



IAEA

国际原子能机构

国际原子能机构安全标准

第 SSG-1 (Rev.1) 号

保护人类与环境

放射性废物钻孔 处置设施

特定安全导则

国际原子能机构安全标准和相关出版物

国际原子能机构安全标准

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

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

有关国际原子能机构安全标准计划的资料可访问以下国际原子能机构因特网网站：

www.iaea.org/zh/shu-ju-ku/an-quan-biao-zhun

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。

放射性废物钻孔处置设施

国际原子能机构成员国

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

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 (Rev.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内容。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 11 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 11 月
STI/PUB/2057
ISBN 978-92-0-524524-9（简装书：碱性纸）
978-92-0-524624-6（pdf 格式）
EPUB 978-92-0-524724-3
ISSN 1020-5853

前 言

拉斐尔·马里亚诺·格罗西总干事

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

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

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

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

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

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

国际原子能机构安全标准

背景

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

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

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

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

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

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

原子能机构安全标准

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

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

安全措施和安保措施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）。

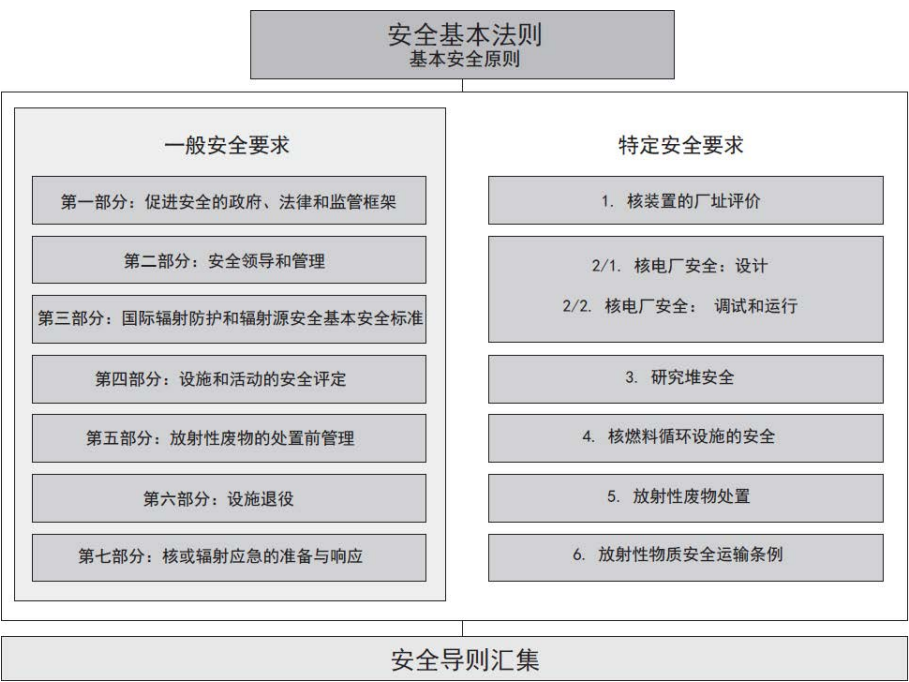


图 1. 国际原子能机构《安全标准丛书》的长期结构。

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。

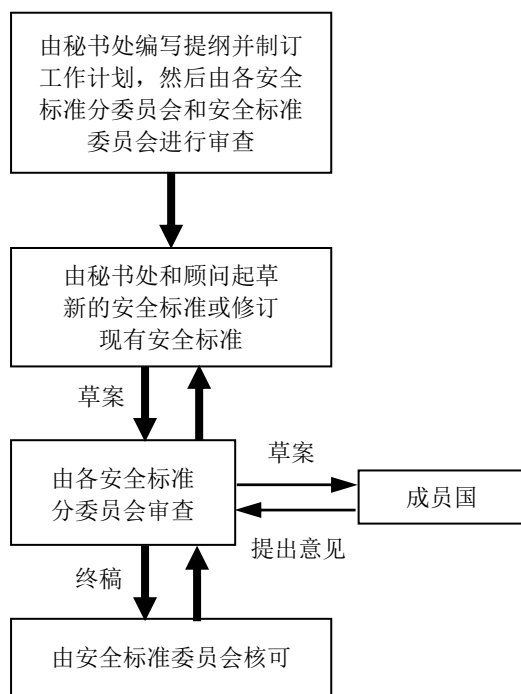


图 2. 制订新安全标准或修订现行标准的过程。

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 (1.1-1.3).....	1
目的 (1.4-1.5).....	2
范围 (1.6-1.12).....	2
结构 (1.13).....	3
2. 钻孔处置及其实施的概况	4
废弃密封放射源的钻孔处置 (2.1-2.28).....	4
其他钻孔处置概念 (2.29)	12
3. 钻孔处置基础设施法律和组织 (3.1).....	12
政府的责任 (3.2-3.8).....	12
监管机构的责任 (3.9-3.28).....	15
营运组织的责任 (3.29-3.43).....	20
4. 钻孔处置设施安全方法	23
安全在钻孔处置设施开发和运行中的重要性 (4.1-4.11)	23
钻孔处置设施的非能动安全手段 (4.12-4.14).....	26
对钻孔处置设施的了解和对安全信心 (4.15-4.22)	27
多重安全功能 (4.23-4.28).....	29
放射性废物的包容 (4.29-4.32).....	31
放射性废物的隔离 (4.33-4.37).....	32
非能动安全特点的监视和控制 (4.38-4.39).....	33
钻孔处置设施的循序渐进开发与评价 (4.40-4.48)	33
5. 钻孔处置设施安全论证文件和安全评定 (5.1-5.2)	35
安全论证文件和安全评定的准备、批准和使用 (5.3-5.10)	35
安全论证文件和安全评定的范围 (5.11-5.45).....	37
安全论证和安全评定的文件 (5.46-5.60).....	48
6. 开发钻孔处置设施的方法 (6.1).....	51
钻孔处置放射性废物的处置前管理 (6.2-6.13)	51
钻孔处置设施场址表征 (6.14-6.21).....	54
钻孔处置设施的设计 (6.22-6.37).....	56
钻孔处置设施的建造 (6.38-6.48).....	60
钻孔处置设施的调试 (6.49)	62

钻孔处置设施的运行 (6.50-6.78).....	62
钻孔处置设施的关闭 (6.79-6.83).....	70
7. 钻孔处置设施的安全保证	70
钻孔处置设施监控计划 (7.1-7.11).....	70
关闭后的时期和机构控制 (7.12-7.21).....	72
核材料的衡算和控制 (7.22-7.27).....	75
管理安全和安保之间的接口 (7.28-7.35).....	76
管理系统 (7.36-7.38).....	77
核或辐射紧急情况的准备和响应 (7.39-7.44).....	78
8. 现有钻孔处置设施 (8.1-8.7)	79
附录 I 钻孔处置设施选址和场址表征	81
附录 II 钻孔处置设施关闭后一般安全评定	93
参考文献	97
附件 I 其他钻孔处置概念	103
附件 II 处置深度	107
参与起草和审订人员	109

1. 引言

背景

1.1. 本“安全导则”就放射性废物钻孔处置设施的开发（即选址和评定、设施设计和建造）、调试、运行、关闭、机构控制和监管提出建议，以满足原子能机构《安全标准丛书》第 SF-1 号《基本安全原则》[1]确立的安全原则和相关安全要求，特别是原子能机构《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》[2]确立的安全要求，第 GSR Part 5 号《放射性废物的处置前管理》[3]和第 SSR-5 号《放射性废物的处置》[4]。本“安全导则”考虑的放射性废物类型包括已被宣布为放射性废物的废弃密封放射源¹，以及在管理这些放射源期间产生的少量低水平和中水平次生废物²。

1.2. 本“安全导则”替代 2009 年 12 月发布的原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-1 号³。自公布以来，对相关安全要求进行了修订，并对废弃密封放射源的钻孔处置进行了重大的进一步研究和开发，为会员国实施这种处置做准备。已在一个会员国获得了钻孔处置废弃密封放射源的许可，其他地方正在进行钻孔处置示范项目，还有几个国家积极有意发展自己的废弃密封放射源钻孔处置设施。因此，现在适时地提出适当反映原子能机构当前安全状况的订正建议关于第 1.1 段所述放射性废物类型的钻孔处置的标准和知识状况。

¹ 废弃密封放射源是指一种放射源，包括永久密封在胶囊中或紧密结合的固态形状的放射性物质（不包括反应堆燃料元件），不再用于也不打算用于已获授权的实践[5]。

² 在有一个窄直径处置钻孔的钻孔处置设施，这种次生废物的总体积预计少于 1 立方米，即小到足以用几个废物货包处置。在同一钻孔处置设施处置次生废物的目的是让废弃密封放射源库存较少的国家可以选择在一个地方处置所有废物，从而避免留下可能的遗留物，包括没有处置途径的少量废物。

³ 国际原子能机构《放射性废物钻孔处置设施》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-1 号，国际原子能机构，维也纳（2009 年）。

1.3. 纳入本“安全导则”的修改反映了最近关于第 1.1 段所述放射性废物钻孔处置的研究和发展、研究和示范项目。安全导则也已更新，以便与原子能机构现行安全标准保持一致。本“安全导则”符合《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》[6]、《放射源安全和安保行为准则》[7]以及《弃用放射源管理手册》[8]。

目的

1.4. 本“安全导则”的目的是就废弃密封放射源的钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭、机构控制和监管提供建议，这些放射源已被宣布为放射性废物，以及在管理这些放射源期间产生的少量中低水平次生废物，以满足 GSR Part 3[2]、GSR Part 5[3]和 SSR-5[4]包含的安全要求。本“安全导则”还可用作再评定和酌情提高现有钻孔处置设施安全的基础。

1.5. 本“安全导则”补充了原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-29 号《放射性废物近地表处置设施》[9]和 SSG-14《放射性废物地质处置设施》[10]。

范围

1.6. 本“安全导则”提供了关于废弃密封放射源钻孔处置设施的建议，这些放射源已被宣布为放射性废物，以及在管理这些放射源期间产生的少量中低水平次生废物。本“安全导则”未就废弃密封放射源管理期间未产生的其他中、低放射性废物或高放射性废物的钻孔处置提供建议。⁴

1.7. 第 1.1 段所述放射性废物的钻孔处置，可成为任何国家实现保护人类和环境免受电离辐射有害影响这一基本安全目标的国家政策和战略的合理组成部分。然而，钻孔处置特别适合废物数量有限的国家（或区域国家集团）。

1.8. 有可能开发各种设计的安全钻孔处置设施，并采用各种废物处理和整备方法，例如具有各种数量的钻孔或各种直径的钻孔设施。本“安全导则”没有规定要使用的处置方法，但规定了钻孔处置设施的开发、调试、

⁴ 在原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-1 号《放射性废物的分类》[11]，被宣布为放射性废物的乏燃料被列入高放废物。GSG-1[11]附件 III 指出，高活度废弃密封放射源（例如 1 PBQ CS-137 源）不会被归类为高放废物，因此属于本“安全导则”的范围。

运行、关闭和机构控制的灵活度，以适应特定的废物和所面临的情况，只要安全得到保证并在设施安全论证文件中得到证明。然而，在提供钻孔处置建议时，本“安全导则”确实描述了一个参考钻孔处置概念，涉及第 1.1 段所述放射性废物的整备和处置。使用水泥基和不锈钢工程屏障和窄直径钻孔（见第 2.12—2.19 段）。此外，根据各国的经验，本“安全导则”侧重于在足够深度的钻孔处置，结合其他因素，避免因人类意外侵入而对安全产生不利影响。⁵

1.9. 在本“安全导则”，假设原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-6(Rev.1) 号《放射性物质安全运输条例》(2018 年版) [12] 定义的放射性物质运输按照 SSR-6 (Rev.1) [12] 规定的要求进行。

1.10. 本“安全导则”涉及第 1.1 段所述废物的处置前管理及其在钻孔处置设施中的处置两者之间的相互依赖。安全导则涉及钻孔处置设施的运行安全和关闭后安全。

1.11. 人们认识到，放射性废物处置是在更广泛的背景下进行的，涉及对金融、经济和社会问题的考虑，常规安全、安保和计划问题,以及防止暴露于非电离辐射相关的环境保护方面。虽然这些更广泛的问题在本“安全导则”没有特定说明，但在附录 I 第 I.7 段提供了一些信息。

1.12. 本“安全导则”旨在供参与实施和管理第 1.1 段钻孔处置设施所述放射性废物安全处置的人员使用。

结构

1.13. 第 2 部分概述了钻孔处置，并描述了第 1.1 段确定的废物的参考钻孔处置概念；第 3 部分提供了关于满足法律和组织基础设施要求的建议；第 4 部分和第 5 部分着重于如何达到和证明足够的安全水平；第 6 部分提供了关于开发钻孔处置设施的建议；第 7 部分就提供额外安全保证的措施提出了建议；第 8 部分涉及现有的钻孔处置设施。这两个附录补充了关于钻孔处置设施选址和场址表征以及钻孔处置设施的一般关闭后安全评定的正文。这两个附件涉及其他钻孔处置概念和处置深度。

⁵ 放射性废物处置设施包括地下几十米深处的岩洞、筒仓和隧道，这些设施靠近地表处置设施[4]，SSG-29[9]提供了关于这些设施的建议。

2. 钻孔处置及其实施的概况

废弃密封放射源的钻孔处置

2.1. SSR-5[4]第 1.6 段指出：

“管理所有放射性废物的首选策略是将其加以控制（即将放射性核素密封在废物基质、包装和处置设施内），并将其与可进入的生物圈隔离开来。”

2.2. SSR-5[4]第 1.10 段指出（脚注略）：

“处置的特定目的是：

- (a) 控制废物；
- (b) 将废物与可进入的生物圈隔离开来，并大大减少人类意外侵入废物的可能性和所有可能的后果；
- (c) 随时抑制、减少和延缓放射性核素从废物迁移到可进入的生物圈；
- (d) 确保因处置设施的任何迁移而到达可进入生物圈的放射性核素数量，使其可能产生的放射性后果在任何时候都低到可接受的程度。”

2.3. 原子能机构安全标准就放射性废物的三种处置计划提出了建议⁶：近地表处置⁷、钻孔处置和地质处置。安全是通过结合自然和工程屏障来实现的，这些屏障提供了足够的废物包容和隔离以满足安全要求，从而确保对人类和环境的充分保护。

2.4. 在钻孔处置，应当通过多屏障系统提供包容和隔离，该系统的每个元件在不同的时间范围内履行一项或多项安全功能。应当选择宿主地质环境和处置深度，以便处置设施提供必要的包容和隔离。例如，废物处置区应当不位于含水层内（见第 6.44 段）。除其他外，应当通过减少人类意外侵入的可能性来提供隔离。

⁶ 处置是指在没有回收意图的情况下将废物放置在适当的设施中[5]。

⁷ 近地表处置设施包括地表和地下几十米深处的处置设施（见 SSG-29[9]）。

2.5. 钻孔处置设施必须符合适用于所有处置设施的安全要求和标准。根据 SSR-5[4], 营运组织⁸ 需要制定一个场址特定的安全论证文件, 包括安全评定, 以评价和证明设施的安全, 并确定可以在设施中安全处置的放射性废物的类型和数量。安全评定必须符合 SSR-5[4]和原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 4 (Rev.1) 号《设施和活动的安全评定》[13]规定的要求。

