

国际原子能机构安全标准

保护人类与环境

乏燃料的贮存

特定安全导则

第 SSG-15 (Rev.1) 号



IAEA

国际原子能机构

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，国际原子能机构受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

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。

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《核能丛书》由旨在鼓励和援助和平利用原子能的研究、发展和实际应用的资料性出版物组成。它包括关于核电、核燃料循环、放射性废物管理和退役领域技术状况和进展以及经验、良好实践和实例的报告和导则。

乏燃料的贮存

国际原子能机构的成员国

阿富汗
阿尔巴尼亚
阿尔及利亚
安哥拉
安提瓜和巴布达
阿根廷
亚美尼亚
澳大利亚
奥地利
阿塞拜疆
巴哈马
巴林
孟加拉国
巴巴多斯
白俄罗斯
比利时
伯利兹
贝宁
多民族玻利维亚国
波斯尼亚和黑塞哥维那
博茨瓦纳
巴西
文莱达鲁萨兰国
保加利亚
布基纳法索
佛得角
布隆迪
柬埔寨
喀麦隆
加拿大
中非共和国
乍得
智利
中国
哥伦比亚
科摩罗
刚果
哥斯达黎加
科特迪瓦
克罗地亚
古巴
塞浦路斯
捷克共和国
刚果民主共和国
丹麦
吉布提
多米尼克
多米尼加共和国
厄瓜多尔
埃及
萨尔瓦多
厄立特里亚
爱沙尼亚
科威特
埃塞俄比亚
斐济
芬兰
法国
加蓬
冈比亚

格鲁吉亚
德国
加纳
希腊
格林纳达
危地马拉
几内亚
圭亚那
海地
教廷
洪都拉斯
匈牙利
冰岛
印度
印度尼西亚
伊朗伊斯兰共和国
伊拉克
爱尔兰
以色列
意大利
牙买加
日本
约旦
哈萨克斯坦
肯尼亚
大韩民国
科威特
吉尔吉斯斯坦
老挝人民民主共和国
拉脱维亚
黎巴嫩
莱索托
利比里亚
利比亚
列支敦士登
立陶宛
卢森堡
马达加斯加
马拉维
马来西亚
马里
马耳他
马绍尔群岛
毛里塔尼亚
毛里求斯
墨西哥
摩纳哥
蒙古
黑山
摩洛哥
莫桑比克
缅甸
纳米比亚
尼泊尔
荷兰
新西兰
尼加拉瓜
尼日尔
尼日利亚
北马其顿

挪威
阿曼
巴基斯坦
帕劳
巴拿马
巴布亚新几内亚
巴拉圭
秘鲁
菲律宾
波兰
葡萄牙
卡塔尔
摩尔多瓦共和国
罗马尼亚
俄罗斯联邦
卢旺达
圣基茨和尼维斯
圣卢西亚
圣文森特和格林纳丁斯
萨摩亚
圣马力诺
沙特阿拉伯
塞内加尔
塞尔维亚
塞舌尔
塞拉利昂
新加坡
斯洛伐克
斯洛文尼亚
南非
西班牙
斯里兰卡
苏丹
瑞典
瑞士
阿拉伯叙利亚共和国
塔吉克斯坦
泰国
多哥
汤加
特立尼达和多巴哥
突尼斯
土耳其
土库曼斯坦
乌干达
乌克兰
阿拉伯联合酋长国
大不列颠及北爱尔兰联合王国
坦桑尼亚联合共和国
美利坚合众国
乌拉圭
乌兹别克斯坦
瓦努阿图
委内瑞拉玻利瓦尔共和国
越南
也门
赞比亚
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-15 (Rev.1) 号

乏燃料的贮存

特定安全导则

国际原子能机构
2024 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（伯尔尼）通过并于 1972 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。必须获得许可而且通常需要签订版税协议方能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內容。欢迎有关非商业性翻印和翻译的建议并将在个案基础上予以考虑。垂询应按以下地址发至国际原子能机构出版处：

Marketing and Sales Unit
Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
传真：+43 1 2600 22529
电话：+43 1 2600 22417
电子信箱：sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/zh/chu-ban-wu>

© 国际原子能机构，2024 年
国际原子能机构印刷
2024 年 2 月·奥地利

乏燃料的贮存

国际原子能机构，奥地利，2024 年 2 月
STI/PUB/1882
ISBN 978-92-0-501923-9（简装书：碱性纸）
978-92-0-501723-5（pdf 格式）
EPUB 978-92-0-501823-2
ISSN 1020-5853

前 言

本出版物是对原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-15 号的修订。本次修订是根据研究日本福岛第一核电站事故的建议和结果，纳入了对原子能机构《安全标准丛书》安全要求出版物的分析结果。本“安全导则”的修订涉及以下主要领域：(a) 加强事故管理；(b) 防护内部和外部危害；和 (c) 实际消除可能导致放射性物质过早释放或大量释放的情况。

修订是通过修正，增加和（或）删除具体段落进行的。修订使用的段落编号系统如下：

- (1) 修正后的段落保留原来的段落号。下表列出了经修正的段落。作为修订过程的一部分，可能还作了一些编辑性质的小修改。编辑上的改动不被视为对本出版物的修改，因此不包括在表中。
- (2) 新段落使用上一段落的编号并加上大写字母表示。这一编号系统仅用于标明新段落在案文中的位置；这并不意味着各段之间有联系。下表列出了本出版物所有新段落的清单。
- (3) 删除段落的，保留段落号。下表列出了本出版物中所有被删除的段落。

本出版物更改段落摘要	
修正段落	1.3、1.5、1.7、3.3、3.9、3.12、3.19、3.20、3.24、3.25、3.26、3.28、3.29、3.31、4.2、4.6、4.11、4.12、5.1、5.21、5.23、6.2、6.4、6.8—6.10、6.29、6.31—6.34、6.37、6.41、6.42、6.44、6.46、6.48、6.49、6.52、6.57、6.58、6.60、6.61、6.67、6.70—6.74、6.81、6.89、6.90、6.96—6.99、表 2、6.118、6.125、6.127、6.136、6.137、6.138、6.142、6.151、I.4、I.11、I.12、I.16、I.21、I.22、I.25、I.26、I.29、I.33、I.35—I.37、I.46、II.3、VI-1
新段落	1.7A、3.31A、3.31B、5.21A、6.37A
删除的段落	6.5、附件 IV

前 言

国际原子能机构（原子能机构）《规约》授权原子能机构“制定或采取旨在保护健康及尽量减少对生命与财产的危险的安全标准”。这些标准是原子能机构在其本身的工作中必须使用而且各国通过其对核安全和辐射安全的监管规定能够适用的标准。原子能机构与联合国主管机关及有关专门机构协商进行这一工作。定期得到审查的一整套高质量标准是稳定和可持续的全球安全制度的一个关键要素，而原子能机构在这些标准的适用方面提供的援助亦是如此。

原子能机构于1958年开始实施安全标准计划。对质量、目的适宜性和持续改进的强调导致原子能机构标准在世界范围内得到了广泛使用。《安全标准丛书》现包括统一的《基本安全原则》。《基本安全原则》代表着国际上对于高水平防护和安全必须由哪些要素构成所形成的共识。在安全标准委员会的大力支持下，原子能机构正在努力促进全球对其标准的认可和使用。

标准只有在实践中加以适当应用才能有效。原子能机构的安全服务涵盖设计安全、选址安全、工程安全、运行安全、辐射安全、放射性物质的安全运输和放射性废物的安全管理以及政府组织、监管事项和组织中的安全文化。这些安全服务有助于成员国适用这些标准，并有助于共享宝贵经验和真知灼见。

监管安全是一项国家责任。目前，许多国家已经决定采用原子能机构的标准，以便在其国家规章中使用。对各种国际安全公约缔约国而言，原子能机构的标准提供了确保有效履行这些公约所规定之义务的一致和可靠的手段。世界各地的监管机构和营运者也适用这些标准，以加强核电生产领域的安全以及医学、工业、农业和研究领域核应用的安全。

安全本身不是目的，而是当前和今后实现保护所有国家的人民和环境的目标的一个先决条件。必须评定和控制与电离辐射相关的危险，同时杜绝不当限制核能对公平和可持续发展的贡献。世界各国政府、监管机构和营运者都必须确保有益、安全和合乎道德地利用核材料和辐射源。原子能机构的安全标准即旨在促进实现这一要求，因此，我鼓励所有成员国都采用这些标准。

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¹具有保护生命和健康以及保护环境共同目的。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。

¹ 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“必须”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”中的建议用“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防护行动。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计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其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）（从 2016 年起）、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四个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计划、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。

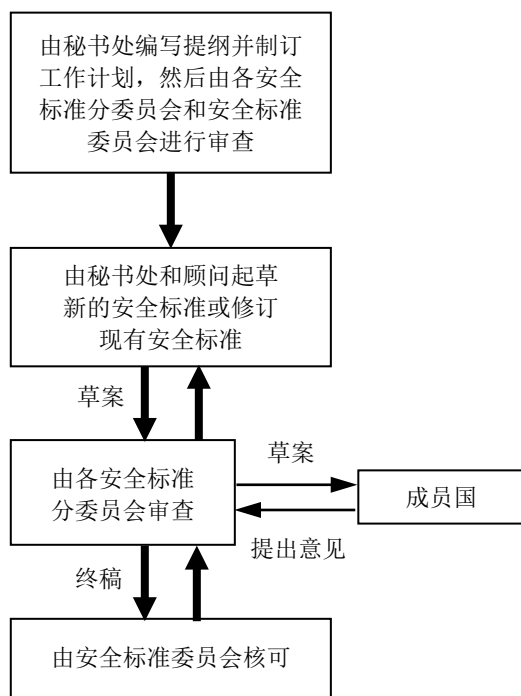


图 2. 制订新安全标准或修订现行标准的过程。

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

安全相关术语应按照《国际原子能机构安全术语》（见 <http://www-ns.iaea.org/standards/safety-glossary.htm>）中的定义进行解释。否则，则采用具有最新版《简明牛津词典》所赋予之拼写和含义的词语。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

1. 引言	1
背景 (1.1-1.7A).....	1
目的 (1.8).....	2
范围 (1.9-1.11).....	3
结构 (1.12, 1.13).....	3
2. 保护人类健康和环境 (2.1-2.6)	4
3. 职责和责任	5
概述 (3.1-3.4).....	5
政府的责任 (3.5-3.8).....	6
监管机构的责任 (3.9-3.15).....	7
营运组织的职责 (3.16-3.28).....	9
乏燃料所有人的责任 (3.39-3.30).....	11
核材料衡算与控制 and 实物保护系统 (3.31-3.31B)	12
4. 管理系统	13
概述 (4.1-4.3).....	13
乏燃料管理 (4.4, 4.5)	13
资源管理 (4.6-4.10).....	14
流程实施 (4.11-4.13).....	15
5. 安全论证文件与安全评定	16
概述 (5.1-5.28).....	16
安全论证文件归档 (5.29)	22
6. 乏燃料贮存的一般安全考虑	23
概述 (6.1-6.5).....	23
乏燃料贮存设施的设计 (6.6-6.76).....	25
乏燃料贮存设施的调试 (6.77-6.88).....	41
乏燃料贮存设施的运行 (6.89-6.146).....	44
乏燃料贮存设施的退役 (6.147-6.154).....	57

附录 I 湿式或干式乏燃料贮存的特殊安全考虑.....	59
附录 II 特殊类型燃料贮存条件和其他考虑.....	71
参考文献	75
附件 I 短期和长期贮存.....	79
附件 II 湿式和干式乏燃料贮存设施的运行和安全考虑.....	81
附件 III 乏燃料贮存设施运行程序中各部分的示例.....	83
附件 IV 辅助安全评定中考虑的场址条件、过程和事件 (外部自然现象)	84
附件 V 辅助安全评定中考虑的场址条件、过程和事件 (外部人因现象)	86
附件 VI 辅助安全评定中考虑的假想始发事件(内部现象)	88
参与起草和审订人员	91

1. 引言

背景

1.1. 乏燃料是所有类型的核反应堆运行产生的，在从反应堆堆芯移出后需要加以安全管理。乏燃料¹在某些情况下被视为废物，在另一些情况下则被视为潜在的未来能源，因此，管理备选计划可能涉及直接处置（一般称为“一次通过式燃料循环”）或后处理（一般称为“闭式燃料循环”）。任何一种管理办法都将涉及若干步骤，其中必然包括将乏燃料贮存一段时间。根据所采用的管理策略，这一贮存期可能从几个月到几十年不等。贮存的时间长短将是决定所采用的贮存安排的一个重要因素。在设计贮存设施时可能尚未确定最后的管理备选计划，导致在必要的贮存期内出现一些不确定性，这是在确定贮存备选计划和设计设施时需要考虑的一个因素。贮存选项包括湿式贮存在某种形式的贮存水池中，或干式贮存在设施中，或为此目的建造的储罐中。储罐可以位于场址上的指定区域，或指定的贮存厂房中。不同设计的湿式和干式贮存技术已在不同的国家得到发展和应用。

1.2. 不论如何看待乏燃料（作为废物或能源），其贮存的安全要求与原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 5 号《放射性废物的处置前管理》[1]规定的放射性废物贮存要求一致。

1.3. 乏燃料贮存设施和贮存在其中的乏燃料安全是通过适当限制所涉放射性核素，保持乏燃料或乏燃料组件的次临界、排热、辐射屏蔽和可回收性来确保的。贮存设施的适当选址、设计、建造和调试，以及适当的管理和安全运行，确保了这些功能。在设计阶段，还需要适当考虑设施今后的退役问题。

1.4. 运行的核反应堆不断产生乏燃料。乏燃料首先暂存在反应堆附属的乏燃料贮存水池中，经过一段时间的冷却后被转移至湿式或干式乏燃料贮存设施贮存，等待后处理或处置（将乏燃料当作放射性废物）。有些反应堆的乏燃料贮存水池有足够的容量来容纳反应堆寿期内产生的所有乏燃料。

¹ 在本出版物中，使用过的燃料和使用过的核燃料的含义相同。

1.5. 乏燃料贮存的基本安全方面适用于研究堆和动力堆乏燃料的贮存。对于研究堆，在确定为确保密封、排热、临界控制、辐射屏蔽和可回收性而应采取的措施时，应采取一种考虑到燃料类型之间差异的办法（例如，研究堆燃料的较低发热量，其较高的浓缩水平和耐腐蚀性较差的包壳材料）。

1.6. 反应堆附属的许多乏燃料贮存设施在一段有限的时期（几年）内用作乏燃料从反应堆卸出到后续进行后处理或处置的贮存选址。鉴于开发处置设施需要时间和已开发后处理方案的局限，贮存期正从几年延长到几十年。乏燃料管理观念的这一变化始终伴随着其他技术的发展，例如富集度增加、燃耗增加、使用先进燃料设计和混合氧化物（MOX）燃料、重新排布、使用燃耗信用制，以及在某些情况下将贮存期延长到超过贮存设施的原始设计寿命。然而，贮存不能被视为乏燃料管理的终极解决方案，乏燃料管理需要一个如后处理或处置明确的终点以确保安全。核设施的设计寿命通常为几十年，贮存乏燃料按经验最多可达 50 年左右。虽然某些乏燃料贮存设施的设计寿命长达 100 年，但鉴于工业和体制变化的速度，在本“安全导则”中，超过大约 50 年的期限被视为“长期”（另见附件 I）。

1.7. 本出版物取代 2012 年版 SSG-15²。本“安全导则”补充了原子能机构《安全标准丛书》第 WS-G-6.1 号《放射性废物的贮存》[2]，可与之一并阅读。

1.7A. 本“安全导则”中使用的术语应理解为原子能机构《安全术语》[3]定义和解释。

目的

1.8. 本“安全导则”的目的是通过考虑来自核反应堆（包括研究堆）的不同类型乏燃料，以及不同的贮存期（包括贮存设施原始设计寿命之后的贮存期），就不同类型乏燃料贮存设施（湿式和干式）的设计、调试、安全运行和安全评定提供最新的指导和建议。本“安全导则”就如何满足第 GSR Part 5 号[1]和原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-4 号《核燃料循环设施安全》[4]，第 GSR Part 2 号《安全的领导和管理》[5]，第 GSR Part 4（Rev.1）号

² 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 号，国际原子能机构，维也纳（2012 年）。

《设施和活动安全评定》[6]和 SSR-2/1 (Rev.1) 《核电厂安全：设计》[7]规定的要求提供了指导和建议。

范围

1.9. 本“安全导则”涵盖可能与其他核设施（如核电厂、研究堆或后处理厂）配套或位于独立场址的乏燃料贮存设施。然而，它并不特定打算涵盖乏核燃料的贮存，只要它仍然是核反应堆或乏燃料后处理设施运行活动的一部分，原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-40 号《核电厂和研究堆放射性废物的处置前管理》[8]和第 SSG-41 号《核燃料循环设施放射性废物的处置前管理》[9]分别述及这些问题。

1.10. 本“安全导则”的范围包括贮存水慢化反应堆的乏燃料，以及在适当考虑的前提下，也可适用于其他类型核燃料的贮存，如气冷堆和研究堆的核燃料，还可适用于贮存乏燃料组件相关部件和可能被置于储罐中的退化或故障的核燃料³。

1.11. 本“安全导则”没有就核材料和核设施的实物保护提出全面和详细的建议。关于核设施实物保护安排的建议和标准，包括风险评定、威胁定义、实物保护系统的设计、维护和运行，实物保护系统的有效性评价和视察，见参考文献[10]以及原子能机构《核安保丛书》出版物。本“安全导则”考虑核材料的实物保护以及核材料的衡算和控制，只是为了强调核材料对安全的潜在影响。

结构

1.12. 本“安全导则”第 2 部分涉及基本安全目标和原则及标准在乏燃料贮存中的应用；第 3 部分规定了参与乏燃料贮存的各组织职责和责任；第 4 部分就提供安全保证所需的管理系统提出建议；第 5 部分提供了关于安全评定的建议；第 6 部分提供了关于乏燃料贮存设施的设计、建造、运行和退役方面安全考虑的建议，包括长期贮存方面考虑。附录 I 涉及湿式和干式贮存乏燃料的特定考虑；附录 II 涉及具有特殊特征乏燃料的考虑。附件 I 解释短期和长期贮存的概念；附件 II 概述湿式和干式乏燃料贮存设施的安全

³ 退化或故障的核燃料可以包括从小针孔到包壳裂纹到燃料棒破损的各种情况。

考虑；附件 III 提供安全导则应用到乏燃料贮存设施运行程序中的示例；附件 IV—附件 VI 提供乏燃料贮存设施安全评定考虑的事件清单。

1.13. 为方便起见，本“安全导则”转载了适用于乏燃料贮存的各项安全要求文本，以及相关的建议。

2. 保护人类健康和环境

2.1. 必须根据原子能机构《安全标准丛书》第 SF-1 号《基本安全原则》[11]规定的基本安全目标和基本安全原则，制定国家辐射防护要求安全原则，并根据原子能机构《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》[12]。特别是，由于乏燃料贮存而对人员造成的剂量要求保持在规定的剂量限值内，并要求在剂量限值范围内辐射防护最优化。

2.2. 如果几个核装置（例如核电厂、乏燃料贮存设施、后处理设施）位于同一场址，公众照射的剂量限值应考虑到可能与场址活动相关的所有照射源。特别是在这种情况下，监管机构应要求场址上核装置的营运组织制定限制措施，但须经管理部门批准。或者，监管机构可以确定剂量限值。关于剂量限值的要求见 GSR Part 3[12]，建议见原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-8 号《公众和环境的辐射防护》[13]。

2.3. 乏燃料贮存设施的设计和乏燃料的贮存必须使现在和将来的工作人员、公众和环境受到保护，使其免受与现场现有乏燃料活动相关的一切电离辐射源的辐射照射有害影响[11]，并为现场可预见的也可能引起照射的未来活动留出足够的裕度。

2.4. 乏燃料贮存设施向环境的排放应根据监管机构规定的条件加以控制，并应在估计工作人员和公众所受剂量时予以列入。关于排放限值的建议见原子能机构《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》[14]。

