

国际原子能机构安全标准

保护人类与环境

放射性废物钻孔处置 设施

特定安全导则

第 SSG-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

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。

放射性废物钻孔处置设施

国际原子能机构成员国

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
布隆迪
佛得角
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
荷兰王国
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-1 号

放射性废物钻孔处置设施

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（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內容。请见 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，2024 年
国际原子能机构印刷
2024 年 9 月·奥地利

放射性废物钻孔处置设施

国际原子能机构，奥地利，2024 年 9 月

STI/PUB/1418

ISBN 978-92-0-532923-9（简装书：碱性纸）

978-92-0-532823-2（pdf 格式）

ISSN 1020-5853

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險的安全标准”。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險，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。

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）、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。

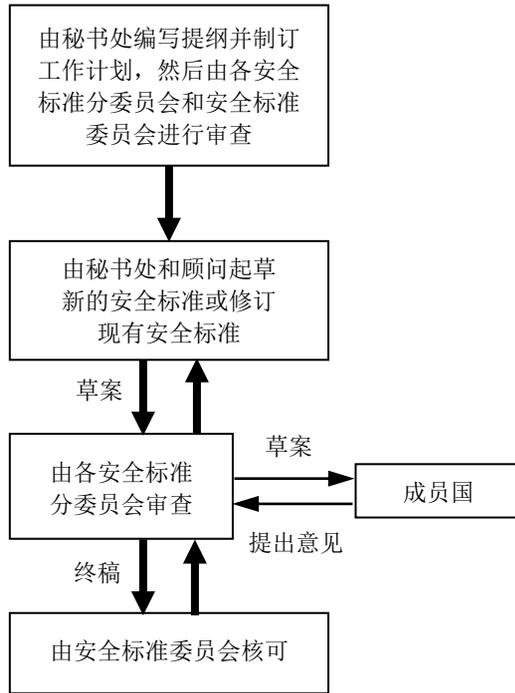


图 2. 制订新安全标准或修订现行标准的过程。

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

1. 导言	1
背景 (1.1-1.5).....	1
目的 (1.6-1.8).....	2
范围 (1.9-1.12).....	3
结构 (1.13).....	4
2. 钻孔处置和放射性废物管理安全	5
钻孔处置概念 (2.1-2.3).....	5
安全原则在放射性废物管理中的应用 (2.4-2.5).....	6
3. 钻孔处置与保护人类健康和环境	7
运行期间的辐射防护 (3.1-3.4).....	7
关闭后的辐射防护 (3.5-3.13).....	9
环境问题和非放射性关注问题 (3.14-3.17).....	12
4. 新钻孔处置设施计划中的安全	13
概述 (4.1-4.2).....	13
法律和组织机构系统 (4.3-4.24).....	13
安全方法 (4.25-4.39).....	17
安全设计原则 (4.40-4.51).....	20
安保 (4.52-4.54).....	24
5. 新钻孔处置设施的安全和处置	25
处置框架 (5.1).....	25
安全论证文件和安全评定 (5.2-5.13).....	25
钻孔处置设施的建设 (5.14-5.83).....	28
6. 已有钻孔处置设施实施的安全策略 (6.1-6.9)	44
附录 I 钻孔处置设施监管机构视察计划：可能需要视察的事项	47
附录 II 分步实施方法	49
附录 III 钻孔处置设施的安全论证文件和安全评定	51
附录 IV 场址特征和场址水文地质表征	59
附录 V 适用于小型钻孔处置设施的监视和监控计划	65
附录 VI 管理系统	67

参考文献	69
附件 非使用密封源钻孔处置关闭后一般安全评定	73
参与起草和审订人员	77
国际原子能机构安全标准核可机构	79

1. 导言

背景

1.1. 放射性物质在核科研与工业、医疗以及其他方面的应用中已产生了量少但不可忽视的放射性废物。这类废物的一部分（如工业和医疗应用中的废放射源）具有强放射性。目前许多国家都存有不同类型的放射性废物，所有类型的放射性废物都需要安全可靠地管理和处置。《乏燃料管理安全与放射性废物管理安全联合公约》[1]赋予缔约国安全控制和管理这些放射性废物的义务。

1.2. 废物放射性活度相对低且半衰期小于 30 年时，在近地表处置通常是适宜的。不过，一些废物由于放射性活度过高且寿命太长而不适于近地表处置，这类废物需要比近地表处置更高水平的包容和隔离，这意味着需要处置在更深的深度中。在核工业成规模的国家，可能已有深层处置设施或计划开发深层处置设施，不过这类国家是相对少的。更常见的是，一些国家拥有放射性废物，但是缺乏安全处置这些废物的可能性，甚至看不到这样的前景。如工业和医疗用的放射源可能排放高能的光子，须采用高屏蔽能力的容器来保证安全使用、运输和贮存。达到使用寿命后，某些情况下可能将这些放射源返回制造商进行循环利用。而大多数情况下，不可能进行循环利用，虽然这些放射源是“废”放射源（即放射性不再满足预期用途），但仍具有显著危害。这已从不恰当地使用废放射源引发的大量事件或事故（包括致命性事故）中得到了证实[2]。

1.3. 当废物中核素的半衰期相对短（如钴-60，半衰期 5.3 年）且活度小于几十兆贝可时，可以合理地假定将它们安全地贮存在一些设施，如近地表处置设施中，经过 10—20 个半衰期使放射性衰减到安全水平。不过，对于长寿命和高活度的放射源以及其他废物，贮存只是一个临时方案，还需要继续寻求长期方案。对于这类废物，一个潜在的长期方案是将其处置在有工程屏障的岩洞型深层处置库中。

1.4. 一种备选方案是在有特殊工程措施的专用钻孔中处置（称之为“钻孔处置”[3]），这使得经济地处置小批量废物，同时又满足安全要求成为可能。钻孔建造和场址表征相对容易，使得这种处置方法特别适用于废物量

有限的国家或国家区域集团。钻孔处置设施对废密封放射源处置具有特殊意义。不过，一般说来，含有可能对无意侵入人员造成危害的废密封放射源，或可以用作放射性分散装置的废密封放射源应当不在近地表处置设施中处置。

1.5. 过去，钻孔类型设施已被许多国家用于贮存和处置放射性废物。所有这些设施均位于现有的废物处置场址中[3]。例如俄罗斯联邦，已有 40 多年运行深达 15 米钻孔处置设施的经验[4]，并且正在计划建设新的钻孔设施[5]。又如，美国内华达州的更高包容性处置试验设施采用深 10 米，直径 3 米的钻孔来处置废物[6]。这些示例在本“安全导则”被认为是良好实践。不过，也有一些受到质疑的实践，如已经关注到以下问题：某些现有钻孔处置设施场址和深度所能提供的隔离程度，隔离屏障的可靠性与性能，以及相关安全评定的充分性。这些关注说明了需要针对现有钻孔处置设施的安全评价制定导则，以便决定是否采取补救措施。

目的

1.6. 本“安全导则”的目的是，依据相关安全要求[7—9]，为放射性废物钻孔处置设施的设计、建造、运行和关闭提供指导。这些指导也可用于重新评定已有设施的安全。符合安全要求应当能保护人类和环境免受电离辐射的照射。钻孔处置安全目标和相关标准的严格程度不低于地质处置或近地表处置。不过，因为废物量（体积和活度）相对较小满足这些目标和标准，以及证明将满足或已经满足这些目标和标准，需付出的努力比大规模处置小的多。

1.7. 实际上，在钻孔处置设施中处置放射性废物是介于近地表处置和地质处置两种完善方案之间的一种方案。因此，本“安全导则”是在《近地表处置安全导则》[10]和《地质处置安全导则》[11]基础上的进一步补充。

1.8. 本“安全导则”旨在为可行和系统的钻孔处置决策方法提供支持，这在管理系统框架内是必需的，以提供必要的质量水平（见附录 VI）。

范围

1.9. 现有和拟议钻孔处置设施的直径和深度变化范围很大，包括不同深度的竖井和小直径钻孔。虽然本“安全导则”考虑了所有的可能性，但主要关注直径不超过几百毫米、深度为几十米至几百米的钻孔（即深度在近地表处置和地质处置之间）。

1.10. 虽然钻孔处置设施也适于处置其他类型的废物，但本“安全导则”主要关注非使用密封源和少量的低、中水平放射性废物。在本“安全导则”，“非使用密封源”是指无论出于何种原因已不再使用并归类为废物的密封源。非使用密封源中所含的典型核素见表 1。最可能适于钻孔处置的核素和/或废物类型应当是：

- (a) 寿命过长，不宜衰变贮存（如半衰期超过几年）；
- (b) 寿命过长或放射性太强，不能在简单的近地表设施中处置；
- (c) 没有其他适宜处置设施的少量废物。

表 1. 非使用密封源中的典型放射性核素

放射性核素	半衰期	最大预期活度 (兆贝可)	应用
<100 天			
金-198	2.7 天	1.5E3	手工近距离放射治疗
钷-90	2.7 天	5E2	手工近距离放射治疗
碘-131	8.0 天	1.5E3	手工近距离放射治疗
磷-32	14.3 天	2E2	血管近距离放射治疗
钷-103	17.0 天	1.5E3	手工近距离放射治疗
锶-89	50.5 天	1.5E2	血管近距离放射治疗
碘-125	60.0 天	1E4	骨剂量测定
铯-192	74.0 天	5E6	工业射线照相
100 天至≤ 30 年			
钷-210	138.0 天		静电消除器
钷-153	242.0 天		骨剂量测定
钴-57	271.7 天	5E5	示踪剂

表 1. 非使用密封源中的典型放射性核素（续）

放射性核素	半衰期	最大预期活度 (兆贝可)	应用
钷-106	1.0 年	5E4	手工近距离放射治疗
镱-252	2.6 年	5E3	校准设备
钷-147	2.6 年	5E5	仪器仪表标准源
钴-60	5.3 年	5E4	杀菌与食品保鲜
氙-85	10.8 年		测厚仪
氢-3	12.3 年	5E6	氚靶
铯-90	29.0 年	5E4	测厚仪
铯-137	30.1 年	5E5	杀菌与食品保鲜
	>30 年		
钷-238	87.7 年	3.7E3	静电消除器
镍-63	100 年	5E2	电子俘获探测器
镅-241/铍	433 年	8E5	测井、火灾探测
镭-226	1600 年	3.7E3	手工近距离放射治疗
碳-14	5700 年		
氯-36	3E5 年	4.00	仪器仪表标准源
碘-129	1.6E7 年	4.00	仪器仪表标准源

1.11. 本“安全导则”考虑了运行安全、废物安保和关闭后安全。已经认识到，虽然辐射安全是至关重要的，但也只是众多需考虑因素的一部分，其他考虑因素包括计划、财务、经济和社会等方面，以及非辐射安全。本“安全导则”没有专门涵盖上述其他方面的考虑因素。

1.12. 本“安全导则”主要面向放射性废物安全处置的管理人员和实施人员。

结构

1.13. 本“安全导则”的第 1—3 部分分别阐述了钻孔处置的背景、概念、防护以及安全目标。第 4 部分和第 5 部分提出了关于如何将相关要求应当用于钻孔处置设施的建议。第 6 部分描述了对现有钻孔处置设施采用的安全策略。

2. 钻孔处置和放射性废物管理安全

钻孔处置概念

2.1. 钻孔处置概念（如图 1 所示）是指将非使用密封放射源和小体积的低、中放废物处置在钻成或凿成的，并能直接在地表操作的工程设施中。本“安全导则”钻孔处置主要是指不需要大规模科研和场址调查项目就可以开展的小型活动。

2.2. 在本“安全导则”，以 30 米作为近地表处置与中等深度或更深处置的界限。通常认为这个深度属于“正常居住侵入带”的较低水平（即超过此深度的人员侵入仅限于钻探和重大开挖活动，如开挖隧道、采石和采矿）[12]。在应用这个界限时，关键参数不是钻孔的最大深度而是钻孔中废物所处的最小深度。因此，即使是几百米深的钻孔，如果其中废物距地表的深度小于 30 米，那么这个钻孔也应当看作是近地表处置设施。如果所有的废物均位于地表 30 米以下，就属于中等深度处置设施。

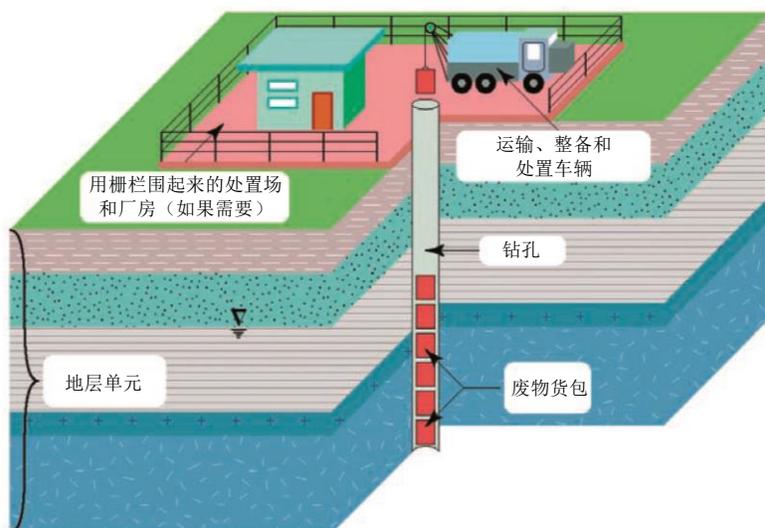


图 1. 钻孔处置设施的示意图

2.3. 从安全角度，钻孔处置与放射性废物近地表处置、地质处置没有概念上的区别。实际上，由于钻孔处置的钻孔深度范围通常可同时达到近地表处置和地质处置的深度，因此需要考虑这两者的要素。正如近地表处置和地质处置一样，天然屏障和工程屏障共同为钻孔处置的安全发挥作用。通过设计这些屏障，以包容放射性物质直至其衰变到非显著水平，并提供充分的隔离和包容，确保对人类和环境的充分保护。

安全原则在放射性废物管理中的应用

2.4. “基本安全原则”[13]建立了适用于所有设施和活动的安全原则，包括废物处置活动。考虑到钻孔处置设施的深度范围大（从近地表深度直到地质处置深度），以及拟处置废物的特性，需要制定导则用于指导这些设施如何同时满足地质处置[8]和近地表处置[9]安全要求。

2.5. 对于钻孔处置，分级采用近地表处置和地质处置的安全要求，将可以保证获得足够的安全水平。应当向监管机构和其他的相关各方证明，所有情况下安全都能得到合理保证。不过，对于一个只处置少量核素放射性总量的设施，为符合安全要求而需付出的努力通常会明显少于大型处置库，包括安全评定、场址表征、设施建造、运行与关闭。一般安全评定有助于特定场址的评定，运用这些评定以促进钻孔处置设施的安全评定，第 5.7—5.9 段将对此进行讨论。

3. 钻孔处置与保护人类健康和环境

运行期间的辐射防护

3.1. 钻孔处置设施运行期间的辐射防护目标和相关的安全标准与已许可证的任何核设施都是一样的，这是《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》（《基本安全标准》BSS）[7]所要求的（见方框 1）。就辐射防护而言，就是放射源处于受控状态，排放能够核实，照射能得到控制，必要时可采取行动。辐射防护最优化是主要目标（适用于参考文献[13]原则 5），也见方框 2 的“目标”。

3.2. 在处置前活动和钻孔处置设施运行期间，预计仅有极少量的核素排放（如少量的气态核素）。设计上应当做到，即使发生废物货包破损事故，排放的核素也不可能对设施以外造成影响。考虑的相关因素包括包装、废物形状、废物中的核素组成以及对包装和设备污染的控制。

3.3. 运行期间应当具备辐射防护计划。这应当确保工作人员所受剂量得到控制并满足剂量限值的要求[14、15]。此外，应当有处理事件和事故的应急措施，以便能控制与此相关的放射性危害。第 5.39—5.59 段对关于处置设施的运行进行了更全面的描述。

3.4. 对于钻孔处置设施废物运输所致剂量和风险，应当采用与其他放射性物质运输一样的方式进行管理。在这方面尤其重要的是外照射剂量率和废物货包的污染（或运输期间所用外包装的污染）。运输安全要符合《放射性物质安全运输条例》[16]要求。

方框 1: 运行期间的辐射防护

要求[7]

在考虑社会、经济因素的条件下，钻孔处置设施运行对工作人员和公众造成的照射要求保持合理可行尽量低，人员的照射要求在适用的剂量限值范围内。

标准

《基本安全标准》[7]表 II 规定了工作人员和公众的辐射剂量限值和约束值。该出版物特别规定了：

- (a) “任何工作人员受到的职业辐照必须得到控制，不得超过下列限值：
 - 连续 5 年的平均年有效剂量 20 毫希沃特；
 - 单一年份的年有效剂量 50 毫希沃特”（参考文献[7]第 II-5 段表 II）。
- (b) “估算的实践活动对关键群组公众成员造成的平均剂量不得超过：
 - 单一年份的年有效剂量 1 毫希沃特”（参考文献[7]第 II-8 段表-II）。

公众成员可能接受到多个实践活动或源的照射。为了符合上面的限值，“一个设施（如钻孔处置设施，看作单一来源）的设计和运行应当确保任何涉及处置设施的活动对公众成员造成的预期平均剂量或平均风险不超过 0.3 毫希沃特/年的剂量月约束或 10^{-5} 的风险约束^a[8]”（基于国际放射防护委员会的模式和假设）。

^a 在这种情况下，风险可以理解为死亡或严重遗传性疾病的概率。

方框 2: 关闭后的辐射防护[7、8、18]

目标

“（钻孔）处置设施的选址、设计、建造、运行和关闭要求在考虑社会、经济因素的条件下，关闭后的防护能实现最优化，保证公众成员受到的长期剂量和风险不超过适用的剂量或风险约束值” [8]。

标准

“公众成员所有实践的剂量限值是 1 毫希沃特/年的有效剂量[7]，可以认为将来也不得超过这一剂量或风险当量。为了符合这一限值，（钻孔）处置设施（看作是单一来源）设计必须满足将来活动对公众成员造成的预期剂量不超过 0.3 毫希沃特/年的剂量约束或 10^{-5} /年量级的风险约束^a” [8]。

对于关闭后人员侵入的影响，国际放射防护委员会第 81 号建议[18]，如果人员侵入对居住在场址附近公众造成的年剂量预期小于 10 毫希沃特，那么为减少侵入概率或控制侵入后果付出努力是不正当的。如果人员侵入对居住在场址附近公众造成的年剂量预期大于 100 毫希沃特，那么在设施开发阶段所做出的减少侵入概率或控制侵入后果的努力是正当的。这也适用于相关器官所受辐照超过确定性人类健康影响阈值的情况。不过，不是所有的监管机构都接受国际放射防护委员会第 81 号[18]建议。

“已经认识到公众将来受到的辐射剂量只能是一种估算，而且估算的不确定性会随着时间的延长而增加。因此在使用标准时要关注其适用的时间范畴，当超出时间范畴时不确定性会变得很大以至于这些标准不能作为决策的合理依据” [8]。

^a 在这种情况下，风险被理解为死亡或严重遗传性疾病的概率。

关闭后的辐射防护

3.5. 钻孔处置的主要目标是在处置设施关闭后，能长期保护人类健康和环境。根据《基本安全标准》[7]，为实现这一目标须在设计上做到从处置设施中迁移出的核素所致剂量最优化，且同时满足剂量约束（见方框 2）。不过，已经认识到，对于长远未来的个人辐射剂量和风险只能进行估算，估算的可靠性随着时间范围增加而减少（见附录 III 第 III.2—III.11 段）。这