2.6. 钻孔处置为废物处置的可能深度提供了灵活性(见第 4.33—4.36 段); 钻孔可以进入的深度范围可以从地表向下延伸到通常与地质处置设施相关的深度⁹。在确定某一特定设施处置放射性废物的选定深度时, 应当考虑到以下因素: 需要减少人类意外侵入的可能性(例如通过关闭后的一段时间的机构控制)、废物的性质(例如放射性核素的活度和半衰期、废物货包和废物形状的耐久性)、宿主地质的适宜性、水文地质和水文地球化学条件、气候和其他地表相关过程的可能影响(例如侵蚀)以及安全评定的结果。本“安全导则”的前一版依据 1987 年的一份报告[14], 其中规定了放射性废物在地下处置的建议最小深度为 30 米钻孔处置设施。当时, 30 米被认为是人类侵入仅限于钻探和重大挖掘活动的深度, 如隧道挖掘、采石和采矿[14]。然而, 自参考文献[14]发表以来, 高层建筑和其他基础设施的建设取得了重大进展, 深度超过 30 米的其他类型的挖掘已经司空见惯。鉴于这些发展以及成员国的实践和经验(见附件 II), 并鉴于钻窄直径钻孔既容易又便宜(与废物处置计划的总成本相比), 本“安全导则”建议钻孔处置的最小深度为几十米¹⁰。

⁸ 营运组织是指申请授权或被授权经营经授权的设施或进行经授权的活动并对其安全负责的任何组织或个人。除其他外, 这包括私人、政府机构、托运人或承运人、许可证持有人、医院和自营职业者[5]。许可证持有人是现行许可证持有人。许可证持有人是对设施或活动负有全面责任的个人或组织[5]。虽然营运组织不一定是许可证持有人(例如, 营运组织可以是供应链组织), 但在实践中, 对于授权设施, 营运组织通常也是注册人或许可证持有人。然而, 保留了单独的术语来指代两种不同的能力[5]。

⁹ 地质处置涉及在地面以下至少几百米的设施中进行处置(见 SSR-5[4])。

¹⁰ 无法提供精确的单一最小深度值。这里使用“几十米”术语是指建议的最小深度大于“几十米”(例如 30—50 米)和“几十米”(例如 50—80 米)。

2.7. 特定场址的钻孔处置设施可以包括一个或多个钻孔。在确定钻孔数量时，应当考虑到待处置废物的库存（废物货包的数量和总长度及其在钻孔中的间距）以及第 2.6 段识别的因素。每个钻孔都应当安装套管，套管密封在钻孔底部，以提供合适且定义明确的处置体积。关于处置钻孔套管的更多信息见参考文献[15]以及本“安全导则”第 2.14 段、第 6.34 段、第 6.44 段和第 6.46 段。应当考虑到场址的特征、钻孔和操作的实用性、钻孔之间相互作用的可能性以及安全评定的结果，优化钻孔之间的间距。

2.8. 废物货包是整备废物的产物，包括一个或多个废物容器。营运组织应当使用适合钻孔处置设施的废物货包。待处置废物货包的大小、钻孔的直径和废弃密封放射源的大小应当一致。回填材料应用于填充废物货包内部的空间、废物货包外部钻孔中的空间以及钻孔套管和宿主地质之间的空间。废物货包、回填、宿主地质环境和周围岩石应当提供一个多重屏障系统，确保放射性废物的安全和可持续管理解决方案。

2.9. 根据 SSR-5[4]要求 5，处置设施的安全必须尽可能通过非能动手段来确保，设施关闭后需要采取的行动必须是被最小化。营运组织应当设计钻孔处置设施，通过处置系统部件的固有特征（即废物货包、回填材料和宿主地质环境）以非能动方式提供安全，并且在场址解除监管控制后无需采取任何行动来确保安全。第 7 部分提供了关于钻孔处置设施监控的建议。

2.10. 在计划废物处置时，应当考虑到需要处置的废物数量以及现有和计划处置设施的能力和规模。钻孔处置设施是通过钻孔建造的，因此，其几何构型通常适合于相对较小体积的放射性废物，而不是可以在近地表或地质处置设施中处置的体积。¹¹

2.11. 营运组织应当优化钻孔处置设施的设计，以便结合适当的设施选址（见第 6.14—6.21 段和附录 I）和在足够深度的处置，在钻孔中处置的放射性废物不太可能受到人类意外侵入（见 SSR-5[4]第 5.10 段）或废物返回地表的其他潜在原因的影响。

¹¹ 钻孔处置设施接收整备放射性废物的容积能力受到适合安全处置的宿主岩石中钻孔的直径和长度的限制。这里的“小体积”术语是指明显小于近地表处置设施中处置的数千至数十万立方米废物的体积。不一定可以假定废弃密封放射源事故产生的放射性废物（例如发生在巴西戈亚尼亚的事故，该事故产生了大约 3500 立方米的放射性废物[16]）可以通过钻孔处置进行处置。

废弃密封放射源的钻孔处置参考概念

2.12. 本部分概述了第 1.1 段所述放射性废物处置的参考概念，涉及使用广泛可用的钻孔技术钻探的一个或多个垂直钻孔。其他钻孔处置概念在第 2.29 段和附件 I 描述。本部分中描述的尺寸和材料用于参考钻孔处置概念，它们可以而且应当加以调整，以满足其他钻孔处置概念的安全要求。参考文献[15、17—20]提供了参考钻孔处置概念的更多细节。

2.13. 参考文献[15]介绍了钻孔中废弃密封放射源处置的概念。这一概念是为没有大规模核计划或大型放射性废物处置计划（例如，包括开发大型地质处置设施）的国家设计的一个可行选择，同时认识到相关的安保问题、各国根据《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》[6]和《放射源安全和安保行为守则》[7]建议承担的义务，以实施安全处置解决方案，从而保护人类（今世后代）和环境。尽管自参考文献[15]发表（见文献[17、18]）以来，钻孔处置概念得到了改进，但它基本上保持不变，并已成为参考钻孔处置概念。总之，参考钻孔处置概念需要将已被宣布为放射性废物的废弃密封放射源，以及在管理这些放射源期间可能产生的少量低水平和中水平次生废物，放置在从地面钻探和操作的适当位置的钻孔处置设施中。

2.14. 在参考钻孔处置概念，假设钻孔是垂直和直的，直径为 260 毫米，应当足够大到包容钻孔套管、回填和废物货包。可以钻 260 毫米直径孔的钻机随处可见，因为这种尺寸的钻孔通常用于取水。在参考钻孔处置概念，使用高密度聚乙烯管将钻孔套管至全深度，其目的是便于操作，例如将废物货包放入钻孔中。在参考钻孔处置概念，对中器放置在钻孔侧壁和套管之间以确保套管位于钻孔中心，并提供均匀的间隙，用于放置回填灌浆（水泥浆）[15]。在参考钻孔处置概念，套管底部用水泥基塞子密封，这与钻孔侧壁和套管外部之间的环空中的水泥基回填一起，防止了地下水的进入，从而促进了废物放置操作。参考钻孔处置概念中使用的水泥基材料包括最大粒径为 4 毫米的抗硫酸盐波特兰水泥和沙子可以使用替代材料（如套管、水泥或回填材料），但在所有情况下，营运组织都应当考虑材料的预期用途、安全功能和在处置系统条件下的性能，证明材料的选择是正当的。

2.15. 在参考钻孔处置概念，废弃密封放射源被放置在不锈钢处置胶囊内，该处置胶囊通过完全焊接在不锈钢盖上而封闭[15]。焊缝的厚度应当至少与处置胶囊壁一样厚，并且应当试验焊缝是否有泄漏。在参考钻孔处置概念，

包含放射源的密封处置胶囊然后被放置在不锈钢废物容器内的预制水泥基插入物中。在参考钻孔处置概念，水泥基插入物包括两部分：较大的主体部分和盖子。使用少量液体灌浆（水泥浆）将插入物的盖子固定到插入物主体上，液体灌浆将凝固。在参考钻孔处置概念，废物容器通过完全焊接在不锈钢盖上而封闭[15]。焊缝应当至少与废物容器壁一样厚。中低水平废弃密封放射源管理过程中产生的次生废物被放置在不锈钢废物容器内，废物容器通过焊接在不锈钢盖上而封闭。焊缝应当至少与废物容器壁一样厚。可以使用替代材料和设计（例如胶囊、插入物或容器），但在所有情况下，营运组织都应当证明材料的选择和处置设施部件的设计是正当的，同时考虑到它们的预期目的、安全功能和在处置系统条件下的性能。处置胶囊、插入物和废物容器的直径和长度应当适应待处置源的大小，并考虑到钻孔和套管的直径。

2.16. 用于处置胶囊和容器及其盖子的不锈钢成分应当相同，以避免发生电偶腐蚀等过程的可能性。参考文献[15]描述的不锈钢类型是 316L 不锈钢。处置胶囊和容器的不锈钢和其他材料的选择应当适合待处置的废弃密封放射源和放射性废物（例如，就其产生热量和引起水辐解的潜力而言见附录 II）。

2.17. 在参考钻孔处置概念，废物货包被放置在钻孔，并且使用水泥基回填填充钻孔中废物货包周围的空间。营运组织应当通过考虑废物货包的数量和长度以及它们之间的空间大小来确定所需处置区的总长度。营运组织应当考虑所需处置区的总长度和宿主岩石的特征，确定所需钻孔和处置区的数量，以及处置区的位置和深度。

2.18. 图 1 展示了一个有两个钻孔的废弃密封放射源处置设施的示例，插图突出展示了处置区中存在的部件。

2.19. 在参考钻孔处置概念，应当将钢偏转板（在图 1 显示为红色三角形）插入最上面废物货包上方的钻孔中。该偏转板（在参考文献[15]称为防侵入板。）的设计和放置应当防止钻头在有人钻孔时撞上废物货包。在其他钻孔处置概念，营运组织应当考虑在必要时安装偏转板和其他工程部件，以降低人类侵入的可能性。在参考钻孔处置概念，偏转板上方的钻孔部分用水泥基回填物填充至距离地面数米以内，回填物上方的钻孔顶部用土壤填充，以便钻孔没有特殊设备是检测不到的[15]。可以使用不同的材料和深

度间隔，但在所有情况下，营运组织都应当证明材料的选择和处置设施部件的设计是正当的，同时考虑到它们的预期目的、安全功能和在处置系统条件下的性能。例如，根据场址的特定条件，营运组织可以考虑使用粘土基回填。

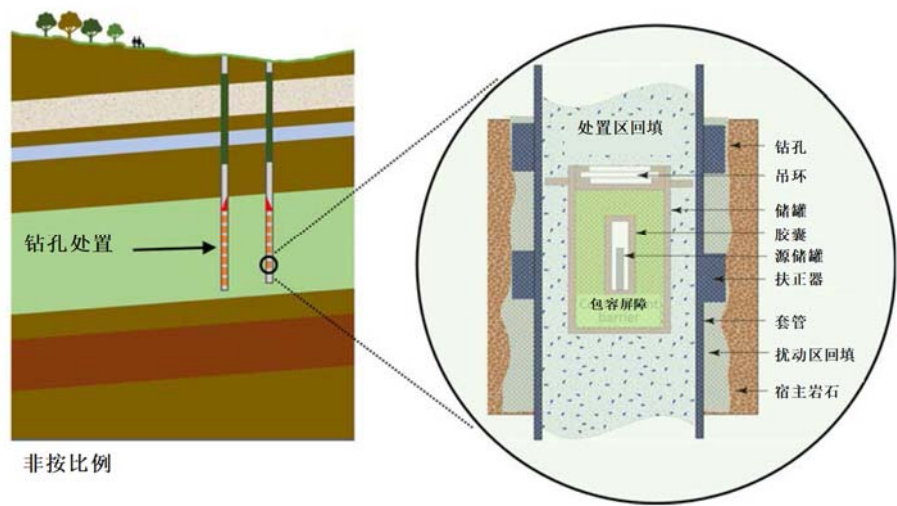


图 1. 废弃密封放射源的钻孔处置系统示例

废弃密封放射源的钻孔处置时期

2.20. 根据 SSR-5[4]要求 11，在开发处置设施时需要遵循循序渐进的方法。开发钻孔处置设施的计划（包括场址表征和选择、安全论证文件制定、与相关各方的互动和授权）可能需要几年到十年的时间来实施。然而，一旦必要的授权程序完成，处置钻孔的运行和关闭不太可能持续超过几个月至每年。循序渐进的方法应当包括正式阶段，在此阶段，在作出进展决定之前，对计划进行评审和安全评定。这种循序渐进的方法可以逐渐增强对安全的信心，并有助于确保决策有充分的依据。监管机构应当在每个主要决策点进行评审。这些评审还为独立的技术评审和相关各方的参与提供了机会。

2.21. 营运组织应当确保循序渐进开发设施的过程具有足够的灵活度，使处置计划能够根据可获得的新的科学和技术信息进行调整。在钻孔处置设施的整个开发、调试、运行、关闭和机构控制过程，营运组织和监管机构应当符合分级方法，以便所付出的努力和所采用的控制措施与废物的危害和风险水平相称。参考文献[20]提供了如何将分级方法应用于钻孔处置的关闭后安全评定的信息。

2.22. 将放射性废物处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制分为三组是方便的，即运行前（或开发）期、运行期和关闭后期（见 SSR-5[4] 第 1.22 段）。在这三个时期进行各种活动，主要取决于处置概念。以下小节描述了钻孔处置期间应当进行的活动。

运行前时期

2.23. 运行前时期包括在场址接收废物之前可以进行的所有活动。这些活动的范围应当反映该国的情况，并可包括废物表征，待处置废物库存的定义，处置场址勘察、表征和选址，场址特定处置设施设计，制定安全论证文件和安保计划，监管评审和授权，以及建造。废物表征和贮存处置处理可在本国其他场址的授权设施进行。在此期间，营运组织应当制定其管理系统和处置设施场址安全论证文件的那些方面，以获得钻孔处置设施的授权。营运组织应当在必要时进行环境影响评定研究，并应当根据国家、法律和监管框架为设施制定安全论证文件，其中包括适当的安全评定（包括运行和关闭后的安全评定）。

运行时期

2.24. 运行时期从获得授权后开始。由于废物管理活动在此期间可能导致辐射照射，这些活动需要得到监管机构的授权，并根据 GSR Part 3[2] 和 GSR Part 5[3]规定的辐射防护和辐射源安全要求进行控制。营运组织应当根据原子能机构《安全标准丛书》第 WS-G-6.1 号《放射性废物的贮存》[21]和第 SSG-45 号《医药、工业、农业、研究和教育中使用放射性物质产生的放射性废物的处置前管理》[22]提供的建议开展处置前管理活动。

