不影响货包的损坏[27]。当确定最具破坏性的撞击位置时，设计人员应当考虑板的撞击可能在试件表面的任何地方。试件的方向应当选择以确保大部分撞击能量进入破碎试件。撞击板的角部应当不是试件的第一个撞击点。

727.18. 由于以下原因，应当使用试件甚至靶上的测量仪器仪表（即测量对撞击的响应）：

- (a) 安全分析中假设的验证；
- (b) 作为设计变更的基准；
- (c) 作为设计可比货包的基准；
- (d) 作为计算机代码的基准试验。

727.19. 在 9 米跌落试验（跌落 I）或粉碎实验（跌落 III）期间应当测量的函数包括减速时间函数和应变时间函数。在使用电子设备获取、记录和存储数据时，应当进行任何过滤、截断或裁剪检查，以避免丢失重要的数据峰值。大多数仪器仪表将需要电缆连接到外部设备。这些连接应当使它们既不限制货包的自由跌落，也不在撞击后以任何方式约束货包（见第 701.9 段）。

727.20. 参考文献[28]可以提供有用的信息，当选择在 9 米跌落试验（跌落 I）导致次生撞击最大损坏的货包轴与靶之间的初始角度时。

728.1. 参考文献[16—18、29—31]表明，第 16—18 段指出的热试验。“运输条例”第 728 段指出了环境条件的范围，包括大多数与运输相关的火灾事故。“运输条例”规定了基于持续 30 分钟的液态烃—空气火灾的试验工况。其他相关火焰几何构型和传热特征的参数是指定的，以便定义热输入到货包。

728.2. 热试验规定了液态烃池火灾，其目的是包括涉及液态、固态或气态可燃物质火灾的破坏性影响。涉及液化石油气（LPG）或液化天然气（LNG）和液态氢等液体的实际火灾包括在试验范围内，因为使用这些燃料的池火一般不会持续 30 分钟。液态石油产品经常通过公路、铁路和海上运输，发生事故后可能会引起火灾。可以在货包周围流动并创造规定条件的液体被限制在一个狭窄的热值范围内，因此火灾的严重程度是相当明确的。

728.3. 火焰温度和发射率（分别为 800℃和 0.9）代表了池火的平均条件（在时间和空间上）。在局部火灾中，温度和热流可能超过这些值。然而，货包在火灾中的非理想定位、火源相对于货包随时间的移动、事故中涉及的其他不可燃货包或运输工具的屏蔽、风的影响以及许多 B(U)型和 B(M)型货包的巨大结构将综合起来平均条件，使其符合或低于试验说明[31、32]。货包的存在和远离氧气供应（空气穿过大约 1 米的火焰）可能都倾向于降低货包附近的火焰温度。自然风可以提供额外的氧气，但往往会从货包的部分移除火焰罩，因此需要静止的环境条件。在货包下面使用垂直火焰引导将最大限度地减少风的影响，并提高火焰覆盖[33]。火焰发射率很难评定，因为通常无法直接测量，但实际试验表明，0.9 的指定值是一个高估值。试验中的参数组合在严重火焰条件下的结果在事故工况下不太可能超过。

728.4. 大型石油火灾的持续时间取决于所涉及燃料的数量和消防资源的可用性。液体燃料是大量运输的，但为了形成一个水池，任何泄漏都必须流入货包周围一个明确的区域，从而通过排水导致损失。一般来说，并不是所有的内容物将在储罐内或转移到货包附近的过程中被消耗。要么在储罐本身或转移到附近的货包。当火势从一个储罐转移到另一个储罐时，其他储罐的内容物很可能在更偏远的地方被烧毁。还应当认识到这样一个事实，即当生命没有直接危险时，往往允许火灾继续自燃到熄灭。因此，对火灾持续时间的历史记录应当予以批判地看待。因此，30 分钟的持续时间是这些因素的考虑中选择的，并包括低概率的在火灾中包含大量燃料货包，并规定了“最坏情况”几何构型。低概率、长持续时间的火灾最有可能与有效地减少热输入的几何构型相结合而发生，其中货包放置在地面上和/或由车辆结构保护。因此，热试验的热输入与现实的、严重事故工况是一致的。

728.5. 以下防火几何构型可最大限度地减少辐射损失的影响，并最大限度地增加对货包的热输入：

- (a) 货包 0.6—1 米的高度确保火焰在货包位置充分发展，有足够的空间供空气横向流入。这在不影响热流的情况下提高了火焰的均匀性。
- (b) 将燃料源延伸到货包边界之外，可确保最小火焰厚度约为 1 米，提供合理的高火焰发射率。为了提高火焰复盖率，池的尺寸应当超出试件的任何外表面 1—3 米。较大的延伸可能导致中心缺氧和靠近货包的相对较低的温度[34]。

728.6. 应当只允许自然对流和热辐射有助于火灾结束后货包表面的热量散失。

728.7. “运输条例”允许使用表面吸收率的其他值作为 0.8 标准值的替代，如果它们是正当的。在实践中，池火是如此的烟尘，很可能烟尘会沉积在冷的表面从而改变条件。这可能会增加吸收率，但插入传导屏障。0.8 值与涂料的吸热系数一致，可以认为是表面烟尘对涂料吸热系数的影响。当表面被加热时，烟尘可能不会被保留，并可能导致表面吸收率的降低。

728.8. 热输入的很大一部分可能来自对流，特别是当外表面是翼片的时候和在试验的早期，当表面相对较冷的时候。在规定的条件下，对流热输入应当至少与碳氢化合物燃料—空气火灾的对流热输入相当。

728.9. 当然，热试验的影响主要是货包温度的增加和随之而来的影响，如高内部压力。峰值温度在某种程度上取决于初始温度，因此应当使用最高适当的初始条件来确定初始温度内热产生，太阳能加热和环境温度。对于实际试验，并不是所有这些初始条件都可以实现，因此应当进行适当的测量（例如环境温度），并在试验后校正货包温度。

728.10. “运输条例”规定的火灾条件和在试验期间完全吞没要求是对货包的一项非常严峻的考验。它并不考虑定义最严重的火灾。在实践中，有些参数可能比“运输条例”规定的更严格，但其他参数则不那么严格。例如，很难想象一种实际情况，即货包的所有表面都能受到火灾的全面影响，因为预计很大一部分表面区域会受到地面或事故产生的残骸和碎片的保护。重点放在热流密度上，而不是选择的单独参数上，在这方面，规定的条件对任何货包都是一个非常严峻的考验[32]。还应当强调的是，热试验只是一系列积聚试验中的一个，需要应用这些试验才能对货包造成最大的损坏。根据控制容器完整性、剂量率和临界安全的严格标准，该损坏要求保持在较小的范围内。

728.11. 热试验要求可以通过实际试验、计算评定或两者的结合来满足。最后一种方法可能是必要的，例如，如果实际试验所需的初始条件没有达到，或者如果所有的货包设计特点在实验中没有完全表现出来。在许多情况下，热试验的结果需要通过计算来确定，因此，计算成为实际试验计划和执行的一个组成部分。可以使用其他方法或技术，但可能需要更多的正当性来支持该方法。“运输条例”规定了某些火灾参数，这些参数是计算方法的基本输入数据，但在实际试验中通常是不可控的参数。因此，通过定义池火的燃料和试验几何构型，并要求其他实用方法提供相同或更大的热输入，可以实现实际试验的标准化。

728.12. 关于货包设计，一些屏蔽材料含有熔化温度低于热试验规定的800℃的共晶成分。因此，应当考虑任何结构材料保持它们的能力。局部屏蔽材料，如塑料、石蜡或水可能会蒸发，导致可能使外壳破裂的压力，外壳可能因机械试验的损坏而减弱。可能需要进行热分析来确定是否能达到这样的压力。

728.13. 待试验货包的底部应当高出液体燃料源表面 0.6—1 米之间。除非补充燃料或用另一种如水的液体代替，否则在试验过程液位将下降约 100—200 毫米。试件货包的支撑方式应当使热量和火焰的流动受到最小实际量的干扰。例如，与覆盖货包大面积的单个支撑相比，更倾向于使用更多的小支柱。运输车辆和任何其他可能在实践中保护货包的辅助设备应当从本试验中省略，因为在试验定义中已考虑到保护。

728.14. 水池的尺寸应当超出货包边缘 1—3 米，以便货包的所有侧面暴露在不小于 0.7 米高、不超过 3 米厚的发光火焰中，同时考虑到随着水池上方高度的增加，火焰厚度会减小。一般来说，较大的货包将需要较大的延伸，因为火焰厚度将在更大的距离上变化更大。完全吞没火焰要求可以解释为在 30 分钟的试验中，或者至少在很大一部分时间内，包的所有部分都要保持不可见。这是最好的实现设计厚火焰罩，可以适应自然变化的厚度，而不变得透明。低风速（静止条件）也需要稳定的火焰覆盖，尽管大的火灾可能会产生高的局部风速。挡风板或挡板有助于稳定火焰，但应当注意避免改变火焰的性质，并避免外部表面的反射或直接热辐射。这将增加热输入，尽管这不会使试验无效，但它可能会使试验更加严格。

728.15. 小于约 2 米/秒的风速应当不使试验失效，较高速度的短时间阵风不会对高热容货包产生很大影响，尤其是在保持火焰覆盖的情况下。露天试验只应当在火灾后冷却期结束前不会出现雨、冰雹或雪的情况下进行。货包应当以最短的垂直尺寸安装，以获得最均匀的火焰罩，除非不同的方向会导致更高的热输入或更大的损坏，在该情况下，应当选择这样的布置。对于 30 分钟的着火试验和随后的冷却期，可以考虑单独的货包方向。30 分钟着火试验的货包方向和随后的冷却周期应当是对货包造成最大损坏的时间。然而，在火灾试验之前评定稳定状态时要考虑的货包方向是运输的常规条件。

728.16. 池火的燃料应当包括蒸馏终点最高为 330°C、开杯闪点最低为 46 开、总热值在 46—49 兆焦耳/千克之间的石油馏分。这包括大多数来自石油、密度小于 820 千克/立方米的碳氢化合物，例如煤油和 JP4 型燃料。可以使用少量挥发性较强的燃料来点燃水池，因为这对总热输入没有显著影响。

728.17. 仪器仪表的选择将取决于实际热试验的用途。当一个试验提供数据用于计算以证实符合性时，一些仪器仪表是必要的。仪器仪表的类型和位置将取决于所需的数据，例如，内部压力和温度测量可能是必要的，如果认为应力很重要，则应当安装应变计。在任何情况下，通过火焰传送信号的电缆都应当受到保护，以避免高温下产生的外来电压。作为连续测量的一种替代方案，该组件可以以这样一种方式装备，即在火灾发生后不久和足够早的时间连接仪器仪表，以测量峰值压力和温度。泄漏量的测量可以通过预加压和热试验后的重新测量来实现，必要时对温度进行适当调整（见第 659.5—659.24 段）。

728.18. 试验的持续时间可以通过以下方法来控制：提供经计算以确保所需的 30 分钟持续时间的测量燃料供应，在试验结束前预定时间内除去燃料供应，在试验结束时从水池中排出燃料，或用灭火剂在不影响货包表面的情况下小心灭火。试验的持续时间是从达到良好的火焰覆盖到要求的火焰温度之间的时间，以及该覆盖和温度消失的时间。

728.19. 火灾发生后应当继续测量，至少直到内部温度和压力下降。如果在此期间下雨或其他降水，应当竖起临时盖以保护货包，并防止意外熄灭货包材料的燃烧，同时注意不要限制货包的热量损失。

728.20. 如果试验提供数据用于对货包进行分析评价，则应当针对非标准初始条件（包括环境温度、日晒、内部热负载和压力）对试验期间所做的测量进行校正。应当评定部分装载（即少于全部内容物）对货包热容和热传递的影响。

728.21. 炉子试验往往比露天池火试验更方便。其他可能的试验环境包括矿井火灾和使用液化石油气的露天燃烧器系统[35]。任何这样的试验都是可以接受的，只要它遵守“运输条例”第 728 段要求。氧气水平应当考虑在内，尤其是当货包内含有可燃材料时[36]。核实所需热输入的方法和证实热环境的方法见参考文献[37—39]。

728.22. 要求内部温度增加不低于 800℃火灾的预测值，以确保热输入令人满意。然而，试验至少应当持续 30 分钟，在此期间，时间平均环境温度至少应当为 800℃。高发射率辐射热源应当通过选择一个内表面积比包封面积大得多的炉子或具有固有的高发射率内表面（0.9 或更高）来产生。许多熔炉无法再现所需的发射率或池火的对流热输入，因此可能需要延长试验

时间来补偿。或者，可以使用较高的炉温，但在该情况下，试验持续时间应当至少 30 分钟。炉壁温度应当在几个地方测量，足以表明平均温度至少为 800°C。炉子可以预热足够的时间以达到热平衡，因此避免了货包插入时的大温度下降。30 分钟的最小持续时间应当使时间平均环境温度至少为 800°C。

728.23. 如果没有许多不同的试验，基于比例模型热试验结果的外推来计算热传递或确定全尺寸货包的物理和化学变化可能是不可能的。一个范围广泛的程序分别模拟每个过程将需要使用理论模型进行广泛的研究，因此该技术与正常的分析方法相比没有什么固有的优势。任何量表试验，以及对结果的解释，都应当证实和技术上是有效的。然而，如果一个部件（如翼片表面）的计算证实很困难，则使用货包部件的全尺寸模型可能是有用的。例如，隔热罩的效率，或减震器的效率该作用可以通过对该部件的试验来最容易地证实，该部件下面有一个相对简单的主体。部件建模对于计算机模式的核实具有重要意义。然而，火焰温度、火焰和表面发射率的测量是困难的，可能无法为核实计算提供足够准确的规范。应当选择部件尺寸并提供适当的隔热，以便从人工边界（即代表货包其余部分的边界）进入的热量不显著。

728.24. 对符合热试验规定条件的缩比例模型进行热试验，可以得出温度的保守结果，假设部件的热性能没有根本变化。

728.25. 热试验中最常用的货包评定方法是计算。许多通用传热计算机代码可用于该型货包建模，但应当注意确保代码中的规定对货包几何构型足够，特别是用于表示从环境到外表面的辐射传热。最终可能需要实际试验来核实，但经常使用表明近似或假设产生了比要求更严格试验的论据。通常，代码验证是通过与解析解的比较以及与其他代码的比较来完成的。

728.26. 通常，正常的运输工况将通过计算来评定，因此应当有详细的温度和压力分布。或者，货包温度可以通过实验测量，因此，在校正到适当的环境温度以及由于内容物所引起的日晒和热负载的影响后，这些为计算的热试验工况提供了初始条件。环境温度修正可以根据第 653.4 段进行。

728.27. 火灾的外部边界条件应当表示热辐射、反射和对流。“运输条例”规定的温度平均为 800°C，因此，一般而言，热辐射源和对流换热应当采用 800°C 的均匀平均温度。

728.28. 火焰发射率规定为 0.9。这可以在平面表面上毫不含糊地使用，但对于翼片表面，翼片之间的薄火焰将具有远低于 0.9 的发射率。因此主要来源对翼片表面的辐射将是翼片外部的火焰，翼片腔内火焰的辐射可以忽略不计。在所有情况下，对翼片包络应当采用适当的几何视图因素，并应当考虑反射热辐射。应当注意避免包含从代表火焰的表面“反射”热辐射，因为这是一种非典型的情况。

728.29. 表面吸收率规定为 0.8，除非可以建立替代值。在实践中，由于火灾中的表面条件发生变化，特别是由于烟尘的影响，很难证实替代值，而且火灾后获得的证据可能与此无关。因此，0.8 的数值最有可能用于分析性评定。考虑反射热辐射是很重要的，特别是对于复杂的翼片表面，因为多次反射将有效吸收率提高到接近 1。该复杂性可以通过假设表面吸收率为 1 来避免，但是，即使在该情况下，表面到表面的热辐射也应当不被忽略，特别是在冷却期间。

728.30. 火灾过程中的对流系数应当是正当的。池火气体速度一般在 5—10 米/秒范围内[40]。将该速度用于强制对流换热关联式（如参考文献[41]引用的 Nusselt、Prandtl 和雷诺数之间的 Colburn 关系式  $Nu=0.036Pr^{1/3}Re^{0.8}$ ）的结果是对流换热系数约为  $10W\cdot m^{-2}\cdot ^\circ C^{-1}$  适用于大型货包。自然对流系数（约  $5W\cdot m^{-2}\cdot ^\circ C^{-1}$ ）是不合适的，因为这意味着靠近冷却货包壁的朝下气流，而在实践中，一般的浮力朝上气流将占主导地位。在静止大气条件下，货包的上表面不太可能经历如此高的气流速度，因为该区域将包括朝上气流背风处的停滞区。该区域的减少对流由平均系数充分表示，因为平均过程包括了该影响。

728.31. 试验后冷却期的对流系数可从标准自然对流参考中获得，如参考文献[41]。在该情况下，可以很容易地应用适合于每个表面的系数。对于垂直平面，葛拉许（Grash）数的湍流自然对流  $>10^9$  由公式得出：

$$Nu=0.13 (Pr\cdot Gr)^{1/3} \tag{7.2}$$

应当使用用于正常运行工况评定的边界条件。火灾后评定应当认识到火灾引起的表面条件和/或几何构型的变化，因为这些变化可能会影响热辐射和对流热量损失。如果货包部件在热试验暴露后继续燃烧，则应当考虑持续的热输入。

728.32. 应当考虑对所有热防护罩（如撞击减震器）进行适当的建模，这些热防护罩在“运输条例”第 727 段所述的机械试验后受到影响。一些示例是形状和/或尺寸的变化、由于压实而导致的材料密度变化以及热屏蔽的分离。

728.33. 使用有限差分或有限元模式进行的计算应当具有足够“精细网格”或元素分布，以便能够适当地表示内部传导和外部及内部边界条件。外部特点，如翼片，应当给予特别注意，因为温度梯度可能是严重的，可能需要单独的详细计算，以确定到主体的热流密度。应当考虑选择一维、二维或三维模式，并决定是对整个货包还是单独部分进行评价。

728.34. 低热导率的外表面会导致计算温度的振荡。处理该问题可能需要特别的技术（例如简化的边界条件）或假设（例如时间平均温度足够精确）。

728.35. 一般情况下，传导和辐射可以显式建模，外部对流为通用计算机代码提供了很少的问题。然而，可能需要实验证据来支持建模假设和用于表示内部对流和辐射的基本数据。在充气货包内，辐射反射将是重要的，而对热辐射率的知识不足可能会限制最终的精度。使用不同的热辐射率值进行灵敏度研究，可以用来表明假设是充分的，或者提供计算温度的保守（即最大）限值。

728.36. 内部对流对于充满水的货包来说很重要，在充满气体的货包内也可能很重要。除非有核实数据支持建模假设，否则很难预测该过程。有水循环路线的地方，内部散热快与其他时间常数进行比较，并可以做出简化的假设（例如，水可以用高电导率的人工材料来模拟）。应当注意考虑不受环流影响的区域（停滞区域），因为那里可能会出现高温，因为水的固有导热系数较低。

728.37. 气体间隙和接触电阻可以随着元件的不同膨胀而变化，并且不总是清楚假设会产生高温还是低温。例如，一个高电阻气体间隙将阻止热流，使内部温度最小化，但由于有效热容量降低，使其他温度最大化。在该情况下，基于两个极端假设的计算可能提供证据，证实这两个条件都是可以接受的，而且，通过暗示，两者之间的所有变化也是可以接受的。试件中的间隙和接触电阻应当代表未来的生产。密封件很少被明确表示，但局部温度可以作为密封件温度的近似值。

728.38. 热试验瞬态的计算应当包括初始条件、30 分钟的外部条件表示火灾和冷却期，直到所有温度随时间下降。此外，进一步的计算运行，也许与不同的网格分布，应当执行以检查模式的有效性，并评定与建模假设相关的不确定性。

728.39. 分析的结果将用于确认货包有足够的强度和泄漏率是可以接受的。因此，根据计算温度确定压力是一个重要步骤，尤其是在货包内含有挥发性物质如水或六氟化铀的情况下。通常，铅屏蔽等物项可能不允许熔化，因为无法准确定义产生的条件，因此屏蔽评定可能不可行。部件温度，如有必要与局部热点相关，应当检验以确保在整个过程中不会发生熔化或其他故障模式。模式中的不确定性、数据（例如制造公差）和计算机代码的局限性应当得到承认，并应当考虑到这些不确定性。

728.40. 暴露后的平衡温度和压力可能受到热试验中不可逆变化的影响（可能是由于防护措施，如使用膨胀涂层或铅在货包内熔化和随后重新定位）。应当评定这些影响。

729.1. 由于在河流、湖泊或海洋附近或海上发生运输事故，货包可能受到浸没在水下的外部压力。为了模拟该低概率事件的等效损坏，“运输条例”要求货包能够承受由浸没在合理深度所产生的外部压力。工程估计表明，大多数桥梁、道路或港口附近的水深将小于 15 米。因此，选定 15 米作为货包的浸没深度（应当指出，装有大量辐照核燃料货包应当能够承受更大的深度（见“运输条例”第 730 段））。虽然浸没在深度大于 15 米是可能的，但该数值被选定为包括大多数运输事故的等效损坏。此外，大量排放的潜在后果将在海岸附近或浅水体中最大。8 小时的时间周期足够长，以允许货包从浸没的速率相关效应中获得稳定状态（例如外部隔间的水淹）。

729.2. 浸没试验可通过浸入货包、至少 150 千帕的压力试验、基本部件的压力试验结合计算或整个货包的计算来满足。整个货包可能不必进行压力试验。评价中应当包括关于基本部件响应的模式假设的正当性。

### **含 $10^5\text{A}_2$ 以上的 B (U) 型和 B (M) 型货包和 C 型货包的强化浸没试验**

730.1. 见第 660.1—660.7 段、第 729.1 段和第 729.2 段。

730.2. 强化浸没试验可以通过货包的浸入、至少 2 兆帕的外部压力试验、基本部件的压力试验结合计算或整个货包的计算来满足。作为一个示例，诸如盖区域的基本部件可以承受至少 2 兆帕的外部表压，并且可以通过计算来评价结构的平衡。

730.3. 如果采用计算技术，应当注意的是，既定的方法通常旨在确定材料、性能和几何构型，从而使设计能够承受所需的压力负载而不受任何损坏。如果要求浸没不少于 1 小时，只要最终条件遵守“运输条例”第 660 段的要求，货包某种程度的屈曲或变形是可以接受的。

### **含有易裂变材料货包泄漏试验**

732.1. 这项试验是必要的，因为水的泄漏可能会对货包的允许易裂变材料内容物产生很大影响。选择试验序列是为了提供允许水自由泄漏到货包内的条件，以及可能重新排列易裂变内容物的损坏。

733.1. 浸没试验旨在确保临界评定是保守的。浸没前的一系列试验模拟了运输过程中货包在水上或附近发生严重事故时可能遇到的事故工况。

### **C 型货包试验**

734.1. “运输条例”并不要求同一试件必须进行所有规定的试验，因为没有真正事故序列将所有的试验以最大的严重程度结合在一起。相反，“运输条例”要求按顺序进行试验，以严重事故典型的逻辑顺序集中损坏（见参考文献[42]）。

734.2. 不同的试件可以进行顺序的试验。另外，“运输条例”第 730 段指出浸没试验的评价标准。不同于为其他试验指定的标准。要求在完成每个试验序列后，对货包的屏蔽和包容完整性进行评价。

735.1. 穿孔和撕裂的可能发生是显著的。然而，事故工况在定性和定量上都难以描述[43、44]。机体和/或货物的部分可能造成穿孔损坏。在地面上穿孔也是可能的，但被认为不太重要。

735.2. 穿孔的后果可能是从货包包容系统中排放，但该情况发生的可能性非常低。一个更大的关注是损坏货包的绝热能力，如果撞击后发生火灾，这将导致不令人满意的行为。

735.3. 试验的设计要求定义：关于长度、直径和质量的探针，不屈的靶，以及撞击速度。指定探头的一种可能性是指飞机的部件。工字钢已经被纳入一些试验或试验建议，但更喜欢采用更传统的几何物体，即圆锥。该形状被认为是一个可能造成相当大的损坏。探测结构在几米范围内的跌落高度或行进距离代表构筑物倒塌或在飞机内弹跳。

735.4. 发动机的故障会以值得考虑的速度产生无约束的发动机碎片。飞机的损失只是发射飞射物的许多可能后果之一，飞射物的能量可能相当大（高达  $10^5$  焦耳）。然而，在特定的研究中发现，碎片击中货包的概率非常低[42、45、46]，贯穿的概率虽然没有估计，但也会更低。因此，基于该低概率，人们认为没有必要定义一个试验来涵盖发动机碎片损坏。

735.5. 在“运输条例”第 735 (a) 段，穿透探头的总长度及其在圆台外的构造细节未作特定规定，但应当加以调整，以确保达到所需质量。为了第 735 (b) 段，穿透物体应当具有足够的长度和质量，以延伸穿过内部容器周围的吸能材料和绝热材料，并应当具有足够的刚度，以提供穿透力，而其本身不会被粉碎或塌陷。在这两种情况下，探头和包装的重心应当对齐，以防止非穿透偏转[47]。

735.6. 另见“运输条例”第 727 段，以获得更多信息。

736.1. 空运事故火灾试验的持续时间定为 60 分钟。由这类事故引起的火灾的统计数据支持这样的结论，60 分钟的热试验超过了在飞机事故中货包可能遇到的最严重的火灾环境。火灾持续时间的统计数字往往因地面构筑物燃烧的持续时间和与飞机残骸无关的其他特点以及事故所涉货物的位置而有所偏差。为了考虑到该影响，对火灾持续时间的信息进行了仔细评价，以避免对不涉及飞机火灾的描述产生偏差。

736.2. 在确定火灾试验要求时，对严重飞机事故产生的“火球”重要性进行了评价。调查表明，持续时间短、温度高的火球通常发生在飞机火灾的早期阶段，随后通常会发生地面火灾[48、49]。火球对货包的热输入与扩展火灾试验的热输入相比并不显著。因此，不需要试验来评价火球对货包幸存的影响。

736.3. 飞机中某些物质的存在，例如镁，可能会导致剧烈的火灾。然而，这不被认为是对货包的严重威胁，因为可能存在的这类物质数量很少，而且这类火灾的性质是局部的。铝以机身面板的形状大量存在。然而，这些面板会在几分钟内融化掉。因此，认为铝会燃烧并大大增加货包热负载是不可信的。

736.4. 该试验与“运输条例”第 737 段所述的 90 米/秒撞击速度试验不是连续的。在严重事故中，高速撞击和长时间火灾预计不会同时发生，因为高速事故会分散燃料，导致非吞没性、大面积火灾，后果较轻。C 型货包必须接受一个扩展的试验程序，包括 B (U) 型和 B (M) 型撞击试验（跌落 I-“运输条例”第 727 (a) 段）和粉碎实验（跌落 III-第 727 (a) 和 (c) 段），然后是穿孔撕裂试验（“运输条例”第 735 段），然后是强化热试验（“运输条例”第 736 段）。据认为，这些试验的额外组合提供了对可能涉及撞击和火灾的严重空中事故的保护。

736.5. 与 B (U) 型和 B (M) 型货包相比，在较长的火灾持续时间内，隔热材料或结构材料的熔化、燃烧或其他损失是隔热材料所依赖的。

736.6. 关于进一步的情况，见第 728.1—728.40 段。

737.1. 在确定撞击试验的条件时，靶是确定垂直于不屈靶的指定速度的组合，该组合将对试件产生与飞机以实际速度和随机角度撞击真实表面时可能预期的破坏条件相当的破坏条件。在事故中考虑了变量的概率分布，以及最容易损坏的货包方向。

737.2. 据以进行事故分析的数据是根据现场官员和参与随后调查人员提交的事故细节获得的。一些数据是基于实际测量。其他数据是通过对数据的分析和基于事故可能进展的概念的推论得出的。对每个事故报告进行评价，以提取某些基本特征，如撞击速度、撞击质量的特征、撞击角度和撞击表面的性质。经常需要获得事故的其他考虑来交叉核对信息。

737.3. 事故报告中的基本数据是有用的，但不包括事故对所涉货物的影响。例如，如果飞机撞击小型汽车、软岸或桥台，对飞机和货物的损坏可能会非常不同。为了考虑到该影响，进行了一项分析，将实际撞击速度转换为对不屈表面的有效迎面撞击速度（见第 717.1 段和第 717.2 段）。因

此，所有可用的能量都用在飞机和货包的变形上。假设飞机不吸收能量是正常的，因为该假设导致保守分析。

737.4. 假设货物以飞机的速度撞击到不屈表面上，将导致有效撞击速度较低，这取决于货物与实际撞击表面相比的相对强度。对于“硬”货包和“软”靶（例如水中的乏燃料钢瓶），实际速度与有效速度之比可能在 7—9 之间。对于货包和表面硬度相似的情况，比值可能为 2 或更大。对于混凝土巷道和跑道，速度比可以在 1.1—1.4 之间。很少有表面的比率是统一的[42]。

737.5. 将基本事故报告数据转换为有效撞击速度，以使事故工况正常化，以标准格式产生撞击数据，消除了事故假想方案的大部分可变性，但同时保持了对货物的应力。对所有相关的飞机事故重复该过程，就产生了选择对刚性靶的有效撞击速度的统计基准[47—49]。

737.6. 当进行性能试验时，在一周内排放不超过  $A_2$  量放射性物质的货包设计可能被假想为在稍微更严格的条件下排放其总内容物。然而，这样不可能发生的事情是意料之中的。相反，预计为满足“运输条例”而设计的货包将把排放量限制在可接受的水平，直到事故环境远远超出所需试验中提供的环境，然后只有当事故工况大大超过试验水平时才会逐渐产生更大的排放量（即货包应当“优雅”失效）。该行为是由以下原因造成的：

- (a) 货包设计中存在的安全裕度；
- (b) 在设计分析中未明确考虑屏蔽等特定目的时，货包中使用材料的减轻负载的能力；
- (c) 材料抵抗超过弹性限值负载的能力；
- (d) 设计人员不愿意使用一和/或主管当局不愿意批准—由于在运输中可能发生的环境中熔化或破裂而具有突然失效阈值的材料。

737.7. 虽然良好的包装设计的所有特征都有望提供优雅故障的理想特性，但同样真实的是，在试验到故障的包装上，只有非常有限的数据可以查看释放如何随着事故的严重程度而增加。已进行的有限测试数据和分析支持优雅故障的概念[49-51]。虽然良好的货包设计的所有特点都有望提供理想的优雅失效的特性，但同样真实的是，在试验到失效的货包上，只有非常

有限的试验数据可以查看排放如何随着事故的严重程度而增加。已进行的有限试验数据和分析支持优雅失效的概念[49—51]。

737.8. 试验的撞击速度是由频率分布积聚概率研究[42、52—54]推导的。大多数事故分析表明，随着撞击严重程度的增加，具有该严重程度的事件数量迅速增加到峰值，然后随着严重程度接近物理限值，如飞机的最高速度下降到零。将这些数据绘制成一条积聚曲线（即严重程度低于给定值的事件的百分比），得出了一条曲线，该曲线初始上升很快，然后在达到曲线的“膝部”后上升非常缓慢。当数据以显示超过给定撞击速度的概率的格式绘制时，严重事故的稀少就表现为曲线中的一个明显的弯曲或膝部。曲线的该区域很有意义，因为它表明了货包中增加保护级别对失效概率的影响在符号开始变小。此外，膝部左边的区域覆盖了大约 95% 的事故。曲线的膝部发生在大约 90 米/秒：该值是为撞击试验选择的。

737.9. 要求货包设计以防止远高于膝部处值的正常速度，通常意味着更大、更复杂和更昂贵的货包设计，但对公众的保护几乎没有增加。此外，在由于货包设计的保守性、事故数据分析的保守性以及将这些数据转换成对不屈靶的有效撞击速度，膝部处的速度将在膝部以上的速度下经受住许多事故。换句话说，容器完全灾难性的失效是不可能发生的，即使在曲线的极端部分。

737.10. 在撞击试验的背景下讨论了进行货包终端速度试验的必要性，但预计 90 米/秒撞击试验将考虑到货包终端速度的撞击。终端速度条件的目的是证实，在货包从飞机上弹出的情况下，货包设计将提供保护。该情况可能是由于空中碰撞或飞行中机体故障造成的。然而，要注意的是，C 型货包要求已经包括在不屈表面上以 90 米/秒的速度进行撞击试验。该试验提供了一个严格的证实货包完整性的货物落水情况。

737.11. 虽然自由跌落货包的速度可能超过 90 米/秒，但撞击表面不太可能像撞击试验中规定的不屈表面那样坚硬。还应当指出，任何类型的飞机事故的概率都很低，涉及空中碰撞或飞行中机体故障的此类事故的百分比很低。如果该事故发生在携带 C 型货包的飞机上，如果货包在跌落过程中仍然附着在机体残骸上，就可以减轻对货包的损坏，这将降低货包的撞击速度。

737.12. 将货包以 90 米/秒的速度撞击在不屈的表面上是一项很难执行的试验。该撞击速度相当于在不考虑空气阻力的情况下通过大约 420 米高度的自由跌落。这意味着通常需要导丝来确保货包在所需的位置以正确的方向撞击。引导自由跌落将意味着摩擦力必须通过更大的释放高度来考虑，以确保撞击时的速度是正确的。还可以使用利用额外能源来实现速度和方位可靠性的技术。这些技术包括火箭滑车、电缆下拉和气枪设施。

737.13. 此外，第 701.1—701.25 段和第 727.6—727.11 段提供了有用的信息。

737.14. 对于装有“运输条例”第 674 段所述数量非例外易裂变材料货包中，“最大损坏”术语应当被视为将导致最大中子增殖系数的损坏条件。

## 第七节 参考文献

- [1] BJORKMAN, G., “间隙对容器封盖冲击响应的影响”，ASME PVP 2009-77800（压力容器和管道会议），捷克共和国布拉格（2009 年）。
- [2] WILLE, F., BALLHEIMER, V., QUERCETTI, T., STERTHAUS, J., “货包设计评定中内容物和盖之间间隙的考虑”，放射性物质运输 2015 年（放射性物质运输和存储会议及展览），英国牛津（2015 年 5 月）。
- [3] WILLE, F., BALLHEIMER, V., DROSTE, B., “考虑相似理论特性的国际原子能机构缩小尺寸货包 1 米穿刺棒跌落试验的正确执行建议”，《放射性物质包装和运输》第 182 期（2007 年）第 111—116 页。
- [4] LEMAO, S., MOUTARDE, M., LIZOT, M.-T., SERT, G., “IRSN 运输货包设计安全评定经验反馈表”，《放射性物质包装和运输》第 2007 期（国际研讨会论文集，迈阿密，2007 年），核材料管理学会，伊利诺伊州迪尔菲尔德（2007 年）。
- [5] 国际标准化组织《辐射防护—密封源—一般要求和分类》（ISO 2919:2012），国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。

- [6] 国际标准化组织《密封源防护：泄漏试验方法》（ISO 9978:2020），国际标准化组织，日内瓦（2020 年）。
- [7] 美国国家标准协会《美国放射性物质运输货包泄漏试验国家标准》，美国国家标准协会第 N14.5-2014 号报告，美国国家标准协会，纽约（2014 年）。
- [8] 国际标准化组织《放射性物质安全运输—货包泄漏试验》（ISO 12807:2018），国际标准化组织，日内瓦（2018 年）。
- [9] DROSTE, B., 等，“运输罐撞击不同类型靶的安全性评价”，《放射性物质包装和运输》第 98 期（国际研讨会论文集，巴黎，1998 年），第 3 卷，核安全与保护研究所，巴黎（1998 年）第 1343—1351 页。
- [10] 国际原子能机构《放射性物质的运输包装》（会议论文集，维也纳，1976 年），国际原子能机构，维也纳（1976 年）。
- [11] 《放射性物质包装和运输（PATRAM）》，研讨会论文集：（新墨西哥州阿尔伯克基（1965 年），新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1965 年）；盖特林堡，田纳西州（1968 年），美国原子能委员会，田纳西州橡树岭（1968 年）；华盛顿州里奇兰（1971 年）；美国原子能委员会，田纳西州橡树岭（1971 年）；迈阿密比奇，佛罗里达州（1974 年），联合碳素公司核分部，田纳西州橡树岭（1975 年）；拉斯维加斯，内华达州（1978 年），新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1978 年）；柏林（西）（1980 年）；联邦材料试验研究所，柏林（1980 年）；新奥尔良，路易斯安那州（1983 年），田纳西州橡树岭国家实验室橡树岭（1983 年）；达沃斯（1986 年）；国际原子能机构，维也纳（1987 年）。
- [12] 国际标准化组织《核能—六氟化铀运输包装》（ISO 7195:2020），国际标准化组织，日内瓦（2020 年）。
- [13] 国际原子能机构《运输包装试验设施目录》，国际原子能机构《技术文件》第 295 号，国际原子能机构，维也纳（1983 年）。
- [14] “2001 年放射性物质运输货包试验设备目录”，《国际放射性物质运输杂志》特刊第 12 期第 2—3 页（2001 年）。

- [15] 联合国《危险货物运输建议：示范条例》，ST/SG/AC.10/1/Rev.22，2卷本，联合国，纽约和日内瓦（2021年）。
- [16] CLARKE, R.K., FOLEY, J.T., HARTMAN, W.F., LARSON, D.W., “运输事故严重程度”，第 SL74-0001 号报告，新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1976年）。
- [17] DENNIS, A.W., FOLEY, J.T., HARTMAN, W.F., LARSON, D.W., “大型货包运输事故的严重性”，第 SL77-0001 号报告，新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1978年）。
- [18] McCLURE, J.D., “小型放射性物质运输货包合格标准分析”，第 SAND76-0708 号报告，新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1977年）。
- [19] McCLURE, J.D., 等，“B 型货包对监管和其他冲击试验环境的相对响应”，《放射性物质包装和运输》第 80 期（国际研讨会论文集，柏林，1980年），联邦材料试验研究所，柏林（1980年）。
- [20] BLYTHE, R.A., MILES, J.C., HOLT, P.J., “靶材对冲击损伤影响的研究”，放射性物质包装和运输，《放射性物质包装和运输》第 83 期（国际研讨会论文集，新奥尔良，1983年），田纳西州橡树岭国家实验室（1983年）。
- [21] GABLIN, K.A., “非屏蔽运输货包对不屈服和半屈服表面的冲击响应”，同上。
- [22] HÜBNER, H.W., MASSLOWSKI, J.P., “500 公斤以下 B 型货包的粉碎条件和耐火性之间的相互作用”，同上。
- [23] DIGGS, J.M., LEISHER, W.B., POPE, R.B., TRUJILLO, A.A., “判定小型 B 型包装对拟定国际原子能机构粉碎实验要求的敏感性试验”，同上。
- [24] CHEVALIER, G., GILLES, P., POUARD, P., “破碎试验与坠落试验比较的正当性论证和优势及现行法规的修改”，同上。

- [25] COLTON, J.D., ROMANDER, C.M., “公路、铁路和海上事故中放射性物质货包的潜在挤压负载”, 第 NUREG/CR-1588 号报告, 加利福尼亚州门洛帕克斯坦福国际研究院 (1980 年)。
- [26] 橡树岭国家实验室, 《运输罐设计人员导则》, 第 ORN L-NSIC-68 号报告, UC-80, 田纳西州橡树岭国家实验室 (1976 年)。
- [27] DIGGS, J.M., POPE, R.B., TRUJILLO, A.A., UNCAPHER, W.L., “小型 B 型包装的粉碎实验”, 第 SAND83-1145 号报告, 新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室 (1985 年)。
- [28] QUERCETTI, T., BALLHEIMER, V., WIESER, G., “压扁条件下货包冲击性能的分析、数值和实验研究”, 《放射性物质包装和运输》第 2001 期 (国际研讨会论文集, 芝加哥, 2001 年), 联邦材料试验研究所, 柏林 (2001 年)。
- [29] McCLURE, J.D., “乏燃料运输事故概率”, 第 SAND-80-1721 号报告, 新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室 (1981 年)。
- [30] WILMOT, E.L., McCLURE, J.D., LUNA, R.E., “关于乏燃料的运输事故假想方案研讨会的报告”, 第 SAND-80-2012 号报告, 新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室 (1981 年)。
- [31] POPE, R.B., YOSHIMURA, H.R., HAMANN, J.E., KLEIN, D.E., “RAM 运输货包的事故热试验和分析程序评定”, 美国机械工程师学会文件第 80-HT-38 号, 美国试验和材料学会, 宾夕法尼亚州费城 (1981 年)。
- [32] JEFFERSON, R.M., McCLURE, J.D., “监管与现实”, 《放射性物质包装和运输》第 83 期 (国际研讨会论文集, 新奥尔良, 1983 年), 田纳西州橡树岭国家实验室 (1983 年)。
- [33] FRY, C.J., “利用 CFD 模拟水池火灾”, 《放射性物质包装和运输》第 92 期 (国际研讨会论文集, 俄克拉荷马城, 1992 年), 科技署, 东京 (1992 年)。
- [34] FRY, C.J., “国际原子能机构火灾试验参数的实验研究”, 同上。

- [35] WIESER, G., DROSTE, B., “热试验要求及其不同试验方法的核实”, 同上。
- [36] 美国试验与材料协会《放射性物质 B 型货包热鉴定标准规程》(ASTM E 2230-02-08), 美国试验与材料协会, 宾夕法尼亚州费城 (2008 年)。
- [37] BAINBRIDGE, B.L., KELTNER, N.R., “大型水池火灾中大型物体的传热”, 《危害材料杂志》第 20 期 (1988 年) 第 21—40 页。
- [38] KELTNER, N.R., MOYA, J.L., “火灾试验中热环境的定义”, 《消防材料》第 14 期 (1989 年) 第 133—138 页。
- [39] BURGESS, M., FRY, C.J., “货包批准的消防试验”, 《国际放射性物质运输杂志》第 1 期 (1990 年) 第 7—16 页。
- [40] McCAFFERY, B.J., “纯浮力扩散火焰—一些实验结果”, 第 PB80-112113 号报告, 美国国家标准局, 华盛顿特区 (1979 年)。
- [41] McADAMS, W.H., 《热传输》, 麦格劳·希尔, 纽约 (1954 年)。
- [42] 国际原子能机构《大量或高活度放射性物质的空运》, 国际原子能机构《技术文件》第 702 号, 国际原子能机构, 维也纳 (1993 年)。
- [43] McSWEENEY, T.I., JOHNSON, J.F., “货运飞机运输二氧化钚风险评定”, 第 BNWL-2-30UC-71 号报告, 华盛顿州里奇兰巴特尔西北太平洋实验室 (1977 年)。
- [44] McCLURE, J.D., VONRIESEMANN, W.A., “美国商用喷气式飞机上携带小型集装箱的粉碎环境”, 报告函, 新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室 (1976 年)。
- [45] BROWN, M.L., 等, “钚空运中用容器试验标准规范”, 英国原子能管理局, 伦敦 (1980 年)。
- [46] HARTMAN, W.F., 等, “美国商用喷气式飞机小型货包发动机碎片威胁及破碎环境分析”, 《放射性物质包装和运输》第 78 期 (国际研讨会论文集, 新奥尔良, 1978 年), 新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室 (1978 年)。

- [47] 美国核管制委员会《钚空运货包认证的鉴定标准》，第 NUREG/0360 号报告，核管制委员会，华盛顿特区（1978 年）。
- [48] WILKINSON, H.L., “关于飞机严重坠毁环境的研究，特别是有关放射性物质的运输”，SARS89（研讨会论文集，巴斯，1989 年），爱思唯尔，阿姆斯特丹和纽约（1989 年）。
- [49] BONSON, L.L., “钚运输容器特殊冲击试验的最终报告：试验结果的描述”，第 SAND76-0437 号报告，新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1977 年）。
- [50] McWHIRTER, M., 等，“氧化钚船运集装箱特殊试验报告：美国联邦航空局飞行记录仪生存标准”，第 SAN75-0446 号报告，新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1975 年）。
- [51] STRAVASNIK, L.F., “6M、SP58 和 L-10 钚运输容器的特殊试验”，开发报告第 SC-DR-72059 号，新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1972 年）。
- [52] BROWN, M.L., 等，“钚空运中用容器试验标准规范”，第 EUR6994EN 号报告，欧共体理事会，布鲁塞尔和卢森堡（1980 年）。
- [53] McCLURE, J.D., LUNA, R.E., “严重空运事故分析”，《放射性物质包装和运输》第 89 期（国际研讨会论文集，华盛顿特区，1989 年），田纳西州橡树岭国家实验室（1989 年）。
- [54] DEVILLERS, C., 等，“钚安全空运监管办法”，同上。

## 第八节

### 批准和行政要求

#### 一般规定

801.1. “运输条例”区分了在没有主管当局货包设计批准的情况下可以进行运输的情况和需要该批准的情况。在这两种情况下，“运输条例”都规定托运人和承运人负有符合的主要责任。托运人应当能够提供文件，例如通过计算或试验报告，向主管当局证实货包设计遵守“运输条例”要求。货包设计人员应当编写货包设计安全报告，以系统的方式处理所有监管要求，并应当向托运人发放一份合规证书，总结货包的监管合规。

801.2. “相关主管当局”还可包括途中国家的主管当局。

801.3. 对于不需要主管当局批准的货包，可能需要申请某种形式的“合格证实”。此类合格证实应当包括以下信息：

- (a) 货包的类型。
- (b) 包装的识别。
- (c) 发货日期和到期日。
- (d) 对运输方式的任何限制（如适当）。
- (e) 适用的国家和国际条例的清单，包括“运输条例”版本和货包设计符合的相关段落，以及证实符合文件的参考信息。
- (f) 以下声明：

“本证书并不豁免托运人符合货包将通过或进入的任何国家政府的任何要求。”
- (g) 参照设计图纸或规范说明对包装的说明。还应当提供一张不大于 21 厘米×30 厘米的可复制说明，显示货包的组成，并附有包装的简要说明，包括制造材料、总质量、一般外部尺寸和外观。
- (h) 参照图纸的设计规范。

- (i) 允许放射性内容物的规范，包括对从包装性质来看可能不明显的放射性内容物的任何限制。这包括物理和化学形状、所涉及的活度（酌情包括各种同位素的活度）、克数以及是否存在特殊形状放射性物质。
- (j) 装卸、包装和维护说明参考文件。
- (k) “运输条例”第 306 段所要求适用管理系统的说明。
- (l) 任何认为必要的应急安排。
- (m) 负责认证符合性人员的签名和身份证实。

802.1. 见第 204.1—204.3 段和第 205.1 段。

802.2. 在需要主管当局批准时，主管当局应当酌情对特殊形状或低弥散放射性物质、含有 0.1 公斤或以上六氟化铀货包、含有易裂变材料货包、“运输条例”第 417 (f) 段指出除外的易裂变材料进行独立评定。B (U) 型和 B (M) 型货包、C 型货包、特殊安排、某些装运、特别用途船舶的辐射防护计划以及未列出的  $A_1$  和  $A_2$  值的计算、豁免物质未列出的活度浓度和豁免托运的未列出的活度限值。

802.3. 关于装有易裂变材料货包须经主管当局批准要求，“运输条例”第 417 段、第 674 段和第 675 段将某些货包排除在专门适用于易裂变材料要求之外。然而，适用于货包内容物的放射性、非裂变特性的所有相关要求仍然适用。

802.4. 必须清楚地了解主管当局与申请人之间的关系。申请人有责任证实符合适用要求。主管当局的责任是判断所提交的信息是否充分表明该合规情况。主管当局应当可自由地检查申请人所作的陈述、计算和评定，必要时甚至通过进行独立的计算或试验。主管当局应当不为申请人进行辩护，然而，这并不排除它在没有承诺的情况下向申请人提供咨询意见，说明什么可能是表明合规情况的可接受的方式。

802.5. 关于主管当局作用的进一步详细情况，可在国家或国际运输组织颁布的法规中查阅。

802.6. 申请人应当在初始设计阶段与主管当局联系，讨论相关设计原则的实施，并制定批准程序和应当采取的行动。

802.7. 经验表明，许多申请人首次提出申请是为了满足范围相当窄的特定和紧迫的需要，然后在试图扩大批准证书的范围以将包装用于其他类型的材料和/或装运时，多次提出修订批准证书的请求。只要有可能，应当鼓励申请人将其第一次提交的材料作为预测其未来需求的一般情况。这将使申请和审批制度运作更有效率。此外，在某些情况下，在正式提交详细申请之前，批准申请人和主管当局先对拟议申请进行概要讨论对双方都有利。

802.8. 申请人提交相关货包设计和装运的详细信息后，主管当局如认为合理，可发放货包设计批准证书和装运批准证书相结合的单独证书。

802.9. SSG-78[1]附件 I 提供了进一步的指导。

## **特殊形状放射性物质和低弥散放射性物质（LDRM）的批准**

803.1. 特殊形状放射性物质的设计要求在运输前获得单方面主管当局的批准，而低弥散放射性物质的设计要求多边批准。“运输条例”第 803 段指出了批准申请中应当包括的最低信息。

803.2. 对于可能影响其满足“运输条例”第 602—604 段对特殊形状放射性物质要求能力的特殊形状设计的任何与时间相关的特点，应当提供定量说明。

803.3. 可能有一些进程会影响特别形状胶囊的完整性。在特殊形状胶囊的设计中应当考虑这些因素。例如，胶囊的加压可能是由  $\alpha$  同位素衰变产生的气体引起的。

803.4. 应当给予主管当局合理的机会，观察或评论为证实符合特殊形状放射性物质和低弥散放射性物质“运输条例”而进行或计划进行的任何试验。申请应当包括一份关于试验及其结果的详细报告。

804.1. 关于识别标记的详细建议见第 832.1—832.3 段。

## 货包设计的批准

### 装有六氟化铀货包设计的批准

807.1. “运输条例”（1996 年版）规定批准用于运载数量大于 0.1 千克的非裂变或裂变除外六氟化铀货包。采用了一种新的货包识别类别（见“运输条例”第 832 段）。

807.2. 遵守“运输条例”第 631—633 段要求的货包可能仍需要多边批准，因为其他原因，例如物质的易裂变性。

807.3. 应当给予主管当局合理的机会，观察或评论为证实遵守“运输条例”而对含有 0.1 公斤或以上六氟化铀货包进行的或计划进行的任何试验。申请应当包括一份关于试验及其结果的详细报告。

807.4. 申请批准拟装有六氟化铀货包的设计时，应当包括一份所有适用要求的清单（按“运输条例”段落编号），其中涉及证实符合这些要求的文件或其他正当性。

### B (U) 型和 C 型货包设计的批准

809.1. 货包设计的批准申请应当包括一份所有适用要求的清单（按“运输条例”段落编号），并参照提供符合这些要求的证实文件或其他正当性。

809.2. 应当给予主管当局合理的机会，观察或评论对 B (U) 型或 C 型货包进行或计划进行的任何试验，以表明遵守“运输条例”。申请应当包括一份关于试验及其结果的详细报告。

809.3. 由于存储后用于装运的货包可能在装载放射性内容物的情况下使用了很长时间，应当评定退化机制和老化过程的影响，以便在整个存储期间符合安全正当性，以核实存储后的可运输性。这可以通过定期的安全评定以及对货包及其操作和环境条件的视察、监控和监视以及存储期间的维护来证实。该评定应当记录在老化管理计划中（见第 613A.4 段）。在参考文献[2—7]可以找到考虑用于存储后装运货包的老化机制的示例。

809.4. 需要建立间隙分析计划。间隙分析是对货包设计是否符合现行“运输条例”定期评定。它应当考虑规则的变化、技术知识的变化和货包设计在存储期间状态的变化，然后找出任何间隙。间隙分析计划应当说明进行

该间隙分析的程序。这支持货包设计批准证书的更新过程，以及在整个存储期间和存储后装运的现有证书有效性核实过程。关于间隙分析计划目标的详细信息见参考文献[8]，关于用于存储后装运货包的间隙分析的进一步见参考文献[9—12]。

### **B (M) 型货包设计的批准**

812.1. 申请人提供的关于“运输条例”第 812 (a) 和 (b) 段信息，将使主管当局能够评定 B (M) 型设计不符合 B (U) 型要求的影响，并确定拟议补充控制是否足以提供可比的安全水平。补充控制的目的是补偿不能纳入设计的安全措施。通过多边批准机制，B (M) 型货包的设计由运输所经过或进入所有国家的主管当局独立评定。

812.2. 为弥补未能满足“运输条例”第 639 段、第 656 段、第 657 段和第 660—666 段一项或多项要求而适用的拟议补充操作控制或限制（即“运输条例”已经要求的控制或限制以外的控制或限制），应当充分加以确定、说明和说明正当性。应当参照使用区域或国家以及适当的气象数据，确定运输过程中预计最高和最低温度和日晒环境条件，并说明正当性（见第 667.1 段和第 667.2 段）。

812.3. 如果要求对 B (M) 型货包进行间歇排气，则应当向主管当局提交程序和控制措施的完整说明以供批准。进一步的建议见第 668.1—668.6 段。

812.4. 应当给予主管当局合理的机会，观察或评论对 B (M) 型货包进行的或计划进行的任何试验，以表明遵守“运输条例”。申请应当包括一份关于试验及其结果的详细报告。

### **装有易裂变材料的货包设计的批准**

814.1. 易裂变材料（IF、AF、B (U) F、B (M) F 和 CF）的所有货包设计都需要多边批准，主要是因为临界危害的性质以及在运输过程中始终保持次临界的重要性。此外，关于易裂变材料货包设计的管理规定允许完全自由地使用通常是计算的方法来证实合规情况。因此有必要主管当局独立评定和批准易裂变材料的所有货包设计。

814.2. 易裂变材料的货包设计必须满足关于货包内容物的放射性特性要求和关于货包内容物的裂变特性要求。关于放射性特性，货包按照“运输条例”第 231 段货包的定义分类。在适用的情况下，需要根据货包内容物的放射性、非裂变特性批准货包设计。除了该批准之外，还需要与货包内容物的裂变特性相关的设计批准。关于易裂变材料货包设计批准要求的例外情况，见“运输条例”第 417 段、第 674 段和第 675 段。

815.1. 在申请批准时向主管当局提供的信息必须详细说明遵守“运输条例”第 673 段和第 676—685 段各项要求的情况。信息应当包括根据第 673 (b) (i) — (iv) 段列出的所有适用要求的清单（按“运输条例”段落分列）。涉及证实符合这些要求的文件或其他正当性，并应当包括“运输条例”第 838 (n) 段详述的主管当局批准证书中特定引用的物项。应当包括用于证实单独货包或货包阵列次临界的任何实验、计算或推理论据的适当信息。申请人应当意识到，他们应当向其提出申请法域的主管当局寻求指导。

## 过渡性安排

**根据“运输条例”1985年版、1985年（修正后的1990年版）、1996年版、1996年（修订版），1996年（2003年修订版）、2005年版、2009年版和2012年版不需要主管当局批准设计的货包**

819.1. “运输条例”（1985年版）通过后，根据“运输条例”（1973年版）和“运输条例”（1973年（修订版）），不需要主管当局批准设计的货包不能再使用。若要继续使用该型货包，则必须对照“运输条例”（1985年版）要求，或由主管当局作为特殊安排评审和批准装运，尽管“运输条例”没有明确说明该点。

819.2. 第 819 段被列入“运输条例”（1996年版），并在后续版本中作了进一步修订，以允许这类现有包装在公布后的一段有限和确定的时间内继续使用，在此期间可对设计进行评审，并在必要时进行修订，以确保其完全符合最新版“运输条例”要求。如果该评审和/或修订证实是不切实际的，过渡期旨在为逐步淘汰货包设计和逐步采用符合最新版“运输条例”要求的新货包设计留出时间。遵守“运输条例”（1985年版）或后续版本的准备的货包有时在进一步装运前存储多年。这可能特别适用于装有放射性废物并等待运往中间或最终存储库的工业货包或 A 型货包。第 819 段允许在

规定的时间内准备并经过适当维护和视察的该型货包在遵守“运输条例”（1985 年版）或后续版本基础上今后运输。“运输条例”（2018 年版）对 1996 年版、1996 年（修订版）、1996 年（2003 年修订版）、2005 年版、2009 年版、2012 年版增加了额外的过渡性规定。

819.3. 第 819 段强调了根据现行“运输条例”适用管理系统措施要求，以确保该型货包仅在继续满足初始设计意图或监管要求的情况下继续使用。要做到该点，最好的方法是确保将最新的管理系统措施应用于制造后的活动，如服务、维护、改造和使用这些货包。