里，辐射防护的最优化是一个判断过程，这个过程要考虑社会、经济因素，这种优化以一定结构化但实际上是定性的方式进行，并辅之以定量分析。第 4.38 段对关闭后的辐射防护最优化做了进一步解释。

3.6. 一个良好设计和选址的钻孔处置设施，应当可以合理地保证关闭后的辐射影响是低的，不仅是辐射影响的绝对数值低，而且与当前已有的经济代价合理的废物管理计划相比也是低的。应确定一个场址，为废物与生物圈的包容和隔离以及工程屏障的保护提供有利条件（如低的地下水流量和有利的地球化学环境）。钻孔处置设施的设计应当考虑场址特征，防护最优化并使剂量保持在剂量或风险的约束范围以内。钻孔处置设施应当按照评定后的设计进行建造、运行和关闭，以便能实现工程和天然屏障的预期安全特征。

3.7. 在估算未来公众个人剂量时，假设人类使用受到废物中核素污染的当地资源。因为不可能准确预测未来人类行为，评定模式中需要假设它们是程式化的。原子能机构 BIOMASS 项目[17]提出了一种合理可行的方法，以模拟生物圈和估算固体废物处置造成的剂量（见附录 III）。概括地说，参考文献[17]提供了一种合乎逻辑且可以自辩的“评定生物圈”构建方法（即用于放射性废物处置全系统性能评定的生物圈数学表达式）。参考文献[17]也给出了一系列参考生物圈的示例：用于说明其方法学的程式化评定生物圈，这可能成为一种有用的评定工具。

3.8. 评定设计是否能提供最优的防护水平可能需要结合其他因素进行判断。这些因素可能包括设计质量、评定质量和长期照射计算中重要的定性和定量不确定性。总体而言，当不可减少的不确定性导致安全评定计算结果的可靠性降低时，将计算结果与剂量约束或风险约束进行比较时就应当慎重。对于钻孔处置设施，下列条件下就需要考虑这种情况：

- (a) 未来极长时间范围上的设计演变（见附录 III 的定义）；
- (b) 极低频率的自然事件；
- (c) 人员侵入事件。

3.9. 对于第 3.8 (a) 段的情况，已经认识到在计算长远未来的人员剂量时，存在不可减少的不确定性，并且这种不确定性随着评定时间范围¹的增加

¹ 评定时间范围是指计算关闭后性能评定的时间段。

而增加。监管机构有时会对评定时间范围做出要求，但更经常的是，默认地设置评定时间范围长于峰值剂量出现的时间。对于地质处置，上百万年的评定时间范围是很普遍的。不过，如果在钻孔处置设施中处置的废物是相对短寿命的（如几十年），则评定的时间范围可能较短（最多几百年），因此计算的不确定性也会减少。

3.10. 极低频率的自然事件可能使钻孔处置设施的屏障功能受损，从而导致核素向环境排放和人员受到辐射照射。在事件的发生或照射的过程及其后果存在显著不确定性时，证明安全水平最佳的方法是分别考虑发生的概率和潜在的照射。这些情况下，可以认为对长远未来照射的处理与潜在照射类似，并以类似方式处理[18、19]。对于钻孔处置设施，拟处置废物的寿命较短，评定时间范围也较短，降低了低频率自然事件的重要性。

3.11. 对于人员无意侵入钻孔处置设施的事件，参与钻探或开挖这类活动的个别人员可能会受到高剂量照射。应当估算这些人员的剂量和风险，但是根据最新的国际放射防护委员会建议书[18]，在评定设施的安全和可接受性时，他们不是必要的决定因素。应当对这类侵入人员所致的剂量和后果进行估算，以便评价和确定阻止侵入和缓解其后果的必要措施（管理措施或实体措施）是否适宜。一旦确定了处置系统具有符合安全要求的、适宜的阻止侵入措施和缓解侵入潜在后果的措施，则无需进一步估算侵入人员的受照剂量。钻孔处置设施具有很多减少侵入可能性和后果的固有特点，包括：

- (a) 发生的概率低；
- (b) 侵入人员数量少；
- (c) 人员进行适当去污和医学治疗的可能性；
- (d) 产生的危害可能与其他职业风险相当；
- (e) 对于无意侵入人员可能受到很高剂量的情况，与其他处置策略相比，钻孔处置所能提供的高水平长期防护更有利于降低这类风险。

不过，应当注意到，国际放射防护委员会这些特殊建议并不被所有的监管机构接受。在这些建议未被接受时，需要考虑无意侵入人员的后果。

3.12. 侵入的更显著后果是其可能破坏工程屏障，对居住在钻孔周围的人员造成长期危害。这种情况下，防护的最佳方式是降低这类事件的发生概

率。一种方案是评定人员侵入的后果，用方框 1 所描述的标准[18]对一种或两种人员侵入假想方案进行评价。其他评定人员侵入后果的方法也是可以接受的。

3.13. 钻孔处置设施的占地面积小也有助于减少人员侵入的可能性，增加处置区的深度和长度可进一步减少侵入可能性。设施选址远离已知的矿物资源和水源也能降低人员侵入的可能性。在较短的时间范围内，一些行动，如保存记录、限制土地使用、设立警告标示，以及维持非能动的机构控制也有助于减少这类事件的发生。

环境问题和非放射性关注问题

3.14. 本小节将讨论钻孔处置设施中放射性物质的环境保护，尤其是长期的环境保护。另一项重要考虑是钻孔处置设施中非放射性物质的环境影响。此外，通常意义上的环境影响，如交通、噪音、视觉舒适性、对自然栖息地的干扰和对土地使用的限制，以及社会和经济因素，也需要得到监管核准，但这超出了本“安全导则”的范围。

3.15. 过去的假设是对于恰当定义的受照人群，就钻孔处置相关辐射风险对人员进行的防护也能满足对环境防护的需求[19]。当前，国际上正在讨论环境电离辐射防护的必要性以及可能的防护标准（如，见参考文献[20]），预期在此方面将会有所进展。虽然如此，但在绝大多数情况下，对人员进行防护也就对环境进行了防护。不过，预期将来其他物种的剂量评定方法会更明确地证明这一点[21]。

3.16. 钻孔处置设施排放的放射性所致的剂量和风险可以作为环境保护的一个指标，与人类行为习惯无关的附加指标也可能是有价值的。这些指标包括，如，将处置库排放到环境介质中的放射性核素浓度与天然放射性核素浓度进行比较，将处置库排放的放射性核素通量与天然放射性矿物的通量进行比较[22]。

3.17. 也应当对钻孔处置设施中非放射性物质的影响做出评定。应当考虑的因素包括，废物或工程屏障材料的化学和生物毒性、地下水资源的保护、污染物释入环境的生态敏感性。例如，如果废弃放射源与其铅屏蔽一同处置，那么安全评定也要考虑铅的可能迁移。

4. 新钻孔处置设施计划中的安全

概述

4.1. 本部分针对新钻孔处置设施，指导如何组织处置前活动才能符合要求的运行和关闭后安全。（即如何满足第3部分描述和讨论的防护要求和相关标准）。

4.2. 本“安全导则”主要包括四方面内容，(i) 法律和组织机构系统；(ii) 安全方法；(iii) 安全设计原则；和 (iv) 安保。

法律和组织机构系统

4.3. 对法律和组织机构系统的讨论分为政府职责、监管机构职责、设施开发和营运组织或未来营运组织职责和废物产生者职责。总体目的是实现放射性废物从产生到处置全过程的安全和安保。特别关注适宜的法律和监管框架和配置充分的财务资源。要求具有废物处置、监管评审与评定的资金。应当考虑财务责任和法律责任在不同组织之间转移的时间和方式。

政府职责

4.4. 参考文献[23]规定了建立国家放射性废物管理系统的总体要求。除了建立必要的技术和运行能力外，确保放射性废物的安全管理也要求有相关的法律法规，独立于营运组织的监管机构，以及明确设施许可证和开发各个步骤的监管程序。法律应当要求证明安全，并且要求监管机构进行独立评审，这是《安全基本原则》[13]原则之一，《乏燃料管理安全与放射性废物管理安全联合公约》[1]对此也有要求，这也是参考文献[8]对地质处置政府职责的要求。

4.5. 放射性废物钻孔处置的法律和监管程序中的要求应当体现废物具有的潜在危害。当处置少量非使用密封源时，法律和监管的内容和复杂程度应当与之相符。在制定国家放射性废物管理政策时，应当考虑下列事项：

- (a) 及早建立全面的国家放射性废物库存量清单有助于保证废物管理资源和设施的充分配置，如不会因为初始未预料的废物而在后续进行设计

变更。通常，库存量清单包括废物数量（体积、活度）和特性（半衰期，理化性质），库存量清单也在很大程度上决定处置所需的资源；

- (b) 钻孔处置设施建设全过程定义应当明确各个阶段的法律（如许可证）要求（见第 5.1 段）；
- (c) 需要考虑如何使营运组织和监管机构拥有具备专业技能的人员。如政府可以要求国家的地质和水文研究机构保持或提高在本领域的能力，以便能为监管机构提供支持；
- (d) 需要考虑废物管理各步骤之间的相互联系，以便从总体上平衡放射性废物管理的安全和效率。

4.6. 国家政策和法规应当包括建立具有适当任务和职责的营运组织。例如，可以是一个政府部门，它可以指定或分包给专业机构实施设施的设计、建造和运行。

监管机构的职责

4.7. 监管机构应当向政府提供关于放射性废物管理国家政策必要性和有效性的建议，并协助进行更新和改进。

4.8. 与其他放射性废物处置实践一样，监管机构也应当制定放射性废物钻孔处置的监管计划（例如，参考文献[8]规定了地质处置监管机构职责的要求）。监管机构应当在征询所有相关方意见的基础上制定监管计划，并在许可证申请前完成。监管计划应当涵盖设施建设的所有阶段，要说明监管的原则、要求和标准，以及出现不符合项时的处理方案。监管计划也应当包含一般性内容，如：

- (a) 放射性水平极低废物的解控水平以及这些物质排放的监管安排；
- (b) 放射性废物处置前贮存的监管核准；
- (c) 在现有放射性废物处置设施中建设钻孔处置的许可证。

4.9. 监管机构应当在如下方面给予指导：法规的执行、希望营运组织提交许可证申请和安全论证文件所遵循的程序、许可证申请时可能要求考虑的时间范围和有组织控制可能期限等。监管安排应当是综合的，也应当与监管控制设施的规模和潜在危害相适应。

4.10. 只有在许可证申请通过监管评审和评定、安全要求能得到合理的保证、所有阶段（即建造、运行、关闭以及任何计划的关闭后有组织的控制时期）的项目资金已经或将落实的条件下，才能颁发建造和运行许可证。正如第 5.1 段解释的那样，分阶段许可证和实施的实施方式将使决策的过程更透明并且突出影响决策的关键因素。每一阶段的许可证申请都应当全面描述整个处置计划，以保证处置计划的前后一致。

4.11. 许可证应当具有充分的灵活性是一种良好实践，可以涵盖变更控制程序，以及由于技术进步而引起的（在设计上）不可预计的变更。在许可证中应当说明哪些条件下营运组织可以自行做出变更而无需得到监管机构的批准。变更控制程序指定的责任应当与其潜在危害相一致。

4.12. 对安全论证文件（见第 5.12 段和第 5.13 段）进行的独立安全评审和评价可随已有的监管实践、废物的潜在危害以及设施建设阶段的不同而不同。监管机构应当保证其具备对安全论证文件进行独立评审和评价的能力，并且能确定设施是否安全，批准条件也应当在许可证中说明。这可以通过不同的方式来实现，如向独立专家咨询，与其他有类似情况的国家合作以及采用一般安全评定。

4.13. 对于处置设施将运行数年，且期间钻孔的数量随时间进一步增加的情况，应当周期性地定期进行安全再评定。也可以采用对场址进行许可证但同时要求对钻孔分别进行许可证的方式。这将正式地允许监管机构依据运行得到的新数据和安全标准的新发展对安全进行再评定。无论是哪一种情况，在处置设施开发过程中，都应当在早期明确安全再评定的要求。

4.14. 监管机构应当保证，在钻孔处置设施建设的所有阶段，对营运组织实行充分的控制。针对安全相关的重要活动，如建造、运行和关闭，应当制定监管机构的视察计划。监管机构的视察将有助于保证设施开发符合许可证要求和运行程序（例如废物货包的接收和合理放置）。附录 I 是一个钻孔处置设施监管机构视察计划的示例。当发现不符合项时，监管机构要求采取的行动应当能反映不符合项的安全意义。对于很严重的情况，应当限制或提前终止场址上的活动。对于较轻违反要求的情况，可以简单要求采取补救措施。

4.15. 在一些国家，对于已经关闭的钻孔或地表处置设施，通常要基于监控结果进行周期性的安全再评定，这种良好实践应当予以采纳。

营运组织的职责

4.16. 参考文献[8]规定的地质处置营运组织职责，赋予营运组织建造可行的和安全的处置设施并证明处置设施符合监管要求的职责。某些情况下，营运组织职责也包括从废物产生单位收集废物并运输到处置场址。为了履行职责，营运组织应当考虑需处置的非使用密封源和其他放射性废物的特性和数量、运输基础设施、可用场址以及可用的钻探和工程技术、需要开展的研究、国家的法律框架和监管要求。如果营运组织合同委托的方式开展这些工作，营运组织负责保证其符合监管要求。

4.17. 营运组织负责编写并向监管机构提交安全论证文件（见第 5.2—5.13 段），安全论证文件是处置设施建设的决策基础。在许可证得到批准后，方可建造钻孔设施。

4.18. 营运组织负责实施或委托开展设施可行性和安全方面的相关研发活动，包括场址勘查。营运组织也有责任实施或委托开展必要的场址勘查和材料调查以评定其适宜性，并为安全评定提供数据。对于钻孔处置设施，设计应当完全基于经过试验和试验的材料以及工作实践。这将在很大程度上把研究限于初始探索，将工作重点转移到阐明设计的可运行性和场址的适宜性。

4.19. 营运组织应当在安全评定的基础上设立限值、控制和条件（例如技术说明书），以保证处置设施的建设和运行与安全论证文件和许可证条件相一致。这也要求招聘和培训合格的工作人员，演练预定的废物接收、运输、堆放控制措施（即废物验收标准，见第 5.60 段），采取适宜的安保措施。任何可能对安全有影响的设计变更和运行变更都应当符合变更控制程序（见第 4.11 段）。

4.20. 营运组织应当保存以下信息：与安全论证文件相关的信息，处置设施安全评定的支持性信息，证明符合监管要求的记录，以及营运组织自身的技术规范，保存期限至少要延续到这些信息被替代或是处置设施的责任转移到另外指定的机构（例如，在关闭时）。责任转移时，营运组织应当将与处置设施安全相关的信息一同移交。营运组织也应当与监管机构合作，向其提交履行监管职责所需的全部信息。营运组织应当定期向监管机构提交报告，出现不符合项时提交不符合项报告。

4.21. 营运组织全面负责废物的接收。营运组织也有责任核实所附废物信息文件的完整性和正确性。描述废物的信息包括废物货包表面和 1 米处的剂量率、可去除的表面污染、体积、质量和物理状态、废物的化学成分和放射性核素组成。

放射性废物产生单位的职责

4.22. 放射性废物产生单位应当与监管机构、营运组织共同协作，以保证在放射性废物管理的各步骤中放射性废物均能得到安全管理。由于放射性废物从产生到处置各管理步骤间的相互影响，对其中某一步骤的决策，要考虑其对后续步骤的影响和/或要求。这要求对相关活动进行协调并及时交流信息。废物产生单位应当不以不恰当的方式处理、整备（包括封装废物）和贮存废物，或者采取任何使废物的后续管理更加困难的行动。

4.23. 废物产生单位应当对废物进行表征、处理和整备，以保证其符合营运组织制定并得到监管机构批准的废物验收标准（见第 5.60—5.65 段），该项责任也可能归属于营运组织。可以通过独立视察，全过程监查以及对废物货包的代表性取样来保证表征、处理和整备的充分性。

4.24. 废物产生者应当保存记录。如对于密封源，购置的详细信息应当与其使用记录一同保存，尤其是要记录其受损的情况。废物产生者也有责任将废物运输到处置场址，除非处置设施营运组织在废物离开产生地前已接管了责任。

安全方法

4.25. 建设一个钻孔处置设施，即便是很顺利也需要几年时间。随着项目的进展，需做出一些关键的决策，如选址、详细设计、建造、运行管理和关闭等。决策要基于届时已获得的信息以及对这些信息的信心。对设施建设的决策也受许多外部因素的影响，如国家政策和优先性，以及是否有适宜的地质环境。

4.26. 根据参考文献[8]建设过程安全重要性的要求，在每个主要的决策点，都要考虑可选方案所涉及的安全问题。在每个决策点，保证安全是优先要考虑的因素。如果有一种以上满足安全要求的方案，则也要考虑其他的因

素。这些因素包括公众的接受性、费用、安保、土地所有权、已有的基础设施和运输线路。

非能动安全

4.27. 钻孔处置设施的选址、设计和建造应当使关闭后的安全不依赖于能动措施。这就要求钻孔处置设施符合参考文献[8]非能动安全要求。

4.28. 通过非能动设计特点实现安全要求，意味着当处置设施处于关闭后阶段，无需对关闭后钻孔处置设施实施能动管理。对于中等深度的钻孔（即废物处置深度在地表 30 米以下的钻孔），关闭后处置系统的天然和工程屏障应当是充分的，处置系统自身能保证废物安全，保护人类和环境。对于近地表钻孔（即废物处置深度距地表不到 30 米），为减少人员侵入风险而采取的有组织的控制可能是安全论证文件中需要考虑的要素。近地表钻孔不可能适用于处置对人员侵入有不可接受风险的废物或具有安保风险的废物。第 5.68—5.80 段对有组织的控制和监控做了进一步讨论。

4.29. 实践中，即便是中等深度钻孔，也会在关闭后进行一段时间的非能动有组织的控制，如控制土地的所有权和限制土地的利用，以进一步降低无意侵入的概率和提供额外的公众保证。此外，这也便于进行监控，以提供设施安全的保证和信心。

4.30. 无论有组织的控制的程度和期限如何，都需要进行安全评定，其目的是说明两种类型的钻孔都能合理地保证充分的非能动安全水平。对非能动安全有贡献的因素包括：废物具有稳定的化学形态，高整体性容器，对钻孔内的容器间和钻孔套管间的空隙予以回填，处置深度大于 30 米，非化学活性的地下水，稳定的地质条件，以及处置在人员侵入概率较低的位置。

4.31. 虽然非能动安全不是对运行阶段的要求，但如果运行期间的活动有助于减少为保证安全而需采取的能动措施，那么也是有益的。在废物货包装容器内置入屏蔽材料以便进行手工装卸就是这方面的一个示例。较短的运行期也有助于非能动安全。如，为了避免钻孔的开口时间过长，在待处置的废物积累到一定量时，再开始钻探、建造、放置、回填和关闭钻孔等全流程的工作。这可能要求设施具有临时安全贮存废物的功能。

对安全的充分理解和对安全的信心

4.32. 为了合理地保证安全，钻孔处置设施的设计和选址要对影响关闭后安全的特点、事件和过程有充分的理解。这种理解应当覆盖废物具有显著潜在危害的时间段，或者至少是关闭后安全评定的时间范围（可以是法规规定或监管机构同意的时间范围）。