2.25. 在某些情况下，场址收到的废物已经过处理。一旦通过了适用的废物验收程序，并经历了必要的缓冲贮存期，这些废物可以立即放置。如果在场址收到的废物尚未经过处理，营运组织应当采取必要的处置前管理活动（例如拆除含有废弃密封放射源的设备、移走废弃密封放射源、进行整備），使用适当的设施并符合适当的程序。营运组织应当以避免任何排放的方式设计和进行废物处理活动¹²。如果排放无法避免，营运组织应当确保排放符合既定标准和要求。处置设施可以是固定的，也可以是移动的。原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.9 号《放射源的分类》[23]承认 5 个放射源的类别。热室设施，如参考文献[24]所述。通常具有足够的屏蔽，可用于处理所有 5 类废弃密封放射源。第 3—5 类废弃密封放射源的处理可以安全地进行，比第 1 类和第 2 类放射源的屏蔽更少，并且可以使用参考文献[24]描述的设施进行。无论使用哪种设施，营运组织都应当提供足够的屏蔽，以确保对工作人员的保护与废物的性质相适应，如有必要，包括屏蔽 γ 射线和中子源。营运组织应当在场址提供适当的贮存设施，以促进废物管理过程。

2.26. 钻孔处置设施的运行包括处理废物货包、将废物货包放置在钻孔中、放置工程屏障（如钻孔回填、密封、防侵入屏障）及关闭设施。营运组织必须按照 SSR-5[4]规定的要求进行所有这些活动。

2.27. 为了符合原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 2 号《安全领导和管理》[25]规定的要求，所有运行都应当由合格和有经验的人员根据适当的管理系统进行，并根据明确的运行程序进行培训（另见原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-16 号《放射性废物管理中的安全领导、管理和文化》[26]）。应当建立可追溯的记录，描述和表征场址、设施、放射性废物和所开展的废物管理活动。应当在管理系统中规定要记录的信息范围和详细程度，同时考虑到分级方法。应当保留和控制与放射性废物管理相关的重要安全信息。根据原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 6 号《设施退役》[27]，运行期间使用的钻孔以外的设施需要退役。

¹² 排放是指（通常是气态或液态）放射性物质向环境的有计划和有控制的排放[5]。

关闭后时期

2.28. 关闭后时期在钻孔处置设施关闭后立即开始。根据 SSR-5[4]要求 5，设施关闭后，钻孔处置设施的安全需要由场址和设施特征中固有的非能动特点来提供。某些形式的机构控制在关闭后可以继续，最初这些可能是能动控制（例如，维护场址安保、监控（见第 7.14 段）），但能动控制不能无限期地维持，因此是非能动机构控制在以后变得更加重要。例如，非能动机构控制可能包括对土地使用的行政限制，这提供了额外的保证，即人类意外侵入是不可能的。处置设施的授权应当在相关技术、法律和财务要求得到满足后终止。

其他钻孔处置概念

2.29. 还提出了其他几个概念，涉及利用钻孔贮存或处置放射性废物，其中一些概念已用于各种类型的放射性废物（见附件 I）。根据本“安全导则”的目标和范围，附件 I 描述的钻孔处置概念适用于第 1.1 段确定的废物类型以外的废物类型没有进一步详细考虑，尽管所提供的信息可能具有普遍意义。本“安全导则”提供的建议，尤其是第 8 部分提供的建议，应当被视为再评定和酌情提升现有钻孔处置设施安全的基础，这些设施含有第 1.1 段确定的废物类型。

3. 钻孔处置基础设施法律和组织

3.1. 钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制的责任由三类组织承担：国家政府、指定的监管机构和设施的营运组织。

政府的责任

3.2. 政府必须按照原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 1（Rev.1）号《政府、法律和监管安全框架》[28]要求 1 的规定，制定国家安全政策和战略。此外，GSR Part 5[3]要求 2 规定（参考文献略）：

“为确保有效管理和控制放射性废物，政府必须确保制定放射性废物管理的国家政策和战略。政策和战略必须适合本国放射性废物的性质和数量，必须指明所需的监管控制，并必须考虑相关的社会因素。政策和战略必须符合基本安全原则以及国家批准的国际文书、公约和准则。国家政策和战略必须构成放射性废物管理方面决策的基础。”

3.3. 在制定放射性废物管理国家政策和战略时，政府的责任包括：

- (a) 建立和实施一个决策程序，以指定一个作为放射性废物的废弃密封放射源（见参考文献[8]）。
- (b) 编写和维持一份关于放射性废物（包括宣布为放射性废物的废弃密封放射源）的全面国家库存。
- (c) 确保识别放射性废物管理的首选方案（见 GSR Part 5[3]第 3.5 段）。
- (d) 确保适当考虑到废物管理各步骤之间的相互依存关系。
- (e) 确保避免长期贮存尚未申报为放射性废物的废弃密封放射源。
- (f) 制定符合国家总体放射性废物管理计划¹³（见参考文献[8]）的被指定为放射性废物的废弃密封放射源处置计划。
- (g) 确保考虑到国家对于一个或多个放射性废物处置设施的需要，并考虑到可能视国家内废弃密封放射源和其他放射性废物的库存情况而定。¹⁴
- (h) 确保在为废弃密封放射源和其他放射性废物选择适当类型的处置设施时，安全是最重要的考虑因素。应当考虑的其他因素包括该国废弃密封放射源和其他放射性废物的库存、运输放射性物质的潜在需求以及相关的社会经济因素。
- (i) 确保许可证持有人拨用于安全的资源，以及法规及其应用的范围和严格程度，与辐射危害的程度及其易于控制的程度相称（见 SF-1[1]第 3.24 段）。¹⁵

¹³ 在放射性废物管理计划，一组相关的废物管理项目以协调的方式管理，并有一个特定的长期目标，以获得单独管理项目无法获得的利益和控制。

¹⁴ 例如，在一些国家，处置废弃密封放射源的国家战略可能包括使用一个或多个钻孔处置设施，在另一些国家，可能包括对低放射性废物的近地表处置和对废弃密封放射源的钻孔处置，而在另一些国家，可能包括对低放射性废物和一些短期废弃密封放射源的近地表处置，以及对其他废弃密封放射源和废物的地质处置。

¹⁵ 各国废弃密封放射源的数量各不相同，有些国家只有几个放射源，另一些国家则远远超过 10 万个放射源。据估计，对废弃密封放射源进行整备所产生的包装放射性废物的体积从典型的小国的不到 10 立方米到一些大国的几百立方米不等。虽然与一些国家存在的其他废物类型的体积相比，这些体积相对较小，但与一些废弃密封放射源相关的危害可能非常高。

3.4. SSR-5[4]要求 1 规定：

“要求政府建立和维持一个适当的政府、法律和安全监管框架，在此框架内，对拟选址、设计、建造、运行和关闭的放射性废物处置设施作出明确的责任分配，其中包括：在国家一级确认对不同类型处置设施的需要，特定说明不同类型设施的开发和许可证发放的步骤，以及与计划处置设施相关的责任分配、财务和其他资源的获取以及独立监管职能的提供。”

3.5. 根据 SSR-5[4]要求 1—3，政府、法律和监管框架必须包括以下内容：

- (a) 建立或确定对钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制负有法律责任的组织；
- (b) 为参与钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制的组织规定明确界定的法律、技术和财务责任；
- (c) 确保财务拨款的充足和保障，例如，要求钻孔处置设施的营运组织为关闭设施和随后由它们负责的任何控制措施设立资金；
- (d) 界定钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制的总体程序，包括每一步骤的法律和监管要求，以及决策程序和相关各方的参与；
- (e) 界定法律、技术和财务责任，并在必要时规定处置设施关闭后设想的任何机构安排，包括监控和确保处置废物的核安保；
- (f) 建立一个监管机构，负责监督处置前废物管理设施和钻孔处置设施；
- (g) 确保营运组织和监管机构都能获得必要的科学和技术专门知识（例如来自国家卫生、辐射防护、地质、水文学和其他相关学科的专门知识）。

3.6. GSR Part 1 (Rev.1) [28]要求 4 规定：

“政府必须确保监管机构在安全相关决策方面有效独立，并与可能对其决策产生不当影响的责任或利益实体保持功能分离。”

3.7. 为满足这一要求，政府应当确保监管机构具备专门知识，能够在评价钻孔处置设施的处置前废物管理和处置活动时提供适当的监督和客观性，并确保在充分独立监管机构内工作的个人不受废物产生者和营运组织的影响。政府应当进行定期评审，以评价监管机构的有效性及其履行使命的能力。

3.8. 政府应当确保直接或间接受到钻孔处置设施和活动影响的相关各方参与适当阶段的决策。应当建立一个明确、正式的程序来确定相关各方和决策者，以促进有意义的信息和观点交流。相关各方参与第 1.1 段所述放射性废物钻孔处置决策过程的方式。将根据国家法律、法规和喜好而有所不同。相关各方参与决策框架的制定可以鼓励公众对政府行动的信心，使监管机构更加有效，并提高营运组织的安全绩效。

监管机构的责任

3.9. 监管机构必须确保制定和维护一份全面的密封放射源国家登记册（见 GSR Part 1（Rev.1）[28]第 4.63 段）。

3.10. GSR Part 5[3]要求 3 确立了关于监管机构对放射性废物管理设施和活动责任的一般要求，而 SSR-5[4]要求 2 规定：

“监管机构必须为开发不同类型的放射性废物处置设施制定监管要求，并必须规定满足许可证程序各个阶段要求的程序。它还必须为每个单独处置设施的开发、运行和关闭设定条件，并必须开展必要的活动以确保满足这些条件。”

3.11. 监管机构应当制定并实施一个有效的流程，为钻孔处置设施的开发制定监管要求，并应当让相关各方参与该流程。监管要求应当在任何授权申请之前建立。监管要求应当涵盖钻孔处置设施和活动的开发、调试、运行、关闭和机构控制的所有阶段，应当特定说明哪些原则、要求和标准将用于监管设施和活动，并应当要求营运组织制定在不符合、事件和事故情况下应当采取的措施。参考文献[29]提供了钻孔处置的示范规则。

3.12. 监管机构应当就如何实施监管要求、营运组织在申请授权和提交安全论证文件时应当符合的程序以及安全论证文件和授权申请的监管评审和评定的可能时间表提供指导。监管机构应当确保监管要求既全面又与监管控制下的设施和活动的规模和潜在危害相称。

3.13. 监管机构应当定义并遵循钻孔处置设施授权的循序渐进方法。监管机构应当尽可能鼓励营运组织在安全论证文件中及其授权申请的每个步骤中完整描述处置计划，以便处置计划的早期步骤可以被视为与后期步骤兼容，并且监管机构在评审设施开发过程初始步骤的申请时被告知设施的长期安全。

3.14. 监管机构在完成对相关授权申请和安全论证文件的监管评审和评定之前，应当不授予钻孔设施建造、调试或运行的授权。它还应当首先确定申请是完整的，安全论证文件提供了足够的证据，以提供合理的保证，即安全要求将得到满足，资金是或将是可用于资助废物处理计划通过所有相关步骤（如开发、调试、运行、关闭和机构控制）。

3.15. 监管机构应当确保授权具有足够的灵活度，以通过变更控制流程适应变更（例如处置设施设计）。在授权书，监管机构应当规定营运组织可以在哪些条件下对处置系统进行变更，而无需向监管机构申请新的授权。变更控制过程带来的负担应当与变更的规模及其对安全的潜在影响相称。

3.16. 监管机构应当制定和实施流程和程序，通过这些流程和程序为每个钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制设定条件。这些过程和程序应当包括但不限于设施安全论证文件的监管评审和评定，以及有适当条件的授权。

3.17. 监管机构应对钻孔处置设施的安全论证文件进行独立评审和评定。监管机构应当严格考虑安全论证文件各个方面的可用证据和置信度，例如安全论证文件中假设的机构控制的有效性。

3.18. 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》[30]提供了关于监管评审和评定的一般建议。监管评审和评定的范围应当不仅限于记录在案的安全论证文件，而应当考虑广泛的方面，包括以下方面：

- (a) 营运组织是否具备必要的权限，以及资源（如人力、财力）；
- (b) 该场址是否合适；
- (c) 设施设计的所有方面及限值和控制在是否充分；
- (d) 营运组织是否使用适当的安全管理系统；
- (e) 安全评定是否充分；

(f) 是否有应当施加的额外要求或条件, 如果已经施加了这些要求或条件, 这些要求或条件是否已经得到满足。

3.19. 监管机构应当制定一项计划, 管理与钻孔处置设施相关的监管评审和评定流程, 该计划应当涵盖人员配备和资源、评审和评定的目标和范围、时间表和时间安排、责任分配、人员培训、应当符合的流程和程序、进度监控、与营运组织的会议、技术顾问的作用以及与公众和其他相关各方的互动。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协商》[31]提供了监管机构与相关各方互动的建议。

3.20. 对钻孔处置设施安全论证文件的监管评审和评定应当反映设施和活动的规模和潜在危害。监管机构应当根据问题对安全的重要性对其进行优先排序。

3.21. 监管机构应当确保其有足够的执行和管理钻孔处置设施安全论证文件评审和评定计划, 以确定该设施是否安全并将继续安全, 以及授权中应当规定和附加的授权条件。安全论证文件和授权申请的监管评审和评定可通过多种方式进行, 可能包括根据原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-12 号《安全监管机构的组织、管理和人员配备》[32]提供的建议使用独立的外部专家。

3.22. 监管机构应当检查营运组织是否对钻孔处置设施进行了充分的控制。监管机构应当核实是否符合授权条件, 包括检查营运组织是否正确制定并符合废物验收标准, 以及开展适当的监管视察和执法活动。

3.23. 监管机构应为对安全重要的活动制定监管视察计划, 如建造、运行和关闭 (见 GSG-13[30])。监管视察应包括核实营运组织是否符合授权、安全论证文件和运行程序, 并评定营运组织员工和承包商的安全文化 (见 GSG-16[26])。

运行期间的辐射防护

3.24. 根据 GSR Part 3[2]，监管机构需要建立适当的辐射防护要求。根据 SF-1[1]，防护必须最优化，以提供合理实现的最高安全水平。SF-1[1]第 3.22 段指出：

“为了确定辐射风险是否在合理可达到的范围内，所有此类风险，无论是由正常运行或异常或事故工况引起的，都必须先验地进行评定（使用分级方法），并在设施和活动的整个寿命期间定期再评定。”

3.25. 以下关键要求适用于钻孔处置设施的运行期：

- (a) 关于正当性，GSR Part 3[2]要求 10 规定：“政府或监管机构必须确保只批准正当实践”。如 GSR Part 5[3]第 2.5 段所述，放射性废物管理是产生废物“实践”的一部分，因此不需要单独的正当性。
- (b) 关于最优化，GSR Part 3[2]要求 11 规定：“政府或监管机构必须制定和执行防护和安全最优化的要求，注册人和许可证持有人必须确保防护和安全得到最优化。”
- (c) 关于剂量限值，GSR Part 3[2]要求 12 规定：“政府或监管机构必须为职业照射和公众照射制定剂量限值，注册人和许可证持有人必须适用这些限值。”
- (d) 关于剂量和风险约束，第 GSR Part 3[2]第 3.120 段指出：“政府或监管机构必须制定或批准剂量约束和风险约束，用于公众成员的防护和安全最优化。”剂量和风险约束被确定在低于相应约束的水平，因为照射可能来自一个以上的源。这里的风险是指所有癌症的风险和遗传影响的风险。

3.26. 处置前放射性废物管理活动可能导致计划照射。放射性废物处理活动可能导致工作人员和公众在钻孔处置设施运行期间的计划照射。GSR Part 3[2]附表 III 规定了以下适用于放射性废物管理的关键剂量限值（脚注略）：

“对于 18 岁以上工作人员的¹职业照射，剂量限值为：

- (a) 连续 5 年平均每年 20 毫希沃特的有效剂量（5 年 100 毫希沃特）
和任何每年 50 毫希沃特的有效剂量；

.....