2.5. 应通过设施内外的监控和监视来核实为限制工作人员和公众的辐射照射而采取的控制措施是否充分。

2.6. 在乏燃料管理的每一个步骤中，应培养和保持一种安全文化，鼓励对防护和安全采取质疑和学习的态度，并劝阻自满情绪[5、15、16]。

3. 职责和责任

概述

GSR Part 5[1]要求 1：法律和监管框架

“政府须提供适当的国家法律和监管框架，以便能够在此框架内计划和安全实施放射性废物管理活动。这种框架须包括明确清晰的责任划分、确保财务资源和其他资源以及规定独立的监管职能。还须在必要时酌情为可能受到影响的邻国提供跨境保护。”

GSR Part 5[1]要求 6：相互依赖关系

“须适当考虑放射性废物处置前管理所有步骤之间的相互依赖关系和预期处置计划的影响。”

3.1. 乏燃料的贮存应在适当的国家法律和监管框架内进行，该框架应明确规定责任分配[17]，包括履行国际义务和核实这些义务遵守情况的责任，并确保对相关设施和活动进行有效的监管控制。国家法律框架还应确保遵守其他相关的国家和国际法律文书，如《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》[18]。

3.2. 乏燃料的管理可能需要乏燃料从一个营运组织转移到另一个营运组织，并且乏燃料管理的各个步骤之间存在各种相互依存关系。法律框架应包括确保在整个过程中明确规定安全责任，特别是在乏燃料的贮存和营运组织之间的转移方面，应通过监管机构的授权制度确保安全责任的连续性。国家之间的转移需要得到各自国家监管机构的批准[18、19]。

3.3. 法律和监管框架应明确规定监管机构⁴、营运组织以及乏燃料所有人（在适当情况下）在乏燃料管理方面的责任应明确规定，并在职能上加以区分。

⁴ 监管机构可以是一个或多个负责设施或活动的监管机构（见第 3.15 段）。

3.4. 应建立一个提供充足财务资源的机制，以覆盖今后的任何费用，特别是与乏燃料贮存和贮存设施退役相关的费用，以及管理放射性废物的费用。应在发放许可证和最终运行之前建立财务机制，并应视需要加以更新。还应考虑在乏燃料贮存设施提前关闭的情况下提供必要的财务资源。

政府的责任

GSR Part 5[1]要求 2：国家放射性废物管理政策和战略

“为确保对放射性废物的有效管理和控制，政府须确保制订关于放射性废物管理的国家政策和战略。这种政策和战略须适合本国放射性废物的性质和数量，须说明所需的监管控制，并须考虑相关的社会因素。它们还须符合《基本安全原则》[11]和国家已批准的相关国际文书、公约和标准。国家政策和战略须构成制订放射性废物管理决策的依据。”

3.5. 政府负责制定一项国家政策和相应的乏燃料管理策略，并提供执行这些政策和战略所需的法律和监管框架。政策和战略应涵盖所有类型的乏燃料和乏燃料贮存设施，并考虑到乏燃料管理各阶段之间的相互依存关系、所涉及的时间期限和可供选择的办法[17]。

3.6. 政府负责建立一个独立于乏燃料所有人或乏燃料管理营运组织的监管机构，拥有充分的授权、权力、人员配备和财务资源，以履行其指定的职责[17]。

3.7. 政府应就制定影响乏燃料管理的政策和战略的事项征求相关各方（即参与乏燃料管理活动或受其影响各方）的意见。

3.8. 如果情况发生变化，需要在国家战略最初假想的期限之后进行贮存，则应开始重新评价国家贮存战略。

监管机构的责任

GSR Part 5[1]要求 3：监管机构的责任

“监管机构须制订关于放射性废物管理设施的建造和开展相关活动的要求，并须公布满足许可证审批过程各阶段要求的程序。监管机构须评审和评定营运组织在获得授权前编写的和在运行期间定期编写的关于放射性废物管理设施和活动的安全论证文件及这类设施和活动的环境影响评定报告。监管机构须就任何必要条件下许可证的发放、变更、中止或撤销作出规定。监管机构须开展活动，核实营运组织是否满足了这些条件。如果营运组织偏离了或不遵守相关要求和条件，监管机构须酌情采取执法行动。”

3.9. 监管机构应就如何满足与乏燃料安全贮存相关的要求向营运组织提供指导，其中应包括但不限于：适用乏燃料装卸和贮存管理系统；制定运行限值 and 条件；安全评定的执行情况；制定和使用可量化的绩效指标；以及安全论证文件的记录和使用⁵。

3.10. 由于乏燃料在回收再处理或处置之前可能会被长期贮存，监管机构应核实营运组织是否正在寿期内为乏燃料贮存设施提供必要的人员、技术和财务资源，只要这种确认符合监管机构的法定义务。

3.11. 乏燃料贮存设施退役计划的监管评审应采用分级方法，特别要考虑贮存设施寿期的各个阶段。初始退役计划应是概念性的，应由监管机构评审其总体完整性，而不是特定退役安排，但应具体包括退役时如何确保提供财务和人力资源以及设计、建造和运行阶段的必要信息。许可证持有人应定期更新退役计划，监管机构应评审更新情况。如果设施关闭不再用于预定用途，则应向监管机构提交最终退役计划以供评审和核准[20]。

⁵ 安全论证文件是支持设施或活动安全的论据和证据的集合。在不同的国家，这些论点和证据可能以不同的名称（例如安全报告、安全档案、安全文件）为人所知，并可能以单一文件或一系列文件的形式呈现（见第 5 部分）。

3.12. 原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-13 号《安全监管机构的职能和程序》[21]提供了相关乏燃料贮存设施的监管视察和执法行动的一般性建议。监管机构应定期核实贮存设施运行的关键方面是否符合国家法律制度的要求和设施许可证条件，例如与保存库存和材料转让记录相关的要求，遵守贮存、维护、视察、试验和监视的验收标准、运行限值和条件，核材料的实物保护以及现场应急准备和响应安排。例如，可以通过对乏燃料贮存设施和营运组织进行例行视察，以及通过评审和评定安全论证文件来进行这种核实。此外，核实应包括视察和评价营运组织的一些活动。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》[22]第 6.30 段指出，监管机构应核实是否准备了必要的记录，并将其保存一段适当的时间。GSG-13[21]提供了关于应保留记录的建议。

3.13. 监管机构应建立适当的手段，向例如生活在附近的人、公众、媒体和其他方面的相关各方通报乏燃料贮存设施的安全方面（包括健康和环境方面）以及监管程序，并应酌情以开放和不公开方式与这些相关各方磋商。应当尊重保密的需要（例如出于安保原因）。进一步的建议见原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-6 号《监管机构与相关各方的沟通和磋商》[23]。

3.14. 监管机构应考虑拟采取的许可证策略，例如：

- (a) 为贮存系统和（或）设施的整个寿期发放的许可证，包括第 5 部分所述的整个预计运行期，包括定期安全评审；
- (b) 在一定期限内发放的许可证，到期后可以续期。

3.15. 如果监管机构由一个以上的机构组成，则应作出有效安排，确保明确界定和协调监管责任和职能，以避免任何遗漏或不必要的重复，并防止对营运组织提出相互冲突的要求。评审和评定以及监视和执法等主要监管职能的组织方式应做到前后一致，并能够进行必要的反馈和信息交流。

营运组织的职责⁶

GSR Part 5[1]要求 4：营运组织的职责

“营运组织须负责放射性废物处置前管理的设施或活动的安全。营运组织须开展安全评定，须编写安全论证文件，并须确保依照法律和监管要求开展相关选址、设计、建造、调试、运行、关闭和退役的活动。”

3.16. 营运组织负责与乏燃料贮存相关的所有活动（包括承包商开展的活动）的安全，并负责确保安全所必需的计划和程序的规范和实施。营运组织应保持高水平的安全文化以展示安全。在一些情况下，营运组织可以是乏燃料的所有人，而在其他情况下，所有人可以是分开的组织。在后一种情况下，应考虑相互依赖关系，包括在贮存设施接收乏燃料之前开展的任何活动，如乏燃料的表征或包装，或随后从设施运输乏燃料，以确保满足安全要求。

3.17. 乏燃料贮存设施营运组织的职责通常包括：

- (a) 向监管机构申请乏燃料贮存设施的选址、设计、建造、调试、运行、改造或退役许可证；
- (b) 进行恰当的安全和环境评定，以支持许可证的申请；
- (c) 依据安全论证文件、许可证条件和适用法规的要求运行乏燃料贮存设施；
- (d) 制定和应用监管机构批准的乏燃料贮存验收标准；
- (e) 按照监管机构的要求提供定期报告（例如乏燃料实际库存、乏燃料进出设施的任何转移、设施内发生的任何必须向监管机构报告的事件等信息），并与相关各方和公众沟通。

3.18. 在乏燃料贮存设施获得批准之前，营运组织应向监管机构提供一份安全论证文件，证明拟议活动的安全，并证明拟议活动将符合国家法律和法规规定的安全要求和标准。在安全论证文件中，营运组织应运用安全评定，确定特定的运行限值和条件。营运组织可能希望将运行目标值设定为低于这些规定的限值，以避免违反批准的限值和条件（见第 6.106 段）。

⁶ 营运组织被视为许可证持有人。如果设施是根据合同运行，则应当明确并记录许可证持有人责任与合同经营管理责任之间的界限。

3.19. 在乏燃料贮存设施寿命期的早期阶段，营运组织应为其最终退役编写初始计划。对于新设施，应在设计阶段考虑到有助于退役的特点。这些特点应包括在退役计划中，并包括关于如何确保提供必要的人力和财务资源及信息的安排的信息，以便在安全论证文件中提出。营运组织应定期更新退役计划，并将更新提交监管机构评审和核准。如果一个设施将要关闭并且不再用于其预定目的，则要求营运组织在与监管机构商定的期限内向监管机构提交最终退役计划以供评审和核准[20]。

3.20. 对于没有退役计划的现有设施，许可证持有人应尽快拟备这类计划，并提交监管机构评审和核准。随后将根据原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 6 号《设施退役》[20]规定的退役要求和原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-47 号《核电厂、研究堆和其他核燃料循环设施的退役》[24]提出的建议进行更新。

3.21. 营运组织应确定其员工和承包商的培训和资格要求，包括初始和定期复训要求[4]。营运组织应确保所有相关工作人员了解乏燃料的性质、潜在危害以及相关的运行和安全程序。监督人员应当有能力开展活动，因此应当为此目的进行人员的选拔、培训、资格认定和授权。应指定一名辐射防护主管监督辐射防护要求的履行情况。

3.22. 营运组织应进行预运行试验和调试试验，以证明贮存设施和贮存活动符合安全评定的要求和监管机构制定的安全要求。

3.23. 营运组织应确保向环境排放的放射性物质和其他潜在危害物质符合许可证条件，并记录排放情况。

3.24. 营运组织应为人员监控、区域监控和环境监控制定计划并实施计划。

3.25. 营运组织应制定程序，说明如何分析对乏燃料贮存设施、贮存条件和待贮存乏燃料进行改造的必要性以及如何实施改造。作为程序的一部分，应评价此类改造和为实施这些改造而进行工程的潜在后果，包括对其他设施安全以及对乏燃料的回收、运输、后处理和处置的后果。程序应与建议的安全改造的重要性相称。

3.26. 要求营运组织分配和维持适当的财务资源，以便在包括退役在内的设施整个寿命期间承担所有必要的任务[17]。

3.27. 营运组织应开发和维护乏燃料数据和贮存系统的信息系统，其中应包括放射性库存、乏燃料的位置和特征、所有权和来源的信息以及关于乏燃料的其他信息。应建立明确的识别系统，并在整个贮存期间进行标识。应保存和更新此类记录，以保证执行乏燃料管理策略，无论是处置还是后处理。

3.28. 要求营运组织编写应急计划以及现场应急准备和有效响应所必需的程序和分析工具[22]。营运组织必须将本应急计划与其他所有在核或辐射紧急情况下负有责任的机构（包括公共当局）的应急计划进行协调，并将其提交监管机构批准[22]。在应急计划的内容、特点和范围中，必须考虑到危害评定的结果以及从运行经验和以往紧急情况，包括常规紧急情况中确定的任何教训[22、25]。作为安全论证文件的一部分，营运组织应向监管机构证明，应急安排为有效的现场应急响应提供了充分的保证，并且它们已经到位[26]。

乏燃料所有人的责任

GSR Part 5[1]要求 6：相互依赖关系

“须适当考虑放射性废物处置前管理所有步骤之间的相互依赖关系和预期处置计划的影响。”

3.29. 应当明确和毫不含糊地拥有贮存在设施中乏燃料的所有权。乏燃料所有人的责任和营运组织的责任如果不同，应明确界定并形成文件。乏燃料所有人（即对乏燃料拥有法律所有权，包括财务责任的机构）应负责管理其乏燃料的总体策略。在确定总体策略时，乏燃料所有人应考虑到乏燃料管理所有阶段之间的相互依存关系，现有备选计划和国家乏燃料管理总体战略。

3.30. 应向监管机构提供相关乏燃料所有权的任何变化或乏燃料贮存设施所有人与营运组织之间关系变化的信息。

核材料衡算与控制 and 实物保护系统

GSR Part 5[1]要求 21：核材料衡算和控制制度

“对于须遵守核材料衡算协定的设施，须在设计和运行放射性废物处置前管理设施时执行核材料衡算和控制制度，以使设施的安全不受到损害……。”

GSR Part 5[1]要求 5：对安保措施的要求

“须实施旨在确保在放射性废物处置前管理中采取综合安全和安保计划的措施。”

3.31. 将要求营运组织建立、维持和实施核材料衡算和控制制度，作为国家核材料衡算和控制制度的一个组成部分⁷ [10]。

3.31A. 此外，在乏燃料贮存设施的建造和运行期间，还要求设计和安装实物保护系统，以威慑和探测未经授权人的侵入，并防止来自设施内外的破坏。

3.31B. SF-1[11]第 1.10 段要求以综合方式设计和实施安全措施和安保措施，以使安保措施不损害安全，安全措施不损害安保。营运组织应向监管机构证明，设施的安保规定，包括实物保护系统和安全管理措施的管理能够做到这一点。

⁷ 原子能机构与《不扩散核武器条约》（不扩散条约）的无核武器缔约国之间的保障监督协定规定，缔约国有义务建立和维持一个国家核材料衡算和控制制度。原子能机构的文件 INFCIRC/153 (Corrected) [27]也称为蓝皮书，阐述了国家核材料衡算和控制制度的基本要求，该文件描述了这种不扩散条约保障协定的结构和内容。

4. 管理系统

概述

GSR Part 5[1]要求 7：管理系统

“管理系统须适用于放射性废物处置前管理的所有步骤和要素。”

4.1. 乏燃料贮存设施在其寿期内各阶段的管理系统要求在 GSR Part 2[5]提出。原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-3.3 号[28]提供关于贮存乏燃料管理系统的建议。

4.2. 营运组织必须建立、实施、评定和不断改进综合管理系统[5]，并将其应用于乏燃料贮存的所有阶段。要求管理系统与营运组织的目标保持一致，并有助于实现这些目标[5]。管理系统应处理乏燃料贮存设施的选址、设计、调试、运行、维护和退役问题。管理系统的设计必须确保乏燃料和乏燃料贮存设施的安全得到维护，乏燃料库存记录和辅助资料的质量得到维护，同时考虑到贮存期的长短和连续的管理步骤，例如后处理或处置[5]。管理系统还应载有各项规定，以确保其目标的实现能够得到证明。

4.3. 乏燃料管理操作的长期性意味着，应特别考虑建立和维持这样的信心，即乏燃料贮存设施和活动的特性将在设施寿期内满足安全要求，直至设施退役（例如，通过建立长期管理乏燃料所必需的基金）。

乏燃料管理

4.4. 乏燃料管理的国家和国际政策和原则作为当前公认的管理安排，将会在设施整个寿期内不断演变。政策决定（如乏燃料后处理）和技术创新与进步（如分离和嬗变）可导致乏燃料总体管理策略的根本变化。然而，营运组织始终保留其对所有活动的责任，其持续的承诺仍然是确保安全，以及保护人类健康和环境的先决条件。

4.5. 为实现基于整体安全策略的计划、目标和目的，应考虑与所有相关各方的互动，以及各种长期因素，例如：

- (a) 提供足够的资源（设施和设备的维护资源是否充足，可能需要在几十年的运行期间定期评审）；
- (b) 保存技术和知识，并向未来参与项目或组织的人员传递这些知识；
- (c) 保留或转移乏燃料和乏燃料管理设施的所有权；
- (d) 项目或营运组织技术和管理人力资源的继任计划；
- (e) 持续作出与相关各方互动的安排。

资源管理

4.6. 乏燃料管理活动将需要财务和人力资源以及乏燃料贮存设施所在地的必要基础设施。高级管理层必须作出安排，为乏燃料管理活动提供充足的资源，以满足乏燃料管理所涉各种活动的安全、健康、环境、安保、质量、人力和组织因素以及社会和经济方面的要求，以及此类活动可能持续的较长时间[5]。

4.7. 应特定规定今后乏燃料管理活动的资金安排，并应适时确定提供资金的责任、机制和时间表。乏燃料产生方应建立适当的提供资金机制。

4.8. 乏燃料管理系统需应对若干提供资金方面的挑战：

- (a) 由于各种原因（例如破产、停业），从乏燃料产生方获得必要资金可能是不可行的，特别是如果在获得生产收益时没有预留资金，或者乏燃料的所有权已转让给其他当事方。
- (b) 如果资金来自公共来源，这 will 与其他公共资金需求竞争，可能难以及时获得足够的资金。
- (c) 对于尚处计划阶段又未积累相关经验的乏燃料管理活动，可能难以就费用作出现实的估算。
- (d) 估算一个长期开展活动的预期费用可能是困难的，因为这些费用将在很大程度上取决于对未来通货膨胀率、利率和技术发展所作的假设。

- (e) 由于社会需求、政治需要、公众舆论以及可能需要花费资源处理的计划外自然事件等所带来的不确定性，将使得纳入未来费用估算的适度风险和偶然性因素难以确定。
- (f) 如果有几个组织参与乏燃料管理活动，必要的财务安排可能会很复杂，而且在设施整个寿期内可能会有所不同。这对所有安排建立足够的信心，以确保在整个系列活动中资金的连续性可能存在问题。

4.9. 应结合积累的经验定期进行反思，包括从事故和事件中吸取教训，并将其用于修订培训计划以及未来的决策。

4.10. 在设计用于长期乏燃料管理的设施时，应一并考虑便于设施运行、设备维护和最终退役的措施。对于长期乏燃料管理活动，应特定说明今后的基础设施需求，并应制定计划，确保这些需求得到满足。相关计划中应考虑支持服务的后续需求，可能最终停产的设备备件，以及为满足新规则和改进运行开展的设备升级，并考虑到软件演变和不可避免的淘汰。还应考虑监控计划和视察技术的开发和应用，以便在长期贮存期间使用。

流程实施

4.11. 如果乏燃料储罐在贮存后出现问题，则应考虑是否可能需要重新安置这些乏燃料储罐。应评定乏燃料贮存期间可能长期需要的或今后可能需要的任何专门设备的可用性。

4.12. 需要长期贮存的乏燃料及其贮存记录的保存方式应尽量减少由于火灾、水淹或其他自然或人为事件（设施内部和外部）等不可预测事件而造成损失、损坏或变质的可能性和后果。记录的贮存安排应符合国家主管部门或监管机构规定的要求，并应定期评定记录的状况。如果记录被无意中销毁，则应评审幸存记录的状态，并重新评价其保留的重要性及其必要的保留期限。

4.13. 每当乏燃料所有人与设施营运组织之间的关系发生变化时（例如，公共组织私有化、创建新的组织、合并或重组现有组织、在各组织之间转移责任、营运组织对管理机构进行内部重组或重新分配资源），都应重新评定管理系统。

5. 安全论证文件与安全评定

概述

GSR Part 5[1]要求 13：准备安全论证文件及辅助安全评定

“营运组织须准备安全论证文件及辅助安全评定。如果是分步建造设施或开展活动，或如果对设施进行改造或对活动进行变更，则须对安全论证文件及辅助安全评定进行必要的评审和更新。”