4.33. 对关闭后处置系统的行为的认知，随着数据的积累和科学知识的发展而不断深入。在处置设施概念开发的早期，应当有充分的数据和认识以建立信心，配置资源进行下一步调查。在开始建造前、废物堆放和关闭期间，安全论证文件中应当体现充分的认识水平，为监管要求得到满足提供合理保证。要证明合理保证，就应当对整个处置系统进行安全评定并说明评定中的不确定性。通过鉴别系统中与安全相关的特性和过程，以及对安全不利的外部特点、事件和过程，来说明它们及其相互作用都已得到充分的表征和理解。

4.34. 原子能机构正在开发近地表处置的特点、事件和过程数据库[25]，这对于汇编钻孔处置的特点、事件和过程清单是一个很好的基础。特点、事件和过程是否相关取决于特定情况。一些特点、事件和过程很明确是关闭后安全评定所需要的。例如，核素的溶解度几乎总是需要的。其他的一些特点、事件和过程则是不相关的。对于大多数的特点、事件和过程，需要判断其是否包含在安全评定中。可以通过参考以前安全评定的示例（如，参考文献[26]钻孔处置设施一般安全评定）来获得这方面的指导。最重要的是确定排除或忽略特点、事件和过程的标准以及原因。

4.35. 通过采用综合的和系统的方法学，对关闭后安全的信心已得到明显提升。经济合作与发展组织核能机构[27]和原子能机构的 ISAM 项目[28]已在这方面提供了有用的导则。本“安全导则”第 5.2 段对此做了进一步的讨论。

防护最优化

4.36. 保证剂量低于监管批准的剂量约束是必需的，但这本身并不是监管批准的充分条件。因为对于防护最优化，若强化安全不会造成不恰当的社会和经济损害，则应当采取该措施。通常要对防护最优化做出判断，因为损害是可接受或不恰当最终取决于特定情况以及决策者的价值判断。防护的最优化要在特定的条件下讨论，可能的条件下，应当事先得到监管机构的同意。安全评定为防护最优化提供了一些最重要的输入。

4.37. 处置设施运行期间的防护最优化是处置设施自身、处置前设施和地面操作设计中要考虑的关键因素。考虑的相关因素包括钻孔的间隔、废物堆放操作、在处置前和处置操作中使用远程操作和辐射屏蔽、工作环境控制、降低事故可能性与后果以及辐射区和污染区维护需求最小化。这些问题多数与核设施运行相同，其导则同样适用[29]。

4.38. 需要对关闭后的防护最优化做出判断[18]。不过，判断拟建处置设施是否充分优化还要求能够通过客观标准进行判断。如果满足下列所有条件，那么防护必定是最优化[18]，即：

- (a) 在建设过程中，对各种方案关闭后安全问题都做了考虑，这应当包括第 5.14—5.20 段所有的选址和设计的相关问题；
- (b) 评定得出的剂量和风险在相应约束范围内；
- (c) 任何可能导致超过剂量约束的事件，其发生概率已通过选址和设计得到合理的降低；
- (d) 设计、建造、运行和关闭计划都纳入了管理系统，管理系统保证项目中与安全相关的事项都具有必要的质量水平。

4.39. 在一些情况下，运行和关闭后可能有一些相互竞争的需求。更高标准的包装（如使用全部焊接的容器，或对废物进行处理以抑制气体的产生）可能有利于关闭后的安全，但付出了处置前活动更高职业照射的代价（虽然剂量仍在监管的剂量约束范围内）。营运组织有责任对设施进行优化设计，以便这些相互竞争的需求能达到适当的平衡。

安全设计原则

4.40. 通常，关闭后的安全是通过设计和实施各组成部分协同工作的处置系统，来保证达到要求的防护水平。这给设计人员在利用天然特征和周围环境的屏障能力来进行设施的布局和设置工程屏障上提供了灵活性。同时运行安全也应当得到保证，这要求考虑很多复杂问题，包括处置前操作和处置操作对关闭后性能的影响。

包容

4.41. 参考文献[8]关于包容的要求是期望通过设计工程屏障²，包括废物形状和包装，以及选择天然屏障来实现废物中核素的包容，尤其是在初期，这时废物的活度水平最强，核素衰变能显著降低废物的危害。它使得主要的短寿命核素能就地衰变。与此同时，某些类型的废物货包也会不可避免地排放出一些气态核素和部分易迁移的核素，不过通常这些核素都具有较小的放射性危害。任何情况下，安全评定应当说明，排放所造成的剂量和风险在监管约束的范围内。

4.42. 放射性毒性较高的废物，可能包括一些废弃放射源，可以用封装基材包装置于耐久的容器中。封装基材的作用是通过物理和化学作用来包容废物中的核素，这种包容在几百甚至几千年内都能发挥作用。其他的工程屏障，如钻孔的回填材料，可以使包容期进一步延长，但不能期望对所有的核素实现完全的包容。天然屏障也通过地球化学和物理化学的滞留作用来实现对核素的包容，这可延迟核素在地质圈中的运移。天然屏障类比研究显示，这些过程在很长的时间范围上都能发挥作用。

4.43. 钻孔处置一个明显的特点是其对深度没有限制，其深度范围可以从近地表处置（几米到几十米）到地质处置（几百米）。钻孔处置可以选择适宜的处置地层（因此有适宜的水文地质条件），并预先考虑对核素的包容和与人类的隔离，因此钻孔处置是相对容易的，且具有较高的成本效益。应当认识到，适宜的深度应当是位于中等深度范围内（即 30 米到几百米），在近地表和深地质处置之间。图 2 给出了钻孔处置系统的典型组成部分。

² 屏障是防止或抑制核素迁移，或辐射屏蔽的实体屏障。有两种类型的屏障，工程屏障和天然屏障。这里的屏障是指提供或有助于安全的实物实体。

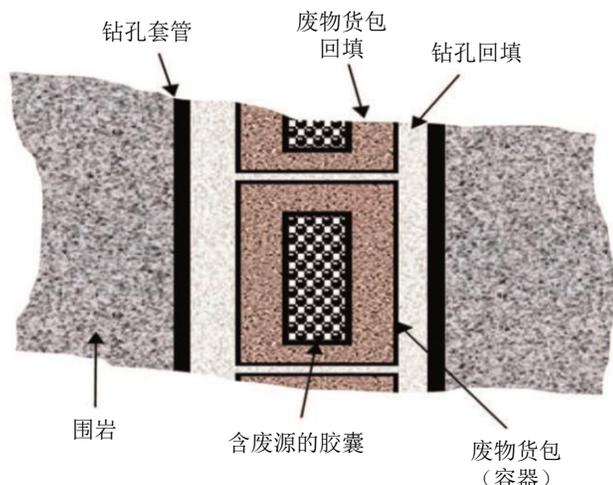


图 2. 钻孔处理系统某些可能组成部分的示意图。

隔离

4.44. 包容主要针对的是废物中的核素，隔离更关注废物本身，隔离要将具有潜在危害的废物，与人类、人类的活动、人类所用的资源和生物圈保持隔离。如果废物中的核素是短寿命的，则参考文献[8]关于包容的要求中提到的“几百年”隔离期是不适用的。在选址时，应当考虑在剥蚀、构造抬升和塌方等作用可能会缩短评定期内废物与地表之间的距离。隔离的一个目的是阻止人员侵入，人员侵入可能影响对废物的后续隔离和对废物中核素的包容。很明显，隔离对安保也是很重要的。由于人员侵入的不可预测性，在设计阶段就要采取措施以降低侵入的概率和后果。例如，如果可能，钻孔处置设施应当远离已知的地下矿产和水资源区。通常，处置在较深的深度可以提升安保水平，并有助于降低人员侵入的概率和后果。

4.45. 在缺乏有组织的控制情况下，30 米可以看作是实现废物隔离所需的最小深度。因此，这应当是处置有安保风险废物（见第 4.52—4.54 段）所需的最小深度。不过，对于适于近地表处置的废物和短寿命核素废物，有可能在 100 年后，这些废物就不再具有潜在危害，可以选择处置在较浅的深度并进行有组织的控制。高强度的、厚重的防侵入屏障也可能有助于隔离。对于小规模钻孔处置设施，可以通过将钻孔布于已有安保基础设施的场址内，如已有的核设施范围内，来减少有组织的控制所需的资源。

4.46. 对于处置于 30 米以下的废物，主要是通过岩石圈来实现隔离，在确定适宜的隔离深度时所考虑的主要因素是地表剥蚀速率、评定的时间范围和永久冻土层的深度。当然，在确定钻孔深度时，隔离不是唯一要考虑的问题，也要考虑周围地质环境对包容的影响。

多重安全功能

4.47. 安全功能是为实现安全必须达到的特定目标，安全功能通过物理或化学质量或是有助于安全的工艺来实现。安全功能的示例包括低地下水通量、不透水性、抗腐蚀性能、核素不溶解性、工程屏障和围岩对核素的吸附、以及处置在低地下水通量的地质层中。对于近地表处置设施（即废物置于地下 30 米以内）可采用行政管理措施（即废物衰变至无显著危害期间的有组织控制）来实现安全功能[9]。

4.48. 为提高对长期安全的信心，处置系统应当采用大量互补的工程屏障和天然屏障。通常，这些在不同时间发挥作用的屏障系统，将实现大量的安全功能。屏障的数量和复杂程度可以变化，主要取决于废物的潜在危害。包括如：

- (a) 由防腐蚀材料制成的废物容器的寿命约 1 千年；
- (b) 容器和钻孔套管之间水泥基材的回填材料能形成高 pH 的环境条件，这能限制溶解、有利于吸附，能形成数千年的化学包容；
- (c) 场址地下水流动的速度和周围岩石对核素的吸附共同保证核素需要几千年时间才能迁移到生物圈。

4.49. 虽然钻孔处置设施的安全最终是通过全系统的性能综合判断，但是各屏障系统间不能过分地相互依赖。如，在上面的示例中，水泥回填材料浸出水所形成的高 pH 环境可延长容器的寿命，低的地下水流速将可以延长回填材料的寿命。不过，如果地下水流速比预计的高，也应当不导致容器的快速腐蚀和容器内容物的排放。类似的，水泥未能提供高 pH 环境也应当不导致容器失效和核素向围岩更快迁移。这些不希望发生的情况可以采取措施进行预防，如使用在预计的 pH 范围内能充分抗腐蚀的容器材料，进行充分的水泥回填以便在地下水流可能的变化范围内都能长期保持高 pH 条件。

4.50. 为了增强安全和对安全的信心，应当采用多重屏障和多重安全功能，以保证处置系统的总体性能不过分依赖单一屏障或功能。应当合理地保证，即使一个屏障不能发挥预期的作用，也还有充分的安全裕度（见参考文献[8]多重安全功能要求）。

4.51. 人工和自然系统的各组成部分需要相适当，反例如：

- (a) 在周围地下水或地质介质中含有较高硫酸盐的条件下，使用普通的波特兰水泥；
- (b) 在高含盐量或地下水中钾含量高的条件下使用膨胀性粘土。

安保

4.52. 《基本安全标准》要求“放射源必须处于安全状态以防止被盗或损坏”（参考文献[7]第 2.34 段）。钻孔处置设施营运组织从接收废物时起就应当承担废物的安保责任。如果责任转移是在废物产生地，那么处置设施营运组织也要负责废物从产生地经过公众区域运输到废物整备或处置场址过程中的安全和安保[30]。在处置场址，应当采取预防措施以防止人员实施未经授权且可能危害安全的行动，或未经授权移动废物[31]。安保程度应当能反映对设施造成破坏的可能性和未经授权移动废物所引起的风险。安保计划至少应当包括在运行期间，防止未经授权人员进入现场的措施。很明显，高活度非使用密封放射源类的废物要比低放废物具有严格的安保措施。应当制定计划并与相关部门建立恰当沟通，以便能及时地得到援助。

4.53. 在近地表处置情况下，可能会要求安保措施持续到关闭后阶段，以防止人员侵入和/或未经授权情况下移动废物。安保措施应当一直持续到放射源不再具有潜在的危害。通常，有潜在安保风险的废物（如放射性物质呈分散状的密封源）不宜近地表处置。

4.54. 对于钻孔处置设施，即使所有的废物都是放置在地表 30 米以下，在整个运行期间也要求有安保措施。在分阶段性处置的情况下，在每个阶段结束时，应当优先考虑密封所有处置有废物的钻孔。后续钻孔的密封（第 5.53 段）和场址关闭（第 5.66 段）旨在提升场址的安保措施。

5. 新钻孔处置设施的安全和处置

处置框架

5.1. 符合参考文献[8]分步建设和评价要求，地质处置设施建设适用的框架是分步方法，它是在在项目的的所有阶段，持续不断地对设计和管理计划、系统性能和总体安全进行评价为支撑的。这是因为设施从一个阶段转入另一个阶段和相关的许可证活动必须通过广泛的调查和评定来获得信心。通常政府法律会对建设框架进行特定的规定。对于小规模处置计划，分步方法可进行较少的调查和评定，附录 II 提供了这样的一个示例。

安全论证文件和安全评定

概述

安全论证文件

5.2. 安全论证文件包括描述、量化和证明放射性废物处置设施安全的论据和证据的总和，以及安全的置信水平。安全论证文件是所有与设施相关的重要决策和批准的重要输入。它为解释为什么设施是安全的提供了论据，也包括安全评定（见下文）和不同论据相关性的分析，以及它们的优缺点。处置后，应当保存安全论证文件中的一些信息，尤其是与关闭后安全相关的信息（见第 5.68—5.73 段关闭后的有组织控制），以有利于后代。这些信息应当明确定义、汇编并保存在适宜的贮存场所（如国家档案馆）。

5.3. 安全论证文件也可能需要涵盖环境影响评定法规中的问题，以及公众接受问题。

5.4. 安全论证文件应当是一个与放射性废物处置设施建设计划平行开展的“动态文件”。无论建设处于哪个阶段，提交给监管评审的安全论证文件都应当涵盖完整的计划（即使还没有完成建设），以便监管机构能恰当地处理许可证申请。这也包括具有显著不确定性的领域和减少不确定性的工作计划。总体目标是要说明完整的计划是可行的并且能按计划完成，并且已经完成的阶段计划具有与阶段相匹配的置信水平。

安全评定

5.5. 无论是哪种类型的放射性废物处置设施，安全评定都是很重要的部分。安全评定可用来检测整体或其中某一部分、某一环节的安全性，如运输、运行和关闭后。分步方法可促进安全评定随着项目的进展而持续改进，在项目的早期通常是通用的（不针对特定场址），以后逐步过渡到特定场址的安全评定。安全评定为相关的决策提供了输入，如概念设计的选择、研究指导、场址选择、场址表征、评定能力发展、资源配置（包括资金）和废物验收标准的制定等。安全评定也能鉴别关键的安全相关过程，有助于对处置设施运行安全和关闭后性能的正确认知。这些认知是安全论证文件中安全论据的基础。

5.6. 关于安全评定的时间和详细程度，营运组织需咨询监管机构。对于小规模钻孔处置设施，由于库存量较小，计算出的剂量远低于剂量约束（即安全裕度大），可能安全评定和相关的调查就相对简单。附录 III 是关于钻孔处置设施安全论证文件和安全评定的详细资料。

一般安全评定

5.7. 一般安全评定（即不针对特定场址）是可用于废物处置项目很多方面的一种工具。如，在概念开发阶段和相对应的场址筛选中，一般安全评定可用于：

- (a) 帮助鉴别适于处置的核素库存量；
- (b) 帮助确定适宜的工程水平；
- (c) 帮助确定适宜的场址特征；
- (d) 帮助确定有组织控制需求及期限。

5.8. 即使已选定了进行详细调查的场址，一般安全评定也有助于：

- (a) 鉴别特定场址评定中需要详细调查的关键参数以及场址表征所需的详细程度；
- (b) 为实施特定场址评定奠定基础，符合良好实践，有助于建立对特定场址评定的信心。

在这些情况下，通过对特定场址的调查以确认场址条件、设计和存量都在一般安全评定的假设和数据的包络范围内即可，而无需开展特定场址的安全评定。

5.9. 一般安全评定一般也可用来检验运行和运输安全（如，见参考文献[32]和[33]），并已编写了用于小直径钻孔处置概念设计一般安全评定的独立报告。本“安全导则”附件就是基于一般安全评定报告。

特定场址的安全评定

5.10. 一旦选择一个或多个场址进行详细调查，（尤其是）关闭后的安全评定就是确定场址表征方案的重要决定性因素。以特定场址的信息替换一般安全论证文件中的通用信息，可建立覆盖所有安全相关方面的特定场址安全评定，其目的是确定在该场址上建造处置设施是否满足监管要求。特定场址的安全评定是该场址安全论证文件的重要组成部分。在已开展了一般安全评定的条件下，通过确认拟建的处置设施所有与安全相关的方面已在一般安全评定中进行了充分的论述，可以简化特定场址的安全评定。

5.11. 当计划在现有的近地表处置设施场址中进行钻孔处置时，要考虑钻孔处置设施安全和近地表处置设施安全的相互影响。最佳的方案是修订已有的安全评定，将钻孔处置设施纳入其中。当拟建的钻孔处置设施和近地表处置设施的废物及处置深度相似时，对安全论证文件进行简单的直接修订是可能的。如拟建的钻孔延伸到较大的深度，对安全论证文件的影响就要复杂的多，因为需要考虑将核素放置在不同地质和/或水文地质层中的后果。

独立的评审和评定

5.12. 钻孔处置设施营运组织应当向监管机构提交安全论证文件和相关的的安全评定供独立评审和评定。评审的主要目的是判断安全论证文件的质量和项目所达到的阶段。本质上，是要求对安全论证文件中的论据、数据和认知水平（及不确定性）进行检验。

5.13. 独立的评审和评定，应当对诸多事项进行判断，是否：

- (a) 遵守安全要求；
- (b) 安全论证文件是足够详细的；
- (c) 数据和信息是足够准确的；

- (d) 安全论证文件证明设计已得到优化,能合理保证满足安全目标和标准;
- (e) 管理系统是充分的(在这方面,已有分别针对处置前[34]和处置活动的导则[35]);
- (f) 建议的记录保存方案是充分的(相关此方面详细的导则见参考文献[35])。

钻孔处置设施的建设

处置设施的设计

处置设施设计的总体考虑

5.14. 安全评定是证明设施优化设计的重要工具。要求的工程屏障包容水平和包容方式,包括废物放置、钻孔密封和关闭的方式,与天然屏障预期的包容性能相关。钻孔处置设施的设计方案取决于很多因素,包括待处置废物的数量和特性、适宜的处置环境、适当的工程技术和材料。

5.15. 废物货包选型和设计,即容器和成分,是项目早期就应当决策的重要问题。这对于处置前和处置都是至关重要的,因其在贮存、运输、处置运行和关闭后对废物进行包容。废物货包的内部屏蔽情况(是否需要遥控装卸)、废物货包的尺寸和重量、提升和装卸方案、耐腐蚀和耐辐照性、以及废物在钻孔中的放置方法等因素对运行的可操作性和安全都有影响(见第 5.39—5.59 段对处置设施运行的讨论)。废物货包的长期性能对处置系统关闭后安全具有重要意义。废物货包的耐久性取决于所用材料的性质、材料与其他工程屏障的相互作用以及所处的地球化学环境。

5.16. 钻孔设施建设的早期,会有多种选址、设计和运行候选方案。选择时应当在合理经济成本之内,寻找可操作性与废物货包容和隔离之间的最佳平衡。也应当采用多重安全功能方法以便设施的安全不过度地依赖单一屏障或单一物理化学特性。应当采用安全评定来检验不同的设计方案,首先,看是否能满足监管约束,其次,有助于达成第 4.36—4.39 段描述的优化。