819.4. 提及现行“运输条例”第四节是为了确保仅使用最新的放射性数据（如  $A_1$  和  $A_2$  值所反映的）来确定货包内容物和其他相关限值。应当指出，“运输条例”过渡性安排的范围只扩大到对某些包装和货包要求。在所有其他方面，例如关于总则、运输要求和控制，包括托运和运输限值，以及批准和行政要求，适用现行“运输条例”要求。

819.5. 经货包所有人与货包设计人员协商后确定，对原货包设计的任何修改，或增加内容物的活度，或添加其他类型的放射性物质，如果会对安全产生重大和有害影响，则需要对照现行“运输条例”要求重新评定设计。这可能包括内容物质量的增加、闭合物的改变、任何撞击减震器的改变、热防护或屏蔽的改变以及内容物的改变等物项。

**根据“运输条例”1985 年版、1985 年（1990 年修订版），1996 年版、1996 年（修订版）、1996 年（2003 年修订版）、2005 年版、2009 年版和 2012 年版批准的货包设计**

820.1. 在通过“运输条例”（2018 年版）之后，根据“运输条例”（1973 年版）和“运输条例”（1973 年（修订版））需要主管当局批准设计的货包（B）型、B（U）型、B（M）型货包和易裂变材料货包设计）不能再使用。若要继续在操作上使用该型货包，要么必须对照现行“运输条例”要求对设计进行评审，要么必须由主管当局作为特殊安排对货物进行评审和批准。

820.2. 根据先前的“运输条例”版本，需要主管当局批准设计的货包允许继续使用，但受某些限制。该规定俗称“祖父”规定，被引入“运输条例”（1985 年版）以简化他们的过渡。这样就可以继续使用货包，只要它

们得到适当的维护并继续满足其初始的设计意图，直到其有用的设计寿命结束。它还规定了出版后的一段时间，在此期间可对设计进行评审，并在必要时进行修订，以确保货包完全遵守现行“运输条例”要求。如果该评审和/或修订证实不切实际，则过渡期为逐步淘汰货包和逐步采用遵守现行“运输条例”要求的新设计留出了时间。

820.3. 1973 年版和 1973 年（修订版）的“运输条例”只要求质量保证计划（现在称为管理系统）<sup>1</sup> “运输条例”（1985 年版）适当地确定了质量保证计划的必要性，以涵盖运输的所有方面，从所有货包设计、制造、试验、文件、使用、维护和视察，到实际运输和在途存储操作。根据“运输条例”（2018 年版），按照“运输条例”1973 年版或 1973 年（修订版）版的规定批准的货包设计制造的包装不能再使用。

820.4. 当考虑祖父批准时，“运输条例”第 306 段“适用要求”将涉及 (a) 初始制造包装时的质量保证计划（现称为管理系统）；(b) 管理系统中涉及当前运输活动的部分，如使用、视察、维护和保养，以及运输和在途存储操作。涵盖 (b) 项活动的管理系统安排应当符合主管当局商定管理系统的现行国家和/或国际标准。

820.5. 提及现行“运输条例”各段和各节，以确保关于管理系统要求（“运输条例”第 306 段）、活度限值和分类规定（“运输条例”第四节），包括最新的放射性数据（如  $A_1$  和  $A_2$  值所反映）；运输要求和控制（“运输条例”第五节）；适用时，对空运易裂变材料要求（“运输条例”第 683 段）用于确定货包内容物和其他相关限值。应当指出，“运输条例”过渡性安排的范围只扩大到对某些包装和货包要求。在所有其他方面，例如关于总则、运输要求和控制，包括托运和运输限值，以及批准和行政要求适用现行“运输条例”规定。还需要使用与裂变例外相关的最新要求（“运输条例”第 417 段、第 674 段和第 675 段）。

820.6. 在制定“运输条例”（2018 年版）的过程中，确定无需立即修订但这些旨在长期改善运输安全的变化是正当的。因此，还决定接受继续在操作上使用根据 1985 年版、1985 年（1990 年修订版）、1996 年版、1996 年版（修订版）、1996 年（作为根据“运输条例”1967 年版、1973 年版或

---

<sup>1</sup> 在“运输条例”和相关安全导则的现行版中，“管理系统”术语现已取代“质量保证”。

1973 年（修订版）的规定批准的货包设计制造的现有货包继续使用被认为不再有必要或正当。

820.7. 遵守“运输条例”1985 年版、1985 年（1990 年修订版）、1996 年版、1996 年（修订版）、1996 年（2003 年修订版）、2005 年版、2009 年版和 2012 年版要求的经批准货包的继续使用须经多边批准，以便主管当局能够建立一个框架，在此框架内可批准继续使用。此外，不允许开始对此类设计的包装进行新的制造。该过渡期是根据对将“运输条例”（2018 年版）纳入国家和国际条例所需时间的评定确定的，同时考虑到在执行“运输条例”（1996 年版）过渡安排期间取得的经验。

820.8. 对于主管当局确定的对原货包设计的任何修订，或增加内容物的活度，或添加其他类型的放射性物质，这些都将对安全产生显著和有害的影响，应当根据现行“运输条例”要求重新评定和批准设计。这些因素可能包括内容物质量的增加、闭合物的改变、任何撞击减震器的改变、热防护或屏蔽改变以及内容物形状改变。

820.9. 在适用“运输条例”第 820 段时。原主管设计当局指定的原主管当局识别标记和设计类型代码应当保持在货包和主管当局的设计批准证书上，尽管这些货包须经多边设计批准。这意味着，根据“运输条例”（1985 年版）初始指定为 B(U)-85 型或 B(U)F-85 型的货包，在根据第 820 段规定使用时，应当不重新指定为 B(M) 型或 B(M)F 型。这是为了确保该型货包能被清楚地识别为第 820 段规定的货包，初始是根据“运输条例”（1985 年版）批准的。

820.10. 见第 832.2 段和第 832.3 段。

**根据“运输条例”1985 年版、1985 年（1990 年修订版）、1996 年版、1996 年（修订版）和 1996 年（2003 年修订版），2005 年版、2009 年版和 2012 年版批准的特殊形状放射性物质**

823.1. “运输条例”第 823 段指出了特殊形状放射性物质的过渡安排，其设计也须经主管当局批准。它强调有必要采取管理系统措施，以确保该特殊形状放射性物质只有在继续满足初始的设计意图或监管要求时才继续使用。要做到该点，最好的方法是确保最新的管理系统措施适用于制造后的活动，如服务、维护、修改和使用该特殊形状的物质。应当指出，“运输

条例”过渡性安排的范围只扩大到对某些特殊形状放射性物质要求。在所有其他方面，例如关于总则、运输要求和控制，包括托运和运输限值，以及批准和行政要求，适用现行“运输条例”要求。

823.2. 在制定“运输条例”（2018 年版）的过程中，确定在通过后没有必要立即进行修订，但旨在长期改善运输安全的修订是正当的。因此，还决定接受根据“运输条例”1985 年版和 1985 年（1990 年修订版）、1996 年版、1996 年（修订版）和 1996 年（2003 年修订版）、2005 年版、2009 年版和 2012 年版设计和批准的特殊形状放射性物质的继续实际使用。但是，不得开始制造该特殊形状放射性物质。继续使用根据“运输条例”1967 年版、1973 年版或 1973 年（修订版）版规定批准的现有特殊形状放射性物质被认为不再必要或正当。

823.3. 见第 832.2 段和第 832.3 段。

## 序列号的通知和登记

824.1. 主管当局应当监控与货包设计、制造和使用相关的特定方面合规保证计划（见“运输条例”第 307 段）。为了核实充分的性能，必须向主管当局提供按照主管当局批准的设计制造的所有包装的序列号。主管当局应当保存序列号登记册。

824.2. 按照“运输条例”第 820 段祖父规定批准继续使用的货包设计制造的货包。也将被分配一个序列号。序列号和主管当局对该序列号的了解是至关重要的，因为该序列号确定了明确确定哪些单独包装受各自祖父规定管辖的手段。

824.3. 货包序列号应当唯一识别每个制造的货包。应当将序列号通知适当的主管当局。“适当的”术语有广泛的解释，可以涉及以下任何一项：

- (a) 货包设计的起源国；
- (b) 货包的制造国；
- (c) 使用货包的一个或多个国家。

如果是按照“运输条例”第 820 段下批准继续使用的货包设计制造的货包。参与多边批准程序的所有主管当局都应当收到关于货包序列号的信息。

## 装运批准

825.1. 如果需要装运批准，该批准必须涵盖托运货物从原产地到目的地的整个运输过程。如果托运货物跨越国境，则托运批准必须是多边的（即托运货物必须得到始发国主管当局的批准，以及托运货物经过或进入的所有国家主管当局的批准）。要求多边批准的目的是使所有相关主管当局能够判断是否需要在运输过程中实行任何特别监管。

825.2. “运输条例”第 825 段每一项要求应当单独适用。例如，装有易裂变材料的 B (M) 型排气货包的托运货物可能需要根据第 825 (a) 和 (c) 段获得装运批准。

825.3. 适用“运输条例”第 825 段必要性，由要运输货包的实际内容物管辖。例如，当一个 B (M) 型货包，其货包设计批准证书规定允许的钴-60 含量限于 1600 太贝可，而用于装运仅 400 太贝可的钴-60，则无需装运批准，因为 400 太贝可小于 1000 太贝可。

825.4. “运输条例”第 825 (c) 段指出的意图，装运批准要求只适用于海船货舱、舱室或规定甲板面积的临界安全指数总和超过 50，因为适用 6 米分隔要求，所以整个船舶的临界安全指数总和不限于 50，货舱、隔舱或规定的甲板面积可视为单独的运输。

826.1. 根据“运输条例”第 802 (a) (iv) — (vii) 段指出，规定的货包设计需要获得设计批准。其中一些货包可以在没有额外装运批准的情况下运输，而其他货包则需要获得该批准（见“运输条例”第 825 段）。在某些情况下，需要额外的装运批准，因为可能需要操作或其他控制，而这些控制可能取决于实际的货包内容物。在装运过程中需要控制的情况下，可以在设计评审和批准阶段确定，不需要评审单独装运。在该情况下，货包设计和装运批准可以合并为一个批准文件。

826.2. “运输条例”在概念上区分了设计批准和装运批准。装运批准可纳入相应的设计批准证书，如果这样做，应当注意明确界定批准证书的双重性质，并适用适当的类型代码。相关类型代码见“运输条例”第 832 段。

827A.1. 关于运输计划的建议，见第 520.3—520.5 段。

## 根据特殊安排装运货物的批准

829.1. 虽然根据特殊安排批准装运需要考虑装运程序和货包设计，但该批准在概念上是装运批准。进一步的指导见第 310.1—310.4 段。

830.1. 特殊安排装运所需的安全水平通常是通过实施操作控制来补偿包装或装运程序中的任何不符合之处来实现的。可以有效使用的一些操作控制措施如下：

- (a) 独家使用的车辆（见“运输条例”第 221 段）。
- (b) 护送货物。护送队通常是一名辐射防护专家，配备辐射监控仪器仪表，熟悉应急程序，使专家在发生事故或其他异常事件时，能够迅速识别存在的任何辐射和污染危害，并向民政当局提供适当的建议。在公路运输方面，护送人员应当尽可能分车行驶，以避免因同一事故而丧失能力的风险。护送队还应当配备木桩、绳索和标记来封锁事故区域，一个灭火器来控制轻微火灾，以及一个通信系统。如果考虑到谨慎，辐射防护专家可以由警察和消防部门护送。
- (c) 可对装运路线进行控制，以选择潜在危害最小的路线，并在可能的情况下避开人口密度高和可能发生危害的地区，如陡峭的坡度和铁路平交道口。
- (d) 可以控制装运时间，以避免繁忙时期，如高峰时间和周末交通高峰。
- (e) 在可能的情况下，应当直接装运（即不中途停留或不转运）。
- (f) 运输车辆的速度可能受到限制，特别是如果包装的抗撞击能力较低，如果运输车辆的较慢速度不会造成额外的危害（如涉及较快行驶的车辆碰撞）。
- (g) 应当考虑提前通知应急服务部门（警察、消防和救援）。
- (h) 适用的应急程序需要考虑到因特殊安排货物发生事故而产生的意外情况（见“运输条例”第 554 (c) 段）。
- (i) 必要时，应当使用辅助设备，如车辆货包系带或减震器系统和其他防护设备或结构，作为补偿性安全安排。

# 主管当局批准证书

## 主管当局识别标记

832.1. 类型代码是基于几个指标的使用，旨在迅速提供相关货包或货物类型的信息。这些指标提供了关于货包设计特征（例如 B(U) 型、B(M) 型或 C 型）、易裂变材料多边货包设计批准证书的可用性以及批准证书的其他特定方面（例如特殊安排、装运、特殊形状、低弥散放射性物质、非裂变或裂变例外六氟化铀含量、例外易裂变材料）的信息。因此，例如，识别标记中出现的 B(U)F 并不一定表明某一特定货包中存在易裂变材料，而只表明存在易裂变材料的可能性。

832.2. 重要的是，最好是在识别标记中提供简单的手段，以确定原始货包设计批准是根据哪一版“运输条例”发放的。在“运输条例”（1985 年版），这是通过在识别标记上添加“-85”符号来实现的，然后在“运输条例”（1996 年版）发布时，识别标记改为“-96”。包括“-96”在内的识别标记延续到“运输条例”1996 年（修订版）和 1996 年（2003 年修订版）、2005 年版、2009 年版和 2012 年版。没有年份符号意味着根据当前版的“运输条例”要求批准了设计。

示例：

| “运输条例” 版本 | 货包设计识别标记                        |
|-----------|---------------------------------|
| 1985 年    | A/132/B (U)-85 或 A/132/B (M)-85 |
| 1996 年    | A/132/B (U)-96 或 A/132/B (M)-96 |
| 2018 年    | A/132/B (U) 或 A/132/B (M)       |

832.3. 在“运输条例”1996 年版至 1996 年（修订版）和 1996 年（2003 年修订版）、2005 年版、2009 年版和 2012 年版的类型代码中添加相同符号“-96”程序是正当的，因为在“运输条例”（1996 年版）之后的版本中，直到 2012 年版之前，没有对货包、特殊形状放射性物质和低弥散放射性物质的设计或试验要求进行重大的安全修改。所有加上“-85”或“-96”设计，均须分别根据“运输条例”第 820—823 段符合过渡安排的规定，并可清楚地加以识别。

# 批准的证书的内容

## 特殊形状放射性物质和低弥散放射性物质批准的证书

834.1. 对批准的证书的内容仔细描述的目的是双重的。它旨在协助主管当局设计证书，并便利对证书的任何检查，因为证书所载信息是标准化的。

834.2. “运输条例”规定了批准证书和主管当局识别标记系统中的基本信息。遵守这些规定有助于实现认证的国际统一。除了适用的国家条例和相关的国际条例外，每份证书都必须提到“运输条例”适用版，因为这是国际公认的已知标准。本“安全导则”表 4 给出了主管当局识别标记中使用的国际车辆登记 (VRI) 代码[13]。VRI 是国际上道路交通车辆上使用的区别标记。<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> 国际道路交通中机动车辆和拖车上使用的注册国区别标记，例如根据 1949 年《日内瓦道路交通公约》或 1968 年《维也纳道路交通公约》。

表 4. 按国家 VRI 代码清单

| 国家           | VRI 代码 |
|--------------|--------|
| 阿富汗          | AFG    |
| 阿尔巴尼亚        | AL     |
| 阿尔及利亚        | DZ     |
| 安道尔          | AND    |
| 安哥拉          | AO     |
| 阿根廷          | RA     |
| 亚美尼亚         | AM     |
| 澳大利亚         | AUS    |
| 奥地利          | A      |
| 阿塞拜疆         | AZ     |
| 巴哈马          | BS     |
| 巴林           | BRN    |
| 孟加拉          | BD     |
| 巴巴多斯         | BDS    |
| 白罗斯          | BY     |
| 比利时          | B      |
| 伯利兹（前英属洪都拉斯） | BH     |
| 贝宁           | DY     |
| 波利维亚         | BOL    |
| 波斯尼亚和黑塞哥维那   | BIH    |
| 博茨瓦纳         | BW     |
| 巴西           | BR     |
| 文莱           | BRU    |
| 保加利亚         | BG     |
| 布基纳法索        | BF     |
| 布隆迪          | RU     |
| 柬埔寨          | KH     |
| 喀麦隆          | CAM    |
| 加拿大          | CDN    |
| 中非共和国        | RCA    |

表 4. 按国家 VRI 代码清单（续）

| 国家         | VRI 代码 |
|------------|--------|
| 乍得         | TCH/TD |
| 智利         | RCH    |
| 中华人民共和国    | RC     |
| 哥伦比亚       | CO     |
| 刚果         | RCB    |
| 哥斯达黎加      | CR     |
| 科特迪瓦       | CI     |
| 克罗地亚       | HR     |
| 古巴         | CU     |
| 塞浦路斯       | CY     |
| 捷克共和国      | CZ     |
| 刚果民主共和国    | ZRE    |
| 丹麦         | DK     |
| 法罗群岛       | FO     |
| 多米尼克（向风群岛） | WD     |
| 多米尼加共和国    | DOM    |
| 厄瓜多尔       | EC     |
| 埃及         | ET     |
| 萨尔瓦多       | ES     |
| 厄立特里亚      | ER     |
| 爱沙尼亚       | EST    |
| 斯威士兰       | SD     |
| 埃塞俄比亚      | ETH    |
| 斐济         | FJI    |
| 芬兰         | FIN    |
| 法国         | F      |
| 加蓬         | G      |
| 冈比亚        | WAG    |
| 格鲁吉亚       | GE     |
| 德国         | D      |

表 4. 按国家 VRI 代码清单（续）

| 国家          | VRI 代码 |
|-------------|--------|
| 加纳          | GH     |
| 希腊          | GR     |
| 格林纳达（向风群岛）  | WG     |
| 危地马拉        | GCA    |
| 几内亚         | RG     |
| 圭亚那         | GUY    |
| 海地          | RH     |
| 梵蒂冈         | V      |
| 香港          | HK     |
| 匈牙利         | H      |
| 冰岛          | IS     |
| 印度          | IND    |
| 印度尼西亚       | RI     |
| 伊朗伊斯兰共和国    | IR     |
| 伊拉克         | IRQ    |
| 爱尔兰         | IRL    |
| 以色列         | IL     |
| 意大利         | I      |
| 牙买加         | JA     |
| 日本          | J      |
| 约旦          | HKJ    |
| 哈萨克斯坦       | KZ     |
| 肯尼亚         | EAK    |
| 朝鲜民主主义人民共和国 | KP     |
| 科威特         | KWT    |
| 吉尔吉斯斯坦      | KG     |
| 老挝人民民主共和国   | LAO    |
| 拉脱维亚        | LV     |
| 黎巴嫩         | RL     |
| 莱索托         | LS     |

表 4. 按国家 VRI 代码清单（续）

| 国家       | VRI 代码 |
|----------|--------|
| 利比里亚     | LB     |
| 列支敦士登    | FL     |
| 立陶宛      | LT     |
| 卢森堡      | L      |
| 马达加斯加    | RM     |
| 马拉维      | MW     |
| 马来西亚     | MAL    |
| 马里       | RMM    |
| 马耳他      | M      |
| 马绍尔群岛    | PC     |
| 毛里塔尼亚    | RIM    |
| 毛里求斯     | MS     |
| 墨西哥      | MEX    |
| 摩纳哥      | MC     |
| 蒙古       | MGL    |
| 黑山       | MNE    |
| 摩洛哥      | MA     |
| 莫桑比克     | MOC    |
| 缅甸       | BUR    |
| 纳米比亚     | NAM    |
| 瑙鲁       | NAU    |
| 尼泊尔      | NEP    |
| 荷兰       | NL     |
| 荷属安的列斯群岛 | NA     |
| 新西兰      | NZ     |
| 尼加拉瓜     | NIC    |
| 尼日尔      | RN     |
| 尼日利亚     | WAN    |
| 挪威       | N      |
| 巴基斯坦     | PK     |

表 4. 按国家 VRI 代码清单（续）

| 国家               | VRI 代码 |
|------------------|--------|
| 巴拿马              | 帕      |
| 巴布亚新几内亚          | PNG    |
| 巴拉圭              | PY     |
| 秘鲁               | PE     |
| 菲律宾              | RP     |
| 波兰               | PL     |
| 葡萄牙              | P      |
| 卡塔尔              | Q      |
| 大韩民国             | ROK    |
| 摩尔多瓦共和国          | MD     |
| 罗马尼亚             | RO     |
| 俄罗斯联邦            | RUS    |
| 卢旺达              | RWA    |
| 萨摩亚              | WS     |
| 圣马里诺尔            | RSM    |
| 沙特阿拉伯            | SA     |
| 塞内加尔             | SN     |
| 塞尔维亚             | SRB    |
| 塞舌尔              | SY     |
| 塞拉利昂             | WAL    |
| 新加坡              | SGP    |
| 斯洛伐克             | SK     |
| 斯洛文尼亚            | SLO    |
| 索马里              | SO     |
| 南非               | ZA     |
| 西班牙              | E      |
| 斯里兰卡             | CL     |
| 圣卢西亚（向风群岛）       | WL     |
| 圣文森特和格林纳丁斯（向风群岛） | WV     |
| 利比亚              | LAR    |

表 4. 按国家 VRI 代码清单（续）

| 国家        | VRI 代码 |
|-----------|--------|
| 苏丹        | SUD    |
| 苏里南       | SME    |
| 瑞典        | S      |
| 瑞士        | CH     |
| 叙利亚阿拉伯共和国 | SYR    |
| 塔吉克斯坦     | TJ     |
| 泰国        | T      |
| 马其顿       | MK     |
| 多哥        | TG     |
| 特立尼达和多巴哥  | TT     |
| 突尼斯       | TN     |
| 土耳其       | TR     |
| 土库曼斯坦     | TM     |
| 乌干达       | EAU    |
| 乌克兰       | UA     |
| 阿拉伯联合酋长国  | SV     |
| 英国        | GB     |
| 奥尔德内      | GBA    |
| 直布罗陀      | GBZ    |
| 根西岛       | GBG    |
| 马恩岛       | GBM    |
| 泽西岛       | GBJ    |
| 坦桑尼亚联合共和国 |        |
| 坦噶尼喀      | EAT    |
| 桑给巴尔      | EAZ    |
| 美国        | USA    |
| 乌拉圭       | ROU    |
| 乌兹别克斯坦努兹  | UZ     |
| 委内瑞拉      | YV     |
| 越南        | VN     |

**表 4. 按国家 VRI 代码清单（续）**

| 国家    | VRI 代码 |
|-------|--------|
| 维尔京群岛 | BVI    |
| 也门    | YAR    |
| 赞比亚   | RNR    |
| 津巴布韦  | ZW     |

- <sup>a</sup> 独立后，在 1949 年《道路交通公约》中没有通知国家名称的变更。
- <sup>b</sup> 柬埔寨以前称为民主柬埔寨。
- <sup>c</sup> 区分标记没有通知联合国秘书长。

**特殊安排批准证书**

836.1. 如第 418.1 段所述，在准备证书期间，由于对临界安全的潜在影响，应当注意每个货包内容物的授权数量、类型和形状。

在装运前对内容物进行的任何特定视察或试验以确认内容物的特征，应当在证书中注明。这对于装运前装入货包内的任何可移除中子毒物或其他临界控制特点特别重要（见第 503.4—503.5 段）。在适当的情况下，应当在批准证书中指定或引用测量需要满足的标准。

836.2. 应当符合或避免货包的任何特殊装载安排应当在特殊安排证书中注明。

**装运批准证书**

837.1. 见第 836.1 段。

837.2. 如果满足某些货包和托运要求，则含有易裂变材料货包不受“运输条例”第 676—685 段要求的限制：见“运输条例”第 674 (a) — (d) 段。如果托运货物中的货包含有易裂变材料，根据货包限值应当注意确保托运限值为没有超过。这将意味着托运人应当知道每个货包内易裂变材料数量的上限或假想每个货包都有上限（见第 674 (a) 段）。

## 货包设计批准的证书

838.1. 如第 418.1 段所述，由于对临界安全的潜在影响，应当注意每个货包内容物的授权数量、类型和形状。在装运前为确认货物特征而需要对货物进行的任何视察或试验都应当在证书中注明满足“运输条例”第 677 (b) 段要求的测量。如果货包内装有辐照核燃料，则可能需要在装载和/或装运前执行。要求测量满足的标准应当在货包的证书中指定或引用（见第 503.8 段相关咨询材料）。同样，如果特别功能不包括泄漏水，则应当在证书中说明（或引用）确保符合的特定视察和/或试验程序。

## 证书的验证

840.1. 原产国主管当局的批准证书通常是多边批准证书系列中最先发放的。原产国以外的主管当局可选择单独进行安全评定和评价，或利用原主管当局已经进行的评定，从而限制了其自身评定的范围和程度。

840.2. 随后的批准证书可以采用两种形式之一。首先，后一国的主管当局可认可证书原件（即同意并认可证书原件，包括其中包含的任何控制定义）。这是通过核实原始证书的多边批准。通过核实的批准不需要任何额外的主管当局的识别标记，无论是证书识别还是货包上的标记。第二，主管当局可以发放与原始证书有关联但与原始证书分离的批准证书，因为该随后的证书将带有原始识别标记以外的识别标记。此外，在该情况下，根据该多边批准使用的包装必须标有原件和其后批准证书的识别标记（见“运输条例”第 833 (b) 段）。

840.3. 对于考虑用于存储后装运的货包，存储地和开始存储后装运国家的主管当局可以不同于货包外观设计的原产国。当货包设计批准在设计原产国被撤回或不续期时，未经货包设计批准，货包可能不再被授权在货包存放国运输。为此，相关存储和存储后装运的主管当局可考虑发放和维持其本身的货包设计批准。这可能部分基于货包设计原产国主管当局已经进行的评定，但随后由针对存储和存储后装运的特定方面的额外评定完成，如老化管理、间隙分析、装运前要求、存储后装运要求以及各种批准期限。

## 第八节 参考文献

- [1] 国际原子能机构《放射性物质安全运输的合规保证》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-78 号，国际原子能机构，维也纳（编写中）。
- [2] ERHARD, A., PROBST, U., WOLFF, D., “长期临时存储容器的老化管理，放射性物质的包装、运输、存储和安保”，第 22 卷第 1 号，W. S. Maney & Son 有限公司，利兹，英国（2011 年）。
- [3] CHOPRA, O.K., DIERCKS, D., 等，“乏燃料长期贮存和运输干式贮存系统老化影响管理”第 1 版，第 FCRD-UFD-2013-000294 号，ANL-13/15，阿贡国家实验室，伊利诺伊州阿贡（2013 年）。
- [4] SAEGUSA, T., “乏燃料两用容器的老化管理和贮存后运输”，W. S. Maney & Son 有限公司《放射性物质的包装、运输、存储和安保》第 25 卷第 2 期，W. S. Maney & Son 有限公司，英国利兹（2014 年）。
- [5] WILLE, F., WOLFF, D., 等，“德国 SNF 货包可运输性经验的方法和反馈”，《放射性物质的包装、运输、存储和安保》第 25 卷第 2 期，W. S. Maney & Son 有限公司，英国利兹 W. S. Maney & Son 有限公司（2014 年）。
- [6] 核能研究所《基于运行老化管理干式贮存导则》，核能研究所 14-03 第 0 版，华盛顿特区（2014 年）。
- [7] DROSTE, B., KOMANN, S., 等，“考虑老化机制对乏燃料或高放废物两用容器运输安全的影响”，W. S. Maney & Son 有限公司《放射性物质的包装、运输、存储和安保》第 25 卷第 3—4 期，W. S. Maney & Son 有限公司，英国利兹（2014 年）。
- [8] 国际原子能机构《用于贮存和运输乏燃料两用容器的安全论证文件方法》，国际原子能机构《技术文件》第 1938 号，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。
- [9] HANSON, B., ALSAED, H.等，“支持使用过燃料长期贮存的差距分析”第 0 版，第 CED-Used-2011—000136 号第 0 版，PNNL-20509，华盛顿州里奇兰巴特尔西北太平洋实验室（2012 年）。

- [10] 太平洋西北国家实验室《已使用核燃料贮存和运输技术差距分析审查》(FCRD-Used-2012-000215)，第 PNNL-21596 号，华盛顿州里奇兰（2012 年）。
- [11] DROSTE, B., WILLE, F., “乏燃料/高水平放射性废物两用容器货包设计安全报告的有效性维护”，第 17 届放射性物质包装和运输国际研讨会论文集（《放射性物质包装和运输》第 2013 期），加利福尼亚州旧金山（2013 年）。
- [12] KOMANN, S., WILLE, F., DROSTE, B., “乏燃料/高水平放射性废物两用容器运输包装设计安全报告定期评审的差距分析示例”，概率安全评定和管理（PSAM 12），夏威夷檀香山（2014 年）。
- [13] 联合国欧洲经济委员会《根据 1968 年<道路交通公约>（第 45（4）条）和 1949 年<道路交通公约>（附件 4）通知联合国秘书长的国际交通车辆识别标志》，联合国欧洲经济委员会，日内瓦（2007 年）。

## 附录 I

### 用于 $A_1$ 、 $A_2$ 值的计算及其应用的 Q 系统

#### 介绍

I.1. Q 系统根据 A 型货包中允许的放射性核素的  $A_1$  和  $A_2$  值定义了“数量”限值。这些限值还用于“运输条例”其他几个目的，例如规定 B (U) 型、B (M) 型或 C 型货包活度泄漏限值、低比活度和例外货包内容物限值，以及低弥散性和特殊形状（非弥散性）和非特殊形状（弥散性）放射性物质的内容物限值。Q 系统中的术语 Q 代表“量”。

I.2. 参考文献[I.1]提供了原来 Q 系统的概要。1982 年，原子能机构的一个特别工作组进一步完善了 Q 系统，这是“运输条例”（1985 年版） $A_1$  和  $A_2$  值的基准。参考文献[I.2—I.7]提供了进一步的信息。

I.3. 由于预计“运输条例”（1996 年版）将出版，国际放射防护委员会的最新建议和每单位摄入量的剂量系数（剂量系数）[I.8]形式的数据已纳入 Q 系统。这些结果作为更新  $A_1$  和  $A_2$  值的基准。这项工作的一个重要部分是重新检验在推导 A 型货包内容物限值时使用的剂量模式。对早期模式的重新评审导致了 Q 系统的进一步发展，从而改进了评价  $A_1$  和  $A_2$  值的方法。本附录报告了确定  $A_1$  和  $A_2$  值的修订方法和所获得的结果。本附录所载的许多信息和讨论都是历史的，但保持这些信息和讨论对于充分理解所提供的建议至关重要。

#### 背景

I.4. “运输条例”规定的控制运输货包放射性排放的各种限值是基于 A 型货包的活度内容物限值。A 型货包旨在为大量低活度的托运物提供经济的运输，而在同时实现了高水平的安全。规定内容物限值是为了确保 A 型货包严重损坏的放射性后果不是不可接受的，而且不需要主管当局批准设计，但含有易裂变材料货包除外。

I.5. 超过 A 型货包限值的活度在“运输条例”由 B (U) 型或 B (M) 型货包要求涵盖，这些要求确实需要主管当局的批准。B (U) 型或 B (M) 型货包的设计要求是将严重事故导致该货包显著放射性排放的可能性降低到很低的水平。

I.6. 开始，放射性核素为运输目的分为 7 组，每组对特殊形状放射性物质和所有其他形状的物质都有其 A 型货包内容物限值。特殊形状放射性物质是指在进行特定试验时非弥散性物质。在“运输条例”（1973 年版），分数类系统发展为  $A_1/A_2$  系统，其中，每种核素在以特殊形状运输时有一个 A 型货包内容物限值， $A_1$  居里，在不以特殊形状运输时有一个限值， $A_2$  居里。

I.7.  $A_1/A_2$  系统的剂量基准最初依赖于一些实用的假设。在计算  $A_1$  值时，全身暴露在距离 3 米的 3 小时内限值为 30 毫希沃特。此外，在推导  $A_2$  时，假设摄入量为  $10^{-6}A_2$ ，导致辐射工作人员每年摄入量限值的一半，这是由于“中值事故”。中值事故被任意定义为导致完全失去屏蔽和 0.1% 的货包内容物排放的事故，以这样的方式，旁观者随后接受了 0.1% 的排放物质的摄入。此处所述的现行 Q 系统包括比以前的  $A_1/A_2$  系统更广泛的照射途径的考虑，但使用了与“运输条例”（1985 年版）所述 Q 系统相同的假设。所作的许多假设与“运输条例”（1973 年版）所述或暗示的假设相似，但在涉及放射性物质摄入的情况下，则使用[I.8、I.9]建议的新数据和概念。特别是对货包损坏和内容物排放的程度作出了务实的假设，如后文所讨论的，而没有参考事故中值。

## Q 系统的基准

I.8. 在 Q 系统下，考虑了许多不同的照射途径，每一途径都可能导致在严重运输事故中涉及的 A 型货包附近人员受到外部或内部照射。剂量路线在图 I.1 示意性地表示，并分别导致外部光子剂量、外部  $\beta$  剂量、吸入剂量、由于污染转移引起的皮肤和摄入剂量以及浸没剂量的 5 个内容物限值  $Q_A$ 、 $Q_B$ 、 $Q_C$ 、 $Q_D$  和  $Q_E$ 。对特殊形状的  $\alpha$  和中子发射体以及氟的内容物限值分别进行了考虑。

I.9. 如“运输条例”（1985 年版）所述，A 型货包内容物限值是为单独放射性核素确定的。特殊形状放射性物质的  $A_1$  值是  $Q_A$  和  $Q_B$  两个值中较小的一个，而非特殊形状放射性物质的  $A_2$  值是  $A_1$  和其余  $Q$  值中最低的一个。相关照射途径的特定假设。下面将讨论用于推导单独  $Q$  值的方法，但所有这些方法都基于以下放射学标准：

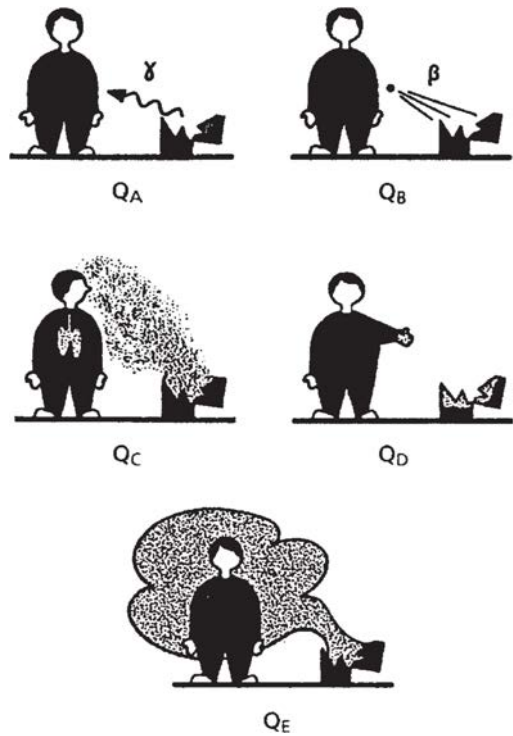


图 1.1. 在  $Q$  系统中使用的照射途径的示意图。

- (a) 事故发生后照射在运输货包附近人员的有效或承诺有效剂量应当不超过 50 毫希沃特的参考剂量。
- (b) 涉及事故人员的个别器官（包括皮肤）所接受的当量剂量或承诺当量剂量应当不超过 0.5 希沃特，或在特殊情况下，眼睛晶状体应当不超过 0.15 希沃特。
- (c) 人员不太可能在离受损货包 1 米的地方停留 30 分钟以上。

I.10. 在“运输条例”（1985年版），在推导  $A_1/A_2$  值时使用的参考剂量为 50 毫希沃特，即发生事故后在运输货包附近受照射人的有效剂量或承诺有效剂量，是根据当时辐射工作人员的年剂量限值计算的。在修订后的 Q 系统中，50 毫希沃特伏的参考剂量被保留，因为涉及 A 型货包的实际事故导致了非常低的照射。在选择参考剂量时，考虑到个人因运输事故而照射的可能性也很重要。一般而言，该风险可被视为“一生一次”风险。显然，大多数个人永远不会受照射。

I.11. 事故发生后，暴露在运输货包附近人员的有效剂量应当不超过 50 毫希沃特。为计算的目的，该人员被认为是在距离损坏货包 1 米的距离，并在该位置停留 30 分钟。有效剂量是组织当量剂量的总和，每个剂量乘以适当的组织加权系数[I.10]。组织加权系数是辐射防护中使用的系数，如国际放射防护委员会第 103 号出版物[I.8]所述，但“运输条例”（2018 年版）增加的 7 种放射性核素除外，其中使用了国际放射防护委员会第 116 号出版物[I.11]数据。

I.12. 在 1 米距离处照射 30 分钟是对最初出现在事故现场的人员偶然照射的谨慎判断，假设随后的恢复操作是在保健物理监督和控制下进行的。这被认为比早先关于在 3 米距离内照射 3 小时的假设更为现实。再加上上述剂量限值，导致损坏货包在 1 米处的全身中子辐照的限制剂量率为 0.1 希沃特/小时。

## 剂量模式和假设

I.13. 在本节中，详细描述了在推导 5 个 Q 值时使用的剂量模式和假设。本文概述了不同的辐射途径，并讨论了与推导方法相关的考虑。

### Q<sub>A</sub>：光子引起的外部剂量

I.14. 放射性核素的 Q<sub>A</sub> 值是通过考虑事故后暴露在损坏的 A 型货包附近人员所接受的  $\gamma$  辐射或 X 射线引起的全身外部照射剂量来确定的。假想在事故中货包的屏蔽完全丧失，在距离未屏蔽放射性物质的边缘（或表面）1 米处，由此产生的剂量率限制在 0.1 希沃特/小时。进一步假设，受损的货包可以作为点源进行有效处理。

I.15. 在早期的 Q 系统中， $Q_A$  是通过使用国际放射防护委员会第 38 号出版物[I.12]每一次崩解的平均光子能量来计算的。此外，换算成每单位在空气中自由照射的有效剂量近似为 6.7 毫希沃特/雷姆的光子能量在 50 千电子伏特和 5 兆电子伏特之间。

I.16. 在 Q 系统修订版中， $Q_A$  值是使用国际放射防护委员会第 38 号出版物[I.12]给出的放射性核素的完整 X 射线和  $\gamma$  发射光谱计算的，但“运输条例”（2018 年版）增加的 7 种放射性核素除外，这些放射性核素使用了国际放射防护委员会第 107 号出版物[I.13]数据。有效剂量与空气中自由照射之间的能量依赖关系是国际放射防护委员会第 51 号出版物[I.14]对各向同性辐射几何构型所给出的关系。

I.17.  $Q_A$  值由以下方法给出：

$$Q_A = \frac{D/t}{DRC_\gamma} \tag{I.1}$$

式中

D 是参考剂量 0.05 希沃特；

t 是照射时间为 0.5 小时；

$DRC_\gamma$  是放射性核素的有效剂量率系数。

I.18. 因此， $Q_A$  值由以下方法推导：

$$Q_A(TBq) = \frac{10^{-13}}{\dot{e}_{pt}} \tag{I.2}$$

其中， $\dot{e}_{pt}$  是距离 1 米的放射性核素的有效剂量率系数 ( $Sv \cdot Bq^{-1} \cdot h^{-1}$ )。

I.19. 附录 II 表 II.2 给出了剂量和剂量率系数。

I.20. 剂量率系数的计算公式如下：

$$\dot{e}_{pt} = \frac{1}{4\pi d^2} \sum_i \left( \frac{e}{X} \right)_{E_i} Y_i E_i \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E_i} e^{-\mu_i d} B(E_i, d) \quad (I.3)$$

式中

$(e/X)_{E_i}$  是有效剂量与空气中游离照射量 ( $Sv \cdot R^{-1}$ ) 的关系；

$Y_i$  是放射性核素每崩解一次能  $E_i$  的光子产额 (贝可·秒) $^{-1}$ ；

$E_i$  是光子的能量 (兆电子伏特)；

$(\mu_{en}/\rho)_{E_i}$  是能量为  $E_i$  (平方厘米每克) 的光子在空气中的质能摄取系数；

$\mu_i$  是能量为  $E_i$  ( $cm^{-1}$ ) 的光子在空气中的线性衰减系数；

$B(E_i, d)$  是能量为  $E_i$  和距离为  $d$  的光子的空气比释动能积聚系数。

I.21. 距离  $d$  取为 1 米。 $(e/X)_{E_i}$  值是通过插值国际放射防护委员会第 51 号出版物[I.14]数据得出的，但“运输条例”（2018 年版）增加的 7 种放射性核素除外，这些放射性核素使用了国际放射防护委员会第 116 号出版物[I.11]数据。该方法对 5 千电子伏特到 10 兆电子伏特范围内的光子是有效的。 $(e/X)_{E_i}$  的值取决于关于辐射场角分布的假设（照射几何构型）。然而，各种照射几何构型之间的数值差异是有限的，例如，旋转平行光束与各向同性场的比值通常小于 1.3。

### **Q<sub>B</sub>: β 发射体引起外部剂量**

I.22.  $Q_B$  值是通过考虑在涉及含有特殊形状放射性物质的 A 型货包的事故后照射人员皮肤的  $\beta$  剂量来确定的。运输货包的屏蔽假想在事故中完全丧失，但保留“运输条例”（1985 年版）包括的  $\beta$  发射体（与  $\beta$  窗口保护器、货包碎片等物质相关）的残留屏蔽系数的概念。对于最大能量  $\geq 2$  兆电子伏特的  $\beta$  发射体，这是一个非常保守的屏蔽系数为 3，在 Q 系统中，该方法被扩展到包括依赖于  $\beta$  能量和基于大约 150 毫克/平方厘米厚度吸收体的屏蔽系数范围。

I.23. 在修订版 Q 系统中， $Q_B$  是通过使用国际放射防护委员会第 38 号出版物[I.12]放射性核素的完整  $\beta$  谱计算的，但“运输条例”（2018 年版）增加的 7 种放射性核素除外，这些放射性核素使用了国际放射防护委员会第 107 号出版物[I.13]数据。谱数据与参考文献[I.15—I.17]关于单能电子发射体单位活度皮肤剂量率的数据一起使用。货包的自屏蔽被认为是  $\beta$  谱最大能量的平滑函数，如图 I.2 所示。

$Q_B$  来自：

$$Q_B = \frac{D/t}{DRC_\beta} \tag{I.4}$$

式中

D 是参考剂量为 0.5 希沃特；

T 是照射时间为 0.5 小时；

$DRC_\beta$  是放射性核素的等效皮肤剂量率系数。

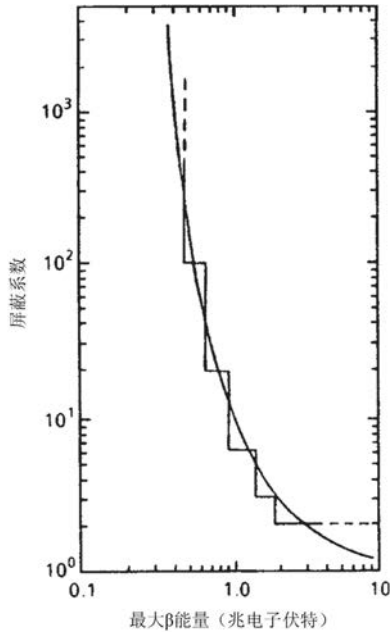


图 I.2. 屏蔽系数作为  $\beta$  能量的函数。屏蔽系数  $= e^{\mu d}$ ， $\mu = 0.017 \times e_{\beta_{\max}}^{1.14}$ ， $d = 150$  毫克/平方厘米。

I.24. 因此,  $Q_B$  的计算如下:

$$Q_B(\text{TBq}) = \frac{1 \times 10^{-12}}{\dot{e}_\beta} \tag{I.5}$$

其中,  $\dot{e}_\beta$  是距离自屏蔽材料 1 米处  $\beta$  发射的等效皮肤剂量率系数 ( $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )。剂量和剂量率系数可在附录 II 表 II.2 找到。

I.25. 剂量率系数定义为:

$$\dot{e}_\beta = \frac{1}{SF_{\beta_{\max}}} J_{\text{air}} \tag{I.6}$$

式中

$SF_{\beta_{\max}}$  是在  $\beta$  谱的最大能量下计算的屏蔽系数;

$J_{\text{air}}$  是每次崩解 1 米时的剂量 ( $\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

$J_{\text{air}}$  系数计算自:

$$J_{\text{air}} = \frac{n}{4\pi r^2} \int_0^{E_{\max}} N(E) j(r/r_E, E) (E/r_E) dE \tag{I.7}$$

式中

$N$  是每次解体发射的  $\beta$  粒子数;

$R$  是与源的距离 (厘米);

$P$  是介质的密度 (克每立方厘米);

$N(e)$  是能量在  $E$  和  $E+dE$  ( $\text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 之间发射的电子数;

$j(r/r_E, E)$  是无量纲剂量分布, 它代表了在半径为  $r/r_E$  的球壳中沉积的发射能量的分数, 列表显示见参考文献[I.16、I.17]。

I.26. 应当指出, 虽然眼睛晶状体的年剂量限值低于皮肤的剂量限值 (0.15 希沃特与 0.5 希沃特相比), 但考虑到  $\beta$  发射体在组织中的深度剂量, 特别是晶状体上皮敏感细胞在 300 毫克/平方厘米深度的吸收, 表明对皮肤的剂量总是限制在最大  $\beta$  能量约 4 兆电子伏特[I.18—I.20]。因此, 对眼睛晶状体剂量的特定考虑是不必要的。

I.27. 在 Q 值的测定中, 转换电子被视为单能  $\beta$  粒子, 并根据它们的产出加权。湮灭辐射不包括在对皮肤  $\beta$  剂量的评价中, 因为它只占基底层局部剂量的少数百分比。然而, 0.51 兆电子伏特的  $\gamma$  射线被包括在推导  $Q_A$  所用的每次分解的光子能量中。

### **Q<sub>C</sub>: 吸入内剂量**

I.28. 非特殊形状放射性物质的质量控制值是通过考虑事故后暴露于损坏的 A 型货包排放放射性核素人员的吸入剂量来确定的。通过将事故工况下放射性物质的摄入量限制在当时国际放射防护委员会建议[I.21]的年摄入量限值内, 确保了对上述剂量限值的符合性。“运输条例”(1973 年版)使用的事故中值概念已不再使用。

I.29. 在 Q 系统下, 考虑了一系列事故假想方案, 包括初始为推导  $Q_C$  而提出的假想方案, 包括发生在室内和室外的事故, 以及火灾的可能影响。在“运输条例”(1973 年版), 假想  $10^{-3}$  的货包内容物可能因中值事故而逃逸, 而  $10^{-3}$  的该物质可能被带入事故影响人员的身体。这导致了一个净摄入系数的  $10^{-6}$  的货包内容物和该值已保留在 Q 系统。然而, 它现在被认为代表了一系列可能的排放分数和摄取系数, 因此可以方便地根据这两个参数独立地考虑摄入系数。

I.30. 现在在 Q 系统下承认的排放分数范围, 即  $10^{-3}$ — $10^{-2}$ , 涵盖了“运输条例”(1973 年版)和 Q 系统内初始建议中假想排放分数范围。在此基础上, 还有一个默认的假设, 也是在“运输条例”(1985 年版)做出的, 即可能导致大部分货包内容物逃逸重大事故的可能性很小。A 型货包在严重事故环境中的行为证实了该方法[I.22—I.24]。

I.31. 关于在事故工况下产生的可吸入气溶胶分数的数据通常很少, 而且只能用于有限范围的物质。例如, 对于在空气和二氧化碳中强化氧化速率条件下的铀和钚试样, 据报告可吸入气溶胶分数高达约 1%[I.25]。然而, 在该水平以下, 气溶胶分数显示出很大的变化, 这取决于温度和本地大气流动条件。在液态的情况下, 更高的排放分数显然是可能的, 但在这里, A 型货包材料提供的多重屏障, 包括吸收体和双重包容系统, 即使在发生严重撞击或粉碎事故后仍然有效[I.24]。例如, 在一次碘-131 源被完全粉碎的事故中, 在清除货包碎片后, 不到 2%的货包内容物留在道路上[I.26]。

I.32. 对于许多 A 型货包来说，潜在最严重的事故环境是严重的机械损坏和火灾的结合。然而，如参考文献[I.23、I.24]所述，即使在该情况下，碎片在保留排放的放射性物质方面也可能发挥重要作用。

I.33. 通常，火灾会产生较大尺寸的颗粒物质，这往往会使通过吸入的任何摄入量最小化，同时为挥发性物质，特别是汽化液体的吸收提供了很大的表面积。另一个缓解因素是火灾引起的对流气流的局部扩散增强，这也会减少通过吸入的摄入量。

I.34. 现在 Q 系统中使用的摄取系数的  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  范围是基于对室内和室外一系列可能的事故工况的考虑。初始的 Q 系统建议考虑了在存储室或货物装卸舱内的照射，体积为 300 立方米，每小时换 4 次空气。假设成年人的呼吸频率为  $3.3 \times 10^{-4}$  立方米/秒，则在 30 分钟的照射期内，摄取系数约为  $10^{-3}$ 。另一种事故工况可能涉及在体积为 50 立方米的运输车辆中照射，每小时换气 10 次，这是在“运输条例”（1985 年版）确定 B (U) 型或 B (M) 型货包正常运输泄漏限值时初始采用的方法。使用与上述相同的呼吸频率和照射时间，这导致摄取系数为  $2.4 \times 10^{-3}$ 。

I.35. 对于发生在室外的事故，排放物质的大气扩散最保守的假设是地面点源。在顺风距离 100 米处，该情况的表列稀释系数范围为  $7 \times 10^{-4}$ — $1.7 \times 10^{-2}$  秒/立方米[I.27]，对应于第 I.34 段提到的成人呼吸率的摄取系数为  $2.3 \times 10^{-7}$ — $5.6 \times 10^{-6}$ 。这些吸收值适用于短期排放，涵盖从高度不稳定到高度稳定的天气条件，平均条件的相应值为  $3.3 \times 10^{-7}$ ，接近上述范围的下端。

I.36. 将用于评价大气稀释系数的模式外推到下风距离较短是不可靠的，但将照射距离缩小一个数量级至 10 米将使上述摄取系数增加约 30 倍。这表示当下风距离接近数米时，摄取系数会接近在 Q 系统中使用的  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  范围。然而，在该情况下，其他可能减少吸收的因素也会起作用，甚至可能成为主导因素。前面已经提到了火灾时预计额外湍流。由于任何卷入事故的车辆周围的空气流动或附近建筑物的影响而产生的湍流，可以预计空气中的浓度也会有类似的减少。

I.37. 因此，总的来说，认为摄取系数在  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  范围内对于确定 A 型货包内容物限值是合理的。结合已经讨论过的排放分数，使用了总摄入系数  $10^{-6}$ ，就像“运输条例”（1985 年版）一样。然而，在 Q 系统中，该值

表示排放的组合，通常是货包内容物作为可呼吸气溶胶的  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  范围内的排放，以及排放物质的摄取系数高达  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  的组合。加上前面提到的剂量限值，这导致了基于吸入的内容物限值的表达式，形式如下：

$$Q_c = \frac{D}{1 \times 10^{-6} DC_{inh}} \tag{I.8}$$

式中

- D 是参考剂量 0.05 希沃特；
- $1 \times 10^{-6}$  是吸入的货包内容物的分数；
- $DC_{inh}$  是吸入的剂量系数。

因此， $Q_c$  可以计算为：

$$Q_c(TBp) = \frac{5 \times 10^{-8}}{e_{inh}} \tag{I.9}$$

其中  $e_{inh}$  为吸入上述放射性核素的有效剂量系数（见第 I.38 段）（希沃特/贝可）。 $e_{inh}$  的值可在 GRS Part 3[I.9]表 III 找到。

I.38. 排放系数和摄取系数的范围部分由物质的化学形状和气溶胶的粒径决定。化学形状对单位摄入量的剂量有主要影响。在计算  $Q_c$  时，假设了最严格的化学形状，并假设了空气动力学直径（AMAD）为 1 微米的气溶胶表征的有效剂量系数[I.9]。保留了早期 Q 系统中使用的 1 微米空气动力学直径值，尽管其他空气动力学直径值可以给出一些放射性核素的更保守的剂量系数。

I.39. 对于铀， $Q_c$  值是根据指定的铀的主要化学形状的肺吸收类型提出的。这是对  $Q_c$  的更详细的评价，因为单位摄入量对吸收类型的敏感性，以及运输中铀的化学形状是众所周知的。

**$Q_D$ ：皮肤污染和摄入剂量**

I.40.  $\beta$  发射体的  $Q_D$  值是通过考虑因装卸损坏的 A 型货包而被非特殊形状放射性物质污染人员的皮肤所受的  $\beta$  剂量来确定的。在 Q 系统中提出的模式假设 1% 的货包内容物均匀分布在 1 平方米的面积上，处理碎片被认为会

导致手部污染达到该水平的 10%[I.28]。进一步假设接触者没有戴手套，但会意识到污染的可能性并在 5 小时内洗手。

I.41. 就个别情况而言，这些假设有些武断，但作为一个整体，它们代表了估计事故工况下可能出现的皮肤污染水平的合理基准。这是  $10^{-3} \times Q_D$ /平方米，根据 5 小时的照射期，皮肤的剂量率限值为 0.1 希沃特/小时。

I.42. 在“运输条例”（1985 年版），剂量的转换是基于直方图类型表示的  $\beta$  光谱的最大能量。 $Q_D$  值现已使用国际放射防护委员会所列的放射性核素  $\beta$  谱和离散电子发射计算[I.12、I.14]。相关核素的排放数据与参考文献 [I.29] 数据一起使用。关于从皮肤表面发射的单能电子的皮肤剂量率。 $Q_D$  由：

$$Q_D = \frac{D}{10^{-3} \times DRC_{\text{skin}} \times t} \tag{I.10}$$

式中

$D$  是参考剂量为 0.5 希沃特；

$1 \times 10^{-3}$  是皮肤单位面积所分配货包内容物的分数 ( $\text{m}^{-2}$ )；

$DRC_{\text{skin}}$  是皮肤污染的等效皮肤剂量率系数；

$t$  是照射时间  $1.8 \times 10^4$  秒（5 小时）。

I.43. 因此， $Q_D$  可以从以下几个方面确定：

$$Q_D(\text{TBq}) = \frac{2.8 \times 10^{-2}}{\dot{h}_{\text{skin}}} \tag{I.11}$$

其中  $\dot{h}_{\text{skin}}$  是每单位面积每单位活度的等效皮肤剂量率皮肤 ( $\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{TBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$ )。剂量和剂量率系数可在附录 II 表 II.2 找到。

I.44. 对于一些放射性核素， $Q_D$  值比早期  $Q$  系统值更受限制。这些较低的  $Q_D$  值主要与发射内部转换电子的放射性核素相关。

I.45. 根据皮肤剂量推导  $Q_D$  值所用的模式也可用于估计通过摄入可能摄入的放射性物质。假设一个人可以在 24 小时内从  $10^{-3}$  平方米（10 平方厘米）的皮肤上摄取所有污染物[I.28]，与之前通过吸入  $10^{-6} \times Q_C$  得出的摄入量相比，最终摄入量为  $10^{-6} \times Q_D$ 。由于通过吸入摄入的每单位剂量通常与通过摄入的剂量相同或大于通过摄入的剂量[I.9]，吸入途径通常对内部污染是有限的，因此，没有必要明确考虑摄入途径。

### **$Q_E$ : 气态同位素引起的浸没剂量**

I.46. 没有融入体内的气态同位素的  $Q_E$  值是通过考虑在事故中作为非特殊形状放射性物质以压缩或未压缩状态运输时排放后的浸没剂量来确定的。假设每小时换气 4 次，将货包内容物快速 100% 排放到尺寸为 3 米×10 米×10 米的存储室或货物装卸舱。这导致空气中的初始浓度为  $Q_E/300$  立方米，由于在随后的 30 分钟照射期内通风，该浓度以  $4 \text{ h}^{-1}$  的衰减常数指数跌落，平均浓度水平为  $1.44 \times 10^{-3} \times Q_E \text{ (m}^{-3}\text{)}$ 。由此，根据参考文献[I.30]使用使用半无限云中浸没有效剂量系数或等效皮肤剂量系数计算剂量，如本“安全导则”表 I.1 所示。