“就公众照射而言，剂量限值为：

- (a) 有效剂量为每年 1 毫希沃特；
- (b) 在特殊情况下，可适用每年中较高的有效剂量值，条件是连续 5 年的平均有效剂量不超过每年 1 毫希沃特”。

关闭后期间的辐射防护

3.27. SF-1[1]确立的基本安全目标是保护人类和环境免受电离辐射的有害影响。SSR-5[4]第 2.15 段指出：

“安全目标是选址、设计、建造、运行和关闭处置设施，以便在考虑到社会和经济因素的情况下，处置设施关闭后的防护最优化。还必须提供合理保证，确保长期剂量和对公众成员的风险不会超过作为设计标准的剂量约束或风险约束。”

3.28. 放射性废物处置可能导致公众在关闭后期间的潜在计划照射，然而，计划的潜在风险并不一定会发生。以下关键标准适用于钻孔处置设施的关闭后阶段：

- (a) 公众成员在所有计划照射情况下的剂量限值为每年 1 毫希沃特的有效剂量[2]。这一标准及其风险当量被视为今后不得超过的标准（见 SSR-5[4]第 2.15 (a) 段）。
- (b) 为了符合这一剂量限值，处置设施（被视为单一来源）的设计应当使今后可能因影响处置设施的自然过程而暴露的代表人的计算剂量或风险不超过每年 0.3 毫希沃特的剂量约束或每年 10^{-5} 的风险约束（见 SSR-5[4]第 2.15 (b) 段）。
- (c) 关于关闭后人类意外侵入的影响，如果预计这种侵入对居住在场址周围的人员造成的剂量低于每年 1 毫希沃特，则没有正当性努力减少侵入的可能性或限制其后果（见 SSR-5[4]第 2.15 (c) 段）。
- (d) 如果人类侵入预计会导致居住在场址周围人员的剂量可能超过每年 20 毫希沃特（见参考文献[33] ¹⁶ 的表 8），则应当考虑废物处置的替代方案（SSR-5[4]第 2.15 (d) 段）；

¹⁶ 国际放射防护委员会在参考文献[33]提出的建议并非所有成员国的监管机构都接受。

- (e) 如果指出剂量在每年 1—20 毫希沃特范围内（见参考文献[33]表 8），则在设施开发阶段应当作出合理努力，通过优化设施设计来减少侵入的可能性或限制其后果（见 SSR-5[4]第 2.15 (b) 段）。
- (f) 国际放射防护委员会认为，剂量上升到 100 毫希沃特几乎总是采取正当的防护行动（见参考文献[33]第 241 段）。
- (g) 国际放射防护委员会指出，只有在极端情况下，或者是因为照射是不可避免的，或者是在拯救生命或预防严重灾难等特殊情况下，才能证明急性或发生每年 100 毫希沃特以上的照射是正当的。任何其他个人或社会利益都无法补偿如此高的风险（见参考文献[33]第 236 段）。

营运组织的责任

3.29. GSR Part 5[3]要求 4 确立了与营运组织对放射性废物管理设施和活动的安全责任相关的一般要求。SSR-5[4]要求 3 规定：

“放射性废物处置设施的营运人必须对其安全负责。营运人必须进行安全评定，制定和维护安全论证文件，并必须根据国家战略，符合监管要求，在法律和监管基础设施范围内，开展选址和评定、设计、建造、运行、关闭以及必要时关闭后的监视等所有必要活动。”

3.30. 营运组织对设施和活动的安全负有主要责任，这一责任不能委托，并延伸到设施寿命和活动持续时间的所有阶段，直到监管控制结束。如果营运组织雇用承包商来执行工作，营运组织保留安全和确保符合法律和法规要求的主要责任（见 GSR Part 1 (Rev.1) [28]第 2.14 段和第 2.15 段）。

3.31. 根据 SSR-5[4]要求 12—14，要求钻孔处置设施的营运组织制定和维护安全论证文件，包括相关的安全评定，在此基础上做出关于设施的授权和开发、调试、运行、关闭和机构控制的决定。营运组织必须将安全论证文件提交监管机构批准。营运组织应当在安全论证文件中包括相关场址选择和评定、设计、建造、运行、关闭以及（如有必要）关闭后监视的信息。原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-3 号《放射性废物处置前管理的安全论证文件和安全评定》[34]提供了关于放射性废物处置前管理的安全论证文件和安全评定的建议。原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-23 号《放射性废物处置的安全论证文件和安全评定》[35]提供了关于放射性废物处置的安全论证文件和安全评定的建议。处置前废物管理安全评定的详细信息见参

考文献[36]。参考文献[19、20]包含了关于废弃密封放射源钻孔处置设施关闭后安全评定的详细信息。

3.32. 根据 SSR-5[4]要求 15，营运组织必须进行或委托对场址进行必要的调查，以评定其是否适合包容钻孔处置设施，并为场址选择决策提供信息。营运组织应当使用安全论证文件来计划场址勘察，并应当将场址勘察的结果整合到安全论证文件中。

3.33. 营运组织应当密封场址勘察钻孔，以防止它们成为地下水或气体流动以及放射性核素迁移的通道。场址勘察钻孔应当在处置设施投产前及时密封，并符合授权和安全论证文件。营运组织应当密封场址勘察钻孔，使密封钻孔不比周围完整岩石更具渗透性。第 6 部分和附录 I 提供了关于场址表征的进一步建议。

3.34. 营运组织应对钻孔处置设施场址的放射源和放射性废物承担全部责任。营运组织应当核实随附文件中对放射源和放射性废物的描述是否正确和充分。对于废弃密封放射源，说明应当包括以下信息：

- (a) 放射性核素及其在某一特定日期的半衰期和活度；
- (b) 辐射的性质以及接触和 1 米距离时的剂量率；
- (c) 未屏蔽源的大小；
- (d) 是否已知源正在泄漏；
- (e) 源的物理和化学形状；
- (f) 容器材料和厚度。

3.35. 在可能的情况下，记录的每一个废弃密封放射源的信息应当包括以下内容：

- (a) 制造商；
- (b) 源类型和模型；
- (c) 序列号；
- (d) 生产日期；
- (e) 进口日期；
- (f) 容器材料和厚度。营运组织收到钻孔处置的日期设施；
- (g) 以前的所有人；

(h) 使用源装置的名称和类型及其用途。

3.36. 营运组织应当努力填补现有信息中的重大空白，咨询源的制造商和用户、废物产生者、原子能机构《国际密封放射源和装置目录》¹⁷ 以及酌情咨询其他信息来源。

3.37. 营运组织负责处理放射源和放射性废物，生产适用于钻孔的废物货包处置和用于处置废物货包。为履行这一职责，营运组织应当开展下列活动：

- (a) 为这些活动提供必要的设施和设备，并制定和符合适当的运行程序；
- (b) 提供与待处理的放射源和放射性废物的性质相适应的辐射屏蔽；
- (c) 从使用源的设备中取出源，并将其放入适当的胶囊中临时贮存；
- (d) 从临时贮存处取回这些源，并对其进行处理；
- (e) 处理废物以便钻孔处置，并处置废物货包。

3.38. 营运组织负责所有活动的安全，并应当确保活动得到优化，并由经过相关程序培训的合格且经验丰富的人员执行。营运组织应当确保考虑到废物管理过程中的相互依赖性（例如，处置胶囊和废物货包适合放置在钻孔处置设施中）。

3.39. 营运组织负责第 1.1 段所述放射性废物钻孔处置的所有步骤。在获得授权之前，营运组织应当不开始建造处置钻孔或其他可能严重影响场址地基（如水文地质）条件的活动（见原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-31 号《放射性废物处置设施的监控和监视》[37]）。营运组织应当在批准和开发钻孔处置设施的早期阶段就与监管机构接触。营运组织应当确保建造和处置活动按照批准的安全论证文件进行。

3.40. 营运组织负责根据安全评定和安全论证文件建立限值、控制和条件（如技术规范），以确保钻孔处置设施的建造和运行符合安全论证文件和授权条件。营运组织应对废物的接收、处理和放置进行适当的控制，并实施和维持适当的安保措施。

¹⁷ 经授权的用户可通过以下链接查阅原子能机构《国际密封放射源和装置目录》：<https://www.iaea.org/resources/databases/international-catalogue-of-sealed-radiative-sources-and-devices>

3.41. 作为变更控制过程的一部分，营运组织应当评定废物类型或数量的变化或设施的设计或运行的变化对安全的影响。

3.42. 营运组织负责采取一切必要步骤，使核准的处置前管理设施和活动安全和可持续地退役。退役需要按照 GSR Part 6[27]规定的要求进行。

3.43. 根据 SSR-5[4]第 3.15 段和第 3.16 段，要求营运组织记录和保留与钻孔处置设施安全相关的信息，包括视察记录和其他符合监管要求、营运组织管理系统和运行程序的评定（另见 GSG-16[26]）。如果设施的责任在组织之间转移，营运组织应当向新负责的组织提供与设施安全相关的信息。根据 SSR-5[4]第 3.16 段，营运组织必须与监管机构合作，并提供监管机构可能要求的所有信息，以确保安全并履行其职责。

4. 钻孔处置设施安全方法

安全在钻孔处置设施开发和运行中的重要性

4.1. SF-1[1]原则 5 指出：“**必须防护最优化，以提供合理实现的最高安全水平**”。为了实现这一原则，营运组织应当在考虑到经济和社会因素的情况下，尽可能合理地将剂量和风险降低到低于监管机构设定的相关剂量和风险标准。营运组织还应当确保其拥有有效的领导，培养和保持有效的安全文化，并按照适当的管理系统开展放射性废物管理活动（见 GSG-16[26]）。关于防护是否得到最优化的决定是判断性的，因为需要考虑什么是合理的，并平衡关于一系列定量和定性因素的信息，包括当前和潜在的未来剂量和风险、技术实用性、成本、不确定性和相关各方的观点。在开发和运行钻孔处置设施的每一步都应当考虑到防护的最优化，并根据特定情况与相关各方进行讨论。

4.2. 营运组织在优化钻孔处置设施的保护时应当考虑以下几点：

- (a) 地面操作安排（例如废物装卸和运输）；
- (b) 提供适当的辐射屏蔽；
- (c) 控制工作环境；
- (d) 设计处置前废物管理设施和活动（例如废物加工）；
- (e) 避免排放的设施和活动的设计；

- (f) 将设施建造活动（如钻探）与废物放置运行分开；
- (g) 建立和使用处置设施的运行程序（例如废物放置程序、钻孔回填程序）；
- (h) 必要时使用远程技术（例如废物装卸和放置）；
- (i) 减少发生事故的可能性并尽量缓解发生事故的潜在后果；
- (j) 尽量减少在辐射和污染地区进行维护活动的需要。

4.3. 营运组织应当根据存在的放射性核素、放射源的大小和废物的体积，确定放射源和废物在处置胶囊和容器中的排列。营运组织应当考虑使用适当的信息系统和/或软件来帮助完善处置胶囊和容器中的源安排计划。

4.4. 在优化钻孔处置设施关闭后期间提供的防护时，以及在判断是否实现了最优化时，营运组织和监管机构应当考虑以下方面，其中包括：

- (a) 在整个设施开发过程，是否适当注意可能的备选方案在关闭后的安全影响，包括与第 6.14—6.21 段讨论的设计和选址问题相关的问题及附录 I，特别是以下内容：
 - (i) 为钻孔处置设施选择合适场址；
 - (ii) 设施的设计应当能包容待处置的废物量（例如，选择适当数量和直径的钻孔）；
 - (iii) 适当考虑到地质、水文地质和地球化学，在地质环境中适当确定处置区的位置；
 - (iv) 为废物提供足够的隔离，以最大限度地减少人类意外侵入的可能性；
 - (v) 选择适当的钻孔技术，特别是避免造成放射性核素沿钻孔壁或靠近钻孔壁迁移的路径。
- (b) 评定的潜在剂量和风险是否低于相关剂量和风险标准。
- (c) 是否通过选址或设计合理地降低了可能导致超过相关剂量和风险标准的潜在剂量或风险事件的概率。
- (d) 选址、设计、建造、运行和关闭计划是否按照适当的管理系统进行，以确保项目安全相关方面的必要质量水平（见 GSG-16[26]）。

4.5. SSR-5[4]要求 4 规定：

“在放射性废物处置设施的整个开发和运行过程，营运人必须了解该设施现有备选方案的相关性和对安全的影响，目的是在运行阶段和关闭后提供最佳的安全水平。”

4.6. 安全、可靠和可持续管理第 1.1 段确定的废物类型的备选方案。包括长寿命和高活度废弃密封放射源及其屏蔽材料，将废物与地表环境隔离在深度低于建议的最小深度的钻孔处置设施中（见附件 II）。对上述废物类型的另一种安全、可靠和可持续的管理方法是地质处置（见 SSR-5[4]第 1.14 (d) 段），许多国家正在推行这一方法。

4.7. 对一些短寿命废弃密封放射源进行安全、可靠和可持续管理的备选方案可能是在比建议的最小深度浅的深度进行钻孔处置，或与低放废物一起进行近地表处置，但这取决于对在处置设施场址保持有效的能动机构控制和有效的工程屏障的能力有足够的信心，直到危害降低到安全水平。在低于建议的最低深度的深度处置废物的情况下，即使关闭后的安全评定表明，评定的潜在剂量和风险将低于相关的剂量和风险标准，仅此一点可能不足以提供处置设施长期安全的足够信心。因此，在安全方面，营运组织应用其他论据补充安全评定的结果，以表明处置设施将为寿命短、废弃密封放射源提供安全、可靠和可持续的解决方案。

4.8. 在开发钻孔处置设施时，营运组织应当解决以下问题：

- (a) 待处置废物的种类和数量是什么？废物有哪些危害，这些危害将如何演变？
- (b) 设施应当设在何处？
- (c) 如何设计设施布局，以利用自然宿主环境的特征和屏障潜力？
- (d) 处置前废物管理操作应当如何进行？
- (e) 应当建造多少个钻孔？
- (f) 废物应当在何种深度范围内处置？
- (g) 应当使用哪种类型的钻孔套管？
- (h) 在选定的处置概念范围内，是否有其他可考虑的备选方案（例如废物整备、废物放置），这些备选方案的安全影响是什么？例如，替代材料可以用于工程屏障吗？