5.17. 拟处置废物的体积和库存量确定的情况下,营运组织应当设计包含一个或一系列钻孔的设施来处置这些废物。显然,可以通过多种方式来实现在,从多个小体积的钻孔到单一大口径的竖井都可以。虽然优化设计取决于特定的条件,但也有一些共性:

- (a) 在占地面积小，废物置于“居住侵入带”以下时，人员侵入风险将降低；
- (b) 深度的增加通常会增加核素迁移到地表所需的时间，主要的例外情况是，有时更浅的深度能够使废物处置在非饱和带或渗透性很低的岩石中；
- (c) 开挖的费用随深度以近指数的方式增加。

工程屏障的选择

5.18. 工程屏障能有效包容废物中的核素。应当使用耐腐蚀材料使工程屏障的寿命足够长，为安全做出有用的贡献。因此，安全论证文件应当确认废物货包自身的包容期。工程屏障可以包括（如，见图 2）：

- (a) 原始包装（对非使用密封源）；
- (b) 小体积废物（如镭源）焊死的金属（如普通碳钢或不锈钢）封壳；
- (c) 金属的（如普通碳钢或不锈钢）废物容器；
- (d) 封装基材（如水泥浆、膨润土或铅）及其包封的放射性废物（如镭源）形成的废物形状³；
- (e) 废物货包周围的钻孔回填材料（如水泥浆）；
- (f) 钻探或废物放置期间支护钻孔壁的金属或塑料套管，在放置废物后，移除处置区上方的套管是有利的；
- (g) 套管和钻孔之间空隙的充填物；
- (h) 钻孔密封——将几米长的粘土或水泥栓塞置于钻孔中高于处置区的区域（有时需要在处置区域的底部补加栓塞）。

5.19. 如果工程屏障采用多种物理和化学特性来包容核素，则工程屏障的效果及对其的信心是最佳的。因此，如，废物容器的主要作用是实物包容，水泥封装基材可通过降低核素溶解度和增加核素的吸附面积来实现化学包容。选择工程屏障重点要考虑工程屏障与周围地球化学条件的相容性（见第 4.51 段），以及废物潜在危害期内屏障的耐久性和完整性。

³ 废物货包定义为整备的产物，包括废物形状、容器和内部屏障（如吸附材料和衬衬），废物货包要按照搬运、运输、贮存、和/或处置的要求进行准备。这也包括外部容器，若有，还包括填充容器间空隙的包装基材。废物货包是废物及其包装的统称。

选址

5.20. 确定钻孔处置场址的位置，需要考虑科学、技术、社会经济和计划方面的因素。在选址过程中，位于已有的核设施、废物管理设施或属于政府的设施范围内的场址可以作为备选场址，有时这类场址因土地所有权、运输需求以及现有的有组织控制而被看重。良好计划的、系统的方法对选址过程是有益的，可以为相关方提供参与的机会。在选址过程中，首要考虑的是满足安全目标，本小节的其余内容重点关注这一方面。

5.21. 原子能机构的两个出版物[36、37]给出了放射性废物处置设施选址的通用导则。不过，钻孔概念要求对这些导则进行一些解释，原因主要是它们涵盖了广泛的可能性。

场址特征

5.22. 参考文献[9]规定，在讨论近地表处置设施场址适宜性时，至少要考虑下列因素：地质、水文地质、地球化学、地质构造和地震、地表过程、气象、气候和人为活动的影响。虽然，上述规定是针对近地表处置设施的，但对于中等深度钻孔，上述方面的调查也可用于评价：

- (a) 可能引起的地下水源污染；
- (b) 地表过程如洪水、侵蚀、塌方或风化对处置系统隔离废物能力的影响；
- (c) 断裂、地震活动或火山等事件对处置库隔离能力的破坏程度；
- (d) 可预见的人类活动对处置库隔离能力的破坏程度，这需要考虑土地所有权、资源和场址及其附近区域的发展潜力；
- (e) 周围地球化学环境可能对工程屏障寿命的削弱程度；
- (f) 地质条件所能提供的物理和化学稳定性程度；
- (g) 地质、水文地质和地球化学条件对核素从场址向可接近环境迁移的限制程度；
- (h) 废物货包和开挖器具进入场址的路线，场址可能需要的水、电等服务。

初始选址的方法

5.23. 任何情况下，在任何情况下，应当重点寻求最可靠的方案以实现安全，并寻找地质条件和地表环境简单或明了的场址。其目的是利用上述特征来降低建设处置设施的难度。

5.24. 典型地，这些信息可以包括已有的地质、地形和水文地质测绘数据、气候记录和环境调查数据。在许多区域，可能缺乏详细的国家调查和测绘数据，这更要将重点放在寻找地质简单、稳定的区域。在已有的近地表处置场中，许多这样的信息是容易获得的。关于场址特征的进一步讨论见附录 IV。

场址表征

表征活动

5.25. 正如参考文献[8]场址表征要求部分所描述的，场址表征的总体目标是建立对场址区域背景、过去的演变和在评定时间范围内（见 3.9 段）可能的自然演变等方面的综合认知。例如，这包括第 5.22 段所列的场址表征。本小节针对的是场址表征的重要方面，应当进行这些方面的调查以获得设计和安全评定所需的数据。这些方面最少要包括地质、水文地质、地球化学、构造和地震、地表过程、气象、气候和人为活动的影响[9]。对于大型的近地表和地质处置设施，这些表征所需开展的工作是相当多的，而如果是相对简单的场址且是小规模的钻孔处置，则正如下所解释的，调查工作不宜过于繁多。

5.26. 在选址过程中，一旦选定了预选区域或场址，下一步的工作就将涉及到野外作业，尤其是通过各种地表测绘来确认地质结构和处置区下游的水文地质。通常，要通过测绘和已有的数据来建立初始的地质、水文地质和水文模式，并用来鉴别处置目标区。所需的信息量取决于场址的复杂程度和关闭后安全评定的安全裕度。任何可能的情况下，都应当查阅区域长期的气象记录来给出将来可能的气象条件范围。这些数据可用来估算场址对极端气象条件的敏感性，也可用于估算场址自身的地下水补给。

5.27. 地表测绘后，通常至少要在预选区域完成一个初始调查钻孔。钻孔应当设计为取岩心，并能给出向下（如果可能）直到基岩的地质序列。应当对岩石样品进行表征和保存，其余如果必要，可用于评价岩石对核素的滞留特性（吸附，岩石基质扩散）。调查性钻孔也应当可取水样，理想的是能用流量计测量，和进行标准的地球物理测井。

5.28. 对于中等深度处置设施钻孔，应当监控调查性钻孔井壁岩石的破碎情况，因为破碎会妨碍设施的运行，可能要求使用套管。出于这样的考虑，测量岩石应力可能是有益的。

5.29. 通常，钻探一个或多个调查性钻孔有三个主要目的：

- (1) 收集充分的水文地质数据以便建立通过处置区和周围岩石的地下水流动模式；
- (2) 确定工程屏障系统和周围环境的化学反应性质（尤其是两者间的不利反应）；
- (3) 收集设施建造可行性方面的数据，如是否需要钻孔套管。

5.30. 通常用于场址表征的钻孔在使用后应当予以密封。如果适宜，也可以作为设施的一部分用于处置废物。

5.31. 场址表征也应当包括对场址以及设施地下水排泄区的生物圈表征。应当收集的信息包括土地使用、当地居民的生活习性（尤其是食物消耗）和饮用水源。当前的生物圈特性有助于确定关闭后评定所用生物圈模式的背景。同样，食物消耗数据可能是确定关键群组和剂量估算所要求的（见参考文献[17]）。

5.32. 在关闭后安全评定中，核素在地下水中的输运（地下水途径）通常是废物中核素迁移的主导机制。因此，地下水流动很慢的非饱和场址（即岩石渗透率很低的场址）应当是有利的，在其他因素相同的条件下，一般更容易证明地下水流较慢的非饱和场址符合剂量约束或风险约束。因此，通常，饱和渗透性岩石场址的表征要比同类非饱和或低渗透性岩石场址的工作量大。附录 IV 第 IV.21—IV.26 段对此做了更为深入的讨论。

钻孔处置设施的建造

5.33. 颁发许可证后方可钻孔。这要求监管机构评审、评定和批准拟建造设施在运行期和关闭后的辐射安全影响。例如，监管机构应当判断，拟采取的建造方法是否满足钻孔尺寸、钻孔准直、套管的长度、套管注浆能力等方面的设计。此外，监管机构也应当判断安全论证文件是否充分解释和论证了非正常情况下拟采取措施的正当性，如钻头遗失、过量的水侵入、或未预料到的钻孔壁破坏等。安全论证文件应当描述如何对“失效”的钻孔进行密封（即钻孔被证明不适宜废物处置）。

5.34. 钻孔处置设施的建造是简单的还是复杂的主要取决于岩石条件、钻孔直径和深度。很明显，设施的建造既应当体现核准的设计，也应当保留

关闭后地质屏障的安全功能（见参考文献[8]地质处置设施建造要求）。这在建造简单的情况下最有可能实现（即岩石条件与钻孔尺寸的要求相适应）。

5.35. 建造应当辅以实验、调试和视察计划（可能包括监管机构的视察）。其目的是证明设施的建造符合设计和相关技术规范，建造过程中所揭示的特性与场址表征的结论是一致的。这可能要求采集并保留岩石和地下水样品。

5.36. 钻孔建造应当由适当资质的且有经验的人员按照已批准的书面程序来实施[35]。这些程序应当在常规建造安全评定的基础上，结合已有的实践经验予以更新。钻孔建造记录应当完整地描述建造历史，包括何时建造、谁建造、如何建造、深度和直径、所遇到的地层以及任何不符合建造程序的事项。

5.37. 在已经建造好的钻孔开始堆放废物后，还可能建造新的钻孔。应当很好地计划和执行这种交叉的建造和运行活动，以保证运行和关闭后安全符合规定的许可证条件。

5.38. 当钻孔穿过不同的水文地质构造时，钻探活动应当避免不必要的扰动。如，废物处置区应当避开含水层，如果为了到达废物处置区可能必须穿过含水层，这时需要用钻孔套管将废物和含水层中的水隔离开，以免在不同地层间形成穿透路径。不同钻孔的岩石和水文地质条件是不同的，因此地下工程技术和方案要有足够的灵活性，以决定修复有轻微问题的钻孔或直接封闭钻孔，不放置废物。可能有多种因素会导致形成不合格的钻孔，需要制定涵盖这些偶然事件的应急计划。

处置设施的运行

概述

5.39. 钻孔处置设施运行阶段包括调试活动、废物接收、废物放置、钻孔回填、钻孔密封、场址退役和关闭（第 5.66 段和第 5.67 段对最后的两项活动进行了讨论）。此外，还会有多项工程任务，包括已整备废物的临时贮存。当然，只有颁发许可证后，钻孔处置设施方可开始运行。这就要求监管机构评审和批准运行安全的相关事项，以满足：(i) 设计和管理程序考虑了设施运行对操作人员和公众的安全影响；(ii) 运行能实现安全论证文件中的安全功能（见参考文献[8]处置设施运行安全要求）。运行安全论证文件应当包括辐射防护政策，它描述正常工况下如何控制对工作人员和公众成员的放

射性危害，以及意外条件下（如应急）计划采取的措施。安全论证文件也要描述设施将如何调试和运行。只有符合验收标准的废物可以被接收和处置，下文会对此问题进行详细讨论。

辐射防护计划

5.40. 国际上已经制定了关于运行期辐射防护工程和实践方法的导则[14、15、38]。辐射防护计划（《基本安全标准》[7]称为辐射防护政策）是防护的一个重要组成部分，它应当是一个涉及下列事项的书面文件，并具有相应的详细程度：

- (a) 指定不同管理层级在职业辐射防护和安全方面的责任，如果适用的话，包括相应的组织机构，雇员以及注册人或许可证持有人的职责；
- (b) 控制区和监督区的划分；
- (c) 工作人员应当遵守的内部程序和工作视察；
- (d) 工作人员和场所的监控计划，包括辐射防护仪器仪表的配置和维护；
- (e) 照射控制、职业辐射防护和安全措施的决策以及个人监控相关信息的记录和报告制度；
- (f) 相关危害性质、防护和安全的教育与培训计划；
- (g) 计划的周期性评审和监查方法；
- (h) 干预情况下（如事故、应急或发现未预计到的持续照射）的实施计划；
- (i) 健康监视计划；
- (j) 质量管理和程序改进的要求。

5.41. 辐射防护计划是运行安全论证文件的重要部分，本身需要监管批准。将计划转化为行动要求有相应资质且有经验的人员。

人员的招聘和培训

5.42. 开始运行前，营运组织应当确定组织机构中的人员需求，包括数量、职责和技能，然后招聘并将其培训为合格的人员。培训计划应当鉴别对安全有显著意义的活动并针对这些活动提供必要的知识和实践经验，也应当培养安全文化。培训应当使运行人员对处置库的设计特点有充分的认知，因为其对安全有着明显的作用。应当根据经验对培训计划进行升版，必要时对人员进行复训。

5.43. 运行辐射防护、远程操作、废物包装、废物运输、钻孔建造和关闭、以及安全评定可能需要专业技术。

调试

5.44. 应当对运行技术进行试验和确认，尤其是钻孔的工程屏障和废物货包堆放技术。这可通过冷试验和随后的现场调试试验进行。

5.45. 对于较深的、直径较小的钻孔，进入和回取废物货包是比较困难的，应当考虑并保证：

- (a) 废物货包跌落的概率是极小的；
- (b) 废物货包在设施中能正确地定位；
- (c) 废物货包能恰当地回填。

书面程序

5.46. 营运组织应当编写一系列的程序，（主要）包含在运行和关闭后安全评定基础上所确定的限值、控制和条件，以保证设施能安全地运行并符合许可证条件和国家的规定。这些程序应当反映对下述事项的考虑：

- (a) 正常运行和事故工况下，职业照射人员和公众成员的防护标准；
- (b) 安全评定中限定性假设。

5.47. 为保证制定的控制能实现，限值和条件可测量，需以书面程序或说明书的方式详细说明运行的安全影响[8、35]；营运组织也要负责让工作人员认真地遵守这些程序或说明。运行程序源于运行技术规范，也就是基于运行安全评定。总体目标是通过安全评定和安全论证文件全面涵盖运行期间的所有工作，且这些工作都能得到正确实施，达到设计的运行目标，以实现安全。通过视察、监查和记录等方式来证明实现了这些目标（见下文）。同时应当关注设备或运行程序变更的安全问题。应当采用正式的变更控制程序（见第 4.11 段）。

5.48. 营运组织也应当建立针对下列事件的处理程序，(i) 应急或非常规事件（如废物货包卡在钻孔中）；和 (ii) 接收的废物不符合废物验收标准。程序应当说明何时向监管机构提交报告。

堆放策略

5.49. 钻孔处置设施的运行可以采取连续或集中，或者二者结合的方式来实施。对于连续运行，废物货包一产生就放置在钻孔处置设施中，因此营运组织可能需要对场址实行几年的运行控制。集中运行等待暂存废物积累至足够填满一个新钻孔，这使得运行期较短，在此期间完成单一钻孔的钻探、回填、密封等完整的全过程操作，因此减少了处置期间钻孔受损或管理不善的可能。如果废物货包是抗风化的，那么可以贮存在安全的、有进入控制的露天场址中。对容量很大的钻孔，连续运行可能是最合适的，同时也需要有大容量的贮存设施。这种情况下，应当阻止雨水和地表水进入钻孔，在运行间隙期应当配置安全盖。

5.50. 有时不同类型的废物需处置在一个设施中，建议高活度、长寿命核素的废物货包放置在钻孔底部，低活度、短寿命核素的废物货包放置在钻孔的顶部。这能提高关闭后的安全，限制人员侵入的后果。不过，这样的放置策略在实践中可能是难以实现的，因为它要求较长的贮存时间，更复杂的现场贮存设施，很好地确定单一废物货包的位置，这也可能对运行人员造成更高的剂量。总之，对设施设计人员而言，要优先选择简单、稳健、且任何废物货包能以任意顺序放入任一钻孔的方案。当然，应当认识到，这通常是不大可能的，尤其是当废物放置层接近地表或是需处置大量高强度放射源时。

钻孔回填

5.51. 废物放置后，通常要对钻孔进行回填。回填可能使用的材料包括水泥、膨润土浆、膨润土颗粒的松散回填料、砂等等。需设计并说明减少回填可能留下空隙的措施，这可能包括分阶段回填。

5.52. 对于较深的钻孔，放置一些废物货包后就要进行回填。这种情况下，如果钻孔没有套管（或是只有部分部位有套管），可能需要采用压力注浆来进行回填。如果钻孔全部下套管并且底部密封时，必须依靠重力回填（虽然可通过抽气进行辅助）。

钻孔密封

5.53. 废物放置和回填后，营运组织应当按照许可证和安全论证文件所规定的方法密封钻孔。这些活动，将形成钻孔的最终结构并保持关闭后所需的安全功

能（见参考文献[8]地质处置设施关闭安全要求），监管机构可能要对此进行视察。可以对单一钻孔进行密封或关闭，或是在集中处置结束时成批地关闭。如果废物放置一段时期后还不能密封，那么在安全论证文件中就要考虑其对运行和关闭后安全的影响。类似地，也需要考虑非预期延期密封带来的问题。

5.54. 对于中等深度的小直径钻孔，密封要求对处置区以上部分采用低渗透性的材料进行充填，以阻止浅层地下水渗入，或防止废物中的空隙水从处置区向上输运。钻孔水泥灌浆密封的标准方法可能适用，这种精准技术取决于钻孔尺寸，是否套管以及地质条件。对于没有套管的情况，至少应当对围岩层进行密封。一般来说，移除处置区上方的套管是有利的，因为这样就可使注浆与其相邻的岩石形成一个整体，排除通过受损的套管或注浆与套管粘合的薄弱环节渗漏到地表的可能性。

视察和评审

5.55. 应当采用已得到认可的技术和管理原则以实现安全运行[35]。因此，运行许可证可能要求营运组织对一些问题进行定期评审，如质量保证监查、运行工况、环境取样和分析、职业健康和安全、记录维护等。这些评审结果应当提交监管机构。

5.56. 监管机构也应当进行独立监查、视察和评审，以满意采用了适宜的技术和管理原则。当发现未采用时，应当要求采取纠正措施并再次进行视察。

记录

5.57. 按照监管机构规定记录相关信息是重要的运行要求。特定到废物，营运组织会从废物产生单位得到很多信息，并将成为国家废物库存量的一部分。每个废物货包应当有一个唯一的识别码。对于一个废物货包，应当根据其来编写信息（如废物来源、核素成分、封装方法、废物容器材料、密封方法）。

5.58. 运行记录应当描述何时、如何操作以及谁实施了操作，尤其是要记录不符合运行程序的操作。如，放置废物时，应当记录废物货包的位置（如钻孔的编号和位置，以及在钻孔中的位置）。类似地，也应当记录回填和密封等过程。

5.59. 应当考虑记录的方式，以保证需要时信息的可获得性并且无中断或缺失。这些信息对后代是有益的，是安全相关信息档案的组成部分（见始于第5.68段的关闭后有组织的控制部分）。记录维护和保存的详细信息见参考文献[35]。