表 I.1. 浸没剂量系数

| 浸没剂量系数 $h_{\text{sub}}$ ( $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^3$ ) |                      |                      |        |                      |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------|----------------------|----------------------|
| 核素                                                                                          | 有效剂量                 | 等效皮肤剂量               | 核素     | 有效剂量                 | 等效皮肤剂量               |
| 氚-37                                                                                        | 0                    | 0                    | 氚-122  | $2.19\times10^{-15}$ | $3.36\times10^{-15}$ |
| 氚-39                                                                                        | $1.15\times10^{-16}$ | $1.07\times10^{-14}$ | 氚-123  | $2.82\times10^{-14}$ | $4.52\times10^{-14}$ |
| 氚-41                                                                                        | $6.14\times10^{-14}$ | $1.01\times10^{-13}$ | 氚-127  | $1.12\times10^{-14}$ | $1.57\times10^{-14}$ |
| 氚-42                                                                                        | 无数值                  | 无数值                  | 氚-131m | $3.49\times10^{-16}$ | $4.82\times10^{-15}$ |
| 氚-81                                                                                        | $2.44\times10^{-16}$ | $4.04\times10^{-16}$ | 氚-133  | $1.33\times10^{-15}$ | $4.97\times10^{-15}$ |
| 氚-85                                                                                        | $2.40\times10^{-16}$ | $1.32\times10^{-14}$ | 氚-135  | $1.10\times10^{-14}$ | $3.12\times10^{-14}$ |
| 氚-85m                                                                                       | $6.87\times10^{-15}$ | $2.24\times10^{-14}$ | 氚-218  | $3.40\times10^{-17}$ | $4.30\times10^{-17}$ |
| 氚-87                                                                                        | $3.97\times10^{-14}$ | $1.37\times10^{-13}$ | 氚-219  | $2.46\times10^{-15}$ | $3.38\times10^{-15}$ |
|                                                                                             |                      |                      | 氚-220  | $1.72\times10^{-17}$ | $2.20\times10^{-17}$ |
|                                                                                             |                      |                      | 氚-222  | $1.77\times10^{-17}$ | $2.28\times10^{-17}$ |

I.47.  $Q_E$  值是使用有效剂量系数和等效皮肤剂量系数计算的两个值中较小的一个。 $Q_E$  由以下提供:

$$Q_E = \frac{D}{d_f \times \text{DRC}_{\text{subm}}}$$

(I.12)

式中

$D$  是有效剂量为 0.05 希沃特，皮肤等效剂量为 0.5 希沃特;

$d_f$  是时间积分空气浓度;

$\text{DRC}_{\text{subm}}$  是浸没有效剂量系数或等效皮肤剂量系数，单位为  $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^3$

在公式 (I.12)上, 对于所定义的房间,  $d_f$  的值被设置为排放 2.6 贝可秒每立方米。

I.48. 因此,  $Q_E$  可以从以下几个方面计算出来。

对于有效剂量:

$$Q_E(TBq) = \frac{1.9 \times 10^{-14}}{h_{E, \text{ subm}}} \quad (I.13)$$

其中  $h_{E, \text{ subm}}$  为浸没有效剂量系数, 单位为  $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^3$ 。

对皮肤的等效剂量:

$$Q_E(TBq) = \frac{1.9 \times 10^{-13}}{h_{\text{skin, subm}}} \quad (I.14)$$

其中  $h_{\text{skin, subm}}$  为浸没等效皮肤剂量系数, 单位为  $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^3$ 。

## 特别考虑

I.49. 第 I.8—I.48 段所述剂量模式适用于绝大多数相关放射性核素, 可用于确定它们的  $Q$  值以及相关的  $A_1$  和  $A_2$  值。然而, 在有限数量的情况下, 模式是不适当的或需要修订。在该情况下适用的特别考虑将在本部分中讨论。

### 关于父代和子代放射性核素的考虑

I.50. 早期的  $Q$  系统假想最大运输时间为 50 天, 因此半衰期小于 10 天的放射性衰变产物被假想与寿命较长的父代相平衡。在该情况下, 计算父代及其子代的  $Q$  值, 并用限值确定父代的  $A_1$  和  $A_2$  值。如果子代放射性核素的半衰期大于 10 天或大于父代核素的半衰期, 则该子代与父代核素一起被视为混合物。

I.51. 保留 10 天半衰期标准。半衰期小于 10 天的子代放射性核素假想与寿命较长的父代处于长期平衡, 然而, 子代对每个  $Q$  值的贡献与父代的贡献相加。这提供了一种解释分支分数小于 1 的子代方法, 例如, 钷-137m 在其父代铯-137 的衰变的 94.6% 中产生。如果父代半衰期小于 10 天, 而子代的半衰期大于 10 天, 那么托运人将使用混合规则。例如, 一个含有钙-47 (4.53 天) 的货包被评价, 其钷-47 (3.351 天) 子代与父代处于瞬态

平衡。托运人将把含有锆-77（11.3 小时）的货包评价为锆-77 及其后代砷-77（38.8 小时）的混合物。

I.52. 在某些情况下，一个长寿命的后代是由一个短寿命的父代衰变产生的。在这些情况下，如果不了解迁移时间和子代核素的积聚，就无法评定子代对照射的潜在贡献。需要确定货包的运输时间和子代核素的积聚量，并用混合规则确定  $A_1/A_2$  值。作为一个示例，考虑碲-131m（30 小时），衰变为碲-131（25 分钟），然后衰变为碘-131（8.04 天）。托运人应当根据运输时间和子代核素的积聚量得出碘-131 活度，对此货包适用混合规则。

### **$\alpha$ 发射体**

I.53. 对于  $\alpha$  发射体，通常不适合计算特殊形状物质的  $Q_A$  或  $Q_B$  值，因为它们的  $\gamma$  和  $\beta$  发射体相对较弱。在“运输条例”（1973 年版），对  $10^3 A_2$  的特殊形状  $\alpha$  源提出了任意的上限。该程序没有剂量测定的正当性：由于认识到该点，再加上在运输特殊形状放射性物质方面的良好记录，以及由于采用国际放射防护委员会建议[I.8]而降低了许多  $\alpha$  发射体的  $Q_C$  值，因此将该系数提高了 10 倍。因此，为特殊形状的  $\alpha$  发射体定义了一个额外的  $Q$  值， $Q_F=10^4 \times Q_C$ ，并在  $Q$  值列表中酌情列在  $Q_A$  栏中。

I.54. 如果放射性核素在超过 0.1% 的衰变中发射  $\alpha$  粒子或衰变为  $\alpha$  发射体，则定义为  $\alpha$  发射体。例如，镭-226 在  $1.4 \times 10^{-5}$  的衰变中通过  $\alpha$  发射而衰变，就特殊形状考虑而言，它不是  $\alpha$  发射体。然而，铅-212 是一个  $\alpha$  发射体，因为它的子铋-212 经历了  $\alpha$  衰变。总体而言， $\alpha$  发射体的特殊形状限制随着  $Q_C$  的增加而增加。

I.55. 关于  $\alpha$  发射体的摄取，与关于  $Q_D$  的讨论中用于  $\beta$  发射体的论据类似，适用于吸入途径，而不是摄取途径，总是更具限制性，因此，后者没有明确考虑。

### **中子发射体**

I.56. 在中子发射体的情况下，最初在  $Q$  系统下提出，不存在已知的  $(\alpha, n)$  或  $(\gamma, n)$  源或自发中子发射体镭-252 的情况，对于这些情况，中子剂量将对前面所考虑的外辐射或内辐射途径产生重大贡献[I.4]。然而，对于镭-252 源，中子剂量是不能忽略的。国际放射防护委员会第 21 号出版物[I.31]提供的中子和  $\gamma$  排放数据表明，1 克镭-252 源在 1 米处的剂量

率为 25.4 希沃特/小时：由此产生镭-252 的  $Q_A$  值为 0.095 太贝可。国际放射防护委员会建议[I.8]的中子辐射加权系数增加约 2 个系数，则  $Q_A$  的值为  $4.7 \times 10^{-2}$  太贝可，“运输条例”（1996 年版）用于确定  $A_1$  的值。这比根据修正后的特殊形状  $\alpha$  发射体的表达式得到的 28 太贝可的  $Q_F$  值更具限制性。来自镭-252 源的中子辐射占外部剂量的主导地位：类似的考虑也适用于另外两个潜在的自发裂变源，镭-248 和镭-254。这些放射性核素的  $Q_A$  值是通过假设与上述镭-252 源的单位活度相同的剂量率换算系数来评价的，同时考虑到它们各自相对于该源的中子发射率。镭-252 的  $A_1$  值已按参考文献[I.32]所述更新。根据国际放射防护委员会建议[I.33]，“运输条例”1996 年（修订版）和以后所有版本都采用了该修订值。

### 韧致辐射

I.57. “运输条例”（1973 年版）列出  $A_1$  和  $A_2$  值的截止限值为 1000 居里，以防止韧致辐射的可能影响。在 Q 系统中，该截止限值保留在 40 太贝可。它被认为是一种任意的截断，与韧致辐射或任何其他剂量学考虑没有特定联系。

I.58. 根据  $Q_A$  和  $Q_B$  的假设，对韧致辐射的初始评价表明，40 太贝可是一个合理的数值。然而，在 Q 系统中明确包含韧致辐射可能会将某些核素的  $A_1$  和  $A_2$  限值在大约 20 太贝可，比原来低 2 倍。总体而言，该评价支持继续使用 40 太贝可的截止量。

### 氟及其化合物

I.59. 在 Q 系统的发展过程中，曾认为含氟的液体应当单独考虑。所考虑的情况是火灾后大量氟化水溢出到一个密封区域。因此，“运输条例”（1985 年版）将氟化液体的  $A_2$  值定为 40 太贝可，额外条件是浓度应当低于 1 太贝可/升，这些值得到了保留。

### 氦及其子代

I.60. 如第 I.46 段所述。 $Q_E$  的推导适用于未融入人体的惰性气体形状的放射性核素。因此，它只适用于其子代要么是稳定核素，要么是另一种惰性气体的放射性核素。在一些情况下，该条件没有得到满足，应当考虑除因浸没在放射性云中而引起的外照射之外的剂量学途径[I.34]。在“运输条例”范围内，唯一具有实际重要性的示例是氦-222。

I.61. 计算出“运输条例”（1985 年版）相应的  $Q_C$  值为 3.6 太贝可。然而，考虑到氦的 100% 排放，而不是  $Q_C$  模式中包含的  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  气溶胶排放分数，这将减少到  $3.6 \times 10^{-3}$  至  $3.6 \times 10^{-2}$  太贝可范围内的  $Q_C$  值。此外，将氦-222 及其子代作为惰性气体处理，其  $Q_E$  值为  $4.2 \times 10^{-3}$  太贝可，接近  $Q_C$  值范围的下端，这仍然是  $Q$  值列表中为氦-222 引用的 A 型货包非特殊形状限值。

## 应用

### 具有“无限” $A_1$ 或 $A_2$ 值低比活度物质

I.62. “运输条例”（1973 年版）承认了一类物质，其比活度非常低以至于难以想象摄入可能会产生显著辐射危害，即低比活度物质。这些物质是根据一个模式定义的，该模式假设一个人在尘埃大气中停留足够长的时间以吸入超过 10 毫克的物质是最不可能的。在这些条件下，如果物质的比活度使其质量摄入量相当于或小于 A 型货包事故所涉人员假想活度摄入量，即  $10^{-6}A_2$ ，则该物质在运输过程中的危害应当不大于 A 型货包所运输的放射性物质的数量。该假设模式被保留在  $Q$  系统中，并导致低比活度标准限值为  $10^{-4} \times Q_C$ /克。因此，比活度低于该水平的放射性核素的  $Q$  值被列为“无限制”。在满足该标准的情况下，与摄入 10 毫克核素相关的有效剂量小于 50 毫希沃特伏的剂量标准。天然铀和钍、贫化铀和其他物质，如铀-238、钍 232 和铀-235 符合上述低比活度标准。使用 GRS Part 3[I.9]所列剂量系数进行的计算表明，根据 ASTM C996-90[I.35]给出的同位素混合物，浓缩度小于 20% 的未经辐照铀也满足同样的标准。辐照后处理铀的  $A_1$  和  $A_2$  值应当根据“运输条例”第 405 段使用的混合物公式计算。其中考虑到铀放射性核素和裂变产物。

I.63. 在推导  $Q_D$  时使用的皮肤污染模式中，与低比活度物质相关的进一步考虑是可能在皮肤上保留任何显著时间期间的物质质量。据认为，通常情况下，手上的 1—10 毫克/平方厘米的污垢很容易辨认，并可通过擦拭或洗涤迅速清除，而不考虑可能的活度。一致认为，该范围的上端是保留在皮肤上的适当物质质量限值，结合  $Q_D$  的皮肤污染模式，这导致低比活度限值为  $10^{-5} \times Q_D$ /克。在此基准上，适用本标准的放射性核素的  $Q_D$  值在  $Q$  值表中也被列为无限值。

## 正常运输排放率

I.64. 在“运输条例”（1973年版），在确定正常运输工况下 B (U) 型或 B (M) 型货包的最大允许排放率时，最不利的预计条件被判断为工作人员在 50 立方米体积的密封车辆中花费 20%的工作时间，每小时换 10 次空气。该车辆被认为含有 B (U) 型或 B (M) 型货包，泄漏率为  $r$ （贝可/小时），保守地假想所产生的气载活度浓度一直处于平衡状态。在此基准上，一个平均呼吸速率为 1.25 立方米/小时的人每年工作 2000 小时，通过吸入的年活度摄入量 ( $I_a$ ) 被评价为：

$$I_a = \frac{r}{50 \times 10} \times 1.25 \times 2000 \times 0.2 \quad (I.15)$$

它相当于：

$$I_a = r$$

I.65. 因此，1 年以上摄入的最大活度等于活度 1 小时内排放。

I.66. 这是假设所有排放的物质都是空气传播的，可以被吸入，这对许多物质来说可能是一个总体高估。此外，平衡条件被假想在任何时候都占上风。这些因素，加上应当尽量减少 B (U) 型或 B (M) 型货包泄漏的原则，表明运输工作人员的照射量仅为当时辐射工作人员剂量限值的一小部分 [I.5]。此外，该程度的保守性被认为足以涵盖同一辆车中包含的几个泄漏货包的不太可能情况。

I.67. 在“运输条例”（1985年版），正常运输工况下 B (U) 型或 B (M) 型货包的最大允许排放率没有变化，尽管上述推导中使用的一些参数进行了更新，并考虑到了当时国际放射防护委员会建议 [I.18] 的年剂量限值和年摄入量限值。反过来，这些被合并到改进的方法中，称为 Q 系统，用于评价 A 型货包内容物限值  $A_1$  和  $A_2$  值。

I.68. 早期的模式假设照射时间为每年 2000 小时，这是非常悲观的。保留该数值，再加上在 30 米×10 米×10 米（3000 立方米）的房间内每小时换气 4 次，成人呼吸速率为 1.25 立方米/小时，有效剂量为 20 毫希沃特的允许排放速率  $r$  可计算如下：

$$r = \frac{20 \times 10^{-6} A_2}{50} \times \frac{3000 \times 4}{2000 \times 1.25} \quad (I.16)$$

$$r = 1.9 \times 10^{-6} A_2 \quad (I.17)$$

I.69. 假设的房间尺寸比 Q 系统下急性排放的房间要大。然而，假设的照射时间是非常悲观的。在 300 立方米的密闭空间中照射 200 小时将导致相同的预测有效剂量。对于在泄漏的 B (U) 型或 B (M) 型货包附近人员来说，在室外接触的最大吸入剂量会低得多。

I.70. 因此，每小时  $10^{-6} A_2$  的当前限值被保留并被显示为保守的。经验表明，在常规运输中，货包极少以接近允许限值的速度泄漏。事实上，该液态货包的泄漏会导致密封件附近非常严重的表面污染，在运输过程中或收货人收到时进行任何放射性调查都是显而易见的。

### 事故工况下排放率

I.71. “运输条例”规定的 B 型试验所模拟的严重事故不大可能发生在室内的密闭空间内，或者如果发生了该事故，所造成的情况将使附近的所有人员必须立即撤离[I.2]。因此，在该情况下，兴趣照射假想方案是发生在室外的事故。在该情况下，B (U) 型或 B (M) 型货包在一周内最大允许排放  $A_2$  的辐射影响可通过考虑在整个排放期间持续留在受损货包下风处人员所受的照射来表示为等效剂量限值[I.36]。

I.72. 实际上，任何意外排放都不太可能持续一周。在大多数情况下，应急救援人员会到达事故现场，并采取有效的治理行动，将排放限制在数小时内。在此基础上，在平均天气条件下，从受损的 B (U) 型或 B (M) 型货包下风 50—200 米范围内照射人员通过吸入的最大有效剂量为  $1^{-10}$  毫希沃特，在通常不太可能和持续稳定的气象条件下增加约 5 倍（例如，见参考文献[I.37]图 3）。将倾向于将距离放射源附近的局部包容和大气湍流效应，以及如果涉及火灾可能产生的羽流上升效应，往往会使距离放射源几十米以外的剂量降至上述剂量范围的下限。忽视源几十米范围内人员的潜在剂量被认为是正当的，部分原因是保守假设在整个排放期间源在顺风方向持续暴露，部分原因在于该地区的应急服务人员应在保健物理监督和控制下工作。

## 氪-85 特别规定

I.73. 关于氪-85 的特别规定是“运输条例”（1973 年版）提出的，“运输条例”（1985 年版）保留的，其依据是对排放该放射性核素的剂量学后果的考虑。 $10A_2$  的允许排放量最初是根据对暴露在氪-85 和任何其他放射性核素（气态或非气态）源 20 米范围内人的全身或任何关键器官的潜在辐射剂量比较得出的。据指出，当时用于推导  $A_2$  值的吸入途径模式不适用于惰性气体，即没有明显融入人体组织的惰性气体。在“运输条例”（1996 年版），在 Q 系统下，氪-85 的  $A_2$  值等于  $Q_E$  值，该值是根据事故中 A 型货包内容物迅速排放后暴露在室内人的皮肤浸没剂量计算的。对于受稀释系数  $d_f$  影响的  $A_2$  排放，通过吸入的最大有效剂量  $D_{inh}$  由以下公式给出：

$$D_{inh} = A_2 \times d_f \times 3.3 \times 10^{-4} \times \frac{50}{A_2 \times 10^{-6}} \quad (I.18)$$

其中  $3.3 \times 10^{-4}$  是成年人的平均呼吸速率，单位为立方米/秒，摄入  $10^{-6}A_2$  相当于 50 毫希沃特的剂量。在同样的基准上，排放  $10A_2$  的氪-85（100 太贝可）将导致以下人员给出的浸没剂量：

$$D_{subm} = 100 \times d_f \times 2.4 \times 10^{-1} \quad (I.19)$$

其中  $2.4 \times 10^{-1}$  为浸没剂量系数，单位为毫希沃特·立方米·太贝可<sup>-1</sup>·秒<sup>-1</sup>。

由以上表达式可知， $D_{INH}/D_{SUMM}$  约为 700。因此，与其他非气态放射性核素相比，氪-85 的 B (U) 型或 B (M) 型货包活度排放限值保守了两个数量级以上。

I.74. 2009 年，一个专家小组评审了氪-85 与其他放射性核素相比活度排放率系数 10 的有效性。关于在正常的运输工况下，对从 B (U) 型或 B (M) 型货包中排放氪-85 的浸没情况提出了以下假想方案。

(a) 考虑与第 I.69 段相同的环境参数情况如下：

- 房间体积 300 立方米；
- 换气速率为 4 小时<sup>-1</sup>；
- 照射时间 200 小时；
- 皮肤浸没剂量系数为  $1.32 \times 10^{-14} \text{ Sv} \cdot \text{s}^{-1} / (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$  [I.30]。

(b) 采用均匀排放速率 (RR 以贝可/小时为单位), 氪-85 的平均浓度为:

$$\text{浓度 (贝可/立方米)} = \text{RR} / (300 \times 4) = 8.3 \times 10^{-4} \times \text{RR} \quad (\text{I.20})$$

(c) 照射时间为 200 小时的皮肤剂量为:

$$\text{D (希沃特)} = \text{浓度 (贝可/立方米)} \quad (\text{I.21})$$

×等效皮肤剂量系数 (希沃特·立方米/ (贝可·秒))

×照射 (秒)

$$= 8.33 \times 10^{-4} \times \text{RR} \times 1.32 \times 10^{-14} \times 200 \times 3600$$

$$= 7.92 \times 10^{-12} \times \text{RR}$$

(d) 为了不超过公众的年当量皮肤剂量限值 0.05 希沃特, 应当将 RR 限制在:

$$\text{RR (贝可/小时)} = 0.05 / (7.92 \times 10^{-12})$$

$$= 6.3 \times 10^9 \text{ 贝可/小时} = 6.3 \times 10^{-4} \text{ A}_2/\text{小时}$$

(e) 该数值比目前氪-85 的  $10 \times 10^{-6} \text{ A}_2/\text{小时}$  的监管标准大 63 倍, 因此是保守的。

关于运输事故工况, 对 B 型货包排放的氪-85 活度浸没情况提出了以下设想:

(a) 考虑与第 I.72 段参数相同, 即:

- 距离货包 100 米;
- 稀释系数为  $8 \times 10^{-3}$  秒/立方米;
- 皮肤等效剂量系数为  $1.32 \times 10^{-14}$  希沃特·立方米/ (贝可·秒);
- 瞬间排放  $10 \text{ A}_2$  ( $10^{14}$  贝可)。

(b) 当量皮肤剂量为:

$$\text{D (希沃特)} = \text{活度 (贝可)} \times \text{稀释系数 (秒/立方米)} \quad (\text{I.22})$$

×等效皮肤剂量系数 (希沃特·立方米/ (贝可·秒))

$$= 10^{14} \times 8 \times 10^{-3} \times 1.32 \times 10^{-14}$$

$$= 10.6 \text{ 毫希沃特}$$

- (c) 该数值低于第 I.9 (b) 段所述事故工况下个别器官接受的当量剂量或承诺当量剂量的标准。并且低于每年 500 毫希沃特的当量皮肤剂量限值。
- (d) 距离货包 15 米也已考虑，该距离意味着稀释系数比 100 米时少 17 倍。因此，等效皮肤剂量为 180 毫希沃特。该数值仍然低于事故工况下单独器官 500 毫希沃特的等效皮肤剂量限值。
- (e) 然后得出结论，目前  $10A_2$ /周的监管标准不会导致超过皮肤剂量限值。

## Q 值制表

I.75. 根据本附录描述的模式确定的 Q 值的完整清单在本“安全导则”表 I.2 给出。还包括相应的特殊形状和非特殊形状放射性物质的 A 型货包  $A_1$  和  $A_2$  内容物限值。本“安全导则”表 I.2 所示的 Q 值已四舍五入为两个有效数字， $A_1$  和  $A_2$  值已四舍五入为一个有效数字，在后一种情况下，也适用了任意的 40 太贝可的截止量。

I.76. 一般说来，新的值是早期值的三倍，有少数放射性核素的新的  $A_1$  和  $A_2$  值在该范围之外。几十种放射性核素的新的  $A_1$  值比以前的值高出 10 至 100 倍。这主要是由于改进了  $\beta$  发射体模式。没有新的  $A_1$  或  $A_2$  值比以前的数字低 10 倍以上。以前列出的几种放射性核素现在被排除，但增加了异构体，即铈-150 和镆-236 的异构体。

## 物理化学特性的考虑

I.77. 另一个因素是，是否有必要对物质施加额外的限制，这些物质的物理特性可能会使在推导 Q 值时所作的假设无效。这些考虑与在火灾中可能发生的高温下可能变得易挥发的物质或以非常细的粉末运输的物质相关，尤其是用于评价  $Q_c$  值的模式。然而，总的来说，人们认为只有在最极端的情况下才会超过假想  $10^{-6}$  的摄入系数，并且对这些物质没有必要对  $Q_c$  模式进行特别修订。

I.78. 与“运输条例”（1985 年版）的情况一样，没有考虑放射性核素的化学形状或化学性质。然而，在测定  $Q_c$  值时，使用了 GSR Part 3[I.9]推荐最严格的剂量系数。

## 多重照射途径

I.79. 根据“运输条例”（1985年版），Q系统的应用分别处理每个Q值的推导，以及每个潜在的照射途径。一般来说，这将导致符合先前定义的剂量标准，前提是暴露在受损货包附近人员所产生的剂量由一种途径控制。然而，如果两个或多个Q值彼此接近，则不一定如此。例如，对于作为 $Q_A \approx Q_B$ 的特殊形状放射性物质运输的放射性核素，根据Q系统模式，暴露人员的有效剂量和当量皮肤剂量可分别接近50毫希沃特和0.5希沃特。对本“安全导则”表I.2的评审表明，该考虑只适用于相对较少数量的放射性核素，因此，在Q系统中保留了对照射途径的独立处理。

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$  和  $A_2$

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铯-225  | a                     | $4.9 \times 10^{+00}$  | $8.5 \times 10^{-01}$ | $6.3 \times 10^{-03}$ | $3.0 \times 10^{-01}$  | $8 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-03}$ |
| 铯-227  |                       | $9.3 \times 10^{-01}$  | $1.3 \times 10^{+02}$ | $9.3 \times 10^{-05}$ | $3.7 \times 10^{+01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $9 \times 10^{-05}$ |
| 铯-228  |                       | $1.2 \times 10^{+00}$  | $5.6 \times 10^{-01}$ | $2.0 \times 10^{+00}$ | $5.2 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 银-105  |                       | $2.0 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.3 \times 10^{+01}$ | $2.5 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{-00}$ |
| 银-108m |                       | $6.5 \times 10^{-01}$  | $5.9 \times 10^{+00}$ | $1.4 \times 10^{+00}$ | $6.0 \times 10^{+00}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 银-110m |                       | $4.2 \times 10^{-01}$  | $1.9 \times 10^{+01}$ | $4.2 \times 10^{+00}$ | $2.1 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 银-111  |                       | $4.1 \times 10^{-01}$  | $1.9 \times 10^{+00}$ | $2.9 \times 10^{+01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铝-26   |                       | $4.3 \times 10^{-01}$  | $1.4 \times 10^{-01}$ | $2.8 \times 10^{+00}$ | $7.1 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{-01}$ |
| 镅-241  | a                     | $1.3 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.3 \times 10^{-03}$ | $3.8 \times 10^{+02}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 镅-242m | a                     | $1.4 \times 10^{+01}$  | $5.0 \times 10^{+01}$ | $1.4 \times 10^{-03}$ | $8.4 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 镅-243  |                       | $5.0 \times 10^{+00}$  | $2.6 \times 10^{+02}$ | $1.3 \times 10^{-03}$ | $4.1 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{-03}$ |

表I.2. A型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和 $A_2$  (续)

| 放射性核素 | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 氚-37  |                       | $1.0 \times 10^{+3}$   | $1.0 \times 10^{+3}$  | —                     | $1.0 \times 10^{+3}$   | $4 \times 10^{+1}$  | $4 \times 10^{+1}$  |
| 氚-39  |                       | —                      | $7.3 \times 10^{+1}$  | —                     | $1.8 \times 10^{+1}$   | $4 \times 10^{+1}$  | $2 \times 10^{+1}$  |
| 氚-41  |                       | $8.8 \times 10^{-1}$   | $3.1 \times 10^{-1}$  | —                     | $3.1 \times 10^{-1}$   | $3 \times 10^{-1}$  | $3 \times 10^{-1}$  |
| 砷-72  |                       | $6.1 \times 10^{-1}$   | $2.8 \times 10^{-1}$  | $5.4 \times 10^{+1}$  | $6.5 \times 10^{-1}$   | $3 \times 10^{-1}$  | $3 \times 10^{-1}$  |
| 砷-73  |                       | $9.5 \times 10^{+1}$   | $1.0 \times 10^{+3}$  | $5.4 \times 10^{+1}$  | $1.0 \times 10^{+3}$   | $4 \times 10^{+1}$  | $4 \times 10^{+1}$  |
| 砷-74  |                       | $1.4 \times 10^{+00}$  | $1.7 \times 10^{+00}$ | $2.4 \times 10^{+1}$  | $9.4 \times 10^{-1}$   | $1 \times 10^{+00}$ | $9 \times 10^{-1}$  |
| 砷-76  |                       | $2.5 \times 10^{+00}$  | $2.5 \times 10^{-1}$  | $6.8 \times 10^{+1}$  | $5.9 \times 10^{-1}$   | $3 \times 10^{-1}$  | $3 \times 10^{-1}$  |
| 砷-77  |                       | $1.3 \times 10^{+02}$  | $1.8 \times 10^{-1}$  | $1.3 \times 10^{+02}$ | $6.5 \times 10^{-1}$   | $2 \times 10^{+1}$  | $7 \times 10^{-1}$  |
| 碲-211 |                       | $2.5 \times 10^{+1}$   | $1.0 \times 10^{+3}$  | $5.1 \times 10^{-1}$  | $4.4 \times 10^{+2}$   | $2 \times 10^{+1}$  | $5 \times 10^{-1}$  |
| 金-193 |                       | $7.0 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+3}$  | $4.2 \times 10^{+2}$  | $1.8 \times 10^{+00}$  | $7 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 金-194 |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+3}$  | $2.0 \times 10^{+2}$  | $6.1 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 金-195 |                       | $1.3 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+3}$  | $3.1 \times 10^{+1}$  | $5.5 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+1}$  | $6 \times 10^{+00}$ |
| 金-198 |                       | $2.6 \times 10^{+00}$  | $1.1 \times 10^{+00}$ | $6.0 \times 10^{+1}$  | $6.1 \times 10^{-1}$   | $1 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-1}$  |
| 金-199 |                       | $1.4 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+3}$  | $6.7 \times 10^{+1}$  | $6.4 \times 10^{-1}$   | $1 \times 10^{+1}$  | $6 \times 10^{-1}$  |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a-代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钋-131  |                       | $1.6 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.9 \times 10^{+02}$ | $2.2 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 钋-133  |                       | $2.6 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 钋-133m |                       | $1.5 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.6 \times 10^{+02}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钋-135m |                       | $1.6 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+02}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钋-140  |                       | $6.3 \times 10^{-01}$  | $4.5 \times 10^{-01}$ | $2.4 \times 10^{-01}$ | $3.1 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 铍-7    |                       | $2.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.4 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+01}$ |
| 铍-10   |                       | —                      | $5.8 \times 10^{+01}$ | $1.5 \times 10^{+00}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铋-205  |                       | $6.9 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.4 \times 10^{+01}$ | $1.1 \times 10^{+01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 铋-206  |                       | $3.4 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.9 \times 10^{+01}$ | $1.1 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 铋-207  |                       | $7.1 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.4 \times 10^{+00}$ | $5.0 \times 10^{+00}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 铋-210  |                       | —                      | $1.3 \times 10^{+00}$ | $6.0 \times 10^{-01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铋-210m |                       | $4.3 \times 10^{+00}$  | $6.2 \times 10^{-01}$ | $1.6 \times 10^{-02}$ | $4.9 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 铋-212  |                       | $1.0 \times 10^{+00}$  | $6.5 \times 10^{-01}$ | $1.7 \times 10^{+00}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 镭-247  | a                     | $7.7 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.7 \times 10^{-04}$ | $1.4 \times 10^{+00}$  | $8 \times 10^{+00}$ | $8 \times 10^{-04}$ |
| 镭-249  |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{-01}$ | $1.2 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 溴-76   |                       | $4.4 \times 10^{+01}$  | $6.3 \times 10^{-01}$ | $1.2 \times 10^{+02}$ | $9.9 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 溴-77   |                       | $3.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.7 \times 10^{+02}$ | $2.3 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 溴-82   |                       | $4.1 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.8 \times 10^{+01}$ | $7.7 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 碳-11   |                       | $1.0 \times 10^{+00}$  | $2.0 \times 10^{+00}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 碳-14   |                       | —                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | $8.6 \times 10^{+01}$ | $3.2 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 钙-41   |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 钙-45   |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.9 \times 10^{+01}$ | $1.2 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 钙-47   |                       | $2.7 \times 10^{+00}$  | $3.7 \times 10^{+01}$ | $2.0 \times 10^{+01}$ | $3.3 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 镅-109  |                       | $2.9 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.2 \times 10^{+00}$ | $1.9 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 镅-113m |                       | —                      | $9.1 \times 10^{-01}$ | $4.5 \times 10^{-01}$ | $6.9 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 镅-115  |                       | $3.9 \times 10^{+00}$  | $3.3 \times 10^{+00}$ | $4.3 \times 10^{+01}$ | $3.9 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 镅-115m |                       | $5.0 \times 10^{+01}$  | $5.2 \times 10^{-01}$ | $6.8 \times 10^{+00}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 铈-139  |                       | $6.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.8 \times 10^{+01}$ | $2.2 \times 10^{+00}$  | $7 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 铈-141  |                       | $1.6 \times 10^{+01}$  | $3.2 \times 10^{+02}$ | $1.4 \times 10^{+01}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铈-143  |                       | $3.7 \times 10^{+00}$  | $8.9 \times 10^{-01}$ | $6.2 \times 10^{+01}$ | $6.0 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素 | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铯-144 |                       | $2.2 \times 10^{+01}$  | $2.5 \times 10^{-01}$ | $1.0 \times 10^{+00}$ | $3.8 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 镭-248 | a                     | $6.1 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $6.1 \times 10^{-03}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-03}$ |
| 镭-249 |                       | $3.2 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $7.6 \times 10^{-04}$ | $4.6 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $8 \times 10^{-04}$ |
| 镭-250 | a                     | $1.6 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.6 \times 10^{-03}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-03}$ |
| 镭-251 | a                     | $7.5 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $7.5 \times 10^{-04}$ | $5.2 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-00}$ | $7 \times 10^{-04}$ |
| 镭-252 |                       | $1.3 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $2.8 \times 10^{-03}$ | $5.2 \times 10^{-02}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-03}$ |
| 镭-253 | a                     | $4.2 \times 10^{-02}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $4.2 \times 10^{-02}$ | $1.2 \times 10^{-00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-02}$ |
| 镭-254 |                       | $1.4 \times 10^{-03}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.4 \times 10^{-03}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $1 \times 10^{-03}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 氯-36  |                       | $1.0 \times 10^{-03}$  | $1.0 \times 10^{-01}$ | $7.2 \times 10^{+00}$ | $6.3 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 氯-38  |                       | $8.1 \times 10^{-01}$  | $2.2 \times 10^{-01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.6 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 镭-240 | a                     | $1.7 \times 10^{-02}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.7 \times 10^{-02}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 镭-241 |                       | $2.2 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.3 \times 10^{+00}$ | $1.5 \times 10^{-00}$  | $2 \times 10^{-00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 镭-242 | a                     | $1.0 \times 10^{-02}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.0 \times 10^{-02}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{-02}$ |
| 镭-243 |                       | $8.6 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.3 \times 10^{-03}$ | $8.3 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-00}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 镭-244 | a                     | $1.6 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.6 \times 10^{-03}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-03}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素 | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铜-245 | a                     | $9.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.1 \times 10^{-04}$ | $2.7 \times 10^{+00}$  | $9 \times 10^{+00}$ | $9 \times 10^{-04}$ |
| 铜-246 | a                     | $9.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.1 \times 10^{-04}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $9 \times 10^{+00}$ | $9 \times 10^{-04}$ |
| 铜-247 |                       | $3.2 \times 10^{+00}$  | $1.6 \times 10^{+02}$ | $9.8 \times 10^{-04}$ | 无限制                    | $3 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 铜-248 |                       | $1.8 \times 10^{-02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.5 \times 10^{-04}$ | 无限制                    | $2 \times 10^{-02}$ | $3 \times 10^{-04}$ |
| 钴-55  |                       | $5.4 \times 10^{-01}$  | $9.7 \times 10^{-01}$ | $9.1 \times 10^{+01}$ | $7.7 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 钴-56  |                       | $3.3 \times 10^{-01}$  | $1.5 \times 10^{+01}$ | $7.8 \times 10^{+00}$ | $2.9 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 钴-57  |                       | $1.0 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.3 \times 10^{+01}$ | $1.3 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{-01}$ |
| 钴-58  |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $7.8 \times 10^{+02}$ | $2.5 \times 10^{+01}$ | $3.8 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 钴-58m |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 钴-60  |                       | $4.5 \times 10^{-01}$  | $7.3 \times 10^{+02}$ | $1.7 \times 10^{+00}$ | $9.7 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 铬-51  |                       | $3.4 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 铈-129 |                       | $3.6 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.7 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{+00}$ | $4 \times 10^{+00}$ |
| 铈-131 |                       | $3.1 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 铈-132 |                       | $1.5 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.1 \times 10^{+02}$ | $2.5 \times 10^{+01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铈-134 |                       | $6.9 \times 10^{-01}$  | $3.6 \times 10^{+00}$ | $7.4 \times 10^{+00}$ | $9.2 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铯-134m |                       | $3.7 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.3 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铯-135  |                       | —                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | $1.5 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铯-136  |                       | $5.1 \times 10^{-01}$  | $8.3 \times 10^{+02}$ | $3.8 \times 10^{+01}$ | $7.0 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 铯-137  |                       | $1.8 \times 10^{+00}$  | $8.2 \times 10^{+00}$ | $1.0 \times 10^{+01}$ | $6.3 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铜-64   |                       | $5.6 \times 10^{-00}$  | $1.1 \times 10^{+02}$ | $4.2 \times 10^{+02}$ | $1.1 \times 10^{-00}$  | $6 \times 10^{-00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铜-67   |                       | $1.0 \times 10^{+01}$  | $4.1 \times 10^{+02}$ | $8.6 \times 10^{+01}$ | $6.9 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 镅-159  |                       | $2.0 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.4 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{+01}$ |
| 镅-165  |                       | $4.1 \times 10^{-01}$  | $9.4 \times 10^{-01}$ | $8.2 \times 10^{+02}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 镅-166  |                       | $3.4 \times 10^{-01}$  | $8.6 \times 10^{-01}$ | $2.0 \times 10^{+01}$ | $3.4 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 铈-169  |                       | $1.0 \times 10^{-03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.1 \times 10^{+01}$ | $9.5 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铈-171  |                       | $2.9 \times 10^{-00}$  | $8.3 \times 10^{-01}$ | $2.3 \times 10^{+02}$ | $5.1 \times 10^{-01}$  | $8 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 钍-147  |                       | $2.2 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.0 \times 10^{+01}$ | $3.8 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 钍-148  |                       | $5.1 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.9 \times 10^{+01}$ | $1.9 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 钍-149  |                       | $1.5 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.9 \times 10^{+02}$ | $7.4 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+01}$ |
| 钍-150  |                       | $7.2 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+00}$ | $7.1 \times 10^{+00}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a-代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钍-150m |                       | $2.3 \times 10^{+01}$  | $1.5 \times 10^{+00}$ | $2.6 \times 10^{+02}$ | $6.9 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 钍-152  |                       | $9.6 \times 10^{-01}$  | $1.7 \times 10^{+02}$ | $1.3 \times 10^{+00}$ | $1.3 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 钍-152m |                       | $3.7 \times 10^{+00}$  | $8.1 \times 10^{-01}$ | $2.3 \times 10^{+02}$ | $7.8 \times 10^{-01}$  | $8 \times 10^{-01}$ | $8 \times 10^{-01}$ |
| 钍-154  |                       | $9.0 \times 10^{-01}$  | $1.6 \times 10^{+00}$ | $1.0 \times 10^{+00}$ | $5.5 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钍-155  |                       | $1.9 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.7 \times 10^{+00}$ | $3.2 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 钍-156  |                       | $8.8 \times 10^{-01}$  | $7.4 \times 10^{-01}$ | $1.5 \times 10^{+01}$ | $6.7 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 氟-18   |                       | $1.0 \times 10^{+00}$  | $2.8 \times 10^{+01}$ | $8.3 \times 10^{+02}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铁-52   |                       | $4.1 \times 10^{-01}$  | $3.2 \times 10^{-01}$ | $7.6 \times 10^{+01}$ | $3.7 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 铁-55   |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.5 \times 10^{-01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 铁-59   |                       | $9.4 \times 10^{-01}$  | $4.4 \times 10^{+01}$ | $1.4 \times 10^{+01}$ | $8.9 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $9 \times 10^{-01}$ |
| 铁-60   |                       | $2.0 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.1 \times 10^{-01}$ | $3.7 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 镓-67   |                       | $7.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.2 \times 10^{+02}$ | $3.2 \times 10^{+00}$  | $7 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 镓-68   |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $4.6 \times 10^{-01}$ | $9.8 \times 10^{+02}$ | $6.6 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 镓-72   |                       | $4.3 \times 10^{-01}$  | $3.7 \times 10^{-01}$ | $9.1 \times 10^{+01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 钆-146  |                       | $5.3 \times 10^{-01}$  | $2.9 \times 10^{+02}$ | $7.3 \times 10^{+00}$ | $1.0 \times 10^{+00}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钐-148  | a                     | $2.0 \times 10^{+01}$  | —                     | $2.0 \times 10^{+03}$ | —                      | $2 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+03}$ |
| 钐-153  |                       | $9.5 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.4 \times 10^{+01}$ | $8.9 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $9 \times 10^{+00}$ |
| 钐-159  |                       | $2.1 \times 10^{+01}$  | $3.1 \times 10^{+00}$ | $1.9 \times 10^{+02}$ | $6.4 \times 10^{+01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{+01}$ |
| 铯-68   |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $4.6 \times 10^{+01}$ | $3.8 \times 10^{+00}$ | $6.6 \times 10^{+01}$  | $5 \times 10^{+01}$ | $5 \times 10^{+01}$ |
| 铯-69   |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $2.2 \times 10^{+00}$ | $1.6 \times 10^{+02}$ | $1.7 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铯-71   |                       | $5.2 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 铯-77   |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $3.3 \times 10^{+01}$ | $1.4 \times 10^{+02}$ | $6.0 \times 10^{+01}$  | $3 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{+01}$ |
| 钍-172  |                       | $5.8 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.5 \times 10^{+00}$ | $1.7 \times 10^{+00}$  | $6 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{+01}$ |
| 钍-175  |                       | $2.9 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.5 \times 10^{+01}$ | $4.7 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 钍-181  |                       | $1.9 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+01}$ | $5.0 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $5 \times 10^{+01}$ |
| 钍-182  |                       | $4.6 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 银-194  |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.3 \times 10^{+00}$ | $6.1 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 银-195m |                       | $3.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.3 \times 10^{+00}$ | $7.3 \times 10^{+01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $7 \times 10^{+01}$ |
| 银-197  |                       | $1.6 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+01}$ | $1.6 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{+01}$ |
| 银-197m |                       | $1.3 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $8.1 \times 10^{+00}$ | $3.5 \times 10^{+01}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 银-203  |                       | $4.6 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.7 \times 10^{+00}$ | $1.1 \times 10^{+00}$  | $5 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 钍-166  |                       | $3.8 \times 10^{-01}$  | $4.4 \times 10^{-01}$ | $7.6 \times 10^{+01}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 钍-166m |                       | $6.2 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.5 \times 10^{-01}$ | $1.3 \times 10^{+00}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 碘-123  |                       | $6.3 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.3 \times 10^{+02}$ | $2.9 \times 10^{+00}$  | $6 \times 10^{-00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 碘-124  |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $6.0 \times 10^{+00}$ | $3.8 \times 10^{+00}$ | $2.5 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 碘-125  |                       | $1.6 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+00}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 碘-126  |                       | $2.3 \times 10^{+00}$  | $6.4 \times 10^{+00}$ | $1.7 \times 10^{+00}$ | $1.3 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 碘-129  |                       | $2.9 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 碘-131  |                       | $2.8 \times 10^{-00}$  | $2.0 \times 10^{+01}$ | $2.3 \times 10^{+00}$ | $6.9 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-00}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 碘-132  |                       | $4.8 \times 10^{-01}$  | $4.4 \times 10^{-01}$ | $1.8 \times 10^{+02}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 碘-133  |                       | $1.8 \times 10^{-00}$  | $7.3 \times 10^{-01}$ | $1.1 \times 10^{+01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 碘-134  |                       | $4.2 \times 10^{-01}$  | $3.2 \times 10^{-01}$ | $6.9 \times 10^{+02}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 碘-135  |                       | $8.2 \times 10^{-01}$  | $6.2 \times 10^{-01}$ | $5.2 \times 10^{+01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铀-111  |                       | $2.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.2 \times 10^{+02}$ | $3.0 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 铀-113m |                       | $4.1 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.6 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铀-114m |                       | $1.1 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.4 \times 10^{+00}$ | $4.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 铀-115m |                       | $6.5 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $8.3 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{+00}$  | $7 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铀-189  |                       | $1.3 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.1 \times 10^{+01}$ | $1.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{+01}$ |
| 铀-190  |                       | $7.5 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.2 \times 10^{+01}$ | $7.5 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 铀-192  |                       | $1.3 \times 10^{+00}$  | $4.6 \times 10^{+01}$ | $8.1 \times 10^{+00}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铀-193m |                       | $7.7 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.8 \times 10^{+01}$ | $3.0 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{+00}$ |
| 铀-194  |                       | $1.2 \times 10^{-01}$  | $3.3 \times 10^{-01}$ | $8.9 \times 10^{+01}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 钾-40   |                       | $7.3 \times 10^{+00}$  | $9.4 \times 10^{-01}$ | 无限制                   | 无限制                    | $9 \times 10^{-01}$ | $9 \times 10^{-01}$ |
| 钾-42   |                       | $4.2 \times 10^{+00}$  | $2.2 \times 10^{-01}$ | $3.8 \times 10^{+02}$ | $5.7 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 钾-43   |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $7.3 \times 10^{-01}$ | $3.3 \times 10^{+02}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 氩-81   |                       | $1.1 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | —                     | $7.9 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 氩-85   |                       | $4.8 \times 10^{+02}$  | $1.4 \times 10^{+01}$ | —                     | $1.4 \times 10^{+01}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{+01}$ |
| 氩-85m  |                       | $7.5 \times 10^{+00}$  | $7.6 \times 10^{+00}$ | —                     | $2.8 \times 10^{+00}$  | $8 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 氩-87   |                       | $1.5 \times 10^{+00}$  | $2.1 \times 10^{-01}$ | —                     | $4.8 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 镭-137  |                       | $3.0 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.7 \times 10^{+00}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{+00}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$  和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铜-140  |                       | $4.9 \times 10^{-01}$  | $3.7 \times 10^{-01}$ | $4.5 \times 10^{-01}$ | $6.0 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 镭-172  |                       | $5.9 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+01}$ | $2.2 \times 10^{+00}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 镭-173  |                       | $8.0 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.2 \times 10^{+01}$ | $1.7 \times 10^{+01}$  | $8 \times 10^{-00}$ | $8 \times 10^{+00}$ |
| 镭-174  |                       | $8.5 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.3 \times 10^{+01}$ | $2.9 \times 10^{+01}$  | $9 \times 10^{-00}$ | $9 \times 10^{+00}$ |
| 镭-174m |                       | $1.6 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.3 \times 10^{+01}$ | $3.7 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{+01}$ |
| 镭-177  |                       | $3.3 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.2 \times 10^{+01}$ | $7.3 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 镁-28   |                       | $3.7 \times 10^{-01}$  | $2.5 \times 10^{-01}$ | $2.6 \times 10^{+01}$ | $3.2 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 锰-52   |                       | $3.2 \times 10^{-01}$  | $7.3 \times 10^{+02}$ | $3.6 \times 10^{+01}$ | $1.9 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 锰-53   |                       | $1.0 \times 10^{-03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 锰-54   |                       | $1.3 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1 \times 10^{-00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 锰-56   |                       | $6.7 \times 10^{-01}$  | $3.0 \times 10^{-01}$ | $3.8 \times 10^{+02}$ | $6.0 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 钼-93   |                       | $8.6 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.3 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{+01}$ |
| 钼-99   |                       | $6.2 \times 10^{-00}$  | $1.3 \times 10^{+00}$ | $5.1 \times 10^{+01}$ | $5.5 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{-00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 氮-13   |                       | $1.0 \times 10^{+00}$  | $9.3 \times 10^{-01}$ | —                     | $5.8 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钠-22   |                       | $5.0 \times 10^{-01}$  | $3.8 \times 10^{+00}$ | $3.8 \times 10^{+01}$ | $6.5 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钠-24   |                       | $3.0 \times 10^{-01}$  | $2.0 \times 10^{-01}$ | $1.7 \times 10^{+02}$ | $6.0 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 铈-93m  |                       | $4.9 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.1 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{+01}$ |
| 铈-94   |                       | $6.8 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+00}$ | $7.0 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 铈-95   |                       | $1.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.1 \times 10^{+01}$ | $4.0 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铈-97   |                       | $1.6 \times 10^{+00}$  | $9.0 \times 10^{-01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铷-147  |                       | $7.4 \times 10^{+00}$  | $5.6 \times 10^{+00}$ | $2.2 \times 10^{+01}$ | $6.5 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铷-149  |                       | $2.9 \times 10^{+00}$  | $6.3 \times 10^{-01}$ | $5.6 \times 10^{+02}$ | $5.1 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 镍-57   |                       | $5.9 \times 10^{-01}$  | $6.8 \times 10^{+00}$ | $8.9 \times 10^{+01}$ | $1.3 \times 10^{+00}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 镍-59   |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 镍-63   | —                     |                        | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.9 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{+01}$ |
| 镍-65   | $2.1 \times 10^{+00}$ |                        | $4.4 \times 10^{-01}$ | $5.7 \times 10^{+02}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 镓-235  | $1.4 \times 10^{+02}$ |                        | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.3 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 镓-236  | $8.7 \times 10^{+00}$ |                        | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.7 \times 10^{+02}$ | $5.0 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 镓-236m | $2.3 \times 10^{-01}$ |                        | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+01}$ | $1.5 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 镓-237  | $2.4 \times 10^{+01}$ | a                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.4 \times 10^{+03}$ | 无限制                    | $2 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{-03}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 镭-239  |                       | $6.7 \times 10^{+00}$  | $2.6 \times 10^{+02}$ | $5.6 \times 10^{+01}$ | $4.1 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{+00}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 钚-185  |                       | $1.5 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+01}$ | $2.3 \times 10^{+01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 钚-191  |                       | $1.5 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.8 \times 10^{+01}$ | $2.3 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 钚-191m |                       | $1.3 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+02}$ | $2.7 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{+01}$ |
| 钚-193  |                       | $1.5 \times 10^{+01}$  | $1.6 \times 10^{+00}$ | $9.8 \times 10^{+01}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钚-194  |                       | $1.2 \times 10^{+01}$  | $3.1 \times 10^{-01}$ | $6.3 \times 10^{-01}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 磷-32   | —                     | —                      | $4.5 \times 10^{-01}$ | $1.6 \times 10^{+01}$ | $6.0 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 磷-33   | —                     | —                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.6 \times 10^{+01}$ | $1.2 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 镉-230  |                       | $1.7 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.6 \times 10^{+02}$ | $2.1 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $7 \times 10^{-02}$ |
| 镉-231  | a                     | $3.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.8 \times 10^{-04}$ | $1.8 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{+00}$ | $4 \times 10^{-04}$ |
| 镉-233  |                       | $5.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.4 \times 10^{+01}$ | $6.5 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{+00}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 铅-201  |                       | $1.5 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.7 \times 10^{+02}$ | $3.3 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铅-202  |                       | $9.0 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | $1.6 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+01}$ |
| 铅-203  |                       | $3.6 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.5 \times 10^{+02}$ | $2.6 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 铅-205  |                       | $8.3 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铅-210  |                       | $2.4 \times 10^{+02}$  | $1.3 \times 10^{+00}$ | $5.1 \times 10^{+02}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $5 \times 10^{-02}$ |
| 铅-212  |                       | $1.0 \times 10^{-00}$  | $7.0 \times 10^{-01}$ | $2.2 \times 10^{-01}$ | $2.7 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 钍-103  |                       | $4.7 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.2 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 钍-107  | —                     |                        | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 钍-109  |                       | $7.0 \times 10^{+01}$  | $1.9 \times 10^{+00}$ | $1.4 \times 10^{+02}$ | $4.7 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 钍-143  |                       | $3.3 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.6 \times 10^{+01}$ | $3.6 \times 10^{+02}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 钍-144  |                       | $6.7 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.4 \times 10^{+00}$ | $3.4 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 钍-145  |                       | $2.6 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.5 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{-03}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{+01}$ |
| 钍-147  |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+01}$ | $1.7 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 钍-148m |                       | $8.3 \times 10^{-01}$  | $7.6 \times 10^{+00}$ | $9.1 \times 10^{+00}$ | $7.2 \times 10^{-01}$  | $8 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 钍-149  |                       | $1.0 \times 10^{+02}$  | $1.7 \times 10^{+00}$ | $6.9 \times 10^{+01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钍-151  |                       | $3.3 \times 10^{+00}$  | $1.8 \times 10^{+00}$ | $1.1 \times 10^{+02}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钍-210  | a                     | $1.7 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.7 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 镭-142  |                       | $2.0 \times 10^{-01}$  | $3.6 \times 10^{-01}$ | $8.9 \times 10^{+01}$ | $6.0 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 镭-143  |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $3.0 \times 10^{+00}$ | $2.2 \times 10^{+01}$ | $6.3 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钚-188  |                       | $9.7 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.7 \times 10^{+01}$ | $7.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $8 \times 10^{-01}$ |
| 钚-191  |                       | $3.6 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.5 \times 10^{+02}$ | $3.5 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 钚-193  |                       | $8.7 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 钚-193m |                       | $9.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.8 \times 10^{+02}$ | $5.5 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 钚-195m |                       | $1.5 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.6 \times 10^{+02}$ | $4.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 钚-197  |                       | $4.7 \times 10^{+01}$  | $2.4 \times 10^{+01}$ | $5.5 \times 10^{+02}$ | $6.3 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钚-197m |                       | $1.3 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铀-236  | a                     | $2.8 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.8 \times 10^{+03}$ | $6.5 \times 10^{+02}$  | $3 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{-03}$ |
| 铀-237  |                       | $2.3 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.4 \times 10^{+02}$ | $1.2 \times 10^{+02}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+01}$ |
| 铀-238  | a                     | $1.2 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.2 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 铀-239  | a                     | $1.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+03}$ | 无限制                    | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 铀-240  | a                     | $1.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+03}$ | 无限制                    | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 铀-241  |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.9 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-02}$ |
| 铀-242  | a                     | $1.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+03}$ | 无限制                    | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 铀-244  |                       | $3.1 \times 10^{+00}$  | $3.8 \times 10^{-01}$ | $1.1 \times 10^{+03}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素   | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 镭-223   |                       | $3.9 \times 10^{+00}$  | $4.0 \times 10^{-01}$ | $7.2 \times 10^{+03}$ | $2.6 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-03}$ |
| 镭-224   |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $4.3 \times 10^{-01}$ | $1.6 \times 10^{+02}$ | $2.7 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 镭-225   |                       | $1.2 \times 10^{-01}$  | $2.2 \times 10^{-01}$ | $3.6 \times 10^{+03}$ | $2.3 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-03}$ |
| 镭-226   |                       | $6.5 \times 10^{-01}$  | $2.5 \times 10^{-01}$ | $2.7 \times 10^{+03}$ | $2.7 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-03}$ |
| 镭-228   |                       | $1.2 \times 10^{+00}$  | $5.6 \times 10^{-01}$ | $1.9 \times 10^{+02}$ | $5.2 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 铯-81    |                       | $1.7 \times 10^{+00}$  | $1.5 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $8.3 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $8 \times 10^{-01}$ |
| 铯-83    |                       | $2.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.9 \times 10^{+01}$ | $4.3 \times 10^{+02}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 铯-84    |                       | $1.2 \times 10^{+00}$  | $4.0 \times 10^{+01}$ | $4.5 \times 10^{+01}$ | $2.2 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铯-86    |                       | $1.2 \times 10^{+01}$  | $4.8 \times 10^{-01}$ | $5.2 \times 10^{+01}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $5 \times 10^{-01}$ |
| 铯-87    | —                     | —                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铯 (nat) | —                     | —                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铈-184   |                       | $1.2 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.8 \times 10^{+01}$ | $1.7 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铈-184m  |                       | $2.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $8.2 \times 10^{+00}$ | $1.2 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铈-186   |                       | $5.8 \times 10^{-01}$  | $2.0 \times 10^{+00}$ | $4.5 \times 10^{+01}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铈-187   | —                     | —                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |

表 I.2.A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ - $A_1$  和  $A_2$  (续)

| 放射性核素   | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铯-188   |                       | $2.0 \times 10^{+01}$  | $3.5 \times 10^{+01}$ | $9.1 \times 10^{+01}$ | $5.4 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 铯-189   |                       | $3.2 \times 10^{+01}$  | $2.5 \times 10^{+00}$ | $1.2 \times 10^{+02}$ | $5.7 \times 10^{+01}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{+01}$ |
| 铯 (nat) | —                     |                        | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铈-99    |                       | $1.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.0 \times 10^{+01}$ | $7.5 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 铈-101   |                       | $4.3 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.8 \times 10^{+00}$ | $2.6 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 铈-102   |                       | $5.0 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.1 \times 10^{+00}$ | $5.4 \times 10^{+01}$  | $5 \times 10^{+01}$ | $5 \times 10^{+01}$ |
| 铈-102m  |                       | $2.2 \times 10^{+00}$  | $8.9 \times 10^{+00}$ | $7.5 \times 10^{+00}$ | $1.8 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 铈-103m  |                       | $4.5 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 铈-105   |                       | $1.4 \times 10^{+01}$  | $1.8 \times 10^{+02}$ | $1.5 \times 10^{+02}$ | $7.9 \times 10^{+01}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $8 \times 10^{+01}$ |
| 钐-222   |                       | $6.7 \times 10^{+01}$  | $2.6 \times 10^{+01}$ | —                     | $4.2 \times 10^{+03}$  | $3 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+03}$ |
| 钐-97    |                       | $4.7 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.5 \times 10^{+02}$ | $1.3 \times 10^{+01}$  | $5 \times 10^{+00}$ | $5 \times 10^{+00}$ |
| 钐-103   |                       | $2.2 \times 10^{+00}$  | $2.0 \times 10^{+02}$ | $1.8 \times 10^{+01}$ | $1.6 \times 10^{+00}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 钐-105   |                       | $1.4 \times 10^{+00}$  | $1.2 \times 10^{+00}$ | $2.8 \times 10^{+02}$ | $6.1 \times 10^{+01}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{+01}$ |
| 钐-106   |                       | $5.3 \times 10^{+00}$  | $2.2 \times 10^{+01}$ | $8.1 \times 10^{+01}$ | $5.7 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+01}$ |
| 硫-35    | —                     |                        | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.8 \times 10^{+01}$ | $3.0 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{+00}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值: Q<sub>A</sub>-Q<sub>F</sub>, A<sub>1</sub>和 A<sub>2</sub> (续)

| 放射性核素 | a—代替 Q <sub>A</sub> 的 Q <sub>F</sub> 制表 | Q <sub>A</sub> 或 Q <sub>F</sub><br>(太贝可) | Q <sub>B</sub><br>(太贝可) | Q <sub>C</sub><br>(太贝可) | Q <sub>D</sub> 或 Q <sub>E</sub><br>(太贝可) | A <sub>1</sub><br>(太贝可) | A <sub>2</sub><br>(太贝可) |
|-------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 镭-122 |                                         | 2.4 × 10 <sup>+00</sup>                  | 4.3 × 10 <sup>-01</sup> | 5.0 × 10 <sup>+01</sup> | 6.2 × 10 <sup>-01</sup>                  | 4 × 10 <sup>-01</sup>   | 4 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 镭-124 |                                         | 6.2 × 10 <sup>-01</sup>                  | 7.2 × 10 <sup>-01</sup> | 8.2 × 10 <sup>+00</sup> | 6.9 × 10 <sup>-01</sup>                  | 6 × 10 <sup>-01</sup>   | 6 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 镭-125 |                                         | 2.4 × 10 <sup>+00</sup>                  | 2.5 × 10 <sup>+02</sup> | 1.1 × 10 <sup>+01</sup> | 1.4 × 10 <sup>+00</sup>                  | 2 × 10 <sup>+00</sup>   | 1 × 10 <sup>+00</sup>   |
| 镭-126 |                                         | 3.8 × 10 <sup>-01</sup>                  | 1.3 × 10 <sup>+00</sup> | 1.8 × 10 <sup>+01</sup> | 7.1 × 10 <sup>-01</sup>                  | 4 × 10 <sup>-01</sup>   | 4 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 钍-44  |                                         | 5.1 × 10 <sup>-01</sup>                  | 6.1 × 10 <sup>-01</sup> | 2.6 × 10 <sup>+02</sup> | 6.2 × 10 <sup>-01</sup>                  | 5 × 10 <sup>-01</sup>   | 5 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 钍-46  |                                         | 5.4 × 10 <sup>-01</sup>                  | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 7.8 × 10 <sup>+00</sup> | 8.5 × 10 <sup>-01</sup>                  | 5 × 10 <sup>-01</sup>   | 5 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 钍-47  |                                         | 1.1 × 10 <sup>+01</sup>                  | 1.7 × 10 <sup>+02</sup> | 7.1 × 10 <sup>+01</sup> | 7.0 × 10 <sup>-01</sup>                  | 1 × 10 <sup>+01</sup>   | 7 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 钍-48  |                                         | 3.3 × 10 <sup>-01</sup>                  | 9.0 × 10 <sup>-01</sup> | 4.5 × 10 <sup>+01</sup> | 6.5 × 10 <sup>-01</sup>                  | 3 × 10 <sup>-01</sup>   | 3 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 钷-75  |                                         | 2.9 × 10 <sup>+00</sup>                  | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 3.6 × 10 <sup>+01</sup> | 1.0 × 10 <sup>+01</sup>                  | 3 × 10 <sup>+00</sup>   | 3 × 10 <sup>+00</sup>   |
| 钷-79  | —                                       | —                                        | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 1.7 × 10 <sup>+01</sup> | 2.3 × 10 <sup>+00</sup>                  | 4 × 10 <sup>+01</sup>   | 2 × 10 <sup>+00</sup>   |
| 铈-31  |                                         | 1.0 × 10 <sup>+03</sup>                  | 5.8 × 10 <sup>-01</sup> | 6.3 × 10 <sup>+02</sup> | 6.0 × 10 <sup>-01</sup>                  | 6 × 10 <sup>-01</sup>   | 6 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 铈-32  | —                                       | —                                        | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 4.5 × 10 <sup>-01</sup> | 1.6 × 10 <sup>+00</sup>                  | 4 × 10 <sup>+01</sup>   | 5 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 钐-145 |                                         | 1.3 × 10 <sup>+01</sup>                  | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 3.3 × 10 <sup>+01</sup> | 1.0 × 10 <sup>+03</sup>                  | 1 × 10 <sup>+01</sup>   | 1 × 10 <sup>+01</sup>   |
| 钐-147 |                                         | 5.6 × 10 <sup>+01</sup>                  | —                       | 无限制                     | —                                        | 无限制                     | 无限制                     |
| 钐-151 |                                         | 1.0 × 10 <sup>+03</sup>                  | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 1.4 × 10 <sup>-01</sup> | 1.0 × 10 <sup>+03</sup>                  | 4 × 10 <sup>+01</sup>   | 1 × 10 <sup>+01</sup>   |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$  和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钐-153  |                       | $1.7 \times 10^{-01}$  | $9.1 \times 10^{+00}$ | $8.2 \times 10^{+01}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 锡-113  |                       | $3.7 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.0 \times 10^{+01}$ | $1.6 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 锡-117m |                       | $7.1 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.2 \times 10^{+01}$ | $4.0 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{+00}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 锡-119m |                       | $6.2 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.5 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{+01}$ |
| 锡-121m |                       | $1.4 \times 10^{-02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.1 \times 10^{+01}$ | $8.5 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $9 \times 10^{-01}$ |
| 锡-123  |                       | $1.6 \times 10^{-02}$  | $7.5 \times 10^{-01}$ | $6.5 \times 10^{+00}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $8 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 锡-125  |                       | $3.6 \times 10^{-00}$  | $3.7 \times 10^{-01}$ | $1.7 \times 10^{+01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 锡-126  |                       | $6.6 \times 10^{-01}$  | $5.9 \times 10^{-01}$ | $1.9 \times 10^{+00}$ | $3.6 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 铟-82   |                       | $9.7 \times 10^{-01}$  | $2.4 \times 10^{-01}$ | $5.0 \times 10^{+00}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 铟-83   |                       | $1.3 \times 10^{-00}$  | $2.7 \times 10^{+00}$ | $1.4 \times 10^{+02}$ | $2.2 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 铟-85   |                       | $2.1 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.5 \times 10^{+01}$ | $8.5 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 铟-85m  |                       | $5.2 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.8 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 铟-87m  |                       | $3.3 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 铟-89   |                       | $1.0 \times 10^{-03}$  | $6.2 \times 10^{-01}$ | $6.7 \times 10^{+00}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 铟-90   |                       | $1.0 \times 10^{-03}$  | $3.2 \times 10^{-01}$ | $3.3 \times 10^{-01}$ | $3.1 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$  和  $A_2$  (续)

| 放射性核素   | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)        | $A_2$<br>(太贝可)        |
|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 铯-91    |                       | $1.5 \times 10^{+00}$  | $3.0 \times 10^{-01}$ | $1.2 \times 10^{+02}$ | $6.0 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$   | $3 \times 10^{-01}$   |
| 铯-92    |                       | $8.2 \times 10^{+00}$  | $1.1 \times 10^{+00}$ | $1.2 \times 10^{+02}$ | $3.1 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$   | $3 \times 10^{-01}$   |
| 氚 (H-3) |                       | —                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | —                      | $4 \times 10^{+01}$   | $4 \times 10^{+01}$   |
| 钪-178m  |                       | $1.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.2 \times 10^{+02}$ | $8.2 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$   | $8 \times 10^{-01}$   |
| 钪-179   |                       | $3.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.6 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $3 \times 10^{+01}$   | $3 \times 10^{+01}$   |
| 钪-182   |                       | $8.7 \times 10^{-01}$  | $1.3 \times 10^{+01}$ | $5.1 \times 10^{+00}$ | $5.4 \times 10^{-01}$  | $9 \times 10^{-01}$   | $5 \times 10^{-01}$   |
| 铀-149   |                       | $8.2 \times 10^{-01}$  | $4.5 \times 10^{+01}$ | $1.2 \times 10^{+01}$ | $2.2 \times 10^{+00}$  | $8.0 \times 10^{-01}$ | $8.0 \times 10^{-01}$ |
| 铀-157   |                       | $3.1 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.2 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$   | $4 \times 10^{+01}$   |
| 铀-158   |                       | $1.4 \times 10^{+00}$  | $1.6 \times 10^{+02}$ | $1.1 \times 10^{+00}$ | $1.8 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+00}$   | $1 \times 10^{+00}$   |
| 铀-160   |                       | $9.8 \times 10^{-01}$  | $2.3 \times 10^{+00}$ | $7.6 \times 10^{+00}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{+00}$   | $6 \times 10^{-01}$   |
| 铀-161   |                       | $2.5 \times 10^{+01}$  | $2.4 \times 10^{+02}$ | $4.2 \times 10^{+01}$ | $7.1 \times 10^{-01}$  | $3.0 \times 10^{+01}$ | $7.0 \times 10^{-01}$ |
| 钨-95m   |                       | $1.5 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.7 \times 10^{+01}$ | $1.2 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+00}$   | $2 \times 10^{+00}$   |
| 钨-96    |                       | $4.3 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.0 \times 10^{+01}$ | $1.4 \times 10^{+02}$  | $4 \times 10^{-01}$   | $4 \times 10^{-01}$   |
| 钨-96m   |                       | $4.3 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.1 \times 10^{+01}$ | $1.4 \times 10^{+02}$  | $4 \times 10^{-01}$   | $4 \times 10^{-01}$   |
| 钨-97    |                       | $7.6 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                   | 无限制                   |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钨-97m  |                       | $8.6 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.6 \times 10^{+01}$ | $1.4 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 钨-98   |                       | $7.5 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | $6.8 \times 10^{+01}$  | $8 \times 10^{+01}$ | $7 \times 10^{+01}$ |
| 钨-99   |                       | -                      | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | $8.8 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $9 \times 10^{+01}$ |
| 钨-99m  |                       | $9.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.3 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+00}$ |
| 碲-121  |                       | $1.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.3 \times 10^{+02}$ | $1.0 \times 10^{+02}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 碲-121m |                       | $5.1 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.2 \times 10^{+01}$ | $2.5 \times 10^{+00}$  | $5 \times 10^{+00}$ | $3 \times 10^{+00}$ |
| 碲-123m |                       | $7.7 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.3 \times 10^{+01}$ | $1.2 \times 10^{+00}$  | $8 \times 10^{+00}$ | $1 \times 10^{+00}$ |
| 碲-125m |                       | $2.0 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.5 \times 10^{+01}$ | $9.1 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $9 \times 10^{+01}$ |
| 碲-127  |                       | $2.2 \times 10^{+02}$  | $1.9 \times 10^{+01}$ | $4.2 \times 10^{+02}$ | $6.6 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $7 \times 10^{+01}$ |
| 碲-127m |                       | $5.0 \times 10^{+01}$  | $1.9 \times 10^{+01}$ | $6.8 \times 10^{+00}$ | $5.0 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+01}$ | $5 \times 10^{+01}$ |
| 碲-129  |                       | $1.7 \times 10^{+01}$  | $6.6 \times 10^{+01}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.1 \times 10^{+01}$  | $7 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{+01}$ |
| 碲-129m |                       | $1.3 \times 10^{+01}$  | $8.5 \times 10^{+01}$ | $7.9 \times 10^{+00}$ | $4.4 \times 10^{+01}$  | $8 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 碲-131m |                       | $7.5 \times 10^{+01}$  | $1.2 \times 10^{+00}$ | $4.5 \times 10^{+01}$ | $4.9 \times 10^{+01}$  | $7 \times 10^{+01}$ | $5 \times 10^{+01}$ |
| 碲-132  |                       | $4.9 \times 10^{+01}$  | $4.9 \times 10^{+01}$ | $2.0 \times 10^{+01}$ | $4.2 \times 10^{+01}$  | $5 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 钷-22   |                       | $1.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.2 \times 10^{+03}$ | $4.7 \times 10^{+00}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $5 \times 10^{+03}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素   | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钚-228   |                       | $7.6 \times 10^{-01}$  | $5.3 \times 10^{-01}$ | $1.2 \times 10^{-03}$ | $2.7 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 钚-229   | a                     | $5.1 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.1 \times 10^{-04}$ | $1.8 \times 10^{-00}$  | $5 \times 10^{-00}$ | $5 \times 10^{-04}$ |
| 钚-230   | a                     | $1.2 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.2 \times 10^{-03}$ | 无限制                    | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 钚-231   |                       | $3.9 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.6 \times 10^{-02}$ | $1.2 \times 10^{-00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 钚-232   |                       | $1.2 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 钚-234   |                       | $4.2 \times 10^{-01}$  | $3.0 \times 10^{-01}$ | $6.8 \times 10^{+00}$ | $4.9 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 钚 (nat) |                       | $4.7 \times 10^{-01}$  | $2.7 \times 10^{-01}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 钍-44    |                       | $4.8 \times 10^{-01}$  | $6.1 \times 10^{-01}$ | $4.2 \times 10^{-01}$ | $6.2 \times 10^{-01}$  | $5 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 铀-200   |                       | $8.5 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.6 \times 10^{+02}$ | $7.1 \times 10^{+00}$  | $9 \times 10^{-01}$ | $9 \times 10^{-01}$ |
| 铀-201   |                       | $1.2 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.0 \times 10^{-00}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{+00}$ |
| 铀-202   |                       | $2.3 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $2.5 \times 10^{+02}$ | $1.6 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{+00}$ |
| 铀-204   |                       | $9.9 \times 10^{-02}$  | $9.6 \times 10^{+00}$ | $1.1 \times 10^{+02}$ | $6.9 \times 10^{-01}$  | $1 \times 10^{-01}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 钚-167   |                       | $7.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $4.5 \times 10^{+01}$ | $8.2 \times 10^{-01}$  | $7 \times 10^{+00}$ | $8 \times 10^{-01}$ |
| 钚-170   |                       | $2.0 \times 10^{-02}$  | $2.6 \times 10^{+00}$ | $7.6 \times 10^{-00}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-00}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钚-171   |                       | $1.0 \times 10^{-03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.8 \times 10^{-01}$ | $1.0 \times 10^{-02}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$  和  $A_2$  (续)

| 放射性核素     | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|-----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铀-230 (F) |                       | $5.2 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.4 \times 10^{-01}$ | $3.1 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-01}$ |
| 铀-230 (M) | a                     | $3.8 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.8 \times 10^{-03}$ | $3.1 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{-03}$ |
| 铀-230 (S) | a                     | $3.3 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.3 \times 10^{-03}$ | $3.1 \times 10^{+00}$  | $3 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{-03}$ |
| 铀-232 (F) | a                     | $1.4 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.4 \times 10^{-02}$ | $1.8 \times 10^{+02}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-02}$ |
| 铀-232 (M) | a                     | $7.1 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $7.1 \times 10^{-03}$ | $1.8 \times 10^{+02}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $7 \times 10^{-03}$ |
| 铀-232 (S) | a                     | $1.4 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.4 \times 10^{-03}$ | $1.8 \times 10^{+02}$  | $1 \times 10^{+01}$ | $1 \times 10^{-03}$ |
| 铀-233 (F) |                       | $8.0 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $8.8 \times 10^{-02}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $9 \times 10^{-02}$ |
| 铀-233 (M) | a                     | $1.6 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.6 \times 10^{-02}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 铀-233 (S) | a                     | $5.7 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.7 \times 10^{-03}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-03}$ |
| 铀-234 (F) |                       | $6.0 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $9.1 \times 10^{-02}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $9 \times 10^{-02}$ |
| 铀-234 (M) | a                     | $1.6 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.6 \times 10^{-02}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{-02}$ |
| 铀-234 (S) | a                     | $5.9 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.9 \times 10^{-03}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{-03}$ |
| 铀-235 (F) |                       | $6.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀-235 (M) |                       | $6.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀-235 (S) |                       | $6.4 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |

表 I.2.A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$  和  $A_2$  (续)

| 放射性核素      | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 铀-236 (F)  |                       | $6.6 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀-236 (M)  | a                     | $1.7 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.7 \times 10^{+02}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $2 \times 10^{+02}$ |
| 铀-236 (S)  | a                     | $6.3 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.3 \times 10^{+03}$ | 无限制                    | $4 \times 10^{+01}$ | $6 \times 10^{+03}$ |
| 铀-238 (F)  |                       | $7.5 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀-238 (M)  | a                     | $1.9 \times 10^{+02}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀-238 (S)  | a                     | $6.8 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀 (nat)    |                       | $6.4e^{01}$            | $1.3 \times 10^{+01}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀 (<20%浓缩) |                       | —                      | —                     | —                     | —                      | 无限制                 | 无限制                 |
| 铀 (贫化)     |                       | $4.7 \times 10^{+01}$  | $3.3 \times 10^{+01}$ | 无限制                   | 无限制                    | 无限制                 | 无限制                 |
| 钚-48       |                       | $3.8 \times 10^{+01}$  | $3.0 \times 10^{+00}$ | $2.2 \times 10^{+01}$ | $1.1 \times 10^{+00}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 钚-49       |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $4 \times 10^{+01}$ |
| 钨-178      |                       | $8.8 \times 10^{+00}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $6.4 \times 10^{+02}$ | $4.6 \times 10^{+00}$  | $9 \times 10^{+00}$ | $5 \times 10^{+00}$ |
| 钨-181      |                       | $2.6 \times 10^{+01}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $1.0 \times 10^{+03}$ | $5.3 \times 10^{+02}$  | $3 \times 10^{+01}$ | $3 \times 10^{+01}$ |
| 钨-185      |                       | $1.0 \times 10^{+03}$  | $1.0 \times 10^{+03}$ | $3.6 \times 10^{+02}$ | $8.1 \times 10^{+01}$  | $4 \times 10^{+01}$ | $8 \times 10^{+01}$ |
| 钨-187      |                       | $2.2 \times 10^{+00}$  | $2.1 \times 10^{+00}$ | $2.5 \times 10^{+02}$ | $6.2 \times 10^{+01}$  | $2 \times 10^{+00}$ | $6 \times 10^{+01}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值:  $Q_A$ - $Q_F$ ,  $A_1$ 和  $A_2$  (续)

| 放射性核素  | a—代替 $Q_A$ 的 $Q_F$ 制表 | $Q_A$ 或 $Q_F$<br>(太贝可) | $Q_B$<br>(太贝可)        | $Q_C$<br>(太贝可)        | $Q_D$ 或 $Q_E$<br>(太贝可) | $A_1$<br>(太贝可)      | $A_2$<br>(太贝可)      |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 钨-188  |                       | $2.0 \times 10^{-01}$  | $3.7 \times 10^{-01}$ | $4.4 \times 10^{-01}$ | $3.5 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 氙-122  |                       | $1.1 \times 10^{-00}$  | $4.0 \times 10^{-01}$ | —                     | $8.8 \times 10^{-00}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 氙-123  |                       | $1.8 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-01}$ | —                     | $6.8 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-00}$ | $7 \times 10^{-01}$ |
| 氙-127  |                       | $3.9 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | —                     | $1.7 \times 10^{-00}$  | $4 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{-00}$ |
| 氙-131m |                       | $3.8 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | —                     | $4.0 \times 10^{-01}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 氙-133  |                       | $2.1 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | —                     | $1.5 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $1 \times 10^{-01}$ |
| 氙-135  |                       | $4.5 \times 10^{-00}$  | $3.5 \times 10^{-00}$ | —                     | $1.8 \times 10^{-00}$  | $3 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{-00}$ |
| 钇-87   |                       | $1.4 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.2 \times 10^{-02}$ | $3.2 \times 10^{-00}$  | $1 \times 10^{-00}$ | $1 \times 10^{-00}$ |
| 钇-88   |                       | $4.3 \times 10^{-01}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.2 \times 10^{-01}$ | $2.2 \times 10^{-02}$  | $4 \times 10^{-01}$ | $4 \times 10^{-01}$ |
| 钇-90   |                       | $1.0 \times 10^{-03}$  | $3.2 \times 10^{-01}$ | $3.3 \times 10^{-01}$ | $5.9 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 钇-91   |                       | $3.1 \times 10^{-02}$  | $5.9 \times 10^{-01}$ | $6.0 \times 10^{-00}$ | $6.1 \times 10^{-01}$  | $6 \times 10^{-01}$ | $6 \times 10^{-01}$ |
| 钇-91m  |                       | $2.0 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.2 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-00}$ | $2 \times 10^{-00}$ |
| 钇-92   |                       | $4.4 \times 10^{-00}$  | $2.2 \times 10^{-01}$ | $2.5 \times 10^{-02}$ | $5.6 \times 10^{-01}$  | $2 \times 10^{-01}$ | $2 \times 10^{-01}$ |
| 钇-93   |                       | $1.3 \times 10^{-01}$  | $2.6 \times 10^{-01}$ | $1.2 \times 10^{-02}$ | $5.8 \times 10^{-01}$  | $3 \times 10^{-01}$ | $3 \times 10^{-01}$ |
| 铈-169  |                       | $3.5 \times 10^{-00}$  | $1.0 \times 10^{-03}$ | $1.8 \times 10^{-01}$ | $1.0 \times 10^{-00}$  | $4 \times 10^{-00}$ | $1 \times 10^{-00}$ |

表 I.2. A 型货包内容物限值: Q<sub>A</sub>-Q<sub>F</sub>, A<sub>1</sub>和 A<sub>2</sub> (续)

| 放射性核素 | a—代替 Q <sub>A</sub> 的 Q <sub>F</sub> 制表 | Q <sub>A</sub> 或 Q <sub>F</sub><br>(太贝可) | Q <sub>B</sub><br>(太贝可) | Q <sub>C</sub><br>(太贝可) | Q <sub>D</sub> 或 Q <sub>E</sub><br>(太贝可) | A <sub>1</sub><br>(太贝可) | A <sub>2</sub><br>(太贝可) |
|-------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 镱-175 |                                         | 2.7 × 10 <sup>+01</sup>                  | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 7.1 × 10 <sup>+01</sup> | 4.2 × 10 <sup>+01</sup>                  | 2 × 10 <sup>+00</sup>   | 2 × 10 <sup>+00</sup>   |
| 镅-69  |                                         | 1.0 × 10 <sup>+03</sup>                  | 3.2 × 10 <sup>+00</sup> | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 6.2 × 10 <sup>-01</sup>                  | 3 × 10 <sup>+00</sup>   | 6 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 镅-69m |                                         | 3.4 × 10 <sup>+00</sup>                  | 4.0 × 10 <sup>+00</sup> | 1.7 × 10 <sup>+02</sup> | 5.9 × 10 <sup>-01</sup>                  | 3 × 10 <sup>+00</sup>   | 6 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 镭-88  |                                         | 2.6 × 10 <sup>+00</sup>                  | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 1.4 × 10 <sup>+01</sup> | 2.1 × 10 <sup>+01</sup>                  | 3 × 10 <sup>+00</sup>   | 3 × 10 <sup>+00</sup>   |
| 镭-93  |                                         | —                                        | 1.0 × 10 <sup>+03</sup> | 无限制                     | 无限制                                      | 无限制                     | 无限制                     |
| 镭-95  |                                         | 1.8 × 10 <sup>+00</sup>                  | 4.5 × 10 <sup>+02</sup> | 9.1 × 10 <sup>+00</sup> | 8.5 × 10 <sup>-01</sup>                  | 2 × 10 <sup>+00</sup>   | 8 × 10 <sup>-01</sup>   |
| 镭-97  |                                         | 9.2 × 10 <sup>-01</sup>                  | 3.7 × 10 <sup>-01</sup> | 5.0 × 10 <sup>+01</sup> | 5.6 × 10 <sup>-01</sup>                  | 4 × 10 <sup>-01</sup>   | 4 × 10 <sup>-01</sup>   |

## 放射性核素的混合物

I.80. 有必要考虑放射性核素混合物的货包内容物限值，包括混合裂变产物的特殊情况。对于其特性和活度已知的混合物，有必要表明：

$$\sum_i \frac{B(i)}{A_1(i)} + \sum_j \frac{C(j)}{A_2(j)} \leq 1 \quad (I.23)$$

式中

$B(i)$  是放射性核素  $i$  作为特殊形状放射性物质的活度；

$A_1(i)$  是放射性核素  $i$  的  $A_1$  值；

$C(j)$  是放射性核素  $j$  作为非特殊形状放射性物质的活度；

$A_2(j)$  是放射性核素  $j$  的  $A_2$  值。

I.81. 或者，混合物的数值可按以下方式确定：

$$X_m \text{ for mixture} = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}} \quad (I.24)$$

式中

$f(i)$  是混合物中放射性核素  $i$  活度的分数；

$X(i)$  是放射性核素  $A_1$  或  $A_2$  的适当值；

$X_m$  是混合物  $A_1$  或  $A_2$  的推导值。

## Q 系统中的衰变链

I.82. “运输条例”表 2 脚注 (a) 列出了第 I.50—I.52 段所述在用 Q 系统确定  $A_1$  和  $A_2$  值时使用的各种衰变链。

## 结论

I.83. 这里描述的 Q 系统是对“运输条例”（1985 年版）用于确定 A 型货包内容物和其他限值的原始  $A_1/A_2$  系统的更新。它纳入了国际放射防护委

员会第 103 号出版物[I.8]的建议, 并通过明确确定得出这些限值所依据的剂量学考虑, 为“运输条例”提供了坚实和合理的基准。

I.84. Q 系统现在具有以下特点:

- (a) “运输条例”(1985 年版)使用的放射学标准和照射假设已经评审并保留;
- (b) 采用了国际放射防护委员会第 103 号出版物[I.8]有效剂量量;
- (c) 对来自光子和  $\beta$  粒子外部剂量的评价已经严格修订;
- (d) 目前对吸入摄入量的评价是根据有效剂量, 并以 GRS Part 3[I.9]剂量系数为基准。

不排除根据今后的发展情况进行进一步评审。

## 附录 I 参考文献

- [I.1] 国际原子能机构《放射性物质安全运输若干方面的国际研究, 1980—1985 年》, 国际原子能机构《技术文件》第 375 号, 国际原子能机构, 维也纳(1986 年)。
- [I.2] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., “放射性物质运输用 B 型货包允许放射性泄漏率的剂量测定特性”, 《辐射防护剂量学》第 2 期(1982 年)第 75 页。
- [I.3] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., “ $A_1/A_2$  系统的另一种方法—用于确定运输货包中的内容物限值和允许的放射性排放”, 《放射性物质包装和运输》第 80 期(国际研讨会论文集, 柏林, 1980 年), 联邦材料试验研究所, 柏林(1980 年)。
- [I.4] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., “根据国际原子能机构条例项下 A 型货包内容物的剂量测定限值”, 《辐射防护剂量学》第 2 期(1981 年)第 29—42 页。
- [I.5] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., “国际原子能机构放射性物质安全运输条例—同位素补充清单 A 型货包内容物限值的剂量学方面”, 《辐射防护剂量学》第 1 期(1981 年)第 199—202 页。

- [I.6] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., “关于国际原子能机构放射性物质安全运输条例某些放射性问题的评论”，《放射防护—理论和实践进展》（研讨会论文集，因弗内斯，1982 年），辐射防护学会，英国伯克利（1982 年）。
- [I.7] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., “国际原子能机构放射性物质安全运输条例：修订  $A_1$  和  $A_2$  值”，《放射性物质包装和运输》第 83 期（国际研讨会论文集，新奥尔良，1983 年），田纳西州橡树岭国家实验室（1983 年）。
- [I.8] 国际放射防护委员会《国际放射防护委员 2007 年建议书》，国际放射防护委员会第 103 号出版物，《国际放射防护委员会年刊》第 37 期第 2—4 页，（2007 年）。
- [I.9] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号，国际原子能机构，维也纳（2014 年）。
- [I.10] 国际原子能机构《国际原子能机构核安全和辐射防护安全术语》（2018 年版），国际原子能机构，维也纳（2019 年）。
- [I.11] 国际放射防护委员会《外照射放射防护量的转化系数》，国际放射防护委员会第 116 号出版物，《国际放射防护委员会年刊》第 40 期第 2—5 页（2010 年）。
- [I.12] 国际放射防护委员会《放射性核素的转换：发射的能量和强度》，第 38 号出版物，佩加蒙出版社，牛津和纽约（1984 年）。
- [I.13] 国际放射防护委员会《剂量学计算用核衰变数据》，国际放射防护委员会第 107 号出版物，《国际放射防护委员会年刊》第 38 期（2008 年）。
- [I.14] 国际放射防护委员会《外照射辐射防护中使用的数据》，国际放射防护委员会第 51 号出版物，培格曼出版社，牛津和纽约（1987 年）。

- [I.15] ECKERMAN, K.F., WESTFALL, R.J., RYMAN, J.C., CRISTY, M., “剂量研究组的核衰变数据文件”，第 ORNL/TM-12350 号报告，田纳西州橡树岭国家实验室（1993 年）。
- [I.16] CROSS, W.G., ING, H., FREEDMAN, N.O., WONG, P.J., “无限量水介质中  $\beta$  射线剂量分布表”，《保健物理》第 63 期（1992 年）。
- [I.17] CROSS, W.G., ING, H., FREEDMAN, N.O., MAINVILLE, J., “水、空气和其他介质中的  $\beta$  射线剂量分布表”，第 AECL-7617 号报告，加拿大原子能有限公司，安大略省白垩河（1982 年）。
- [I.18] 国际放射防护委员会《国际放射防护委员会建议书》，第 26 号出版物，佩加蒙出版社，牛津和纽约（1977 年）。
- [I.19] CROSS, W.G., ING, H., FREEDMAN, N.O., MAINVILLE, J., “水、空气和其他介质中  $\beta$  射线剂量分布表”，第 AECL-2793 号报告，加拿大原子能有限公司，安大略省白垩河（1967 年）。
- [I.20] BAILEY, M.R. BETA, “从点源和平面源计算  $\beta$  剂量率的计算机程序”，第 RD/B/N2763 号报告，中央电力局，伦敦（1973 年）。
- [I.21] 国际放射防护委员会《工作人员的放射性核素摄入量限值》，国际放射防护委员会第 30 号出版物第 1—3 部分，佩加蒙出版社，牛津和纽约（1980 年）。
- [I.22] LOHMANN, D.H., “放射性物质运输：放射性化学中心在运输过程中货包损坏的回顾”，《放射性物质包装和运输》第 80 期（国际研讨会论文集，柏林，1980 年），联邦材料试验研究所，柏林（1980 年）。
- [I.23] HADJANTONION, A., ARMIRIOTIS, J., ZANNOS, A., “A 型货包在空难和火灾条件下的性能”，同上。
- [I.24] TAYLOR, C.B.G., “粉碎和燃烧中的放射性同位素货包”，同上。
- [I.25] STEWART, K., “核能进展：大气中可能出现的放射性污染物的主要特征”，《核能进展》第 12 号《保健物理》第 2 卷，培格曼出版社，牛津和纽约（1969 年）。

- [I.26] WEHNER, G, “可报告事件在放射性物质的公众接受、包装和运输中的重要性”, 《放射性物质包装和运输》第 83 期 (国际会议论文集, 新奥尔良, 1983 年), 橡树岭国家实验室, 田纳西州 (1983 年)。
- [I.27] BRYANT, P.M., “风载材料分散度的估算方法和支持其应用的数据”, 英国原子能管理局报告 (RP) 第 R42 号报告, 英国原子能管理局, 英国伯克利 (1964 年)。
- [I.28] DUNSTER, H.J., “皮肤污染的最大允许水平”, 英国原子能管理局 (RP) 第 R78 号报告, 英国原子能管理局, 英国哈德维尔 (1967 年)。
- [I.29] CROSS, W.G., FREEDMAN, N.O., WONG, P.Y., “皮肤污染引起的  $\beta$  射线剂量分布”, 《辐射防护剂量学》第 403 期 (1992 年) 第 149—168 页。
- [I.30] 美国环境保护署《空气、水和土壤核素的外照射》, 《联邦导则报告》第 12 号, 环境保护署, 华盛顿特区 (1993 年)。
- [I.31] 国际放射防护委员会《外部源致电离辐射的防护数据: 国际放射防护委员会第 15 号出版物的补充报告》, 国际放射防护委员会第 21 号出版物, 培格曼出版社, 牛津和纽约 (1973 年)。
- [I.32] ECKERMAN, K.F., RAWL, R., HUGHES, J.S., BOLOGNA, L., “自发裂变放射性核素的 A 型货包限值”, 《放射性物质包装和运输》第 2001 期 (国际研讨会论文集, 芝加哥, 2001 年), 美国能源部, 华盛顿特区 (2001 年)。
- [I.33] 国际放射防护委员会《外照射放射防护用的剂量转换系数》, 国际放射防护委员会第 74 号出版物, 佩加蒙出版社, 牛津和纽约 (1996 年)。
- [I.34] FAIRBAIRN, A., MORLEY, F., KOLB, W., “运输用放射性核素的分类”, 《放射性物质安全运输》(GIBSON, R., 编), 培格曼出版社, 牛津和纽约 (1966 年) 第 44—46 页。

- [I.35] 美国试验与材料学会《铀-235 浓缩至低于 5%的六氟化铀标准规范》(ASTM C996-15), 美国试验与材料学会, 宾夕法尼亚州费城 (2015 年)。
- [I.36] MACDONALD, H.F., “辐照核燃料运输的放射性限值”, 第 TPRD/B/0388/N84 号报告, 中央电力局, 英国伯克利 (1984 年)。
- [I.37] MACDONALD, H.F., “辐照核燃料运输过程中产生的个人和集体剂量”, 《放射性物质包装和运输》第 80 期 (柏林国际研讨会, 1980 年), 德国联邦材料研究所, 柏林 (1980 年)。

## 附录 II

### 放射性核素的半衰期和比活度、放射性核素的 剂量和剂量率系数以及比活度

II.1. 本“安全导则”表 II.1 列出了使用当量计算的每种放射性核素的半衰期和比活度。如第 240.2 段公式 (2.1) 所示（见参考文献[II.1]）。如“运输条例”第 240 段指出，放射性核素的比活度是“该核素的单位质量活度”，而物质的比活度“应当指放射性核素基本均匀分布物质的单位质量活度”。表 II.1 所列的比活度值与放射性核素相关，而与物质无关。