- (i) 如何在废弃密封放射源和废物的整个管理过程中确保质量控制？
- (j) 可能需要什么监控？
- (k) 应当采取哪些机构控制措施？

4.9. 在对此类问题做出决策时，营运组织应当采取质疑的态度，作为其安全文化的一部分，例如，应当询问是否有更安全的方式来做事。营运组织应当进行安全评定，并证明已考虑了一系列备选方案，且现有备选方案的安全影响已被评定和理解。组织运营应当清楚地记录其对可用方案的评定，以提高对所遵循流程和处置系统安全性的信心。在所有阶段，营运组织应当向监管机构和其他相关各方提供合理的安全保证。

4.10. 对于第 2 部分描述的参考钻孔处置概念，证明防护和安全最优化水平所需的许多文件已经可用，例如：

- (a) 一般设计，包括使用不锈钢和水泥基工程屏障（见第 2 部分）；
- (b) 运行安全的程序和演示；
- (c) 一般安全评定（见参考文献[19]）——然这并不排除对特定场址进行评定的必要性，但一般安全评定确实提供了合理的保证，即处置概念能够在广泛的环境中提供必要的安全水平。

4.11. 营运组织在应用与钻孔处置设施的开发和运行相关的安全要求时，应当符合分级方法。营运组织应当努力以与待处置废物相关的危害和风险水平相称的方式符合安全要求。第 5.25—5.45 段提供了关于使用分级方法的进一步建议。

钻孔处置设施的非能动安全手段

4.12. SSR-5[4]要求 5 规定：

“营运人必须评定场址，并必须设计、建造、运行和关闭处置设施，以尽可能通过非能动手段确保安全，并尽量减少设施关闭后采取行动的必要性。”

4.13. 营运组织应当开发、运行和关闭钻孔处置设施，以便在关闭后，设施的安全不依赖于现行系统或未来营运组织、政府或几代人的行动。第 7.12—7.21 段述及在关闭后期间通过机构控制确保安全的问题。

4.14. 营运组织应当采取以下措施促进非能动安全：

- (a) 钻孔处置设施的场址应当具有稳定的地质条件、较低的取水和/或开采矿物、石油、天然气或其他资源的可能性（因此人类意外侵入的可能性较低）以及与设施的结构、系统和部件在化学上相容的地下水。
- (b) 利用化学和物理稳定的废物货包和其他结构、系统和部件，以化学和物理稳定的固体废物形状处置废物的方式设计钻孔处置设施，确保废物、废物形状和结构、系统和部件彼此相容并与宿主岩石相容，并且以这种方式在比推荐的最小深度更深的深度处置废物。设计应当符合废物造成的危害以及设施安全论证文件中所需的包容和隔离程度。
- (c) 缩短操作时间（例如几个月至每年），避免长时间保持钻孔打开，只有当收集到足够的废物，使这一系列活动能够作为合理规模的处置活动（例如，足够的废物填满处置钻孔中的处置区）进行时，才应当通过钻探和建造一个钻孔并放置废物和回填来实现这一目标。营运组织应在处置活动之前和之间为废物提供足够的贮存容量。在处置前管理过程，要求尽快将废物加工成安全、非能动的形状，以便贮存或处置，要求加工符合废物的类型、贮存废物的可能需要、预期的处置计划以及安全论证文件 and 环境影响评定中规定的限值、条件和控制（见 GSR Part 5[3]第 4.13 段和第 4.14 段）。
- (d) 关闭钻孔处置设施，不涉及随后对结构、系统和部件的维护。
- (e) 实施非能动机构控制，如钻孔处置设施记录存档、土地所有权控制和土地使用限制。这种非能动机构控制应当旨在减少未来人类意外侵入的可能性，并为设施的安全提供额外的保证和信心。

对钻孔处置设施的了解和对安全信心

4.15. SSR-5[4]要求 6 规定：

“处置设施的营运人必须充分了解设施及其所在环境的特点，以及在适当长期关闭后影响其安全的因素，以便对安全有足够的信心。”

4.16. 钻孔处置设施的营运组织应当向监管机构，并酌情向其他相关各方开发和展示对钻孔处置系统和可能影响安全因素的充分理解。营运组织应当根据 GSR Part 4（Rev.1）[13]规定的要求以及 SSG-23[35]和本“安全导

则”提供的建议，为这种理解的开发定义一个逻辑和合理的策略，包括进行系统的安全评定。安全评定应当涵盖处置前管理活动、处置运行和关闭后期间，它们应当基于对可能影响处置系统的特点、事件和过程的系统和全面分析，以及对钻孔处置设施的结构、系统和部件部分的安全功能的分析。

4.17. 营运组织应当利用安全评定来了解钻孔处置设施及其周围环境在未来不同条件或假想方案下的行为和发展。与钻孔处置设施关闭后安全相关的特点、事件和过程的一般清单和分析包含在参考文献[19]，营运组织在确定特定场址的钻孔处置设施的特点、事件和过程以及假想方案时，应当考虑这些信息。

4.18. 为了提供合理的安全保证，营运组织应当制定一个安全论证文件，其中包括安全评定，表明处置系统的特点、事件和过程及其可能的相互作用已经确定并得到充分理解，同时考虑到不确定性。营运组织还应当进行不确定性分析，以确定可能的处置系统行为的范围，并应当考虑对处置系统各部分进行更详细的建模和敏感性研究对安全非常重要。GSR Part 4 (Rev.1) [13]、GSG-3[34]、SSG-23[35]和参考文献[19、20]进一步介绍了通过在安全评定中使用假想方案和特点、事件和过程进行的不确定性分析。

4.19. 营运组织应当公开承认在钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制的每个阶段存在的不确定性，并应当制定和应用一种不确定性管理方法，以确保设施以安全的方式开发和管理。不确定性的存在应当不妨碍设施开发和管理的下一步进展。

4.20. 随着钻孔处置计划的进行，营运组织应当更新安全论证文件和安全评定，以反映新的数据和经验。随着更多数据的积累和科学知识的发展，对处置系统行为的理解将会不断发展。在处置概念发展的早期，数据和理解应当足以给予投入资源进行进一步调查所必需的信心。在建造开始前、就位期间和关闭时，从安全评定中获得并在安全论证文件中汇编的理解应当足以提供正当的安全保证和满足相关监管要求的保证。

4.21. 建立信任应当该是安全评定和安全论证文件编写过程的一个组成部分。营运组织应当在安全论证文件文件中提出一系列论点，旨在建立对钻孔处置系统安全的信心。营运组织可设法以各种方式建立对钻孔处置系统安全的信心，其中包括：

- (a) 表明安全评定尽可能全面，并以良好的科学和工程实践以及高质量的数据为基础；
- (b) 表明处置系统是安全和健稳的（即其性能不会对个别有害事件或过程过于敏感）；
- (c) 就废物验收标准等控制措施的适当性和有效性提供证据（见第 6.58—6.66 段）；
- (d) 通过提供信息来证明设施工程部件的可行性，并建立对其有效性和耐用性的信心。

4.22. 行动组织应当酌情进一步提出建立信任的论据，例如与纵深防御、工程防御相关的论据安全特点、多线推理、机构控制、监控、来自自然类似物的信息或保守方法的使用。

多重安全功能

4.23. SSR-5[4]要求 7 规定：

“宿主环境的选择、处置设施工程屏障的设计和设施的运行必须确保通过多种安全功能提供安全保障。废物的包容和隔离必须通过处置系统的一些实物屏障来提供。这些实物屏障的性能必须通过不同的物理和化学过程以及各种操作控制来实现。必须证明单一屏障和控制装置以及整个处置系统按照安全论证文件中假设运行的能力。处置系统的总体性能必须不过分依赖单一的安全功能。”

4.24. 营运组织应当为钻孔处置设施制定一个包括多种安全功能的安全策略。安全功能是为了安全而必须实现的特定目的[5]。安全功能通常归因于特定的结构、系统或部件，并且可以由该结构、系统或部件的物理或化学质量来提供。

4.25. 营运组织应当确保安全功能由工程屏障和天然屏障的组合提供。营运组织应当确保钻孔处置系统的设计方式使屏障和安全功能的数量和复杂性与废物的危害和风险相称。

4.26. 钻孔处置系统中的屏障和安全功能的示例包括：

- (a) 宿主岩石渗透性低，地下水的移动速度和岩石对放射性核素的吸附程度共同确保了从废物中迁移出来的放射性核素需要数千年才能迁移到生物圈；
- (b) 在处置系统的条件下耐腐蚀的废物容器，例如由特殊不锈钢制成的容器，用于处置不同类型的废弃密封放射源[17]；
- (c) 溶解度低并在相关地球化学条件下缓慢排放放射性核素的固体废物；
- (d) 延缓放射性核素迁移的工程屏障材料，例如容器和钻孔套管之间的水泥基回填材料，这种材料造成高 pH 值条件，限制溶解度，促进吸附，从而提供密封。

4.27. 营运组织应当确保钻孔处置系统的性能不过度依赖于某一安全功能或屏障，且屏障之间不过度依赖。营运组织应当提供合理保证，即如果一个屏障没有按预期发挥作用，或者如果一个安全功能没有实现，那么处置系统仍然是安全的。营运组织在设计处置设施时，应当确保一个屏障性能的丧失不会直接导致其他屏障性能的丧失。

4.28. 营运组织应当设计处置系统的工程部件，使其彼此兼容，并与自然屏障兼容。不兼容部件的示例包括：

- (a) 当周围地下水或地质中硫酸盐含量高时，用于回填的普通硅酸盐水泥，硫酸盐在某些类型的粘土中很常见；
- (b) 膨胀粘土（如膨润土），用于高盐环境或钾含量高的地下水中。

放射性废物的包容

4.29. SSR-5[4]要求 8 规定：

“工程屏障，包括废物的形状和包装，以及宿主环境的选择，必须能包容与废物相关的放射性核素。必须在放射性衰变显著降低废物造成的危害之前提供包容。此外，对于产生热量的废物，必须在废物仍在产生热能，其量可能对处置系统的性能产生不利影响时提供包容。”

4.30. 安全壳被定义为旨在防止或控制放射性物质排放和扩散的方法或实物结构[5]。在废物处理方面，通过规定工程屏障和天然屏障来控制与废物相关的放射性核素[5]。

4.31. 营运组织应当特别注意在钻孔处置后的最初阶段，即放射性水平最高的时候，在废物中提供放射性核素的密封。安全壳应当足以让绝大多数放射性核素衰变而不到达生物圈。然而，并不要求营运组织始终对所有放射性核素进行绝对密封，因为这是无法证明的，也不是安全所必需的。营运组织应当在安全评定中证明，确实发生的任何放射性核素排放产生的潜在剂量和风险低于相关剂量和风险标准。

4.32. 尽管一些废弃密封放射源会因放射性衰变而产生热量，但如果营运组织能够准备一份令人置信的安全论证文件，这并不排除在钻孔处置设施中对其进行处置。营运组织应当通过选择或设计合适的废物容器和废物货包，为此类废物提供足够的容器。营运组织应当考虑到高活度废弃密封放射源的特征和相关过程，包括相关的发热、中子发射和水的辐解。营运组织应当确保废物货包的设计包括适当的屏障，这些屏障与处置系统中的其他屏障（如钻孔回填物、宿主岩石）相容，并将与其他屏障一起工作，通过物理和化学功能的结合来包容放射性核素。

放射性废物的隔离

4.33. SSR-5[4]要求 9 规定：

“处置设施的选址、设计和运行必须提供旨在将放射性废物与人类和可进入的生物圈隔离的特点。这些特点必须旨在为短期废物提供数百年的隔离，为中高放射性废物提供至少数千年的隔离。在这样做时，必须考虑处置系统的自然演变和对设施造成干扰的事件。”

4.34. 隔离被定义为放射性废物远离人类和环境的实物分隔和保留[5]。隔离不仅是安全处置废物的一项要求，对于提供和维护某些类型处置废物的核安保也很重要。SSR-5[4]第 3.43 段指出：

“对于近地表设施，必须通过处置设施的位置和设计以及操作和机构控制来提供隔离。对于放射性废物的地质处置，由于处置深度的原因，主要由宿主地质构造提供隔离。”

4.35. 在确定钻孔处置设施的选址时，营运组织应当适当考虑可能使处置的废物更接近地表环境、导致隔离丧失并导致人们暴露于辐射的事件和过程。这些事件和过程包括侵蚀、构造隆起、冰川作用、永久冻土融化和人类意外侵入。为了最大限度地减少人类意外侵入的可能性，营运组织应当将钻孔处置设施设在远离矿产、石油、天然气、地热能和水等资源的区域。关于钻孔处置设施选址的更多信息载于附录 I。

4.36. 在设计钻孔处置设施时，营运组织应当考虑到废物特征以及隔离和核安保的要求，为废物处置区选择适当的深度范围。对于在能动机构控制期结束时将具有显著活度的废物¹⁸（例如，已被宣布为废物的长期废弃密封放射源和在管理这些源期间产生的中水平废物），营运组织应当将处置区的位置设在比建议的最小深度更深的地方（见附件 II）。对于一些不受保障的短寿命废弃密封放射源和低放射性废物，在比建议的最小深度浅的深度进行处置可能是一个安全和适当的选择（见第 7.22—7.27 段），但营运组织必须证明将提供足够的隔离和核安保。营运组织在决定钻孔处置设施中处置区的深度时，应当考虑宿主岩石的特征（如渗透性）和地下水的地球化学（见第 6 部分）。

¹⁸ 例如，参考文献[15]图 3 展示，一些含有铯-137 的密封放射源在 1000 年以上不会衰变到豁免水平，而含有镅-241 的放射源可能在数万年内仍然具有潜在的危险。

4.37. 在选择场址和设计钻孔处置设施时，营运组织应当适当考虑进一步增强对所提供隔离的信心，包括对处置深度选择的信心，方法是采用机械强度高、重量大的工程防侵入屏障（如偏转板、混凝土板）。

非能动安全特点的监视和控制

4.38. SSR-5[4]要求 10 规定：

“在必要的范围内，必须对非能动安全设施进行适当程度的监视和控制，以保护和保存非能动安全设施，使其能够履行在关闭后的安全论证文件中为其分配的功能。”

4.39. 就放射性废物处置设施而言，监视是指对设施进行实物视察，以核实其完整性以及保护和保存非能动屏障的能力[5]。尽管直接观察钻孔处置设施的非能动安全特点的可能性相对有限，但营运组织应当在整个授权期内定期视察处置系统，以检查场址或场址附近的条件或人类活动是否发生了可能对设施的结构、系统和部件产生重大影响的意外变化。如果发生了此类变化，营运组织应当再评定设施的安全，并更新安全论证文件。政府或监管机构应当酌情定期检查已实施的任何非能动机构控制是否仍然有效。

钻孔处置设施的循序渐进开发与评价

4.40. SSR-5[4]要求 11 规定：

“放射性废物处置设施必须分阶段建造、运行和关闭。必要时，应对选址、设计、建造、运行和管理方案以及处置系统的性能和安全进行迭代评价，以支持这些步骤中的每一步。”

4.41. 钻孔处置设施的开发、调试、运行和关闭可能比近地表或地质处置设施的开发、调试、运行和关闭时间更短。尽管如此，营运组织应当遵循循序渐进的方法来开发、调试、运行和关闭钻孔处置设施，包括对场址和设施的各种选项进行反复评价（如评定）。