废物验收标准

5.60. 营运组织实施限值、控制和条件的一个关键内容是废物验收标准。不能接收不符合废物验收标准的废物，这是为了保证废物货包符合安全论证文件的假设条件，尤其是运输、处置前操作、运行和关闭安全评定中的评定条件。虽然有时监管机构可以指定标准，但通常，废物验收标准是由营运组织编写，并经监管机构核准。因此，废物验收标准通常通过施加一系列的技术和管理控制来保证废物货包符合废物管理各阶段的要求。废物验收标准是设施设计的安全相关组成部分，因此应当执行变更控制程序，接受内部安全评审和监管机构的视察。

5.61. 在设施建设的早期阶段，安全论证文件中的一些细节（如场址）还无法确定，至少可以从原则上讲，在这一阶段确定废物验收标准是很困难的。不过实践中这几乎不是难题，因为一些原子能机构成员国已在缺乏处置场址的情况下整备和包装了废物。因为多数的废物处置概念是针对拟处置废物库存量设计的，可能从一开始就知道有多种废物，并且一些废物已经进行了包装。这样可防止废物验收标准的范围过窄。因此，如果需处置废物的范围比较清楚，那么即使是在项目的早期阶段，也可以制定较宽范围并具有充分灵活性的废物处置标准。不过，需密切关注在执行废物验收标准和相关质量管理要求之前就已完成整备和包装的废物。对于少量无法接收的废物货包，一种可能的方案是重新包装。

5.62. 废物验收标准通常要求：

- (a) 仅限于固体形状的废物；
- (b) 核素成分、可裂变成分、总活度和废物货包表面放射性水平的限值，以及在单一钻孔和整个处置设施中的限值；
- (c) 废物形状要有稳定的化学和物理特性（如不含易腐烂材料）；
- (d) 允许和不允许的封装材料；
- (e) 气体排放率限值；

- (f) 废物货包重量和尺寸的限值；
- (g) 废物容器的技术要求（如可接受的材料、尺寸、焊接试验）；
- (h) 废物表征、包装、装卸和贮存的管理系统。

5.63. 存在废物验收标准就意味着要对废物进行表征，这通常是废物产生单位的责任，废物产生单位要以营运组织提供的、已得到监管机构批准的导则为基础进行废物表征。证明废物符合验收标准也可要求对废物的行为进行模拟和/或试验。典型地，通过实验室模拟来试验处置条件下废物货包的物理和化学稳定性。类似的，也可通过试验检验废物货包在事故工况或非正常工况下的性能。对于已充分了解的材料，如“316 不锈钢”和“普通的波特兰水泥”，绝大多数的相关信息是已有的。通常应当由废物产生单位证明符合废物验收标准并将相关的信息提交给营运组织。

5.64. 对不符合验收标准的废物，应当编写处理措施程序。采取的行动主要取决于不符合的严重程度，可以从通知废物包装单位现场补救，直至强制关停废物货包生产线。对于明显的不符合项，应当通知监管机构。

5.65. 如果没有采取附加的实体屏障或管控措施来防止或减少侵入的可能性，和/或缓解后果，那么核素活度水平达到 I、II 类的密封源（尤其是半衰期较长的核素，如铯-90、铯-137、钷-238 和镅-241[39]）应当不在近地表钻孔中处置，应当考虑中等深度处置。

厂房的退役和处置设施的关闭

5.66. 所有的钻孔回填和密封后应当关闭场址。监管机构批准退役和场址关闭（被看作是运行活动），要求提交更新的安全论证文件，更新的文件需采用能证明符合关闭后性能要求的现有数据。安全论证文件也应当包括退役和关闭的详细计划。这些计划应当描述退役活动（如场址调查、去污和移除不必要的厂房和设备、场址恢复、证实符合解控标准的终态调查、文件移交），并证实关闭活动不破坏设施关闭后的性能。原子能机构的一份技术报告[40]讨论了小型设施的退役。

5.67. 关闭计划也应当描述关闭后有组织的控制阶段的工作安排。这些安排应当包括档案和记录保存制度。尤其是对在地表 30 米范围以内的设施，关闭计划也包括控制进入场址、维护场址安保、视察计划和辐射监控计划。关闭计划应当明确各种情况下每项活动的组织责任。场址的所有权应当明

晰合理地划拨。关闭操作圆满完成后，就可进入关闭后有组织的控制期。可以要求也可以不要求单独的监管批准，这取决于监管框架系统和许可证条件。

关闭后有组织的控制

5.68. 有组织的控制定义为任何形式的有组织活动，从国际机构和政府的视察到诸如环境监控等很具体的活动。通常期望有组织的控制有助于社会对处置的接受。有组织的控制通常分为“能动”和“非能动”控制。能动有组织的控制包括：

- (a) 维护场址的标识、围栏、警卫，防止未批准的人员进入和动物侵入；
- (b) 维护出入通道、维护地面和杂草控制，等；
- (c) 监控和视察（见第 5.74—5.80 段）；
- (d) 执行任何可能必要的补救工作，如按照监控和视察计划需要进行的补救工作。

非能动有组织的控制包括：

- (a) 长期标识；
- (b) 限制土地使用和所有权；
- (c) 记录保存；
- (d) 财务保证。

5.69. 无论机构控制的期限是法律规定的还是按批准的关闭计划以“一事一议”方式确定的，在场址的关闭计划中都应当说明（见参考文献[8]关闭后和机构控制的要求）并判断未来的潜在的危害（如废物中核素的放射性衰变、人员侵入假想方案、或信息记载的历史经验）。有组织的控制期，通常是在 100—300 年的量级，往往是与核电计划相关的许多近地表处置设施安全概念的组成部分。场址关闭计划，包括任何新建议的机构控制期，在实施前，都应当要求得到监管机构的评审和批准。

5.70. 关闭后的工作计划应当予以文档化，并确定在机构控制期内计划安排的机构控制，负责人以及每项控制的持续时间。提前解除机构控制需预先得到监管机构的批准。

5.71. 总体上，就地表遗留的痕迹、废物距地表的距离和需处置的废物量而言，小规模中等深度钻孔处置设施的危害较低。由于设施的安全不依赖于有组织的控制，因此可能适合进行短期有组织的控制，如此土地所有权很快就可归还当地使用，所有权和使用的限制可能只有几年时间。

需归档的信息

5.72. 非能动有组织的控制有助于社会各界保持设施位置和特征方面的了解，对于钻孔处置设施，应当保存的信息主要有：

- (a) 精确的位置；
- (b) 场址表征所获得的地质、地球化学和水文学数据（见第 5.25—5.32 段）；
- (c) 设施的详细设计，例如对回填、下套管和密封的描述（见第 5.18 段、第 5.19 段、第 5.51—5.54 段）；
- (d) 废物货包的详细描述，包括废物来源、核素成分、封装基材和容器（见第 4.22—4.24 段、第 5.18 段、第 5.19 段）；
- (e) 建造和运行的详细描述，内容包括日期和详情，例如测量地下水对特别是任何的不符合项和所采取的纠正行动（见第 5.33—5.59 段）；
- (f) 设施的安全论证文件（附录 III）及支持性信息（如场址表征的信息，见第 5.25—5.32 段）；
- (g) 关闭后工作安排的描述（见第 5.68 段）；
- (h) 监视和监控计划的结果，包括本底调查（见 5.74—5.80 段）。

5.73. 这样的信息保留的时间应当尽可能长，以便后代以此为基础对场址的使用进行决策。采用国家档案可能是最容易实现的。场址的长期标识可能是有益，尽管需要考虑安保问题。

监视和监控计划

5.74. 监视和监控计划是安全论证文件的组成部分，应当在处置设施运行前启动，通常是在场址表征计划中启动。随着处置计划从一个阶段进入到下一个阶段，监视和监控的目标也会随之发生变化，视察和监护活动也随之增加[41]。一些活动可能一直持续到组织的控制期。在设施建设的各个阶段，应当设定监视和监控计划的目标，通过试验假设和符合性证明，有

益于构建对安全论证文件的信心。如，参考文献[1]列出的关闭后监视和监控计划的目标如下：

- (a) 证明设施符合监管机构为保护人类健康和环境；
- (b) 尽可能地确认安全评定中的相关假设；
- (c) 发现任何包容失效导致核素非预计排放的迹象；
- (d) 为废物处置设施附近相关居民提供保证。

5.75. 设施监视和监控计划的一个重要原则是计划的设计和 implement 不降低关闭后的总体安全水平（见参考文献[8]监控计划要求）。监视和监控也应当不至于复杂以致给营运组织造成不恰当负担。尤其是对于小规模处置设施，计划安排应当是相对简单的。附录 V 提供了这样的示例。

5.76. 作为场址表征的一部分，应当建立环境水平、放射性水平和放射性浓度水平的本底值，以便将来确定放置废物后引起的变化（如果有的话）。这些数据可能包括地表辐射数据，如 γ 辐射场、空气粉尘中的核素成分、场址及其周围土壤、水和空气中的核素成分（包括氡）。这些数据及其当前对人类的影响能用于识别核素的转移途径，尤其是在设施附近地下水排泄区的转移途径。监控也应当覆盖广泛的环境信息，如当地的生态、化学污染物、人口密度和习性、可能影响核素转移途径的当地农业、自然和人为环境特点[41]。

5.77. 处置前监视和监控的结果将有助于构建对安全和钻孔处置设施关闭后性能的信心，也有助于设施未来发展的决策。监控计划对构建关闭后安全评定的岩石圈和生物圈模式也可能是有用的。

5.78. 对小于 30 米的钻孔处置设施应当进行与近地表处置设施相类似的监视和监控[42]。对于饱和环境下的中等深度钻孔设施，如果预计遥远的未来会发生核素排放，可通过附近含水层来监控核素的潜在排放。如果采用钻孔监控，那么使用后应当进行密封。

5.79. 如果必要，监管机构应当发布制定监视和监控计划的导则，用于：(i) 说明符合监管约束和其他许可证条件；(ii) 监控核素向环境的任何迁移；(iii) 评定建造、运行、关闭和关闭后的环境影响。营运组织要正确地执行这些计划并采取必要的措施来保证符合国家部门的要求。监管机构应当：

- (a) 核实营运组织提交的监视和监控数据；

- (b) 定期评审监视和监控工作，包括应急监控工作；
- (c) 监查管理系统；
- (d) 提供满足公众要求的证据，以证明没有未授权的放射源。

5.80. 此外，监管机构也可单独实施监视和监控计划。

核材料衡算和控制系统

5.81. 已经研制了核材料衡算和控制系统对核材料进行计量，以便及时地发现短、中期未经批准或不明目的核材料转移。正如当前所做的，核材料衡算和控制系统依赖于能动的视察和控制。参考文献[8]第 3.79—3.81 段对此进行的讨论，对于放射性废物，尤其是含裂变核素的，如乏燃料，明确了要继续执行已确定的核材料衡算和控制要求，即便这些乏燃料已密封于地质处置系统中。其他（非裂变）材料可能的恶意使用不在核材料衡算和控制系统的范围内。

5.82. 钻孔处置主要是用来处置小体积的废物（如非使用密封源），尤其是在没有建立核燃料循环高水平放射性废物完整管理系统的国家。这样的废物可能具有潜在的安保风险，但因为其低裂变性不在核材料衡算和控制系统的范围内。

管理系统

5.83. 虽然管理系统适用于任何组织，但是在放射性废物管理方面，最重要的是适用于营运组织。附录 VI 对此进行深入讨论。

6. 已有钻孔处置设施实施的安全策略

6.1. 标准、程序和实践都随着时间而改变，因此一些较老的钻孔处置设施可能与本“安全导则”提出的安全指导原则不一致。特别是，一些较老的钻孔处置设施的人员侵入假想方案可能导致超过 10 毫希沃特/年剂量，在干预情况下，此水平应当考虑纠正行动。侵入一些设施甚至可能导致超过 100 毫希沃特/年剂量，100 毫希沃特/年是通用的参考水平，高于此剂量，干预几乎总是适宜的。本小节从监管角度审视了过去的钻孔处置实践，这与《乏燃料管理安全与放射性废物管理安全联合公约》[1]提到的要求缔约方报告过去的实践和可能需要的干预是密切联系的。此外，对已关闭的设施和运行设施进行定期安全评定属于良好实践。

6.2. 对现有的废物处置设施进行安全评定的目的是：

- (a) 首先，评定设施是否依照《基本安全原则》[13]和《基本安全标准》[7]要求，为后代提供了可靠的辐射防护；
- (b) 其次，如果不满足相应的标准，确定对设施进行干预，回取废物或采取其他的纠正行动是否恰当。

6.3. 在一些情况下，直接应用这些导则可能会建议进行一些纠正行动或者是从处置设施回取废物。不过，应当强调的是，对未来照射剂量不能简单地应用导则。干预应当建立在充分论证和最优化的基础上[8]。简单地说，任何纠正行动都应当利大于弊。

6.4. 在钻孔处置的情况下，意味着负责决策的国家机构应当权衡未来对公众可能造成的风险以及当前对工作人员的风险。如果该方法应当用于已有的钻孔处置设施，有可能会选择下面的一种方案。

方案 1：进行附加的场址研究并采取正当的纠正行动

6.5. 对现有的处置设施，最简单的纠正行动是有组织的控制（如，限制进入），并只在有组织的控制持续的时期内有效。这些控制可以辅以其他措施，如防侵入屏障。如果废物中的放射性核素大部分是短寿命的，这些方法通常是足够的。不过，如果放射性核素是长寿命的（特别是会有明显的增加时），则这样的纠正行动不会改变设施所致剂量的长期预测。

6.6. 一种稍微不同的方法是通过场址表征和数据收集来解决安全评定中的问题，期望通过采用新数据来降低安全评定的保守性，使预测剂量在可接受的范围内。不过，降低保守性通常会增加模式和所需数据的复杂性。虽然如此，但这仍然可能是最经济的方法。

方案 2：回取废物

6.7. 在评价此方案的适用性时，应当考虑几个问题。首先，应当考虑剂量的最优化。这意味着应当考虑回取废物对工作人员的剂量，对剂量进行最优化评定，并应当与将废物留在原处可能所致的剂量进行比较。虽然一些成员国已经或者正计划从某些设施回取废物，但对此类工作最优化的方法没有一致意见。此外，如果回取废物，最终也需处置到某个地方。新的处置将不可避免地导致潜在照射，在最优化评定中也应当考虑。最后，如果回取废物，相关活动必须遵照《基本安全标准》[7]要求安全地实施。

方案 3：接受现有状况可能造成的风险

6.8. 如果纠正行动或废物回取的风险和成本超过了可能带来的利益，那么可能会考虑维持现状。这种情况下，将接受现有状况的风险，即使预期的剂量超过适用于相同类型新设施的剂量约束。只有在对备选方案进行细致评定的基础上才可以做出这样的决策。虽然不启动纠正行动，但要加强对当地土地使用的有组织的控制以使将来受照的可能性降到最低。

6.9. 最后，执行干预的决定应当由监管机构签署，应当考虑下列方面：

- (a) 只有在明确了随后的废物管理步骤，并对后果进行评价后，才考虑实施干预；
- (b) 应当调查成员国（或者一个区域内）所有可能需干预的场址，并建立优先次序；
- (c) 应当考虑证明符合附加的监管要求或者不同领域（如运输、环境、核、辐射和废物安全）的监管要求。

附录 I

钻孔处置设施监管机构视察计划：可能需要视察的事项

I.1. 营运组织的组织机构：

- (a) 机构的综合管理；
- (b) 合理配置负责的专家（辐射防护、安保、废物接收等方面）；
- (c) 工作描述；
- (d) 向相关监管机构报告的机制。

I.2. 运行程序

- (a) 已接收废物的表征和控制；
- (b) 辐射防护计划；
- (c) 环境监控计划；
- (d) 个人监控计划；
- (e) 人员培训和资格评定计划和程序；
- (f) 应急计划（场内和场外）；
- (g) 现场搬运程序；
- (h) 废物现场贮存程序；
- (i) 不符合安全要求、废物接收标准、其他限值、控制和条件的废物管理程序；
- (j) 内部监查和视察；
- (k) 报告或通知主管部门；
- (l) 质量管理计划。

I.3. 设施的真实状态：

- (a) 设施设计和废物货包符合获批的安全论证文件；
- (b) 安保和进入设施的控制（进入场址的人员登记）；
- (c) 个人监控设备；

- (d) 环境监控设备；
- (e) 运行程序的应用；
- (f) 场址已接收废物的登记；
- (g) 定期的个人监控记录；
- (h) 已处置废物的登记；
- (i) 定期的场内和场外环境监控记录；
- (j) 场内（以及场外适当场所）应急计划的演练；
- (k) 运行经验反馈的记录和评价。

I.4. 遵守许可证条件：

- (a) 在安全论证文件的基础上控制废物验收标准，以及限值、控制和条件；
- (b) 控制满足获得批准所需的附加条件；
- (c) 变更控制程序。

I.5. 完成以前视察提出的整改和建议。

附录 II

分步实施方法

II.1. 鉴于较低水平危害的废物可能会在小尺度的钻孔处置设施内处置，采用分步方法建设钻孔处置设施可能相对简单。虽然如此，仍需要建立一个框架，在此框架内，对可行性和安全性的信心随着建设进展而逐步增加。将建设项目和申请许可证的过程分解为一系列步骤，并在关键决策点上允许相关各方参与，以此实现上述目标。

II.2. 例如，小尺度钻孔处置设施的框架系统可由两个步骤组成，存在两个决策点，都需要进行公众咨询。

决策 1：将钻孔处置作为优选方案，并且建立必要的法律和监管框架。许可证将允许开展步骤 1，处置前活动，包括：

- (a) 明确需处置的废物库存量；
- (b) 形成概念设计；
- (c) 一般安全评定；
- (d) 废物整备和包装；
- (e) 按照预先确定的标准和程序进行场址选择；
- (f) 最优选场址的表征；
- (g) 开发特定场址设计与安全评定；
- (h) 推荐最优选的场址。

决策 2：将批准最优选的场址和特定场址的设计与安全评定。许可证将允许开始步骤 2，废物处置和关闭，包括：

- (a) 钻孔建造；
- (b) 废物放置；
- (c) 钻孔密封；
- (d) 处置设施的关闭和退役；
- (e) 开始关闭后有组织的控制。

II.3. 大型的放射性废物钻孔处置项目通常需要其他步骤。例如，对于场址选择，逐步的协商方法可能更合适。另一个考虑是，大型的处置项目可能要求处置场址运行几十年。这种情况下，批准场址但要求每个新的钻孔分别获得许可证可能是适当的。这将使安全论证文件能够按照新数据进行更新，并进行监管评审。最后，对于几十年的运行期，将退役、关闭和关闭后机构控制分为独立的步骤并要求单一许可证更方便。

II.4. 参考文献[3]给出了更详细的钻孔处置行动计划建议。

附录 III

钻孔处置设施的安全论证文件和安全评定

安全论证文件和安全评定的编写准备

III.1. 在设施建设过程的早期，应当编写第一份安全论证文件，如果还没有确定场址，安全论证文件是一般性的。早期的一项重要任务是确定预计要处置的废物库存量，因为这将决定项目的总体规模，包括运输和运行期间需要采取的辐射防护措施，以及关闭后要求的隔离和包容水平。理想情况下，处置废物库存量应当包括预计产生的所有放射源或废物类型。当确定了场址和详细设计时，将逐步细化安全论证文件，最终允许编写特定场址的安全评定。