II.2. 本“安全导则”表 II.2 提供了每种放射性核素的剂量和剂量率系数清单。

II.3. 本“安全导则”表 II.3 提供了各种浓缩水平铀的比活度。铀的这些数字包括铀-234 的活度，铀-234 是在浓缩过程中浓缩的。

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                          |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|------------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T <sub>1/2</sub> (年、天、小时、分钟) | T <sub>1/2</sub> (秒)   |                        |
| 铯-225  | 铯 (89) | 10 天                         | $8.640 \times 10^5$    | $2.150 \times 10^{15}$ |
| 铯-227  |        | 21.773 年                     | $6.866 \times 10^8$    | $2.682 \times 10^{12}$ |
| 铯-228  |        | 6.13 小时                      | $2.207 \times 10^4$    | $8.308 \times 10^{16}$ |
| 银-105  | 银 (47) | 41 天                         | $3.542 \times 10^6$    | $1.124 \times 10^{15}$ |
| 银-108m |        | 127 年                        | $4.005 \times 10^9$    | $9.664 \times 10^{11}$ |
| 银-110m |        | 249.9 天                      | $2.159 \times 10^7$    | $1.760 \times 10^{14}$ |
| 银-111  |        | 7.45 天                       | $6.437 \times 10^5$    | $5.850 \times 10^{15}$ |
| 铝-26   | 铝 (13) | $7.16 \times 10^5$ 年         | $2.258 \times 10^{13}$ | $7.120 \times 10^8$    |
| 镅-241  | 镅 (95) | 432.2 年                      | $1.363 \times 10^{10}$ | $1.273 \times 10^{11}$ |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期            |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|----------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟) | T½ (秒)                 |                        |
| 镅-242m |        | 152 年          | 4.793×10 <sup>9</sup>  | 3.603×10 <sup>11</sup> |
| 镅-243  |        | 7380 年         | 2.327×10 <sup>11</sup> | 7.391×10 <sup>9</sup>  |
| 氩-37   | 氩 (18) | 35.02 天        | 3.026×10 <sup>6</sup>  | 3.734×10 <sup>15</sup> |
| 氩-39   |        | 269年           | 8.483×10 <sup>9</sup>  | 1.263×10 <sup>12</sup> |
| 氩-41   |        | 1.827小时        | 6.577×10 <sup>3</sup>  | 1.550×10 <sup>18</sup> |
| 砷-72   | 砷 (33) | 26小时           | 9.360×10 <sup>4</sup>  | 6.203×10 <sup>16</sup> |
| 砷-73   |        | 80.3天          | 6.938×10 <sup>6</sup>  | 8.253×10 <sup>14</sup> |
| 砷-74   |        | 17.76天         | 1.534×10 <sup>6</sup>  | 3.681×10 <sup>15</sup> |
| 砷-76   |        | 26.32小时        | 9.475×10 <sup>4</sup>  | 5.805×10 <sup>16</sup> |
| 砷-77   |        | 38.8小时         | 1.397×10 <sup>5</sup>  | 3.886×10 <sup>16</sup> |
| 碲-211  | 碲 (85) | 7.214小时        | 2.597×10 <sup>4</sup>  | 7.628×10 <sup>16</sup> |
| 金-193  | 金 (79) | 17.65小时        | 6.354×10 <sup>4</sup>  | 3.409×10 <sup>16</sup> |
| 金-194  |        | 39.5小时         | 1.422×10 <sup>5</sup>  | 1.515×10 <sup>16</sup> |
| 金-195  |        | 183天           | 1.581×10 <sup>7</sup>  | 1.356×10 <sup>14</sup> |
| 金-198  |        | 2.696天         | 2.329×10 <sup>5</sup>  | 9.063×10 <sup>15</sup> |
| 金-199  |        | 3.139天         | 2.712×10 <sup>5</sup>  | 7.745×10 <sup>15</sup> |
| 钡-131  | 钡 (56) | 11.8天          | 1.020×10 <sup>6</sup>  | 3.130×10 <sup>15</sup> |
| 钡-133  |        | 10.74年         | 3.387×10 <sup>8</sup>  | 9.279×10 <sup>12</sup> |
| 钡-133m |        | 38.9小时         | 1.400×10 <sup>5</sup>  | 2.244×10 <sup>16</sup> |
| 钡-135m |        | 28.7小时         | 1.033×10 <sup>5</sup>  | 2.995×10 <sup>16</sup> |
| 钡-140  |        | 12.74天         | 1.101×10 <sup>6</sup>  | 2.712×10 <sup>15</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数    | 半衰期               |                      | 比活度<br>(贝可/克)        |
|--------|-----------|-------------------|----------------------|----------------------|
|        |           | T½ (年、天、小时、分钟)    | T½ (秒)               |                      |
| 铍-7    | 铍 (4)     | 53.3天             | $4.605\times10^6$    | $1.297\times10^{16}$ |
| 铍-10   |           | $1.6\times10^6$ 年 | $5.046\times10^{13}$ | $8.284\times10^8$    |
| 铋-205  | 铋 (83)    | 15.31天            | $1.323\times10^6$    | $1.541\times10^{15}$ |
| 铋-206  |           | 6.243天            | $5.394\times10^5$    | $3.762\times10^{15}$ |
| 铋-207  |           | 38年               | $1.198\times10^9$    | $1.685\times10^{12}$ |
| 铋-210  |           | 5.012天            | $4.330\times10^5$    | $4.597\times10^{15}$ |
| 铋-210m |           | $3.0\times10^6$ 年 | $9.461\times10^{13}$ | $2.104\times10^7$    |
| 铋-212  |           | 60.55分钟           | $3.633\times10^3$    | $5.427\times10^{17}$ |
| 镅-247  | 伯克莱姆 (97) | 1380年             | $4.352\times10^{10}$ | $3.889\times10^{10}$ |
| 镅-249  |           | 320天              | $2.765\times10^7$    | $6.072\times10^{13}$ |
| 溴-76   | 溴 (35)    | 16.2小时            | $5.832\times10^4$    | $9.431\times10^{16}$ |
| 溴-77   |           | 56小时              | $2.016\times10^5$    | $2.693\times10^{16}$ |
| 溴-82   |           | 35.3小时            | $1.271\times10^5$    | $4.011\times10^{16}$ |
| 碳-11   | 碳 (6)     | 20.38分钟           | $1.223\times10^3$    | $3.108\times10^{19}$ |
| 碳-14   |           | 5730年             | $1.807\times10^{11}$ | $1.652\times10^{11}$ |
| 钙-41   | 钙 (20)    | $1.4\times10^5$ 年 | $4.415\times10^{12}$ | $2.309\times10^9$    |
| 钙-45   |           | 163天              | $1.408\times10^7$    | $6.596\times10^{14}$ |
| 钙-47   |           | 4.53天             | $3.914\times10^5$    | $2.272\times10^{16}$ |
| 镅-109  | 镅 (48)    | 464天              | $4.009\times10^7$    | $9.566\times10^{13}$ |
| 镅-113m |           | 13.6年             | $4.289\times10^8$    | $8.625\times10^{12}$ |
| 镅-115  |           | 53.46小时           | $1.925\times10^5$    | $1.889\times10^{16}$ |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子<br>序数 | 半衰期                    |                        | 比活度<br>（贝可/克）          |
|--------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|        |            | T½（年、<br>天、小时、<br>分钟）  | T½（秒）                  |                        |
| 钋-115m |            | 44.6天                  | 3.853×10 <sup>6</sup>  | 9.433×10 <sup>14</sup> |
| 铈-139  | 铈（58）      | 137.66天                | 1.189×10 <sup>7</sup>  | 2.528×10 <sup>14</sup> |
| 铈-141  |            | 32.501天                | 2.808×10 <sup>6</sup>  | 1.056×10 <sup>15</sup> |
| 铈-143  |            | 33小时                   | 1.188×10 <sup>5</sup>  | 2.461×10 <sup>16</sup> |
| 铈-144  |            | 284.3天                 | 2.456×10 <sup>7</sup>  | 1.182×10 <sup>14</sup> |
| 镅-248  | 镅（98）      | 333.5天                 | 2.881×10 <sup>7</sup>  | 5.849×10 <sup>13</sup> |
| 镅-249  |            | 350.6年                 | 1.106×10 <sup>10</sup> | 1.518×10 <sup>11</sup> |
| 镅-250  |            | 13.08年                 | 4.125×10 <sup>8</sup>  | 4.053×10 <sup>12</sup> |
| 镅-251  |            | 898年                   | 2.832×10 <sup>10</sup> | 5.881×10 <sup>10</sup> |
| 镅-252  |            | 2.638年                 | 8.319×10 <sup>7</sup>  | 1.994×10 <sup>13</sup> |
| 镅-253  |            | 17.81天                 | 1.539×10 <sup>6</sup>  | 1.074×10 <sup>15</sup> |
| 镅-254  |            | 60.5天                  | 5.227×10 <sup>6</sup>  | 3.148×10 <sup>14</sup> |
| 氯-36   | 氯（17）      | 3.01×10 <sup>5</sup> 年 | 9.492×10 <sup>12</sup> | 1.223×10 <sup>9</sup>  |
| 氯-38   |            | 37.21分钟                | 2.233×10 <sup>3</sup>  | 4.927×10 <sup>18</sup> |
| 钆-240  | 钆（96）      | 27天                    | 2.333×10 <sup>6</sup>  | 7.466×10 <sup>14</sup> |
| 钆-241  |            | 32.8天                  | 2.834×10 <sup>6</sup>  | 6.120×10 <sup>14</sup> |
| 钆-242  |            | 162.8天                 | 1.407×10 <sup>7</sup>  | 1.228×10 <sup>14</sup> |
| 钆-243  |            | 28.5年                  | 8.988×10 <sup>8</sup>  | 1.914×10 <sup>12</sup> |
| 钆-244  |            | 18.11年                 | 5.711×10 <sup>8</sup>  | 3.000×10 <sup>12</sup> |
| 钆-245  |            | 8500年                  | 2.681×10 <sup>11</sup> | 6.365×10 <sup>9</sup>  |
| 钆-246  |            | 4730年                  | 1.492×10 <sup>11</sup> | 1.139×10 <sup>10</sup> |
| 钆-247  |            | 1.56×10 <sup>7</sup> 年 | 4.920×10 <sup>14</sup> | 3.440×10 <sup>6</sup>  |
| 钆-248  |            | 3.39×10 <sup>5</sup> 年 | 1.069×10 <sup>13</sup> | 1.577×10 <sup>8</sup>  |
|        |            |                        |                        |                        |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                   |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)        | T½ (秒)                 |                        |
| 钴-55   | 钴 (27) | 17.54小时               | 6.314×10 <sup>4</sup>  | 1.204×10 <sup>17</sup> |
| 钴-56   |        | 78.76天                | 6.805×10 <sup>6</sup>  | 1.097×10 <sup>15</sup> |
| 钴-57   |        | 270.9天                | 2.341×10 <sup>7</sup>  | 3.133×10 <sup>14</sup> |
| 钴-58   |        | 70.8天                 | 6.117×10 <sup>6</sup>  | 1.178×10 <sup>15</sup> |
| 钴-58m  |        | 9.15小时                | 3.294×10 <sup>4</sup>  | 2.188×10 <sup>17</sup> |
| 钴-60   |        | 5.271年                | 1.662×10 <sup>8</sup>  | 4.191×10 <sup>13</sup> |
| 铬-51   | 铬 (24) | 27.704天               | 2.394×10 <sup>6</sup>  | 3.424×10 <sup>15</sup> |
| 铯-129  | 铯 (55) | 32.06小时               | 1.154×10 <sup>5</sup>  | 2.808×10 <sup>16</sup> |
| 铯-131  |        | 9.69天                 | 8.372×10 <sup>5</sup>  | 3.811×10 <sup>15</sup> |
| 铯-132  |        | 6.475天                | 5.594×10 <sup>5</sup>  | 5.660×10 <sup>15</sup> |
| 铯-134  |        | 2.062年                | 6.503×10 <sup>7</sup>  | 4.797×10 <sup>13</sup> |
| 铯-134m |        | 2.9小时                 | 1.044×10 <sup>4</sup>  | 2.988×10 <sup>17</sup> |
| 铯-135  |        | 2.3×10 <sup>6</sup> 年 | 7.253×10 <sup>13</sup> | 4.269×10 <sup>7</sup>  |
| 铯-136  |        | 13.1天                 | 1.132×10 <sup>6</sup>  | 2.716×10 <sup>15</sup> |
| 铯-137  |        | 30年                   | 9.461×10 <sup>8</sup>  | 3.225×10 <sup>12</sup> |
| 铜-64   | 铜 (29) | 12.701小时              | 4.572×10 <sup>4</sup>  | 1.428×10 <sup>17</sup> |
| 铜-67   |        | 61.86小时               | 2.227×10 <sup>5</sup>  | 2.801×10 <sup>16</sup> |
| 镅-159  | 镅 (66) | 144.4天                | 1.248×10 <sup>7</sup>  | 2.107×10 <sup>14</sup> |
| 镅-165  |        | 2.334小时               | 8.402×10 <sup>3</sup>  | 3.015×10 <sup>17</sup> |
| 镅-166  |        | 81.6小时                | 2.938×10 <sup>5</sup>  | 8.572×10 <sup>15</sup> |
| 铼-169  | 铼 (68) | 9.3天                  | 8.035×10 <sup>5</sup>  | 3.078×10 <sup>15</sup> |
| 铼-171  |        | 7.52小时                | 2.707×10 <sup>4</sup>  | 9.029×10 <sup>16</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子<br>序数 | 半衰期                    |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|        |            | T½ (年、<br>天、小时、<br>分钟) | T½ (秒)                 |                        |
| 钷-147  | 钷 (63)     | 24天                    | 2.074×10 <sup>6</sup>  | 1.371×10 <sup>15</sup> |
| 钷-148  |            | 54.5天                  | 4.709×10 <sup>6</sup>  | 5.998×10 <sup>14</sup> |
| 钷-149  |            | 93.1天                  | 8.044×10 <sup>6</sup>  | 3.488×10 <sup>14</sup> |
| 钷-150m |            | 12.8小时                 | 4.608×10 <sup>4</sup>  | 6.134×10 <sup>16</sup> |
| 钷-150  |            | 36.9年                  | 1.164×10 <sup>9</sup>  | 2.584×10 <sup>12</sup> |
| 钷-152  |            | 13.33年                 | 4.204×10 <sup>8</sup>  | 6.542×10 <sup>12</sup> |
| 钷-152m |            | 9.32小时                 | 3.355×10 <sup>4</sup>  | 8.196×10 <sup>16</sup> |
| 钷-154  |            | 8.8年                   | 2.775×10 <sup>8</sup>  | 9.781×10 <sup>12</sup> |
| 钷-155  |            | 4.96年                  | 1.564×10 <sup>8</sup>  | 1.724×10 <sup>13</sup> |
| 钷-156  |            | 15.19天                 | 1.312×10 <sup>6</sup>  | 2.042×10 <sup>15</sup> |
| 氟-18   | 氟 (9)      | 109.77分钟               | 6.586×10 <sup>3</sup>  | 3.526×10 <sup>18</sup> |
| 铁-52   | 铁 (26)     | 8.275小时                | 2.979×10 <sup>4</sup>  | 2.698×10 <sup>17</sup> |
| 铁-55   |            | 2.7年                   | 8.515×10 <sup>7</sup>  | 8.926×10 <sup>13</sup> |
| 铁-59   |            | 44.529天                | 3.847×10 <sup>6</sup>  | 1.841×10 <sup>15</sup> |
| 铁-60   |            | 1.0×10 <sup>5</sup> 年  | 3.154×10 <sup>12</sup> | 2.209×10 <sup>9</sup>  |
| 镓-67   | 镓 (31)     | 78.26小时                | 2.817×10 <sup>5</sup>  | 2.214×10 <sup>16</sup> |
| 镓-68   |            | 68分钟                   | 4.080×10 <sup>3</sup>  | 1.507×10 <sup>18</sup> |
| 镓-72   |            | 14.1小时                 | 5.076×10 <sup>4</sup>  | 1.144×10 <sup>17</sup> |
| 钆-146  | 钆 (64)     | 48.3天                  | 4.173×10 <sup>6</sup>  | 6.861×10 <sup>14</sup> |
| 钆-148  |            | 93年                    | 2.933×10 <sup>9</sup>  | 9.630×10 <sup>11</sup> |
| 钆-153  |            | 242天                   | 2.091×10 <sup>7</sup>  | 1.307×10 <sup>14</sup> |
| 钆-159  |            | 18.56小时                | 6.682×10 <sup>4</sup>  | 3.935×10 <sup>16</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                |                      | 比活度<br>(贝可/克)        |
|--------|--------|--------------------|----------------------|----------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)     | T½ (秒)               |                      |
| 锆-68   | 锆 (32) | 288天               | $2.488\times10^7$    | $2.470\times10^{14}$ |
| 锆-69   |        | 39.05小时            | $1.406\times10^5$    | $4.307\times10^{16}$ |
| 锆-71   |        | 11.8天              | $1.020\times10^6$    | $5.775\times10^{15}$ |
| 锆-77   |        | 11.3小时             | $4.068\times10^4$    | $1.334\times10^{17}$ |
| 钐-172  | 钐 (72) | 1.87年              | $5.897\times10^7$    | $4.121\times10^{13}$ |
| 钐-175  |        | 70天                | $6.048\times10^6$    | $3.949\times10^{14}$ |
| 钐-181  |        | 42.4天              | $3.663\times10^6$    | $6.304\times10^{14}$ |
| 钐-182  |        | $9.0\times10^6$ 年  | $2.838\times10^{14}$ | $8.092\times10^6$    |
| 汞-194  | 汞 (80) | 260年               | $8.199\times10^9$    | $2.628\times10^{11}$ |
| 汞-195m |        | 41.6小时             | $1.498\times10^5$    | $1.431\times10^{16}$ |
| 汞-197  |        | 64.1小时             | $2.308\times10^5$    | $9.195\times10^{15}$ |
| 汞-197m |        | 23.8小时             | $8.568\times10^4$    | $2.476\times10^{16}$ |
| 汞-203  |        | 46.6天              | $4.026\times10^6$    | $5.114\times10^{14}$ |
| 铊-166  | 铊 (67) | 26.8小时             | $9.648\times10^4$    | $2.610\times10^{16}$ |
| 铊-166m |        | 1200年              | $3.784\times10^{10}$ | $6.655\times10^{10}$ |
| 碘-123  | 碘 (53) | 13.2小时             | $4.752\times10^4$    | $7.151\times10^{16}$ |
| 碘-124  |        | 4.18天              | $3.612\times10^5$    | $9.334\times10^{15}$ |
| 碘-125  |        | 60.14天             | $5.196\times10^6$    | $6.436\times10^{14}$ |
| 碘-126  |        | 13.02天             | $1.125\times10^6$    | $2.949\times10^{15}$ |
| 碘-129  |        | $1.57\times10^7$ 年 | $4.951\times10^{14}$ | $6.545\times10^6$    |
| 碘-131  |        | 8.04天              | $6.947\times10^5$    | $4.593\times10^{15}$ |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                    |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)         | T½ (秒)                 |                        |
| 碘-132  |        | 2.3小时                  | 8.280×10 <sup>3</sup>  | 3.824×10 <sup>17</sup> |
| 碘-133  |        | 20.8小时                 | 7.488×10 <sup>4</sup>  | 4.197×10 <sup>16</sup> |
| 碘-134  |        | 52.6分钟                 | 3.156×10 <sup>3</sup>  | 9.884×10 <sup>17</sup> |
| 碘-135  |        | 6.61小时                 | 2.380×10 <sup>4</sup>  | 1.301×10 <sup>17</sup> |
| 铟-111  | 铟 (49) | 2.83天                  | 2.445×10 <sup>5</sup>  | 1.540×10 <sup>16</sup> |
| 铟-113m |        | 1.658小时                | 5.969×10 <sup>3</sup>  | 6.197×10 <sup>17</sup> |
| 铟-114m |        | 49.51天                 | 4.278×10 <sup>6</sup>  | 8.572×10 <sup>14</sup> |
| 铟-115m |        | 4.486小时                | 1.615×10 <sup>4</sup>  | 2.251×10 <sup>17</sup> |
| 铋-189  | 铋 (77) | 13.3天                  | 1.149×10 <sup>6</sup>  | 1.925×10 <sup>15</sup> |
| 铋-190  |        | 12.1天                  | 1.045×10 <sup>6</sup>  | 2.104×10 <sup>15</sup> |
| 铋-192  |        | 74.02天                 | 6.395×10 <sup>6</sup>  | 3.404×10 <sup>14</sup> |
| 铋-193m |        | 10.53天                 | 9.098×10 <sup>5</sup>  | 2.378×10 <sup>15</sup> |
| 铋-194  |        | 19.15小时                | 6.894×10 <sup>4</sup>  | 3.125×10 <sup>16</sup> |
| 钾-40   | 钾 (19) | 1.28×10 <sup>9</sup> 年 | 4.037×10 <sup>16</sup> | 2.589×10 <sup>5</sup>  |
| 钾-42   |        | 12.36小时                | 4.450×10 <sup>4</sup>  | 2.237×10 <sup>17</sup> |
| 钾-43   |        | 22.6小时                 | 8.136×10 <sup>4</sup>  | 1.195×10 <sup>17</sup> |
| 氦-81   | 氦 (36) | 2.1×10 <sup>5</sup> 年  | 6.623×10 <sup>12</sup> | 7.792×10 <sup>8</sup>  |
| 氦-85   |        | 10.72年                 | 3.381×10 <sup>8</sup>  | 1.455×10 <sup>13</sup> |
| 氦-85m  |        | 4.48小时                 | 1.613×10 <sup>4</sup>  | 3.049×10 <sup>17</sup> |
| 氦-87   |        | 76.3分钟                 | 4.578×10 <sup>3</sup>  | 1.049×10 <sup>18</sup> |
| 镧-137  | 镧 (57) | 6.0×10 <sup>4</sup> 年  | 1.892×10 <sup>12</sup> | 1.612×10 <sup>9</sup>  |
| 镧-140  |        | 40.272小时               | 1.450×10 <sup>5</sup>  | 2.059×10 <sup>16</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                |                      | 比活度<br>(贝可/克)        |
|--------|--------|--------------------|----------------------|----------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)     | T½ (秒)               |                      |
| 镭-172  | 镭 (71) | 6.7天               | $5.789\times10^5$    | $4.198\times10^{15}$ |
| 镭-173  |        | 1.37年              | $4.320\times10^7$    | $5.592\times10^{13}$ |
| 镭-174  |        | 3.31年              | $1.044\times10^8$    | $2.301\times10^{13}$ |
| 镭-174m |        | 142天               | $1.227\times10^7$    | $1.958\times10^{14}$ |
| 镭-177  |        | 6.71天              | $5.797\times10^5$    | $4.073\times10^{15}$ |
|        |        |                    |                      |                      |
| 镁-28   | 镁 (12) | 20.91小时            | $7.528\times10^4$    | $1.983\times10^{17}$ |
|        |        |                    |                      |                      |
| 锰-52   | 锰 (25) | 5.591天             | $4.831\times10^5$    | $1.664\times10^{16}$ |
| 锰-53   |        | $3.7\times10^6$ 年  | $1.167\times10^{14}$ | $6.759\times10^7$    |
| 锰-54   |        | 312.5天             | $2.700\times10^7$    | $2.867\times10^{14}$ |
| 锰-56   |        | 2.5785小时           | $9.283\times10^3$    | $8.041\times10^{17}$ |
|        |        |                    |                      |                      |
| 钼-93   | 钼 (42) | 3500年              | $1.104\times10^{11}$ | $4.072\times10^{10}$ |
| 钼-99   |        | 66小时               | $2.376\times10^5$    | $1.777\times10^{16}$ |
|        |        |                    |                      |                      |
| 氮-13   | 氮 (7)  | 9.965分钟            | $5.979\times10^2$    | $5.378\times10^{19}$ |
|        |        |                    |                      |                      |
| 钠-22   | 钠 (11) | 2.602年             | $8.206\times10^7$    | $2.315\times10^{14}$ |
| 钠-24   |        | 15小时               | $5.400\times10^4$    | $3.225\times10^{17}$ |
|        |        |                    |                      |                      |
| 铈-93m  | 铈 (41) | 13.6年              | $4.289\times10^8$    | $1.048\times10^{13}$ |
| 铈-94   |        | $2.03\times10^4$ 年 | $6.402\times10^{11}$ | $6.946\times10^9$    |
| 铈-95   |        | 35.15天             | $3.037\times10^6$    | $1.449\times10^{15}$ |
| 铈-97   |        | 72.1分钟             | $4.326\times10^3$    | $9.961\times10^{17}$ |
|        |        |                    |                      |                      |
| 钷-147  | 钷 (60) | 10.98天             | $9.487\times10^5$    | $2.997\times10^{15}$ |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                    |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)         | T½ (秒)                 |                        |
| 钷-149  |        | 1.73小时                 | 6.228×10 <sup>3</sup>  | 4.504×10 <sup>17</sup> |
| 镍-57   | 镍 (28) | 35.60小时                | 1.282×10 <sup>5</sup>  | 5.718×10 <sup>16</sup> |
| 镍-59   |        | 7.5×10 <sup>4</sup> 年  | 2.365×10 <sup>12</sup> | 2.995×10 <sup>9</sup>  |
| 镍-63   |        | 96年                    | 3.027×10 <sup>9</sup>  | 2.192×10 <sup>12</sup> |
| 镍-65   |        | 2.52小时                 | 9.072×10 <sup>3</sup>  | 7.089×10 <sup>17</sup> |
| 镱-235  | 镱 (93) | 396.1天                 | 3.422×10 <sup>7</sup>  | 5.197×10 <sup>13</sup> |
| 镱-236  |        | 1.54×10 <sup>5</sup> 年 | 4.857×10 <sup>12</sup> | 4.884×10 <sup>8</sup>  |
| 镱-236m |        | 22.5小时                 | 8.100×10 <sup>4</sup>  | 2.187×10 <sup>16</sup> |
| 镱-237  |        | 2.14×10 <sup>6</sup> 年 | 6.749×10 <sup>13</sup> | 2.613×10 <sup>7</sup>  |
| 镱-239  |        | 2.355天                 | 2.035×10 <sup>5</sup>  | 8.596×10 <sup>15</sup> |
| 铽-185  | 铽 (76) | 94天                    | 8.122×10 <sup>6</sup>  | 2.782×10 <sup>14</sup> |
| 铽-191  |        | 15.4天                  | 1.331×10 <sup>6</sup>  | 1.645×10 <sup>15</sup> |
| 铽-191m |        | 13.03小时                | 4.691×10 <sup>4</sup>  | 4.665×10 <sup>16</sup> |
| 铽-193  |        | 30小时                   | 1.080×10 <sup>5</sup>  | 2.005×10 <sup>16</sup> |
| 铽-194  |        | 6年                     | 1.892×10 <sup>8</sup>  | 1.139×10 <sup>13</sup> |
| 磷-32   | 磷 (15) | 14.29天                 | 1.235×10 <sup>6</sup>  | 1.058×10 <sup>16</sup> |
| 磷-33   |        | 25.4天                  | 2.195×10 <sup>6</sup>  | 5.772×10 <sup>15</sup> |
| 镉-23   | 镉 (91) | 17.4天                  | 1.503×10 <sup>6</sup>  | 1.209×10 <sup>15</sup> |
| 镉-23   |        | 32760年                 | 1.033×10 <sup>12</sup> | 1.752×10 <sup>9</sup>  |
| 镉-233  |        | 27天                    | 2.333×10 <sup>6</sup>  | 7.690×10 <sup>14</sup> |
| 铅-201  | 铅 (82) | 9.4小时                  | 3.384×10 <sup>4</sup>  | 6.145×10 <sup>16</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                          |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|------------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T <sub>1/2</sub> (年、天、小时、分钟) | T <sub>1/2</sub> (秒)   |                        |
| 铅-202  |        | 3.0×10 <sup>5</sup> 年        | 9.461×10 <sup>12</sup> | 2.187×10 <sup>8</sup>  |
| 铅-203  |        | 52.05小时                      | 1.874×10 <sup>5</sup>  | 1.099×10 <sup>16</sup> |
| 铅-205  |        | 1.43×10 <sup>7</sup> 年       | 4.510×10 <sup>14</sup> | 4.521×10 <sup>6</sup>  |
| 铅-210  |        | 22.3年                        | 7.033×10 <sup>8</sup>  | 2.830×10 <sup>12</sup> |
| 铅-212  |        | 10.64小时                      | 3.830×10 <sup>4</sup>  | 5.147×10 <sup>16</sup> |
| 钷-103  | 钷 (46) | 16.96天                       | 1.465×10 <sup>6</sup>  | 2.769×10 <sup>15</sup> |
| 钷-107  |        | 6.5×10 <sup>6</sup> 年        | 2.050×10 <sup>14</sup> | 1.906×10 <sup>7</sup>  |
| 钷-109  |        | 13.427小时                     | 4.834×10 <sup>4</sup>  | 7.934×10 <sup>16</sup> |
| 铈-143  | 铈 (61) | 265天                         | 2.290×10 <sup>7</sup>  | 1.277×10 <sup>14</sup> |
| 铈-144  |        | 363天                         | 3.136×10 <sup>7</sup>  | 9.255×10 <sup>13</sup> |
| 铈-145  |        | 17.7年                        | 5.582×10 <sup>8</sup>  | 5.165×10 <sup>12</sup> |
| 铈-147  |        | 2.6234年                      | 8.273×10 <sup>7</sup>  | 3.437×10 <sup>13</sup> |
| 铈-148m |        | 41.3天                        | 3.568×10 <sup>6</sup>  | 7.915×10 <sup>14</sup> |
| 铈-149  |        | 53.08小时                      | 1.911×10 <sup>5</sup>  | 1.468×10 <sup>16</sup> |
| 铈-151  |        | 28.4小时                       | 1.022×10 <sup>5</sup>  | 2.708×10 <sup>16</sup> |
| 钆-210  | 钆 (84) | 138.38天                      | 1.196×10 <sup>7</sup>  | 1.665×10 <sup>14</sup> |
| 镨-142  | 镨 (59) | 19.13小时                      | 6.887×10 <sup>4</sup>  | 4.274×10 <sup>16</sup> |
| 镨-143  |        | 13.56天                       | 1.172×10 <sup>6</sup>  | 2.495×10 <sup>15</sup> |
| 铂-188  | 铂 (78) | 10.2天                        | 8.813×10 <sup>5</sup>  | 2.523×10 <sup>15</sup> |
| 铂-191  |        | 2.8天                         | 2.419×10 <sup>5</sup>  | 9.046×10 <sup>15</sup> |
| 铂-193  |        | 50年                          | 1.577×10 <sup>9</sup>  | 1.374×10 <sup>12</sup> |
| 铂-193m |        | 4.33天                        | 3.741×10 <sup>5</sup>  | 5.789×10 <sup>15</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                          |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|------------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T <sub>1/2</sub> (年、天、小时、分钟) | T <sub>1/2</sub> (秒)   |                        |
| 铂-195m |        | 4.02天                        | 3.473×10 <sup>5</sup>  | 6.172×10 <sup>15</sup> |
| 铂-197  |        | 18.3小时                       | 6.588×10 <sup>4</sup>  | 3.221×10 <sup>16</sup> |
| 铂-197m |        | 94.4分钟                       | 5.664×10 <sup>3</sup>  | 3.746×10 <sup>17</sup> |
| 钷-236  | 钷 (94) | 2.851年                       | 8.991×10 <sup>7</sup>  | 1.970×10 <sup>13</sup> |
| 钷-237  |        | 45.3天                        | 3.914×10 <sup>6</sup>  | 4.506×10 <sup>14</sup> |
| 钷-238  |        | 87.74年                       | 2.767×10 <sup>9</sup>  | 6.347×10 <sup>11</sup> |
| 钷-239  |        | 24065年                       | 7.589×10 <sup>11</sup> | 2.305×10 <sup>9</sup>  |
| 钷-240  |        | 6537年                        | 2.062×10 <sup>11</sup> | 8.449×10 <sup>9</sup>  |
| 钷-241  |        | 14.4年                        | 4.541×10 <sup>8</sup>  | 3.819×10 <sup>12</sup> |
| 钷-242  |        | 3.763×10 <sup>5</sup> 年      | 1.187×10 <sup>13</sup> | 1.456×10 <sup>8</sup>  |
| 钷-244  |        | 8.26×10 <sup>7</sup> 年       | 2.605×10 <sup>15</sup> | 6.577×10 <sup>5</sup>  |
| 镭-223  | 镭 (88) | 11.434天                      | 9.879×10 <sup>5</sup>  | 1.897×10 <sup>15</sup> |
| 镭-224  |        | 3.66天                        | 3.162×10 <sup>5</sup>  | 5.901×10 <sup>15</sup> |
| 镭-225  |        | 14.8天                        | 1.279×10 <sup>6</sup>  | 1.453×10 <sup>15</sup> |
| 镭-226  |        | 1600年                        | 5.046×10 <sup>10</sup> | 3.666×10 <sup>10</sup> |
| 镭-228  |        | 5.75年                        | 1.813×10 <sup>8</sup>  | 1.011×10 <sup>13</sup> |
| 铷-81   | 铷 (37) | 4.58小时                       | 1.649×10 <sup>4</sup>  | 3.130×10 <sup>17</sup> |
| 铷-83   |        | 86.2天                        | 7.448×10 <sup>6</sup>  | 6.762×10 <sup>14</sup> |
| 铷-84   |        | 32.77天                       | 2.831×10 <sup>6</sup>  | 1.758×10 <sup>15</sup> |
| 铷-86   |        | 18.66天                       | 1.612×10 <sup>6</sup>  | 3.015×10 <sup>15</sup> |
| 铷-87   |        | 4.7×10 <sup>10</sup> 年       | 1.482×10 <sup>18</sup> | 3.242×10 <sup>3</sup>  |
| 铯-184  | 铯 (75) | 38天                          | 3.283×10 <sup>6</sup>  | 6.919×10 <sup>14</sup> |
| 铯-184m |        | 165天                         | 1.426×10 <sup>7</sup>  | 1.594×10 <sup>14</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                    |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)         | T½ (秒)                 |                        |
| 铯-186  |        | 90.64小时                | 3.263×10 <sup>5</sup>  | 6.887×10 <sup>15</sup> |
| 铯-187  |        | 5.0×10 <sup>10</sup> 年 | 1.577×10 <sup>18</sup> | 1.418×10 <sup>3</sup>  |
| 铯-188  |        | 16.98小时                | 6.113×10 <sup>4</sup>  | 3.637×10 <sup>16</sup> |
| 铯-189  |        | 24.3小时                 | 8.748×10 <sup>4</sup>  | 2.528×10 <sup>16</sup> |
| 铈-99   | 铈 (45) | 16天                    | 1.382×10 <sup>6</sup>  | 3.054×10 <sup>15</sup> |
| 铈-101  |        | 3.2年                   | 1.009×10 <sup>8</sup>  | 4.101×10 <sup>13</sup> |
| 铈-102  |        | 2.9年                   | 9.145×10 <sup>7</sup>  | 4.481×10 <sup>13</sup> |
| 铈-102m |        | 207天                   | 1.788×10 <sup>7</sup>  | 2.291×10 <sup>14</sup> |
| 铈-103m |        | 56.12分钟                | 3.367×10 <sup>3</sup>  | 1.205×10 <sup>18</sup> |
| 铈-105  |        | 35.36小时                | 1.273×10 <sup>5</sup>  | 3.127×10 <sup>16</sup> |
| 氦-222  | 氦 (86) | 3.8235天                | 3.304×10 <sup>5</sup>  | 5.700×10 <sup>15</sup> |
| 钪-97   | 钪 (44) | 2.9天                   | 2.506×10 <sup>5</sup>  | 1.720×10 <sup>16</sup> |
| 钪-103  |        | 39.28天                 | 3.394×10 <sup>6</sup>  | 1.196×10 <sup>15</sup> |
| 钪-105  |        | 4.44小时                 | 1.598×10 <sup>4</sup>  | 2.491×10 <sup>17</sup> |
| 钪-106  |        | 368.2天                 | 3.181×10 <sup>7</sup>  | 1.240×10 <sup>14</sup> |
| 硫-35   | 硫 (16) | 87.44天                 | 7.555×10 <sup>6</sup>  | 1.581×10 <sup>15</sup> |
| 铈-122  | 铈 (51) | 2.7天                   | 2.333×10 <sup>5</sup>  | 1.469×10 <sup>16</sup> |
| 铈-124  |        | 60.2天                  | 5.201×10 <sup>6</sup>  | 6.481×10 <sup>14</sup> |
| 铈-125  |        | 2.77年                  | 8.735×10 <sup>7</sup>  | 3.828×10 <sup>13</sup> |
| 铈-126  |        | 12.4天                  | 1.071×10 <sup>6</sup>  | 3.096×10 <sup>15</sup> |
| 钪-46   |        | 83.83天                 | 7.243×10 <sup>6</sup>  | 1.255×10 <sup>15</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                     |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|-------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)          | T½ (秒)                 |                        |
| 钷-47   |        | 3.351天                  | 2.895×10 <sup>5</sup>  | 3.072×10 <sup>16</sup> |
| 钷-48   |        | 43.7小时                  | 1.573×10 <sup>5</sup>  | 5.535×10 <sup>16</sup> |
| 硒-75   | 硒 (34) | 119.8天                  | 1.035×10 <sup>7</sup>  | 5.384×10 <sup>14</sup> |
| 硒-79   |        | 6.5×10 <sup>4</sup> 年   | 2.050×10 <sup>12</sup> | 2.581×10 <sup>9</sup>  |
| 硅-31   | 硅 (14) | 157.3分钟                 | 9.438×10 <sup>3</sup>  | 1.429×10 <sup>18</sup> |
| 硅-32   |        | 450年                    | 1.419×10 <sup>10</sup> | 9.205×10 <sup>11</sup> |
| 钐-145  | 钐 (62) | 340天                    | 2.938×10 <sup>7</sup>  | 9.813×10 <sup>13</sup> |
| 钐-147  |        | 1.06×10 <sup>11</sup> 年 | 3.343×10 <sup>18</sup> | 8.506×10 <sup>2</sup>  |
| 钐-151  |        | 90年                     | 2.838×10 <sup>9</sup>  | 9.753×10 <sup>11</sup> |
| 钐-153  |        | 46.7小时                  | 1.681×10 <sup>5</sup>  | 1.625×10 <sup>16</sup> |
| 锡-113  | 锡 (50) | 115.1天                  | 9.945×10 <sup>6</sup>  | 3.720×10 <sup>14</sup> |
| 锡-117m |        | 13.61天                  | 1.176×10 <sup>6</sup>  | 3.038×10 <sup>15</sup> |
| 锡-119m |        | 293天                    | 2.532×10 <sup>7</sup>  | 1.388×10 <sup>14</sup> |
| 锡-121m |        | 55年                     | 1.734×10 <sup>9</sup>  | 1.992×10 <sup>12</sup> |
| 锡-123  |        | 129.2天                  | 1.116×10 <sup>7</sup>  | 3.044×10 <sup>14</sup> |
| 锡-125  |        | 9.64天                   | 8.329×10 <sup>5</sup>  | 4.015×10 <sup>15</sup> |
| 锡-126  |        | 1.0×10 <sup>5</sup> 年   | 3.154×10 <sup>12</sup> | 1.052×10 <sup>9</sup>  |
| 铟-82   | 铟 (38) | 25天                     | 2.160×10 <sup>6</sup>  | 2.360×10 <sup>15</sup> |
| 铟-83   |        | 32.41小时                 | 1.167×10 <sup>5</sup>  | 4.314×10 <sup>16</sup> |
| 铟-85   |        | 64.84天                  | 5.602×10 <sup>6</sup>  | 8.778×10 <sup>14</sup> |
| 铟-85m  |        | 69.5分钟                  | 4.170×10 <sup>3</sup>  | 1.179×10 <sup>18</sup> |
| 铟-87m  |        | 2.805小时                 | 1.010×10 <sup>4</sup>  | 4.758×10 <sup>17</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素   | 元素原子序数 | 半衰期                    |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|---------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
|         |        | T½ (年、天、小时、分钟)         | T½ (秒)                 |                        |
| 锶-89    |        | 50.5天                  | 4.363×10 <sup>6</sup>  | 1.076×10 <sup>15</sup> |
| 锶-90    |        | 29.12年                 | 9.183×10 <sup>8</sup>  | 5.057×10 <sup>12</sup> |
| 锶-91    |        | 9.5小时                  | 3.420×10 <sup>4</sup>  | 1.343×10 <sup>17</sup> |
| 锶-92    |        | 2.71小时                 | 9.756×10 <sup>3</sup>  | 4.657×10 <sup>17</sup> |
| 氚 (H-3) | 氚 (1)  | 12.35年                 | 3.895×10 <sup>8</sup>  | 3.578×10 <sup>14</sup> |
| 钽-178m  | 钽 (73) | 2.2小时                  | 7.920×10 <sup>3</sup>  | 2.965×10 <sup>17</sup> |
| 钽-179   |        | 664.9天                 | 5.745×10 <sup>7</sup>  | 4.065×10 <sup>13</sup> |
| 钽-182   |        | 115天                   | 9.936×10 <sup>6</sup>  | 2.311×10 <sup>14</sup> |
| 铽-149   | 铽 (65) | 4.12小时                 | 1.483×10 <sup>4</sup>  | 1.889×10 <sup>17</sup> |
| 铽-157   |        | 150年                   | 4.730×10 <sup>9</sup>  | 5.628×10 <sup>11</sup> |
| 铽-158   |        | 150年                   | 4.730×10 <sup>9</sup>  | 5.593×10 <sup>11</sup> |
| 铽-160   |        | 72.3天                  | 6.247×10 <sup>6</sup>  | 4.182×10 <sup>14</sup> |
| 铽-161   |        | 6.91天                  | 5.970×10 <sup>5</sup>  | 4.340×10 <sup>15</sup> |
| 铈-95m   | 铈 (43) | 61天                    | 5.270×10 <sup>6</sup>  | 8.349×10 <sup>14</sup> |
| 铈-96    |        | 4.28天                  | 3.698×10 <sup>5</sup>  | 1.177×10 <sup>16</sup> |
| 铈-96m   |        | 51.5分钟                 | 3.090×10 <sup>3</sup>  | 1.409×10 <sup>18</sup> |
| 铈-97    |        | 2.6×10 <sup>6</sup> 年  | 8.199×10 <sup>13</sup> | 5.256×10 <sup>7</sup>  |
| 铈-97m   |        | 87天                    | 7.517×10 <sup>6</sup>  | 5.733×10 <sup>14</sup> |
| 铈-98    |        | 4.2×10 <sup>6</sup> 年  | 1.325×10 <sup>14</sup> | 3.220×10 <sup>7</sup>  |
| 铈-99    |        | 2.13×10 <sup>5</sup> 年 | 6.717×10 <sup>12</sup> | 6.286×10 <sup>8</sup>  |
| 铈-99m   |        | 6.02小时                 | 2.167×10 <sup>4</sup>  | 1.948×10 <sup>17</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                      |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|--------|--------|--------------------------|------------------------|------------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)           | T½ (秒)                 |                        |
| 碲-121  | 碲 (52) | 17天                      | 1.469×10 <sup>6</sup>  | 2.352×10 <sup>15</sup> |
| 碲-121m |        | 154天                     | 1.331×10 <sup>7</sup>  | 2.596×10 <sup>14</sup> |
| 碲-123m |        | 119.7天                   | 1.034×10 <sup>7</sup>  | 3.286×10 <sup>14</sup> |
| 碲-125m |        | 58天                      | 5.011×10 <sup>6</sup>  | 6.673×10 <sup>14</sup> |
| 碲-127  |        | 9.35小时                   | 3.366×10 <sup>4</sup>  | 9.778×10 <sup>16</sup> |
| 碲-127m |        | 109天                     | 9.418×10 <sup>6</sup>  | 3.495×10 <sup>14</sup> |
| 碲-129m |        | 69.6分钟                   | 4.176×10 <sup>3</sup>  | 7.759×10 <sup>17</sup> |
| 碲-129m |        | 33.6天                    | 2.903×10 <sup>6</sup>  | 1.116×10 <sup>15</sup> |
| 碲-131m |        | 30小时                     | 1.080×10 <sup>5</sup>  | 2.954×10 <sup>16</sup> |
| 碲-132  |        | 78.2小时                   | 2.815×10 <sup>5</sup>  | 1.125×10 <sup>16</sup> |
| 钍-227  | 钍 (90) | 18.718天                  | 1.617×10 <sup>6</sup>  | 1.139×10 <sup>15</sup> |
| 钍-228  |        | 1.9131年                  | 6.033×10 <sup>7</sup>  | 3.039×10 <sup>13</sup> |
| 钍-229  |        | 7340年                    | 2.315×10 <sup>11</sup> | 7.886×10 <sup>9</sup>  |
| 钍-230  |        | 7.7×10 <sup>4</sup> 年    | 2.428×10 <sup>12</sup> | 7.484×10 <sup>8</sup>  |
| 钍-231  |        | 25.52小时                  | 9.187×10 <sup>4</sup>  | 1.970×10 <sup>16</sup> |
| 钍-232  |        | 1.405×10 <sup>10</sup> 年 | 4.431×10 <sup>17</sup> | 4.066×10 <sup>3</sup>  |
| 钍-234  |        | 24.1天                    | 2.082×10 <sup>6</sup>  | 8.579×10 <sup>14</sup> |
| 铀-44   | 铀 (22) | 47.3年                    | 1.492×10 <sup>9</sup>  | 6.369×10 <sup>12</sup> |
| 铀-200  | 铀 (81) | 26.1小时                   | 9.396×10 <sup>4</sup>  | 2.224×10 <sup>16</sup> |
| 铀-201  |        | 3.044天                   | 2.630×10 <sup>5</sup>  | 7.907×10 <sup>15</sup> |
| 铀-202  |        | 12.23天                   | 1.057×10 <sup>6</sup>  | 1.958×10 <sup>15</sup> |
| 铀-204  |        | 3.779年                   | 1.192×10 <sup>8</sup>  | 1.719×10 <sup>13</sup> |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素  | 元素原子序数 | 半衰期                  |                      | 比活度<br>(贝可/克)        |
|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
|        |        | T½ (年、天、小时、分钟)       | T½ (秒)               |                      |
| 铊-167  | 铊 (69) | 9.24天                | $7.983\times10^5$    | $3.135\times10^{15}$ |
| 铊-170  |        | 128.6天               | $1.111\times10^7$    | $2.213\times10^{14}$ |
| 铊-171  |        | 1.92年                | $6.055\times10^7$    | $4.037\times10^{13}$ |
| 铀-230  | 铀 (92) | 20.8天                | $1.797\times10^6$    | $1.011\times10^{15}$ |
| 铀-232  |        | 72年                  | $2.271\times10^9$    | $7.935\times10^{11}$ |
| 铀-233  |        | $1.585\times10^5$ 年  | $4.998\times10^{12}$ | $3.589\times10^8$    |
| 铀-234  |        | $2.445\times10^5$ 年  | $7.711\times10^{12}$ | $2.317\times10^8$    |
| 铀-235  |        | $7.038\times10^8$ 年  | $2.220\times10^{16}$ | $8.014\times10^4$    |
| 铀-236  |        | $2.3415\times10^7$ 年 | $7.384\times10^{14}$ | $2.399\times10^6$    |
| 铀-238  |        | $4.468\times10^9$ 年  | $1.409\times10^{17}$ | $1.246\times10^4$    |
| 钷-48   | 钷 (23) | 16.238天              | $1.403\times10^6$    | $6.207\times10^{15}$ |
| 钷-49   |        | 330天                 | $2.851\times10^7$    | $2.992\times10^{14}$ |
| 钨-178  | 钨 (74) | 21.7天                | $1.875\times10^6$    | $1.253\times10^{15}$ |
| 钨-181  |        | 121.2天               | $1.047\times10^7$    | $2.205\times10^{14}$ |
| 钨-185  |        | 75.1天                | $6.489\times10^6$    | $3.482\times10^{14}$ |
| 钨-187  |        | 23.9小时               | $8.604\times10^4$    | $2.598\times10^{16}$ |
| 钨-188  |        | 69.4天                | $5.996\times10^6$    | $3.708\times10^{14}$ |
| 铀-122  | 铀 (54) | 20.1小时               | $7.236\times10^4$    | $4.735\times10^{16}$ |
| 铀-123  |        | 2.08小时               | $7.488\times10^3$    | $4.538\times10^{17}$ |
| 铀-127  |        | 36.41天               | $3.146\times10^6$    | $1.046\times10^{15}$ |
| 铀-131m |        | 11.9天                | $1.028\times10^6$    | $3.103\times10^{15}$ |
| 铀-133  |        | 5.245天               | $4.532\times10^5$    | $6.935\times10^{15}$ |
| 铀-135  |        | 9.09小时               | $3.272\times10^4$    | $9.462\times10^{16}$ |

表 II.1. 放射性核素的半衰期和比活度（续）

| 放射性核素 | 元素原子序数 | 半衰期                    |                        | 比活度<br>(贝可/克)          |
|-------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
|       |        | T½（年、天、小时、分钟）          | T½（秒）                  |                        |
| 钇-87  | 钇（39）  | 80.3小时                 | 2.891×10 <sup>5</sup>  | 1.662×10 <sup>16</sup> |
| 钇-88  |        | 106.64天                | 9.214×10 <sup>6</sup>  | 5.155×10 <sup>14</sup> |
| 钇-90  |        | 64小时                   | 2.304×10 <sup>5</sup>  | 2.016×10 <sup>16</sup> |
| 钇-91  |        | 58.51天                 | 5.055×10 <sup>6</sup>  | 9.086×10 <sup>14</sup> |
| 钇-91m |        | 49.71分钟                | 2.983×10 <sup>3</sup>  | 1.540×10 <sup>18</sup> |
| 钇-92  |        | 3.54小时                 | 1.274×10 <sup>4</sup>  | 3.565×10 <sup>17</sup> |
| 钇-93  |        | 10.1小时                 | 3.636×10 <sup>4</sup>  | 1.236×10 <sup>17</sup> |
|       |        |                        |                        |                        |
| 镱-169 | 镱（70）  | 32.01天                 | 2.766×10 <sup>6</sup>  | 8.943×10 <sup>14</sup> |
| 镱-175 |        | 4.19天                  | 3.620×10 <sup>5</sup>  | 6.598×10 <sup>15</sup> |
|       |        |                        |                        |                        |
| 锌-65  | 锌（30）  | 243.9天                 | 2.107×10 <sup>7</sup>  | 3.052×10 <sup>14</sup> |
| 锌-69  |        | 57分钟                   | 3.420×10 <sup>3</sup>  | 1.771×10 <sup>18</sup> |
| 锌-69m |        | 13.76小时                | 4.954×10 <sup>4</sup>  | 1.223×10 <sup>17</sup> |
|       |        |                        |                        |                        |
| 镭-88  | 镭（40）  | 83.4天                  | 7.206×10 <sup>6</sup>  | 6.592×10 <sup>14</sup> |
| 镭-93  |        | 1.53×10 <sup>6</sup> 年 | 4.825×10 <sup>13</sup> | 9.315×10 <sup>7</sup>  |
| 镭-95  |        | 63.98天                 | 5.528×10 <sup>6</sup>  | 7.960×10 <sup>14</sup> |
| 镭-97  |        | 16.9小时                 | 6.084×10 <sup>4</sup>  | 7.083×10 <sup>1</sup>  |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铯-225  | $2.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.2 \times 10^{-12}$                                            | $7.9 \times 10^{-06}$                   | $9.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-227  | $9.6 \times 10^{-17}$                                         | $7.7 \times 10^{-15}$                                            | $5.4 \times 10^{-04}$                   | $7.6 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铯-228  | $8.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.8 \times 10^{-12}$                                            | $2.5 \times 10^{-08}$                   | $5.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 银-105  | $5.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.8 \times 10^{-10}$                   | $1.1 \times 10^{-03}$                                                            |
| 银-108m | $1.5 \times 10^{-13}$                                         | $1.7 \times 10^{-13}$                                            | $3.5 \times 10^{-08}$                   | $4.7 \times 10^{-03}$                                                            |
| 银-110m | $2.4 \times 10^{-13}$                                         | $5.3 \times 10^{-14}$                                            | $1.2 \times 10^{-08}$                   | $1.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 银-111  | $2.4 \times 10^{-15}$                                         | $5.3 \times 10^{-13}$                                            | $1.7 \times 10^{-09}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铝-26   | $2.3 \times 10^{-13}$                                         | $7.1 \times 10^{-12}$                                            | $1.8 \times 10^{-08}$                   | $3.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镅-241  | $3.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.9 \times 10^{-05}$                   | $7.4 \times 10^{-05}$                                                            |
| 镅-242m | $2.5 \times 10^{-15}$                                         | $2.0 \times 10^{-14}$                                            | $3.5 \times 10^{-05}$                   | $3.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镅-243  | $2.0 \times 10^{-14}$                                         | $3.8 \times 10^{-15}$                                            | $3.9 \times 10^{-05}$                   | $6.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 氙-37   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 氙-39   | (*) -                                                         | $1.4 \times 10^{-14}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 氙-41   | (*) $1.1 \times 10^{-13}$                                     | $3.2 \times 10^{-12}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 砷-72   | $1.6 \times 10^{-13}$                                         | $3.6 \times 10^{-12}$                                            | $9.2 \times 10^{-10}$                   | $4.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 砷-73   | $1.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.3 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 砷-74   | $7.1 \times 10^{-14}$                                         | $5.9 \times 10^{-13}$                                            | $2.1 \times 10^{-09}$                   | $2.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 砷-76   | $4.0 \times 10^{-14}$                                         | $4.0 \times 10^{-12}$                                            | $7.4 \times 10^{-10}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 砷-77   | $7.7 \times 10^{-16}$                                         | $5.6 \times 10^{-14}$                                            | $3.8 \times 10^{-10}$                   | $4.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-211  | $4.0 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.8 \times 10^{-08}$                   | $6.3 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铜-193  | $1.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.2 \times 10^{-10}$                   | $1.5 \times 10^{-02}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铜-194  | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.5 \times 10^{-10}$                   | $4.6 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铜-195  | $7.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.6 \times 10^{-09}$                   | $5.0 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铜-198  | $3.8 \times 10^{-14}$                                         | $9.1 \times 10^{-13}$                                            | $8.4 \times 10^{-10}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铜-199  | $7.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.5 \times 10^{-10}$                   | $4.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钡-131  | $6.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.6 \times 10^{-10}$                   | $1.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钡-133  | $3.8 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.5 \times 10^{-09}$                   | $2.7 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钡-133m | $6.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.9 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钡-135m | $6.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.5 \times 10^{-10}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钡-140  | $1.6 \times 10^{-13}$                                         | $2.2 \times 10^{-12}$                                            | $2.1 \times 10^{-09}$                   | $9.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铍-7    | $4.8 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.2 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铍-10   | -                                                             | $1.7 \times 10^{-14}$                                            | $3.2 \times 10^{-08}$                   | $1.5 \times 10^{-01}$                                                            |
| 铋-205  | $1.4 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.2 \times 10^{-10}$                   | $2.5 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铋-206  | $2.9 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.7 \times 10^{-09}$                   | $2.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铋-207  | $1.4 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.2 \times 10^{-09}$                   | $5.5 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铋-210  | -                                                             | $7.7 \times 10^{-13}$                                            | $8.4 \times 10^{-08}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铋-210m | $2.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.6 \times 10^{-12}$                                            | $3.1 \times 10^{-06}$                   | $5.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铋-212  | $1.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.5 \times 10^{-12}$                                            | $3.0 \times 10^{-08}$                   | $4.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镅-247  | $9.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.5 \times 10^{-05}$                   | $2.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镅-249  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.5 \times 10^{-07}$                   | $2.3 \times 10^{-03}$                                                            |
| 溴-76   | $2.3 \times 10^{-13}$                                         | $1.6 \times 10^{-12}$                                            | $4.2 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 溴-77   | $2.9 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $8.7 \times 10^{-11}$                   | $1.2 \times 10^{-03}$                                                            |
| 溴-82   | $2.4 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.4 \times 10^{-10}$                   | $3.6 \times 10^{-02}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 碳-11   | 1.0 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 5.0 × 10 <sup>-13</sup>                                          | 5.0 × 10 <sup>-11</sup>                 | 4.8 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 碳-14   | -                                                             | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 5.8 × 10 <sup>-10</sup>                 | 8.8 × 10 <sup>-03</sup>                                                          |
| 钙-41   | 1.0 × 10 <sup>-16</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | -                                       | -                                                                                |
| 钙-45   | 1.0 × 10 <sup>-16</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 2.7 × 10 <sup>-09</sup>                 | 2.3 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 钙-47   | 3.7 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 2.7 × 10 <sup>-14</sup>                                          | 2.5 × 10 <sup>-09</sup>                 | 8.4 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镅-109  | 3.4 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 8.1 × 10 <sup>-09</sup>                 | 1.4 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镅-113m | -                                                             | 1.1 × 10 <sup>-14</sup>                                          | 1.1 × 10 <sup>-07</sup>                 | 4.0 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镅-115  | 2.6 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 3.0 × 10 <sup>-13</sup>                                          | 1.1 × 10 <sup>-09</sup>                 | 7.1 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镅-115m | 2.0 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 1.9 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 7.3 × 10 <sup>-09</sup>                 | 4.6 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 铈-139  | 1.5 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.8 × 10 <sup>-09</sup>                 | 1.3 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 铈-141  | 6.3 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 3.1 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 3.6 × 10 <sup>-09</sup>                 | 4.8 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 铈-143  | 2.7 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 1.1 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 8.1 × 10 <sup>-10</sup>                 | 4.6 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 铈-144  | 4.5 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 4.0 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 4.9 × 10 <sup>-08</sup>                 | 7.3 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镧-248  | 1.5 × 10 <sup>-16</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 8.2 × 10 <sup>-06</sup>                 | 2.8 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 镧-249  | 3.1 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 6.6 × 10 <sup>-05</sup>                 | 6.1 × 10 <sup>-03</sup>                                                          |
| 镧-250  | 1.5 × 10 <sup>-16</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 3.2 × 10 <sup>-05</sup>                 | 2.8 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 镧-251  | 1.1 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 6.7 × 10 <sup>-05</sup>                 | 5.4 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镧-252  | 7.5 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.8 × 10 <sup>-05</sup>                 | 5.4 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 镧-253  | 8.1 × 10 <sup>-18</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.2 × 10 <sup>-06</sup>                 | 2.3 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镧-254  | 7.1 × 10 <sup>-11</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 3.7 × 10 <sup>-05</sup>                 | 2.8 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 氯-36   | 1.0 × 10 <sup>-16</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-13</sup>                                          | 6.9 × 10 <sup>-09</sup>                 | 4.4 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 氯-38   | 1.2 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 4.5 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 4.7 × 10 <sup>-11</sup>                 | 5.0 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铜-240  | $2.2 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.9 \times 10^{-06}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铜-241  | $4.5 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.8 \times 10^{-08}$                   | $1.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铜-242  | $2.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.8 \times 10^{-06}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铜-243  | $1.2 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.8 \times 10^{-05}$                   | $3.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铜-244  | $1.9 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.1 \times 10^{-05}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铜-245  | $7.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.5 \times 10^{-05}$                   | $1.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铜-246  | $1.7 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.5 \times 10^{-05}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铜-247  | $3.1 \times 10^{-14}$                                         | $6.3 \times 10^{-15}$                                            | $5.1 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 铜-248  | $5.6 \times 10^{-12}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.0 \times 10^{-04}$                   | -                                                                                |
| 钴-55   | $1.9 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-12}$                                            | $5.5 \times 10^{-10}$                   | $3.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钴-56   | $3.0 \times 10^{-13}$                                         | $6.7 \times 10^{-14}$                                            | $6.3 \times 10^{-09}$                   | $9.5 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钴-57   | $1.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.4 \times 10^{-10}$                   | $2.1 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钴-58   | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.3 \times 10^{-15}$                                            | $2.0 \times 10^{-09}$                   | $7.4 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钴-58m  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钴-60   | $2.2 \times 10^{-13}$                                         | $1.4 \times 10^{-15}$                                            | $2.9 \times 10^{-08}$                   | $2.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铬-51   | $2.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铯-129  | $2.8 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $7.4 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铯-131  | $3.2 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铯-132  | $6.7 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.4 \times 10^{-10}$                   | $1.1 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铯-134  | $1.4 \times 10^{-13}$                                         | $2.8 \times 10^{-13}$                                            | $6.8 \times 10^{-09}$                   | $3.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-134m | $2.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $4.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-135  | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | $1.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-136  | $2.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.2 \times 10^{-15}$                                            | $1.3 \times 10^{-09}$                   | $4.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-137  | $5.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.2 \times 10^{-13}$                                            | $4.8 \times 10^{-09}$                   | $4.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铜-64   | $1.8 \times 10^{-14}$                                         | $9.1 \times 10^{-15}$                                            | $1.2 \times 10^{-10}$                   | $2.4 \times 10^{-02}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铜-67   | $1.0 \times 10^{-14}$                                         | $2.4 \times 10^{-15}$                                            | $5.8 \times 10^{-10}$                   | $4.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镅-159  | $5.0 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.5 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 镅-165  | $2.4 \times 10^{-15}$                                         | $1.1 \times 10^{-12}$                                            | $6.1 \times 10^{-11}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镅-166  | $2.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.2 \times 10^{-12}$                                            | $2.5 \times 10^{-09}$                   | $8.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-169  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.8 \times 10^{-10}$                   | $2.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-171  | $3.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.2 \times 10^{-12}$                                            | $2.2 \times 10^{-10}$                   | $5.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钐-147  | $4.5 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.0 \times 10^{-09}$                   | $7.4 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钐-148  | $2.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.7 \times 10^{-09}$                   | $1.4 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钐-149  | $6.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.7 \times 10^{-10}$                   | $3.8 \times 10^{-04}$                                                            |
| 钐-150  | $1.4 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-08}$                   | $3.9 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钐-150m | $4.3 \times 10^{-15}$                                         | $6.7 \times 10^{-13}$                                            | $1.9 \times 10^{-10}$                   | $4.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钐-152  | $1.0 \times 10^{-13}$                                         | $5.9 \times 10^{-15}$                                            | $3.9 \times 10^{-08}$                   | $2.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钐-152m | $2.7 \times 10^{-14}$                                         | $1.2 \times 10^{-12}$                                            | $2.2 \times 10^{-10}$                   | $3.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钐-154  | $1.1 \times 10^{-13}$                                         | $6.3 \times 10^{-13}$                                            | $5.0 \times 10^{-08}$                   | $5.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钐-155  | $5.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.5 \times 10^{-09}$                   | $8.7 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钐-156  | $1.1 \times 10^{-13}$                                         | $1.4 \times 10^{-12}$                                            | $3.3 \times 10^{-09}$                   | $4.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 氟-18   | $1.0 \times 10^{-13}$                                         | $3.6 \times 10^{-14}$                                            | $6.0 \times 10^{-11}$                   | $4.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铁-52   | $2.4 \times 10^{-13}$                                         | $3.1 \times 10^{-12}$                                            | $6.3 \times 10^{-10}$                   | $7.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铁-55   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.7 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铁-59   | $1.1 \times 10^{-13}$                                         | $2.3 \times 10^{-14}$                                            | $3.5 \times 10^{-09}$                   | $3.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铁-60   | $5.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.4 \times 10^{-07}$                   | $7.6 \times 10^{-03}$                                                            |
| 镓-67   | $1.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.3 \times 10^{-10}$                   | $8.6 \times 10^{-03}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 镓-68   | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $2.2 \times 10^{-12}$                                            | $5.1 \times 10^{-11}$                   | $4.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镓-72   | $2.3 \times 10^{-13}$                                         | $2.7 \times 10^{-12}$                                            | $5.5 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钆-146  | $1.9 \times 10^{-13}$                                         | $3.4 \times 10^{-15}$                                            | $6.8 \times 10^{-09}$                   | $2.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钆-148  | -                                                             | -                                                                | $2.5 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 钆-153  | $1.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.1 \times 10^{-09}$                   | $3.1 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钆-159  | $4.8 \times 10^{-15}$                                         | $3.2 \times 10^{-13}$                                            | $2.7 \times 10^{-10}$                   | $4.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锆-68   | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $2.2 \times 10^{-12}$                                            | $1.3 \times 10^{-08}$                   | $4.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锆-69   | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $4.5 \times 10^{-13}$                                            | $2.9 \times 10^{-10}$                   | $1.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锆-71   | $1.9 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 锆-77   | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $3.0 \times 10^{-12}$                                            | $3.6 \times 10^{-10}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铪-172  | $1.7 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.2 \times 10^{-08}$                   | $1.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铪-175  | $3.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $5.9 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铪-181  | $5.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.7 \times 10^{-09}$                   | $5.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铪-182  | $2.2 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 汞-194  | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.0 \times 10^{-08}$                   | $4.6 \times 10^{-03}$                                                            |
| 汞-195m | $3.2 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.4 \times 10^{-09}$                   | $3.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 汞-197  | $6.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.4 \times 10^{-09}$                   | $1.8 \times 10^{-03}$                                                            |
| 汞-197m | $7.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.2 \times 10^{-09}$                   | $7.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 汞-203  | $2.2 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.5 \times 10^{-09}$                   | $2.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铊-166  | $2.6 \times 10^{-15}$                                         | $2.3 \times 10^{-12}$                                            | $6.6 \times 10^{-10}$                   | $4.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铊-166m | $1.6 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.1 \times 10^{-07}$                   | $2.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碘-123  | $1.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.1 \times 10^{-10}$                   | $9.5 \times 10^{-03}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 碘-124  | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.7 \times 10^{-13}$                                            | $1.2 \times 10^{-08}$                   | $1.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碘-125  | $6.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.4 \times 10^{-08}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 碘-126  | $4.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.6 \times 10^{-13}$                                            | $2.9 \times 10^{-08}$                   | $2.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碘-129  | $3.4 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 碘-131  | $3.6 \times 10^{-14}$                                         | $5.0 \times 10^{-14}$                                            | $2.0 \times 10^{-08}$                   | $4.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碘-132  | $2.1 \times 10^{-13}$                                         | $2.3 \times 10^{-12}$                                            | $2.8 \times 10^{-10}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碘-133  | $5.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.4 \times 10^{-12}$                                            | $4.5 \times 10^{-09}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碘-134  | $2.4 \times 10^{-13}$                                         | $3.1 \times 10^{-12}$                                            | $7.2 \times 10^{-11}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碘-135  | $1.2 \times 10^{-13}$                                         | $1.6 \times 10^{-12}$                                            | $9.6 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铟-111  | $3.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.3 \times 10^{-10}$                   | $9.3 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铟-113m | $2.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $1.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铟-114m | $9.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.3 \times 10^{-09}$                   | $5.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铟-115m | $1.5 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.0 \times 10^{-11}$                   | $2.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-189  | $7.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.5 \times 10^{-10}$                   | $1.6 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铯-190  | $1.3 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.3 \times 10^{-09}$                   | $3.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-192  | $7.7 \times 10^{-14}$                                         | $2.2 \times 10^{-14}$                                            | $6.2 \times 10^{-09}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-193m | $1.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.2 \times 10^{-09}$                   | $9.3 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铯-194  | $8.3 \times 10^{-15}$                                         | $3.0 \times 10^{-12}$                                            | $5.6 \times 10^{-10}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钾-40   | $1.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.1 \times 10^{-12}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 钾-42   | $2.4 \times 10^{-14}$                                         | $4.5 \times 10^{-12}$                                            | $1.3 \times 10^{-10}$                   | $4.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钾-43   | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.4 \times 10^{-12}$                                            | $1.5 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 氦-81   | (*) $9.1 \times 10^{-16}$                                     | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 氦-85   | (*) $2.1 \times 10^{-16}$                                     | $7.1 \times 10^{-14}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 氦-85m  | (*) $1.3 \times 10^{-14}$                                     | $1.3 \times 10^{-13}$                                            | -                                       | -                                                                                |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 氦-87   | (*) 6.7 × 10 <sup>-14</sup>                                   | 4.8 × 10 <sup>-12</sup>                                          | -                                       | -                                                                                |
| 镧-137  | 3.3 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 8.6 × 10 <sup>-09</sup>                 | 2.8 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 镧-140  | 2.0 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 2.7 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 1.1 × 10 <sup>-09</sup>                 | 4.7 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镭-172  | 1.7 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.5 × 10 <sup>-09</sup>                 | 1.3 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镭-173  | 1.3 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 2.3 × 10 <sup>-09</sup>                 | 1.6 × 10 <sup>-03</sup>                                                          |
| 镭-174  | 1.2 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 4.0 × 10 <sup>-09</sup>                 | 9.6 × 10 <sup>-04</sup>                                                          |
| 镭-174m | 6.3 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 3.8 × 10 <sup>-09</sup>                 | 7.5 × 10 <sup>-04</sup>                                                          |
| 镭-177  | 3.0 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.1 × 10 <sup>-09</sup>                 | 3.8 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 镁-28   | 2.7 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 4.0 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 1.9 × 10 <sup>-09</sup>                 | 8.7 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 锰-52   | 3.1 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 1.4 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.4 × 10 <sup>-09</sup>                 | 1.5 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 锰-53   | 1.0 × 10 <sup>-16</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | -                                       | -                                                                                |
| 锰-54   | 7.7 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.5 × 10 <sup>-09</sup>                 | 2.8 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 锰-56   | 1.5 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 3.3 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 1.3 × 10 <sup>-10</sup>                 | 4.7 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 钼-93   | 1.2 × 10 <sup>-15</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 2.2 × 10 <sup>-09</sup>                 | 2.8 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 钼-99   | 1.6 × 10 <sup>-14</sup>                                       | 8.0 × 10 <sup>-13</sup>                                          | 9.7 × 10 <sup>-10</sup>                 | 5.1 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 氮-13   | 1.0 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 1.1 × 10 <sup>-12</sup>                                          | -                                       | 4.8 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 钠-22   | 2.0 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 2.6 × 10 <sup>-13</sup>                                          | 1.3 × 10 <sup>-09</sup>                 | 4.2 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 钠-24   | 3.3 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 5.0 × 10 <sup>-12</sup>                                          | 2.9 × 10 <sup>-10</sup>                 | 4.7 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |
| 铈-93m  | 2.0 × 10 <sup>-16</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 1.6 × 10 <sup>-09</sup>                 | 2.8 × 10 <sup>-05</sup>                                                          |
| 铈-94   | 1.5 × 10 <sup>-13</sup>                                       | 1.0 × 10 <sup>-15</sup>                                          | 4.5 × 10 <sup>-08</sup>                 | 4.0 × 10 <sup>-02</sup>                                                          |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素   | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_\beta$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|---------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铈-95    | $7.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $1.6 \times 10^{-09}$                   | $7.0 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铈-97    | $6.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.1 \times 10^{-12}$                                          | $4.7 \times 10^{-11}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钆-147   | $1.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.8 \times 10^{-13}$                                          | $2.3 \times 10^{-09}$                   | $4.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钆-149   | $3.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.6 \times 10^{-12}$                                          | $9.0 \times 10^{-11}$                   | $5.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镍-57    | $1.7 \times 10^{-13}$                                         | $1.5 \times 10^{-13}$                                          | $5.1 \times 10^{-10}$                   | $2.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镍-59    | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | -                                       | -                                                                                |
| 镍-63    | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $1.7 \times 10^{-09}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 镍-65    | $4.8 \times 10^{-14}$                                         | $2.3 \times 10^{-12}$                                          | $8.7 \times 10^{-11}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镆-235   | $7.1 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $4.0 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 镆-236   | $1.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $3.0 \times 10^{-06}$                   | $5.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镆-236 m | $4.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $5.0 \times 10^{-09}$                   | $1.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镆-237   | $3.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $2.1 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 镆-239   | $1.5 \times 10^{-14}$                                         | $3.8 \times 10^{-15}$                                          | $9.0 \times 10^{-10}$                   | $6.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-185   | $6.7 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $1.5 \times 10^{-09}$                   | $1.2 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钷-191   | $6.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $1.8 \times 10^{-09}$                   | $1.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-191m  | $7.7 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $1.5 \times 10^{-10}$                   | $1.0 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钷-193   | $6.7 \times 10^{-15}$                                         | $6.3 \times 10^{-13}$                                          | $5.1 \times 10^{-10}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-194   | $8.3 \times 10^{-15}$                                         | $3.2 \times 10^{-12}$                                          | $7.9 \times 10^{-08}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 磷-32    | -                                                             | $2.2 \times 10^{-12}$                                          | $3.2 \times 10^{-09}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 磷-33    | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $1.4 \times 10^{-09}$                   | $2.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镉-230   | $6.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $7.6 \times 10^{-07}$                   | $1.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镉-231   | $1.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                          | $1.3 \times 10^{-04}$                   | $1.5 \times 10^{-03}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 镭-233  | $1.9 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.7 \times 10^{-09}$                   | $4.2 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 铅-201  | $6.7 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.5 \times 10^{-11}$                   | $8.4 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铅-202  | $1.1 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | $1.7 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铅-203  | $2.8 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.1 \times 10^{-11}$                   | $1.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铅-205  | $1.2 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铅-210  | $4.2 \times 10^{-16}$                                         | $7.7 \times 10^{-13}$                                            | $9.8 \times 10^{-07}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铅-212  | $1.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.4 \times 10^{-12}$                                            | $2.3 \times 10^{-07}$                   | $1.0 \times 10^{-01}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 钋-103  | $2.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.0 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钋-107  | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 钋-109  | $1.4 \times 10^{-15}$                                         | $5.3 \times 10^{-13}$                                            | $3.6 \times 10^{-10}$                   | $5.9 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 钷-143  | $3.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.4 \times 10^{-09}$                   | $7.7 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钷-144  | $1.5 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.8 \times 10^{-09}$                   | $8.2 \times 10^{-04}$                                                            |
| 钷-145  | $3.8 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.4 \times 10^{-09}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钷-147  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.7 \times 10^{-09}$                   | $1.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-148m | $1.2 \times 10^{-13}$                                         | $1.3 \times 10^{-13}$                                            | $5.4 \times 10^{-09}$                   | $3.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-149  | $1.0 \times 10^{-15}$                                         | $5.9 \times 10^{-13}$                                            | $7.2 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-151  | $3.0 \times 10^{-14}$                                         | $5.6 \times 10^{-13}$                                            | $4.5 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 钷-210  | $7.9 \times 10^{-19}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.0 \times 10^{-06}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 镨-142  | $5.0 \times 10^{-15}$                                         | $2.8 \times 10^{-12}$                                            | $5.6 \times 10^{-10}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 镨-143  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $3.3 \times 10^{-13}$                                            | $2.3 \times 10^{-09}$                   | $4.4 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 铂-188  | $1.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $8.8 \times 10^{-10}$                   | $3.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铂-191  | $2.8 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.1 \times 10^{-10}$                   | $7.9 \times 10^{-03}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素   | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|---------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铂-193   | $1.1 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铂-193m  | $1.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.3 \times 10^{-10}$                   | $5.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铂-195m  | $6.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.9 \times 10^{-10}$                   | $5.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铂-197   | $2.1 \times 10^{-15}$                                         | $4.2 \times 10^{-14}$                                            | $9.1 \times 10^{-11}$                   | $4.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铂-197m  | $7.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $4.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-236   | $2.2 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.8 \times 10^{-05}$                   | $4.3 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钷-237   | $4.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.6 \times 10^{-10}$                   | $2.3 \times 10^{-04}$                                                            |
| 钷-238   | $1.9 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.3 \times 10^{-05}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钷-239   | $7.5 \times 10^{-17}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.7 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 钷-240   | $1.8 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.7 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 钷-241   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $8.5 \times 10^{-07}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钷-242   | $1.5 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.4 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 钷-244   | $3.2 \times 10^{-14}$                                         | $2.6 \times 10^{-12}$                                            | $4.4 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 镭-223   | $2.6 \times 10^{-14}$                                         | $2.5 \times 10^{-12}$                                            | $6.9 \times 10^{-06}$                   | $1.1 \times 10^{-01}$                                                            |
| 镭-224   | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $2.3 \times 10^{-12}$                                            | $3.1 \times 10^{-06}$                   | $1.0 \times 10^{-01}$                                                            |
| 镭-225   | $8.3 \times 10^{-15}$                                         | $4.5 \times 10^{-12}$                                            | $1.4 \times 10^{-05}$                   | $1.2 \times 10^{-01}$                                                            |
| 镭-226   | $1.5 \times 10^{-13}$                                         | $4.0 \times 10^{-12}$                                            | $1.9 \times 10^{-05}$                   | $1.0 \times 10^{-01}$                                                            |
| 镭-228   | $8.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.8 \times 10^{-12}$                                            | $2.6 \times 10^{-06}$                   | $5.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铷-81    | $5.9 \times 10^{-14}$                                         | $6.7 \times 10^{-14}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $3.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铷-83    | $4.8 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.1 \times 10^{-10}$                   | $6.4 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铷-84    | $8.3 \times 10^{-14}$                                         | $2.5 \times 10^{-14}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $1.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铷-86    | $8.3 \times 10^{-15}$                                         | $2.1 \times 10^{-12}$                                            | $9.6 \times 10^{-10}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铷-87    | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铷 (nat) | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铯-184  | $8.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.8 \times 10^{-09}$                   | $1.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-184m | $3.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.1 \times 10^{-09}$                   | $2.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-186  | $1.7 \times 10^{-15}$                                         | $5.0 \times 10^{-13}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-187  | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铯-188  | $5.0 \times 10^{-15}$                                         | $2.9 \times 10^{-12}$                                            | $5.5 \times 10^{-10}$                   | $5.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯-189  | $3.1 \times 10^{-15}$                                         | $4.0 \times 10^{-13}$                                            | $4.3 \times 10^{-10}$                   | $4.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铯（nat） | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铈-99   | $5.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $8.3 \times 10^{-10}$                   | $3.7 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铈-101  | $2.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-09}$                   | $1.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-102  | $2.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.6 \times 10^{-08}$                   | $5.1 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铈-102m | $4.5 \times 10^{-14}$                                         | $1.1 \times 10^{-13}$                                            | $6.7 \times 10^{-09}$                   | $1.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-103m | $2.2 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铈-105  | $7.1 \times 10^{-15}$                                         | $5.6 \times 10^{-15}$                                            | $3.4 \times 10^{-10}$                   | $3.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 氦-222  | $1.5 \times 10^{-13}$                                         | $3.8 \times 10^{-12}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 钆-97   | $2.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.1 \times 10^{-10}$                   | $2.1 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钆-103  | $4.5 \times 10^{-14}$                                         | $5.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.8 \times 10^{-09}$                   | $1.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钆-105  | $7.1 \times 10^{-14}$                                         | $8.3 \times 10^{-13}$                                            | $1.8 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钆-106  | $1.9 \times 10^{-14}$                                         | $4.5 \times 10^{-12}$                                            | $6.2 \times 10^{-08}$                   | $4.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 硫-35   | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.3 \times 10^{-09}$                   | $9.4 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铈-122  | $4.2 \times 10^{-14}$                                         | $2.3 \times 10^{-12}$                                            | $1.0 \times 10^{-09}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-124  | $1.6 \times 10^{-13}$                                         | $1.4 \times 10^{-12}$                                            | $6.1 \times 10^{-09}$                   | $4.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-125  | $4.2 \times 10^{-14}$                                         | $4.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.5 \times 10^{-09}$                   | $2.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-126  | $2.6 \times 10^{-13}$                                         | $7.7 \times 10^{-13}$                                            | $2.7 \times 10^{-09}$                   | $3.9 \times 10^{-02}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 钷-44   | $2.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.6 \times 10^{-12}$                                            | $1.9 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-46   | $1.9 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.4 \times 10^{-09}$                   | $3.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-47   | $9.1 \times 10^{-15}$                                         | $5.9 \times 10^{-15}$                                            | $7.0 \times 10^{-10}$                   | $3.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-48   | $3.0 \times 10^{-13}$                                         | $1.1 \times 10^{-12}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $4.3 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 硒-75   | $3.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.4 \times 10^{-09}$                   | $2.8 \times 10^{-03}$                                                            |
| 硒-79   | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.9 \times 10^{-09}$                   | $1.2 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 硅-31   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.7 \times 10^{-12}$                                            | $8.0 \times 10^{-11}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 硅-32   | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.1 \times 10^{-07}$                   | $1.7 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 钐-145  | $7.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.5 \times 10^{-09}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钐-147  | -                                                             | -                                                                | -                                       | -                                                                                |
| 钐-151  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.7 \times 10^{-09}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钐-153  | $5.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.1 \times 10^{-13}$                                            | $6.1 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 锡-113  | $2.7 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.5 \times 10^{-09}$                   | $1.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锡-117m | $1.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.3 \times 10^{-09}$                   | $7.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锡-119m | $1.6 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.0 \times 10^{-09}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 锡-121m | $7.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.2 \times 10^{-09}$                   | $3.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锡-123  | $6.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.3 \times 10^{-12}$                                            | $7.7 \times 10^{-09}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锡-125  | $2.8 \times 10^{-14}$                                         | $2.7 \times 10^{-12}$                                            | $3.0 \times 10^{-09}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锡-126  | $1.5 \times 10^{-13}$                                         | $1.7 \times 10^{-12}$                                            | $2.7 \times 10^{-08}$                   | $7.7 \times 10^{-02}$                                                            |
|        |                                                               |                                                                  |                                         |                                                                                  |
| 铟-82   | $1.0 \times 10^{-13}$                                         | $4.2 \times 10^{-12}$                                            | $1.0 \times 10^{-08}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铟-83   | $7.7 \times 10^{-14}$                                         | $3.7 \times 10^{-13}$                                            | $3.4 \times 10^{-10}$                   | $1.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铟-85   | $4.8 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.7 \times 10^{-10}$                   | $3.3 \times 10^{-04}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 锶-85m  | $1.9 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $1.5 \times 10^{-03}$                                                            |
| 锶-87m  | $3.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $8.5 \times 10^{-03}$                                                            |
| 锶-89   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.6 \times 10^{-12}$                                            | $7.5 \times 10^{-09}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锶-90   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $3.1 \times 10^{-12}$                                            | $1.5 \times 10^{-07}$                   | $8.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锶-91   | $6.6 \times 10^{-14}$                                         | $3.3 \times 10^{-12}$                                            | $4.1 \times 10^{-10}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 锶-92   | $1.2 \times 10^{-14}$                                         | $9.1 \times 10^{-13}$                                            | $4.2 \times 10^{-10}$                   | $8.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 氚（H-3） | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | -                                                                                |
| 钽-178m | $9.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $6.9 \times 10^{-11}$                   | $3.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钽-179  | $3.2 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.2 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钽-182  | $1.1 \times 10^{-13}$                                         | $7.7 \times 10^{-14}$                                            | $9.7 \times 10^{-09}$                   | $5.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铽-149  | $1.2 \times 10^{-13}$                                         | $2.2 \times 10^{-14}$                                            | $4.3 \times 10^{-09}$                   | $1.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铽-157  | $3.2 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 铽-158  | $7.1 \times 10^{-14}$                                         | $6.3 \times 10^{-15}$                                            | $4.3 \times 10^{-08}$                   | $1.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铽-160  | $1.0 \times 10^{-13}$                                         | $4.3 \times 10^{-13}$                                            | $6.6 \times 10^{-09}$                   | $4.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铽-161  | $4.0 \times 10^{-15}$                                         | $4.2 \times 10^{-15}$                                            | $1.2 \times 10^{-09}$                   | $3.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-95m  | $6.7 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $8.7 \times 10^{-10}$                   | $2.3 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铈-96   | $2.3 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.1 \times 10^{-10}$                   | $2.0 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铈-96m  | $2.3 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.0 \times 10^{-10}$                   | $2.0 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铈-97   | $1.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铈-97m  | $1.2 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.1 \times 10^{-09}$                   | $1.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-98   | $1.3 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | $4.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-99   | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | $3.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-99m  | $1.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $6.5 \times 10^{-03}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 碲-121  | $5.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.9 \times 10^{-10}$                   | $2.8 \times 10^{-04}$                                                            |
| 碲-121m | $2.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.2 \times 10^{-09}$                   | $1.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-123m | $1.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.9 \times 10^{-09}$                   | $2.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-125m | $5.0 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.3 \times 10^{-09}$                   | $3.1 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-127  | $4.5 \times 10^{-16}$                                         | $5.3 \times 10^{-14}$                                            | $1.2 \times 10^{-10}$                   | $4.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-127m | $2.0 \times 10^{-15}$                                         | $5.3 \times 10^{-14}$                                            | $7.2 \times 10^{-09}$                   | $5.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-129  | $5.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.5 \times 10^{-12}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-129m | $7.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.2 \times 10^{-12}$                                            | $6.3 \times 10^{-09}$                   | $6.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-131m | $1.3 \times 10^{-13}$                                         | $8.3 \times 10^{-13}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $5.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 碲-132  | $2.0 \times 10^{-13}$                                         | $2.0 \times 10^{-12}$                                            | $2.2 \times 10^{-09}$                   | $6.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-227  | $9.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.6 \times 10^{-06}$                   | $5.9 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钷-228  | $1.3 \times 10^{-13}$                                         | $1.9 \times 10^{-12}$                                            | $3.9 \times 10^{-05}$                   | $1.0 \times 10^{-01}$                                                            |
| 钷-229  | $8.1 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $9.9 \times 10^{-05}$                   | $1.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-230  | $1.4 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.0 \times 10^{-05}$                   | -                                                                                |
| 钷-231  | $2.6 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.1 \times 10^{-06}$                   | $2.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷-232  | $8.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 钷-234  | $2.4 \times 10^{-15}$                                         | $3.3 \times 10^{-12}$                                            | $7.3 \times 10^{-09}$                   | $5.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钷（nat） | $2.2 \times 10^{-13}$                                         | $3.7 \times 10^{-12}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-44   | $2.1 \times 10^{-13}$                                         | $1.6 \times 10^{-12}$                                            | $1.2 \times 10^{-07}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铀-200  | $1.2 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.4 \times 10^{-10}$                   | $3.9 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铀-201  | $8.3 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.7 \times 10^{-11}$                   | $7.0 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铀-202  | $4.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.0 \times 10^{-10}$                   | $1.7 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铀-204  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-13}$                                            | $4.4 \times 10^{-10}$                   | $4.0 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钍-167  | $1.4 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $3.4 \times 10^{-02}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素     | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|-----------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 铊-170     | $5.0 \times 10^{-16}$                                         | $3.8 \times 10^{-13}$                                            | $6.6 \times 10^{-09}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铊-171     | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.3 \times 10^{-09}$                   | $2.7 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铀-230 (F) | $1.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.6 \times 10^{-07}$                   | $9.0 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铀-230 (M) | $1.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.2 \times 10^{-05}$                   | $9.0 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铀-230 (S) | $1.9 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.5 \times 10^{-05}$                   | $9.0 \times 10^{-03}$                                                            |
| 铀-232 (F) | $2.1 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.0 \times 10^{-06}$                   | $1.5 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铀-232 (M) | $2.1 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.2 \times 10^{-06}$                   | $1.5 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铀-232 (S) | $2.1 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.5 \times 10^{-05}$                   | $1.5 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铀-233 (F) | $1.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.7 \times 10^{-07}$                   | -                                                                                |
| 铀-233 (M) | $1.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.2 \times 10^{-06}$                   | -                                                                                |
| 铀-233 (S) | $1.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $8.7 \times 10^{-06}$                   | -                                                                                |
| 铀-234 (F) | $1.7 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.5 \times 10^{-07}$                   | -                                                                                |
| 铀-234 (M) | $1.7 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.1 \times 10^{-06}$                   | -                                                                                |
| 铀-234 (S) | $1.7 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $8.5 \times 10^{-06}$                   | -                                                                                |
| 铀-235 (F) | $1.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-235 (M) | $1.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-235 (S) | $1.6 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-236 (F) | $1.5 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-236 (M) | $1.5 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.9 \times 10^{-06}$                   | -                                                                                |
| 铀-236 (S) | $1.5 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.9 \times 10^{-06}$                   | -                                                                                |
| 铀-238 (F) | $1.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-238 (M) | $1.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-238 (S) | $1.3 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀(nat)    | $1.6 \times 10^{-13}$                                         | $7.9 \times 10^{-12}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀(dep)    | $2.2 \times 10^{-15}$                                         | $3.1 \times 10^{-12}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 钷-48      | $2.6 \times 10^{-13}$                                         | $3.3 \times 10^{-13}$                                            | $2.3 \times 10^{-09}$                   | $2.5 \times 10^{-02}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素  | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 钷-49   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.8 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钨-178  | $1.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.6 \times 10^{-11}$                   | $6.1 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钨-181  | $3.8 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $5.2 \times 10^{-05}$                                                            |
| 钨-185  | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $1.4 \times 10^{-10}$                   | $3.4 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钨-187  | $4.5 \times 10^{-14}$                                         | $4.8 \times 10^{-13}$                                            | $2.0 \times 10^{-10}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钨-188  | $5.0 \times 10^{-15}$                                         | $2.7 \times 10^{-12}$                                            | $1.1 \times 10^{-09}$                   | $7.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铀-122  | (*) $9.1 \times 10^{-14}$                                     | $2.5 \times 10^{-12}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-123  | (*) $5.6 \times 10^{-14}$                                     | $1.0 \times 10^{-13}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-127  | (*) $2.6 \times 10^{-14}$                                     | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-131m | (*) $2.6 \times 10^{-15}$                                     | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-133  | (*) $4.8 \times 10^{-15}$                                     | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 铀-135  | (*) $2.2 \times 10^{-14}$                                     | $2.9 \times 10^{-13}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 钇-87   | $7.1 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.0 \times 10^{-10}$                   | $8.7 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钇-88   | $2.3 \times 10^{-13}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $4.1 \times 10^{-09}$                   | $1.3 \times 10^{-04}$                                                            |
| 钇-90   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $3.1 \times 10^{-12}$                                            | $1.5 \times 10^{-09}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钇-91   | $3.2 \times 10^{-16}$                                         | $1.7 \times 10^{-12}$                                            | $8.4 \times 10^{-09}$                   | $4.6 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钇-91m  | $5.0 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $2.3 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钇-92   | $2.3 \times 10^{-14}$                                         | $4.5 \times 10^{-12}$                                            | $2.0 \times 10^{-10}$                   | $4.9 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钇-93   | $7.7 \times 10^{-15}$                                         | $3.8 \times 10^{-12}$                                            | $4.3 \times 10^{-10}$                   | $4.8 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-169  | $2.9 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.8 \times 10^{-09}$                   | $2.7 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-175  | $3.7 \times 10^{-15}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $7.0 \times 10^{-10}$                   | $3.2 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-65   | $5.3 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $2.9 \times 10^{-09}$                   | $6.7 \times 10^{-04}$                                                            |
| 铈-69   | $1.0 \times 10^{-16}$                                         | $3.1 \times 10^{-13}$                                            | $5.0 \times 10^{-11}$                   | $4.5 \times 10^{-02}$                                                            |
| 铈-69m  | $2.9 \times 10^{-14}$                                         | $2.5 \times 10^{-13}$                                            | $2.9 \times 10^{-10}$                   | $4.7 \times 10^{-02}$                                                            |