4.42. 钻孔处置设施的开发、调试、运行和关闭中最重要的步骤应当与监管或政府决策点一致。这些决策点通常是场址选择、设计概念批准、建造开始授权、调试和运行授权、设施关闭授权以及解除场址监管控制决定。监管机构应当建立并遵循钻孔处置设施授权的循序渐进方法（见第 3 部分）。

4.43. 营运组织应当在开发进程开始时与相关各方和监管机构接触，以确保就处置计划的方向达成共识，并促进包容性和协商一致的决策。

4.44. 在项目进行过程，应当根据当时可获得的信息以及对钻孔处置设施将满足要求并提供可接受的安全和安保的信心，做出关于选址、设施设计、建造开始、调试和运行、关闭和解除监管控制的决定。在决定是否从一个步骤进入下一个步骤时，营运组织应当考虑到国家政策和战略以及相关各方的意见等因素。

4.45. 营运组织应当遵循一种迭代方法来评定钻孔处置系统的安全，并应当在决定下一步进展和投入资源之前根据需要更新安全论证文件。通过遵循循序渐进的方法，随着处置计划的进行，营运组织应当循序渐进建立对钻孔处置设施安全的信心。

4.46. 安全评定和安全论证文件制定的迭代方法应当包括收集、分析和解释相关的科学和技术数据以及设计、运行计划和程序的开发，并应当涵盖运行和关闭后两个阶段（见 SSR-5[4]第 1.18 段）。营运组织应当使用循序渐进方法作为框架，在此框架中发展并证明对钻孔处置设施的技术可行性和安全有足够的信心。对于流程中的每一步，营运组织都应当该确定需要做出的决策以及做出决策所需的信息。营运组织还应当确定适当的相关各方，并确定何时以及如何将他们纳入决策过程。

4.47. 当信息可用时，应当使用它来更新安全论证文件，并为相关设施设计和进一步数据收集的决策提供信息，以减少不确定性。营运组织应当酌情进行额外的安全评定，以便利处置设施的管理。

4.48. 营运组织和监管机构应当在适当的步骤和决策点进行或委托进行独立的技术和监管评审。这些评审的性质以及相关各方在每个步骤和决策点的参与程度将取决于国家实践和所涉钻孔处置设施。

5. 钻孔处置设施安全论证文件和安全评定

5.1. 安全论证文件是支持设施安全的科学、技术、行政和管理论据和证据的集合，包括场址的适宜性和设施的设计、建造和运行，辐射风险的评定以及与设施相关的所有安全相关工作的充分性和质量的保证。安全评定是安全论证文件不可或缺的一部分。安全评定涉及对设施可能产生的辐射剂量和辐射风险进行量化，以便与相关剂量和风险标准进行比较。

5.2. 除安全评定外，在营运组织的安全论证文件中收集的论据和证据应当包括以下内容：

- (a) 说明安全论证文件背景、安全策略和处置系统；
- (b) 最优化展示和不确定性的管理；
- (c) 独立评审和相关各方参与安全论证文件制定的证据；
- (d) 设施开发期间适用的限值、控制和条件的声明；
- (e) 管理系统和已应用于确保安全相关工作 and 活动质量的证据（见 GSG-16[26]和 SSG-23[35]第 4.60 段和第 4.61 段）。

安全论证文件和安全评定的准备、批准和使用

5.3. SSR-5[4]要求 12 规定：

“在处置设施开发、运行和关闭的每一步，营运人必须根据需要编写和更新安全论证文件和辅助安全评定。安全论证文件和辅助安全评定必须提交监管机构批准。安全论证文件和辅助安全评定必须足够详细和全面，以提供必要的技术投入，为监管机构提供信息，并为每一步的必要决定提供信息。”

5.4. 营运组织应当在开发钻孔处置设施的早期就开始准备安全论证文件，包括适当的安全评定。营运组织应当在提供给监管机构请求授权的信息中包括安全论证文件。

5.5. 营运组织应当使用安全论证文件和安全评定来指导钻孔设施和活动的开发、调试、运行、关闭和机构控制中的所有步骤和决策，并作为与相关各方沟通的基础（见 GSG-3[34]和 SSG-23[35]）。营运组织应当将安全论证文件视为一份活的文件，根据监管机构发布的授权中的要求，在每个步骤中根据新信息对其进行更新。图 2 说明了在处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制过程中安全论证文件的循序渐进更新情况，以及做出的决定。营运组织应当使用安全论证文件来指导钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制中开展的活动，包括研究和开发、场址表征、设施设计和优化。营运组织还应当提供安全论证文件中的信息，以帮助监管机构做出解除监管控制的决定。

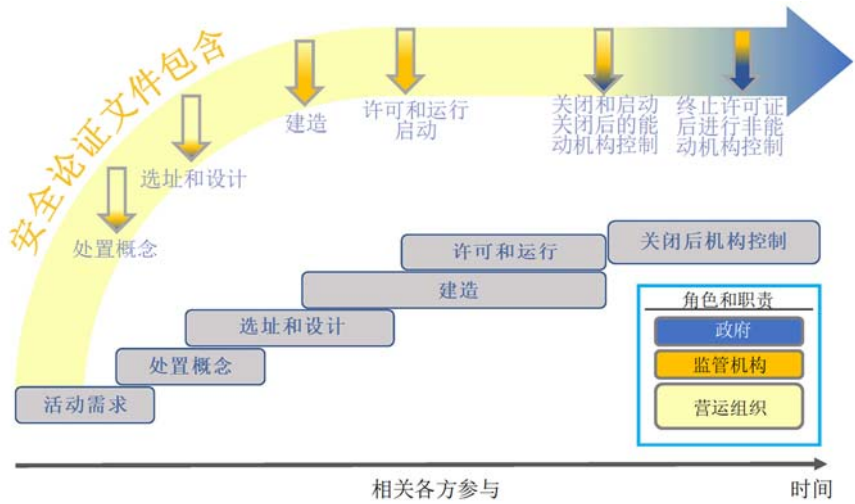


图 2. 在放射性废物处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制中所做决策的典型顺序。视国家法律而定，许可证可能在能动机构控制期结束时或以后终止。

5.6. 对于钻孔处置设施，循序渐进开发方法中的一些周期可能比近地表和地质处置设施的周期短得多。例如，在由一个处置钻孔组成的钻孔处置设施中，运行周期可能仅为几个月一年。监管机构应当界定其提供信息和更新安全论证文件的要求，同时考虑到国家监管方法、设施规模和处置废物造成的危害。监管机构应当准备好及时评审安全论证文件以支持关闭，从而使处置钻孔不会长时间开放。

5.7. 在准备安全论证文件时，营运组织应当将监管机构视为主要受众，但也应当考虑其他相关各方的需求。营运组织应当向公众提供安全论证文件信息，除非出于法律原因或与安保或商业机密相关的原因而无法提供。因为为支持授权而开发的安全论证文件可能高度从技术上讲，营运组织还应当提供公众易于理解的安全论证文件描述。

5.8. 营运组织应当使安全论证文件足够详细和全面，以提供监管机构所需的信息，从而决定监管要求是否已经满足或有可能满足，从而决定项目是否可以从一个步骤进入下一个步骤。在钻孔处置计划的早期，由于知识不完整，安全论证文件在某些方面可能存在弱点或漏洞，在这种情况下，营运组织应当承认安全论证文件中缺乏数据或信息，并应当描述不确定性的潜在重要性以及如何管理不确定性。

5.9. 营运组织应当利用安全论证文件来指导决策，例如，研究和开发的目标和资源分配、场址表征、设施设计、优化、废物验收标准的制定以及钻孔处置设施的运行、关闭和机构控制。

5.10. 营运组织在准备安全论证文件和进行安全评定时应当符合分级方法。钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制计划通常比近地表或地质处置设施的计划小得多。在为钻孔处置设施制定场址特定安全论证文件时，营运组织应当考虑可用信息，包括参考文献[15、19、20、24]的信息。

安全论证文件和安全评定的范围

5.11. SSR-5[4]要求 13 规定：

“处置设施的安全论证文件必须描述场址的所有安全相关方面、设施的设计以及监管控制措施和监管控制。安全论证文件和辅助安全评定必须证明所提供的对人类和环境的保护水平，并必须向监管机构和其他相关各方保证安全要求将得到满足。”

5.12. 营运组织应当明确界定并证明安全论证文件和安全评定的范围，使其适合于处置计划（即钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭或机构控制）。例如，处置概念可行性的初始评定范围将不同于为监管批准、调试、运行或关闭目的而进行的后期评定范围。

安全论证文件的范围

5.13. 钻孔处置设施的安全论证文件范围应当包括所有相关设施和活动。图 3 展示了 SSG-23[35]和参考文献[38]描述的安全论证文件结构和主要组成。在安全论证文件中，营运组织应当描述和评定钻孔处置场址、设施和活动的所有安全相关各方面，包括运行期间和设施关闭后，并应当证明将应用适当和有效的监管控制。在安全论证文件的整个制定过程，以及在钻孔处置设施的开发、运行、关闭和机构控制过程，营运组织应当根据管理系统开展工作（见 GSG-16[26]第 5.14—5.24 段）讨论了图 3 确定的安全论证文件。

5.14. 作为安全论证文件制定的一部分，营运组织和监管机构应当从早期阶段开始进行适当的正式对话，该对话应当包括关于安全论证文件范围和内容的监管要求、指导和期望的讨论。还可能需要就安全评定和其他方面进行详细的技术讨论，例如与设施设计或设施运行、关闭和监控计划相关的方面。对话的框架应当宽泛，以便能够包括与辐射安全相关的其他方面，如环境保护，这些方面可能导致对设施开发的要求或约束。

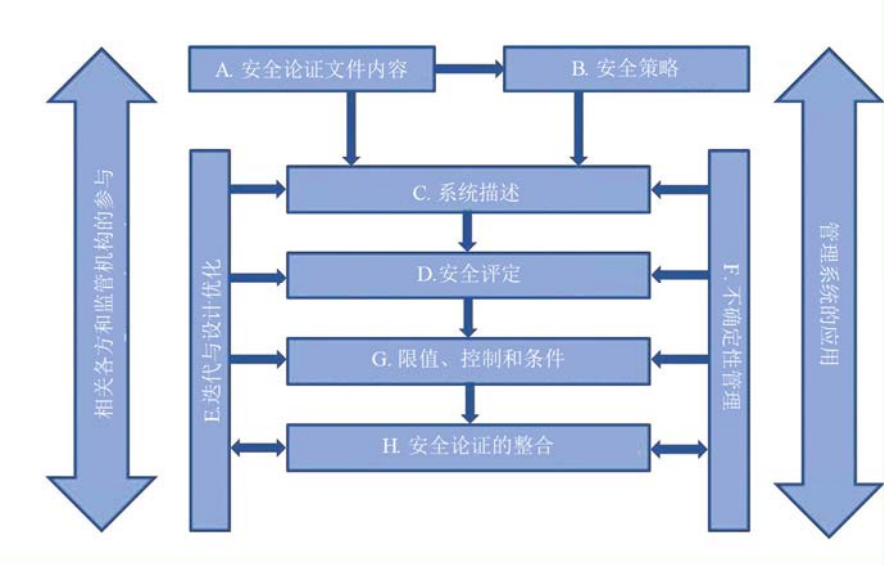


图 3. 安全论证文件的主要组成部分、管理系统的应用以及与监管机构和相关各方互动的过程。 [35]

5.15. 营运组织还应当制定并领导一项与相关各方就处置设施进行对话的计划。这一对话计划应当适合国家和本地的情况。作为对话的一部分，营运组织应当使用安全论证文件中的信息来保证满足安全要求。对话方案的设计还应当加强对营运组织和监管机构的透明度、能力和行为的信任。除了讨论处置设施的计划及其安全外，还应当说明使用放射源带来的收益。GSG-16[26]提供了关于与利益相关方就放射性废物管理进行互动的进一步建议。GSG-6[31]提供了关于监管机构在此类对话中的作用的建议。

5.16. 营运组织应当描述安全论证文件背景，包括以下方面的信息：

- (a) 废物管理的法律和监管框架，其中可包括国际承诺（例如《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》[6]和《放射源安全和安保行为守则》[7]）以及关于放射性废物管理的国家法律、法规、政策和战略，并说明其适用于钻孔处置。
- (b) 在循序渐进开发钻孔处置设施的背景下，现阶段安全论证文件的目的可能辅以特定支持目标（例如，与拟议运行变更相关的目标）。
- (c) 现阶段安全论证文件的范围，包括安全论证文件中包括和排除的特点、事件和过程，以及作出这些决定的正当性。安全论证文件的范围可能会受到以下方面的影响：选址过程、公众参与和接受、环境和社会影响评定、运行和关闭后的时间框架，以及安全论证文件制定中分级方法的应用。
- (d) 安全论证文件的目标受众，以及在安全论证文件的制定过程中相关各方将如何参与。

5.17. 在安全论证文件制定过程的早期，营运组织应当定义一个安全策略，建立将采取的方法，以符合安全论证文件环境中确定的基本安全目标、安全原则、防护标准和监管要求，并确保采用良好的科学和工程实践。安全策略应当解决以下问题：

- (a) 如何利用钻孔处置将废物控制在生物圈内并与生物圈隔离；
- (b) 在钻孔处置系统中纳入非能动安全功能；
- (c) 钻孔处置系统的稳健性；
- (d) 管理不确定性和相互依存关系的方法以及分级方法的应用。

5.18. 营运组织应当在安全论证文件中包括钻孔处置系统的说明，其中包括以下方面的详细信息：

- (a) 废物库存、库存是如何推导以及对库存的信任程度；
- (b) 场址及其周围环境的特征；
- (c) 处置前设施和活动（如热室或其他设施，用于废物整備）；
- (d) 操作程序；
- (e) 处置设施和活动（例如废物货包和钻孔的配置和建造、调试活动、废物放置操作）以及关闭活动；
- (f) 与钻孔处置系统的工程和自然组成部分相关的安全功能，以及这些功能将如何随着时间的推移而实现。

5.19. 营运组织应当在钻孔处置设施的安全论证文件中包括任何必要的安全评定，以解决与处置前管理设施和活动的安全以及钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制的安全相关方面。营运组织应当评定运行安全和关闭后安全。在运行安全评定，营运组织应当表明，结合管理系统的应用，设施在运行期间将是安全的。在关闭后安全评定，营运组织应当提供合理保证，确保设施关闭后是安全的。营运组织应当酌情在安全论证文件中纳入其他安全评定，以解决运输、非放射性危害（如石棉和铅等物质）和常规健康和安全隐患（如钻孔处置设施建造期间对工作人员的危害）等问题。

5.20. 营运组织应当确保在整个安全论证文件制定过程中进行迭代和设计改进，并确保它们在安全论证文件中得到适当的记录。迭代和设计改进涉及数据收集活动（如研发、场址表征）、安全评定和处置设施设计之间的多重互动。随着获得与某一库存和设施设计的场址和处置系统性能相关的新数据和知识，设施的设计应当视需要加以改进，安全评定和数据收集方案应当加以更新。为了达到预期的结果，可能需要许多周期的迭代和设计改进。第 4.40—4.48 段以及第 6.36 段和第 6.37 段分别提供了关于迭代和设计改进的进一步建议。