GSR Part 5[1]要求 14：安全论证文件及辅助安全评定的范围

“放射性废物处置前管理设施的安全论证文件须包括对设施的场址、设计、运行、关闭和退役的所有方面及监管控制是如何满足监管要求的情况作出说明。安全论证文件及辅助安全评定须证明所提供的防护水平，并须向监管机构提供将满足安全要求的保证。”

GSR Part 5[1]要求 22：现有设施

“须评审现有设施的安全性，以核实遵守相关要求的情况。营运组织须根据国家政策和监管机构的要求进行安全相关改进。”

5.1. 在论证乏燃料贮存设施和相关活动的安全性时，应随着设施开发的进展制定安全论证文件，并应以结构化和系统的方式开展辅助安全评定。应评审拟议设施、流程、运行和活动，以确定它们是否可以安全地实施，以及它们是否符合所有相关安全的要求。如果要使用储罐，则可为储罐、贮存厂房或设施以及随后的运输安排准备一个或分开的安全论证文件/或安全评定，如果该储罐最终将用于运输以及贮存。这将取决于国家监管办法。然而，无论采取何种办法，所使用的资源之间的相互依存关系应考虑到核燃料管理操作、活动和共用设施，以确保对安全采取综合办法，并使安全得到最优化。安全论证文件和辅助安全评定应为许可证文件提供主要输入，用于证明符合法规要求[6]。

5.2. 在安全论证文件应考虑乏燃料贮存设施寿期内各个阶段（即选址、设计、建造、调试、运行和退役）。应根据监管要求定期评审安全论证文件，并在必要时进行修订。

5.3. 营运组织对设施在整个寿期内的安全负主要责任[8]。这包括在安全论证文件中保证和证明设施安全的责任。

5.4. 长期贮存（见第 1.6 段和附件 I）可能涉及超出土建结构正常设计寿命以及短期贮存设施，这将对建筑材料的选择、运行方法以及质量保证和质量控制要求等产生影响。在乏燃料长期贮存设施的安全论证文件中应特别考虑的特定问题包括设施的预期寿命、非能动安全特性的重要性、可回收性和管理系统。还应考虑在场址上其他设施关闭后，为乏燃料贮存设施继续运行提供支持服务，特别是反应堆场址上的贮存设施。

5.5. 应论证和说明选择评定时限的正当性。根据评定的目的和评定内容的其他组成部分[26]，为了便于建模或表示，将安全评定的总体时间框架划分为具有不同终点的较短时间窗口可能比较方便。

5.6. 在确定评定时限时，应考虑特定贮存设施或活动的特点，贮存选址和待贮存的乏燃料。应考虑的其他因素包括：

- (a) 对于大多数长期贮存系统（包括储罐、工程结构和周围环境），在设施投产后的一段时间内，潜在的健康和环境影响可能会增加。从长期来看，视设施的性质而定，潜在的影响可能会减少，特别是随着乏燃料放射性核素的衰变。安全评定计算应考虑与设施或活动相关的最大或峰值剂量以及对应风险。
- (b) 可能影响评定时限的另一个考虑因素是外部自然灾害的重现期，如极端气象事件或地震等。
- (c) 对安全评定结果产生重大影响的各种因素可能会随着时间的推移而发生变化，其中包括人类活动造成的外部危害（如在附近建造其他设施）；自然事件（如水位变化）、以及由于共用设施的关闭和退役导致其辅助设施和基础设施的可用性发生变化。在安全评定中应考虑这些潜在的变化。作为评定长期贮存的可能演变的手段，在安全评定中可以考虑被假定为反映不同演变路径的一个或多个假想方案。评定时限可酌情界定为反映贮存设施的潜在变化。

(d) 辐射影响评定中参考人群的位置、习惯和特征可能会随着时间的推移而改变。因此，参考人群应被视为假定，但今后的个人和集体至少应得到与当前所需相同水平的保护。应根据合理的保守和可信的假设，考虑到当前的生活方式以及现有场址或区域环境条件，设定参考人群的习惯和特征。

5.7. 营运组织应在安全论证文件中证明已尽可能采用非能动安全特性。在评定长期安全时，应考虑到非能动屏障随着时间的推移而退化的情况。

5.8. 应评价提供安全功能的不同单元的互补特性。每个单元应尽可能独立于其他单元，以确保它们是互补的，不会因为单一故障模式而故障。安全论证文件应论证和判断每个单元所提供的功能，并应确定它们应在多长时间内履行各自的安全功能，以及如果某个屏障未完全发挥作用时，其替代或附加的安全功能。

5.9. 与处置放射性废物的情况一样，环境也可提供额外的保护功能（如，地下粘土层可在设施发生任何泄漏时提供污染物的吸附能力）。在设施选址时应考虑到这些方面，并应在安全论证文件中加以考虑。

5.10. 贮存根据定义是一项临时措施，但可以持续几十年。贮存乏燃料的目的是可以在一段时间后可以被回取进行后处理乏燃料，或者处理和/或处置乏燃料。在安全论证文件中，应考虑在贮存期之后安全处理乏燃料的计划，并应评定乏燃料和/或容器任何单元的退化对回取和处理乏燃料能力的潜在影响（另见第 6 部分）。

5.11. 在评定贮存设施的安全时，通常不考虑人员无意侵入的可能性，因为该设施不仅在乏燃料放置期间，而且在乏燃料放置之后都需要连续监视和维护。防止人为故意侵入需要有充分的安保措施（见参考文献[10]，这应在安全论证文件中论述（另见第 3.31A 段和第 3.31B 段）。

5.12. 由于贮存是一项临时措施，安全论证文件应说明定期监控、视察和维护贮存设施的规定，以确保其完整性在设施的预期寿期内得以持续保持。

5.13. 由于可能涉及的时限很长，在安全论证文件中应考虑在预期的贮存时限内适当保存记录的计划。

5.14. 应定期评审安全论证文件，以评定贮存容量是否持续充足；应考虑到预计产生的乏燃料、贮存设施的预期寿命以及后处理或处置办法的可行性（见第 5.26 段）。

5.15. 在取得运行经验后，可能有必要重新评定退役乏燃料贮存设施所面临的预期挑战。

5.16. 开展安全评定的要求源于国家计划以及认识到安全评定可以直接促进安全，因为通过这种方式可以确定应采取哪些适当措施来保护工作人员、公众和环境。安全评定不是一项分离的活动，要与拟建设施或活动的计划和设计一起进行。辅助安全评定的结果可用于确定计划或设计中任何必要的变更，以确保符合所有要求。这些结果还被用于对设施的设计、建造和运行进行控制和限制。

5.17. 安全评定通常是一个迭代过程，用于确保乏燃料贮存设施能够安全运行，并应在设计过程的早期开始。一般而言，在辐射风险的控制方面，应主要依靠设计特性而不是运行程序。

5.18. 应确定可能影响乏燃料贮存设施设计以及乏燃料完整性和安全性的假想始发事件。假想始发事件的主要原因可能是可信的设备故障和操作人员失误，或者人为或自然事件（设施内外）。在确定相关假想始发事件时，应参考通用清单（见附件 IV—VI）。此类清单不应当作唯一的参考，因为场址的特定环境条件和现象，以及设施的设计和运行也将影响在安全评定中假想始发事件的选择。

5.19. 安全评定应涵盖贮存设施、拟贮存的乏燃料类型和贮存安排。在这方面，乏燃料的类型、数量、初始富集度、损耗、完整性、释热、贮存模式（湿式或干式贮存）以及物理和化学特征是乏燃料贮存设施安全评定中需要包括的基本要素。

5.20. 乏燃料贮存设施的安全评定应涵盖设施的预计运行期。相对于较短的贮存期，乏燃料长期贮存将需要在安全评定中对发生概率相对较低的事件进行评价。类似地，可能与较短的贮存期无关的过程可能在较长的贮存期内变得重要（例如，气体的产生、均匀腐蚀、应力腐蚀、辐射或氢化物引起的包壳材料脆化、自然过程如害虫侵袭以及核反应性在较长时间内的可能变化）。

5.21. 设施特定的安全论证文件和辅助评定通常应包括以下方面：

- (a) 关于场址和设施的说明(包括乏燃料的最大预期库存量及其验收标准、贮存设施及其特征、结构、系统和部件,包括依据许可证条件对乏燃料贮存设施的安全重要物项的特征)以及适用法规和导则的特定说明。
- (b) 乏燃料装卸和贮存活动以及设施的任何其他操作说明。
- (c) 有系统地查明可能导致预计运行发生和可能导致事故工况的危害(见附件 IV—VI)。在确定危害时,应考虑可能发生的相关事件和危害(例如地震和海啸,火灾和厂房倒塌)的可能组合及其后果。在考虑涉及多种危害的情况时,应考虑到它们同时或连续发生的可能性及其因果关系。在安全论证文件和安全评定中,应采取分级方法来处理危害的组合。
- (d) 对可能导致放射性物质的假想方案进行评价,包括筛选各种假想方案的组合,以确定在设施设计基准中需要考虑的假想方案的组合。还应考虑可能性低但具有高于设计基准阈值的高潜在后果的假想方案组合。
- (e) 通过定量分析危害评价中确定的放射性物质的概率和潜在后果,并将评定结果与监管机构制定的安全标准进行比较[6]。
- (f) 老化管理安排。
- (g) 根据安全评定制定运行限值和条件以及行政控制。如有必要,应修改乏燃料贮存设施的设计,并更新安全评定。此类控制应包括乏燃料储罐的验收标准,包括装有故障燃料的储罐。
- (h) 安全分析和安全评定的文件,包括在设施许可证文件中。
- (i) 调试计划。
- (j) 运行的组织控制。
- (k) 具有重大安全影响活动的程序和运行手册,包括应对设备故障的程序。
- (l) 定期维护、视察和试验计划。
- (m) 乏燃料贮存设施内部和边界的次临界、排热能力和辐射剂量的期望值。
- (n) 监控计划,包括核实屏蔽完整性的计划,监视贮存乏燃料状况的计划,以及酌情监视贮存乏燃料组件的计划。
- (o) 运行经验反馈的程序并将其纳入手册、标准和培训计划。

- (p) 工作人员培训计划。
- (q) 核材料衡算和控制各方面的安全影响。
- (r) 安全与核安保之间接口的管理安排。
- (s) 现场应急计划。
- (t) 管理系统。
- (u) 职业辐射防护规定。
- (v) 放射性废物管理和退役的规定。
- (w) 每当设施的安全取决于人的行动，包括在事故中要采取的行动时，对这些人的行动的评定。

5.21A. 在乏燃料贮存设施与其他设施搭配的情况下，在安全评定中应考虑每个设施或活动对其他设施或活动的潜在危害，以及外部事件对所有设施和活动的影响，包括同时发生影响不同设施和活动事件的可能性[6]。如果预计现场设施将在事故工况下共享资源（人力资源或物质资源），则安全评定中对此类假想方案的评价应证明每个设施都能履行所需的安全功能。

5.22. 在安全评定中，应识别临界危害，以便确定所需的安全功能和安全系统，并针对安全评定所用参数建立与其重要性相称的可信度（例如通过敏感度分析）。

5.23. 安全评定应包括对运行状态和事故工况下的危害进行评定。它应评定场址边界的剂量以及场址内可不受限制进入场址的照射可能性。在正常运行中，不应存在可能导致贮存乏燃料中的反应性迅速增加的机制，因此，相对较少发生反应性突然增加随后放射性物质的可信事故假想方案。

5.24. 根据 GSG-9[14]建议，应合理设定乏燃料贮存设施的允许排放限值。

5.25. 如果初始安全评定的结果接近或超过了限值的特性目标，则可能需要对可能使用的任何通用数据源的适用性进行更严格的评价，和/或可能需要减少库存或增加安全系统和控制措施。

GSR Part 5[1]要求 16：定期安全评审

“营运组织须开展定期安全评审，并须实施监管机构继此种评审后所要求的任何安全改进。定期安全评审的结果须反映在设施安全论证文件的更新文件中。”

5.26. 应根据监管要求定期评审安全论证文件和辅助安全评定，包括与之相关的管理系统。对管理系统的评审应包括安全文化的各个方面。此外，安全论证文件和辅助安全评定还应依据下列要求进行评审和更新：

- (a) 当设施或其放射性核素库存发生可能影响安全的任何重大变化时；
- (b) 当场址特征发生变化，可能影响贮存设施时，如工业发展或周围人口的变化。
- (c) 当知识和理解发生重大变化时（如研究数据或运行经验的反馈）。
- (d) 当由于监管方面的担忧或事故引出新的安全问题时。
- (e) 按监管机构规定定期开展安全评审。一些国家规定，定期安全评审的频率不少于 10 年一次。

5.27. 如果贮存条件出现重大的意外偏差，例如乏燃料中与安全相关的，作为安全评定基准的特征发生偏离，则应重新进行安全评定。

5.28. 对于超过原设计寿期的贮存，应重新评价乏燃料贮存设施的初始设计（如果有显著不同，则应重新评价当前设计）、运行、维护、老化管理、安全评定和与安全相关的任何其他方面。如果在设计寿期内预计会延长贮存期，则应采取预防性办法，特别需验证所假定延长期所对应的设计条件是否充分。

安全论证文件归档

GSR Part 5[1]要求 15：安全论证文件和支持安全评定的记录

“安全论证文件及其辅助安全评定应以足够详细的程度和质量进行归档，以证明安全，支持每个阶段的决策，并允许对安全论证文件和安全评定进行独立评审和核准。文件应写得清楚，并应包括根据可追溯的信息证明在安全情况下采取的方法正当性的论据。”

5.29. 在归档安全论证文件时，应特别考虑确保详细程度和支持性评定与特定系统或部件的安全重要性及其复杂性相称，并确保独立评审人员能够就评定和所采用的论据的充分性（其范围和深度）得出结论。安全论证文件中所使用的假设必须在文档中加以证明[1]，通用信息的使用也应如此。

6. 乏燃料贮存的一般安全考虑

概述

GSR Part 5[1]要求 11：放射性废物的贮存

“废物的贮存方式应使其能够被视察、监控、回收和保存在适合其随后管理的条件下。应适当考虑到预期的贮存期，并应尽可能采用非能动安全装置。特别是长期贮存时，应采取措施防止废物容器的降解。”

6.1. 乏燃料贮存设施应在乏燃料进行后处理或处置之前对其进行安全、稳定和有保障的贮存。设施的设计特点和运行应能对放射性物质进行密封，以确保按照 GSR Part 3[12]规定的要求，在剂量限值范围内对工作人员，公众成员和环境进行辐射防护最优化，并保持次临界状态，确保去除衰变热，确保乏燃料的可回收性。这些安全功能应在正常运行、预计运行事件和事故工况下保持。

6.2. 各种类型的湿式和干式贮存设施目前正在各个国家运行或正在考虑中。乏燃料基本上以三种不同方式之一贮存：

- (a) 在反应堆场址或远离反应堆场址的水池中湿式贮存。乏燃料贮存在标准贮存架或紧凑的贮存架中，在这些贮存架中允许燃料组件或燃料元件间隔更近，以便增加贮存容量。
- (b) 在反应堆场址或远离反应堆场址的储罐或两用（即贮存和运输）储罐中干式贮存。储罐本质上是模块化的。这类系统是密封系统，旨在防止放射性物质在贮存期间。它们通过物理屏障对乏燃料进行屏蔽和密封，物理屏障可包括金属或混凝土主体和金属衬垫或金属储罐和盖子。它们通常呈圆柱形，横截面呈圆形，长轴垂直或水平排列。燃料位置通过贮存篮保持，该贮存篮可或可能不是储罐的组成部分。热量通过

传导, 辐射和强制或自然空气对流到周围环境而从贮存的燃料中去除。储罐可能被密封在厂房内或存放在空旷的地方。

- (c) 干式贮存在拱顶式贮存设施。贮存室是一个巨大的, 辐射屏蔽的设施, 其中贮存了乏燃料。拱顶既可以在地面之上, 也可以在地面之下; 它可能是一个钢筋混凝土结构, 包含一系列的贮存腔。对乏燃料进行适当的容纳, 以防止放射性物质的不可接受。屏蔽由围绕贮存材料的结构提供。通过强制或自然空气对流在贮存腔的外部实现主要的热量排出。根据系统设计, 这些空气可以直接到大气中, 也可以通过适当的过滤到大气中。有些系统还使用二次冷却回路。

6.3. 虽然乏燃料贮存设施的设计可能不同, 但一般而言, 这些设施应由相对简单、最好是非能动的固有安全系统组成, 以便在设施可能长达几十年的设计寿期内提供足够的安全。乏燃料贮存设施的寿命应符合预期的贮存期。设计还应包含一些功能, 以确保相关的处理和贮存操作相对简单。

6.4. 贮存设施的设计应能满足主要的安全功能, 即保持次临界状态, 除去热量, 密封放射性物质和屏蔽辐射, 以及可回收燃料或乏燃料货包。如果可能, 设计至少应包括以下特点:

- (a) 从乏燃料中去除热量的系统, 如有可能, 应由乏燃料本身产生的能量(例如自然对流)驱动。
- (b) 应采取多障碍办法确保密封, 同时考虑到所有要素, 包括燃料基质、燃料包壳、储罐、贮存库和任何可以证明可靠和合格的厂房结构。
- (c) 安全系统的设计应使其在实现安全功能的同时, 最小限度地减少对监控的需要。
- (d) 安全系统的设计应尽量减少人为干预。如果安全系统的功能取决于人员执行的行动, 则应在安全评定中处理人员与设施或活动的交互作用。
- (e) 贮存厂房, 或干式储罐, 应能抵御安全评定中所考虑的危害。
- (f) 应提供对事件的响应。
- (g) 乏燃料贮存设施应能回收乏燃料或乏燃料货包以供视察或返工。
- (h) 乏燃料和贮存系统应具有足够的抗退化能力。
- (i) 贮存环境不应应对乏燃料、乏燃料货包或贮存系统的特性产生不利影响。
- (j) 乏燃料贮存系统应允许视察。

(k) 乏燃料贮存系统的设计应避免或尽量减少二次废物流的产生。

6.5. 本段删除。

乏燃料贮存设施的设计

设计流程

6.6. 在设计过程中，应结合适当选择的输入数据和假设，使用适当的分析方法、程序和工具，涵盖所有可信的运行状态和事故工况，同时考虑到自然现象。只有经过核实和验证的方法才能用于预计运行工况的安全性或事故的后果。所选择的输入数据应是保守的但要切合实际。如有可能，应量化保守程度。如果输入数据、分析或预测中的不确定性是不可避免的，则应作出适当的考虑以补偿这种不确定性。应评定分析结果对不确定因素的敏感性。

6.7. 作为达成可接受设计的整个过程的一部分，设计的演变及其基准应该被清楚和充分地记录下来，并随时可供将来参考。证明文件应作为安全论证文件提交[6]。

6.8. 为了防止陡边效应，设计应针对为设计基准选定的外部危害水平提供足够的裕度。应在安全论证文件中证明，所有可信的危害和假想方案都已在设计中得到充分分析和适当处理。安全论证文件应描述所使用的特性评定模式和方法，以及得出的结论。因此，对于提出的任何设计，都应在安全论证文件中表明，乏燃料贮存设施可以在现有技术范围内，按照设计规范和监管机构的要求安全地建造、交付使用、运行和退役。

6.9. 对包括结构、系统和部件的安全重要物项，应根据其对安全的重要性加以识别和分类。应制定程序确保对安全重要物项具有适当的功能和特征，以便在设施的使用寿命期内或在规定的更换间隔内履行其安全功能。还应规定与控制设施寿命期以后各阶段的设计修改相关的程序。考虑到安全情况的调查结果和在第 5.26 段所述情况下的定期重新评定，可能有必要作出这种修改。

6.10. 对于设计干式贮存设施应作出安排，以便在贮存设施原设计寿命结束时，在需要视察容器内容物或评定乏燃料或贮存容器的完整性之前，处理乏燃料和贮存系统完整性方面的潜在问题。这种视察也可能是必要的，以评定储罐和乏燃料的完整性，包括对储罐的密封性进行调查，以证明如果正在考虑延长干式储罐的贮存期，则可以延长贮存期。应认真考虑在确定乏燃料和贮存系统的完整性方面采取的办法，以防止不必要的职业照射和放射性物质的意外。例如，要考虑是打开储罐取出内容物，还是原地视察内容物。