表 II.2. 放射性核素的剂量和剂量率系数（续）

| 放射性核素 | $\dot{e}_{pt}$ (a)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $\dot{e}_{\beta}$ (b)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | $e_{inh}$ (c)<br>(Sv·Bq <sup>-1</sup> ) | $\dot{h}_{skin}$ (d)<br>(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 钋-88  | $3.8 \times 10^{-14}$                                         | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | $3.5 \times 10^{-09}$                   | $1.3 \times 10^{-03}$                                                            |
| 钋-93  | -                                                             | $1.0 \times 10^{-15}$                                            | -                                       | -                                                                                |
| 钋-95  | $5.6 \times 10^{-14}$                                         | $2.2 \times 10^{-15}$                                            | $5.5 \times 10^{-09}$                   | $3.3 \times 10^{-02}$                                                            |
| 钋-97  | $1.1 \times 10^{-13}$                                         | $2.7 \times 10^{-12}$                                            | $1.0 \times 10^{-09}$                   | $4.9 \times 10^{-02}$                                                            |

解释性说明

- (a) 在 1 米处计算的光子引起的外部剂量的有效剂量率系数；
- (b) 在 1 米处计算的  $\beta$  辐射引起的外部剂量当量皮肤剂量率系数；
- (c) 吸入有效剂量系数；
- (d) 皮肤剂量污染的当量皮肤剂量系数；
- (\*) 对于有效剂量系数及当量皮肤剂量系数，用于气态同位素引起的浸没剂量见附录 I 表 I.1。

表 II.3. 铀在不同浓缩水平下的比活度值

| 铀混合物中铀-235 的<br>质量百分比 | 比活度 <sup>a、b</sup> |                       |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                       | 贝可/克               | 居里/克                  |
| 0.45                  | $1.8 \times 10^4$  | $5.0 \times 10^{-7}$  |
| 0.72（天然）              | $2.6 \times 10^4$  | $7.06 \times 10^{-7}$ |
| 1.0                   | $2.8 \times 10^4$  | $7.6 \times 10^{-7}$  |
| 1.5                   | $3.7 \times 10^4$  | $1.0 \times 10^{-6}$  |
| 5.0                   | $1.0 \times 10^5$  | $2.7 \times 10^{-6}$  |
| 10.0                  | $1.8 \times 10^5$  | $4.8 \times 10^{-6}$  |
| 20.0                  | $3.7 \times 10^5$  | $1.0 \times 10^{-5}$  |
| 35.0                  | $7.4 \times 10^5$  | $2.0 \times 10^{-5}$  |
| 50.0                  | $9.3 \times 10^5$  | $2.5 \times 10^{-5}$  |
| 90.0                  | $2.2 \times 10^6$  | $5.8 \times 10^{-5}$  |
| 93.0                  | $2.6 \times 10^6$  | $7.0 \times 10^{-5}$  |
| 95.0                  | $3.4 \times 10^6$  | $9.1 \times 10^{-5}$  |

- <sup>a</sup> 比活度值包括铀-234 的活度，铀-234 在浓缩过程中浓缩，这些值不包括任何子代产物贡献。这些值是来自通过气体扩散法浓缩的天然铀物质。
- <sup>b</sup> 如果物质来源不明，则应当通过测量或使用同位素比率数据来计算比活度。

附录 II 参考文献

[II.1] 国际放射防护委员会《剂量学计算用核衰变数据》，国际放射防护委员会第 107 号出版物，国际放射防护委员会年刊第 38 期（2008 年）。

## 附录 III

### 确定最小隔离距离示例计算

#### 介绍

III.1. “运输条例”以三种方式对过境运输和存储采取隔离：

- (a) 将放射性物质货包与公众经常进入的区域隔离，并提供充分的辐射防护（第 562 (a) 和 (b) 段）；
- (b) 将放射性物质货包与未冲洗的照相胶卷货包隔离，并保护胶卷不被意外曝光或雾化（第 562 (c) 段）；
- (c) 将放射性物质货包与其他危险货物货包隔离（第 506 段和第 562 (d) 段）。

III.2. 本附录提供指导说明如何制定标准将放射性物质货包与工作人员和公众经常进入的区域隔离。类似的程序也可用于制定保护未冲洗胶卷的标准。将放射性物质货包与其他危险货物隔离的方法在第 562.10 段作了简要概述。

III.3. 一般来说，多式联运当局通过建立基于“运输条例”第 562 段剂量标准的最小隔离距离表来实现辐射防护隔离（另见“运输条例”表 11 关于临界安全隔离距离的脚注 b 和 c）。

III.4. 下面概述的建立隔离距离的方法在许多方面是保守的。例如，“运输条例”第 562 段剂量标准适用于边界上经常居留区域。当存在放射性物质货包时，个人将在居留区域内移动，因此他们的照射量将低于这些剂量标准[III.1]。计算中使用的剂量率是基于一个货包的运输指数或一组货包中运输指数的总和。因此，对于货包的阵列，阵列内的自屏蔽是不考虑的，实际剂量率将低于计算所依据的剂量率。

III.5. 为了用该方法确定最小隔离距离，首先必须建立一个给定运输方式的运输工况模式。模式的开发需要考虑众多的变量。这些考虑是众所周知的，在以前对空运[III.2、III.3]和海运[III.2]所作的计算中都有记载。该模式中的重要参数包括：

- (a) 乘员和公众成员（即代表人）每年最长旅行时间（MATPs）。
- (b) 放射性运输系数（RTF），定义为使用 II 类—黄色和 III 类—黄色放射性物质货包进行的年度旅行次数与所有旅行总数的比例。<sup>1</sup>
- (c) 乘员和公众的最大年照射时间（MAETs），即相关的 MATP 乘以适当的放射性运输系数 RTF，即：

$$\text{MAET (小时/年)} = \text{MATP (小时/年)} \times \text{RTF} \quad (\text{III.1})$$

- (d) 适用剂量值（DV<sub>s</sub>）来自“运输条例”第 562 段适用于乘员和公众。
- (e) 乘员及公众成员的参考剂量率（RDR<sub>s</sub>），用作确定最小隔离距离的基准，并由剂量值除以适用的最大年照射时间而得，即：

$$\text{RDR (毫希沃特/年小时)} = \text{DV (毫希沃特/年)} / \text{MAET (小时/年)} \quad (\text{III.2})$$

III.6. 下面的示例显示了如何确定客机和货机的隔离距离。该示例是基于一组特定的假设和计算技术，其他计算技术也是可能的。考虑了以下三种可能的配置：

- (a) 在客机主甲板下将放射性物质货包堆垛在一组；
- (b) 在客机主甲板以下，将放射性物质货包堆垛成多组，各组之间有规定的隔离距离；
- (c) 在客货两用飞机（航空业称为“组合”飞机）或货运飞机上的主甲板堆垛。

III.7. 在下面的计算中，所有货包和货包组都被视为单点源，其剂量率可以用平方反比关系来描述。考虑货包尺寸和堆垛配置的细节通常会导致所需的隔离距离的小幅减小。因此，将所有货包组视为单点源是保守的。

---

<sup>1</sup> I 类—白色货包不包括在此范围内，因为它们基本上没有辐射照射危害。

### 客机主甲板下堆垛的货包组

III.8. 在典型的客机中，货包装在客舱正下方的货舱里。处于放射性物质货包或货包组正上方座位上的乘客将受到最高剂量的辐射。所有其他乘客都将暴露在较低的放射性水平上。该情况如图 III.1 所示。

III.9. 在一架典型的飞机上，一个货包（或货包组）内的源与受照点（代表乘客）之间所需的实际最小隔离距离（AMD）将是货包与乘客舱边界的距离（S，以米为单位）、座位高度（尽管大多数飞机的实际座位高度约为 0.5 米，但保守地假想为 0.4 米）和货包半径（r，以米为单位）：

$$AMD = S + 0.4 + r \tag{III.3.}$$

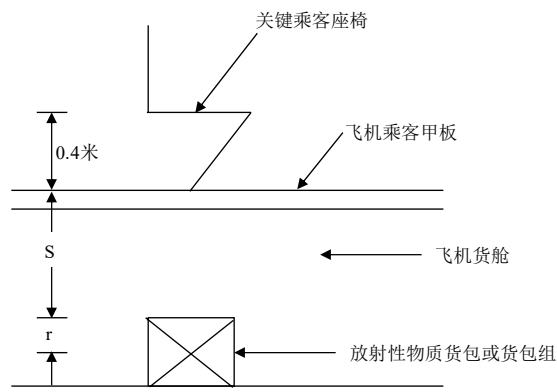


图 III.1. 客机中客货的典型构型，用于确定隔离距离。

III.10. 该运输指数提供了一个精确的测量最大剂量率在 1 米距离货包表面。运输指数需要除以 100 的系数才能得到以毫希沃特/小时为单位的剂量率。因此，平方反比定律给出：

$$RDR = (TI/100) (TF_f) (1.0+r)^2 / (AMD)^2 \tag{III.4}$$

式中

RDR 是座椅高度的参考剂量率（毫希沃特/小时）；

TI 是运输指数；

TF<sub>f</sub> 是客舱地板的传输系数，即辐射源和乘客之间通过飞机结构的辐射分数（无量纲）；

r 是货包或货包组的半径（最小尺寸的一半）（米）；

AMD 到剂量点的实际最小距离（米）。

III.11. 将公式 (III.3) 代入公式 (III.4) 可得：

$$RDR = (TI/100)(TF_f)(1.0+r)^2/(S+0.4+r)^2 \quad (III.5)$$

III.12. 对于 S 的求解，给出：

$$S = [(TI \times TF_f)/(100 \times RDR)]^{1/2}(1.0+r)-(r+0.4) \quad (III.6)$$

III.13. 传输系数（TF<sub>f</sub>）随从货包和飞机地板结构发射的辐射能量而变化。典型的传输系数从 0.7—1.0 不等。本“安全导则”表 III.1 所示的运输指数、传输系数和货包尺寸的组合被选为保守但现实的模式。

III.14. 参考剂量率（RDR）由公式 (III.1、III.2) 确定。假想放射性运输系数为 1/10[III.4]。据估计，普通旅客每年可飞行 500 小时，因此，代表人的 MATP 被假想为 500 小时/年。因此，从公式 (III.1)：

$$MAET = (500 \text{ 小时/年}) \times (0.1) = 50 \text{ 小时/年} \quad (III.7)$$

III.15. 乘客的适用剂量值，见“运输条例”第 562 (b) 段。为 1 毫希沃特/年，因此适用的 RDR 来自公式 (III.2)，是：

$$RDR = (1 \text{ 毫希沃特/年}) / (50 \text{ 小时/年}) = 0.02 \text{ 毫希沃特/小时} \quad (III.8)$$

III.16. 对于客机主甲板以下的堆垛，由于驾驶舱相对于货物区域的位置，飞行员的照射应当尽量减少。

III.17. 根据这些假设，公式 (III.6) 用于计算本“安全导则”表 III.2 第 2 栏所示的隔离距离。还显示了国际民用航空组织《危险货物安全空运技术指示》[III.5]使用的隔离值以供比较。为了在国际运输组织条例中使用，为方便起见，这些数值通常四舍五入。

表 III.1. 传输系数

| 运输指数 (TI) | 传输系数 (TF <sub>f</sub> ) | 货包半径 (r) (米) |
|-----------|-------------------------|--------------|
| 0—1.0     | 1.0                     | 0.05         |
| 1.1—2.0   | 0.8                     | 0.1          |
| 2.1—50    | 0.7                     | 0.4          |

表 III.2. 客机主甲板下单组货包隔离距离随运输指数的变化

| 组内总货包运输<br>指数 (TI) | 垂直隔离距离 (货包顶部至主甲板楼层 (米)) |                                              |
|--------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
|                    | 计算取值 <sup>a</sup>       | 2017 年至 2018 年间<br>国际民用航空组织技术说明 <sup>b</sup> |
| 1.0                | 0.29                    | 0.30                                         |
| 2.0                | 0.48                    | 0.50                                         |
| 3.0                | 0.63                    | 0.70                                         |
| 4.0                | 0.86                    | 0.85                                         |
| 5.0                | 1.05                    | 1.00                                         |
| 6.0                | 1.23                    | 1.15                                         |
| 7.0                | 1.39                    | 1.30                                         |
| 8.0                | 1.54                    | 1.45                                         |
| 9.0                | 1.68                    | 1.55                                         |
| 10.0               | 1.82                    | 1.65                                         |

<sup>a</sup> 使用公式 (III.6) 和本附录概述的假设进行计算。

<sup>b</sup> 参考文献[III.5]。

客机多组货包的主甲板下堆垛

III.18. 需要注意的是，计算的垂直隔离距离对于运输指数为 5 的单独货包或货包组时，在大多数飞机上可以取 1.05 米，但对于许多飞机来说，不可能获得 1.6 米以上的垂直隔离距离。这将限制可以放在客机上的货包组的总运输指数。为增加客机可运载的总运输指数，有必要在机腹货舱内将货包或货包组隔开。

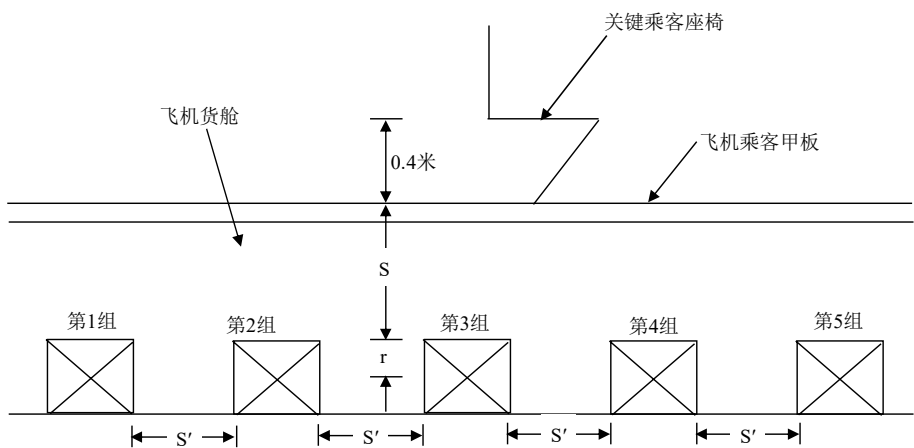


图 III.2. 客机中乘客和特殊货物的典型构型，用于确定隔离距离 S 和间隔距离 S'。

图 III.2 描绘了 5 组货包的配置，每组货包具有不同的总运输指数值，组之间具有相等的隔离距离 S'。乘客的最高剂量率是在中间货包组正上方的座位上。

III.19. 对于如图 III.2 所示的结构，平方反比定律得出：

$$RDR = TF_f \sum_{i=1}^s (TI_i / 100) (1.0 + r_i)^2 / (AMD_i)^2 \quad (III.9.)$$

III.20. 假定：

$$TI_i = 4, i = 1 \text{ 至 } 5$$

$$r_i = 0.4 \text{ m}, i = 1 \text{ 至 } 5$$

$$TF_f = 0.7$$

RDR = 0.02 毫希沃特/小时，表明：

$$AMD_1 = AMD_5 = \sqrt{(r + S + 0.4)^2 + (4r + 2S')^2} \quad (III.10.)$$

$$AMD_2 = AMD_4 = \sqrt{(r + S + 0.4)^2 + (4r + 2S')^2} \quad (III.11.)$$

$$AMD_3 = r + S + 0.4 \quad (III.12)$$

III.21. 公式 (III.9) — (III.12) 结合起来给出一个含有两个未知数和 S' 的公式。S 和 S' 的各种组合将允许总运输指数为 20 的货包托运，隔离距离 S 小于 2.9 米。例如，如图 III.2 所示，将 5 组每组总运输指数为 4 的货包放置在一起，隔离距离 S 为 1.6 米，间距 S' 为 2.11 米，在座位高度处的最大剂量率为 0.02 毫希沃特/小时。因此，隔离和间隔的各种组合将安全地控制大型运输指数货物乘客的辐射照射。

组合式或货运飞机的主甲板堆垛

III.22. 对于该配置，除了  $TF_w$ （一个被居留隔间墙壁的传输系数）被假想大于或等于 0.8 之外，所有先前假想参数都被使用。

III.23. 对于乘员，假设<sup>2</sup>如下：

$MATP = 1000 \text{ 小时/年}$

$RTF = 1/4$

$MAET = (1000 \text{ 小时/年}) \times (1/4) = 250 \text{ 小时/年}$

$DV = 5 \text{ 毫希沃特/年}$ （取自“运输条例”第 562 (a) 段）

$RDR = (5 \text{ 毫希沃特/年}) / (250 \text{ 小时/年}) = 0.02 \text{ 毫希沃特/小时}$

III.24. 这里还使用了客机中用于乘客的 MATP 和 MAET 值。在这些假设下，对组合式飞机中的乘客和货机中乘员的计算将得到相同的隔离距离。

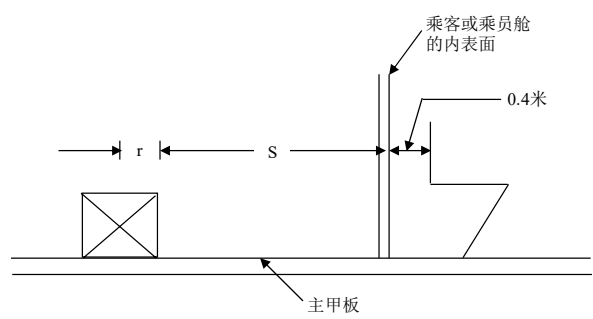


图 III.3. 组合飞机或货机上主甲板堆垛的典型配置。

<sup>2</sup> 此处为乘员假设的 MATP 和 RTF 值未经实际飞行情况核实。

III.25. 组合式货机的情况如图 III.3 所示。坐着人员的座椅靠背与居留隔间内壁之间的最小水平距离也假想为 0.4 米。这可能是一个保守的值，因为如果货物在前面，乘客的脚将靠在隔板上，如果货物在后面，隔板和后座之间通常会有仪器仪表、厨房、厕所或至少是行李或座椅倾斜空间。对于该情况，公式 (III.3) 适用于 AMD，而 S 可从下式算出：

$$S = [(TI \times TF_w)/(100 \times RDR)]^{1/2}(1+r)-(r+0.4)$$

(III.13)

III.26. 本“安全导则”表 III.3 显示了组合飞机和货机的计算隔离距离。

表 III.3. 组合式货机主甲板堆垛隔离距离随运输指数的变化

| 组内货包的总运输指数 | 水平隔离距离（货包组的前表面到居留隔间的内壁（米）） |
|------------|----------------------------|
| 1.0        | 0.29                       |
| 2.0        | 0.48                       |
| 5.0        | 1.18                       |
| 10.0       | 2.00                       |
| 20.0       | 3.16                       |
| 30.0       | 4.05                       |
| 40.0       | 4.80                       |
| 50.0       | 5.46                       |
| 100.0      | 8.05                       |
| 150.0      | 10.04                      |
| 200.0      | 11.72                      |

### 附录 III 参考文献

- [III.1] WILSON, C.K., “放射性物质的空运”, 《辐射防护剂量学》第 48 1 期 (1993 年) 第 129—133 页。
- [III.2] GIBSON, R., “放射性物质的安全运输”, 培格曼出版社, 牛津和纽约 (1966 年)。
- [III.3] 美国能源部《一种评价水生和陆生生物辐射剂量的分级方法》(DOE-STD-1153-2002), 美国能源部, 华盛顿特区 (2002 年)。
- [III.4] GELDER, R., “正常放射性物质运输的放射性影响”, 国家辐射防护和测量委员会第 M219 号报告, 国家辐射防护委员会, 英国奇尔顿 (1990 年)。
- [III.5] 国际民用航空组织《危险货物航空安全运输技术指引》(2021—2022 年版), 国际民用航空组织, 蒙特利尔 (2020 年)。

## 附录 IV

### 运输过程中货包堆垛和保持

#### 介绍

IV.1. 为了安全运输放射性货包，“运输条例”要求在运输操作期间限制货包在运输工具内或运输工具上移动。“运输条例”相关要求以下列方式适用：

- 第 564 段：托运货物要求安全存放—这可以通过各种保持系统来确保（见下文）。
- 第 607 段：要求在设计每一货包时适当考虑到每一种预定运输方式的保持系统。
- 第 612 段：要求不属于货包的保持系统不降低货包的安全。
- 第 613 段：要求货包的部件、内容物及其各自的保持系统的设计应当使货包的完整性在常规运输工况下不受影响。
- 第 638 段：要求在正常或事故运输工况下，栓系或其他保持系统对货包或其附着点施加的应力不损坏货包的完整性。

与这些段落相关的某些方面在本出版物正文中的相关咨询段落中有所说明，但本附录和参考文献[IV.1—IV.36]载有更多细节。

IV.2. 本附录提供了考虑在常规运输工况下应用于货包的保持系统负载影响的指导。它描述了证实符合货包设计要求的可能方法。货包将包括附着点，但不包括保持系统的其他部分。保持系统的其他部件不属于货包的那部分按模态和国家要求处理。

IV.3. 在常规运输工况下（见“运输条例”第 106 段）作用于货包的惯性力可能是由以下原因造成的：

- (a) 凹凸不平的道路或轨道；
- (b) 振动；
- (c) 制动和加速；
- (d) 方向变化；

- (e) 轨道调车（在允许的情况下）；
- (f) 船舶在波涛汹涌的海面上的运动；
- (g) 空运中的湍流。

在下列情况下作用在货包上的惯性力不被视为常规运输工况，本附录不涉及：

- (a) 与车辆和障碍物的轻微撞击；
- (b) 轨道调车（在不允许的情况下）；
- (c) 非常特别的海况；
- (d) 空运中的紧急着陆。

IV.4. 货包保持系统必须设计成在所有运输工况下以可预测的方式运行。但是，在正常或事故运输工况下（见“运输条例”第106段），为了保持货包的完整性，允许并可能要求货包因破损或设计上解除约束而与运输隔离作为设计的一部分。

## 定义和一般性评论

IV.5. 典型的保持系统包括，除其他物项外，拉伸系带或栓系、网、货包上固定在运输框架或运输工具上的支架（或螺栓连接到的法兰）上的耳轴、国际标准化组织扭锁、楔块或静置物。其中一些保持方法可以结合使用。图 4.1 显示了保持系统各部件的示例。

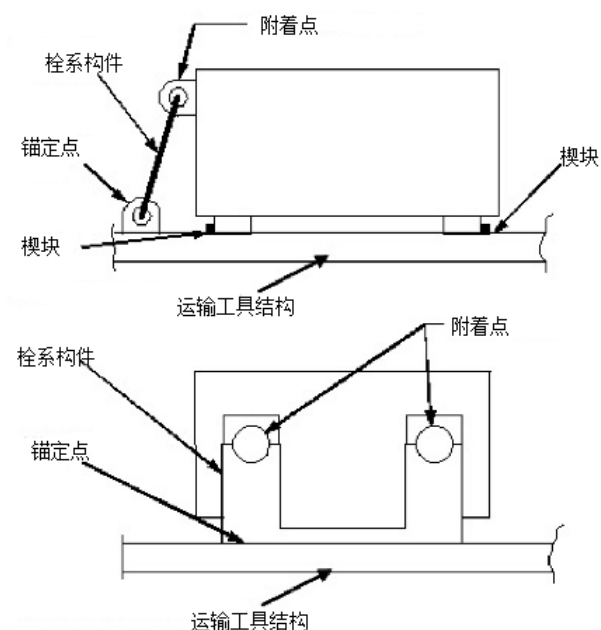


图 IV.1. 保持系统部件。

IV.6. 为本附录指导的目的，适用以下术语定义：

**附着点：** 货包上用于固定保持构件的配件。

**锚定点：** 运输工具上固定保持构件的配件。

**楔块：** 固定在运输工具上以抵抗水平惯性力的配件。

**衬垫：** 用来保护船舱内货物或集装箱内衬垫的松散物质。

**保持：** 在常规运输过程中，使用机械设备来限制货包并防止在运输工具内或运输工具上移动。

**保持构件：** 作为保持系统部件的机械设备，如衬垫、支撑构件、楔块、栓系构件、托架、货物网。

**保持系统：** 为保持货包而设计的保持构件、附着点和锚定点的组合或排列（视情况而定）。

**托架：** 装在运输工具上用来运送未固定货包的框架。

堆垛： 将放射性物质货包与其他货物（放射性和非放射性）相对地放置在运输工具内部或上方。

栓系构件： 将一个或多个附着点连接到一个或多个锚定点的一种保持构件（如钢丝绳、链条或系杆）。

栓系系统： 由一个或多个附着点、栓系构件和锚定点组成的一种保持系统。

IV.7. 附着点是货包的部件。保持系统的所有其他部分，如栓系构件（如系带、绳索、链条或带子）、锚定点和楔块，不是货包的一部分。

IV.8. 在常规运输工况下，保持方法应当不导致货包损坏或在货包部件或其附着点上产生超出组成材料屈服应力的应力。

IV.9. 托运人和承运人有责任确保货包的运输符合监管和多式联运要求。参与栓系人员应当得到与其职责相称的充分培训和资质。一些栓系构件的设计要求预张拉，以避免使用过程中松弛。在该情况下，应当在整个运输途中保持栓系构件的张力（例如，通过检查和按要求拧紧）。潜在松动应当考虑运输过程中的振动（例如使用抗振动连接）。通常，较大和较重的货包通过独家使用的保持方法固定在运输工具上。这样的保持构件应当与货包设计一致。应当为任何独家使用保持构件的使用制定操作、装卸和维护说明。

IV.10. 对参与保持放射性物质货包人员的培训应当与其任务相称。典型的培训计划应当包括：

- 在预定运输方式的保持操作中所涉各方（如托运人、承运人）的法律责任；
- 放射性物质货包与保持操作相关的特定危害（见“运输条例”第311段）；
- 预期运输方式下运输对货包产生的力；
- 针对每种预期运输方式的货包固定要求；
- 预期运输方式的运输工具和设备（如锚定点）的描述；
- 按照适用规则保持货包的方法、相关设备、设计和正当性；
- 堆垛说明；

- 在保持操作和相关的验收标准之前，分别检查和控制货包和运输工具的保持构件、附着点和锚定点；
- 实施不同的保持和固定方法（实际应用）；
- 在运输前和运输过程中检查正确的堆垛。

IV.11. 本附录不侧重于装卸负载。但是，如果附着点同时用于吊装和保持，则在设计中应当考虑吊装操作负载，包括抓举吊装负载（见“运输条例”第 608 段）。

## 通过分析证实符合性

IV.12. 在常规运输工况下，附着点的结构分析应当包括相关的强度分析和疲劳分析部分。如有必要，应当考虑脆性断裂和结构稳定性等问题。应当考虑常规运输工况下附着点的温度范围。

IV.13. 附着点的结构分析一般可以用解析方法（如梁理论）或数值方法（如有限元分析）进行。对于复杂结构，数值方法可以得到更详细的应力和应变结果。有限元分析的精度取决于输入的精度（即网格划分、边界条件、物质行为和性质）。因此，必须对有限元分析进行核实，以获得输出所需的置信度。这些详细结果的解释取决于评定技术（例如名义应力、局部应力或应力线性化）。分析方法、评定技术和设计标准应当为相关主管当局所接受。参考文献[IV.25、IV.28、IV.30]列举了各种实践的示例。

IV.14. 由于运输基础设施和实践的不同，需要征求国家主管当局以及国家和国际多式联运标准和条例的意见，以确定强制性或建议的货包载量，以及在设计货包时应当考虑到的任何特别运输工况。这些负载通常由加速度值指定，以表示结构分析中的货包惯性效应，通常作为等效准静态力施加在货包重心处。根据结构分析（强度分析或疲劳分析）的类型，负载工况数据可能有所不同。

IV.15. 如果设计有两个以上的附着点，那么应当仔细考虑它们之间的负载分配。

IV.16. 为了对附着点进行强度分析，本“安全导则”表 IV.1 给出了代表常规运输工况的加速度值。表 IV.1 给出的数值来自不同的国家和国际标准 and 导则（参考文献[IV.1 — IV.3、IV.6、IV.8、IV.14、IV.27、IV.29、

IV.31])，并采用了 1.25 的系数，这增加了不超过拟议装载范围的信心。使用这些加速度值通常是适当的，然而，对于一些过境设施中的地面运输（例如在机场装卸货包），不同的值可能是相关的。如果在分析中使用特定的设计规范，则可能需要与应用规范一致的额外安全系数。如果没有使用特定的设计规范，则应当在分析中考虑并证实安全系数是正当的（例如，见参考文献[IV.36]）。施加在货包上的力是通过将表 IV.1 列出的加速度值乘以货包的质量来确定，并在货包的重心处施加。分析应当首先分别考虑每个方向加速度值的应用，然后考虑表 IV.1 中条线路对相关运输方式的所有组合。

表 IV.1. 强度分析加速度值

| 模式    | 纵向                   | 横向   | 垂直 <sup>a</sup>        |
|-------|----------------------|------|------------------------|
| 道路    | 1g                   | -    | 1g 下±0.3g <sup>b</sup> |
|       | -                    | 0.7g | 1g 下±0.3g <sup>b</sup> |
| 铁路    | 1.3g/5g <sup>c</sup> | -    | 1g 下±0.4g              |
|       | -                    | 0.7g | 1g 下±0.4g              |
| 海路/水路 | 0.5g                 | -    | 1g 下±1g                |
|       | 0.3g                 | 1g   | 1g 下±0.6g              |
| 航空    | 1.3g                 | -    | 下 1g                   |
|       | -                    | 1.3g | 下 1g                   |
|       | -                    | -    | 上 2.5g，下 2.5g          |

<sup>a</sup> 重力的影响包括在内；

<sup>b</sup> 对于轻于 3500 公斤的车辆运输货包，应当考虑更高的加速度值（参考文献 [IV.29]）。由于缺乏数据，目前无法提供精确的数值；

<sup>c</sup> 如果配备长冲程减震器的货车或明确排除驼峰和飞调作业，则应当使用 1.3g。

IV.17. 货包设计人员负责确保货包附着点的设计符合相关主管当局可接受的数值，并符合模态要求中的定义。本“安全导则”表 IV.2 提供了特定应用的加速度值。对于一些特定的货包设计，已经与许多主管当局和多式联运组织达成协议，可以使用不同的加速度值。表 IV.2 详细列出了数量有限的该型货包，其他示例见参考文献[IV.1—IV.36]，特别是参考文献[IV.10—IV.12]。表 IV.2 给出的加速度值取自引用参考文献，可能与本“安全导则”表 IV.1 的基准不同。如有必要应当参考初始参考文献以便澄清。

**表 IV.2. 特定货包强度分析加速度值**

| 货包类型                                         | 纵向   | 横向   | 垂直        |
|----------------------------------------------|------|------|-----------|
| 美国境内经核证的易裂变材料和 B(U) 或 B(M) 型货包（所有运输方式）[IV.7] | 10g  | 5g   | 2g        |
| 海上船舶运载辐照核燃料、钚和高放射性废物[IV.9]                   | 1.5g | 1.5g | 上 1g，下 2g |
| 便携式储罐（公路、铁路、内河和海上）[IV.32、IV.33]              | 2g   | 2g   | 上 1g，下 2g |

IV.18. 除了强度分析外，货包设计人员还应当考虑在常规运输工况下可能导致货包部件失效的循环负载的影响。对于疲劳分析，最好将附着点设计为无限耐久性，但作为替代方案，也可以确定附着点的疲劳寿命并控制其使用（例如，在规定的使用时间后改变部件）。如果施加在附着点上的负载循环次数不超过相关设计规范中规定的阈值，则可能没有必要进行详细的疲劳分析。铁路货车提供的疲劳分析加速度值[IV.31]见本“安全导则”表 IV.3。如果参考文献[IV.31]的条件和标准相关，使用这些数值是可能的。不同运输模式疲劳分析的其他加速度值见参考文献[IV.3]。参考文献[IV.18、IV.19、IV.22]给出了运输过程中的循环负载测量。如果参考文献中的数据不适用，则应当由货包设计人员提供适当的测量数据。疲劳评定的加速度值、循环次数、允许应力水平和可接受的设计标准应当与相关主管当局商定。对于也用于吊装的附着点，在疲劳分析中应当包括吊装循环。疲劳分析不能代替视察和维护。

表 IV.3. 疲劳分析加速度值

| 运输方式 | 纵向    | 横向    | 垂直        |
|------|-------|-------|-----------|
| 铁路   | ±0.3g | ±0.4g | 1g 下±0.3g |

IV.19. 如果货包可以以不止一个方向固定在运输工具上，那么在分析中应当使用适当方向的加速度值（例如，纵向可以变成横向）。

通过试验证实符合性

IV.20. 当使用加速度传感器的测量数据时，应当考虑相对于等效准静态负载的截止频率。截止频率的选择应当与所考虑货包的质量、形状和尺寸以及运输方式相适应。初始考虑对于质量为 100 吨的货包的地面运输，截止频率可为 10—20 赫兹[IV.8]。对于较小的货包，上述截止频率应当乘以  $(100/m)^{1/3}$ ，其中 m 是货包的质量（吨），该初始考虑应当得到核实。

附录 IV 参考文献

[IV.1] 国际海事组织、国际劳工组织、联合国欧洲经济委员会，《国际海事组织/国际劳工组织/联合国欧洲经济委员会货物运输单元包装实务守则》（CTU 守则），国际海事组织，伦敦（2014 年）。

[IV.2] 国际标准化组织《航空货运设备—约束带—第 2 部分：使用导则和栓系计算》（ISO 16049-2 : 2013）（2013 年）。

[IV.3] 运输集装箱标准化委员会《放射性物质的运输实用规则，运输过程中放射性物质有效负载和货包的固定/保持导则》，第 TCSC1006 号报告（2014 年）。

[IV.4] 美国能源部《卡车运输的燃料运输容器栓系》，RTD 标准 F8-11T，美国能源部，华盛顿特区（1975 年）。

[IV.5] 橡树岭国家实验室《运输容器结构分析第 7 卷：容器栓系设计手册》，技术报告，第 ORNL-TM-1312 号报告，田纳西州橡树岭国家实验室（1969 年）。

- [IV.6] 国家运输委员会和道路与新南威尔士州交通管理局《负载固定导则—道路车辆负载安全运输导则和性能标准》第2版（2004年）。
- [IV.7] 美国核管制委员会《所有货包的吊装和栓系标准》，联邦法规第10篇第71.45部分，美国政府出版办公室，华盛顿特区（2014年）。
- [IV.8] 国际铁路联合会《铁路技术出版物》附录II，第1卷—《装运导则》，国际铁路联合会，巴黎（2015年）。
- [IV.9] 国际海事组织《船上经辐照核燃料、钚和高放废物货包安全运输规范》（INF 规范），MSC.178（79）决议，国际海事组织，伦敦（2009年）。
- [IV.10] 国际标准化组织《货运集装箱系列1，规范和试验，第3部分：液体、气体和加压干散货罐式集装箱》（ISO 1496-3：1995），国际标准化组织，日内瓦（1995年）及后续修订1：2006年。
- [IV.11] 德国联合工程公司《道路车辆负载的固定—系紧力计算—基础》（VDI 2700 第2部分），贝斯·维拉格，贝斯图书，柏林（2014年）。
- [IV.12] 美国联邦注册办公室，美国联邦法规第49章第393部分第100—102页，美国政府出版办公室，华盛顿特区（1990年）。
- [IV.13] 环境、运输和地区部《英国运输放射性物质主管部门批准申请导则》（DETR/RMTD/0003）（2001年）。
- [IV.14] 联合国《危险货物运输建议：示范条例》，ST/SG/AC.10/1/Rev.22，2卷本，联合国，纽约和日内瓦（2021年）。
- [IV.15] SHAPPERT, L.B., RATLEDGE, J.E., MOORE, R.S., DORSEY, E.A., “放射性物质货包用钢丝绳系紧设计的计算”，《放射性物质包装和运输》第95期（国际研讨会论文集，拉斯维加斯，1995年），美国能源部，华盛顿特区（1995年）。
- [IV.16] GWINN, K.W., GLASS, R.E., EDWARDS, K.R., “核材料货包对正常环境响应的道路试验”，第SAND91-0079号报告，新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室（1991年）。

- [IV.17] 运输集装箱标准化委员会《栓系系统设计计算证实》，第 TCSP (93) P1072 号报告，（1994 年）。
- [IV.18] CORY, A.R., “烧瓶栓系设计及监控力经验”，《国际放射性物质运输杂志》第 21-3 期（1991 年）第 15—22 页。
- [IV.19] PUJET, D., MALESYS, P, “正常使用期间辐照过燃料运输瓶承受的加速度测量”，《放射性物质包装和运输》1989 年会议录，美国华盛顿（1989 年）。
- [IV.20] 铁路安全和标准委员会《铁路货车（包括铁路油罐车）结构设计导则》，第 GM/GN2688 号第 1 期，铁路安全和标准委员会，伦敦（2010 年）。
- [IV.21] 运输部《车辆负载安全》，英国文书局，伦敦（1984 年）。
- [IV.22] DIXON, P., “货包栓系—测量和评定计划”，拉姆特兰斯出版社第 8 卷第 3—4 页，第 339—344 页（1997 年），核技术出版社。
- [IV.23] GILLES, P., 等，“公路运输过程中卡车装载量不超过 38 吨放射性物质货包”，第 TNB8601-02 号报告，特兰斯努贝尔公司，布鲁塞尔（1985 年）。
- [IV.24] DRAULANS, J., 等，“在运输工具上装载含有放射性物质的货包”，第 N/Ref: 23.906/85D-JoD/IP 号报告，特兰斯努贝尔公司，布鲁塞尔（1985 年）。
- [IV.25] 核技术委员会《核电厂装载点》（KTA3905（2012-11）），KTA 业务部门，联邦辐射防护办公室，德国萨尔茨吉特（2013 年）。
- [IV.26] 国际标准化组织《货运集装箱系列 1—规范和试验—第 1 部分：通用货运集装箱》（ISO 1496-1 : 2013/AMD 1 : 2016），国际标准化组织，日内瓦（2013 年）。
- [IV.27] 国际海事组织《国际海事组织/国际劳工组织/联合国欧洲经济委员会货物运输单位包装导则（CTU）：国际海运危险货物规则增补》（Amdt.33-06），国际海事组织，伦敦（2006 年）。

- [IV.28] 国际标准化组织《核能—燃料技术—用于运输放射性物质货包用耳轴系统》（ISO 10276 : 2019），国际标准化组织，日内瓦（2019年）。
- [IV.29] 德国标准研究所《道路车辆负载限值—安全—第1部分：安全力计算》（DIN EN 12195-1 : 2021—01），德国标准研究所，柏林（2011年）。
- [IV.30] 德国联邦材料协会《放射性物质运输货包封盖系统和装载附件系统设计评定导则》（BAM-GGR 012 版 2020-12），德国联邦材料协会，柏林（2020年）。
- [IV.31] 欧洲标准化委员会《铁路应用—铁路火车结构要求第2部分：货车》（EN 12663-2 : 2010-07），欧洲标准化委员会，布鲁塞尔（2010年）。
- [IV.32] 联合国欧洲经济委员会、内陆运输委员会，《欧洲国际道路运输危险货物协定》（2021年版），联合国欧洲经济委员会，日内瓦（2020年）。
- [IV.33] 国际铁路运输政府间组织（OTIF）《国际铁路危险货物运输条例》（2021年版）（RID），国际铁路运输政府间组织，伯尔尼（2020年）。
- [IV.34] STERTHAUS, J., BALLHEIMER, V., WILLE, F. “放射性物质 B 型货包螺栓连接耳轴系统的分析方法和评定标准”，2010 年放射性物质包装和运输会议记录，英国伦敦（2010 年）。
- [IV.35] STERTHAUS, J., BALLHEIMER, V., KUSCHKE C., WILLE, F. “放射性物质货包栓接耳轴系统的数值分析”，美国机械工程师学会 2012 年压力容器和管道分部会议论文集（PVP2012），加拿大多伦多（2012 年）。
- [IV.36] 美国机械工程师学会《锅炉和压力容器规范》，美国机械工程师学会，纽约（2015 年）。

## 附录 V

### 货包抗脆性断裂的安全设计导则

#### 介绍

V.1. 本附录基于最初作为 IAEA-TECDOC-717[V.1]第 2 章出版的材料，后来在一系列顾问会议上进行了修订。本“安全导则”包含了基于断裂力学设计评价的抗断裂评定的进一步信息。

V.2. 放射性物质运输的货包必须遵守“运输条例”要求。这些货包必须符合严格的标准以限制剂量率，确保放射性物质的包容，并防止核临界。在严重事故工况下，要求保持符合性。因此，在设计该型货包时，必须考虑防止可能导致不符合这些要求货包的所有模式的故障。“运输条例”第 701 (d) 段要求始终适用（即计算程序和参数要求可靠或保守）。

V.3. 本附录为防止放射性物质货包中结构部件脆性断裂的设计评价提供指导。讨论了 3 种方法：

- 方法 1：评价和使用在要求的使用温度范围内保持延展性和韧性的物质，包括低至-40℃温度。
- 方法 2：用与断裂抗力相关的无韧性转变温度（NDTT）测量来评价铁素体钢。
- 方法 3：基于断裂力学的设计评价来评定抗断裂性能。

V.4. 方法 1 被包括在内以涵盖旨在确保无论引起破坏所需的装载条件如何，该破坏总是涉及广泛的塑性和/或韧性撕裂，并且在任何情况下都不会发生不稳定的脆性断裂的方法。方法 2 是为了提供与公认的评价铁素体钢的实践相一致。方法 3 提供了一种评价脆性断裂的方法，即适用于广泛的材料。本导则并不排除货包设计人员提出适当正当性并被主管当局接受的替代方法。

## 评价方法的一般考虑

V.5. 许多材料在低温或高装载速率下的延展性比在中温和静态装载条件下的延展性要差。例如，具有裂纹状缺陷的铁素体钢在受拉时吸收能量的能力在狭窄的温度范围内发生显著变化。铁素体钢的断裂韧性在转变温度范围内发生明显变化。韧性在相对较窄的温度范围内迅速增加，从具有解理断裂的“下架”或脆性平面应变区，通过弹塑性区，到“上架”或具有韧性撕裂断裂和塑性的区域，其中断裂韧性通常高到足以防止脆性断裂。随着温度的升高，韧性开始迅速上升的温度对应于无韧性转变温度。该类型的转变温度行为只发生在存在产生三轴应力状态的裂纹状缺陷时，当材料显示屈服强度随温度降低而增加时。相同材料的屈服强度随装载速率的增加而增加，因此转变温度也可能与装载速率相关。在所有这些情况下，当材料有效地处于脆性状态时，即使名义应力小于材料屈服强度，该材料的拉伸负载也会导致不稳定裂纹扩展和随后的脆性断裂。材料中的小裂纹状缺陷可能足以引发该不稳定的增长。