5.21. 营运组织应当确保不确定性的管理发生在整个安全论证文件制定过程，并在安全论证文件中正确记录。在考虑放射性废物处置的安全时，总是存在不确定性，特别是当时间框架较长且处置系统包括自然环境系统时。一些不确定性源于缺乏知识，可以通过收集更多数据来减少。其他不确定

性无法减少，因为，例如，它们与内在的随机性或内在不可知的方面相关，如未来的人类行为。在钻孔处置设施的开发过程，通常会有各种选择来管理不确定性。例如，如果关闭后安全评定的结果表明，不确定在拟议钻孔处置设施中处置一定数量的废物是否会导致低于相关剂量和风险标准的潜在剂量和风险，营运组织可以通过收集更多数据、减少模式中的保守性或改变设施的设计，或通过这些行动的某种组合来增加信心。营运组织应当建立和应用一种方法来管理不确定性，并应当在安全论证文件中记录这一点。第 1.1 段所述废物的钻孔处置存在许多不确定性。涉及场址和未来可能发生辐射照射的潜在途径。营运组织应当在安全论证文件中展示关键的不确定因素已被识别、在可能的情况下量化和管理，例如通过选择适当的场址和钻孔位置、深度和设计，通过收集更多的数据或通过改进评定模式。因此，安全评定应当使人相信潜在剂量和风险将低于相关剂量和风险标准。

5.22. 在安全论证文件中，营运组织应当就如何开发、运行、关闭和控制设施和活动提出限值、控制和条件。监管机构应当评审和批准营运组织提出的限值、控制和条件。监管机构应当酌情将批准的限值、控制和条件作为授权条件，以及监管机构认为必要的任何其他条件。限值、控制和条件可能涉及放射性和/或非放射性参数（例如，废物货包中可能放置的放射性量，处置胶囊中放射性核素的混合，工程屏障的最小厚度，回填操作的时间，禁止粉状、自燃和易腐废物）。

5.23. 营运组织应当在安全论证文件中提供现有证据、论据和分析的综合，这些证据、论据和分析应当在逻辑上证明拟议设施和活动可以得到安全可靠的管理。该综合报告应当包括解释如何收集和评定数据和信息，如何保证其质量，如何试验模式，以及如何遵循合理和系统的安全评定程序。综合报告应当涉及安全的重要性、非能动安全的必要性、对处置系统理解的现有信心水平、处置系统设计原则（例如多重安全功能、包容、隔离）、处置设施开发过程中的步骤（例如场址表征、设施设计、建造、运行、关闭）和保证措施（例如监控和监视、机构控制）。营运组织应当承认综合报告中所载证据、论据和分析的任何局限性，并应当强调作出判断的主要依据，即尽管存在局限性，废物管理和处置系统的计划和开发仍应当继续。

5.24. 营运组织应当确保在整个安全论证文件制定过程中应用适当的管理系统，并在安全论证文件中正确记录其应用。营运组织应当确保所有安全论证文件制定活动，包括由供应商¹⁹执行，根据管理系统进行。管理系统的应用应当确保对废物管理设施和活动的安全论证文件进行独立的同行评审，并确保同行评审结果得到适当考虑和采取行动。监管机构应当确保与安全论证文件的监管评审和评定相关的所有活动，包括供应商执行的活动，都按照适当的管理系统进行（见 GSG-16[26]和本“安全导则”第 7.36—7.38 段）。

安全评定的范围

5.25. 要求营运组织根据 GSR Part 4 (Rev.1)[13]、GSR Part 5[3]和 SSR-5[4]的相关要求进行安全评定，GSG-3[34]和 SSG-23[35]提供了安全评定的建议，参考文献[19、20、36]提供了更多相关信息。营运组织应当在钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制的整个过程中进行安全评定，以证明在 (a) 处置前管理期间工作人员和公众的安全；(b) 处置运行（在正常运行工况下和涉及事件工况下，包括事故，如断电或其他服务、火灾、钻孔壁坍塌、废物货包跌落和废物货包在处置过程中卡在钻孔中）；及 (c) 正常情况下的关闭后时期和随后的废物干扰事件。

5.26. 在这些评定，营运组织应当考虑对人类和环境的潜在影响。为了证明对人员和环境的保护水平，营运组织应当在关闭后的安全评定中考虑场址处置的所有废物（即处置钻孔中的所有废物和场址及其附近任何其他处置设施中的废物）。例如，如果拟议在现有近地表处置设施所在地或附近建立钻孔处置设施，营运组织应当评定钻孔处置设施对近地表设施安全的影响，反之亦然。附录 II 提供了钻孔处置设施关闭后一般安全评定的信息。

5.27. 营运组织应当使用安全评定来指导场址表征研究和设施设计（见 SSR-5[4]要求 15 和 16）。营运组织应当在设施的整个开发、调试、运行、关闭和机构控制过程中使用安全评定，以评定对处置系统的普遍理解水平，并评定不确定性（见 SSR-5[4]要求 6）。

¹⁹ 供应链被称为“供应商”，通常包括设计人员、销售商、制造商和建造商、雇主、承包商、分包商以及提供安全相关物项的托运人和承运人。供应链还可以包括组织的其他部分和上级组织。

5.28. 原子能机构进行了各种研究，以评定废弃密封放射源钻孔处置设施关闭后的安全，并提供了评定工具。已经开发了一系列不同复杂程度的模式，用于应用分级方法评定关闭后安全[20]。这些模式包括详细的通用安全评定[19]，可用作开发场址特定关闭后安全评定的基础，以形成授权所需信息的一部分。所开展的研究最初侧重于第 3—5 类废弃密封放射源的处置（见 RS-G-1.9[23]），但后来扩展到第 1 类和第 2 类废弃密封放射源的处置（如参考文献[17]和本“安全导则”附录 II）。尽管参考文献[19、20]有助于进行安全评定，但营运组织仍需针对待处置的场址和废物库存，为处置设施制定一个安全论证文件。

5.29. 根据 SF-1[1]第 3.15 段，营运组织必须以与分级方法一致的方式评定安全，以便所付出的努力和所采用的控制措施与废物的危害和风险水平相称。参考文献[20]提出了分层评定方法。并可酌情用于确定关闭后安全评定的范围、复杂性和保守性水平。

5.30. 营运组织应当明确界定并证明应当遵循的评定方法，包括使用概率和/或确定性评定方法、使用保守或现实假设、评定不确定性、考虑评定时限、计算评定终点（如潜在剂量、风险、工程屏障或从地圈到生物圈的放射性核素通量）等方面。关于这些专题的更多信息见附录 II、参考文献[19、20]和 SSG-23[35]。

5.31. 营运组织应对与钻孔处置系统的安全和性能相关的不确定性进行系统评定。营运组织应当使用安全评定来确定并在可能的情况下量化不确定性。营运组织应当在安全评定中包括对假想方案、模式、数据和参数不确定性的适当处理。图 4 展示了以这种方式分析不确定性的一般结构。

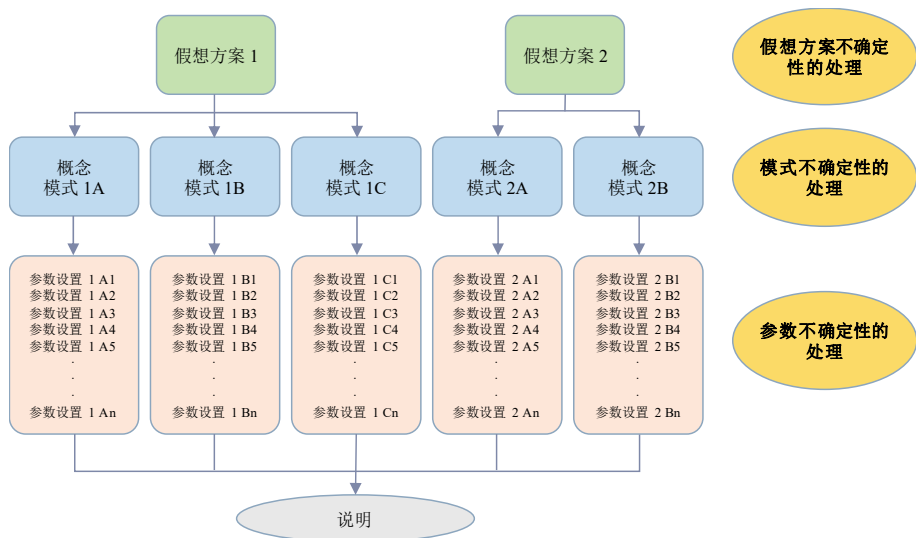


图 4. 不确定性分析的结构显示了假想方案、模式和参数不确定性的处理
(经允许转载自参考文献[39])。

5.32. SSG-23[35]第 5.54—5.69 段提供了处理处置设施关闭后安全评定不确定性的建议。在制定钻孔处置通用安全评定[19]、制定钻孔处置关闭后安全评定分级方法[20]和实施钻孔处置示范项目期间获得的经验表明，营运组织应当考虑一系列假想方案和潜在的放射性核素运输和照射途径，视情况适用于设施和场址，包括以下方面：

- (a) 代表处置系统预期演变的假想方案，包括设计和建造的处置设施（在参考文献[19]和本“安全导则”附录 II），这些被称为“设计假想方案”；
- (b) 包括工程屏蔽中的初始缺陷的假想方案（在参考文献[19]和本“安全导则”附录 II），这些被称为“缺陷假想方案”；
- (c) 处理环境条件（如气候、水文地质、地震活动）的不确定性和可能变化的假想方案；
- (d) 包括放射性核素沿处置钻孔或在处置钻孔附近任何受损岩石区迁移的假想方案；
- (e) 包括放射性核素在地下水中迁移到抽水井和/或其他地下水排放点（如河流）的假想方案；

- (f) 各种假想方案,包括放射性核素在地下水中的迁移和通过农作物灌溉、牲畜饮水和饮用水等途径的潜在照射;
- (g) 包括人类意外侵入在内的假想方案(在参考文献[19]和本“安全导则”附录 II,这些被称为“钻孔干扰假想方案”)。

5.33. 在考虑人类侵入时,营运组织应当关注人类意外侵入以及对保护人员(包括侵入者和公众成员)和环境的潜在影响。这包括侵入时和之后因废物和处置系统中的工程屏障和天然屏障的破坏而造成的影响。一般来说,人类意外侵入的概率随着深度的增加而降低,因为在更深的深度,更少的人类活动干扰系统。

5.34. 如果废物被放置在深度低于建议的最小深度的钻孔,营运组织应当考虑到人类侵入的情况,包括以下情况:

- (a) 厂房地基、道路及铁路路堑的建造,“随挖随填”隧道和标准隧道;
- (b) 钻探(例如自然资源、研究)。

5.35. 如果废物被放置在深度低于建议的最小深度的钻孔,营运组织应当将人类意外侵入评定为可能发生的事件,以便评定结果可用于判断处置深度和处置计划的适宜性。如果将废物放置在深度低于建议的最低深度的钻孔,营运组织应当在此期间实施有效的能动机构控制,直至废物的活度充分衰变,不再令人关切,对于含有长寿命放射性核素或大量初始放射性核素(如铯-137)的废物,能动机构控制期应当根据需要延长至关闭后时期。²⁰ 组织应当特定说明所设想的机构控制措施,说明其假定有效的期限,并为其实施提供财务保证。监管机构应当将提供这些机构控制作为授权的条件。

5.36. 对于已经或将要在大于推荐最小深度的深度处理废物的钻孔处置设施,营运组织应当在安全评定考虑包括钻孔在内的人类侵入情况,但不需要考虑第 5.34 (a) 段的活动。如果废物处理深度大于建议的最小深度,营运组织应当将人类意外侵入评定为不太可能发生的事件。

²⁰ 虽然铯-137(半衰期约为 30 年)有时被认为是一种短寿命放射性核素,但一些高活度铯-137密封源最初含有如此多的活度,以至于即使在 10 个半衰期(约 300 年)后,它们仍然非常有害。

5.37. 在评定与每个假想方案相关的风险时，营运组织应当考虑假想方案概率。

5.38. 营运组织应当使用不太可能但似乎正当的假想方案评定结果，以帮助证明处置系统的性能是健稳的，并帮助优化处置系统。

5.39. 在评定与钻孔处置相关的潜在剂量和风险时，营运组织应当假设场址会有人，并且他们将利用可能含有源自废物的放射性核素的本地资源。由于不可能确定地预测未来的人类行为，营运组织应当避免不适当的猜测。然而，营运组织应当考虑到场址可能发生的变化（例如土地使用、人口或气候条件）以及这些变化对潜在照射群体的影响。鉴于许多废弃密封放射源的钻孔处置设施都是小型设施（与近地表和地质处置设施相比），占地面积小，营运组织应当考虑到场址的农业能力或生产率，因为这可能会限制潜在照射群体的规模。

5.40. 营运组织应当使用不确定性和敏感性分析来证明健稳性，特别是证明钻孔处置系统的安全不过度依赖于以下任何一项：

- (a) 设计或场址的单一特点；
- (b) 在安全评定中作出的单一假设；
- (c) 单一安全功能。

5.41. 营运组织应当表明，如果一个屏障过早失效或未能按预期发挥作用，或者如果一个安全功能未能实现，安全仍将得到保证。

5.42. 营运组织应当该通过提出多种推理来建立对钻孔处置系统安全的信心。这些推理应当包括但不限于与健稳性、机构控制、监控、良好科学和工程的使用、研究和开发工作的信息、安全评定和同行评审相关的论点。营运组织应当在安全评定中强调保守性，并应当使用不确定性和敏感性分析来进一步支持处置设施将是安全的多种推理的发展。图 5 说明了有助于对钻孔处置的长期安全有信心的因素。营运组织应当确定安全评定中的主要因素，并解释这些因素如何结合起来提供安全信心。营运组织应当表明同行评审意见已以合乎逻辑和科学合理的方式得到处理。

5.43. 营运组织必须根据预先处置的要求，评定钻孔处置设施运行的安全。GSR Part 5[3]规定的放射性废物管理和 SSR-5[4]规定的放射性废物处置要求。在废弃密封放射源的钻孔处置设施，进行的主要处置前废物管理活动涉及废弃密封放射源的处理，包括对其进行处置的整备。这些活动之后应当处置钻孔中的污染源，第 6 部分更详细地介绍了所有这些活动。营运组织在制定用于特定设施的评定和程序时，应当考虑现有信息。