6.11. 对于超过原设计寿命的贮存，应考虑如何缓解贮存设施和所贮存乏燃料潜在变化所带来的后果。贮存设施的变化可能由辐射、发热和化学反应或原电池反应引起。贮存的乏燃料和储罐的变化可包括：

- (a) 通过化学和辐射分解作用产生可能造成危害的气体（例如通过辐射分解产生氢气）和产生过压；
- (b) 产生可燃或腐蚀性物质；
- (c) 金属腐蚀；
- (d) 乏燃料密封系统的老化。

这些考虑对于超出原设计寿命的贮存尤其重要，因为小的影响可能会在长时间内产生累积效应。

GSR Part 5[1]要求 10：放射性废物处理

“……在处理放射性废物时须适当考虑废物的特征及其不同管理步骤（预处理、处理、整备、运输、贮存和处置）所提出的要求。须将废物货包设计和生产成能在正常运行期间和废物装卸、贮存、运输和处置过程中可能发生的事件工况下具备适当密封放射性物质的能力。”

GSR Part 5[1]要求 17：设施的选址和设计

“放射性废物处置前管理设施的选址和设计必须能够确保设施在预计运行寿期期间正常工况下和可能的事故工况下的安全以及退役期间的安全。”

SSR-4[5]第 2.11 段指出：纵深防御

“在整个设计和运行过程中应用纵深防御概念，可提供保护，防止瞬变、预计运行事件和事故，包括设备故障或装置内的人为操作造成的事件和外部危害引起的事件。”

选址

6.12. 原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-1 号《核装置场址评价》[29]规定了场址评价的要求。相关的安全导则[30—35]载有可用于乏燃料贮存设施选址分级方法的标准和方法。

纵深防御

6.13. 纵深防御的概念应适用于所有安全活动，不论是与组织、行为还是设计相关的活动，以确保如果发生故障就会被察觉，并通过适当措施予以补偿或纠正[4]。在乏燃料贮存设施的选址和设计中，以及在考虑次临界、排热、密封和辐射防护问题时，应采用纵深防御[4]。

6.14. 在乏燃料贮存设计中应用的纵深防御概念涉及提供一系列防御屏障（固有特征、设备和程序），以防止事故发生，并确保在屏障故障的情况下提供适当的保护和缓解后果[4]。

6.15. 设施应具有一定的后备贮存能力，这种贮存能力应包括在设计中或以其他方式提供，例如允许乏燃料储罐或未包装乏燃料元件的重新编排，以便进行视察、回取或维护工作。后备空间应使最大类型的储罐可被卸载，或者在模块化贮存设施中，至少一个模块可被卸载。

结构完整性

6.16. 为了使安全系统和与安全相关的物项正常运行，乏燃料贮存设施的部件在所有运行状态和事故工况下都应保持其结构完整性。因此，构件及其相关系统的完整性应通过结构评价来证明。这应考虑相关的加载条件（应力、温度、腐蚀环境、放射性水平等），并应考虑蠕变、疲劳、热应力、腐蚀和材料特性随时间的变化（如混凝土收缩）。

6.17. 为防止偏离正常运行并防止系统故障，应认真注意选择适当的设计规范和材料，并控制部件的制造和乏燃料贮存设施的建造。为检测并终止偏离正常运行工况，应根据安全论证文件提供专设系统。

6.18. 乏燃料的完整性和保持次临界和排热所需的几何构型及其相关的密封屏障应在设施的整个寿期内保持，并应使用适当的方法进行核实，包括预期性分析和持续监视。

6.19. 给定负载条件下的许用应力应符合适用的规范和标准。如果没有适用的标准，则应说明所选允许应力水平的正当性。

6.20. 结构材料和焊接方法应根据公认的规范和标准进行选择。应考虑类似处于重大辐射场材料的潜在累积辐射影响。此外，还应考虑潜在热效应对材料老化的影响。

6.21. 对安全重要物项的材料应与乏燃料兼容，包括那些与乏燃料直接接触的结构和部件，应尽量减少化学反应和原电池反应，以免在乏燃料贮存期间破坏乏燃料的完整性，并且不应在乏燃料贮存期间用可能严重破坏乏燃料完整性的物质污染乏燃料。

6.22. 应详细考虑贮存环境对乏燃料和对结构、系统和部件的安全重要物项影响。特别考虑是受照射的二氧化铀氧化成八氧化三铀后引起的体积增大和微粒生成增多的可能性。此外，还应评定贮存环境变化（例如，从潮湿到干燥或反之）带来的任何影响。

6.23. 正如在设计阶段所确定的那样，可能需要使用耐用的建筑材料、冗余的关键部件、具有特定可靠性水平的辅助系统（如电力供应）、有效的监控计划和高效的维护计划（即与正常设施运行兼容的方案）达到足够的可靠性。

6.24. 建筑材料应便于表面去污。在所有运行状态和事故工况下，应考虑去污材料与运行环境的兼容性。与乏燃料贮存系统相连的系统完整性也很重要，例如热排出系统。应防止乏燃料贮存系统中的管道故障和泄漏，因为这些故障和泄漏可能为有损于乏燃料或密封完整性的化学物质进入乏燃料贮存水池提供一条途径，如氯离子等。

结构和机械负载

6.25. 应充分细致地说明贮存设施设计的结构和机械方面，以证明初始设计的正当性。考虑中的典型事项包括：

- (a) 确定在运行状态和事故工况下由乏燃料贮存设施的燃料、燃料储罐和各种部件引起的结构和机械负载；
- (b) 构筑物基础评价；
- (c) 乏燃料贮存设施安全系统的全面结构评价；
- (d) 对吊车、运输车辆和防护建筑等辅助设施的评价。

在评价设施厂房和内部结构完整性时，应为评价正常预计工况下和假想始发事件（如风暴、飞射物撞击和地震）下的结构和机械负载，以及响应此类负载所选取的验收标准的正当性提供说明。应考虑在假想始发事件（包括地震、龙卷风和洪水等外部事件）之后可能出现的贮存条件，并应通过设计确保这些条件的可接受性。

6.26. 应确保考虑到装卸机械可能发生故障的所有情况，从而使燃料元件或储罐得不到充分防护或无法恢复。还应考虑储罐在乏燃料贮存设施内发生楔变和不可移动的可能性。除这种情况下的防护问题外，还应考虑操作设备和系统是否能够从这种情况中恢复，或是否会因施加过大的应力而受到损坏。

热负载和效应

6.27. 鉴于乏燃料产生的衰变热，在设计中应适当考虑所有热负载及其效应。考虑的典型项包括：

- (a) 热应力；
- (b) 内部和外部产生的压力；
- (c) 传热要求；
- (d) 蒸发/补水要求；
- (e) 温度对次临界状态的影响。

材料老化效应

6.28. 贮存设施的预期寿命将由腐蚀、蠕变、疲劳、收缩、辐射引起的变化和 相关辐射场等方面的因素决定。在设计贮存设施时应考虑这些效应的影响。

次临界状态

6.29. 根据 SSR-4[4]要求 38, 乏燃料贮存设施的设计必须确保在被称为可信异常工况的运行状态和工况下有足够的次临界裕度。

6.30. 乏燃料的次临界性可通过许多设计因素和预防措施来确保或被影响。乏燃料贮存设施的实体布置和安排应确保通过安全几何构型, 在所有运行工况和可信的事故工况下保持次临界。

6.31. 如果仅靠安全的几何构型无法使乏燃料保持在次临界状态, 则应采用其他手段, 如固定中子吸收器和/或使用燃耗信用值(见附录 II 第 II.7—II.9 段)。如果使用固定式中子吸收器, 则应通过适当的设计和制造确保吸收器在工作状态或事故工况下不会分离或移位。还应考虑燃耗、老化、腐蚀和处理对固定中子吸收器的影响。

6.32. 次临界性可能受到内部和外部危害的影响, 这些危害有可能重新配置预先存在的乏燃料组件阵列, 从而增加临界的可能性。还应考虑常规的燃料移动, 这种移动可能使正在移动的燃料与贮存的燃料接近, 或者燃料可能坠落并落到贮存的燃料上。对于运行状态和可信的异常工况, 应评价导致此类异常燃料配置的事件序列。应使用可靠的数据和经核实和验证的方法来评价这类事件的可能后果。适当的缓解措施以确保在所有这些工况下都能保持次临界状态。

6.33. 对于运行状态和可信的异常工况, 应保持有效中子倍增因子 k_{eff} 中为监管机构所接受的足够的次临界裕度⁸, 以避免临界事故。对于干式贮存设施, 即使在乏燃料贮存地发生水淹的情况下, 也应保持最低限度的裕度, 除非由于位置或设计而防止水淹。在论证所需的次临界裕度时, 还应考虑燃料销重新排列或压实的可能性。对于湿式贮存设施, 即使在丧失冷却后水沸腾

⁸ 在计算和数据中包括不确定因素后, 在许多状态中, 对运行状态采用 5%的临界裕度, 而对可信的异常工况采用较小的临界裕度(2%或 3%)。

的情况下(即贮存环境在水蒸气工况下可能比在水下反应性更强)或在漏水的情况下也应保持最小裕度。

6.34. 估计所需增值系数的最适当办法将取决于若干因素,包括乏燃料的特性以及所处理的情况(例如正常运行或事故工况)。在确定次临界时,应考虑到下列因素,对有效中子增值系数作出保守估计:

- (a) 如果燃料组件内或燃料组件之间易裂变材料的初始浓缩程度是可变的,则应在建模中适当考虑这种可变性。或者,最高浓缩度可用于提供燃料组件的保守特性。
- (b) 如果与燃料相关的任何数据存在不确定性(例如在设计、几何构型或核数据方面),则应确定数据的保守值,并应在所有次临界计算中使用。如有必要,应进行敏感性分析,以量化这种不确定性的影响。
- (c) 应考虑到任何假想始发事件可能造成的燃料和贮存设备的任何几何变形。
- (d) 对于运行状态和事故工况,应假定最佳慢化和反射,以提供对临界的悲观评定。应确保系统对于所有可信的水密度都保持在次临界状态。在某种中等密度时,可以达到最高的核反应性,例如,如果水池中的水由于排热系统的故障或在干燥桶的过程中开始沸腾。在干式贮存情况下应假定水淹,除非位置或设计特点排除了这一可能性。
- (e) 对于某些事故工况,例如燃料装卸事故,可允许对可溶性硼进行有限的信用制。
- (f) 乏燃料贮存设施的库存应假定处于设计的最大容量。
- (g) 不应就乏燃料贮存设施的中子吸收部件或组件进行信用制考虑,除非这些部件或组件是永久安装的,其中子吸收能力可以确定,而且已经证明它们不会因任何假想始发事件而退化。
- (h) 可考虑燃料组件的反应性变化,但不应考虑可燃毒物的存在,除非有监管机构可接受的正当性,其中应包括考虑燃耗降低中子吸收能力。如果考虑到可燃毒物,则应假定代表性燃料对应于最高的核反应性。

- (i) 所有燃料都应假定其燃耗和富集度能产生最大的核反应性（即假定新燃料），除非燃耗的信用制是基于充分的正当性而假定的。这种正当性应包括适当的测量或评价，直接或间接地确认易裂变材料含量或燃耗水平的计算值。为了在长期贮存中应用燃耗信用制，应考虑乏燃料核素组成随贮存时间的可能变化。
- (j) 不同贮存区的中子去耦假设应通过适当的计算得到证实。

6.35. 无限增值系数⁹可以用作 k_{eff} 的保守估算。

6.36. 确定其他类型燃料的次临界可能需要特别考虑。乏燃料的组成可能在很大范围内变化，可能不容易确定适当的保守条件。例如，具有可燃毒物的沸水堆燃料可能通过燃烧毒物而具有增加的反应性。此外，需要考虑铀—钍混合氧化物燃料或来自研究堆的燃料可能具有非常特殊的性质。

排热

6.37. 乏燃料贮存设施应设计有能够在设施最初接收燃料时可靠地冷却所贮存乏燃料的排热系统。排热能力应使所有乏燃料的温度不超过最高允许温度，设施中与安全相关的其他部件的温度也不应超过其正常运行、预计运行发生和事故工况下的最高允许温度，并在实际可行的情况下，包括设计扩展工况¹⁰，例如：

- (a) 多次故障导致强制冷却系统持续丧失；
- (b) 在概率风险评定的基础上选择的故障组合（例如，预计运行事件或假想事故与影响为缓解相关事件而设计的系统的共因故障的组合）。

应为所有运行状态和事故工况设计排热系统。系统应满足正常运行，预计运行事件和设计基准事故的确定性单一故障标准。为提高事故管理能力，设计应包括能够使用非永久性设备的特征，并应考虑非能动措施，例如在低衰变热组件货包之间均匀分配高衰变热燃料组件货包。

⁹ 无限增值系数是由一代裂变产生的中子数与前一代被吸收损失的中子数之比。

¹⁰ 设计扩展工况是假想事故工况，在设计基准事故中未予考虑，但在设施的设计过程中根据最佳估计方法予以考虑，其放射性物质的排放保持在可接受的限值内[3]。

6.38. 在乏燃料贮存设施的排热系统设计中,应作出适当规定,在乏燃料的装卸和转移期间将燃料温度保持在可接受的限值内。

6.39. 排热系统的设计应能充分排出操作期间预计乏燃料最大库存可能产生的热量。在确定设施必要的排热能力时,应考虑辐照后冷却间隔和待贮存燃料的燃耗。排热系统的设计应包括提供额外的排热能力裕度,以考虑到预期会随着时间推移使得系统退化或削弱而产生的任何效应。在设计排热系统时,还应考虑设施的最大热容量。

6.40. 在诸如拱顶等模块化设施的情况下,可以在设计中考虑乏燃料裂变产物衰变产生的热量随时间而减少这一事实。例如,即使最初需要强制冷却,自然冷却在设施的使用寿命后期也是足够的。应进行分析以确定需要多长时间的强制冷却,同时适当考虑保持强制冷却系统的可运行性及其故障的潜在影响。

6.41. 根据所使用贮存系统的类型,使用冗余的和/或不同的排热系统可能是合适的。在设计过程中应考虑排热系统的可靠性。设计应包括监控和确保冷却系统在运行状态和事故工况下的有效性的规定。在湿式贮存设施中,可以通过监控水的温度和水位来监控冷却系统。在干式的拱顶式贮存库设施中,这种监控可以通过监控冷却剂气体的温度和流量来完成。应考虑乏燃料在长时间内过热的可能性。在这种情况下,湿式贮存设施的设计应包括能够使用非永久性设备为乏燃料的长期冷却供水的特点。

放射性物质密封

6.42. 在乏燃料贮存和装卸系统的设计中,应规定充分和适当的措施来密封放射性物质,以防止放射性核素无节制地排放到环境中。乏燃料包壳在贮存期间应得到保护,以防在运行状态和事故工况下发生退化,随后在回收乏燃料期间也应得到保护。至少应通过两个独立的静态屏障来确保密封。应视需要并尽可能监控乏燃料贮存密封系统的有效性,以确定是否有必要采取纠正行动维持安全的贮存条件。

6.43. 必要时应提供通风和废气处理系统,以确保在运行状态和事故工况下气载放射性颗粒的收集。在设计设施的空气供应系统时,应考虑到外部环境中可能存在氯或二氧化硫等腐蚀性气体,这可能有损于乏燃料包壳或其他安全相关部件的完整性。

辐射防护

6.44. 乏燃料贮存设施的设计应避免场址上的高辐射场，并根据国家法律的要求、GSR Part 3[12]规定的要求和原子能机构《安全标准丛书》第 NS-G-1.13 号《核电厂辐射防护设计》[36]提供的建议，为工作人员和公众提供辐射防护和环境保护。

6.45. 为在贮存设施乏燃料装卸系统的设计中满足这些要求和建议：

- (a) 必要时，在设计中应包括适当的通风，包括高效的、经过适当鉴定和设计的空气过滤系统及其定期检查要求，以将气载放射性物质的浓度以及工作人员和公众的受照剂量保持在可接受的水平。
- (b) 应规定对放射性流出物进行监控。
- (c) 乏燃料装卸方式应设计成可避免污染累积到不可接受的程度，并在发生这种累积时提供补救措施。
- (d) 乏燃料和储罐的装卸应在重要参数（如温度、杂质浓度、辐射强度）得到控制的环境中进行。
- (e) 装卸或贮存乏燃料和储罐的区域应配备适当的辐射监控系统，以保护工作人员。
- (f) 贮存设施不应包括任何仅通过贮存区进入的操作室。
- (g) 应为湿式贮存设施提供水质监控和过滤。

6.46. 应提供屏蔽以满足 NS-G-1.13[36]建议。为满足这些建议，应列入下列规定：

- (a) 在确定屏蔽设计分析所需源项时，应考虑 γ 和中子辐射对应的富集度、燃料和冷却时间的边界条件、乏燃料贮存设施最大设计容量对应的库存、轴向燃料对 γ 和中子源的影响以及非燃料硬件的活化。
- (b) 应为正常运行和事故工况提供适当的屏蔽。湿式贮存设施的设计应包括一些规定以防止在事故情况下不可接受的液体屏蔽丧失，例如设计特点使使用非永久性设备能够保留最低限度的屏蔽水位。在用水进行中子屏蔽的干式贮存设施中，如果水可能流失，则应提供可替代的中子屏蔽。

- (c) 贯穿件的屏蔽防护（例如与冷却系统相关的贯穿件或为装载和卸载提供的贯穿件）的设计应避免来自贯穿件和直接辐照造成的局部高 γ 和中子辐射场。
- (d) 在屏蔽设计的分析中，应假定装卸乏燃料的设备包含大量的乏燃料。
- (e) 装卸设备的设计应防止因疏忽而将乏燃料放置或提升到屏蔽不足的位置。
- (f) 应考虑活化沉积物的辐射影响。

布置

6.47. 与乏燃料贮存设施布置相关的设计考虑如下：

- (a) 乏燃料的装卸和贮存区应加以保护，以防未经授权的人员进入和未经授权的燃料移出。
- (b) 用于贮存的区域不应是通往其他运行区域的路径一部分。
- (c) 设施现场和设施内装卸乏燃料的运输路线应尽可能直接和短，以避免需要复杂或不必要的移动和装卸操作。
- (d) 布置应尽量减少将重物移至贮存的乏燃料和安全重要物项之上。
- (e) 布置应使所有乏燃料装卸操作、乏燃料贮存和人员进出通道都得到优化。
- (f) 布置应提供乏燃料元件表面去污（去除放射性沉积物），以及对乏燃料装卸设备和储罐进行适当的维护和维修。
- (g) 应提供足够的空间，以便对乏燃料进行视察，并对包括乏燃料装卸设备在内的部件进行视察和维护。
- (h) 布置应便于接近任何贮存的燃料，而不需要移动或装卸其他贮存的燃料。
- (i) 将贮存区划分为若干扇区，以便于接近任何贮存的燃料，并避免采用“先进后出”的概念来形成不同的贮存配置。
- (j) 设施的布置应考虑乏燃料或乏燃料货包的回取，以及乏燃料封装或整备的需求。
- (k) 应提供足够的空间，以便将乏燃料和储罐从一个装卸设备转移到另一个装卸设备。

- (l) 应提供足够的空间，以便安全装卸运输容器和/或储罐。这可以通过使用单独的容器装卸区域或通过乏燃料贮存设施内专用空间来实现。
- (m) 应为贮存和使用工具和设备提供足够的空间，这是修复及试验贮存部件所必需。还可能需要空间来接收燃料组件的其他放射性部件。
- (n) 应针对已退化或故障的燃料密封措施和安全贮存作出适当安排。
- (o) 布置应便于人员在紧急情况下撤离。
- (p) 贯穿件的设计应防止异物（如雨水、无机溶液、有机物质）进入，这些异物可能会降低次临界裕度、损害传热或增加贮存设施的腐蚀和退化，从而降低主要安全功能的有效性或阻止视察或维修。
- (q) 供装有重型乏燃料储罐的运输车辆移动或停放区域应设计有足够的地面负载裕度。这类区域应明确标明以避免楼面超载。