V.6. 铁素体钢构件，如电力、石油和化学加工工业中使用的压力容器和管道，防止断裂初始和潜在不稳定断裂扩展的标准已经制定完善，并已编入许多国家和国际标准。这些标准可分为两种一般类型：

- (i) 仅基于材料试验要求的标准。这些标准通常是为了证实某些材料的性能（例如撞击能）已被以往的经验或全尺寸原型试验证实具有令人满意的性能，或者可以与断裂韧性有关联，以提供足够的抗脆性断裂的裕度。
- (ii) 基于材料试验、施加应力和工艺计算以及视察标准的标准。这些是为了证实计算的设计状态和测量的材料响应状态之间存在足够的裕度。

V.7. 第 V.3 段的方法 1 和 2 是基于第 V.6 (i) 段的标准。而方法 3 符合基本断裂力学方法或稍后描述的弹塑性断裂力学的扩展。如果出现较小的屈服限值，可采用线弹性断裂力学方法，如果出现较大的屈服限值，则应当采用弹塑性断裂力学方法。其他评价方法也是可能的。货包设计人员所建议的任何方法须经主管当局批准。

## 方法 1

V.8. 脆性断裂可以没有预兆突然发生，并对货包造成灾难性的后果。因此，方法 1 要求包装材料在“运输条例”规定的正常和事故工况下，在韧性破坏之前不会发生脆性破坏。

V.9. 方法 1 的一个示例是使用奥氏体不锈钢作为瓶材料。这些材料在货包设计中不具有对温度敏感的断裂韧性行为，通常具有良好的延展性和韧性性能。然而，铸造奥氏体钢并不总是具有良好的性能，可能需要某种形状的机械试验来确认韧性和高断裂韧性。

V.10. 方法 1 也具有不必依赖于限值应力水平、缺陷尺寸和脆性断裂抗力的断裂韧性的好处，尽管通常的设计程序必须应用于韧性或其他破坏模式。

## 方法 2

V.11. 确定无韧性转变温度的依据是标准落锤试验[V.2]脆性焊缝在母材中不发生脆性断裂的最高温度。这可以被认为是转变温度曲线的底部，无论是扩展或裂纹停止，还是从小的初始裂纹动态萌生。

V.12. 方法 2 的无韧性转变温度方法的使用示例包括参考文献[V.3—V.6]。例如，这些方法涉及铁素体钢是相关撞击能（夏比试验）与断裂韧性的实质性数据库。在该情况下，夏比撞击能可作为材料韧性的间接指标。该方法可用于各种优质碳钢和碳锰铁素体钢。参考文献[V.3—V.5]基本验收标准是在规定的温度下夏比 V 型缺口试验的最小撞击能（或横向扩展）要求，尽管基本的正当性是基于无韧性转变温度方法。

V.13. 方法 2 的进一步示例见参考文献[V.7、V.8]。根据截面厚度和温度，这些规定了铁素体钢需要达到的无韧性转变温度水平。它们要求材料的无韧性转变温度与事故工况下考虑的最低温度之间的最小温差（取-29℃）作为截面厚度的函数。该温差是基于无韧性转变温度和断裂韧性之间的相关性。虽然这些规范导则专门针对铁素体钢，但对于其他表现出转变温度行为且无韧性转变温度和抗断裂性能之间存在关联的材料，也可以考虑采用同样的方法。参考文献[V.9]标准化试验程序，只适用于铁素体钢。没有标准化的试验方法来测量其他材料的无韧性转变温度。然而，有可能使用动

态撕裂试验来获得无韧性转变温度，或至少其他材料的抗撕裂指示 [V.10]。这将给出比从夏比试验中推导的更严厉（保守）的值。

V.14. 参考文献[V.7、V.8]考虑了不同类型货包和内容物的不同安全裕度，并考虑了材料的止裂性能。这是通过根据参考文献[V.11、V.12]技术报告和下面的公式规定最大允许无韧性转变温度来实现的：

$$\beta = \frac{1}{B} \left( \frac{K_{ID}}{\sigma_{yd}} \right)^2 \tag{V.1.}$$

式中

$\beta$  是无量纲参数；

$\sigma_{yd}$  是动态屈服应力（ksi）；

$K_{ID}$  是临界动态断裂韧度（ksi  $\sqrt{\text{in}}$ ）；

B 是截面厚度（in）。

V.15. 对于装有乏燃料、高放废物或钚的货包，美国核管制委员会要求有足够的断裂韧性，以防止在动态屈服应力水平下贯通厚度裂纹的扩展。这类似于裂纹阻止的理念，关于公式 (V.1) 要求  $\beta$  值不小于 1.0。这相当于公称塑性区的尺寸使得平面应变条件无法维持，因此断裂韧性应当朝上层区域倾斜，材料应当是韧性的。对于其他 B (U) 型或 B (M) 型货包， $\beta$  值应当不小于 0.6。这相当于断裂韧度在底部区域之外，处于过渡区域，弹性塑性破坏预计将占主导地位。对于仅含有低比活度物质或小于 30A<sub>1</sub> 或 30A<sub>2</sub> 的货包，美国核管制委员会准备考虑使用线弹性断裂力学方法来防止断裂的发生。这可以通过要求  $\beta$  不低于 0.4 来实现。对于这些情况，对于厚度小于 0.1 米的，可以考虑使用细晶粒正火钢，而无需进一步分析或试验。对于所有这些方法，所需的断裂韧性可以通过使用最大无韧性转变温度来指定。这些方法还具有不必依赖于限制应力水平和缺陷尺寸的收益。然而，正常的设计程序仍然适用于韧性或其他故障模式。

### 方法 3

V.16. 对于放射性物质的运输，方法 1 和方法 2 没有利用通过提供撞击限制设备和足以检测和确定规定缺陷尺寸的无损检验来限制应力的能力。此外，撞击能与断裂韧性的相关性可能不适用于广泛的材料，从而限制了替代包容边界材料的使用。

V.17. 可以识别出对核电厂部件有效的方法 3 的许多示例。这些示例，虽然不能直接适用于运输货包设计的评价，但就其断裂力学原理的使用而言，可能是有指导意义的。这些示例包括参考文献[V.13—V.18]。这些示例允许在材料选择方面的设计有一定的自由度，以及确定应力和无损检验要求的能力，从而防止断裂的开始和脆性断裂。线弹性断裂力学的基本方法在所有这些示例中都得到了应用，尽管安全系数的应用存在差异。这些示例主要涉及缓慢施加的负载可能会波动。为了将这些原则应用于跌落或贯穿试验中遇到的负载，应当考虑到所产生的应力的材料和材料对装载速率的响应。

### 断裂力学考虑

V.18. 表征材料对来自预先存在的裂纹状缺陷的裂纹起始阻力的机械特性是其起始断裂韧性。该性能的测量结果随温度和装载速率的变化曲线说明了那些表现出转变温度行为的材料从脆性行为到韧性行为的转变。当应力-应变条件为线弹性时，根据缺陷周围应力的局域状态和塑性程度，用应力强度系数 ( $K_I$ ) 的临界水平来测量断裂韧性，或者，如果应力-应变条件是弹塑性的，韧性可以用能量线轮廓积分的临界水平  $J_I$  或用裂纹尖端张开位移 (CTOD) 的临界水平  $\delta$  来表示。根据断裂力学基本理论，所施加的裂纹尖端驱动力 (用应力强度系数  $K_I$ 、轮廓积分  $J_I$  或裂纹尖端张开位移  $\delta_i$  表示) 必须小于材料断裂韧性的临界值 (同样形式为  $K_{I(mat)}$ 、 $J_{I(mat)}$  或  $\delta_{i(mat)}$ )，以防止裂纹的萌生和随后的脆性断裂。参考文献[V.19—V.24]给出了强度系数临界值的标准试验方法。参考文献[V.25]给出了一套涵盖各种断裂韧性参数的建议。为了避免断裂开始所必需的  $K_{I(mat)}$ 、 $J_{I(mat)}$  或  $\delta_{i(mat)}$  的值取决于负载和兴趣环境组合。在平面应变条件下，适用于许多 B (U) 型或 B (M) 型货包通常需要的高厚度，静态装载的临界断裂韧性显示一个最小值，称为  $K_{Ic}$ 、 $J_{Ic}$  或  $\delta_{Ic}$ 。某些材料在增加装载速率或撞击条件下的断

裂韧度（称为动载  $K_{Id}$ ）可能显著低于相同温度下相应的静态值  $K_{IC}$ 。如果缺陷的初始深度与外加负载相结合，导致外加应力强度系数等于材料的韧性，裂纹就会萌生，缺陷的深度称为临界深度。在这些条件下，可能会发生持续的扩展，导致不稳定和失效。

V.19. 对于某些材料，断裂韧度试验结果符合参考文献[V.19]，由于塑性过大，在标准试验中无法获得。此外，有些材料可能不会出现不稳定断裂但进一步的裂纹扩展需要增加裂纹驱动力（即在早期阶段，需要增加负载以引起进一步的裂纹扩展）。这两种过程（即塑性和稳定的韧性撕裂）都吸收能量，对于需要满足运输瓶苛刻设计要求的材料来说，显然是可取的属性。应当注意的是，在货包设计中经常使用的大截面厚度的几何和冶金效应使得很难确定与标准试验几何尺寸相比较的使用中韧性撕裂响应。

V.20. 推荐的运输货包设计断裂力学评价方法是基于“防止断裂发生”，从而防止裂纹类缺陷存在时的不稳定裂纹（扩展）。线弹性断裂力学的原理有时就足够了。在某些条件下，经货包设计人员证实和主管当局认可，弹塑性断裂力学原理可能是正当的。在该情况下，防止裂纹发生仍然是控制标准，在设计中应当不依赖于任何预测的韧性撕裂抗力。第 V.21—V.46 段提供了在接受“运输条例”第 722 段、第 725 段和第 727 段指出的机械试验的货包中防止断裂发生的设计导则。

V.21. 采用基于断裂力学方法的含义是要进行定量分析。分析应当包括货包中假想缺陷、可能发生的应力水平和材料性能之间的相互作用，特别是断裂韧性和屈服强度。因此，应当考虑制造阶段可能存在的缺陷，设计方法必须假想可能发生的最大缺陷尺寸，并在任何视察和维护计划之后保持原状。这反过来意味着，也必须考虑视察方法的类型及其在临界几何位置检测和确定此类缺陷的能力。在本附录，这是参考缺陷概念的基准。很可能需要结合无损检验技术。设计人员指定的适当组合应当包括每种方法视察的位置和发现的任何缺陷的验收级别。在利用断裂力学原理的任何设计方法中，几何构型与可能漏掉的缺陷尺寸和位置相关的可视察性是一个重要的因素。这些方面将在本附录进一步讨论。此外，应当能够确定在各种事故工况下货包不同部分的应力水平，并对该确定中的不确定性有一些估计。最后，需要了解货包材料的断裂韧性基于试验结果、下限估计或参考曲线的运行工况的全温度范围，并包括在撞击事故下将发生的负载率增加的影响。

V.22. 用裂纹尖端驱动力作为外加应力和缺陷深度的函数来描述结构性能的基本线弹性断裂力学公式如下：

$$K_I = Y_\sigma \sqrt{\pi a} \tag{V.2.}$$

式中

$K_I$  是外加应力强度系数（MPa $\sqrt{m}$ ）；

$Y$  是基于缺陷和结构的尺寸、方向和几何构型的常数；

$\sigma$  是所施加的名义应力（兆帕）；

$A$  是缺陷深度（米）。

V.23. 此外，为了防止脆性断裂，施加的应力强度系数应当满足以下关系式：

$$K_I < K_{I\text{ (mat)}} \tag{V.3}$$

其中  $K_{I\text{ (mat)}}$  定义断裂韧性。

V.24. 这应当通过在与货包将经历的负载有关的适当速率下的试验获得，并考虑到设计中包括的任何应力减震器的影响。

V.25. 对于

$$K_I = K_{I\text{ (mat)}} \tag{V.4}$$

公式 (V.2) 可与公式 (V.4) 合并给出临界缺陷深度  $a_{cr}$  的表达式如下：

$$a_{cr} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{I(mat)}}{Y_\sigma} \right)^2 \tag{V.5.}$$

V.26. 脆性断裂评价过程的目的是确保该表征的三个参数（材料断裂韧性、外加应力和缺陷尺寸）满足公式 (V.2) 和 (V.3) 或相应的弹塑性处理，从而防止断裂的发生。

V.27. 裂纹尖端的塑性和局部屈服的影响是使裂纹尖端的严重程度高于仅在线弹性应力条件下相同裂纹尺寸和应力水平的裂纹尖端严重程度。在弹塑性断裂力学中，有许多方法可以考虑塑性和裂纹尖端严重程度之间的相互作用。例如，其中两种方法已被编入各种国家文件—应用 J 积分[V.26]和失效评定图（FAD）[V.17、V.27]并可用于货包正当性评价。这些弹塑性方法的验收标准通常比公式 (V.3) 提供的简单限制更复杂。对于应用 J 积分方法的情况，验收标准应当包括在规定的初始定义下对应用 J 积分本身的限值。对于失效评定图方法，可以根据应力和假想缺陷深度计算塑性崩塌和脆性断裂的评定坐标  $L_r$  和  $K_r$ ，并以该评定点位于失效评定图表面内为验收标准（见图 V.1）。重要的是要认识到，当发生重大屈服时，如果仅从应力水平和裂纹尺寸来估计应力强度系数而不考虑屈服，则线弹性断裂力学的使用可能是非保守的。如需进一步详情见参考文献[V.18、V.26、V.27]。

V.28. 容器边界外的部件屈服应当不被视为不可接受的，这些部件是专门设计来通过塑性流动吸收能量的。

### 方法 3 安全系数

V.29. 任何可能应用于公式 (V.3) 或构成公式 (V.3) 及其弹塑性扩展参数的安全系数，都应当考虑到这些参数的计算或测量中的任何不确定性。

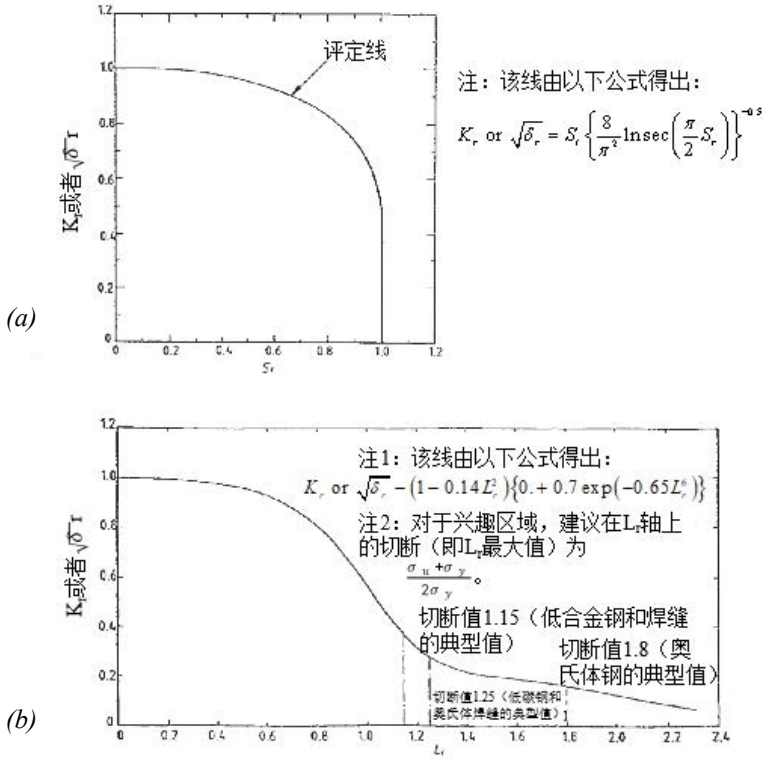


图 V.1. 弹塑性断裂力学处理的失效评定图[V.17]。(a) 二级评定图; (b) 三级评定图。

这些不确定性可能包括与计算货包内的应力状态、检查货包缺陷和测量材料断裂韧性相关的不确定性。因此，总安全系数取决于用于不同输入参数的值是最佳估计值（平均值）还是装载参数和假想缺陷尺寸的上界和断裂韧性的下界。特别是，对无损检验中不确定性的担忧可以通过在参考缺陷的选择中适当的保守性来解决。

V.30. 为了防止货包材料中的断裂，正常运输工况和事故工况下的安全系数应当与线弹性断裂力学方法的参考应用中为类似负载条件制定的安全系数基本一致。例如，对于在使用寿命期间作为正常操作的一部分预计会出现的装载条件，核电厂部件在役检查的参考文献[V.28]规定了一个总体应用公式 (V.3) 的断裂韧性最小安全系数为 $\sqrt{10}$ （约3）。例如作为事故条件，参考文献[V.28]规定了应用于方程式 (V.3) 的断裂韧性的总体最小安全

系数为 2（约 1.4）。对于意外的（但以设计为基础的）负载条件，作为事故工况，参考文献[V.28]规定了应用于公式 (V.3) 的断裂韧性的总体最小安全系数为 $\sqrt{2}$ （约 1.4）。这样最小安全系数才能达到公式 (V.3) 应当使用装载参数和假想缺陷尺寸的上限和断裂韧性的下限，如果适当，应当使用统计评定。安全因素应当由货包设计人员选择和判断，并得到主管当局的认可，同时考虑到对用于应力分析的方法（例如有限元分析代码）核实的信心、材料特性的分散以及无损检验和尺寸确定的不确定性。

### 方法 3 的评价程序

V.31. 应当遵守的一般步骤如下：

- (a) 在货包内最临界的位置和最临界的方向上假定参考或设计基准缺陷；
- (b) 计算“运输条例”第 722 段、第 725 段和第 727 段所述机械试验引起的应力，并确保考虑任何所需的负载组合；
- (c) 设计基准缺陷尖端应力强度系数的计算；
- (d) 对货包可能承受的装载速率的材料断裂韧性的确定或下限估计；
- (e) 计算在相关装载条件下的截面净应力与屈服应力之比；
- (f) 在所施加的净应力强度系数和所接受的材料断裂韧性值之间以及在所施加的应力和屈服应力之间满足任何安全范围。

这将确保缺陷不会因“运输条例”规定的机械试验而产生或增长，因此不会导致不稳定裂纹扩展和/或脆性断裂。净应力是考虑到由于裂纹的存在而减少截面的评价应力。

V.32. 第 V.31 段序列的变体。是用于直接显示抗脆性断裂性能的机械试验。在该情况下，试验测量可用于：(i) 为计算施加的应力强度系数提供应力场推断；和/或 (ii) 提供防止断裂发生的建议裕度的直接确认。对于第二种情况，将裂纹放置在原型试验货包中最容易在-40℃的最低温度下受到机械试验负载的裂纹产生和扩展的位置。参考缺陷形状应当为半椭圆形，长宽比（长度与深度）为 6 : 1 或更大。该人工缺陷的尖端应当尽可能像裂纹，具有由货包设计人员证实正当并被主管当局接受的参考缺陷灵敏度。建议球墨铸铁裂纹尖端半径的锐度不大于 0.1 毫米[V.29]。该缺陷的深度是

通过使用以前计算或从应变测量中推断的应力来确定的，在计算人工缺陷深度时还应当考虑适当的安全系数。

V.33. 第 V.34—V.46 段对每一个程序步骤提出了建议。

### 缺陷考虑

V.34. 本附录提到了三种不同的缺陷尺寸。“参考缺陷尺寸”是用于分析目的的假想缺陷尺寸。“拒绝缺陷尺寸”是一种缺陷尺寸，如果在役前视察中发现，将不能满足质量控制要求。“临界缺陷尺寸”是指在设计基准装载条件下可能不稳定的尺寸。

V.35. 对于通过分析或试验进行的证实，参考缺陷应当放置在货包容器壁的表面上，在施加应力最大的位置。当货包承受循环或波动负载时，应当考虑在使用中产生疲劳裂纹的可能性。当施加的最高应力的位置不确定时，可能需要多次证实。参考缺陷的方向应当使由计算或实验测量确定的表面应力的最高分量垂直于缺陷的平面。该考虑应当考虑到任何应力集中区域的存在。参考缺陷的深度应当为证实了其体积检验灵敏度、检验不确定性、剔除缺陷尺寸和临界缺陷尺寸的关系。参考缺陷深度应当与所显示的体积和表面检验灵敏度有关联，确保未检验到的概率足够小，如货包设计人员所判断的那样。可以选择一个有限的小深度，其尺寸可以证实不被检测的概率在统计上是不显著的，同时适当考虑试验方法中的不确定性。

V.36. 宽高比为 6:1 的参考缺陷面积应当与最大应力方向垂直，大于典型的役前视察指示，这可能是制造货包容器壁报废或修复的原因。然而，由于参考缺陷是类似裂纹的表面缺陷，而不是更典型的真实缺陷（例如，表面下孔隙云或夹渣），因此相对于工艺标准而言，该缺陷尺寸的选择是极其保守的。

### 管理系统与无损检验（NDE）考虑

V.37. 为了使任何运输货包具有令人满意的性能，无论是否使用了基于断裂力学的设计方法，都应当按照令人满意的标准，使用合适的材料，并无严重缺陷进行设计和制造。其含义是设计和制造阶段应当服从管理系统原则，材料应当服从质量控制，以确保它们在规范要求范围内。对于金属货包，应当取样检查化学分析、热处理和微观结构是否令人满意，并且没有

固有缺陷。金属货包应当进行表面裂纹检测和体积试验相结合的无损检验。表面裂纹检测应当根据标准程序采用适当的方法，如磁裂纹检测、染料渗透剂或涡流检测。

V.38. 容器试验通常应当采用射线照相或超声波方法，同样符合标准程序。货包设计应当适合于该无损检验。当基于断裂力学的方法与参考缺陷概念一起使用时，货包的设计人员应当证实指定的无损检验方法能够检测任何此类缺陷，并且这些无损检验方法是在实践中进行的。

V.39. 设计人员应当考虑缺陷发展或增长的可能性，以及在使用中材料可能退化的可能性。重复或定期无损检验要求应当由设计人员规定，并经主管当局批准。

断裂韧性考虑

V.40. 计算出的应用应力强度系数应当显示为小于公式 (V.3) 中的材料断裂韧性值，并适当考虑塑性效应和安全系数。确定材料断裂韧性的方法应当从三个选项中选择，所有这些选项如图 V.2 所示。这些选项中的每一个都包括一个具有统计意义的材料断裂韧性值数据库的泛化，该数据库是在代表材料供应商和货包应用的产品形状上获得的。前两个选项应当包括代表实际货包应用的应变率、温度和约束条件（例如厚度）的材料断裂韧性值。这些同样的考虑适用于用于支持弹塑性断裂评价的材料断裂韧性测量。

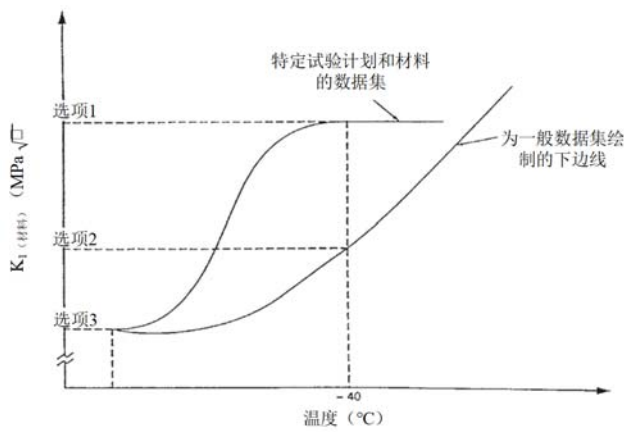


图 V.2. 基于选项 1、2 或 3[V.1] $K_I$  (材料) 测量的相对值。

V.41. 选项 1 应当以确定某一特定材料在-40℃温度下的断裂韧性最小值为基准。图 V.2 所示的最小值表示在适当的装载速率和几何约束条件下从有限数量的材料供应商获得的有限数量样品的统计显著数据集。样品应当代表适合特定货包应用的产品形状。

V.42. 选项 2 应当基于确定材料断裂韧性的下限或接近下限值,  $K_{I(mat)} = K_{Ib}$ , 如图 V.2 所示。作为限制情况, 该选择将包括铁素体钢的标准材料断裂韧性测定, 例如, 在参考文献[V.4]规定的。下界或接近下界的值可以基于静态、动态和止裂断裂韧性的数据组合。该选择的一个优点是可以减少对可以参考下界或接近下界曲线材料的试验程序。相对较少但适当的数据点数量可能足以证实曲线对特定加热、级别或材料类型的适用性。

V.43. 选项 3 应当基于满足参考文献[V.19]静态装载速率和裂纹尖端约束要求的具有统计显著断裂韧性数据集的最小值, 或关于测量断裂韧性的弹塑性方法[V.3、V.4]。线弹性断裂力学试验的试验温度符合参考文献[V.19]要求, 应当至少低至-40℃, 但可能必须更低才能满足参考文献[V.19]条件, 如图 V.2 所示。采用弹塑性方法的断裂韧性试验应当在最低设计温度下进行。该选择的保守性, 特别是在低于-40℃的温度下进行试验的情况下, 如果货包设计人员提出正当性并得到主管当局的接受, 可以使用降低的安全系数。

## 应力考虑

V.44. 对于通过试验或分析进行的论证, 参考缺陷尖端的施加应力强度系数的计算应当基于由货包设计人员判断并由主管当局接受的断裂临界部件中的最大拉应力。断裂临界部件是指由于断裂而导致包容系统贯穿或破裂的部件。应力可以通过对无缺陷货包的计算来确定。常用的方法包括通过专业的有限元代码进行动态分析的直接应力计算, 或根据试验结果进行间接应力计算。通过有限元分析, 撞击负载的方法可以是试图模拟惯性效应, 也可以是准静态的, 前提是撞击减震器和货包体的响应可以解耦。有限元计算机代码的使用应当仅限于能够进行影响分析人员和证实其资格使主管当局满意的设计人员。应当调整计算机模式, 以便在每个撞击点和所检查姿态的临界区域给出准确的结果。当应力场是从比例模型或全尺寸货包性能试验的表面应变测量推断出来的, 推断的应力场也应当得是正当

的。当应变计用于局部应力集中区域时，应考虑由于放置误差或标距长度效应导致的测量应变的可能误差。施加的应力强度系数可以直接根据应力分析计算，也可以根据考虑缺陷形状和其他几何构型和材料因素的手册公式中保守地计算。

V.45. 由于计算的应力场可能依赖于撞击减震器的性能、质量分布和货包本身的结构特征，因此应力的正当性将反过来依赖于分析模式的正当性。如果依赖撞击减震器以确保不超过与参考缺陷一起使用的设计应力水平和假想最低断裂韧性，设计人员应当向主管当局提供分析的核实，包括考虑不确定性安全系数的正当性。使用动态有限元分析的经验表明，只要 (i) 计算机代码能够分析撞击事件； (ii) 使用可靠或保守的性能数据，就可以获得足够可靠或保守的峰值应力估计； (iii) 该模式要么是准确的，要么是保守的简化；并且 (iv) 分析是由合格人员进行的。从性能试验中推断出的应力场的正当性将取决于试验仪器仪表特征、位置和数据解释的正当性。对计算或推断的应力场的评价也可能需要了解相关的动态材料和结构特征。

V.46. 关于适用选项 3 的补充指导意见见参考文献[V.30—V.32]。

## 附录 V 参考文献

- [V.1] 国际原子能机构《运输货包防脆性断裂安全设计导则》，国际原子能机构《技术文件》第 717 号，国际原子能机构，维也纳（1993 年）。
- [V.2] 美国试验和材料学会《美国试验和材料学会标准年鉴：测定铁素体钢无延展性的落锤试验的标准试验法》第 03.01 卷，美国试验和材料学会第 208-87a 号，美国试验和材料学会，宾夕法尼亚州费城（1987 年）。
- [V.3] 英国标准协会《压力容器无火熔焊规范》（BS 5500），英国标准协会，伦敦（1991 年）。
- [V.4] 美国机械工程师学会《锅炉和压力容器规范，第 3 节，第 1 部分，核电厂设备制造规则》，美国机械工程师学会，纽约（1992 年）。
- [V.5] 美国机械工程师学会《锅炉和压力容器规范，第 8 节，第 1 部分，压力容器制造规则》，美国机械工程师学会，纽约（1992 年）。

- [V.6] 法国电热锅炉设计和制造规则协会《法国核制造规范，RCC-M：压水堆核设施机械设备的的设计和制造规则，Z 小节，附录 ZG，抗快速断裂》，法玛通，巴黎（1985 年）。
- [V.7] 美国核管制委员会《壁厚大于 4 英寸（0.1 米）但不超过 12 英寸（0.3 米）的铁素体钢运输容器的断裂韧性标准》，监管导则第 7.12 号，核管制委员会，华盛顿特区（1991 年）。
- [V.8] 美国核管制委员会《最大壁厚为 4 英寸（0.1 米）的铁素体钢运输容器的母材断裂韧性标准》，监管导则第 7.11 号，核管制委员会，华盛顿特区（1991 年）。
- [V.9] 美国试验和材料学会《1941 年撤销的 ASTM A208：锌或钢制品普里斯试验（硫酸铜浸）测定涂层均匀性的方法》，由 ASTM A239 替代，美国试验和材料学会，宾夕法尼亚州费城（2009 年）。
- [V.10] ROLFE, S.T., BARSOM, J.M., “结构的断裂和疲劳控制”，普伦蒂斯霍尔，恩格尔伍德克利夫斯，新泽西（1977 年）。
- [V.11] HOLMAN, W.R., LANGLAND, R.T., “防止 4 英寸厚铁素体钢运输集装箱脆性断裂失效的建议”，第 NUREG/CR-1815 号报告，核管制委员会，华盛顿特区（1981 年）。
- [V.12] Schwartz, M.W., “厚度大于 4 英寸的铁素体钢船运集装箱中防止脆性断裂失效的建议”，第 NUREG/CR-3826 号报告，核管制委员会，华盛顿特区（1984 年）。
- [V.13] 美国机械工程师学会《锅炉和压力容器规范，第 3 节，第 1 部分，核电厂设备制造规则》，美国机械工程师学会，纽约（1992 年）。
- [V.14] 法国电热锅炉设计和制造规则协会《法国核制造规范，RCC-MR：FBR 核岛机械设备的的设计和制造规则》，法玛通，巴黎（1985 年及 1987 年附录）。
- [V.15] 国际贸易和工业部《核动力构筑物的技术标准》，通知第 501 号，国际贸易和工业部，东京（1980 年）。

- [V.16] 核技术委员会《KTA 安全规则，轻水堆一回路部件，第 2 部分：设计和计算》（KTA 3201.2，2017 年 11 月版），KTA 业务部门，联邦辐射防护办公室，德国萨尔茨吉特（2017 年）。
- [V.17] 英国标准协会《熔焊结构缺陷可接受性评定方法导则》（PD 6493），英国标准协会，伦敦（1991 年）。
- [V.18] 俄罗斯标准化和计量联合会《静态负载下断裂韧性特征的测定》，第 GOST25.506-85 号报告，莫斯科（1985 年）；及《动态负载下断裂韧性特征的测定》，第 RD-50-344-8 号报告，莫斯科（1983 年）。
- [V.19] 美国试验与材料协会《美国试验与材料协会标准年鉴：金属材料平面应变断裂韧性标准试验方法》第 03.01 卷，美国试验与材料协会第 E399-83 号，美国试验与材料协会，宾夕法尼亚州费城（1983 年）。
- [V.20] 日本机械工程师学会《CTOD 断裂韧性试验的标准试验方法》（JSME S001），日本机械工程师学会，东京（1981 年）。
- [V.21] 美国试验和材料学会《美国甲状腺协会的实践建议：JIC 的标准试验方法》（ASTME 813），《美国试验和材料学会标准年鉴》第 03.01 卷，美国试验和材料学会，宾夕法尼亚州费城（1991 年）。
- [V.22] 英国标准协会《断裂力学韧性试验：金属材料焊接的 KIC、临界 CTOD 和临界 J 值的测定方法》（BS 7448-2），英国标准协会，伦敦（1997 年）。
- [V.23] 美国试验和材料学会《裂纹尖端张开位移（CTOD）断裂韧性测量的标准试验方法》，ASTME 1290-93《美国试验和材料学会标准年鉴》，美国试验和材料学会，宾夕法尼亚州费城（1993 年）。
- [V.24] 日本焊接工程学会《CTOD 断裂韧性试验的标准试验方法》（JWES 2805），日本焊接工程学会，东京（1980 年）。
- [V.25] 国际标准化组织《金属材料—测定准静态断裂韧性的统一试验方法》（ISO 12135:2021），日内瓦（2021 年）。
- [V.26] 电力研究院《电力研究所弹性塑性断裂力学方法手册》，电力研究院，加利福尼亚州帕罗奥多。

- [V.27] 中央电力局《含缺陷构筑物的完整性评定》，第 R/H/R6-Rev.3 号报告，中央电力局，伦敦（1986 年）。
- [V.28] 美国机械工程师学会《2010 年美国机械工程师学会锅炉和压力容器规范，第 11 部分：核电厂设备在役检查规则》，包括 2011 年附录重印/01-JUL-2010，美国机械工程师学会，纽约（2010 年）第 574 页。
- [V.29] 电力产业中央研究所，“球墨铸铁桶的质量保证研究”，第 EL87001 号报告，电力产业中央研究所，东京（1988 年）。
- [V.30] DROSTE, B., SORENSON, K. 编，“脆性断裂安全评定”，《国际放射性物质运输杂志》第 6 2—3 期（1995 年）第 101—223 页。
- [V.31] SHIRAI, K., 等，“脆性破坏设计标准的核实：铸铁容器抗自由跌落试验的完整性”，《国际放射性物质运输杂志》第 41 期（1993 年）第 5—13 页。
- [V.32] ARAI, T., 等，“大断面球墨铸铁（DCI）和小试样断裂韧度下限的测定”，美国试验和材料学会第 1207 号报告，美国试验和材料学会，宾夕法尼亚州费城（1995 年）第 355—368 页。

## 附录 VI

### 临界安全评定

#### 介绍

VI.1. 本附录就如何证实对装有易裂变材料货包遵守“运输条例”第 673—686 段要求提供一般建议。彻底的临界安全评定的性能和文件提供了必要的符合性证实。临界安全评定文件（应当包括在货包设计安全报告（PDSR））是向主管当局提交批准申请的重要组成部分。该临界安全评定应当按照“运输条例”第 815 段要求，通过在所有阶段应用适当的管理系统程序来进行。

VI.2. 虽然临界安全评定有时可以使用质量或尺寸的安全次临界限值（示例见参考文献[VI.1—VI.6]），但计算分析更常用来提供基准。因此，本附录就应当考虑的分析方法和应当提供的文件提出了建议，以证实遵守“运输条例”第 673—686 段临界安全要求。考虑了为符合监管建立次临界的计算结果的验收标准。

#### 货包说明

VI.3. 运输货包的货包设计安全报告的临界部分应当包括货包及其内容物的说明。该说明应当侧重于货包尺寸和可能影响反应性的材料部件（例如，易裂变材料的库存和放置、中子吸收体材料和放置、反射体材料），而不是结构信息，如螺栓放置和耳轴。应当调用工程图纸和设计说明来指定制造部件的细节。

VI.4. 货包设计安全报告应当清楚说明请求批准的全部内容。因此，应当提供确保包装内容物在规定限值内所需的参数值（例如铀-235 浓缩度、多种组件类型、二氧化铀颗粒直径）。对于具有多个装载配置的货包，还应当特定描述每个配置，包括可能的部分装载配置。内容说明应当包括：

- (a) 材料类型（例如，易裂变和非易裂变同位素、反应堆燃料组件、包装材料和中子吸收体）；

- (b) 材料的实物形状和化学成分（例如气体、液体和金属固体、合金或化合物）；
- (c) 材料的数量（例如，质量、密度、铀-235浓缩度和同位素分布）；
- (d) 其他物理参数（如几何构型、配置、尺寸、方向、间距和间隙）。

VI.5. 货包设计安全报告的临界部分应当包括对包装的描述，重点是与临界安全评定相关的设计特点。应当强调的特点是：

- (a) 结构中使用的材料及其与临界安全的相关性；
- (b) 相关的规模和体积（内部和外部）；
- (c) 临界安全所依赖的设计特点的限值；
- (d) 作为中子慢化剂的包装材料，包括氢密度高于水的含氢材料（例如聚乙烯、塑料包装）或大量铍、碳或氘；
- (e) 有助于临界安全的其他设计特点（例如，根据“运输条例”第 680 段和/或第 683 (b) 段条件，可酌情防止水泄漏的设计特点）。

VI.6. 应当仔细描述构成密封系统的包装和内容物的部分。应当提供一份已进行（或分析）的试验说明，连同试验的结果或证据，以确定正常运输工况（见“运输条例”第 684 (b) 段）和事故运输工况（见“运输条例”第 685 (b) 段）对货包（和密封系统）的影响。对于空运中的货包，应当考虑“运输条例”第 683 (a) 段要求的任何试验的影响。内容物的物理或化学形状的任何潜在变化，以及第 673 (a) 段规定所述的意外情况。在评审试验结果时应当予以考虑。

## 临界安全分析模式

VI.7. 应当使用对内容物、包装、密封系统和试验结果的描述来制定临界安全分析所需的货包模型，以表明遵守“运输条例”第 673—686 段要求。对于每个评价，可能需要开发一个或多个计算模式。货包的确切型号可能不是必要的，一个证实的边界模式可能是足够的。然而，计算模式应当明确包括对临界安全重要的实物特点，并应当与“运输条例”第 682—685 段指出的试验后的货包配置一致。计算模式和实际货包结构之间的任何差异（如尺寸、材料、几何构型）都应当被识别和判断。此外，货包设计安全报告应当讨论并解释识别出的差异如何影响分析。

VI.8. 可以考虑四种计算模式类型：内容物模式、单独货包模式、货包阵列模式和物质泄漏模式。内容物模式应当包括定义的密封系统内的所有几何构型和物质区域。可能需要额外的计算模式来描述应当分析的内容物范围或各种阵列配置或损坏配置（见第 VI.40—VI.43 段）。

VI.9. 应当酌情为模式或部分模式提供与工程图纸一致的草图。任何与工程图纸或应用程序中的其他插图的差异，都应当注明和解释。对于每个模式，可以通过限制每个草图上的尺寸特点来简化图纸，并根据需要提供多个图纸，每个厂房都在前一个图纸上。

VI.10. 货包设计安全报告的临界部分应当涉及货包的尺寸公差，包括含有中子吸收体的组件。在开发计算模式时，应当包括倾向于增加保守性的公差（即产生更高的反应性值）。从标称壁厚中减去公差对于阵列计算应当是保守的，并且对单独货包计算没有显著影响。

VI.11. 货包和内容物的材料规范范围（包括任何不确定性）应当在货包设计安全报告的临界部分中解决。所有易裂变材料的规范和不确定性吸收材料、结构材料和慢化材料应当与货包的工程图纸和规定的内容标准一致。材料规范的范围和相关的不确定性应用于选择产生最高反应性的参数，以遵守“运输条例”第 676 段要求。例如，对于每一个计算模式，为临界控制而添加到货包内的任何中子吸收体（例如硼、镉或钆）的原子密度应当限于根据“运输条例”第 501 段要求经化学分析或中子传输测量证实的原子密度。

VI.12. 在实践中，也可以通过确定反应性裕度来考虑尺寸或材料规范的小变化的影响，该裕度涵盖由于所考虑的参数变化引起的反应性变化。该额外的反应性裕度应当是正的。

VI.13. 在临界安全计算模式中包括一个标记所有不同材料区域的表是有帮助的。本表应当酌情为每个区域列出以下内容：

- 材料；
- 材料的密度；
- 材料的成分；
- 每种成分的重量（百分比）和原子密度；

- 模式所代表的区域质量，以及该区域的实际质量（与第 VI.3—VI.6 段讨论的内容物和包装描述一致）。

## 分析的方法

VI.14. 货包设计安全报告应当提供足够的信息或参考文献，以证实用于完成临界安全评定的计算机代码、核截面数据和技术是充分的。安全评定中使用的计算机代码应当在货包设计安全报告中标记和描述，或应当包括足够参考文献。核实货包是否按预计执行是很重要的。货包设计安全报告应当识别或引用计算中使用的所有硬件和货包（标题和版本），以及相关的版本控制信息。计算机代码和相关数据（如横截面）的正确安装和操作应当通过执行和报告示例问题或一般问题的结果来证实货包提供的验证问题。应当讨论与计算模式相关的货包的能力和局限性，特别注意讨论可能影响计算的局限性。

VI.15. 直接求解玻尔兹曼（Boltzmann）运输公式形式得到  $k_{\text{eff}}$  的计算方法是临界安全分析的首选方法。确定性离散坐标技术和蒙特卡罗统计技术是大多数临界分析程序使用的典型求解公式。蒙特卡罗分析是普遍的，因为这些代码可以更好地建模几何细节所需的大多数临界安全分析。与有限的使用和/或唯一的计算方法相比，良好记录和良好验证的计算方法可能需要更少的描述。使用代码来求解玻尔兹曼公式的近似（例如扩散理论）或使用更简单的方法来估计  $k_{\text{eff}}$  是正当的。

VI.16. 当使用蒙特卡罗代码时，临界安全评定人员应当考虑由统计技术提供的  $k_{\text{eff}}$  的不精确性质。每个  $k_{\text{eff}}$  值都应用标准差  $\sigma$  报告。典型的蒙特卡罗代码提供了计算  $k_{\text{eff}}$  的标准差估计。在某些情况下，分析人员可能希望通过使用不同的有效随机数重复计算并使用这组  $k_{\text{eff}}$  来确定  $\sigma$ ，来获得对标准差的更好估计。此外，由于蒙特卡罗方法的统计性质，很难确定由于问题参数变化引起的  $k_{\text{eff}}$  的微小变化。为了表明  $k_{\text{eff}}$  的趋势，由于参数变化而引起的  $k_{\text{eff}}$  的变化应当具有统计学意义。

VI.17. 确定性、离散坐标方法的几何模式局限性通常限制了它们在边界计算、简化模式和研究  $k_{\text{eff}}$  对系统参数变化的敏感性方面的适用性。这些灵敏度分析可以使用整个问题的一個特定区域的模式（例如，由一个详细的篮子模型包围的燃料销或均质易裂变材料单元）来证实反应性的变化，只

要模型尺寸或材料规范有微小变化。必要时，应当使用此类分析，以确保或证实完整货包模型使用了相对于系统  $k_{\text{eff}}$  值计算的保守假设。例如，一维燃料销模式可以用来证实包覆层厚度公差对反应性的影响。

VI.18. 计算方法既利用了计算机程序，又利用了程序所用的中子截面数据。临界安全评定应当使用从涉及各种中子相互作用（例如俘获、裂变和散射）的测量数据中得出的截面数据进行。从评价核数据参考文献中处理的未经修订的数据应当被视为此类数据的一般来源。横截面数据的来源、为准备分析数据而进行的任何处理以及记录横截面库内容及其适用范围的任何相关参考文献都应当通过货包设计安全报告进行追踪。应当讨论可能影响分析的已知限制（例如，共振数据的遗漏或范围有限，有限的顺序或散射）。

VI.19. 货包设计安全报告应当提供一个讨论，以帮助确保由规范计算的  $k_{\text{eff}}$  值是适当准确的。对多组横截面的适当问题依赖处理、使用足够的横截面能量组（多组）或数据点（连续能量）以及数值结果的适当收敛是申请人可能需要在货包设计安全报告中评审和讨论问题的示例。在代码允许的程度上，申请人应当证实或讨论任何检查，以确认为临界安全分析准备的计算模式与代码输入一致。例如，代码生成的几何模式和按区域的物质质量输出的图在该确认过程中可能是有益的。

VI.20. 蒙特卡罗计算的统计性质导致很少有规则、标准或检验来判断计算何时收敛。然而，一些守则确实就是否已经出现趋同提供了指导。因此，分析人员可能需要讨论代码输出或其他用于确认收敛充分性的度量。例如，许多蒙特卡罗代码提供了输出编辑，应当对其进行评审以确定是否有足够的收敛性。此外，在临界安全分析中使用的所有重要代码输入参数或选项都应当在货包设计安全报告中确定和讨论。对于蒙特卡罗分析，这些参数应当包括中子起始分布、所跟踪的历史数（例如，每代数和每代粒子数）、所选择的边界条件、任何特别的反射层处理以及任何特别的偏置选择。对于离散坐标分析，每个区域中使用的空间网格、使用的角求积、选择的散射阶数、选择的边界条件以及通量和/或特征值收敛标准都应当指定。

VI.21. 代码文档和参考文献是信息来源，用于获得与计算  $k_{\text{eff}}$  所用蒙特卡罗代码相关的不确定性的实际数据，并就输出特点和应当观察的趋势提出

建议。如果申请人遇到衔接问题，应当提供对该问题的讨论和获得适当的 $k_{\text{eff}}$ 值所采取的步骤。例如，可以通过选择不同的中子起始分布或运行额外的中子历史来实现计算收敛。现代计算机允许对显著数量的粒子历史进行跟踪。

## 计算方法的验证

VI.22. 运输货包的批准申请应当证实，用于确定临界安全的计算方法（代码和横截面数据）已根据可证实适用于货包设计特征的测量数据进行了验证。验证过程应当为计算方法的可靠性提供基准，并应当证实包装系统的次临界限值是正当的。

VI.23. 用于执行和记录验证过程的现有导则[VI.5、VI.7]表明：

- (a) 偏差和不确定性应当通过与适用于货包设计的临界实验进行比较来确定。
- (b) 偏差和不确定性的适用范围应当根据实验中参数变化的范围来确定。
- (c) 任何超出实验参数范围的适用范围的扩展都应当基于作为参数函数的偏差和不确定性的趋势，并使用独立的计算方法。
- (d) 应当根据已确定的偏差和不确定性以及次临界裕度确定货包的次临界上限。

VI.24. 虽然有重要参考文献可证实多个不同的临界安全守则和横截面数据组合的性能，但货包设计安全报告仍应当证实申请人所使用的特定计算方法（例如守则版本、横截面库和电脑平台）是按照上述程序验证的，并考虑到评定各阶段对管理系统要求。

VI.25. 验证过程的第一阶段应当是通过使用定义明确的临界实验来确定计算方法的适当偏差和不确定性，这些实验具有货包设计的特征参数（例如材料、几何构型）。单独货包配置、货包组、正常运输工况和事故工况在选择验证过程的临界实验时，应当考虑运输的影响。理想情况下，这组实验应当与最影响中子能谱和反应性的货包特征相匹配。这些特征包括：

- (a) 易裂变同位素（根据“运输条例”第 222 段定义的铀-233、铀-235、钚-239 和钚-241）、形状（均质、异质、金属、氧化物、氟化物）和易裂变同位素组成；

- (b) 符合货包内和货包之间最佳条件的氢气整備（如果货包内含有大量的其他慢化剂，如碳或铍，则也应当考虑这些因素）；
- (c) 吸收体材料和结构材料的类型（例如硼、镉）、放置（在内容物之间、内部或外部）和分布；
- (d) 单独货包内容物配置（如均质或异质）和货包反射层材料（铅、钢）；
- (e) 阵列配置，包括间距、间隙材料和货包数。

VI.26. 从可用的临界实验中不太可能找到货包特征的完整组合，目前还不存在针对大型货包阵列的临界实验。因此，为了证实计算方法能充分预测每个实验的  $k_{eff}$  值，必须对足够多的临界实验进行建模。所选择的实验应当具有在正常和事故工况下对货包（或货包阵列）的  $k_{eff}$  重要的特征。

VI.27. 选择的临界实验应当在货包设计安全报告中简要描述，并为详细描述提供参考。货包设计安全报告应当指出与参考实验描述的任何偏差，包括任何此类偏差的依据（例如与实验人员的讨论、实验日志）。由于验证和支持文件可能导致很长的报告，通常可以在货包设计安全报告中总结结果并参考验证报告。

VI.28. 对于使用临界实验的验证，计算方法中的偏差是临界实验的计算  $k_{eff}$  值与单位之间的差，尽管可以考虑实验误差和外推的使用。通常，如果一个计算方法过高预测了临界条件（即计算的  $k_{eff} > 1.0$ ），则认为它具有正偏差，如果它低估了临界条件，则认为它具有负偏差（即计算  $k_{eff} < 1.0$ ）。一个计算方法应当有一个不依赖于特征参数的偏差，或者是一个平滑的、表现良好的特征参数函数。在可能的情况下，应当分析足够数量的临界实验，以利用验证过程中的重要参数（例如氢气与裂变比（H/X）、铀-235 浓缩、中子吸收体材料）确定可能存在的趋势。一组临界实验的偏差应当作为计算出的  $k_{eff}$  数据的最佳拟合与 1.0 之间的差值。在存在趋势的情况下，偏差在参数范围内不会恒定。如果不存在趋势，偏差将在适用范围内保持不变。为了识别趋势，就计算不确定性和实验不确定性方面具有统计意义。

VI.29. 临界安全分析人员应当考虑三种不确定性：实验数据的不确定性，计算方法的不确定性，以及分析人员和计算模式的不确定性。实验数据中不确定性的示例是材料或制造数据中报告的不确定性，或由于实验布局描

述不充分或仅仅由于设备公差造成的不确定性。计算方法中不确定性的示例包括用于求解数学公式的近似值中的不确定性、由于解的收敛性而产生的不确定性以及由于横截面数据或数据处理而产生的不确定性。个别的建模技术、代码输入选项的选择和计算结果的解释可能是由于分析人员或计算模式造成的不确定性的来源。

VI.30. 一般说来，所有这些不确定性来源都应当在临界实验的计算  $k_{\text{eff}}$  结果的可变性中完整地观察到。可变性应当包括每个计算临界实验  $k_{\text{eff}}$  值的蒙特卡罗标准偏差，以及由于考虑实验不确定性而引起计算值的任何变化。因此，这些不确定性将内在包含在偏差和偏差中的不确定性。该偏差的变化或不确定性应当通过对临界实验的计算  $k_{\text{eff}}$  值进行有效的统计处理来确定。现有的方法[VI.8]使得偏差和偏差中的不确定性能够作为所选特征参数变化的函数进行评价。

VI.31. 应当提供用于分析临界实验的计算模式，或提供对此类讨论的充分参考。应当提供用于分析的输入数据集，并说明这些数据集是由申请人开发的，还是从其他已确定的来源（如已出版参考文献、数据库）获得的。已知的不确定性应当确定实验数据，并讨论如何或是否将它们包括在计算方法的总体偏差和不确定性的建立中。用于确定偏差和不确定性的统计处理应当在应用程序中彻底讨论，并在适当的情况下包括适当参考文献。

VI.32. 作为代码验证工作的一个组成部分，应当定义已建立的偏差和不确定性的适用范围。货包设计安全报告应当证实，考虑到正常和事故工况，货包都在此适用范围内，和/或货包设计安全报告应当界定包括货包所需的范围的扩展。应当通过识别重要参数和/或代码验证（或未验证）的特性范围来定义适用范围。用于确定适用范围的程序或方法应当在批准申请中讨论和判断（或引用）。例如，一种方法[VI.8]指出适用范围是用于关联偏差和不确定性的特征参数的限值（上限和下限）。特征参数可以例如根据氢气与裂变比来定义（例如  $H/X=10-500$ ），引起裂变的平均能量，总裂变与热裂变的比率（例如  $F/F_{\text{TH}}=1.0-5.0$ ），或铀-235 浓缩。

VI.33. 对于具有超出规定适用范围特征的货包，使用偏差和不确定性得到了共识导则[VI.5]的认可。该导则指出，扩展应当基于作为系统参数函数的偏差趋势，如果扩展很大，则由独立的计算方法确认。然而，申请人应当考虑到外推可能导致对实际行为的预测不佳。即使在没有实验数据的大

范围内插值也会产生误导[VI.9]。申请人还应当考虑到这样一个事实，即与其他计算方法的比较可以说明不足或提供并行。然而，由于独立方法的结果存在差异，在缺乏实验数据的情况下，确定哪个结果是“正确的”并不总是一件简单的事情[VI.10]。

VI.34. 临界安全分析人员应当认识到，目前没有关于什么构成“大的”扩展的共识指导，也没有关于如何扩展偏差趋势的指导。事实上，评定人员要考虑的不只是偏差的趋势，而是不确定性和偏差的趋势。在一个参数范围的一端缺乏实验数据可能会导致不确定性在那个区域<sup>3</sup>变得更大。偏差和不确定性的适当扩展意味着评定人员应当确定和理解偏差和不确定性的趋势。评定人员在扩大适用范围时应当极其谨慎，并提供需要扩大适用范围的详细正当性，以及在此扩大范围内用于估计偏差和不确定性的方法和程序的透彻描述。

VI.35. 货包设计安全报告的临界安全部分应当说明如何利用计算方法与临界实验的比较所确定的偏差和不确定性来确定最小  $k_{eff}$  值（即次临界上限值），以便将计算出的  $k_{eff}$  较高的类似系统视为临界系统。建议使用以下一般关系来建立验收标准：

$$k_c - \Delta k_u \geq k_{eff} + n\sigma + \Delta k_m \tag{VI.1}$$

式中

- $k_c$  是临界条件（1.00）；
- $\Delta k_u$  是计算偏差和不确定性的考虑；
- $\Delta k_m$  是次临界要求的裕度；
- $k_{eff}$  是货包或货包组获得的计算值；
- $n$  是考虑到的标准差数量（2 或 3 为常见值）；
- $\sigma$  是蒙特卡罗分析得到的  $k_{eff}$  值的标准偏差。

<sup>3</sup> 应当注意的是，使用参考文献[VI.8]方法不确定性的任何扩展。应当将不确定性的函数行为视为参数的函数，而不仅仅是不确定性的最大值。

因此，一般关系可以改写为：

$$1.00-\Delta k_u \geq k_{\text{eff}} + n\sigma + \Delta k_m \quad (\text{VI.2})$$

或

$$k_{\text{eff}} + n\sigma \leq 1.00 - \Delta k_m - \Delta k_u \quad (\text{VI.3})$$

VI.36. 货包评价应当使用的最大次临界上限（USL）由以下方法给出：

$$\text{USL} = 1.00 - \Delta k_m - \Delta k_u \quad (\text{VI.4})$$

VI.37. 如前所述，偏差可以是积极的（过度预测临界实验）或消极的（低估临界实验）。然而，谨慎的临界安全实践是假设不确定性是单边不确定性，它降低了对临界条件的估计，因此，根据定义，总是零或负。本节中使用的  $\Delta k_u$  术语代表偏差和不确定性的综合值，申请人通常应当定义此术语，以确保最大次临界上限的值不会增加。因此，如果组合值为负值，则  $k_u$  为组合偏差和不确定性的绝对值；如果组合值为正，则  $k_u$  为 0。

VI.38. 考虑到  $k_{\text{eff}}$  对货包可预见的物理或化学变化的敏感性以及广泛的验证研究的可用性，安全评定中使用的次临界裕度  $\Delta k_m$  的值是一个判断问题。例如，低浓缩铀系统的  $k_{\text{eff}}$  值可能很高，但就货包条件或易裂变材料数量的可想象变化而言，该值几乎没有显著变化。相反，一个高浓缩铀系统可能在货包条件或易裂变材料数量的微小变化下，在  $k_{\text{eff}}$  中表现出显著变化。运输货包的典型实践通常是使用等于  $0.05\Delta k$  的  $\Delta k_m$  值。虽然  $\Delta k_m$  值低于 0.05 对某些货包可能是正当的，但该较低的值需要根据可用的验证和对系统和潜在变化的影响的证实理解来证实。参考文献[VI.8]统计方法提供了一种技术的示例，可用于证实  $\Delta k_m$  的选定值足以用于验证中所使用的给定临界实验集。缺乏临界实验数据或需要超出适用范围[VI.5]可能表明需要将次临界范围扩大到通常适用范围之外。