关闭后安全评定

III.2. 安全论证文件的一个重要组成部分是关闭后安全评定，其目的在于论证达到了处置的最终目标——关闭后安全。原子能机构针对国际近地表处置设施安全评定开展的 ISAM (International Safety Assessment Methodologies) 项目[28]，开发了“近地表处置设施运行和关闭后的安全评定方法学”。在 ISAM 项目中，该方法学示范性地应当用于钻孔处置设施，并也用于“关于核科学和钻孔处置技术的非洲研究开发与培训合作协议”[43]通用评定。ISAM 方法为关闭后安全评定提供了一个全面的框架，这一方法强调了安全评定背景的重要性，突出进行评定的理由，并在确定评定范围以及文件编等方面提供了帮助。该方法学的关键组成在图 3 中表示。

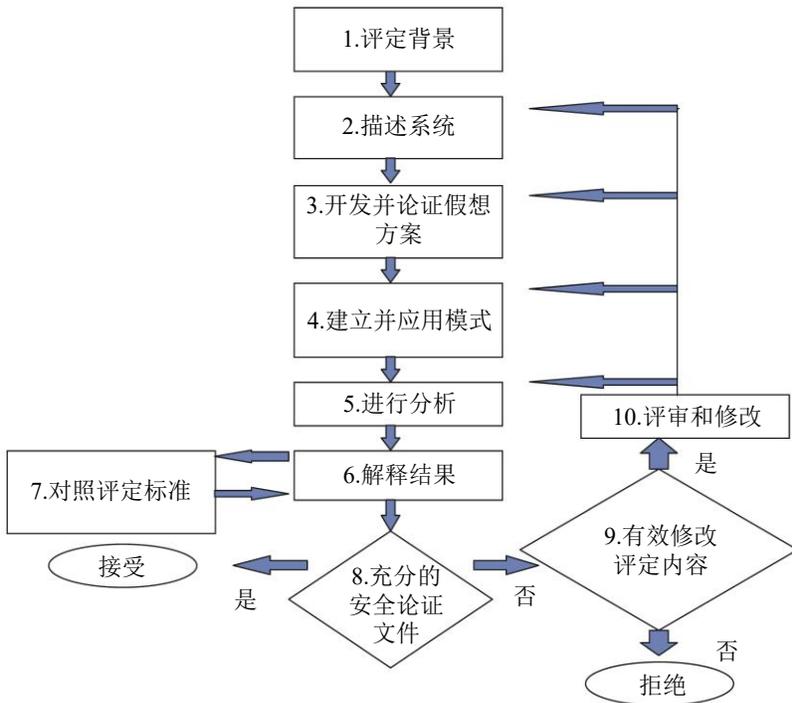


图 3. 关闭后安全评定的 ISAM 方法。

III.3. 处置设施可能受到一系列演变和事件的影响，其中的一些演变和事件比另外一些更有可能发生。在评定关闭后安全时，通常实践是建立一个设施的设计基准演变假想方案，该假想方案被认为是最有可能发生的。设计基准演变假想方案应当包含可能对公众造成辐射照射的所有自然过程和自然事件（表 2）。一些可能的的设计基准演变假想方案示于表 3。对于设计基准演变假想方案，通过假设人类利用可能包含废物中放射性核素的当地资源，来估算长期剂量（及相应的风险）。原子能机构的 BIOMASS 项目建立了这样的方法学，并同时开发了一系列参考生物圈[17]。

III.4. 为评价各种屏障的重要性（牢记处置系统的整体性能应当不过度依赖单一屏障或功能），应当对在设计基准演变假想方案的变体予以研究（表 2），这些变体可能降低系统的性能。变体可产生于不同的水文地质学解释，

部分容器存在缺陷的假设，等等。研究这些变体的常用方式是采用概率方法进行关闭后安全评定。

III.5. 次可能假想方案（表 2）由特点、事件和过程的子集引起，有时被称为外部特点、事件和过程。也应当研究这些次可能假想方案，它们通常包括：

- (a) 不太可能发生的对设施造成显著破坏的自然事件（如，陨石撞击）；
- (b) 人员侵入。

III.6. 应当采用诸如‘如果……怎样……’计算方法评定不太可能假想方案。目的是判断系统对外部特点、事件和过程的健稳性。这些计算可能会指出需要进一步研究的方面，或者甚至是变更设计，以保证如果发生这些外部特点、事件和过程，也不会导致安全功能的大范围丧失。在评定次可能假想方案对人类照射的风险时，应当考虑假想方案的发生概率。

III.7. 人员侵入研究应当关注由人员无意侵入引起的任何工程和天然屏障的破坏，以及破坏后果，即公众剂量的增加。

III.8. 如表 3 中典型的假想方案所示，对于近地表（即，废物被放置在地表下 30 米内）钻孔处置设施，可以设想钻孔处置设施的人员无意侵入类型包括：

- (a) 挖掘深厂房地基，为修道路或铁路而进行深挖，明挖覆盖隧道施工、隧道掘进、露天采矿等等（通常，这类活动开挖的大体积未受污染材料会很大程度上稀释放射性物质）；
- (b) 寻找水源或自然资源的勘探钻孔，这在实物包容被破坏后可能是重要的。

表 2. 假想方案示例和相应的剂量/风险目标水平

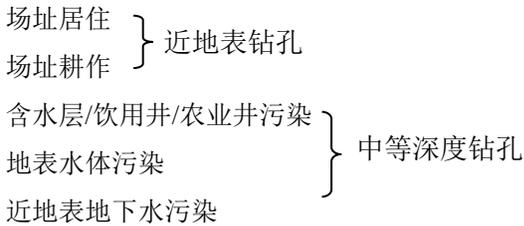
假想方案	设计演变假想方案 ^a	系统性能降低变体	说明性的、不太可能的假想方案			
			自然破坏性事件	环境变化	社会变迁	人员侵入
假想方案描述	预期系统性能，包括预期屏障退化率和等级	包括被认为不太可能发生的屏障退化的速率和水平	认为不太可能发生但对安全有严重后果的事件	全球或区域气候变化导致不同生态、海平面变化	战争、饥荒、社会基础设施崩溃导致的社会变革	人员侵入导致屏障过早失效
示例	容器以预期速度退化；地下水按预期时间范围返回生物圈	屏障过早破坏，因此地下水到达生物圈所需的时间明显少于模拟的时间	地震事件、火山活动、陨石撞击	墨西哥湾流中断导致过早冰期	狩猎—采摘生活方式生存社区	勘探钻孔深水开采
参考剂量/风险目标水平 ^b	年剂量<0.3 毫希沃特	年风险<10 ⁻⁵	年风险<10 ⁻⁵	年风险<10 ⁻⁵	年风险<10 ⁻⁵	年剂量<10 毫希沃特

^a 例如，如果不同的气候序列被认为是同样可能的，那么可能会有多个设计演变假想方案。

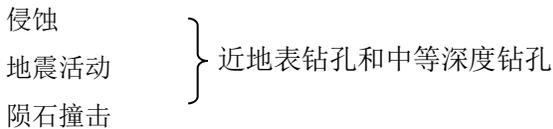
^b 应当理解，安全的关键问题是设计优化。目标剂量/风险水平与此相关。风险约束适用于四个中间列，因为这允许考虑事件的概率。

表 3. 近地表钻孔和中深度钻孔的不同评定假想方案示例^a 设计演变

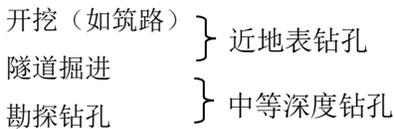
设计进化



自然破坏性事件



人员侵入



^a 相关更多信息，请参见参考文献[26]和附件。

III.9. 如前所述（第 4.28 段），对于近地表钻孔，安全论证文件考虑关闭后能动控制的作用是合理的。在这种情况下，有效的控制措施和控制时间应当作为许可证或批准的条件[9]。

III.10. 对于废物深于 30 米“平均居住侵入带”的钻孔处置设施[12]，唯一可能的人员侵入方式是勘探钻孔（表 3）。

III.11. 关闭后安全评定模式的输出结果将不可避免会有较大的不确定性，因为结果预测的是遥远的未来。在这里，其他论据也可用于证明安全。例如，可以根据包络分析与与自然现象的比较，如与天然放射性矿床行为的比较。

安全论证文件和安全评定的编写

范围

III.12. 安全论证文件应当采用合理的科学和工程技术描述所能提供的防护水平。它应当涉及安全的所有方面：如果处置前活动和运输是营运组织的责任，运行安全、关闭后安全也应当包括在内。通过进行安全评定来描述设施的防护水平。正如参考文献[8]关于安全论证文件和安全评定文件编写要求的那样，也须在安全论证文件中描述管理安排（如质量管理）和其他适用的限值、控制和条件（如，废物验收标准），以确保满足相关的安全标准。安全论证文件也包含安保。在缺乏顶层环境影响评定的情况下，安全论证文件也可在各决策阶段用于检验方案可能的变化范围及非辐射环境影响。

III.13. 安全论证文件的范围应当涵盖处置设施的设计、设施位置和如何将废物运至处置设施，如何运行、关闭和关闭后机构控制内处置设施的管理。安全论证文件应当涵盖内容的详细情况见第 5.14—5.83 段。最后，安全论证文件应当通过关闭后安全评定给出关闭后设施安全的论据。

III.14. 信息量和其相关的不确定性将随着设施开发的推进而改变。例如，在早期阶段，尚未选定场址时，一些信息将是非常不确定的。安全论证文件应当确定关键的不确定性，解释它们对安全论证文件的影响，并描述进一步的解决方案。

III.15. 安全评定的一个重要作用是识别存在不确定性的关键因素（即，对剂量计算有最直接影响的那些因素），以便场址表征和研究等更具有针对性，这应当贯穿于项目建设的全过程。这通常通过灵敏度分析来完成。有时，这些关键的不确定性与安全评定中使用的个别参数（如，某一放射性核素的存量）相关。更经常地，关键不确定性与模式和参数的组合相关。例如，容器的预期寿命不仅依赖于材料性质和环境条件，也依赖于将实验室短期数据外推到安全评定所需时间范围的方法。类似地，某一放射性核素在岩石圈的迁移时间取决于水文地质和其他模式及参数，如吸附系数。因此，通过补充数据和修正模式可以改进安全评定质量。在许多情况下，对新数据进行分析本身就将会提出模式改进的方法。

III.16. 总的来说，安全论证文件应当描述设施将如何满足第 3 部分讨论的各项安全目标和标准。这需要解释：

- (a) 在场址运行期间（包括异常（即事故）工况）和处置前活动以及将废物运输到场址期间（如果废物运输责任属于营运组织），保护工作人员与公众的方法与程度；
- (b) 在关闭后，设施设计和场址如何提供废物的隔离和包容，要考虑重要不确定性，以便确定关键群组所受辐射影响在规定的剂量限值和风险限值范围内。

详细程度

III.17. 安全论证文件和辅助安全评定应当以书面形式阐明读者关注的问题，并易于理解。而且，参考文献[8]关于“安全论证文件和安全评定文件编写”的章节要求，要求在每一阶段的安全论证文件应当充分详细和全面，并提供必要的技术输入来支撑决策。它也应该具有足够的质量，以便允许监管机构进行独立评审和评定。很明显，详细程度将随着项目的进展而逐渐增加。不过，从广义上讲，通常应当足以证明：

- (a) 评定（如，运输安全、运行安全或关闭后安全）涵盖了所有相关的假想方案（即，设计和非设计方面）；
- (b) 选择的模式（概念和数学）与目的相符；
- (c) 模式中使用的参数是合适的；
- (d) 已经考虑了概念模式和参数的合理可变性；
- (e) 已经实现了总体最优化（第 4.36—4.39 段）。

III.18. 能达到的详细程度主要取决于评定结果。如果评定（无论运输安全、运行安全或关闭后安全）表明有大的“安全裕度”（也就是，计算的剂量低于监管限值几个量级），并且即使对假想方案、模式和参数进行非常保守的假设也不会导致不符合，那么，说明符合要求可能是简单的，并且使用相对少的资源就能做到。不过，如果评定结果接近于监管约束，保守的假设有时会导致不符合性，这时需要证明，排除一些更保守的假想方案是正当的，并准确地界定模式和参数的合理（和不合理）变化范围。这通常需要在概念模式开发和确定参数不确定性方面进行非常深入的工作。

III.19. 虽然这些考虑对小型和大型处置设施都是同样适用的，但在其他条件相同的情况下，证明小规模、较低危害废物的钻孔处置设施关闭后的安全要比大规模设施简单的多。

正当性、可追溯性和明晰性

III.20. 正当性、可追溯性和明晰性是安全论证文件编写的重要考虑，这对信心的建立是特别重要的，无论钻孔处置设施的建设项目进展到哪一阶段都是如此。

III.21. 正当性是指解释各种决策背后的推理，特别是与安全相关的推理。正当性应当包括赞成和反对决策的论据，并应当解释为什么选择这种方案而不是另一种。

III.22. 可追溯性是指一个中立的、有资质的人员能够追溯到安全论证文件各种要素的原始来源，并能理解这些要素如何形成安全论证文件。

III.23. 正当性和可追溯性都要求充分的记录：**(a)** 在处置设施建设中所做的决策和假设；**(b)** 获得一组安全评定结果所使用的模式和数据。良好的可追溯性对独立评审是重要的。

III.24. 明晰性要求通过优良的架构和充分的展示，使读者不仅可以理解安全评定的结果，而且能理解背后的原因。这要求文件编写能够使目标读者很好地理解安全论据及其支撑材料。可能需要提供不同风格和水平的文件，以提供对不同读者有用的材料。

附录 IV

场址特征和场址水文地质表征

IV.1. 本附录讨论近地表和中等深度钻孔相关的特征。也概括了主要的场址表征活动。通常，场址选择要综合有利的表征，避免不利的表征，这会比其他情况下证明关闭后安全更简单，需要资源更少。

废物在地表下深度 30 米之内的钻孔

IV.2. 在避免地下水资源污染方面，近地表钻孔的一个重要优点是它们利用了围岩长期不饱和的潜在能力。在一些干旱区域，可能几乎没有近地表地下水运动。在其他情况下，可能有一些大气降水的渗入，并渗透到地下水位。缺乏大量的地下水（它们是放射性核素迁移的主要载体）将延迟放射性核素和饱和带之间的相互作用，减少地下水迁移途径的重要性，使得放射性核素在非饱和带的衰变时间延长。所有这些对关闭后安全都是有利的，并使得证明安全更简单，需要资源更少。

IV.3. 为了建立在相关的包容期内围岩将保持非饱和的合理信心，有必要描述场址特性以便预测将来地下水位可能的变化或围岩的临时饱和。在表征活动中，应当考虑现在和过去的水文地质条件，将来的气候条件和可能的侵蚀速率。这并不是说，必须完全避免饱和，但一般应当避免废物处置区内的岩石相当频繁（季节性的或者每隔几年）地饱和的场址。这是因为周期性的干湿循环条件或者甚至永久局部饱和的环境能形成严重腐蚀。原因是短期的地下水具有氧化性并且可能包含高浓度的溶质。对于一些场址，避免饱和条件可能面临特殊的挑战，即放置废物到足够深度进行隔离与保持废物在地下水位以上两种需求的协调。钻孔岩芯可以保留过去地下水位的证据。

IV.4. 在近地表钻孔置处于饱和环境条件下，该处地下水流动应当非常缓慢。这可能是由低渗透性的岩石（如，粘土），也可能是与低水力梯度共同形成的，这会导致放射性核素向钻孔外迁移的通量较低。如果围岩对核素具有强烈的吸附作用（见 IV.14 段），将形成对放射性核素的进一步阻滞，证明关闭后安全就更简单。

IV.5. 地下水流量非常低的饱和近地表场址，也可能具有缺氧或化学还原条件。这样的条件是有利于处置的，因为可以减少腐蚀，也可能降低如铀和钍等一些多价态核素的溶解度。在许多情况下，通过形成类似水泥的（碱性的）环境也可能造成对溶解度的限制。当地地球化学的其他特性可能对工程屏障具有负面影响。这包括含硫酸盐的地下水，可能导致由普通硅酸盐水泥制成的混凝土提早降解。同样，较高的氯化物水平可能引起容器腐蚀，因此对容器是有害的。

IV.6. 由于风化，近地表岩石通常不足以使近地表钻孔（特别是大直径的钻孔）实现自我支护。为此，通常需要钻孔套管。这意味着，要优先选择可以实施优质的套管密封或者岩石灌浆密封的地层。应当避免通过移动或引入材料改变地面水平，因为这通常具有较低稳定性。

IV.7. 应当调查场址地表过程，如洪水、塌方、侵蚀和风化。应当特别关注洪水的发生率，这是因为它会通过深切山谷影响侵蚀，也因为其会破坏设施的运行能力。出于同样的原因，在场址选择中也应当考虑极端气象事件。通常，钻孔处置系统的活性部分应当位于当地侵蚀基准面以下，并且在任何情况下，侵蚀速率都应当充分低，以避免在评定时间范围内受到废物的照射（见第 3.9 段）。

IV.8. 与较深的钻孔相比，近地表钻孔处置设施更易受到人员无意侵入的影响，因此应当考虑场址及其周围环境的资源和发展潜力。应当获得场址的全部所有权，并且场址应当避免接近可能的水源或矿物资源。应当考虑地下水开采、采石、隧道、采矿和矿产勘查钻探的可能性。为了降低建筑活动引起的无意侵入的可能性，近地表场址应当不靠近人口密度高的区域或者城市的外延区域。

IV.9. 应当避开存在持续性局部构造活动的环境。因此，接近活动断层线或区域，并容易发生频繁地震活动的场址是不合适的。

IV.10. 对近地表钻孔处置设施，可能影响选址的其他因素是：

- (a) 地质和水文的复杂性，这将使场址表征和模拟相当复杂，并将加大完成这些任务所需要的资源；
- (b) 进入通道应当足够好，以允许重型车辆（如，挖掘机或车载钻机）到达场址，对于小规模处置，移动的水电供应是合适的。

放射性废物处置在超过地表下 30 米的钻孔

IV.11. 对于中等深度的钻孔，处置区也可能位于非饱和区，正如上面较小深度的钻孔部分所解释的，从关闭后安全的角度看，这样的场址是非常有利的。不过，中等深度钻孔更可能处在较深的完全饱和条件。这种情况下，小的地下水通量可降低核素地下水途径迁移的重要性。低的地下水不断变动由低渗透性岩石以及低水力梯度结合产生。对于深度在 100 米或更深的中等深度钻孔，适宜的围岩层可能包含老的、含盐的、流动非常缓慢的地下水，这时地下水流动及其缓慢、在与关注的包容期相当的时间段内几乎没有与浅层水混合。较深的饱和条件下通常形成缺氧的、或者甚至还原的条件，正如上面解释的，这对于减少腐蚀是有利的，并且可能降低一些多价放射性核素的溶解性。与近地表钻孔处置一样，应当避免位于饱和与非饱和交替之间的场址。

IV.12. 对于完全饱和场址，考虑重点是混合和弥散引起的稀释，这可能是减弱处置影响的一种有用机制，尤其是从长期角度看，在工程屏障开始破损，一些放射性核素不可避免迁移时，这可能是一种有用的机制。稀释和弥散之所以是有效的，是由于其本质上是包容放射性核素。因此，在稀释情况下，小通量的放射性核素（贝可/年）迁移进大体积通量的地下水，并与之混合，将形成低浓度放射性核素的地下水（贝可/立方米），产生低的剂量。弥散指的是从处置库迁移出的放射性核素在时间和空间的扩散。到目前为止，最重要的是在时间上的弥散，此外，当放射性核素的延迟和阻滞最大的时候，对降低预测剂量也是最有效的。