装卸

6.48. 乏燃料装卸和转移设备和系统包括：

- (a) 燃料装卸机械；
- (b) 燃料转移设备；
- (c) 燃料提升设备；
- (d) 燃料组件拆卸设备；
- (e) 用于与储罐的转运、乏燃料或储罐的视察相关的所有装卸操作设备；
- (f) 安全处理已降解或故障的燃料或储罐和储罐的规定。

6.49. 装卸设备的设计应尽量缓解事故和其他事件的可能性和后果，并尽量减少损坏乏燃料、乏燃料组件和贮存或运输储罐的潜在风险。应考虑以下几点：

- (a) 设备不应有可能损坏乏燃料组件表面的锋利边缘或拐角。
- (b) 设备应配备正向闭锁机构，以防止意外松脱。
- (c) 设备的设计应考虑到辐射防护方面的要求并便于维护。
- (d) 应规定移动乏燃料设备的速度限值。
- (e) 系统的设计应保证断电时乏燃料不能坠落。应考虑单一故障后果，并在适当情况下提供冗余负载路径。

- (f) 如果有必要确保乏燃料组件能够容易地放置在安全位置，则燃料装卸设备的设计应允许在紧急情况下手动操作。
- (g) 设备的设计应确保施加在乏燃料组件上的任何力的大小和方向都在可接受的限度内。
- (h) 应为设备提供适当的联锁或物理上的限制，以防止危害或不兼容的操作，例如防止在某些情况下移动（例如，避免乏燃料的错误放置，或在湿式贮存情况下，当机器太靠近池壁时）。还防止乏燃料组件或其他部件在乏燃料上方意外升起、负载的意外释放或施加不正确的力。
- (i) 控制装置和工具的设计应符合人体工程学并便于使用。
- (j) 工具出错的可能性应通过设计来避免。
- (k) 工作区域应提供最佳的工作条件环境（噪音、亮度、湿度、温度）。

6.50. 运行人员需要设备或部件在不可见状态时的信息以核实计划运行的安全性，如安全论证文件所述，应在设计中作出规定，通过适当位置的指示系统或替代手段，将此类信息有效地传递给运行人员。

6.51. 在乏燃料装卸设备的设计中，应对便携式手动或电动工具的相关使用作出规定，此种工具的计划使用应符合设计目标，且此种使用不影响乏燃料装卸操作的安全。

6.52. 为了尽量减少任何重物意外坠落的可能性，将乏燃料转移到乏燃料贮存设施的设备的设计应确保该设备能够承受正常运行工况、预计运行事件和事故工况。设备的设计、运行限值和条件的确定，应确保在重物意外坠落的情况下，密封系统或燃料储罐的屏蔽不会受到可能导致工作人员或公众无法接受的辐射照射的损坏。此外，设计和运行限值和条件应使意外坠落既不会阻止燃料回收，也不会对乏燃料或乏燃料贮存设施造成重大损害。

6.53. 对运行安全重要的假设应在设计阶段以文件形式记录下来，以便于后续制定运行程序。应通过使用适当技术进行详细分析，以支持涉及乏燃料贮存设施运行安全的这些假设和结论。

6.54. 为确保安全运行，乏燃料装卸和贮存系统应包括以下内容：

- (a) 根据 SF-1[11]规定的防护最优化原则或监管机构规定的限值，采取措施限制运行状态和事故工况下放射性排放以及工作人员和公众的辐射照射，特别考虑在高辐射区域使用远程技术以减少职业照射；

- (b) 采取措施防止预计运行事件和设计基准事故发展为严重事故；
- (c) 为关键设备（特别是安全重要物项）的运行和维护提供便利；
- (d) 通过设备和程序随时从贮存单元回取乏燃料。

6.55. 在设计和评定起重和装卸设备时，应考虑如储罐或盖子、乏燃料和乏燃料贮存格架重物坠落的类别。

6.56. 乏燃料在从储罐转移到贮存格架的过程中坠落（或反之在装载用于干式贮存的储罐情况下），应避免可能导致的影响，例如：

- (a) 乏燃料包壳的部分缺陷，产生泄漏从而导致水池被裂变产物污染；
- (b) 乏燃料的变形（例如弯曲）或损坏，可能导致随后的装卸困难；
- (c) 如果低损耗的乏燃料与贮存篮或贮存格架中其他乏燃料发生撞击，则将增加发生临界事故的可能性；
- (d) 因裂变产物排放导致工作人员受到辐射照射。

通风系统

6.57. 乏燃料贮存设施通风系统的设计和运行应能在正常运行期间维持安全和舒适的工作环境，并限制在运行状态和事故工况下，包括设计基准事故和设计扩展工况下放射性物质排放的可能性。在设计中应考虑到事故发生时设施内压力积聚的可能性，并提供防止氢气浓度水平可能导致破坏性爆炸的方法。

6.58. 通风系统的设计应能控制易燃或易爆气体（如辐解形成的氢气）的积聚。还应考虑从外部来源吸入有害气体的可能性。

6.59. 通风系统的设计应符合原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-64 号《核电厂设计中内部危害防护》[37]提出的建议。通风系统的运行应符合防火要求。

通信

6.60. 设计中应包括适当和多样的通信手段，以满足乏燃料贮存设施的运行以及应急准备和响应的要求。

仪器仪表和控制

6.61. 应提供仪器仪表以检测可能导致余热排出能力丧失和放射性水平过高的情况。该仪器仪表应在受保护的位置提供适当的警报和指示，从而使现场运行人员和主控制室的运行人员及时启动纠正措施，并在需要时自动启动保护措施。指定仪器仪表的指示范围和设计应允许监控事故期间的条件，包括安全情况中考虑的设计基准事故和设计扩展工况。在可行的情况下，控制和保护功能应设计成相互独立，且不受任何纠正措施的影响。在独立不可行的情况下，应详细说明使用共享和相互关联系统的正当性。在为运行人员设计警报和指示时，应考虑到人体工程学因素。控制和监控设备应按其预定用途进行校准。

消防

6.62. 燃料装卸和贮存区的操作应按照 SSG-64[37]提供的消防建议进行。实施消防措施时，应限制人员面临的风险和安全重要物项、乏燃料贮存区、乏燃料装卸系统和支持系统损坏的风险。

6.63. 应提供具有适当容量和能力的消防系统。

6.64. 消防措施应包括限制和控制燃料装卸和贮存区内可燃材料的数量（例如可燃包装材料、输送可燃材料的管道系统）。乏燃料贮存区的操作方式应确保灭火措施的使用不会导致意外临界。

放射性废物管理

6.65. 乏燃料贮存设施的系统设计和运行应做到：

- (a) 避免或尽可能减少放射性废物的产生；
- (b) 提供安全和适当的手段处理放射性废物。

6.66. 此类废物的处理方式应满足废物接收设施的要求。

照明

6.67. 应提供充足和可靠的照明，以支持正常运行、预计运行状态和事故工况并便利对乏燃料贮存区的视察。

6.68. 对于水池中的湿式贮存，水池区域应配备必要的照明设备，包括工作区域附近的水下照明和水下灯具的更换。

6.69. 水下照明中使用的材料应与使用环境兼容，特别是不应遭受不可接受的腐蚀或造成水池水不可接受的污染。

监控

6.70. 区域监控应包括辐射剂量率和空中放射性核素的测量。在受控区域，应安装固定的，连续运行的仪器仪表，带有局部警报和清晰的读数，以提供辐射剂量率的信息。这类仪器仪表的特性和范围应足以涵盖正常运行期间的潜在放射性水平、预计运行事件和事故工况，包括设计基准事故和设计扩展工况。

6.71. 应在有可能发生这种污染的地点的出口配备检测工作人员身上的外部污染的仪器仪表。用于区域监控和人员监控的仪器仪表应证明适合用途，并应符合适当的制造标准。在制定对设备、部件和人员进行去污的规定时，应考虑可能使用这种仪器仪表。

6.72. 对于湿式贮存设施，应监控乏燃料贮存水池的水位，并提供在运行状态和事故工况下查明漏水可能性的规定。

应急准备

6.73. 应查明危害并评定紧急情况的潜在后果，以便为建立与乏燃料贮存相关的场内和场外应急安排提供基础。因此，营运组织或监管机构应将危害评定提供给非现场主管部门，以便为其应急计划提供信息。将需要根据 GSR Part 7[22]和 GS-G-2.1[25]危害评定结果，对应急准备和响应采取分级方法。

6.73A. 虽然现场应急准备和响应的责任仍由营运组织承担（见第 3.28 段），但场外应急安排，包括制定和执行应急计划和程序以及提供应急服务的责任将由相关的场外响应组织承担[22、25]。现场应急安排应包括但不限于：

- (a) 采购和定期试验设备，以缓解事故的后果；
- (b) 对人员和程序进行定期培训，以部署缓解设备；
- (c) 在发生紧急情况时应提请注意的个人和组织名单；

- (d) 执行缓解行动的程序和其他安排，包括异常工况下和紧急情况下的操作程序；
- (e) 在紧急情况下确保有效和不间断通信的程序和其他安排；
- (f) 在紧急情况下确保人员安全的程序和其他安排；
- (g) 紧急情况分类和在紧急情况下使用运行标准的程序和其他安排；
- (h) 定期开展演习，试验应急安排的到位情况，包括与场外应急组织协调的安排；
- (i) 根据从演习、运行经验和对所评定的危害所作的相关修改中确定的教训，定期评审并酌情更新应急计划和程序；
- (j) 根据危害评定设计和建造应急响应设施。

6.74. 现场应急程序应完整地记录在案，提供给相关人员并保持更新。

支持系统

6.75. 除上述乏燃料贮存设施的设计特点外，可能还需要若干其他支持系统，以确保乏燃料贮存设施的运行和安全，例如应急电源应确保相关支持系统可用。

6.76. 如果乏燃料贮存的安全依赖公用资源的供应（例如压缩空气或水系统），则应可靠地提供充足的来源。

乏燃料贮存设施的调试

GSR Part 5[1]要求 18：设施的建造和调试

“须根据安全论证文件中所述且经监管机构核准的设计建造放射性废物处置前管理设施。须对设施加以调试，以核实设备、结构、系统和部件及整个设施是否按计划运行。”

概述

6.77. 调试涉及旨在论证相关设计的逻辑顺序，展示确保乏燃料安全贮存的正确功能。此外，还需在调试过程中核实运行程序，并证明工作人员已准备就绪，可以运行乏燃料贮存设施。运行程序应覆盖正常运行、预计运行状态和事故工况。

6.78. 为便于项目的有效实施，作为项目的一个固有组成部分，应在设计过程的早期阶段建立调试基础。应评审调试计划，并在适当情况下将其提交监管机构批准。应明确规定通常参与调试的各小组责任。应作出安排以涵盖：

- (a) 需执行的试验规范书（试验目标、要满足的安全标准）；
- (b) 提供和批准文件；
- (c) 职责；
- (d) 试验期间的安全；
- (e) 试验工作的控制；
- (f) 记录和评审试验结果；
- (g) 与监管机构的互动；
- (h) 对临时用于调试的辅助设备进行管理，并在运行开始前（和试验结束后）将其拆除。

6.79. 试验安排应包括以下内容：

- (a) 监管要求；
- (b) 调试阶段性进展；
- (c) 结果报告和批准运行；
- (d) 记录保留。

6.80. 对于模块化贮存系统，大多数调试活动将在第一个贮存模块装载时完成。后续模块需投入使用时，某些调试过程可能成为正常运行的一部分。然而，模块设计的变更可能需要为新设计重复一些调试步骤。

6.81. 在乏燃料贮存设施运行期间，可能会继续进行一些调试步骤（例如，调试新的乏燃料储罐或两用储罐，或调试新设计乏燃料所需的新设备）。装置运行期间的调试活动应尽可能在设计阶段就已预料到（例如，需要安装额外的排热系统）。

调试阶段

6.82. 调试通常分几个阶段完成：

- (a) 工程竣工；
- (b) 设备试验；
- (c) 性能演示；
- (d) 非放射性环境调试；
- (e) 放射性环境调试。

6.83. 在建造完工阶段，应对乏燃料贮存设施进行详细的实物视察，以确认是否符合详细设计。应确定物理尺寸和本底放射性水平等因素。应对照设计图纸和项目文件进行系统视察，以确定设施的竣工状态。（除了提供便利设施运行的信息外，在考虑未来可能的设施改造和最终退役，这种检查也很重要。）

6.84. 在设备试验阶段，乏燃料贮存设施的设备和系统应通电，并应进行各种控制、旋转方向、流向、电流、联锁等试验。还应进行容器和乏燃料组件提升设备的负载试验等活动，并应在这些试验过程中论证设备的安全控制。如有必要，还应证明设备间的相互影响已被限制。

6.85. 在性能演示阶段，在对单体设备进行试验之后，应进行一系列试验，以论证所有设备之间的安全影响，以及乏燃料贮存设施总体运行能力和容量。在此阶段，应证明所有指令和程序的安全性和有效性。这应包括论证运行人员是否完成基于正常运行和预计运行事件的运行培训。同时应证明工作人员有能力安全和有效地开展维护工作。

6.86. 非放射性调试阶段应提供正式证明，证明设施人员、设备和程序按预期的方式发挥作用，特别是安全论证文件中确定的事项，对设施运行安全非常重要。在乏燃料贮存设施投入运行之前，应检查在乏燃料未进入情况下可试验的所有安全功能。

6.87. 一旦圆满完成非放射性调试，即开始热态调试阶段，将放射性物质引入乏燃料贮存设施。所有试验和由此产生的任何修正都应在引入放射性物质之前完成。放射性物质的引入有效地标志着设施运行的开始，因此，从这一阶段开始适用设施运行的相关安全要求[1、4、7]。热试应包括一系列试验，以证明已满足辐射防护的设计基准。

6.88. 调试完成后，应编写最终调试报告。应详细说明进行的所有试验，并提供成功完成试验的证据。该报告应向监管机构证明其要求已得到满足，并可为随后的乏燃料贮存设施全面运行许可证提供依据。此外，调试期间对设施或执行程序的任何变更应以适当的方式记录在最终调试报告中。

乏燃料贮存设施的运行

GSR Part 5[1]要求 9：放射性废物的表征和分类

“须在放射性废物处置前管理的各种步骤中根据监管机构制订或批准的要求对放射性废物进行表征和分类。”

GSR Part 5[1]要求 19：设施的运行

“须根据国家法规和监管机构规定的条件运行放射性废物处置前管理设施。设施的运行须按照成文程序进行。须对设施的维护给予适当考虑，以确保设施的安全特性。应急准备和响应计划如系营运组织制订，则须由监管机构核准……。”

概述

6.89. 乏燃料贮存设施必须按照营运组织编写的书面程序运行。这些文件及其更新应与负责乏燃料贮存设施设计的组织合作编写。然而，营运组织有责任确保程序得到适当的准备、评审、批准和发布。这些程序应考虑到与装卸作业相关的人为因素，并至少应确保遵守乏燃料贮存设施的运行限值和条件，以及更一般地遵守安全评定。

6.90. 应为乏燃料贮存设施的正常运行、预计运行事件和事故工况，包括设计基准事故和设计扩展工况，编写指示和程序。应准备指示和程序以便指定的负责人能够随时按适当的顺序执行每项行动。应明确规定出于操作原因可能需要的任何偏离运行程序的批准责任。

6.91. 应作出适当安排、评审和核准运行程序，系统地评价运行经验，包括其他设施的运行经验，并及时和适当地采取纠正行动以防止和阻止不利于安全的事态发展。应对运行程序的分发作出规定以保证运行人员只能查阅最新核准的版本。

6.92. 乏燃料贮存设施的任何设备、加工或文件的维护和修改应遵守规定的程序。这些程序在实施之前应得到批准。程序应根据其安全重要性界定分级的修改授权。根据安全分类的不同，每项修改都要经过设施管理者和监管机构不同层级的评审和核准。

6.93. 任何设备的维护或改造及其调试试验结果均应适当记录和归档。文件应在维护或改造完成后立即修订。

运行方面

6.94. 营运组织应确保与维持次临界相关的运行程序经过严格评审并与设计的安全要求进行比较。这可能包括监管机构的确认性分析和评审。评审应考虑的一些因素包括：

- (a) 拟贮存乏燃料的类型；
- (b) 确保次临界所需的乏燃料几何构型；
- (c) 乏燃料容器类型（如果使用）；
- (d) 乏燃料的装卸操作；
- (e) 异常操作的可能性；
- (f) 乏燃料参数（如初始富集度、最终富集度、能耗）；
- (g) 依靠中子吸收剂维持次临界。

6.95. 包壳故障可导致氦-85、铯-134 和铯-137 等同位素的排放，这些同位素是冷却时间较长的乏燃料包壳故障后检测到的特征裂变产物。当乏燃料和乏燃料包壳经受高温时，以及当乏燃料周围介质中的化学条件加速包壳腐蚀时，包壳故障的可能性更大。营运组织应确保对设施内的环境条件（例如，贮存区的池水和/或大气的成分以及乏燃料包壳上的湿气或水）进行充分的监控，以防止这种不希望出现的情况并发出警报。应提供检测和处理已退化和故障燃料的程序。

6.96. 此外，营运组织应确保有接收、处理和贮存包壳故障的乏燃料的程序，这些程序应确定为管理这些情况而应采取的安全措施，或应确保乏燃料贮存设施不接受这种燃料。在接受这种燃料的情况下，除了限制因素外，还可能对临界产生影响，对此应进行充分评定。在适当情况下，这种燃料的接收、处理和贮存应遵守特定程序。

6.97. 应为乏燃料贮存设施中的密封系统（例如储罐和储罐上的密封，通风和过滤系统）制定操作程序，以便对其进行监控。监控应使营运组织能够确定何时需要采取纠正措施以维持安全的贮存条件。

6.98. 在制定正常和应急运行程序和事故管理计划时，应考虑到各种与安全相关的事件。虽然许多这些事件将作为预计运行事故或作为设计基准事故来处理，但其中一些事件或某些事件的组合也可能导致严重事故，这些事故可在设计扩展工况内考虑，而其他事件则可能超出这些工况。虽然此类事件或多种事件发生的可能性很低，但营运组织应制定运行程序和事故管理计划。在制定运行程序和事故管理计划时应考虑的事件包括：

- (a) 吊车失灵、装满水和乏燃料的储罐停留在在水池外；
- (b) 与安全相关的设施辅助加工系统故障，如电力供应、加工水、压缩空气和通风；
- (c) 辐照分解气体体积聚引起的爆炸；
- (d) 导致安全重要物项受损的火灾（为了减少火灾风险、可燃材料或废物的数量以及其他易燃材料的数量应得到控制（见第 6.64 段））；
- (e) 极端天气条件，可能改变运行特性或损害水池或容器排热系统；
- (f) 其他自然事件，如地震或龙卷风；
- (g) 外部人为事件（飞机坠毁等）¹¹；
- (h) 出入控制系统故障导致不慎进入，可能危及安全¹²。

还应考虑可能的化学品使用不当（例如无意中将化学物质液体引入池水中），会对燃料和水池结构的条件或离子交换树脂的功能产生不利影响。

¹¹ 这里只讨论潜在人为事件后果的安全方面。

¹² 这里只讨论可能危及安全的无意侵入事件。

6.99. 除了提供上述正常运行的运行程序和应急运行程序外，营运组织还应根据 GSR Part 7[22]确立的要求制定场内应急计划（见本“安全导则”第 3.28 段）。

6.100. 应系统地收集、筛选和分析设施的运行经验和事件，以及类似设施的报告。应通过适当的反馈程序确定措施并加以执行。应评审任何新的标准、法规或监管导则以判断其对设施安全的适应性。

6.101. 在乏燃料贮存设施的运行过程中，应监控所贮存乏燃料的完整性。当乏燃料贮存在密封储罐中，需有手段对核材料进行衡算和控制，或核实相关的密封作业。这种手段不应损害乏燃料的完整性。

6.102. 乏燃料贮存设施的运行限值和条件应根据以下规定制定：

- (a) 设计规范、运行参数和调试试验结果；
- (b) 对安全重要物项以及物项故障后的事件后果、特定事件的发生或运行参数变化的灵敏度；
- (c) 测量安全相关运行参数的仪器仪表设备的精度和标定；
- (d) 需制定针对每个安全重要物项的技术规范，以确保这些物项在发生或再次发生任何规定的故障时保有其功能；
- (e) 安全重要物项需确保运行工况（包括维护）下的安全；
- (f) 设备规范应全面和适当的考虑应对假想始发事件或设计基准事故；
- (g) 需考虑安全运行乏燃料贮存设施所需的最低人员配置。