VI.39. 参考文献[VI.8、VI.11—VI.19]相关于可能有用的临界实验、基准试验和通用代码验证报告的信息。

## 计算和结果

### 概述

VI.40. 本节提出了一个逻辑的、通用的计算方法，应当在货包设计安全报告中描述。至少应当执行两个系列的计算示例：(i) 根据“运输条例”第 680—683 段要求进行的一系列单独货包示例；以及 (ii) 根据“运输条例”第 684 段和第 685 段要求进行的一系列阵列示例。然而，安全评定需要进行的计算次数将取决于各种参数的变化和应当考虑的条件、货包设计和特点、货包在正常工况和事故工况下的内容物和潜在工况。就基于计算方法的安全评定而言，申请人应当将术语“次临界”（见第 673 段和第 682—685 段）视为计算的  $k_{\text{eff}}$ （包括任何蒙特卡罗标准偏差）小于第 VI.22—VI.39 段定义的最大次临界上限。

VI.41. 货包设计安全报告中应当提供代表不同可能的负载配置（全部和部分负载配置）的计算。只有在正当性清楚明了的情况下，才应当考虑包含不同装载配置的单独内容物模式。需要进行充分的计算，以证实货包的裂变内容物是以其反应性最强的形状、与其在密封系统内的物理和化学形状以及适当的正常或事故运输工况相一致的形态来考虑的。如果内容物可以在某一参数范围内变化（例如，质量、浓缩、同位素分布、间距），临界安全分析应当表明，该模式描述和使用的参数规范为第 673—685 段指出的条件提供了最大  $k_{\text{eff}}$ 。提供最大反应性的内容物参数值和/或内容物配置可以根据正在分析的是单独货包还是货包的阵列而变化。

VI.42. 对于易裂变材料的非均匀混合物，应当假想裂变块之间的最佳间距，以达到最大的反应性，除非提供适当的结构来确保已知的间距或间距范围（例如组件中的反应堆燃料销）。对于复杂的系统，往往存在竞争因素，均匀的间距可能不是最有可能的反应状态。运输单独球团矿的货包内容物模式应当确保球团矿尺寸和间距的可信变化在达到产生最大反应性的最佳构型时考虑的。运输含有易裂变材料废物的货包应当确保在安全分析中使用易裂变材料的限制浓度。根据“运输条例”第 676 段指出，必须通过将相关参数设置为其最保守值（与可能值的范围一致）来解决内容物的不确定性，在实践中，这可以通过将其纳入计算不确定性的考虑范围来实现。

VI.43. 根据可能需要的计算次数，以表格形式总结计算结果，并附有案例标记符、对每个示例的条件和示例结果的简要说明，这是很有帮助的。如果表中支持并简化了文本中的口头描述，则应当包括额外信息。参考文献[VI.20]包括一个推荐的格式示例，用于总结单独货包和货包组计算的结果。对于证实限制条件得到适当应用的情况，可以使用类似的格式来总结结果。

### 单独货包分析

VI.44. 为“运输条例”第 682 段和第 683 段目的，用于证实次临界的单独货包分析应当描述反应性最强的包装和内容物，与材料的化学和实物形状以及考虑（第 682 段）或不考虑（第 683 (a) 段）泄漏水要求相一致。其他单独货包分析可能需要证实中间配置分析，以确定最具反应性的配置。确定最具反应性的配置应当考虑以下因素：

- (a) 因撞击造成内外尺寸变化；
- (b) 由于火灾试验导致材料损失，如中子防护罩或木质外包装；
- (c) 由于撞击、火灾或浸没，易裂变材料或中子吸收体材料在密封系统内的重新排列；
- (d) 温度变化对货包材料和/或中子相互作用特性的影响。

VI.45. 除非第 680 段所述的特别特点，单独货包的计算应当系统地调查水淹和货包反射的各种状态（根据“运输条例”第 681 段指出）代表运输的正常工况和事故工况。如果货包有多个空隙区域，包括密封或包容系统内的区域，应当考虑每个区域（和/或区域组合）的水淹情况。应当考虑单独货包完全水淹和反射的情况。申请人应当考虑水淹顺序的变化（例如，部分水淹，由货包在水平或垂直方朝上引起的变化，在低于全密度水时的水淹（慢化），由内而外逐步水淹区域）。

VI.46. “运输条例”第 681 段要求，在“运输条例”第 682 段所需的评定中，除非围绕密封系统的包装材料提供更高的  $k_{\text{eff}}$ ，否则密封系统在所有侧面都会以至少 20 厘米的全密度水紧密反射。因此，在常规和正常运输工况下，需要对考虑密封系统水反射和货包水反射的分析进行评价，以确定最高  $k_{\text{eff}}$  的条件。在运输事故工况下，如果证实密封系统仍留在货包内，则

可以排除水对密封系统的反射，而只考虑货包的水反射。围绕在密封系统周围的铅屏蔽是包装反射层的一个示例，它可以提供比水更大的反射。

VI.47. 可能需要几个单独货包分析来评定“运输条例”第 683 段关于空运货包的规定，特别是在没有按照“运输条例”第 733 段和第 734 段进行实际试验的情况下。在没有适当试验的情况下，应制定这些分析以证实假设货包材料中不加水，在单独货包可能至关重要的情况下不会出现任何安排。单独货包计算的结果会影响阵列系列计算所需的方法和计算次数，特别是在有不同内容物加载配置的情况下。

### 货包阵列的评定

VI.48. 货包组模式应当描述计算中使用的、为满足“运输条例”第 684 段和第 685 段要求所必需的货包安排。至少需要两个阵列模式：(i) 符合正常运输工况的货包阵列；和 (ii) 符合以下事故工况的货包阵列运输。数字“N”可能小于 1，在该情况下，货包的临界安全指数将大于 50。各阵列模式中使用的单独货包的配置（符合正常运输工况和事故运输工况）应当与第 VI.44—VI.47 段讨论的各单独货包模式一致（但不一定相同）（例如，在单独货包模式中泄漏需要最小化，但在阵列模式中货包之间的相互作用可能需要最大化）。

VI.49. 阵列慢化的处理可以容易或复杂，这取决于结构材料的位置及其对事故工况损坏的敏感性。对于所有这些条件和条件的组合，评定人员应当仔细调查与材料和包装在正常和事故运输工况下的化学和物理形状一致的内部和散布慢化的最佳程度，并证实次临界保持不变。应当考虑多种慢化条件，包括以下几点：

- (a) 主要包容系统内包装材料的慢化；
- (b) 由于货包中不同空隙区域的优先水淹而产生的慢化性；
- (c) 结构材料的慢化（例如绝热和中子屏蔽）；
- (d) 货包组中货包之间区域的慢化。

VI.50. 在正常运输工况下，分析应当只考虑货包中的慢化剂（第 VI.49 段 (a) — (c) 项），分析必须考虑到按照“运输条例”第 684 (a) 段要求，各货包之间不存在慢化（第 VI.49 (d) 段）—例如雾、雨、雪、泡沫或水淹。在确定一系列符合运输事故工况货包的临界安全指数时，申请人应当仔细考

考虑上述所有 4 个条件，包括每种形式的慢化如何改变。作为一个示例，考虑一个带有热隔热退化和热中子毒物材料的货包。对于正常的运输工况，分析应当包括隔热。对于事故工况，申请人应当调查由于热试验而降低慢化的影响。如果本示例货包的包容系统不能防止泄漏水，申请人应当仔细评价包容。中子毒物对系统反应性的影响也会随着慢化程度的变化而变化。

VI.51. 除非证实在适当的试验工况下不会有水泄漏到空隙空间，否则应当在每次计算中考虑最佳慢化。最佳慢化是为阵列提供最大  $k_{\text{eff}}$  值的条件（这可能与最佳单独货包条件的慢化程度不同）。在确定最佳慢化条件时，应当考虑局部和优先水淹。如果没有水泄漏到系统中，可以在阵列模式中假设货包中的物质提供的实际内部慢化。同样，如果慢化剂提供了超过最佳的慢化作用，并且由于其物理和化学形状不能从容器泄漏，则可以在模式中考虑其慢化剂的特性。例如，如果一种固态慢化剂的存在得到证实，就可以在计算模式中考虑它对易裂变材料的影响过大。对于正常运输工况和事故运输工况，应当分别评定和适用该慢化标准。

VI.52. 符合正常运输工况的货包组的每个模式都应当假想货包之间有遵守“运输条例”第 684 (a) 段要求的空隙。根据“运输条例”第 685 段对符合运输事故工况的货包阵列进行评定。应当确定该最佳的穿插含氢慢化条件。最佳条件被认为是提供最高  $k_{\text{eff}}$  值的含水条件。散布慢化应当被认为是将货包组中的一个货包与另一个货包隔离的慢化。该散布慢化应当不被认为包括货包中的慢化。因此，如果货包提供的散布慢化大于所示的最佳慢化，则可以在计算模式中假想较大的量。

VI.53. 组件间中子相互作用的灵敏度随组件设计的不同而不同。例如，小而轻的货包比大而重的货包（如辐照核燃料货包）更容易受到高中子相互作用的影响。由于每种货包的安排都需要考虑内部水慢化和散布水的变化，如果没有适当的经验来指导分析的选择，该过程可能是繁琐的。这有助于提供  $k_{\text{eff}}$  值作为货包间慢化剂密度函数的曲线图。

VI.54. 在准备第 VI.53 段所述的情节时，第一步是确定符合事故试验结果的货包阵列的最佳慢化。当水被添加到货包之间的区域时，货包的间距可能会限制可以添加慢化剂的数量。由于该原因，有时使用由单独货包和紧配合重复边界组成的阵列单元来模拟无限货包阵列是方便的。如果在完全

密度慢化时，该阵列与接触的单元对增加散布慢化剂密度的  $k_{\text{eff}}$  响应应具有上升趋势（正斜率），申请人应当考虑增加单位单元的尺寸，并重新计算  $k_{\text{eff}}$  作为慢化剂密度的函数。增大单元的尺寸提供了增大的货包之间的边到边间距，并使更多的体积可用于散布的慢化剂。只有在确认货包被隔离，并且添加的间隙水只提供额外的水反射后，才应当停止该渐进的程序。

VI.55. 应当考虑可能导致计算更高  $k_{\text{eff}}$  值的密度和间距变化的所有可信组合，并在货包设计安全报告中提供讨论，证实最大  $k_{\text{eff}}$  值已经确定。图 VI.1 描述了  $k_{\text{eff}}$  与散布水慢化剂密度的一些示例，说明了在包装安全评定中可能遇到的慢化剂、吸收和反射特征。曲线 A、B 和 C 表示货包组被过慢化，增加水慢化只降低  $k_{\text{eff}}$  值（曲线 B 和 C）或对  $k_{\text{eff}}$  值没有影响（曲线 A）。曲线 D、E 和 F 代表了在零水密度下阵列被欠慢化的阵列，增加散布慢化剂密度导致  $k_{\text{eff}}$  值增加。然后，随着水密度的进一步增加，中子吸收开始生效，货包之间的中子相互作用减小， $k_{\text{eff}}$  值变平（曲线 D）或减小（曲线 E 和 F）。这些尖峰效应，如曲线 E 和 F 中可见的尖峰效应，可在极低的慢化剂密度（例如全密度的 0.001—0.1 分之一）下发生。因此，在计算最大  $k_{\text{eff}}$  值时，在选择散布慢化剂密度值时应当慎重。需要注意的是，单独货包计算只需要 20 厘米的水反射，因此，对于间隔良好的阵列（超过 20 厘米），事故工况阵列对单独货包产生的  $k_{\text{eff}}$  可能高于单独货包模式（这取决于“运输条例”第 680 段和第 681 段所述现象的影响，需要考虑）。曲线 G 代表了一个阵列，在该阵列中，即使在完全水密度的情况下，也没有达到最佳的散布慢化剂密度。对于该情况，申请人应当增加货包组中货包的中心至中心间距，所有情况都应当重新计算。

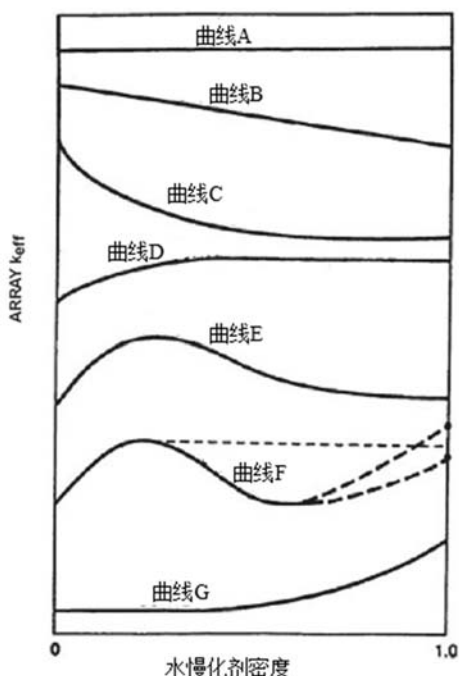


图 VI.1. 阵列  $k_{eff}$  与穿插水慢化剂密度的典型图[VI.20]。

VI.56. 货包组计算的目的是“运输条例”第 686 段要求的获得确定临界控制临界安全指数所需的信息。评定人员可以考虑用无限货包组模式开始货包组计算。可能需要连续较小的有限阵列，直到正常工况下和运输事故工况下的阵列尺寸低于最大次临界上限。作为替代方案，申请人可以使用任何货包组尺寸启动分析，例如，基于计划在车辆上运送的货包数量的货包组尺寸。

VI.57. 在临界安全评定中，应当注意考虑货包的最具反应性的阵列配置。在研究不同的阵列布置时，应当考虑阵列系统的泄漏和阵列中货包之间的相互作用的竞争效应。最小化表面体积比的阵列布置减少了泄漏，简单地说，应当最大化  $k_{eff}$ 。应当考虑阵列中货包的优先几何排列。例如，对于一些货包（例如，在易裂变材料偏离中心装载的情况下），优化相互作用的需要可能意味着当货包分为单层或双层时，阵列的反应性更强。外部水反射层的影响也需要考虑。对于某些阵列情况，阵列中可能存在很少的慢化剂，因此增加表面积可能导致更多的慢化剂，并可能导致更高的反应性。

如果提供了充分的正当性，确切的货包布置可以用简化布置来表示。例如，已经表明在简单的情况下，通过在正方形间距点阵排列中使用适当修订的货包模型，可以表示货包的三角形间距排列[VI.20]。在更复杂的情况下（即使是立方货包），三角形间距的影响可能很重要，因为三个三角形间距的货包之间的相互作用可能是一个主要因素。由于有如此多的相互竞争的影响，评定中所作的任何简化都需要证实是正当的。从货包组泄漏的角度来看很明显的事情，从货包交互的角度来看可能不那么明显。所有有限的货包阵列都应当被一个至少 20 厘米厚的紧密配合的全密度水反射层反射。

VI.58. 临界安全指数应当根据“运输条例”第 686 段要求确定的和来自货包组的信息分析了在正常工况下和在运输事故工况下仍将处于次临界（低于最大次临界上限）的货包数量。

## 特殊问题

VI.59. 为了减少运输货包的临界安全方面的保守性，设计人员应当在整个设计过程中仔细考虑临界安全问题。重要的大量变量会导致大量的计算。因此，评定人员与货包设计和制造团队的其他成员有效互动，以减少评定中需要考虑的变量，并确保对临界安全问题的充分投入，符合评定人员的兴趣。降低临界安全中传统使用边界保守性的困难常常出现在确认事故工况下货包的性能和证实该性能对临界安全的影响方面。与负责货包设计的结构、材料和容器方面的设计团队成员的互动是至关重要的，以便临界安全分析人员获得为计算模式做出合理假设所需的知识。经验和临界安全评定人员的知识对于确保有效而完整的评定得到执行和记录也是至关重要的。

VI.60. 为了安全起见，通常需要依赖于限制质量、尺寸或浓度的设计选项，但由于有效负载减少，通常是一个低优先级的设计选项。同样，通过隔离易裂变材料进行控制需要太多宝贵的货包空间。提供特别功能以防止泄漏水的设计选项是一个有吸引力的替代方案，可以在临界评定中消除对水的考虑，但特别功能的设计和证实可能非常困难，并导致漫长的评审过程。因此，使用固定中子毒物仍然是帮助确保临界安全的主要选择。为了增加运输的大量辐照核燃料的装载量，辐照核燃料的同位素组成可以作为

新的（未辐照的）同位素组成值的替代方法，用于传统的辐照核燃料货包临界安全评定的边界方法。

### 辐照历史信用（燃耗信用）

VI.61. 对于辐照（如辐照至接近设计燃耗）核燃料的运输，传统的设计基准一直是利用新的、未辐照的核燃料的同位素组成进行临界安全评价。该方法简单明了，相对容易防守并且提供了一个保守的裕度，通常排除了对错误装载事件的大多数担忧。

VI.62. 辐照核燃料冷却时间较长的运输和需要考虑较高的初始浓度值，使得临界安全成为辐照核燃料货包的一个更具限制性的设计问题。因此，在新设计中装卸增加的辐照核燃料容量，并在现有货包中实现更高的初始浓缩度，将辐照核燃料的辐照或燃耗导致的反应性降低归功于该概念成为新燃料假设的一个有吸引力的设计替代方案。考虑辐照核燃料燃耗导致的燃料库存变化，从而降低反应性的概念被称为“燃耗信用”。然而，在使用辐照燃料同位素组成进行临界安全评价的设计基准分析之前，需要解决几个问题。这些问题包括：

- (a) 验证分析工具和相关核数据，以证实其在燃耗信用领域的适用性；
- (b) 设计基准分析规范以确保  $k_{\text{eff}}$  边界值的预测；
- (c) 操作和行政控制，确保装载到货包中的辐照核燃料已被核实符合该货包设计规定的装载要求。

VI.63. 在临界安全分析中使用辐照核燃料同位素组成意味着任何用于预测该组成的计算方法都应当得到验证，最好是对照测量数据。辐照核燃料的反应性降低是由于裂变库存的减少和燃耗期间积聚的寄生吸收中子核素（非裂变铀系元素和裂变产物）的增加。参考文献[VI.21、VI.22]提供了有助于确定影响压水反应堆辐照燃料反应性的重要核素的信息。可以从安全分析中省略的辐照核燃料核素是寄生吸收体，只有在分析中包括它才能降低  $k_{\text{eff}}$ 。燃料材料基质（如气体）固有的中子吸收体也应当消除。

VI.64. 在选择了用于安全分析的核素之后，验证过程就应当开始了。已编写了测量同位素组成数据的汇编[VI.23—VI.25]，并努力利用从这些汇编[VI.25—VI.27]选出的数据验证计算方法。可用于验证的测量同位素数据有限。另一个值得关注的事实是，裂变产物测量的数据库是铀系元素测量的

一个小子集。此外，与辐照核燃料中的大多数重要锕系元素相比，裂变产物核素的截面数据在广泛的能量范围内受到的评审要少得多。裂变产物可以提供 20—30% 的燃耗负反应性，但其截面数据和同位素预测的不确定性降低了它们在燃耗信用安全评定中的有效性。

VI.65. 辐照核燃料同位素组成的使用也引起了与预测  $k_{\text{eff}}$  的计算方法性能相关的验证问题。该担忧源于这样一个事实，即没有在运输货包环境中使用辐照燃料的临界实验报告。使用实际辐照燃料的实验数据是必要的，以证实：

- (a) 所有核素的截面数据，包括新燃料中不存在的核素的截面数据，足以预测  $k_{\text{eff}}$ ；
- (b) 同位素组成的变化及其对  $k_{\text{eff}}$  的影响可以是充分建模；
- (c) 分析方法充分地处理了辐照核燃料中粒子相互作用的物理问题。

应当考虑充分的相关实验数据[VI.28—VI.31]，以便为验证使用燃耗信用作为设计基准假设的货包设计安全报告中应用的计算方法提供依据。比较独立计算方法和数据的计算基准练习[VI.32—VI.34]也有助于理解技术问题和查明预测数据与测量数据之间差异的潜在原因。

VI.66. 对建模和参数不确定性的理解，以及在分析假设中适当地考虑这些不确定性是必要的，以便在应用燃耗信用的货包设计安全报告中计算  $k_{\text{eff}}$  的边界值。其中许多不确定性应当作为验证过程的一部分进行检验。例如，参考文献[VI.22]讨论了一种程序，以便在分析测量的同位素数据和数据点的数目时纳入可变性，以提供一个调整辐照核燃料同位素组成的“校正”系数，从而可以计算出  $k_{\text{eff}}$  值的保守估计值。

VI.67. 反应堆中特定燃料组件的同位素组成在不同程度上取决于初始核素浓缩、比功率、反应堆运行历史（包括慢化剂温度、可溶性硼和反应堆中的组件位置）、可燃毒物或控制棒的存在以及排放后的冷却时间。很少，如果有的话，安全分析人员知道所有的辐照参数，通常，分析人员必须在规定的初始浓缩、燃耗、冷却时间和组装类型下证实货包的临界安全。应当选择关于比功率、运行历史、轴向燃耗分布和可燃毒物存在的数据，以确保计算出的辐照核燃料成分将产生  $k_{\text{eff}}$  的保守估计。参考文献[VI.22、VI.35、VI.36]讨论了重要反应堆历史参数的识别及其对辐照核燃料反应性

的影响。类似地，参考文献[VI.22、VI.35]讨论了轴向燃耗剖面中不确定性的影响，并提供了关于轴向同位素分布和数值输入参数（例如中子历史的数目）所需的细节信息，以便预测可靠的  $k_{\text{eff}}$  值。

VI.68. 在验证过程中使用边界不确定性和分析假设应当确保安全分析对初始浓缩、燃耗、冷却时间和组装类型的范围是保守的。对于给定的组装类型和最小冷却时间（反应性在最初的 100 年左右随着冷却时间而降低），安全分析可以提供一个负载曲线（见图 VI.2），该曲线表明燃耗和确保次临界区域的初始浓缩区域。

## 设计和操作问题

### 中子毒物的使用

VI.69. 传统上，中子吸收材料分为结构材料和中子毒物两大类。结构材料通常由于其功能而保证存在。因此，临界安全评定人员应当确保评定符合竣工货包，并对未来的修订进行评审，并针对潜在的临界问题进行处理。固定中子毒物是故意加入的，以吸收中子，降低中子反应性，或在异常工况下限制中子反应性的增加。依赖于毒物的中子吸收（相对于依赖于结构材料的中子吸收）的主要问题是确保这些毒物的存在。因此，必须特别注意保证中子吸收材料的存在和适当分布在货包的假想寿命内。物理、化学和腐蚀机制应当被认为是吸收体丧失的潜在机制。由于中子直接吸收（从而转换为不吸收同位素）而造成的吸收材料丧失通常是无关紧要的，因为任何可测量的耗尽都需要数百万年的常规操作，因为次临界系统中的通量水平极低。

VI.70. 当需要中子毒物时，最好将它们尽可能地融入正常的结构材料中，并通过测量来核实它们的存在。例如，固定在铝或钢基体中的硼可用于内部容器（篮），以减少货包之间的中子相互作用（前提是结构/热可接受），或者可在内部容器的内表面镀镅。但是，货包设计安全报告中需要处理核实（也许以某种频率重复）吸收体确实按规定的数量和分布存在的问题（见“运输条例”第 501 段和第 503 段）。

VI.71. 如果装运的次临界取决于内容物的部件中子吸收材料的存在（例如，燃料组件中带有已知吸收体或控制棒的裂变废物），则证实材料在正常和事故工况下存在是一个重要的安全问题。

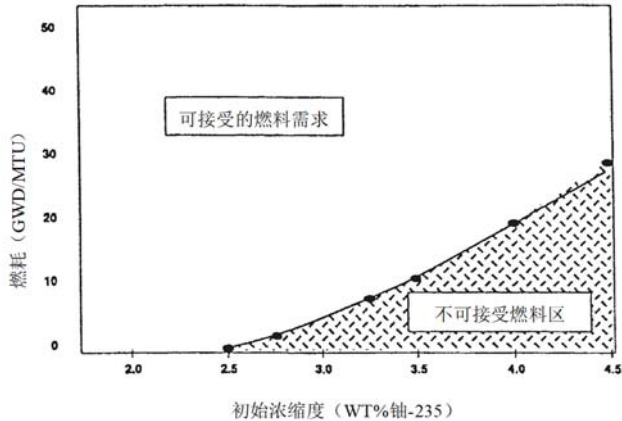


图 VI.2. 表明燃耗和初始浓缩区域、确保次临界的负载曲线[VI.40]。

装运前测量

VI.72. 在货包评定中使用燃耗信用时，需要进行操作和行政控制，以确定货包中装载的辐照核燃料符合安全评价中假想特征。“运输条例”第 677 (b) 段要求进行一项测量，将评定与这项测量联系起来是适当的。评定应当表明，在考虑到安全边际和错误概率的情况下，测量足以达到预计目的（见第 677.1—677.4 段）。所使用的测量技术应当考虑到燃料误载的可能性和由于辐照而产生的可用次临界裕度。

VI.73. 参考文献[VI.37]提供了测量技术可变性的一个示例。其中规定使用简单的  $\gamma$  探测器测量来核实小于 5600 兆瓦日每吨铀的燃耗信用允许值，但对较高辐照允许值的燃料燃耗进行更直接的测量。第二次测量依靠两个仪器仪表来核实基于能动和非能动中子测量的反应堆燃耗记录。在参考文献 [VI.38、VI.39]，类似的测量设备被证实是确定组件是否在图 VI.2 所示的“可接受燃料区域”内的实用方法。如果轴向燃耗曲线被确定为安全分析所依赖的乏燃料的一个重要特征，那么类似的测量设备也可能被用来确定该曲线是否在规定限值内。

## 附录 VI 参考文献

- [VI.1] PRUVOST, N.L., PAXTON, H.C., “核临界安全导则”, 第 L12808 号报告, 新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室, 洛斯阿拉莫斯 (1997 年)。
- [VI.2] THOMAS, J.T. 编, 《核安全导则 TID-7016》第 2 版, 第 NUREG/CR-0095 (ORNL/NUREG/CSD-6) 号报告, 核管制委员会, 华盛顿特区 (1978 年)。
- [VI.3] PAXTON, H.C., PRUVOST, N.L., “含铀-235、钚-239 和铀-233 系统的临界尺寸”, 第 L10860-MS 号报告, 新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室, 洛斯阿拉莫斯 (1987 年)。
- [VI.4] 日本原子能研究所《核临界安全手册》(英译) (JAERI-Review-95-013), 日本原子能研究所, 东京 (1995 年)。
- [VI.5] 美国国家标准协会《反应堆外可裂变材料运行中的核临界安全》(ANSI/ANS-8.1-1998, R2007 (R=重申)), 美国核学会, 伊利诺伊州拉格兰奇帕克 (2007 年)。
- [VI.6] 美国国家标准协会《特殊钢系元素的核临界控制》(ANSI/ANS-8.15-1981, R1987, R1995, R2005 (R=重申)), 美国核学会, 伊利诺伊州拉格兰奇帕克 (2005 年)。
- [VI.7] 国际标准化组织《核裂变材料贮存、装卸和加工中的临界安全原则》(ISO 1709:2018), 国际标准化组织, 日内瓦 (2018 年)。
- [VI.8] LICHTENWALTER, J.J., BOWMAN, S.M., DeHART, M.D., “轻水堆燃料运输和贮存货包临界基准导则”, 第 NUREG/CR-6361 (ORNL/TM-13211) 号报告, 核管制委员会, 华盛顿特区 (1997 年)。
- [VI.9] PARKS, C.V., WRIGHT, R.W., JORDAN, W.C., “123 族截面库在水慢化铀系统临界分析中的适用性”, 第 NUREG/CR-6328 (ORNL/TM-12970) 号报告, 核管制委员会, 华盛顿特区 (1995 年)。

- [VI.10] PARKS, C.V., JORDAN, W.C., PETRIE, L.M., WRIGHT, R.Q., “使用金属/铀混合物探索数据不确定性”, 《泛美核学会》第 73 期 (1995 年) 第 217 页。
- [VI.11] KOPONEN, B.L., WILCOX, T.P., HAMPEL, V.E., “1943 年至 1978 年的核临界实验”, 注释书目: 第 1 卷, 主要清单, 第 UCRL-52769 号报告第 1 卷, 加利福尼亚州劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (1979 年)。
- [VI.12] BIERMAN, S.R., “适用于核燃料输送系统的现有实验临界数据”, 第 PNL-4118 号报告, 华盛顿州里奇兰巴特尔西北太平洋实验室 (1983 年)。
- [VI.13] 经济合作与发展组织《评价临界安全基准实验国际手册》, 第 NEA/NSC/DOC (95) 03 号报告第 1—6 卷, 经济合作与发展组织, 巴黎 (1995 年)。
- [VI.14] DURST, B.M., BIERMAN, S.R., CLAYTON, E.D., “临界实验对标手册”, 第 PNL-2700 号报告, 华盛顿州里奇兰巴特尔西北太平洋实验室 (1978 年)。
- [VI.15] 经济合作与发展组织《轻水堆乏燃料运输容器临界规范的标准问题演练》, CSNI 第 71 号报告 (限制), 经济合作与发展组织, 巴黎 (1982 年)。
- [VI.16] 经济合作与发展组织《大型易裂变材料货包临界规范的标准问题演练》, CSNI 第 78 号报告 (限制), 经济合作与发展组织, 巴黎 (1984 年)。
- [VI.17] JORDAN, W.C., LANDERS, N.F., PETRIE, L.M., “基诺 V.A. 的验证: 与临界实验相比较”, 第 ORNL/CSD/TM-238 号报告, 马丁·玛瑞埃塔能源系统公司, 田纳西州橡树岭国家实验室 (1994 年)。
- [VI.18] “核临界安全”, ICNC'91 (会议论文集, 牛津, 1991 年), 第 3 卷 (1991 年)。

- [VI.19] “核临界安全”，ICNC'91（会议论文集，阿尔伯克基，1995年），第2卷，新墨西哥大学，新墨西哥州阿尔伯克基（1995年）。
- [VI.20] DYER, H.R., PARKS, C.V., ODEGAARDEN, R.H., “运输货包临界安全评定准备建议”，第 NUREG/CR-5661（ORNL/TM-11936）号报告，核管制委员会，华盛顿特区（1997年）。
- [VI.21] BROADHEAD, B.L., 等，“核素对轻水堆乏燃料运输和长期贮存相关功能要求重要性的研究”，第 ORNL/TM-12742 号报告，田纳西州橡树岭国家实验室（1995年）。
- [VI.22] DeHART, M.D., “压水堆乏燃料货包燃耗信用制重要方面的敏感性和参数评价”，第 ORNL/TM-12973 号报告，马丁·玛丽埃塔能源系统公司，田纳西州橡树岭国家实验室（1996年）。
- [VI.23] NAITO, Y., KUROSAWA, M., KANEKO, T., “轻水堆乏燃料同位素组成数据手册”，第 JAERM94-034 号报告，日本原子能研究所，东京（1994年）。
- [VI.24] BIERMAN, S.R., TALBERT, R.J., “验证临界性计算中使用的辐照燃料成分的基准数据”，第 PNL-10045 号报告，华盛顿州里奇兰巴特尔西北太平洋实验室（1994年）。
- [VI.25] KUROSAWA, M., NAITO, Y., KANEKO, T., “临界安全评价用乏燃料同位素组成及同位素组成数据库（SFCOMPO）”，《核临界安全》（ICNC'95 第5届国际会议论文集，阿尔伯克基，1995年），新墨西哥大学，新墨西哥州阿尔伯克基（1995年）第2.11—2.15节。
- [VI.26] HERMANN, O.W., BOWMAN, S.M., BRADY, M.C., PARKS, C.V., “压水堆乏燃料同位素分析用刻度系统的验证”，第 ORNL/TM-12667 号报告，田纳西州橡树岭国家实验室（1995年）。

- [VI.27] MITAKE, S., SATO, O., YOSHIZAWA, N., “用于燃耗信用制研究的压水堆燃料辐照后检验数据分析”, 《核临界安全》, ICNC’ 95 (第 5 届国际会议论文集, 阿尔伯克基, 1995 年), 新墨西哥大学, 新墨西哥州阿尔伯克基 (1995 年) 第 5.18—5.25 节。
- [VI.28] BOWMAN, S.M., DeHART, M.D., ParksC.V., “燃耗信用制应用的四级规模验证”, 《核技术》第 110 期 (1995 年) 第 53 页。
- [VI.29] GULLIFORD, J., HANLON, D., MURPHY, M., “燃耗信用计算方法和数据的实验验证”, 《核临界安全》, ICNC’ 95 (第 5 届国际会议论文集, 阿尔伯克基, 1995 年), 新墨西哥大学, 新墨西哥州阿尔伯克基 (1995 年)。
- [VI.30] SANTAMARINA, A., 等, “在 Minerve 反应堆中通过反应性价值测量进行燃耗信用制计算的实验验证”, 同上, 第 19—25 页。
- [VI.31] ANNO, J., FOUILLAUD, P., GRIVOT, P., POULLOT, G., “钐-149 基准的描述和利用: 参与乏燃料燃耗信用制的裂变产物”, 同上, 第 5.10—5.17 段。
- [VI.32] TAKANO, M., OKUNO, H., “经济合作与发展组织核能机构燃耗信用制临界基准, IIA 阶段结果”, 第 NEA/NSC/DOC (96) 01 号报告, 日本原子能研究所, 东京 (1996 年)。
- [VI.33] TAKANO, M., “经济合作与发展组织核能机构燃耗信用制临界基准, IA 阶段的结果”, 第 NEA/NSC/DOC (93) 22 号报告, 日本原子能研究所, 东京 (1994 年)。
- [VI.34] DeHART, M.D., BRADY, M.C., PARKS, C.V., “经济合作与发展组织核能机构: 燃耗信用制计算临界基准—IB 阶段结果”, 第 NEA/NSC/DOC (96) -06 (ORNL-6901) 号报告, 田纳西州橡树岭国家实验室 (1996 年)。
- [VI.35] DeHART, M.D., PARKS, C.V., “燃耗信用制应用中临界安全分析相关的问题”, 《核临界安全》, ICNC’ 95 (第 5 届国际研讨会论文集, 阿尔伯克基, 1995 年), 新墨西哥大学, 新墨西哥州阿尔伯克基 (1995 年) 第 26—36 页。

- [VI.36] BOWDEN, R.L., THORNE, P.R., STRAFFORD, P.I., “英国核燃料公司在临界安全评定中对反应堆燃料燃耗申请信用制时采用的方法”，同上，第 1B.3—10 页。
- [VI.37] ZACHAR, M., PRETESACQUE, P., “乏燃料运输至 COGEMA 雨果后处理厂的燃耗信用制”，《国际放射性物质运输杂志》第 52—4 期（1994 年）第 273—278 页。
- [VI.38] EWING, R.I., “美国核设施使用分叉系统的燃耗核实测量”，《核临界安全》ICNC’ 95（第 5 届国际会议论文集，阿尔伯克基，1995 年），新墨西哥大学，新墨西哥州阿尔伯克基（1995 年）第 11.64—11.70 节。
- [VI.39] EWING, R.I., “燃耗核实仪在乏压水堆燃料仅限锕系元素燃耗信用制中的应用”，《放射性物质包装和运输》第 95 期（国际研讨会论文集，拉斯维加斯，1995 年），美国能源部，华盛顿特区（1995 年）。
- [VI.40] PARKS, C. V., DYER, H. R., WHITESIDES, G. E., “第 10 章，临界安全”，《放射性物质包装手册：描述、操作和维护》，L. B. Shappert 编，ORNL/M-5003，橡树岭国家实验室，田纳西州（1998 年）。

## 附录 VII

### SCO-III 运输活度摄入量计算导则

VII.1. 在涉及 SCO-III 的事故中，事故附近人员放射性核素的最大活度摄入量应当与 A 型货包的最大活度摄入量大致相同（见第 522.3 段），即  $10^{-6}A_2$  或相应的 50 毫希沃特吸入剂量。

#### 放射性核素活度摄入量

VII.2. 在 SCO-III 装运事故 Q 附近的人员放射性核素活度摄入量如下：

$$Q = Q_{\text{INT\_FIX}} + Q_{\text{INT\_NF}} + Q_{\text{EXT\_FIX}} \quad (\text{VII.1})$$

式中

$Q_{\text{INT\_FIX}}$  是由于物体内表面的固定污染而产生的放射性核素活度摄入量；

$Q_{\text{INT\_NF}}$  是由于物体内表面的非固定污染引起的放射性核素活度摄入量；

$Q_{\text{EXT\_FIX}}$  是由于物体外表面的固定污染而产生的放射性核素活度摄入量。

注意 SCO-III 外表面的非固定污染物不得超过第 508 段规定的限值，与上述活度摄入  $Q_{\text{INT\_NF}}$  和  $Q_{\text{EXT\_FIX}}$  相比，外表面非固定污染的潜在活度摄入被认为无关紧要。

VII.3. 由于物体内表面的固定污染， $Q_{\text{INT\_FIX}}$ ，放射性核素的活度摄入量可计算如下：

$$Q_{\text{INT\_FIX}} = Q_{\text{INV,INT\_FIX}} \times F_{\text{SCR,INT\_FIX}} \times F_{\text{REL,INT\_FIX}} \times F_{\text{AER,INT\_FIX}} \times F_{\text{NTK}} \quad (\text{VII.2})$$

式中

$Q_{\text{INV,INT\_FIX}}$  是物体内表面的固定污染的库存，对于均匀表面污染的物体，可以从该库存中确定；

$$Q_{\text{INV,INT\_FIX}} = C_{\text{INT\_FIX}} \times A_{\text{INT}} \quad (\text{VII.3})$$

式中

- $C_{INT\_FIX}$  是单位面积内表面的固定表面污染水平；
- $A_{INT}$  是物体的内表面面积；
- $F_{SCR,INT\_FIX}$  是事故中从内表面刮擦下来的固定污染物的分数；
- $F_{REL,INT\_FIX}$  是事故中从物体内表面刮擦下来的固定污染物的分数；
- $F_{AER,INT\_FIX}$  是从可呼吸气溶胶形状的内表面刮擦下来的固定污染物排放活度的分数；
- $F_{NTK}$  是事故附近人员吸入的可呼吸排放活度的分数。

VII.4. 由于物体内表面的非固定污染而产生的放射性核素活度摄入量（ $Q_{INT\_NF}$ ）可以以类似的方式计算，但应当假想物体上存在的非固定污染100%可供排放，而不需要对表面进行任何刮擦，特定如下：

$$Q_{INT\_NF} = Q_{INV,INT\_NF} \times F_{REL,INT\_NF} \times F_{AER,INT\_NF} \times F_{NTK} \tag{VII.4}$$

式中

$Q_{INV,INT\_NF}$  是物体内表面的非固定污染的库存，对于具有均匀表面污染的物体，可以从以下方面确定：

$$Q_{INV,INT\_NF} = C_{INT\_NF} \times A_{INT} \tag{VII.5}$$

式中

- $C_{INT\_NF}$  是单位面积内表面的非固定表面污染水平；
- $A_{INT}$  是物体的内表面面积；
- $F_{REL,INT\_NF}$  是事故中从物体排放和排放的物体内表面非固定污染物的分数（ $F_{REL,INT\_NF}$  应当作为单位（100%），除非使用较低的排放分数是正当的）；
- $F_{AER,INT\_NF}$  是物体内表面以可呼吸气溶胶形状存在的非固定污染物排放活度的分数；

$F_{NTK}$  是事故附近人员吸入的可呼吸排放活度的分数。

VII.5. 由物体外表面固定污染引起的放射性核素活度摄入量  $Q_{EXT\_FIX}$  可以用与内表面相同的方法计算，用公式 (VII.2) 的下标 EXT 代替下标 INT，特定如下：

$$Q_{EXT\_FIX} = Q_{INV,EXT\_FIX} \times F_{SCR,EXT\_FIX} \times F_{REL,EXT\_FIX} \times F_{AER,EXT\_FIX} \times F_{NTK} \tag{VII.6}$$

式中

$Q_{INV,EXT\_FIX}$  是物体外表面固定污染的库存，对于具有均匀表面污染的物体，可以通过以下方法确定：

$$Q_{INV,EXT\_FIX} = C_{EXT\_FIX} \times A_{EXT} \tag{VII.7}$$

式中

$C_{EXT\_FIX}$  是单位面积外表面固定表面污染水平；

$A_{EXT}$  是物体的外表面面积；

$F_{SCR,EXT\_FIX}$  是事故中从外表面刮擦下来的固定污染物的分数；

$F_{REL,EXT\_FIX}$  是事故中从物体外表面刮擦下来的固定污染物的分数；

$F_{AER,EXT\_FIX}$  是从外表面刮擦下来的固定污染物排放活度的分数，以可呼吸气溶胶的形状；

$F_{NTK}$  是事故附近人员吸入的可呼吸排放活度的分数。

## 示例计算

### 污染程度

VII.6. 由于 SCO-III 的内表面被认为是不可接触表面，所以内表面固定污染加上非固定污染的污染限值为  $8 \times 10^5$  贝可/平方厘米。在本示例中，为内表面的固定污染水平选择一个接近该限值的值。

$$C_{INT\_FIX} = 7 \times 10^5 \text{ 贝可/平方厘米} \tag{VII.8}$$

VII.7. 在本示例中，400 贝可/平方厘米的值用于内表面的非固定污染水平。

$$C_{INT\_NF} = 400 \text{ 贝可/平方厘米} \tag{VII.9}$$

VII.8. “运输条例”对 SCO-III 飞机外表面的固定污染没有限制（见第 413.13 段）。对于本示例，使用的值为  $4 \times 10^4$  贝可/平方厘米。

$$C_{EXT\_FIX} = 4 \times 10^4 \text{ 贝可/平方厘米} \tag{VII.10}$$

**表面积**

VII.9. 对于该示例，内表面和外表面面积都使用 10 平方米（ $10^5$  平方厘米）的值。

$$A_{INT} = A_{EXT} = 10 \text{ m}^2 = 10^5 \text{ 平方厘米} \tag{VII.11}$$

**事故中刮擦的表面部分**

VII.10. 与 SCO-I 模式（见第 413.4 段）一样，在本示例中，认为 20% 的内外表面在事故中被刮擦。

$$F_{SCR,INT\_FIX} = F_{SCR,EXT\_FIX} = 0.2 \tag{VII.12}$$

**从刮擦表面排放出来的污染物的部分**

VII.11. 对于该示例，认为在事故中从物体上排放出 1% 来自刮擦内表面的固定污染物，100% 来自刮擦内表面的非固定污染物，以及 20% 来自刮擦外表面的固定污染物。

$$F_{REL,INT\_FIX} = 0.01 \tag{VII.13}$$

$$F_{REL,INT\_NF} = 1 \tag{VII.14}$$

$$F_{REL,EXT\_FIX} = 0.2 \tag{VII.15}$$

**以可呼吸气溶胶形状排放活度的分数和事故附近人员吸入的可呼吸活度的分数**

VII.12. 为了符合为 A 型货包开发的 Q 系统的基本假设（见附录 I），在本示例中，我们认为排放活度 100%以可呼吸气溶胶的形状存在，而事故附近人员摄入了 0.01%的可呼吸排放活度。

$$F_{AER,INT\_FIX} = F_{AER,INT\_NF} = F_{AER,EXT\_FIX} = 1 \quad (VII.16)$$

$$F_{NTK} = 10^{-4} \quad (VII.17)$$

### 内表面固定污染引起的放射性核素活度摄入量

VII.13. 首先使用公式 (VII.3) 计算物体内部表面固定污染物的库存，即：

$$\begin{aligned} Q_{INV,INT\_FIX} &= C_{INT\_FIX} \times A_{INT} = 7 \times 10^5 \text{ 贝可/平方厘米} \times 10^5 \text{ 平方厘米} \quad (VII.18) \\ &= 7 \times 10^{10} \text{ 贝可} \end{aligned}$$

VII.14. 然后用公式 (VII.2) 计算由于内表面固定污染引起的放射性核素活度摄入量：

$$\begin{aligned} Q_{INT\_FIX} &= Q_{INV,INT\_FIX} \times F_{SCR,INT\_FIX} \times F_{REL,INT\_FIX} \quad (VII.19) \\ &\quad \times F_{AER,INT\_FIX} \times F_{NTK} \\ &= 7 \times 10^{10} \text{ 贝可} \times 0.2 \times 0.01 \times 1 \times 10^{-4} = 14 \times 10^3 \text{ 贝可} = 14 \text{ 千贝可} \end{aligned}$$

### 内表面非固定污染引起放射性核素活度摄入量

VII.15. 首先使用公式 (VII.5) 计算物体内部表面的非固定污染物库存：

$$\begin{aligned} Q_{INV,INT\_NF} &= C_{INT\_NF} \times A_{INT} = 400 \text{ 贝可/平方厘米} \times 10^5 \text{ 平方厘米} \quad (VII.20) \\ &= 4 \times 10^7 \text{ 贝可} \end{aligned}$$

VII.16. 然后用公式 (VII.4) 计算由于内表面非固定污染引起的放射性核素活度摄入量：

$$\begin{aligned} Q_{INT\_NF} &= Q_{INV,INT\_NF} \times F_{REL,INT\_NF} \times F_{AER,INT\_NF} \times F_{NTK} \quad (VII.21) \\ &= 4 \times 10^7 \text{ 贝可} \times 1 \times 1 \times 10^{-4} = 4 \times 10^3 \text{ 贝可} = 4 \text{ 千贝可} \end{aligned}$$

## 外表面固定污染引起的放射性核素活度摄入量

VII.17. 使用公式 (VII.7) 计算物体外表面固定污染物库存:

$$\begin{aligned} Q_{\text{INV,EXT\_FIX}} &= C_{\text{EXT\_FIX}} \times A_{\text{EXT}} & (\text{VII.22}) \\ &= 4 \times 10^4 \text{ 贝可/平方厘米} \times 10^5 \text{ 平方厘米} = 4 \times 10^9 \text{ 贝可} \end{aligned}$$

VII.18. 然后用公式 (VII.6) 计算由于外表面固定污染引起的放射性核素活度摄入量:

$$\begin{aligned} Q_{\text{EXT\_FIX}} &= Q_{\text{INV,EXT\_FIX}} \times F_{\text{SCR,EXT\_FIX}} \times F_{\text{REL,EXT\_FIX}} & (\text{VII.23}) \\ &\quad \times F_{\text{AER,EXT\_FIX}} \times F_{\text{NTK}} \\ Q_{\text{EXT\_FIX}} &= 4 \times 10^9 \text{ 贝可} \times 0.2 \times 0.2 \times 1 \times 10^{-4} = 16 \times 10^3 \text{ 贝可} = 16 \text{ 千贝可} \end{aligned}$$

## 来自物体的放射性核素总活度摄入量

VII.19. 最后利用公式 (VII.1) 计算出从该物体中放射性核素的总活度摄入量。即:

$$\begin{aligned} Q &= Q_{\text{INT\_FIX}} + Q_{\text{INT\_NF}} + Q_{\text{EXT\_FIX}} \\ &= 14 \text{ 千贝可} + 4 \text{ 千贝可} + 16 \text{ 千贝可} = 34 \text{ 千贝可} & (\text{VII.24}) \end{aligned}$$

## 示例的结论

VII.20. 假设  $A_2 = 0.04$  太贝可 ( $4 \times 10^7$  千贝可), 则以  $A_2$  表示的活度摄入量为:

$$Q = \frac{34 \text{ kBq}}{4 \times 10^7 \text{ kBq}} A_2 = 0.85 \times 10^{-6} A_2 \quad (\text{VII.25})$$

在上述假设下, SCO-III 所提供的安全水平相当于 A 型货包, 与第 VII.1.段所述事故附近人员的摄入相关。

VII.21. 在批准 SCO-III 装运时, 第 VII.2—VII.5 段每一项参数应当检验和是正当的。参数  $A_{\text{INT}}$  和  $A_{\text{EXT}}$  可以从部件的设计图中计算出来。参数的分布和放射性核素成分  $C_{\text{INT\_FIX}}$ 、 $C_{\text{INT\_NF}}$  和  $C_{\text{EXT\_FIX}}$  导致整个部件的  $Q_{\text{INV,INT\_FIX}}$ 、 $Q_{\text{INV,INT\_NF}}$  和  $Q_{\text{INV,EXT\_FIX}}$  进行测量, 或对一系列部件进行适当建模, 并对

每个部件上的代表点进行核实测量。参数  $F_{SCR\_INT}$ 、 $F_{SCR\_EXT}$ 、 $F_{AER}$  和  $F_{NTK}$  是敏感的，应当通过文献（例如参考文献[VII.1、VII.2]）、试验或有理有据的论证。参数  $F_{NTK}$  的值可以是  $10^{-4}$ — $10^{-3}$ ，如第 I.37 段关于 Q 系统的描述。

VII.22. 应当注意库存中的放射性核素库存。例如，在未知的  $\beta$  和  $\gamma$  发射放射性核素的情况下， $10A_2$  的库存限值相当于 0.2 太贝可，如果假设 5000 平方米的表面积（蒸汽发生器的典型内表面积），相当于  $4 \times 10^3$  贝可/平方厘米。这比 SCO-III 不可接近表面的污染水平限值（ $8 \times 10^5$  贝可/平方厘米）低了两个数量级。相比之下，当钴-60 是唯一存在的放射性核素时，不可接触的表面污染的允许水平为 4 太贝可和  $8 \times 10^4$  贝可/平方厘米。

## 附录 VII 参考文献

- [VII.1] 美国能源部《非反应堆核设施的空气排放分数/速率和可呼吸分数》（DOE-HDBK-3010-94），美国能源部，华盛顿特区（1994 年）。
- [VII.2] GRAY, I., “关于 LSA/SCO 材料运输的改进型放射性基准和修订后要求的制定”，《放射性物质包装和运输》第 2004 期（国际研讨会论文集，柏林，2004 年），拉姆特兰斯出版社，英国阿什福德（2004 年）。

## 附录 VIII

### 特定情况下运输

#### 介绍

VIII.1. 提供该指导是为了预测特定情况，在这些情况下即使没有明确界定监管框架也可以确保安全运输。例如，一个国家可能没有放射性物质安全运输的监管，或者可能没有执行放射性物质安全运输条例。使存在监管基础设施，对于以下特殊情况也可能需要一些指导：

- (a) 运输已发现的无看管源；
- (b) 在事故中严重损坏货包的后续运输；
- (c) 紧急情况下的运输。

#### 无看管源的运输

VIII.2. 发现无看管源通常需要将其运送到更安全的位置，例如送回源的原供应商或经授权的处置地点。托运人必须按照“运输条例”，以与任何其他将要运输的放射性物质相同的方式对待无看管源。

#### 放射性物质

VIII.3. 在准备运输时，应当表征无看管源（例如，确定放射性核素、评价活度、检查泄漏和/或污染）。如果源是作为特殊形状放射性物质运输的，在没有特殊形状证书或不适用的情况下（即源超过其建议的工作寿命或关于源来源的数据不足），可能需要重新包覆源。重新包覆源必须满足特殊形状放射性物质要求。如果不可能重新包覆，则应当提供适当的货包。

#### 货包

VIII.4. 放射性物质的表征决定了所需的货包类型，这反过来又决定了货包设计的选择。

VIII.5. 剂量率和污染水平应当由合格专家测量，以确保不超过相关限值。（见第 8.10—8.12 段，以了解在没有监管机构或条例的情况下的指导意见。）

### **特殊安排装运**

VIII.6. 在许多涉及无看管源运输的情况下，可能有必要在特殊安排下装运。在装运货包之前，托运人应当获得必要的多边批准。

### **严重损坏货包的运输**

VIII.7. 装有放射性物质的货包可能在事故中严重损坏。在该情况下，货包必须从公共领域移到一个安全的地方。损坏的货包可能不符合适用的条例，可能必须在损坏的情况下运输。

VIII.8. 应当进行回收操作，并可能需要采取适当措施，以确保在运输过程中继续保持容器和屏蔽的完整性。货包可能必须根据特殊安排（随后加上标记和标签）运输，并经多边批准和附有适用的运输单据。

### **紧急情况下运输**

VIII.9. 应当指出，国家和国际条例可能使某些运输操作豁免适用“运输条例”要求。例如，参考文献[VIII.1]包括以下豁免：

- (a) 由应急响应主管当局进行或在其监督下进行的运输，只要该运输是应急响应所必需的，特别是进行的运输：
  - 载运事故车辆或者载运危险货物发生故障的故障车辆；或
  - 将事故或意外所涉及的危险货物包容和收回，并将其转移至最近的适当安全地点。
- (b) 旨在拯救生命或保护环境的应急运输，但必须采取一切措施确保该运输在完全安全的情况下进行。

## **放射性物质的安全运输在无监管机构或安全条例的国家内/进出/通过**

VIII.10. 一些国家尚未建立放射性物质安全运输的监管基础设施。对于在该情况下运输放射性物质，托运人/收货人应当与原子能机构辐射、运输和废物安全司联系，以获得相关应当遵守程序的指导。

VIII.11. 如果一国没有实施放射性物质安全运输条例，则应当适用“运输条例”（即 2018 年版），适用于在该国境内、自该国、到该国或通过该国的运输。

VIII.12. 如果一个国家没有指定放射性物质安全运输的监管机构，第一份批准证书（特殊安排）可由该国现有的国家辐射防护监管机构发放，该证书应当得到所有与该装运相关的国家批准。原子能机构的辐射、运输和废物安全司可就国际运输安全条例的适用提供指导。

### **装运完成**

VIII.13. 在该特殊情况下，主管当局或相关安全监管机构应当继续跟踪货物直至其安全完成。托运人应当将该装运的安全完成情况通知相关当局。

## **附录 VIII 参考文献**

[VIII.1] 联合国欧洲经济委员会、内陆运输委员会，《欧洲国际道路运输危险货物协定》（2021 年版），联合国欧洲经济委员会，日内瓦（2020 年）。



## 参与起草和审订人员

|                     |               |
|---------------------|---------------|
| Aceña Moreno, M. V. | 西班牙核安全理事会     |
| Alvano, P.          | 意大利国家环境保护研究所  |
| Ben Ouaghrem, K.    | 法国辐射防护与核安全研究所 |
| Börst, F.-M.        | 德国铁路局         |
| Boyle, R.           | 美国运输部         |
| Buchelnikov, A.     | 俄罗斯联邦原子能公司    |
| Cabianca, T.        | 英国卫生保护局       |
| Capadona, N.        | 国际原子能机构       |
| Charette, M. A.     | 加拿大卡梅科公司      |
| Chrupek, T.         | 法国核安全局        |
| Debruyne, M.        | 法国辐射防护与核安全研究所 |
| Desnoyers, B.       | 国际标准化组织       |
| Elechosa, C.        | 阿根廷核监管机构      |
| Ershov, V. N.       | 俄罗斯联邦应急响应中心   |
| Faille, S.          | 加拿大核安全委员会     |
| Fasten, C.          | 德国联邦核安全办公室    |
| Ferran, G.          | 法国核安全局        |
| Fukuda, T.          | 日本核监管局秘书处     |
| Gauthier, F.        | 法国辐射防护与核安全研究所 |
| Hellsten, S.        | 芬兰辐射与核安全局     |
| Hirose, M.          | 日本核监管局秘书处     |
| Ito, D.             | 日本核燃料运输有限公司   |
| Kervella, O.        | 欧洲经济委员会       |
| Kirchnawy, F.       | 奥地利交通、创新和技术部  |

|                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| Koch, F.          | 瑞士核安全监察局        |
| Komann, S.-M.     | 德国材料研究与试验研究所    |
| Konnai, A.        | 日本国家海洋研究所       |
| Krochmaluk, J.    | 法国核安全局          |
| Lizot, M.-T.      | 法国辐射防护与核安全研究所   |
| Malesys, P.       | 世界核运输研究所        |
| Moutarde, M.      | 法国辐射防护与核安全研究所   |
| Muneer, M.        | 巴基斯坦核监管机构       |
| Patko, A. L.      | 美国 NAC 亚特兰大公司总部 |
| Presta, A.        | 世界核运输研究所        |
| Pstrak, D.        | 美国核管制委员会        |
| Rainer, N.        | 德国装置与反应堆安全公司    |
| Ramsay, J.        | 加拿大核安全委员会       |
| Reiche, I.        | 德国联邦核安全办公室      |
| Rooney, K.        | 国际民用航空组织        |
| Sampson, M.       | 美国核管制委员会        |
| Sert, G.          | 法国辐射防护与核安全研究所   |
| Tremblay, I.      | 加拿大核安全委员会       |
| Trivelloni, S.    | 意大利国家环境保护研究所    |
| van Aarle, J.     | 瑞士阿斯波电力公司一核能部   |
| Vogiatzi, S.      | 希腊原子能委员会        |
| Wallin, M.        | 瑞典辐射安全局         |
| Whittingham, S.   | 国际原子能机构         |
| Zamora Martin, F. | 西班牙核安全理事会       |
| Zika, H.          | 瑞典辐射安全局         |





通过国际标准促进安全