IV.13. 核素的包容水平取决于工程屏障的有效性，对核素的有力包容，有助于稀释和弥散，就选址而言，重要的是，这意味着放射性核素迁移到地表需要更长的时间。这可通过在较低的地下水流（见 IV.11 段）和周围岩石圈对放射性核素的强烈吸附（见 IV.14 段）形成。在处置层具有非常低的地下水流量，而近地表层有较高地下水流量时，由于水流条件的强烈反差，可形成高度的混合稀释。

IV.14. 围岩和上覆岩层的强烈吸附（对于被处置的放射性核素及其重要的放射性子体）是另一个有助于包容的有利因素。同时必须承认，一些非吸附性离子（如氯离子），无论是何种岩石，对其基本都没有吸附。吸附这个词用于描述一系列过程，包括吸附作用、离子交换和化学反应，即放射性

核素将自身附着于近场材料上，如膨润土或水泥，或者地质圈的岩石上。对于具有吸附和稀释特性的场址，由于吸附会减慢核素的迁移，混合和弥散致使稀释度高，计算出的剂量将远远低于监管约束值。在这种情况下，用相对少的工作证明关闭后安全是可能的。

IV.15. 如果围岩能自我支撑，对钻孔的建造是有利的，因此，岩石特性将是重要的。应当避开钻孔稳定性差，尤其是处置层稳定性差的岩层和深层土壤。如果岩石特性好，且钻孔口径小，则可能在处置区就不需要下套管。不过，接近于地表，岩石特性较差（由于风化），通常需要套管。如果处置区使用了套管，就需要对套管进行密封。这类密封通常是将水泥浆注入到套管和岩石之间的环状空间。因此是优先选择灌浆与岩石能很好粘合的岩层。应当避免通过输出或引入材料使地平面改变，因为其通常具有较低稳定性。

IV.16. 对于中等深度钻孔，人员侵入的可能性和后果通常比近地表钻孔低。虽然如此，选址应当避开存在有用自然资源（如丰富的地下水、矿物或油气）的区域，以降低人员无意侵入的可能性。关于进出通道，对于小规模处置，不需要专门铺设道路，并且可以使用移动的水电供应。

IV.17. 再次强调，与近地表钻孔一样，应当避免将场址选在正发生构造活动区域的。

IV.18. 对于中等深度钻孔处置的场址，地表过程是不太重要的，但仍然应当考虑：例如，中等深度钻孔比近地表钻孔更可能承受侵蚀和风化。出于运行安全和关闭后安全的考虑，应当避开容易受到洪水和塌方影响的区域。

IV.19. 关于气候和极端气象事件，对于中等深度钻孔，主要关心它们对区域地下水流的影响。应当避免在地下水具有很强季节性变化的岩层中处置。

IV.20. 由于单独通过钻孔实施深部岩层表征是困难的，因此地质结构和水文地质系统简单且容易进行表征的场址是有优势的。应当避开地质复杂程度高的区域，因为很难（因此很贵）进行表征，并且这可能限制对安全评定结果的信心。

水文地质表征活动

IV.21. 为了有助于描述一个场址的水文地质表征，一种有用的方法是定义下列三种情况：

- (1) 位于非饱和区域的钻孔；
- (2) 位于饱和环境，岩石渗透性从高到低变化的钻孔；
- (3) 位于饱和环境，具有非常低渗透性（如，粘土）的钻孔。

IV.22. 下面的三个段落简单地描述每类型场址水文地质表征可能需要的表征活动。讨论假设：(a) 处置是小规模的；以及 (b) 该场址的地质、水文和地球化学并不复杂。在这三种情况下，这项工作的早期重要组成部分将是在拟议处置深度建立场址的地球化学。该组成部分的目的是确保当地的地球化学（如硫酸盐和氯化物水平）不会对工程屏障产生过度影响。

非饱和场址的水文地质表征

IV.23. 甚至在温带和潮湿的热带地区，地下水位有时也可能位于地 10—20 米以下：对于近地表钻孔，这样的深度足以使处置区位于非饱和带。另一方面，只有在干旱地区，非饱和带的深度才会足够深，使得中等深度钻孔的处置区能够位于非饱和带。

IV.24. 在地下水位处在处置区几十甚至几百米以下的场址，研究性钻孔通常应当延伸至地下水位，近地表钻孔应当延伸到支撑它的弱含水层。假如对区域水文地质已有一般性的了解，对于小规模处置设施，一个研究钻孔可能就足够了。这个钻孔应当（至少）提供围岩岩芯，和下方含水层的水样。获取的关键信息包括以前地下水位的证据，大气水渗透通过非饱和区的数量和速率，以及下伏含水层中地下水的特征。这些特性包括地下水的化学成分、来源、年龄、流量和压力，以用于估算其到达生物圈的时间。如果试验未能满足对区域水文地质模式的信心，有必要补充一些钻孔来支持模式开发。

岩石渗透性高到低变化的饱和场址水文地质表征

IV.25. 第二个示例是位于长期饱和但岩石渗透性由高到低变化场址的钻孔处置设施。这里，为了确认不存在可能影响性能的结构或水文地质特点，如下方高压区，研究性钻孔应当至少延伸到围岩底部（除非这非常深）。水

文地质调查应当包括压力测量，不同层的进水速率，抽水试验以确定围岩的有效水力传导率。也有可能需要在周围区域布置其他的调查钻孔。这通常用于建立压力梯度和围岩的均匀性程度。这些次级钻孔通常至少要钻探到处置深度。位于或接近饱和区的近地表钻孔，次级钻孔也用于确定地下水位的形态，及其季节变化。提取的岩芯可以提供过去地下水位水平的证据。对于中等深度钻孔处置设施，从不同深度采集的水样应当用于评定水体的分层程度。

非常低渗透性岩石饱和场址的水文地质表征

IV.26. 处置区位于饱和的、岩石低渗透性非常低（如塑性粘土）的场址时，研究性钻孔的水流入速率可能非常低，甚至无法探察，这使得水样的收集和水文地质特性的测量变得非常困难。在一些情况下，可能会从提取的岩芯中抽出水样，并在能探测到的进入钻孔中水量的基础上确定地下水流速。应当通过提取的岩芯测量围岩的水力传导率。应当测量围岩层厚度，以确定处置区和渗透性岩石之间的距离。假如围岩是相对均匀的，对于小型处置设施，单一的调查钻孔可能就足够了。否则有必要通过浅层钻孔或使用其他的技术调查，如更高渗透性的透镜体或地层的位置。

附录 V

适用于小型钻孔处置设施的监视和监控计划

V.1. 这里描述的监视和监控活动不是规定性的——处置设施营运组织应当说明所提计划范围的正当性。不过，对于少于 20 个钻孔的非使用密封源钻孔处置设施，下面的建议可能是适当的。

运行前（本底值）的监视和监控

V.2. 在场址运行前（如，场址表征阶段期间），应当很好地进行本底测量。本底调查的目的是针对与场址相关的信息，建立一个可靠和全面的数据库，以利于发现未来的变化。数据信息应当覆盖至少一年的时间周期（即，覆盖所有的季节），并包括每天收集的气象资料和连续的地震数据，以及：

- (a) 地表取样：每月测量空气、土壤（如果预计将包含镭源，包括氡）和地表水中的活度水平，识别主要的放射性核素；
- (b) 钻孔地下水取样：如果是地下水位，或略低于地下水位，且假设不超过处置区下方 100 米，每月测量处置区地下水中的活度水平。同样应当识别主要的放射性核素。

V.3. 应当在拟议场址范围内或周围大约 10 个位置进行地表取样。这些位置大约有一半将是重复的，其他位置每个月改变，这样，在全年中，取样点被均匀分布在覆盖的区域。其他地表取样点应当位于最近的人类居住点和通常认定的地下水排放点（如，附近的低地形）。如果附近位置的井水会得到利用，也应当对其监控。

V.4. 对于钻孔地下水取样，2 到 4 个钻孔需位于场址边界，以对废物处置区上游和下游的水进行取样。一旦建立可靠的数据库，取样频率可减少到每年两次。

运行期间的监视和监控

V.5. 运行期开始时，将增加场址内监视和监控的数量。例如，测量应当包括个人监控，新接收废物货包的放射性污染监控，以及从货包到处理设备污染扩散的监控。废物搬运时，应当连续监控空气中的颗粒物，在每次

重要的运行操作后，拆解过滤器进行分析。在放置废物后应当对土壤取样，以监控钻孔周围的土壤污染（如果有的话）。

V.6. 在场址边界外应当继续进行空气、土壤和水的取样和分析，监控频率与以前相同，即每年两次。当然，这是建立在监控结果持续令人满意的前提下。也应当继续实施气象和地震测量。

关闭后有组织的控制期的视察

V.7. 在设施关闭后，空气、土壤和水的地表取样应当以与运行期间相同的频率继续进行。大约 10 个地表取样位置应当是足够的，并应当在最近的人类居住点、低地形处和附近任何取水钻孔另外取样。

V.8. 对于地下水取样，两个监控钻孔是足够的，一个在废物的上游，另一个在下游。如果机构控制期超过 5 年，地表取样的数量可以减半，上游取样井可以密封，取样频率可以减少到一年一次。当机构控制期结束时，最后的监控井将被密封。

附录 VI

管理系统

建立管理系统

VI.1. 建立管理系统的首要要求是以机构最高的管理水平正式签署这样一个系统，并承诺确保在整个机构中全面实施。管理系统是一个手段，以确保有效地实现机构的目标[35]。由此可见，机构的目标应当是管理系统的焦点。例如，在确定钻孔处置设施营运组织职责时，如果政府强调成本效益的重要性，这就应当作为营运组织的目标之一。

VI.2. 若机构的目标已得到清晰地阐述，应当制定和实施管理系统来实现这些目标。这通常以分层方式来分解目标—如分解成“活动”和“任务”—并构建相应的组织机构以体现这种分解。这意味着机构的组织机构和工作描述是管理系统的一部分。怎样执行目标—活动—任务，由谁执行，记录在政策、程序、作业指导书和质量计划中。参考文献[35]将所有这些称为工作文件，这里将遵循这个惯例。管理系统应当适用于机构的所有工作，也就是，从概念设计直到有组织的控制结束。管理系统也应当延伸到供应商和承包商，它们也应当按照约定的程序工作。在这一背景下，国内和国际公认的原则、法规和标准提供了实用、广泛共识的基准，应当尽可能遵循。

VI.3. 就营运组织而言，管理系统应当延伸到废物产生者，它们的废物货包装计划应当由营运组织予以评审。反过来，营运组织的管理系统应当由监管机构批准。

工作文件

VI.4. 工作文件应当描述执行什么工作，怎样和由谁执行，以便能成功地实施（即，这样的工作有助于实现机构的目标）。工作文件也应当要求产生书面证据以证明遵循了工作文件。工作文件应当由在工作方面具有相关经验的人员编写，并最好是由高层管理人员独立批准。

VI.5. 工作文件的详细程度和规定应当取决于该项工作对安全的重要性和对破坏的敏感性。安全论证文件，尤其是安全评定，通常应用来帮助鉴别

和证明单一程序所需的详细水平和规定要求。安全论证文件也应当给出识别需保存信息的方法，这些信息可作为过去决策的监查跟踪或对将来的安全评定有重要意义。

VI.6. 例如，在早期的设计工作中，需要的是创造发明而非规定，虽然最终的设计与安全密切相关，但在早期的设计理念定案前应当进行大量的检查和实验。因此，工作文件应当聚焦于明确地描述目标和设计约束，并要求解释不同设计决策背后的推理。另一方面，应当严格地规定钻孔的回填，因为，(i) 关闭后安全可能依赖于它；(ii) 可能很难检查其是否得到正确实施；以及 (iii) 回填不合格的钻孔可能很难补救。附随的文件应当有表明回填已（或没有）成功完成的证据。例如，可以描述钻孔中回填的体积和测量到的钻孔水平面变化。第三个示例，附录 III ISAM 方法[28]给出了关闭后安全评定工作文件的示例。特别有用的是最初的“背景”步骤，它按照安全评定的用途，可以确定支持性文件的数量。

文档

VI.7. 管理系统的一个重要功能是形成和保留书面证据，证明已经遵循了正确的程序。已以文档形式做了规定应当定期进行管理系统评审，这可提供相关的附加证据。评审应当由机构自身（内部监查）和外部机构进行。若机构是营运组织，应当制定发现不符合安全程序的事件时应当遵循的行动和程序，并得到监管机构批准。

VI.8. 要确保遵守相关的安全要求和标准，这些要求和标准本身是营运组织的目标、活动和任务的一部分，管理系统将有助于这些要求和标准得到遵守，并通过相关文档为之提供证据。

参 考 文 献

- [1] 《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）。
- [2] 国际原子能机构《防止废弃密封放射源事故管理》，国际原子能机构《技术文件》第 1205 号，国际原子能机构，维也纳（2001 年）。
- [3] 国际原子能机构《废弃密封放射源在深井处置设施中的安全考虑》，国际原子能机构《技术文件》第 1368 号，国际原子能机构，维也纳（2003 年）。
- [4] SOBOLEV, I.A., OJOVAN, M.I., KARLINA, O.K., “‘氦’在俄罗斯，地区设施中已使用的密封放射源的管理”，论文发表于第 8 届放射性废物管理和环境治理国际会议，布鲁日（2001 年）。
- [5] PROZOROV, L., TKATCHENKO, A., TITKOV, V., KORNEVA, S., “在‘氦’场址建造大直径竖井的展望”，论文发表在 WM01 高放废物、低放废物、混合废物、危险废物和环境修复一致致力于更清洁的环境会议，图森（2001 年）。
- [6] COCKRAN, J.R., CROWE, B.M., COLARUSSO, A., “内华达州试验场超铀废物分类处理的绩效评定结果”，论文发表在 WM01 “高放废物、低放废物、混合废物、危险废物和环境修复一致致力于更清洁的环境”会议，图森（2001 年）。
- [7] 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，《国际辐射防护和放射源安全基本安全标准》，国际原子能机构《安全丛书》第 115 号，国际原子能机构，维也纳（1996 年）。
- [8] 国际原子能机构《放射性废物的地质处置》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 WS-R-4 号，国际原子能机构，维也纳，2006 年）。
- [9] 国际原子能机构《放射性废物的近地表处置》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 WS-R-1 号，国际原子能机构，维也纳（1999 年）。*

- [10] 国际原子能机构《近地表处置设施》，国际原子能机构，维也纳。（修订版编写中）
- [11] 国际原子能机构《放射性废物的地质处置》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 WS-R-4 号，国际原子能机构，维也纳，2006 年）。（修订版编写中）
- [12] 经济合作与发展组织核能机构《浅地层放射性废物处置：长寿期放射性核素的验收参考水平》，核能机构专家组报告，经济合作与发展组织，巴黎（1987 年）。
- [13] 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）。
- [14] 国际原子能机构《职业辐射防护》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.1 号，国际原子能机构，维也纳（1999 年）。
- [15] 国际原子能机构《外部辐射源引起的职业照射评定》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.3 号，国际原子能机构，维也纳（1999 年）。
- [16] 国际原子能机构《放射性物质安全运输条例》（2009 年版），国际原子能机构《安全标准丛书》第 TS-R-1 号，国际原子能机构，维也纳（2009 年）。
- [17] 国际原子能机构《固态放射性废物处置的“参考生物圈”》，生物圈建模和评定计划的生物量报告主题 1，第 IAEA-BIOMASS-6 号，国际原子能机构，维也纳（2003 年）。
- [18] 国际放射防护委员会《用于长寿命固态放射性废物处置的辐射防护建议》，国际放射防护委员会第 81 号出版物，培格曼出版社，牛津和纽约（2000 年）。
- [19] 国际放射防护委员会《潜在照射的防护：概念框架》，国际放射防护委员会第 64 号出版物，培格曼出版社，牛津（1993 年）。

- [20] 国际原子能机构《保护环境免受电离辐射的影响：讨论报告》，国际原子能机构《技术文件》第 1091 号，国际原子能机构，维也纳（1999 年）。
- [21] 欧洲委员会《FASSET：环境影响评定框架（2003 年）》，<http://www.ericproject.org/>
- [22] 国际原子能机构《地下放射性废物处置库安全评定不同时间框架下的安全指标》，国际原子能机构《技术文件》第 767 号，国际原子能机构，维也纳（1994 年）。
- [23] 国际原子能机构《用于核、辐射、放射性废物和运输安全的法律和政府基础结构》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GS-R-1 号，国际原子能机构，维也纳（2000 年）。
- [24] 国际原子能机构《排除、豁免和解控概念的应用》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.7 号，国际原子能机构，维也纳（2004 年）。
- [25] 国际原子能机构《放射性废物近地表处置的功能、事件和过程(FEP)》，国际原子能机构，维也纳。（修订版编写中）
- [26] LITTLE, R., VANBLERK, J., WALKE, R., BOWDEN, A., “钻孔处置概念的一般关闭后安全评定和活动限值推导”，昆塔沙第 QRS-11286v10 号报告，昆塔沙，泰晤士河畔亨利（2003 年）。
- [27] 经济合作与发展组织核能机构《对深地质长期安全贮存库的信心、发展和沟通》，经济合作与发展组织，巴黎（1999 年）。
- [28] 国际原子能机构《近地表处置设施安全评定方法论》第 2 卷，国际原子能机构，维也纳（2004 年）。
- [29] 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）。
- [30] 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>咨询材料》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 TS-G-1.1 号，国际原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [31] 国际原子能机构《放射源的安保：临时意见指引》，国际原子能机构《技术文件》第 1355 号，国际原子能机构，维也纳（2003 年）。

- [32] 国际原子能机构《近地表处置设施中放射性废物处置活度限值的推导》，国际原子能机构《技术文件》第 1380 号，国际原子能机构，维也纳（2003 年）。
- [33] 英国 NIREX 有限公司，“通用库研究：Nirex 分阶段处置概念”，Nirex 第 N/025 号报告，Nirex，迪科特迪德科特（2001 年）。
- [34] 国际原子能机构《放射性废物的处理、装卸和贮存管理系统》，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）。
- [35] 国际原子能机构《放射性废物处置管理系统》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-3.4 号，国际原子能机构，维也纳（2008 年）。
- [36] 国际原子能机构《近地表处置设施的选址》，《安全丛书》第 111-G-3.1 号，国际原子能机构，维也纳（1994 年）。
- [37] 国际原子能机构《地质处置设施的选址》，《安全丛书》第 111-G-4.1 号，国际原子能机构，维也纳（1994 年）。
- [38] 国际原子能机构《因摄入放射性核素的职业照射评定》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.2 号，国际原子能机构，维也纳（1999 年）。
- [39] 国际原子能机构《放射源的分类》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.9 号，国际原子能机构，维也纳（2005 年）。
- [40] 国际原子能机构《小型医疗、工业和研究设施退役》，《技术报告丛书》第 414 号，国际原子能机构，维也纳（2003 年）。
- [41] 国际原子能机构《辐射防护的环境和源监控》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.8 号，国际原子能机构，维也纳（2005 年）。
- [42] 国际原子能机构《放射性废物近地表处置设施的监督和监控》，《安全报告丛书》第 35 号，国际原子能机构，维也纳（2004 年）。
- [43] NEL, B.vdL., “钻孔处置概念的概念设计”，南非核能公司第 GEA1568 号报告，南非核能公司，比勒陀利亚（2002 年）。