表 1 提供了可能适用于乏燃料贮存设施的技术运行限值和条件的示例。

表 1. 乏燃料贮存的运行限值和条件示例

科目	运行限值和条件
次临界状态	最大允许新燃料富集度或钚含量 固定吸收剂中中子毒物的最低允许浓度（如适用） 乏燃料移动及其贮存配置的限值 慢化剂的使用限值 规定的最小乏燃料燃耗（如适用） 乏燃料组件特性
辐射	乏燃料最大允许燃耗 贮存水池最低允许水位 辐射监控、警报和联锁装置的要求 乏燃料从反应堆卸出后的最短冷却时间 池水中最大放射性核素浓度 储罐表面的最大辐射剂量率和储罐间的规定距离（例如 1—2 米） 乏燃料储罐的最小密封性
排热	最高和最低系统温度下冷却系统的可用性规定 乏燃料从反应堆卸出后的最短冷却时间和乏燃料的最大燃耗 混凝土和储罐表面的最高温度 乏燃料储罐的最小密封性
水质	防止乏燃料和贮存部件腐蚀，确保足够的水净度和防止微生物生长的水质规范

6.103. 运行限值和条件是运行授权的重要依据，因此应纳入对营运组织和运行人员有约束力的技术和行政规定中。为满足法律和监管要求，营运组织应制定乏燃料贮存设施的运行限值和条件，并作为许可证条件的一部分得到监管机构的批准。营运组织可能希望设定一个低于运行限值的管理裕度作为运行目标，以保证设施运行在批准的限值和条件内。

6.104. 运行限值和条件的目的是管理和控制与设施相关的危害。运行限值和条件应针对：

- (a) 防止可能导致工作人员和公众意外受到辐射的情况；
- (b) 如果发生，缓解任何此类事件的后果。

6.105. 直接负责乏燃料贮存设施运行的人员应完全熟悉设施的运行程序以及运行限值和条件，以确保遵守其规定。系统和程序应根据批准的管理系统开发，运行人员应能够证明其符合运行限值和条件。

6.106. 应持续评审运行限值和条件，必要时应根据国家监管框架进行修订，依据如下：

- (a) 根据运行经验；
- (b) 根据对乏燃料贮存设施和乏燃料类型进行的改进；
- (c) 作为定期评审乏燃料贮存设施安全论证文件的一部分（包括作为定期安全评审的一部分）；
- (d) 如果法律或法规条件发生变化。

由于运行经验、技术进步或变化，可能需要相应地更改运行工况。此类更改应通过安全评定确定正当，并应得到监管机构核准。

维护、视察和试验

6.107. 应建立一个涵盖运行和维护的管理系统（另见第 4 部分），并使用经批准的程序，以控制：

- (a) 维护和视察储罐上的起重附件和起重设备（例如吊索、横梁、链条和吊钩）；
- (b) 维护设施内起重设备和乏燃料抓取设备；
- (c) 起重设备和其他附件的定期负载试验；
- (d) 其他安全相关设备的维护、视察和试验。

6.108. 乏燃料贮存设施的运行应包括合适的安全重要物项（即结构、系统和部件）的维护、视察和试验计划。应为需要定期维护、视察和试验的所有结构、系统、区域和部件提供安全通道。这种通道应充分满足所有必要的工具和设备的安全运行以及备件安装。

6.109. 在任何乏燃料贮存设施开始运行之前，营运组织应编写维护、视察和试验计划。在计划中应特定规定所有视察的开始日期，并应根据调试试验的结果重新评价。乏燃料贮存设施包括结构、系统和部件等以及每项计划活动周期的安全论证文件将构成编写计划的基础。

6.110. 如果存在热室则应有热室部件维护的规定。这种维护工作可以选择在热室内或外部完成，无论首选的选项是什么。

6.111. 应定期评审定期维护、视察和试验计划，并考虑运行经验反馈。所有这类活动都应通过管理系统统筹开展，同时需考虑制造商的建议。

6.112. 定期维护、视察和试验活动的标准和频率应确保可靠性和有效性，并始终符合设计假设和意图，以便在乏燃料贮存设施的整个寿期内始终保持高的安全水平。

6.113. 同样，任何部件的可靠性和有效性不应受到试验频率的显著影响，试验可能导致部件过早磨损和故障或产生维护上的偏差，或者如果部件在维护和试验期间不工作，这可能导致不可接受的不可用。

6.114. 如果只有在某些设备处于关闭状态时才能对乏燃料贮存设施进行维护、视察或试验，则应相应制定维护时间表。

6.115. 维护、视察和试验计划应考虑到受运行限值和条件影响的结构、系统和部件以及任何监管要求。表 2 提供了可能包括在维护、视察和试验计划中的结构、系统和部件的示例。

6.116. 在批准和实施维护、视察和试验计划以及批准相关的工作程序和验收标准过程中，应有效地利用合格和经验的运行人员。

表 2. 维护、视察和试验设备示例

设备	类型和试验科目
起重设备： 吊车、吊耳、吊环 螺栓、链条、电缆、 运输工具和軛架	制动系统、联锁装置、机械完整性、负载试验、过载保护 信号
贮存结构或模块	结构完整性、植被堆积、积雪或其他可能影响排热能力的 因素 泄漏检测和监控 贮存结构和工具的腐蚀检测
运输容器空腔清 洗、排热及监控回 路部件	耐压软管标定，例如： — 温度和压力表； — 容器所需的特定辐射监控设备（例如，用于测量选 定的放射性核素，如氦-85、铯-134 和铯-137） 流量测量设备
安装在容器上的 特殊阀门设备	密封件和阀门的机械维护、特性和试验
燃料抓具	对工具固定在燃料上的能力进行机械核实，并检查锁定 机构的功能 工具机械完整性核实
辐射监控设备	固定或便携式设备的校准和功能试验
置物架	中子吸收剂的状态确认（如适用） 视察储罐、篮和架的机械磨损（如适用）
视频系统	确认系统的功能
安保设备	边界围栏和/或大门的功能确认

辐射防护

6.117. 应制定辐射防护计划，确保按照放射性水平对设施的区域进行分类，并按照分类等级对出入进行控制。包括设施内放射性水平监控，以及设施内工作人员受到适当剂量的规定。还应制定工作计划，以确保辐射照射保持合理可行尽量低。

乏燃料的特征和验收

GSR Part 5[1]要求 12：放射性废物验收标准

“接受加工、贮存和/或处置的废物货包和未包装废物应符合与安全论证文件一致的标准。”

6.118. 应为乏燃料贮存设施和乏燃料制定验收标准，同时考虑到所有相关的运行限值和条件以及今后对后处理或处置的需求，包括回收乏燃料。乏燃料在转移到贮存设施之前，设施的营运组织和监管机构应给予验收。应制定并提供应急计划以涵盖如何安全处理不符合验收标准的乏燃料。

6.119. 应向乏燃料贮存设施的营运组织提供关于拟接收贮存的乏燃料特征的详细信息。这些信息应由产生乏燃料的核设施（即核电厂或研究堆）提供。信息包括但不限于：

- (a) 燃料设计，包括比例图；
- (b) 制造材料、放射性核素存量，包括燃料中裂变核素的初始质量、燃耗和冷却时间；
- (c) 燃料识别号（例如燃料组件的序列号）；
- (d) 燃料历史（例如燃耗、辐照期间的反应堆功率、衰变热和反应堆装卸料日期）；
- (e) 可能影响燃料装卸或贮存的条件详情（如燃料包壳损坏或结构损坏）；
- (f) 确认乏燃料贮存设施在接收燃料时可正确的装卸；
- (g) 贮存的特别说明（例如，已退化或故障的燃料）；
- (h) 燃料组件的表面污染水平和剂量率。

如果显示以下一个或多个特征，则可认为燃料已损坏：针孔、裂纹、机械偏差、燃料组件部件遗失、弯曲、磨损或严重的物理损伤。应制定全面和详细的标准，以确定燃料是否应视为受损。

6.120. 在收到乏燃料容器后，应对其进行检查，以确定 γ 和中子放射性水平、泄漏和表面污染并确保其与所附文件一致。乏燃料的特征，例如通过过程控制和过程监控，应作为设施管理系统的一部分加以应用。

6.121. 此外，乏燃料发货人还应向乏燃料贮存设施的营运组织提交相关燃料运输容器的信息。这些信息包括：

- (a) 容器的类型及其适当的设计信息，以及容器腔内燃料和内部部件的布置；
- (b) 装运前容器的辐射测量数据；
- (c) 容器标识（如序号）和遵守现行运输条例的证明[19]；
- (d) 容器装卸和密封的要求和程序；
- (e) 容器的最新视察结果。

6.122. 在容器装卸时，应考虑进行下列操作，以确保安全：

- (a) 在容器装入乏燃料之前：根据要求进行清洗。
- (b) 在容器进行装卸料时，在湿和干的条件下：在取下密封盖之前对内部气体进行取样，并适当检查乏燃料。
- (c) 清空容器后：根据要求进行清洗，并进行容器的日常维护和再认证操作。

6.123. 对于从多个场址接收乏燃料的设施，乏燃料贮存设施的营运组织应确保每一发货人以清晰易懂的形式提供乏燃料特征数据，使营运组织能够证明乏燃料的装卸和贮存将保持次临界状态。营运组织还应确保所提供的数据得到经批准管理系统的支持，并得到适当核实。

6.124. 密封故障可能使工作人员受到照射以及将放射性物质排放到环境中。营运组织及其人员应明白可能发生密封故障的机理，并应在运行程序中合理应对。

燃料完整性

6.125. 乏燃料的完整性可能会退化，导致放射性物质排放到贮存环境中。燃料退化的原因有很多，包括：

- (a) 制造缺陷，如由于焊接不完整或端塞泄漏而产生的缺陷；
- (b) 包壳材料由于与氢的相互作用或高辐射而脆化；
- (c) 由于冷却水化学成分不合适而导致包壳腐蚀；
- (d) 机械损坏，例如应力腐蚀或装卸事故导致的机械损坏；
- (e) 在反应堆辐照过程中发生的未被发现的故障。
- (f) 反应堆堆芯丧失冷却或过热，导致燃料损坏。

6.126. 通常，完整性降低的乏燃料应进行罐装，以保持贮存环境的质量和/或满足许可证要求。经批准设计的可密封储罐或容器应可随时用于泄漏或损坏的燃料组件。

6.127. 由于机械事件而损坏的乏燃料组件应与完整的燃料分开，并提供适当的监控，以发现外部密封的任何故障。应考虑有高度可靠性的技术应急安排，以处理无法通过正常手段回收或不易运输的乏燃料。

6.128. 对已退化或故障乏燃料的贮存，应在设计中针对燃料的状况加以考虑。这可以包括用于在装载和卸载期间安全地处理损坏的燃料的附加工程措施，例如组件的仪器仪表管拉杆，需关注顶部喷嘴的应力腐蚀裂纹；损坏的燃料组件的装储罐需保持乏燃料合理布置并确保临界控制；用于确保密封的附加措施，因为对于退化的燃料，不能依赖其主要密封特征，即乏燃料包壳，来控制乏燃料密封物。应监控贮存的退化乏燃料，开展适当的监控应确保：

- (a) 适当的贮存设计，以便于设施监控；
- (b) 密封特性的监控应尽可能靠近每个密封屏障；
- (c) 定期检查乏燃料的贮存状态（例如，通过取样、破坏性试验、在贮存地点放置腐蚀试样、使用参照物）。

文件记录

6.129. 乏燃料贮存设施的运行数据应按照第 4 部分提供管理系统的建议加以收集和维持。

6.130. 应保存维护、视察和试验记录以便为评审和论证维护、视察和试验计划提供依据，并应定期进行检验，以确定结构、系统和部件是否达到要求的可靠性。

6.131. 由于贮存时间可能跨越多代，因此将信息从一代传递到下一代是重要的。因此，应保持所有相关信息的准确记录。这应包括乏燃料贮存设施本身和所贮存乏燃料的最新信息，以及监控结果和计划外事件记录等支持数据。

6.132. 这些记录应被复制并贮存在不同的位置。应确保信息贮存在假想的贮存期和之后仍可访问的介质上。

乏燃料回取

6.133. 贮存设施的运行应允许在预期贮存期满时和贮存设施寿期末回取乏燃料或乏燃料货包。

6.134. 如果乏燃料或乏燃料货包无法通过正常运行程序从贮存单元回取，则应制定专门的运行程序，以确保乏燃料或乏燃料货包的安全回取。

6.135. 在所有乏燃料和/或乏燃料货包被移出之前，乏燃料贮存设施应被视为一个运行设施。

贮存后运输

6.136. 在贮存后的运输之前，应检验乏燃料与贮存和（或）运输容器及相关文件的完整性。应处理下列事项：

- (a) 所有权和安全保存记录的责任；
- (b) 适用的视察和监视制度；
- (c) 贮存环境控制；
- (d) 核安全相关事项，如乏燃料本身、乏燃料支撑结构和 neutron 屏蔽材料的任何退化。

6.137. 应定期评定贮存和/或运输容器的安全功能，以证明其符合现行安全标准和运输许可证的批准要求和条件[19]。应评定容器可能的退化情况，并应考虑以下因素：

- (a) 乏燃料和燃料支撑结构；
- (b) 密封系统：金属密封和紧固系统，如顶盖螺栓；
- (c) 包装元件：腐蚀效应、辐射效应等；
- (d) 冲击限制器：附件和特性的兼容性；
- (e) 屏蔽材料：密度、成分等的变化；
- (f) 确保次临界的设计特点；
- (g) 常规安全问题，通过定期视察装卸设备。

超出原始设计寿命的贮存

6.138. 如果设想乏燃料的贮存超过设施的原始设计寿命，则应重新评定燃料的核反应性，并视需要在决策时予以考虑。在这种情况下，应适用适当宽的安全裕度或附加的安全规定。

6.139. 营运组织必须拓展专门的知识，以管理因贮存期超出原始设计寿命而可能带来的困难。

6.140. 《基本安全原则》[11]第 3.29 段指出：“放射性废物的管理方式必须避免给后代造成不应有的负担”。构成“不应有的负担”的内涵在很大程度上取决于国情。需要考虑的方面如下，特别是如果预计乏燃料的长期贮存将跨越多代人的话：

- (a) 准备足够的财务资源，确保乏燃料在贮存期内得到安全管理；
- (b) 持续监管；
- (c) 知识和技术能力的转移和保持；
- (d) 持续对乏燃料管理专业人员进行教育，即使核能发电不再是国家能源战略的一部分。

6.141. 应确保乏燃料贮存设施在其整个寿期内的安全运行。这通常比商业公司的平均寿命长。因此，如果营运组织不复存在，比如数十年后，可考虑将乏燃料和乏燃料贮存设施的所有权转让给政府机构。

6.142. 对于乏燃料的贮存，应进行安全评定，并在发放设施许可证之前制定安全论证文件。对于长期贮存，可能需要对安全情况进行重新评定，例如在设施或其任何对燃料密封很重要的部件或结构发生退化的情况下。要特别注意湿式贮存内衬降解。监管机构在确定乏燃料贮存设施的经营许可证期限时，应考虑到这种故障情况。

6.143. 应制定监控计划，以便能够及早发现任何缺陷。监控计划应特定规定监控的参数、监控的频率、行动的参考水平以及应采取的特定行动。

6.144. 对包壳材料、垫圈或其他与确保乏燃料密封相关的材料进行长期辐照可能导致安全功能退化。应制定老化管理计划，处理与老化相关的退化问题。该计划应特定规定必要的监控，以便及早发现任何缺陷。

6.145. 应建立一种机制，以便根据研究和新发现对设施进行改造，特别是针对贮存期超过原设计寿命导致材料老化和退化。

6.146. 假想的贮存期越长，对安全参数设定的不确定性就越大。为了给运行或监管决策提供科学依据，应依据重要程度开展针对性的课题研究和开发，旨在减少这些不确定因素。例如，对乏燃料贮存中使用的材料进行加速辐照试验或选用侵蚀性介质对其进行长时间密封试验，可获得相关其对老化效应敏感性的有用信息。

乏燃料贮存设施的退役

GSR Part 5[1]要求 20：设施的关闭和退役

“营运组织应在设计阶段制定一份处置前放射性废物管理设施关闭和退役的初始计划，并应在整个运行期内定期更新该计划。设施的退役应根据监管机构批准的最终退役计划进行。此外，还应保证有足够的资金用于关闭和退役……。”

6.147. 核设施的退役包括：

- (a) 编写和批准退役计划；
- (b) 退役的实施；
- (c) 退役活动产生废物的管理；

(d) 场址无限制开放或限制使用。

6.148. 在乏燃料贮存设施的设计阶段，应按照退役的要求和建议[20、24]编写首版退役计划。

6.149. 在乏燃料贮存设施运行期间，应定期评审和升版退役计划，并应使其在以下方面更加完善：

- (a) 退役方面的技术发展；
- (b) 可能发生的人因事故和其他事件以及自然事件；
- (c) 系统和结构的改造对退役计划的影响；
- (d) 法规修订和政府政策变化；
- (e) 费用估计和财务拨款。

6.150. 应为也有其他设施的场址制定完整的退役策略，以确保在计划每个独立的设施时考虑到它们之间的相互依存关系[20]。

6.151. 最终退役计划必须在监管机构规定的期限内提交监管机构批准[20]。

6.152. 即使当大部分残留的加工材料被排出时，仍可能残留大量的污染材料。为减少监控和监视的需要，应考虑迅速清除这种材料。与退役相关的其他活动可与清除这些材料同时进行，但应识别和评定同时进行的活动之间发生不利影响的可能性。

6.153. 需要选择拆除和去污技术，以尽量减少废物和空气污染的产生，并优化对工作人员和公众的保护[20]。

6.154. 在场址解控前，例如为了不受限制的使用，应当对其进行监控，必要时加以清理[38]。应组织最终的调查，以证明其符合监管机构规定的终点标准。

附录 I

湿式或干式乏燃料贮存的特殊安全考虑

I.1. 除第 6 部分所列乏燃料贮存设施设计和运行的一般安全考虑外，湿式和干式贮存设施的设计和运行也有其特殊的安全考虑。包括特定于湿式或干式贮存设施的独特特性，可将设计参数保持在可接受的范围内，并满足监管要求。

湿式贮存设施设计

次临界状态

I.2. 在设施的辅助安全评定中考虑并针对异常运行工况下，池水沸腾设定限值，应在设计评价中规定该工况下水慢化剂密度变化的特定限值。对于贮存水池，应证明所有可信水密度的次临界性，包括安全评定中不能排除池水沸腾的事件。

I.3. 水池贮存的临界安全不应依赖于使用可溶性中子毒物。如果这是不可能的，或者如果营运组织选择使用可溶性中子毒物（如含硼水）进行临界控制，则设施的设计应包括工程上的特征，以防止由于添加非含硼水无意稀释池水而导致贮存燃料的反应性增加。

排热

I.4. 湿式贮存设施的排热系统应设计成确保设施的安全运行。排热系统的主要目标应是确保在运行状态和事故工况下不会超过为保护结构、系统、部件和燃料免受损坏而设定的温度限值。

放射性物质密封

I.5. 湿式贮存设施的设计应包括防止或限制放射性物质向环境排放的特征。这些特征可包括保持贮存厂房内压力低于外部大气压；提供潜在通风路径的过滤；防止池水的进出，并可最大限度地减少厂房贯穿件的数量、大小和位置。

辐射防护

I.6. 如果使用池水提供辐射屏蔽以保护工作人员和公众，则应保持水位，以提供所需的屏蔽程度。为此，湿式乏燃料贮存设施的设计应包括从冗余和多样的来源提供充足和便于取用的水，并保证水质。

I.7. 贮存水池的贯穿件设计应不应低于所贮存乏燃料的充分屏蔽和冷却所需的最低水位。

I.8. 设计不应容许安装永久管道或其他设备，以免因疏忽（例如用作虹吸管）而将水池水位降至最低所需水位以下。

I.9. 湿式贮存设施的设计应包括有效控制排放到池水中的放射性物质和具备池水净化能力。需要有效地清除溶解和悬浮的放射性物质，以限制池表面的辐射场。应提供永久性或临时性设备，用于定期或必要时清洗和清除水池内衬表面的放射性沉积物和淤泥。

I.10. 用于向水池提供补充水的系统应设计成可以超过运行期间池水可能的最大流失速率（包括通过水池除水系统去除水）来提供补充水。同时，池水去除系统的容量应小于池水补充系统的容量。此外，应避免在同一区域混合不同限值或采用不同临界控制模式的乏燃料。

I.11. 如果水池要通过水闸通道连接，水闸通道的设计应能限制水，并能检测、收集和清除渗漏。水闸的设计应能承受预期的水压，包括事故工况以及内部危害和外部危害的影响所造成的水压。

I.12. 应提供指示和警报，提醒设施人员注意水位的任何意外下降以及达到最低水位时的情况。应评定水位监控装置和池水补充系统在事故工况下的特性，包括设计扩展工况。

结构和布置

I.13. 贮存水池和其他对冷却水保持起重要作用部件的设计应能承受运行工况和事故工况下的各种情况，包括碰撞或重物坠落的影响下，不发生严重漏水。此外，贮存水池设计应能探测渗漏情况，并在必要时进行适当修复或采取补救行动。应提供设施内地下水取样手段（例如布置在设施周围的监控井）。

I.14. 当临界安全分析中应用燃耗信用制时，应通过适当的联锁和管理过程，将燃料组件错位的可能性降至最低。对于这些情况，应适当设计燃料装卸设备。

I.15. 如果在湿式贮存设施中考虑叠放，则乏燃料和任何燃料格架或燃料篮的机械稳定性应设计成能够承受整个上部堆层的质量，而不会产生不可接受的结构变形。在设计乏燃料和燃料格架或燃料篮时，还应考虑静态、冲击和地震负载。

I.16. 设施的设计应能防止贮存水池过度填充。支撑池的土木结构应设计用于与完全充满乏燃料组件水池相关的负载，包括插入件（例如控制棒、可燃毒物吸收器、顶针塞）。

材料

I.17. 下列设施系统的材料应与池水相容并相互兼容，或应得到有效保护，以防过分的退化：

- (a) 乏燃料密封系统、结构和部件；
- (b) 贮存格架或容器；
- (c) 冷却水系统、结构和部件；
- (d) 池水补充系统、结构和部件；
- (e) 装卸系统。

还应考虑现有材料将化学品渗入池水中的可能性，以及池水中存在此类材料可能产生的影响。应确保燃料格架或容器不会污染池水。暴露在池水中或与池水接触的设备是否易于去污与所用材料的表面相关，设计人员在指定此类设备所用材料时，应考虑去污的便利性。

I.18. 池水的化学成分应满足乏燃料包壳、水池结构和装卸设备保护的要求。应保持水池操作所需池水的清洁度。

装卸

I.19. 装卸系统和设备的设计应排除对润滑剂或其他流体或物质的需求，以免退化池水的质量或以其他方式影响池水的纯度。如果需要润滑剂，应提供设计措施，防止润滑剂泄漏到池水中。应使用与乏燃料、设备和贮存结构完全相容的物质（例如水）。

I.20. 在水下使用的中空装卸工具应设计成在淹没时充满水（以保持水屏蔽效果）并在取出时将水排出。

I.21. 燃料的装卸设备应尽量减少坠落或其他处理事故的可能性。应通过设计特点防止乏燃料或其他部件的过度升高。应通过结合专用联锁来防止燃料损坏，以抑制提升过程中的横向运动操作，并在检测到升降机过载的情况下禁止升降机运动。防止燃料坠落的设计特征应包括使用单一故障处理系统和用于燃料组件的抓钩或钩子上的能动锁定机构。

湿式贮存设施的运行

I.22. 有几个水池管理特性有助于湿式贮存设施的安全运行。其中包括维持设计参数和尽量减少水池结构、系统和部件的腐蚀，并促进辐射防护的作业，如附件 II 表 II-1 所示。在设施的整个寿命期内，应保持乏燃料的完整性和保持次临界和排热所必需的几何构型及其相关的密封屏障，并应使用适当的方法以高度可靠的方式加以核实。应通过应用四眼原则或使用检查表来避免运行人员的错误。

次临界状态

I.23. 当可溶硼用于临界控制时，应根据温度、pH 值、氧化还原性、活性和其他适用的化学和物理特征的规定值实施运行控制，以保持水质条件，防止硼稀释。

辐射防护

I.24. 运行控制应包括适当维持水下照明和水的清洁度，这对在水池内和水池周边履行职责的工作人员的辐射防护非常重要。依靠目视观察和/或视察而无需重复和在最短时间内完成活动的的能力将减少工作人员的受照剂量。

排热

I.25. 在设计设施时，应考虑到极低或极高温对排热（冷却）系统可能产生的影响。在运行限值和制定管理程序时，还应考虑到与排热系统可能损坏相关的问题。

I.26. 运行程序应确保对水池热排出系统进行监控，以确保运行工况保持在设计规范范围内，并确保该系统正常运行。应及时对池热排出系统的损伤或损坏作出响应，以便使系统恢复到预定的运行工况。此外，运行程序应尽量减少系统因日常维护和/或维修而无法使用的时间。

I.27. 如果采用乏燃料高密贮存，传热方面的考虑可能会变得更加重要。

密封

I.28. 应实施运行控制，以避免水池水位下降。水池水位下降尤其可能导致：

- (a) 增加对运行人员的辐射场和剂量率；
- (b) 如果水位的降低不能终止或减少流向水池冷却系统热交换器的水流，则燃料冷却受损；
- (c) 水温升高，引起乏燃料和乏燃料包壳的腐蚀，从而导致放射性物质向水中排放的增加。

I.29. 对于地面以下的湿式贮存设施，应实施运行控制，以避免或最大限度地减少并管理可能导致以下后果的水渗漏：

- (a) 在慢化的池环境中硼的稀释，以及在使用可溶性硼进行临界控制的情况下将裕度降低到临界的可能性；
- (b) 对安全有重要影响材料的腐蚀和其他退化效应。

I.30. 营运组织应对必要的参数进行适当的例行监控，以便及时采取补救措施。应设置警报，提醒设施人员注意水位的任何意外下降，以及达到最低水位。应定期收集设施周围监控井中的地下水样品，并监控其放射性水平。

屏蔽作用

I.31. 应实施运行控制，以避免和最大限度地减少设施活动期间屏蔽故障的可能性。屏蔽的丧失会导致高辐射照射。运行控制应解决并设定限值以避免：

- (a) 在贮存水池的装卸操作中，乏燃料提升高度超过设计限值；
- (b) 池水深度不足；
- (c) 不正确地使用水池工具（例如，空的而不是淹没的）。

重物坠落

I.32. 应实施运行控制，以确保容器坠落等事件不会对贮存设施安全系统造成不当挑战。这方面主要关注的领域包括，尤其是：

- (a) 在水池的容器装卸区的入口气闸与容器准备区和卸料区之间的区域；
- (b) 水池卸料区。

乏燃料元件或组件的坠落可导致，尤其是：

- (a) 乏燃料的损坏和由此造成的水池污染；
- (b) 水池结构损坏，可能导致漏水；
- (c) 如果多个乏燃料组件从格架上移位，并且如果乏燃料阵列变形或者相邻格架中的乏燃料组件或阵列不可接受地接近，则可能引发临界事件；
- (d) 气态裂变产物的排放。

这种坠落造成的另一个潜在危害是，由于池水直接排出或因结构损坏造成严重渗漏导致水池失水。

I.33. 应实施运行控制和设计安全功能，以防止乏燃料元件或组件在转移过程中坠落到水池贮存格架或池底。

干式贮存设施设计

次临界状态

I.34. 乏燃料贮存用的燃料篮和容器的设计应确保乏燃料在装载、转移、贮存和回取期间保持被确定为次临界状态的排列。

I.35. 干式贮存设施的设计应排除水或其他慢化介质进入的可能性，或使内部或外部事件引起的再分配或引入慢化剂可能产生的后果得以适应。

排热

I.36. 贮存设施的建造地点应适当考虑到气候变化和与之相关的环境温度和/或邻近设施的天然水体水位可能升高的情况，并应以允许充分排热的方式进行维护。设计特点应包括在不利天气条件下保持冷却的规定，包括可能影响干式储罐的自然循环设计原理的特性以及贮存设施的强制循环和通风系统的大风。在极端寒冷的天气条件下以及衰变热的散失率极高或极低时，可能会对贮存设施造成损坏。超过设计限值的高温度变化率也可能导致损坏。在规定运行限值和制定管理程序时，应考虑与排热相关的这些问题。沙尘暴、被风重新沉降的火山飞灰和山体滑坡都可能阻碍干式贮存系统的冷却，例如通过阻止气流通过系统。沙子或火山灰可以在设施内部移动并在那里累积。此外，一些物质，如湿的火山飞灰或山崩的泥浆，在干燥后会变得坚硬和岩石。所有这些情况都会在一段时间内阻碍衰变热的去除，这取决于沉积或固结材料的特性。

I.37. 在可行的最大范围内，用于干式贮存的冷却系统应该是非能动的，并且应该需要最少的维护。最大限度地提高非能动排热设计特性，将最大限度地减少监控和运行方面的需要。非能动系统依赖于自然对流、传导和辐射热传递。如果使用强制循环冷却剂，应证明其在运行状态和事故工况下足够可靠，对结构、系统和对安全重要部件没有不利影响。

I.38. 当乏燃料的完整性依赖于储罐的内部气体介质时，乏燃料储罐相关的设计应确保介质在设计寿命内得到保持，或者应在安全论证文件中证明所需的时间内对介质的存在和质量进行监控和维护。

放射性物质密封

I.39. 贮存设施和干式储罐的设计应便于监控乏燃料密封和检测密封故障。如果不提供连续监控，则应通过观察或测量进行定期核实，以确保密封系统的特性令人满意。对于干式储罐，应包括监控螺栓紧固设计的密封完整性。

I.40. 贮存设施的设计应包括密封屏障，以防止放射性核素的排放。这可以包括作为干式贮存系统组成部分的衬里或储罐。

辐射防护

I.41. 乏燃料装卸操作应使用限制对工作人员和公众造成“空中散射效应”和辐射反射的设备和方法。

I.42. 应监控干式贮存设施以便探测 γ 和中子场的增加，这可能表明密封或屏蔽的退化。

I.43. 具有产生或累积不可接受的气态放射性核素浓度的高风险干式贮存区域，应保持在低于大气压的压力下，以防止气态放射性核素扩散到乏燃料贮存设施的其他区域，或者通过通风和过滤将气态放射性核素浓度保持在可接受的水平。对于露天干式贮存设施，如果最大限度不使用覆盖结构或厂房，则应在场址边界进行辐射监控，以检测空气中放射性核素的任何异常水平。

结构和布置

I.44. 装有衬里的储罐的设计应防止衬里和储罐体之间积水。贮存库和储罐应具备便于排水的特征，或者应证明积水不是问题，即贮存的燃料产生的衰变热足以蒸发和带走任何积水。

I.45. 如果在干式燃料贮存设施考虑叠放，则乏燃料和任何储罐或篮的机械稳定性应设计成能够承受整个上部堆层的质量，而不会产生不可接受的结构变形。在乏燃料和储罐或篮的设计中应考虑静态、冲击和地震负载。

I.46. 在设计中应考虑便于进入，以便于在正常运行中或在预计运行发生或事故工况发生后的回收操作中将乏燃料转移到或从贮存位置转移。

- I.47. 储罐的设计应能提供其稳定性防止倾倒。
- I.48. 应计划干式贮存系统区域，并有效密封贮存系统本身，以防止放射性核素和/或惰性气体的不可接受的泄漏，并防止水（慢化剂）和/或空气的进入。
- I.49. 干式贮存区的基础应能承受装载的乏燃料储罐和装卸设备的重量，而不会过度沉降和退化。
- I.50. 开放式干式乏燃料贮存设施的设计应能适当收集、监控和处理地表径流。
- I.51. 应考虑在干式乏燃料贮存设施的设计中包括热室，以便卸出储罐并进行燃料重新包装或修复。
- I.52. 如果热室或其他卸载或维护方式不可用，则应将储罐设计成可维护或维修。或者也可以设计为能够将其运送到具备此类设施维护的地点。

材料

- I.53. 贮存系统，特别是储罐，应使用适当的材料建造，使用适当的设计规范和标准以及建造方法，以在整个设计寿期内在预期的贮存和装卸条件下保持屏蔽和密封功能，除非能证明在运行期间有适当的维护和/或更换方法。这些装卸条件包括暴露于大气、内部和外部的湿度、裂变产物、温度变化、内部气体积聚和高辐射场。
- I.54. 所采用的工业规范和标准应为监管机构所接受。如果规范和标准尚未被监管机构所接受，则应提供使用这些规范和标准的充分正当性。
- I.55. 干式贮存系统，包括任何密封，特别是储罐的密封，应采用化学和辐射稳定性以及适当抵御机械和热冲击的材料建造。

I.56. 燃料贮存容器的填充气应充分干燥，以达到和维持保护乏燃料完整性所需的气态环境。燃料贮存容器填充气的干燥还需确保夹带在损坏的燃料棒内的任何水被充分排空。这减少在干燥活动期间，以及在随后的贮存中可能经历高的燃料温度导致额外燃料损坏或退化的可能性。在贮存容器中保持所需的内部环境也是确保容器维持密封功能的关键，特别是密封件。出于这一原因，并为确保燃料可回取，在乏燃料装入贮存容器之前，应对其状态进行正确的定性和分析，并（或）在必要时进行视察。

装卸

I.57. 可移动储罐的设计应包括提升和装卸装置，以最大限度地减少坠落事故的可能性。这应包括使用防单一故障起重设备和提升支架上的强制连锁机构。提升和装卸机构应能承受储罐设计寿期内的预期负载和使用。

I.58. 对于乏燃料干式贮存设施贮存需要采取屏蔽措施的储罐，应考虑现场装卸和场外运输需要。

I.59. 对于可用于贮存、运输和贮存后可能用于处置的多用途储罐，在设计中应考虑在贮存期结束时进行适当处理的方法。

干式贮存设施的运行

I.60. 为了限制腐蚀、辐照分解现象和临界问题，乏燃料在干式贮存之前应尽最大可能干燥。

I.61. 乏燃料干式贮存设施的管理中有几个因素有助于其安全运行。附件 II 表 II-2 列出了一些关键要素。因为干式贮存设施的非能动设计原则，所以运行中考虑因素要比湿式贮存设施少。

次临界状态

I.62. 确定性的论据表明在大多数情况下干式贮存设施会保持次临界。应分析可能发生的水进入燃料贮存区域的可能影响，例如，气候变化和设施附近自然水体水位上涨。可以确定性分析，也可以是基于外部环境事件或人因事故导致密封屏障破坏的概率分析。此外，如果干式储罐在水池环境中进行乏燃料的装卸，则应在可信的最优慢化前提下评价次临界性。

排热

I.63. 通过热传导、辐射和自然对流或在某些情况下的强制对流，从乏燃料储罐和/或乏燃料贮存设施中排出热量。运行控制应包括核实冷却介质的流动没有受到损害。储罐的内部冷却介质通常是惰性气体，而用于干式贮存的外部冷却介质通常是空气。如果需通过强制循环实现排热，将需要对通风系统进行额外的运行控制和维护。最大限度地利用非能动排热设计特性将最大限度地减少运行上的考虑。

I.64. 应监控运行温度，以确保乏燃料衰变热散失到环境中，从而保持对安全重要材料的完整性。

I.65. 对于依靠气体介质进行内部对流冷却的储罐，如果设计不能确保维护气体介质，则应监控和维护气体的质量和/或密度。

密封

I.66. 对于干式储罐的双重密封系统，应进行监控以检测任何密封故障的情况，从而防止放射性物质排放到环境中。对单密封系统和通风系统，应监控放射性物质（如氡-85、铯-134 和铯-137）的排放。

I.67. 对于带有焊接封盖的干储罐贮存系统或不需要监控。

屏蔽

I.68. 应实施运行控制，以避免乏燃料贮存中的屏蔽故障。屏蔽的故障会导致高辐射照射。特定而言，运行控制措施应解决潜在的问题，特别是：

- (a) 装卸密封或密封干式储罐或容器时的错误；
- (b) 屏蔽室保护联锁操作不当或故障；
- (c) 中子屏蔽材料的高温熔化。

重物坠落

I.69. 应实施运行控制，以避免乏燃料在从储罐转移到贮存格架（如果装储罐用于干式贮存，则反之亦然）的过程中坠落。乏燃料的坠落将特别导致：

- (a) 乏燃料包壳的部分缺陷，导致泄漏，并且在贮存水池中装储罐的情况下，导致贮存水池水被裂变产物污染；

- (b) 乏燃料的变形（例如弯曲）或损坏，这可能导致随后的装卸困难；
- (c) 如果新的乏燃料或低损耗的乏燃料无意中坠落到水池贮存格架中其他乏燃料附近，发生临界事故的可能性就会增加；
- (d) 工作人员因挥发性放射性核素排放而受到辐射照射。

I.70. 应建立程序来评价任何坠落对燃料包壳的完整性，以及受坠落影响的任何其他结构或部件。评价结果应用于后续对坠落燃料的管理。

附录 II

特殊类型燃料贮存条件和其他考虑

概述

II.1. 有许多类型的燃料元件必须考虑贮存。它们因燃料类型、新铀燃料中铀-235 的富集度、包壳材料和几何构型而异。在反应堆中辐照后，在释热、 γ 和中子剂量率以及临界安全要求方面将存在很大差异。在选择贮存模式时，应适当考虑各自燃料的特定特征。

混合氧化物燃料（MOX 燃料）

II.2. 由铀和再循环氧化钚的混合物制成的燃料（MOX 燃料）越来越多地用于轻水堆。虽然燃料棒和燃料组件在结构和形式上与类似的氧化铀燃料基本相同，但它们在放射性核素存量方面与后者不同，其衰变热和中子辐照率要高得多。当冷却时间较短时，这些特征会显著地减少可装入干式储罐中的 MOX 乏燃料组件的数量。为便于最有效地贮存 MOX 燃料并减少所需的干式储罐的数量，乏燃料贮存设施的营运组织应当优化冷却时间，以允许在 MOX 乏燃料被装载到干式贮存系统之前充分降低衰变热生成速率。

II.3. 防止临界事故是一项重要的设计要求。在分析核反应性时，需要特别考虑钚的核素矢量以及包壳钚和铀比率的规范。

II.4. MOX 乏燃料可装入铀燃料组件中间。在这种情况下，MOX 组件应仅放置在特定位置，以允许有效排热并提供足够的辐射屏蔽。

II.5. 与铀燃料相比，MOX 乏燃料的释热增加、 α 活性高和气态裂变产物积累量高将对包壳材料施加额外的应力。因此，对于每种类型的包壳，无论使用湿式还是干式贮存，在进行贮存之前都应证明包壳的完整性。

高燃耗燃料

II.6. MOX 燃料贮存所需的大多数安全措施也适用于高燃耗燃料的贮存（对于轻水堆，高燃耗可定义为燃耗高于 55 吉瓦·日/吨铀的水平）。

燃耗信用

II.7. 在安全评定中使用燃耗信用是指由于裂变而使乏燃料核反应性降低。它不同于更保守的“新燃料”假设，因此可以被认为是一种更实际的方法。应根据准确的实验数据、核准的计算方法，以及根据国际标准经过验证和核实的基准计算机软件，充分证明应用燃耗信用的决定是正当的。这既适用于确定库存计算，也适用于临界计算。在申请包含燃耗信用的乏燃料贮存许可证时，应附上适当的安全评定，证明将达到所要求的安全水平。

II.8. 只有在基于设计工程安全特性和运行控制的情况下，才能批准在安全评定中考虑燃耗信用。运行控制提供纵深防御，有助于维持次临界工况。燃耗值的最低要求应通过独立测量来核实。