附 件

非使用密封源钻孔处置关闭后一般安全评定

A-1. 本附件是一个钻孔处置概念关闭后通用辐射安全评定（GSA）的报告，其目的是识别不同处置条件下处置概念的关键安全特点，为支持概念设计和许可证过程提供支持并便于在特定场址的特定运用。该报告是正在开发的“支持实施钻孔处置概念”系列报告中其中一个。该报告以原子能机构安全报告的形式出版。

A-2. 许多国家都有放射源，须以安全安保的方式妥善地管理和处置。这些放射源包含活度不同的不同放射性核素。虽然许多放射源的尺寸较小，但可包含非常高的活度，典型的活度水平在兆贝可（ 10^6 贝可）到 10^7 的 15 次方贝可（ 10^{15} 贝可）范围。因此，如果得不到适当的管理，放射源可能会对人类健康和环境造成重大的危害。对于含大量短寿命放射性核素的放射源，贮存在一个安全的设施中，在几年内可衰变到无害的水平，因此可以作为一种合适的最终管理计划。不过，对于多数的其他放射源，需要有一个恰当的处置方案。

A-3. 许多国家已有或规划建设低中放废物近地表处置设施。不过，许多放射源的比活度超过了这些设施的废物验收标准，因为这些放射源会在设施内形成了一个局部高浓度的区域。在当前的处置概念中，深地质处置可实现最高水平的隔离。许多国家考虑用这类设施处置乏燃料、高放废物和中放废物。不过，建设地质处置是非常昂贵的，只有在有大规模核能项目的国家才有可行性。因此，废放射源钻孔设施受到越来越多的关注，它为少量的放射性废物，特别是为废弃放射源提供了一种安全经济的处置方案。

A-4. 多种不同深度（几米到几百米）和直径（几十厘米到几米）的钻孔设计已用于处置放射性废物，本报告中评价的设计是基于原子能机构在 AFRA 项目中开发的小直径（0.26 米）设计（见图 1 和图 A-1），因为这个设计是专门用于处置废放射源，并且采用的是所有国家都掌握的现成钻井技术。此设计可容纳长度小于 110 毫米，直径小于 15 毫米的废放射源。这意味着其适于处置多种放射源。假设放射源处置在地表以下至少 30 米。报告中选用的地质、水文地质和地球化学条件已经考虑了场址条件的变化范围。

A-5. 采用了与最佳国际实践相一致的方法开展通用辐射安全评定。特别是，使用了原子能机构“放射性废物近地表处置设施长期安全评定方法学改进协调研究项目”开发的方法（ISAM 方法），目的是确保以一致、合乎逻辑和透明的方式进行评定和编写文件。ISAM 方法包含以下的关键步骤：

- (a) 详述评定背景；
- (b) 描述处置系统；
- (c) 假想方案分析和选择；
- (d) 建模和计算；
- (e) 结果分析和解释。

这些步骤的每一步都适用于用于钻孔处置概念的通用辐射安全评定，并在报告中描述了应用。

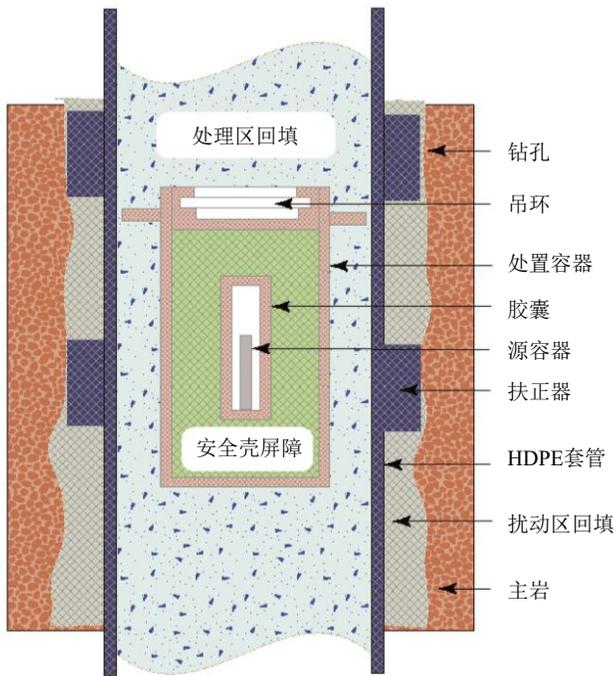


图 A-1. 通过钻孔进行处理的说明部分。

A-6. 主报告有一系列支撑性附件，附件是评定研究的详细信息，即：

- (a) 放射性核素的选择和通用辐射安全评定中的地球化学条件；
- (b) 假想方案分析方法和通用辐射安全评定中的概念模式以及相关特点、事件和过程（特别是那些钻孔本身相关的）的筛选；
- (c) 水泥退化计算、不锈钢包壳和处置容器在不同环境条件下的详细腐蚀模式；
- (d) 计算钻孔处置概念影响水平的评定模式和数据；
- (e) 相关计算的结果。

A-7. 已经开发了通用辐射安全评定，以便可用于评定条件涵盖范围内特定场址的初始关闭后安全评定。如在评定条件范围以外，特定场址的安全评定需进行少量甚至全部的附加计算。这种情况下，通用辐射安全评定能用于指导和支持特定场址的评定。此外，推导的通用参考活度值可作为与特定场址评定值进行比较的基准。

A-8. 结果表明，通过废物活度、近场设计和地质环境的适当组合，钻孔处置概念可作为长寿命和短寿命放射性核素处置的安全方案。对于大多数放射性核素，即使是较长寿命的放射性核素，如镭-226，从关闭后安全角度，钻孔处置概念并不过分严格地限制处置的放射性核素总量。即便如钷-238、钷-239 和镅-241 等含有极其长寿命子体（也就是，半衰期超过 10 万年）的核素，单一钻孔处置能力约为 1 太贝可。

参与起草和审订人员

Ahonen, L.	芬兰地质调查局
Andreeva-Andrievskaya, L.	俄罗斯原子能公司
Avila, R.	瑞典 Facilia AB 电力公司
Balaz, J.	斯洛伐克电力公司
Barinov, A.	俄罗斯联邦核废物处理厂
Batandjeva, B.	国际原子能机构
Benítez-Navarro, J.	古巴辐射保护和健康中心
Berci, K.	匈牙利 ETV 能源公司
Bruno, G.	法国替代能源与原子能委员会
Crossland, I.	英国伊恩·克罗斯兰咨询公司
Dayal, R.	国际原子能机构
Ehn, L.	斯洛伐克电力公司
Fisher-Appelt, K.	德国装置与反应堆安全公司
Gera, F.	顾问（意大利）
Goldammer, W.	顾问（德国）
Guskov, A.	俄罗斯联邦核废物处理厂
Hart, K.	澳大利亚驻美国大使馆，美国华盛顿
Ichimura, T.	国际原子能机构
Jova Sed, L.	国际原子能机构
Kenagy, D.	美国国务院
Koteng, A.O.	肯尼亚卫生部
Kozak, M.	美国监控科学

Little, R.	英国昆特萨有限公司
Metcalf, P.	国际原子能机构
Nel, L.	南非核能公司
Park, J.B.	韩国水力与原子能有限公司
Pla, E.	欧洲委员会
Robertson, G.	美国卫生部
Simo, A.	喀麦隆能源研究实验室
Smietanski, L.	波兰地质研究所
Soeung, V.	柬埔寨工业、矿产与能源部
Steyn, I.	南非国家核监管局
Tkachenko, A.	俄罗斯联邦核废物处理厂
Tuniz, C.	澳大利亚常驻国际原子能机构代表团
Veselic, M.	斯洛文尼亚放射性废物管理机构
Vukelic, Z.	斯洛文尼亚卢布尔雅那大学
Xavier, A.M.	巴西国家核能委员会

国际原子能机构安全标准核可机构

星号表示通讯成员。通讯成员收到征求意见稿和其他文件，他们一般不参加会议。两个星号表示候补者。

安全标准委员会

阿根廷: González, A.J.; 澳大利亚: Loy, J.; 比利时: Samain, J.-P.; 巴西: Vinhas, L.A.; 加拿大: Jammal, R.; 中国: 刘华 (Liu Hua); 埃及: Barakat, M.; 芬兰: Laaksonen, J.; 法国: Lacoste, A.-C. (主席); 德国: Majer, D.; 印度: Sharma, S.K.; 以色列: Levanon, I.; 日本: Fukushima, A.; 韩国: Choul-Ho Yun; 立陶宛: Maksimovas, G.; 巴基斯坦: Rahman, M.S.; 俄罗斯: Adamchik, S.; 南非: Magugumela, M.T.; 西班牙: Barceló Vernet, J.; 瑞典: Larsson, C.M.; 乌克兰: Mykolaichuk, O.; 英国: Weightman, M.; 美国: Virgilio, M.; 越南: Le-chi Dung; 原子能机构: Delattre, D. (协调员); 核安全咨询小组: Hashmi, J.A.; 欧盟: Faross, P.; 国际核安全小组: Meserve, R.; 国际放射防护委员会: Holm, L.-E; 经济合作与发展组织核能机构: Yoshimura, U.; 安全标准委员会主席: Brach, E.W. (运输安全标准委员会); Magnusson, S. (辐射安全标准委员会); Pather, T. (废物安全标准委员会); Vaughan, G.J. (核安全标准委员会)。

核安全标准委员会

阿尔及利亚: Merrouche, D.; 阿根廷: Waldman, R.; 澳大利亚: Le Cann, G.; 奥地利: Sholly, S.; 比利时: De Boeck, B.; 巴西: Gromann, A.; *保加利亚: Gledachev, Y.; 加拿大: Rzentkowski, G.; 中国: 李京喜 (Jingxi Li); 克罗地亚: Valčić, I.; *塞浦路斯: Demetriades, P.; 捷克: Šváb, M.; 埃及: Ibrahim, M.; 芬兰: Järvinen, M.-L.; 法国: Feron, F.; 德国: Wassilew, C.; 加纳: Emi-Reynolds, G.; *希腊: Camarinopoulos, L.; 匈牙利: Adorján, F.; 印度: Vaze, K.; 印度尼西亚: Antariksawan, A.; 伊朗: Asgharizadeh, F.; 以色列: Hirshfeld, H.; 意大利: Bava, G.; 日本: Kanda, T.; 韩国: Hyun-Koon Kim; 利比亚: Abuzid, O.; 立陶宛: Demčenko, M.; 马来西亚: Azlina Mohammed Jais; 墨西哥: Carrera, A.; 摩洛哥: Soufi, I.; 荷兰: van der Wiel, L.; 巴基斯坦: Habib, M.A.; 波兰: Jurkowski, M.; 罗马尼亚: Biro, L.; 俄

罗斯: Baranaev, Y.; 斯洛伐克: Uhrík, P.; 斯洛文尼亚: Vojnovič, D.; 南非: Leotwane, W.; 西班牙: Zarzuela, J.; 瑞典: Hallman, A.; 瑞士: Flury, P.; 突尼斯: Baccouche, S.; 土耳其: Bezdegumeli, U.; 乌克兰: Shumkova, N.; 英国: Vaughan, G.J. (主席); 美国: Mayfield, M.; 乌拉圭: Nader, A.; 欧盟: Vigne, S.; 欧洲原子能公司: Fourest, B.; 原子能机构: Feige, G. (协调员); 国际电力委员会: Bouard, J.-P.; 国际标准化组织: Sevestre, B.; 经济合作与发展组织核能机构: Reig, J.; *世界核能协会: Borysova, I.

辐射安全标准委员会

*阿尔及利亚: Chelbani, S.; 阿根廷: Massera, G.; 澳大利亚: Melbourne, A.; *奥地利: Karg, V.; 比利时: van Bladel, L.; 巴西: Rodriguez Rochedo, E.R.; *保加利亚: Katzarska, L.; 加拿大: Clement, C.; 中国: 杨华庭(Huating Yang); 克罗地亚: Kralik, I.; *古巴: Betancourt Hernandez, L.; *塞浦路斯: Demetriades, P.; 捷克: Petrova, K.; 丹麦: Øhlenschläger, M.; 埃及: Hassib, G.M.; 爱沙尼亚: Lust, M.; 芬兰: Markkanen, M.; 法国: Godet, J.-L.; 德国: Helming, M.; 加纳: Amoako, J.; *希腊: Kamenopoulou, V.; 匈牙利: Koblinger, L.; 冰岛: Magnusson, S. (主席); 印度: Sharma, D.N.; 印度尼西亚: Widodo, S.; 伊朗: Kardan, M.R.; 爱尔兰: Colgan, T.; 以色列: Koch, J.; 意大利: Bologna, L.; 日本: Kiryu, Y.; 韩国: Byung-Soo Lee; *拉脱维亚: Salmis, A.; 利比亚: Busitta, M.; 立陶宛: Mastauskas, A.; 马来西亚: Hamrah, M.A.; 墨西哥: Delgado Guardado, J.; 摩洛哥: Tazi, S.; 荷兰: Zuur, C.; 挪威: Saxebol, G.; 巴基斯坦: Ali, M.; 巴拉圭: Romero de Gonzalez, V.; 菲律宾: Valdezco, E.; 波兰: Merta, A.; 葡萄牙: Dias de Oliveira, A.M.; 罗马尼亚: Rodna, A.; 俄罗斯: Savkin, M.; 斯洛伐克: Jurina, V.; 斯洛文尼亚: Sutej, T.; 南非: Olivier, J.H.I.; 西班牙: Amor Calvo, I.; 瑞典: Almen, A.; 瑞士: Piller, G.; *泰国: Suntarapai, P.; 突尼斯: Chékir, Z.; 土耳其: Okyar, H.B.; 乌克兰: Pavlenko, T.; 英国: Robinson, I.; 美国: Lewis, R.; *乌拉圭: Nader, A.; 欧盟: Janssens, A.; 联合国粮食及农业组织: Byron, D.; 原子能机构: Boal, T. (协调员); 国际放射防护委员会: Valentin, J.; 国际电力委员会: Thompson, I.; 国际劳工处: Niu, S.; 国际标准化组织: Rannou, A.; 国际源供应商和生产者协会: Fasten, W.; 经济合作与发展组织核能机构: Lazo, T.E.; 泛美卫生组织: Jiménez, P.; 联合国原子辐射影响科学委员会: Crick, M.; 世界卫生组织: Carr, Z.; 世界核能协会: Saint-Pierre, S.

运输安全标准委员会

阿根廷: López Vietri, J.; **Capadona, N.M.; 澳大利亚: Sarkar, S.; 奥地利: Kirchnawy, F.; 比利时: Cottens, E.; 巴西: Xavier, A.M.; 保加利亚: Bakalova, A.; 加拿大: Régimbald, A.; 中国: 李晓清 (Xiaoqing Li); 克罗地亚: Belamarić, N.; *古巴: Quevedo Garcia, J.R.; *塞浦路斯: Demetriades, P.; 捷克: Ducháček, V.; 丹麦: Breddam, K.; 埃及: El-Shinawy, R.M.K.; 芬兰: Lahkola, A.; 法国: Landier, D.; 德国: Rein, H.; *Nitsche, F.; **Alter, U.; 加纳: Emi-Reynolds, G.; *希腊: Vogiatzi, S.; 匈牙利: Sáfár, J.; 印度: Agarwal, S.P.; 印度尼西亚: Wisnubroto, D.; 伊朗: Eshraghi, A.; *Emamjomeh, A.; 爱尔兰: Duffy, J.; 以色列: Koch, J.; 意大利: Trivelloni, S.; **Orsini, A.; 日本: Hanaki, I.; 韩国: Dae-Hyung Cho; 利比亚: Kekli, A.T.; 立陶宛: Statkus, V.; 马来西亚: Sobari, M.P.M.; **Husain, Z.A.; 墨西哥: Bautista Arteaga, D.M.; **Delgado Guardado, J.L.; *摩洛哥: Allach, A.; 荷兰: Ter Morshuizen, M.; *新西兰: Ardouin, C.; 挪威: Hornkjøl, S.; 巴基斯坦: Rashid, M.; *巴拉圭: More Torres, L.E.; 波兰: Dziubiak, T.; 葡萄牙: Buxo da Trindade, R.; 俄罗斯: Buchelnikov, A.E.; 南非: Hinrichsen, P.; 西班牙: Zamora Martin, F. 瑞典: Häggblom, E.; **Svahn, B.; 瑞士: Krietsch, T.; 泰国: Jerachanchai, S.; 土耳其: Ertürk, K.; 乌克兰: Lopatin, S.; 英国: Sallit, G.; 美国: Boyle, R.W.; Brach, E.W. (主席); 乌拉圭: Nader, A.; *Cabral, W.; 欧盟: Binet, J.; 原子能机构: Stewart, J.T. (协调员); 国际航空协会: Brennan, D.; 国际民用航空组织: Rooney, K.; 国际航空飞行员协会联合会: Tisdall, A.; **Gessler, M.; 国际海事组织: Rahim, I.; 国际标准化组织: Malesys, P.; 国际源供应和生产者协会: Miller, J.J.; **Roughan, K.; 联合国欧洲经济委员会: Kervella, O.; 万国邮政联盟: Bowers, D.G.; 世界核能协会: Gorlin, S.; 世界核运输研究所: Green, L.

废物安全标准委员会

阿尔及利亚: Abdenacer, G.; 阿根廷: Biaggio, A.; 澳大利亚: Williams, G.; *奥地利: Fischer, H.; 比利时: Blommaert, W.; 巴西: Tostes, M.; *保加利亚: Simeonov, G.; 加拿大: Howard, D.; 中国: 曲志敏 (Zhimin Qu); 克罗地亚: Trifunovic, D.; 古巴: Fernandez, A.; 塞浦路斯: Demetriades, P.; 捷克: Lietava, P.; 丹麦: Nielsen, C.; 埃及: Mohamed, Y.; 爱沙尼亚: Lust, M.; 芬兰: Hutri, K.; 法国: Rieu, J.; 德国: Götz, C.; 加纳: Faanu, A.; 希腊: Tzika, F.; 匈牙利: Czoch, I.; 印度: Rana, D.; 印度尼西亚: Wisnubroto,

D.; 伊朗: Assadi, M.; *Zarghami, R.; 伊拉克: Abbas, H.; 以色列: Dody, A.; 意大利: Dionisi, M.; 日本: Matsuo, H.; 韩国: Won-Jae Park; *拉脱维亚: Salmins, A.; 利比亚: Elfawares, A.; 立陶宛: Paulikas, V.; 马来西亚: Sudin, M.; 墨西哥: Aguirre Gómez, J.; *摩洛哥: Barkouch, R.; 芬兰: van der Shaaf, M.; 巴基斯坦: Mannan, A.; *巴拉圭: Idoyaga Navarro, M.; 波兰: Wlodarski, J.; 葡萄牙: Flausino de Paiva, M.; 斯洛伐克: Homola, J.; 斯洛文尼亚: Mele, I.; 南非: Pather, T. (主席); 西班牙: Sanz Aludan, M.; 瑞典: Frise, L.; 瑞士: Wanner, H.; *泰国: Supaokit, P.; 突尼斯: Bousselmi, M.; 土耳其: Özdemir, T.; 乌克兰: Makarovska, O.; 英国: Chandler, S.; 美国: Camper, L.; *乌拉圭: Nader, A.; 欧盟: Necheva, C.; 欧洲核设施安全标准: Lorenz, B.; *欧洲核设施安全标准: Zaiss, W.; 原子能机构: Siraky, G. (协调员); 国际标准化组织: Hutson, G.; 国际源供应商和生产者协会: Fasten, W.; 经济合作与发展组织核能机构: Riotte, H.; 世界核能协会: Saint-Pierre, S。

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