II.9. 应以递进方式批准在安全评定中考虑燃耗信用。在考虑更复杂的情况（如混合富集度乏燃料）之前，应优先考虑简单的情况，这将使我们能够在燃料方面积累必要的经验，这些经验可以很容易地加以定性，例如标准的压水堆燃料。

来自研究堆的燃料

II.10. 动力堆乏燃料贮存的基本安全内容适用于研究堆乏燃料的贮存。考虑到燃料类型之间的差异，应采用适当的分级方法。应特别考虑与研究堆燃料贮存相关的特定问题，例如，较低的发热、较高的富集度和使用耐腐蚀性较差的包壳材料。

II.11. 在研究堆中，燃料成分、包壳材料以及燃料组件的形状和尺寸存在显著差异。在研究堆中，可以将不同的燃料元件装载到研究堆中，从而产生各种乏燃料。这可以包括，例如具有不同包壳材料（例如铝、不锈钢、锆）或具有不同燃料成分的燃料组件。在某些研究堆中，还会进行辐照燃料组件的重新组装（例如通过更换燃料棒）。

II.12. 除了本“安全导则”中提供的建议外，还必须考虑到与研究堆中使用的特定燃料组件相关的所有方面。

II.13. 应详细评定所有燃料组件，包括重新组装的组件，以便贮存。应根据研究堆燃料组件的形状、尺寸、包壳类型和燃料成分，在设计中为其贮存作

出适当规定。在设计中还应考虑因燃料重新组装而产生的任何单独燃料棒的安全贮存。

II.14. 由于研究堆所用燃料的富集度较高，意外临界的可能性可能较高。因此，如本“安全导则”第 6.33 段和第 6.34 段所述，乏燃料贮存设施的设计应包括将在贮存中增加额外次临界裕度的特征。

II.15. 应评定研究堆燃料包壳与湿式贮存条件的兼容性，以确保其完整性。

II.16. 由于广泛用作研究堆燃料包壳材料的铝及其合金的耐腐蚀性相对较低，因此需要对池水成分进行细致的控制，以确保燃料包壳完整性。有鉴于此，从长期来看，最好将研究堆乏燃料贮存在干的贮存环境中。

II.17. 研究堆乏燃料在转移到干式贮存之前应尽最大可能干燥。这可能需要在转移之前将其放置在适当设计的储罐中，并进行特殊处理。干式贮存设施的设计应确保燃料周围的环境将抑制腐蚀，从而消除气态或液态放射性核素排放的可能性。

参 考 文 献

- [1] 国际原子能机构《放射性废物处置前管理》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 5 号，国际原子能机构，维也纳（2009 年）。
- [2] 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）。
- [3] 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）。
- [4] 国际原子能机构《核燃料循环设施的安全》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-4 号，国际原子能机构，维也纳（2017 年）。
- [5] 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）。
- [6] 国际原子能机构《设施和活动安全评定》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 4 (Rev.1) 号，国际原子能机构，维也纳（2016 年）。
- [7] 国际原子能机构《核电厂安全：设计》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-2/1 (Rev.1) 号，国际原子能机构，维也纳（2016 年）。
- [8] 国际原子能机构《核电厂和研究堆放射性废物处置前管理》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-40 号，国际原子能机构，维也纳（2016 年）。
- [9] 国际原子能机构《核燃料循环设施放射性废物处置前管理》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-41 号，国际原子能机构，维也纳（2016 年）。
- [10] 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）。

- [11] 欧洲原子能联营、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、国际海事组织、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，《基本安全原则》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SF-1 号，国际原子能机构，维也纳（2006 年）。
- [12] 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）。
- [13] 国际原子能机构、联合国环境规划署，《公众和环境的辐射防护》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-8 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [14] 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）。
- [15] 国际核安全咨询组《安全文化》，《安全丛书》第 75-INSAG-4 号，国际原子能机构，维也纳（1991 年）。
- [16] 国际核安全咨询组《加强安全文化的重要实践问题》，《国际核安全咨询组丛书》第 15 号，国际原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [17] 国际原子能机构《促进安全的政府、法律和监管框架》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 1 (Rev.1) 号，国际原子能机构，维也纳（2016 年）。
- [18] 《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》，国际原子能机构《情况通报》第 INFCIRC/546 号，国际原子能机构，维也纳（1997 年）。
- [19] 国际原子能机构《放射性物质安全运输条例》（2018 年版），国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-6 (Rev.1) 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [20] 国际原子能机构《设施退役》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 6 号，国际原子能机构，维也纳（2014 年）。

- [21] 国际原子能机构《核安全监管机构的职能和程序》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-13 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [22] 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）。
- [23] 国际原子能机构《监管机构与相关各方的沟通和磋商》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-6 号，国际原子能机构，维也纳（2017 年）。
- [24] 国际原子能机构《核电厂、研究堆和其他核燃料循环设施的退役》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-47 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [25] 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）。
- [26] 国际原子能机构《放射性废物处置前管理的安全论证文件和安全评定》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-3 号，国际原子能机构，维也纳（2013 年）。
- [27] 《原子能机构与各国之间就<不扩散核武器条约>所需要的协定的结构和内容》，国际原子能机构《情况通报》第 INFCIRC/153（更正）号，国际原子能机构，维也纳（1972 年）。
- [28] 国际原子能机构《放射性废物的处理、操作和贮存管理系统》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-3.3 号，国际原子能机构，维也纳（2008 年）。（修订版编写中）
- [29] 国际原子能机构《核装置场址评价》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-1 号，国际原子能机构，维也纳（2019 年）。

- [30] 国际原子能机构《核电厂场址评价中的外部人为事件》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 NS-G-3.1 号，国际原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [31] 国际原子能机构《核电厂放射性物质在空气和水中的扩散与场址评价中人口分布的考虑》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 NS-G-3.2 号，国际原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [32] 国际原子能机构《核装置场址评价中地震危害》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-9 号，国际原子能机构，维也纳（2010 年）。
- [33] 国际原子能机构、世界气象组织，《核装置场址评价中气象和水文危害》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-18 号，国际原子能机构，维也纳（2011 年）。
- [34] 国际原子能机构《核电厂场址评价和地基的岩土工程问题》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 NS-G-3.6 号，国际原子能机构，维也纳（2004 年）。
- [35] 国际原子能机构《核装置场址评价中火山危害》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-21 号，国际原子能机构，维也纳（2012 年）。
- [36] 国际原子能机构《核电厂的辐射防护设计》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 NS-G-1.13 号，国际原子能机构，维也纳（2005 年）。
- [37] 国际原子能机构《核电厂设计中内部危害防护》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-64 号，国际原子能机构，维也纳（编写中）。
- [38] 国际原子能机构《解除终止实践后场址的监管控制》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 WS-G-5.1 号，国际原子能机构，维也纳（2006 年）。

附件 I

短期和长期贮存

短期贮存

I-1. 短期贮存（常规贮存）在本“安全导则”中定义为最长可持续约 50 年的贮存，因为这一期限代表了：

- (a) 常规贮存结构和设施的典型设计寿命；
- (b) 有理由相信营运组织将有足够的资金持续运行的时期；
- (c) 涵盖常规监管经验的时期；
- (d) 生产足够数量材料的时间，以使后装卸更经济（用于临时或缓冲贮存）；
- (e) 为开发装卸和整备工厂而贮存废物的时间，例如燃料封装工厂（用于临时贮存）；
- (f) 决定材料是资源还是废物以及允许发展必要的处理技术（策略或临时贮存）所需的时间。

I-2. 为满足安全考虑，短期贮存概念需要包括在大约 50 年内达到终点。如果不可能做到这一点，则应将安全考虑因素与长期废物贮存设施的安全考虑因素进行比较。

长期贮存

I-3. 在本“安全导则”中，长期贮存被认为是指超过大约 50 年的贮存，并有明确的终点。贮存终点很重要，因为它决定设施设计寿命、包装要求和财务保证、以及后续处置设施的计划基础。长期贮存预计不会超过大约 100 年。这一时限是根据土木工程建造的技术经验确定的。然而，事实上许多现有的工业和民用类似建筑的寿命为 100—150 年甚至更长。考古上可以找到寿命为 1000—2000 年的类似建筑。社会对更长设计寿命

的接受基于现有工业运行和设施的经验，这也是需要考虑的一个重要因素。100 年的期限被认为足以有充分时间来确定未来的燃料管理步骤。

附件 II

湿式和干式乏燃料贮存设施的运行和安全考虑

表 II-1. 湿式乏燃料贮存设施的运行和安全考虑

要素	适用的安全功能
1. 考虑到衰变热、核反应性和地面静态负载,控制水池中装载的乏燃料量	次临界、排热
2. 保护水池地板和墙壁免受负载冲击	密封、辐射防护、乏燃料组件结构完整性
3. 池水控制(比活度、温度、化学成分)	密封、辐射防护、乏燃料组件结构完整性
4. 水池水位的控制	辐射防护、排热
5. 通风系统的维护	密封
6. 水池排热系统的维护	密封、排热
7. 装卸设备的维护	辐射防护、密封、乏燃料组件结构完整性
8. 水下照明的维护	辐射防护
9. 防止乏燃料错位的监管控制	次临界
10. 乏燃料完整性	辐射防护

表 II.2. 干式乏燃料贮存设施的运行和安全考虑

要素	适用的安全功能
1. 控制贮存隔间中乏燃料的类型和数量	次临界、排热
2. 贮存区乏燃料位置附近 γ 和中子辐射场的监控	辐射防护
3. 排热和乏燃料向环境消散热量的监控	排热、辐射防护、密封、乏燃料组件结构完整性
4. 乏燃料密封完整性的直接监控（如果设计允许）	辐射防护、密封
5. 设施内如装有密封乏燃料储罐则间接监控体积和/或空间内的大气	辐射防护、密封、乏燃料组件结构完整性
6. 密封储罐中惰性气体的维护和监控（如果存在并经设计允许）	排热、乏燃料完整性

附件 III

乏燃料贮存设施运行程序中各部分的示例

III-1. 乏燃料贮存设施运行程序中可能包括的部分章节示例如下：

- (a) 标题说明，包括版本、日期和批准状态；
- (b) 程序的目的是；
- (c) 使用该程序之前所需的初始条件；
- (d) 必须遵守的预防措施和限值；
- (e) 对正在控制的参数（如池水组成）的限值和行动水平，以及将参数恢复到正常范围内的纠正措施；
- (f) 提供完整详细的程序，一步一步的操作说明；
- (g) 在适用的情况下，用于判断活动成败的验收标准；
- (h) 包含或引用的复杂程序核对表；
- (i) 制定程序时使用的参考文献；
- (j) 进行试验，以核实乏燃料装载后的辐射剂量水平和排热特性；
- (k) 设施周围的测井监控；
- (l) 烟囱排放监控。

附件 IV

辅助安全评定中考虑的场址条件、过程和事件 (外部自然现象)

IV-1. 在使用本清单时，应认识到所列始发事件不一定适用于所有设施和所有场址：

(1) 场址和区域的气象和气候：

- (i) 降雨量（平均数和极值，包括频率、持续时间和强度）：
 - 雨、冰雹、雪和冰；
 - 积雪和冰盖（包括堵塞入口或出口的可能性）；
 - 干旱。
- (ii) 风（平均值和极值，包括频率、持续时间和强度）：
 - 龙卷风、飓风和旋风。
- (iii) 直接太阳辐射输入的速率和持续时间（日照、平均值和极值）。
- (iv) 温度（平均值和极值，包括频率和持续时间）：
 - 多年冻土和土壤的循环冻融。
- (v) 气压（平均值和极值，包括频率和持续时间）。
- (vi) 湿度（平均值和极值，包括频率和持续时间）：
 - 雾和霜。
- (vii) 闪电（频率和强度）。

(2) 场址和区域水文、水文地质：

- (i) 地表径流（平均值和极值，包括频率、持续时间和强度）：
 - 洪水（频率、持续时间和强度）；
 - 侵蚀（率）。
- (ii) 地下水状况（平均值和极值，包括频率和持续时间）。
- (iii) 波浪作用（平均值和极值，包括频率、持续时间和强度）：
 - 高潮、风暴潮和海啸；
 - 洪水（频率、持续时间和强度）；

- 海岸侵蚀（率）。
- (3) 场址和区域地质：
 - (i) 岩性地层：
 - 场址材料的岩土工程特性。
 - (ii) 地震活动性：
 - 断层和薄弱带；
 - 地震（频率和强度）。
 - (iii) 火山：
 - 火山碎屑和火山灰。
 - (iv) 历史上的采矿和采石业：
 - 地面沉降。
- (4) 场址的地貌和地形：
 - (i) 天然材料的稳定性：
 - 边坡破坏、滑坡和下沉；
 - 雪崩。
 - (ii) 表面侵蚀。
 - (iii) 地形（地貌）在天气条件或极端天气后果的影响。
- (5) 场址的陆生和水生动植物（就其对设施的影响而言）：
 - (i) 植被（陆生和水生）：
 - 堵塞出入口；
 - 结构损坏。
 - (ii) 啮齿动物、鸟类和其他野生动物：
 - 由于挖洞、咀嚼等造成的直接损害；
 - 筑巢残骸、鸟粪等的堆积。
- (6) 以下方面的可能性：
 - (i) 现场自然发生的火灾和爆炸；
 - (ii) 沼气或天然毒性气体积聚（来自沼泽地或垃圾填埋场）；
 - (iii) 沙暴或尘暴（包括可能阻塞出入口）。

附件 V

辅助安全评定中考虑的场址条件、过程和事件 (外部人因现象)

V-1. 在使用本清单时，应认识到所列始发事件不一定适用于所有设施和所有场址：

- (1) 爆炸：
 - (i) 固态物质；
 - (ii) 气体、尘埃或气溶胶云。
- (2) 火灾：
 - (i) 固态物质；
 - (ii) 液态物质；
 - (iii) 气体、尘埃或气溶胶云。
- (3) 飞机坠毁。
- (4) 由于附近设施的结构或机械故障而产生的飞射物。
- (5) 洪水：
 - (i) 大坝的结构破坏；
 - (ii) 河流的堵塞。
- (6) 由于隧道开挖或采矿引起的地面下沉或塌陷。
- (7) 地面振动。
- (8) 任何腐蚀性、毒性和/或放射性物质的：
 - (i) 液体；
 - (ii) 气体、尘埃或气溶胶云。
- (9) 地理和人口数据：
 - (i) 人口密度和设施寿期内的预期变化；
 - (ii) 工业和军事设施和相关活动以及这类设施的事故对设施的影响；
 - (iii) 交通；

- (iv) 运输基础设施（公路、机场和/或航道、铁路线、河流和运河、管道以及涉及危害物质的撞击或事故的可能性）。
- (10) 电力供应和潜在的电力丧失。
- (11) 内乱：
 - (i) 恐怖主义、破坏和周边侵入；
 - (ii) 基础设施损坏；
 - (iii) 内乱；
 - (iv) 罢工和封锁；
 - (v) 健康问题（如地方病或流行病）。

附件 VI

辅助安全评定中考虑的假想始发事件 (内部现象)

VI-1. 在使用本清单时，应认识到所列始发事件不一定适用于所有设施和所有场址：

- (1) 接收不符合设计基准中规定规范（验收标准）的乏燃料、乏燃料容器、加工化学品、调节剂等（无意或其他原因）。
- (2) 对乏燃料的装卸，这种装卸符合验收标准，但随后对特定类型的乏燃料进行不适当的处理（不管是无意的还是其他原因）。
- (3) 由于易裂变材料的不当累积、几何构型的改变、慢化材料的引入、中子吸收材料的去除或这些因素的各种组合而导致的临界事故。
- (4) 由于爆炸性气体混合物的析出而引起的爆炸，其原因如下：
 - (i) 辐射分解；
 - (ii) 废气排放或挥发；
 - (iii) 不适当的混合或接触引起的化学反应：
 - 不同的乏燃料流；
 - 乏燃料和调节剂；
 - 乏燃料储罐材料和调节剂；
 - 加工化学品；
 - 乏燃料、乏燃料储罐、调节剂、加工化学品和工作环境或贮存环境的主要条件。
 - (iv) 在焚烧炉或压缩机的输入中包括压缩气体瓶等物项。
- (5) 火灾原因：
 - (i) 自燃；
 - (ii) 结构、系统或部件故障产生的局部“热点”；
 - (iii) 机器、设备或电路产生的火花；
 - (iv) 人类活动产生的火花，如焊接或吸烟；
 - (v) 爆炸。

- (6) 加工系统的部件与引入系统的材料之间的严重不相容性。
- (7) 由于处理不当或贮存不当而造成的过程材料（化学品、添加剂或粘合剂）的降解。
- (8) 未考虑乏燃料（物理、化学或病原体）带来的非放射性危害。
- (9) 由于各种试剂和材料的不适当混合或接触而引起的化学反应而产生的有毒气体。
- (10) 由于处理不当或设备故障而使乏燃料元件或其他重物坠落，坠落的乏燃料元件和可能对其他乏燃料元件或设施的结构、系统和部件造成后果。
- (11) 车辆或悬挂物与设施的结构、系统和部件或与乏燃料元件、乏燃料储罐和管道的碰撞。
- (12) 结构、系统和部件故障，原因如下：
 - (i) 结构完整性或机械完整性的丧失；
 - (ii) 设施内产生的振动；
 - (iii) 压力不平衡（压力波动或压塌）；
 - (iv) 内部腐蚀或侵蚀或工作或贮存环境的化学影响。
- (13) 由于承压部件的爆炸或旋转设备的灾难性故障而产生的飞射物和飞行碎片。
- (14) 加热或冷却设备的故障，导致加工系统或贮存系统中意外的温度偏差。
- (15) 加工控制设备故障。
- (16) 维持设施内环境条件的设备的故障，如通风系统或排水系统。
- (17) 监控或警报系统故障，使不利的情况不被注意。
- (18) 监视器、警报或控制设备上设置不正确（错误或未经授权的更改）。
- (19) 应急设备，如消防系统、泄压阀和管道，在需要时不能正常工作。
- (20) 电源故障，无论是主系统还是各个子系统。
- (21) 处理乏燃料的关键设备，如转移吊车或输送机发生故障。
- (22) 控制向环境排放的结构、系统和部件（如过滤器或阀门）发生故障。
- (23) 未能正确视察、试验和维护结构、系统和部件。
- (24) 由于信息不准确或不完整，导致操作人员操作不正确。
- (25) 操作人员操作不正确，尽管有准确和完整的信息。

- (26) 工作人员的破坏。
- (27) 焚烧炉炉衬、压缩机液压系统或切割机械等系统和部件的故障，有可能使被要求协助进行维护或更换的人员遭受更多的辐射。
- (28) 在退役过程中遇到意想不到的辐射源（例如，性质或数量不同），并立即认识到情况的变化。
- (29) 在退役过程中拆除或削弱退役中的结构或部件，而没有认识到对其他结构和部件的结构完整性可能产生的影响。

参与起草和审订人员

Bevilacqua, A.	国际原子能机构
Carreton, J.P	法国辐射防护与核安全研究所
Guskov, A.	国际原子能机构
Hornebrant, T.	瑞典核燃料与废物管理公司
Jones, C.	美国核管制委员会
Kumano, Y.	国际原子能机构
Maaranen, P.	芬兰辐射与核安全局
Nestoroska Madjunarova, S.	国际原子能机构
Nocture, P.	法国阿海珐
Witt, K.	瑞士核安全监察局
Yllera, J.	国际原子能机构

当地订购

国际原子能机构的定价出版物可从我们的主要经销商或当地主要书商处购买。
未定价出版物应直接向国际原子能机构发订单。

定价出版物订单

请联系您当地的首选供应商或我们的主要经销商：

Eurospan

1 Bedford Row
London WC1R 4BU
United Kingdom

交易订单和查询：

电话：+44 (0) 1235 465576

电子信箱：trade.orders@marston.co.uk

个人订单：

电话：+44 (0) 1235 465577

电子信箱：direct.orders@marston.co.uk

网址：www.eurospanbookstore.com/iaea

欲了解更多信息：

电话：+44 (0) 207 240 0856

电子信箱：info@eurospan.co.uk

网址：www.eurospan.co.uk

定价和未定价出版物的订单均可直接发送至：

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

通过国际标准促进安全

国际原子能机构
维也纳