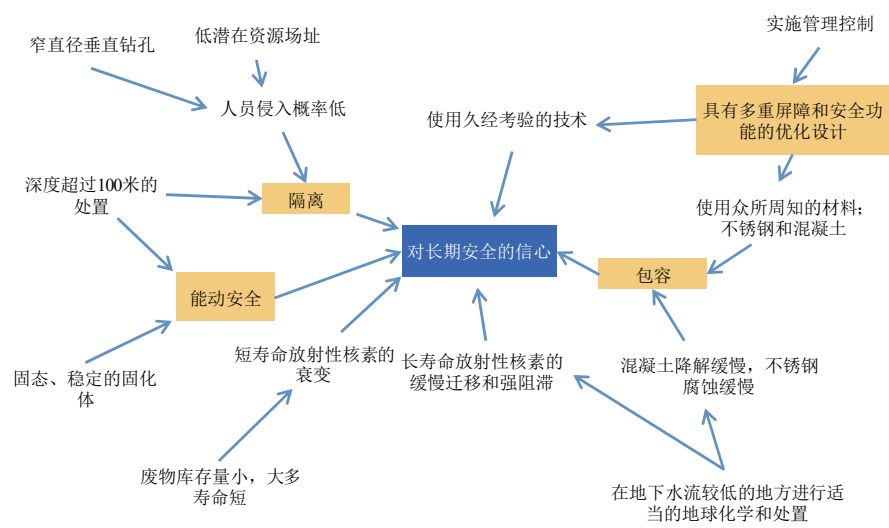


图 5. 有助于确认废弃密封放射源钻孔处置长期安全的因素。

5.44. 营运组织应当根据国家法律和法规，进行必要的进一步评定，以应对非放射性风险，如废物的非放射性成分对人的影响、设施运行对环境的影响以及运行（如起重运行）期间工作人员的安全。营运组织应当酌情考虑各种因素，包括废物和工程材料中化学或生物有毒物质的含量、地下水资源的保护以及污染物可能排放到的环境的生态敏感性。例如，如果废弃密封放射源与其铅屏蔽一起处置，营运组织应当进行评定，以评定人类和其他物种对从设施迁移的铅的潜在照射。

5.45. 关于保护非人类物种，目前的辐射防护系统一般为人类环境中的生态系统提供适当的保护，使其免受辐射照射的有害影响（见 SF-1[1]第 3.28 段）。此外，尽管自然环境很复杂，辐射只是几种影响类型中的一种，但防护的最优化提供了一种整合不同影响的手段（见 GSR Part 3[2]第 1.34 段）。

然而，营运组织应当根据国家和国际要求和指导，酌情进行环境影响评定（例如，对动植物的当前和未来潜在影响，噪音、交通、灰尘和其他相关因素的环境影响）。监管机构应当评审环境影响评定。

安全论证和安全评定的文件

5.46. SSR-5[4]要求 14 规定：

“处置设施的安全论证文件和辅助安全评定必须记录在案，其详细程度和质量必须足以告知和支持在每一步作出的决定，并允许对安全论证文件和辅助安全评定进行独立评审。”

5.47. 营运组织应当将安全论证文件记录为文件的层次结构，图 6 示出了样品层次结构。最低、最详细的是文件，其中载有通过研究和开发工作、场址表征研究、实验、文献评审和其他研究收集的数据和信息，涵盖广泛的科学、工程和其他学科，以及开发计划期间开展的活动记录。营运组织应当使用这些数据和信息来准备各种科学、工程和其他支持安全评定的报告。营运组织应当使用报告和安全评定作为基础，准备更高层次的安全论证文件文件，直接解决安全要求。即使对于第 1.1 段所述少量废物的钻孔处置设施。安全论证文件文件的层次结构可能相当广泛。



图 6. 构成安全论证文件的文档的样品层级结构。

5.48. 营运组织应当在安全论证文件文件中包括以令人置信、可追溯和透明的方式提出论点、推理和支持证据（如模式、参数、数据）的文件。营运组织应当编写安全论证和安全评定的文件，以便于了解钻孔处置系统及其行为和性能，用于安全评定的模式、数据和假设，以及表明该设施是或将是安全的论据的基础和真实性（见 SSG-23[35]）。

5.49. 营运组织应当以说明整个钻孔处置系统的性能以及废物管理系统的单一结构、系统和部件性能的方式呈现安全评定结果。营运组织应当确定并记录有待改进的设计中的任何弱点，并应当实施适当的设计改进活动，以增强对废物管理系统绩效的信心。

5.50. 营运组织应当定期更新安全论证文件，例如考虑到设计和安全评定工作的迭代循环、科学认识的发展或处置系统的变化（例如接收新的废物类型、增加更多的处置钻孔），并符合监管要求（例如定期安全评审）。

5.51. 近地表或地质处置设施的安全论证文件通常是在循序渐进设施开发过程，在多年的时间内循序渐进开发的。相比之下，钻孔处置设施的建造和关闭之间的时间可能很短，这意味着营运组织应当在申请建造授权时尽可能完整和详细地提供安全论证文件文本。

5.52. 营运组织应当制定安全论证文件文件，考虑文件的受众，包括监管机构和其他相关各方。营运组织应当考虑为不同的受众和目的准备具有不同技术细节水平和不同风格的安全论证文件文件，但它们在提出的主要结论和信息方面都应当保持一致。

5.53. 营运组织应当在安全论证文件中包括综合一级文件（见图 6），提供安全论证文件的概述，使用相对简单并尽可能采用非技术性语言，旨在让非专业人士理解，非专业人士可能包括民选代表、政府官员和公众成员。综合报告应当传达安全论证文件的主要信息（例如，处置设施是安全的，在运行期间将得到安全管理并将长期保持安全）。

5.54. 营运组织应当根据钻孔处置设施和决策步骤的需要，通过制定更详细的二级文件来支持综合一级文件。支持综合二级文件应当解决安全论证文件的主要组成部分，如图 6 所示。

5.55. 营运组织应当酌情提供更详细的三级文件，包括在编写安全论证文件期间以及在设施开发、调试、运行、关闭和机构控制期间进行的研究、报告和同行评审，例如关于废物库存、工程屏障研究、水文和地球化学解释工作的报告、关于软件开发和核实的报告、监控计划、应急计划、退役计划，以及关于现有设施治理行动备选方案的相关研究。营运组织应当提供透明和可追踪的参考资料，例如使用一致的报告参考系统，并在引用数据时提供数据来源的精确页码。

5.56. 营运组织应当根据需要制定和编写四级文件，包括实验室和场址研究、试验、视察和运行的详细记录，以及安全论证文件中引用的科学文献。这些文件应当共同提供安全评定中使用的参数值和假设的基础。

5.57. 监管机构应当就其对安全论证文件文本的期望提供指导，包括文件的范围、内容和详细程度，以及提供信息的安排。

5.58. 在记录安全论证文件时，营运组织应当确保以下几点：

- (a) 文件应当完整记录在钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制方面作出的决定和假设，并完整记录在安全评定中使用的模式和数据。
- (b) 以可追踪的方式提供信息，以便独立、有适当资格和经验的人员能够追溯支持安全论证文件各种要素的原始信息来源，了解这些要素在安全论证文件中是如何使用的，并在必要时复制安全评定。
- (c) 以合乎逻辑和清晰的方式记录所作决定的正当性（例如关于设施的选址、设计或运行）。营运组织应当记录支持和反对备选方案的正当性，并应当解释为什么选择一个方案而不是另一个方案。

5.59. 营运组织应当在安全论证文件文件中包括使用管理系统的证据，包括质量保证和质量控制的流程和程序（如数据收集、安全评定建模和文件制作）。营运组织应当在安全论证文件文件中包括安全论证文件内部和外部独立同行评审的证据和结果，以及对同行评审意见的回应。

5.60. 根据分级方法，安全论证文件文件的数量和详细程度应当与废物的危害和风险程度相称。如果根据经核实的数据和信息可以表明，评定的潜在剂量和风险比相关剂量和风险标准低几个数量级，则应当提高对钻孔处置设施安全的信心，从而简化安全论证文件。安全论证文件可以简化到什

么程度将是一个判断问题，取决于各种因素（例如，国家和地方情况、监管要求、安全论证文件的受众），营运组织、监管机构和其他相关各方之间的对话可能有助于做出这种判断。

6. 开发钻孔处置设施的方法

6.1. 根据 SSR-5[4]要求 25，营运组织需要建立和实施一个管理系统（见第 7.36—7.38 段）。在运行开始前，营运组织应当确定人力资源在人数、职责和专门知识方面的需求，并应当通过征聘和培训，确保有足够的适当的人力资源执行处置前管理和处置操作的合格和有经验的人员。营运组织的培训计划应当涵盖所有对安全有显著意义的活动，并应当提供安全开展活动所需的知识和实践经验。营运组织应当通过其培训计划促进安全文化的发展（见 GSG-16[26]第 6 部分）。培训计划应当使工作人员高度了解对安全重要设施和活动的设计特点，并应当旨在预防事故（包括意外事故），保护人类和环境。应当根据经验更新培训计划，必要时应对工作人员进行复训。营运组织应当获得各种学科的技术专长，包括辐射防护、放射源和废物处理、废物整备（包括水泥和混凝土技术以及焊接）、废物运输、钻孔建造、套管、回填和密封、安全评定和安全论证文件制定。

钻孔处置放射性废物的处置前管理

6.2. 第 1.1 段所述放射性废物的处置前管理。窄直径钻孔内的处置可在钻孔处置设施所在地或另一场址进行，并可由运行处置设施的组织或另一营运组织进行。要求适当的营运组织按照 GSR Part 5[3]规定的要求进行处置前管理活动。关于第 1.1 段所述各类废物处置前管理的进一步建议见 WS-G-6.1[21]和 SSG-45[22]。

6.3. GSR Part 5[3]要求 6 规定：“必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存关系，以及预期处置选项的影响。”

6.4. 营运组织应当酌情确定、计划和开展钻孔处置的处置前管理活动。营运组织应当考虑废物相对于处置设施场址的位置、要管理的源和废物的类型、废物表征的需要以及处置前加工、运输和贮存所需的基础设施。

6.5. 如果打算处置的废弃密封放射源位于一个国家的许多场址（例如在用户场址），政府应当确保：

- (a) 源的短期贮存始终在安全可靠的条件下进行，并有适当的授权和定期视察（见参考文献[8]）；
- (b) 源的短期贮存方式不排除未来的管理选择（见参考文献[8]）；
- (c) 监管机构根据其他管理备选方法的可得性，为源的短期贮存设定适当的时限（见参考文献[8]）；
- (d) 考虑集中贮存（见 WS-G-6.1[21]第 5.3 段和 SSG-45[22]第 4.80 段）。

6.6. 如果废物位于集中贮存设施，营运组织应当考虑在集中设施中进行废物表征和废物处理。如果这不可行，营运组织应当进行废物表征和处理，以生产废物货包，在处置场所使用适当的固定设施或移动设施进行处置。

6.7. 要求营运组织在整个放射源管理和放射性废物处置前管理期间实施辐射防护计划（见 GSR Part 3[2]，特别是要求 19—28）。原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-7 号《职业辐射防护》[40]提供了职业防护建议。辐射防护计划是安全论证文件的重要组成部分，因此需要得到监管机构的批准。营运组织应当使用具有适当资格和经验的人员来实施辐射防护计划。

6.8. 根据管理系统（见 GSG-16[26]），营运组织应当制定一套书面程序，以确保处置前管理设施的运行和活动的安全进行，符合授权条件并符合安全论证文件。除了正常运行的书面程序外，营运组织还应当建立检测和预防意外事件和事故以及缓解其后果的书面程序。营运组织应当培训人员使用程序。使用移动式热室的工作人员的防护程序参考文献[24]描述了钻孔处置设施中废弃密封放射源的状况。

6.9. 需要按照 SSR-6（Rev.1）[12]规定的要求，将废物整备产生的废物和废物货包运输到处置场。

6.10. 废弃密封放射源的长期贮存需要持续的监管控制和相关资源，这是无法无限期保证的。在有处置设施的情况下，废弃污染源应当进行加工和处置，而不是贮存在长期贮存设施中（见参考文献[8]）。

6.11. 在进行适当加工之前，废弃密封放射源通常保存或贮存在屏蔽层，屏蔽层构成了利用放射源设备的一部分。常见的屏蔽材料包括贫化铀、钨和铅。经验表明，如果废弃密封放射源在不适当的条件下保存或贮存时间过长，就很难或不可能从设备屏蔽上移除（例如由于腐蚀）。根据监管机构的授权，营运组织应当从存放放射源的设备中取出放射源，并将其放入适当的不锈钢胶囊如下：

- (a) 如果有必要暂时贮存废弃密封放射源，然后才能对其进行处置处理，营运组织应当考虑使用原子能机构的标准源整备胶囊。含有源的胶囊应当贮存在能提供适当屏蔽容器内以保护工作人员。
- (b) 如第 2.15 段和第 2.16 段所述，为了使废弃密封放射源处于钻孔筒处置状态，营运组织应当将放射源转移到处置胶囊，这些胶囊应当通过焊接密封，然后放置并密封在不锈钢制成的废物处置容器内，容器内装有水泥基嵌件。可以使用其他容器和包装，但在所有情况下，营运组织都应当证实其使用的正当性，并在安全论证文件中证实其性能。

6.12. 营运组织应当保存所有废物管理活动和废物的记录，包括在放射源管理过程中产生的废弃密封放射源以外的任何废物的记录（见第 6.76—6.78 段）。此类废物可能包括少量受污染的材料（例如，在管理泄漏源过程中产生的废物）、贫化铀和其他废物。营运组织应当评定在安全论证文件中，该废物是否可以在钻孔处置设施中安全处置。

6.13. 根据 GSR Part 6[27]，营运组织必须退役处置前废物管理设施。营运组织需要制定退役计划，并在设施的整个使用寿命期间保持该计划。对于每个设施，营运组织必须准备并向监管机构提交一份初始退役计划以及运行该设施的授权申请。为了确定退役计划，证明退役的可行性，确保有足够的财务资源用于退役，并确定和估计退役期间将产生的废物的类型和数量，需要制定该初始退役计划。营运组织需要定期或在特定情况下更新退役计划，并由监管机构评审。根据 GSR Part 6[27]要求 11，在进行退役之前，营运组织需要准备并向监管机构提交最终退役计划以供批准。最终退役计划需要涵盖退役策略，退役行动的时间表、类型和顺序，废物管理策略，拟议场址最终状态以及营运组织将如何证明最终状态已经实现，退役时限，以及完成退役的融资。

钻孔处置设施场址表征

6.14. SSR-5[4]要求 15 规定：

“处置设施场址的详细描述必须足以支持对场址表征和场址将如何随时间演变的一般理解。这必须包括其现状、可能的自然演变和可能的自然事件，以及在感兴趣的时期内可能影响设施安全的附近人类计划和行动。还必须包括对与场址和设施相关的特点、事件和过程对安全的影响的特定理解。”

6.15. 营运组织应当制定、记录和实施一个场址表征计划，以充分了解地貌学、地质学、水文地质学、水文学、地球化学、气候、钻孔处置场及其周围的天气和生态。营运组织还应当制定、记录和实施场址表征计划，以充分了解场址内和周围的土地使用、人口和行为，以及这些对环境的影响。营运组织应当记录这些场址表征计划内容的科学依据和推理。营运组织应当结合制定安全论证文件和进行安全评定的计划（见第 5 部分）制定场址表征计划，并应当同时实施这些计划。

6.16. 营运组织应当使用场址表征计划的结果，为安全论证文件和安全评定的制定提供信息。营运组织还应当利用安全评定和安全论证文件制定工作的结果来完善场址表征计划的内容，并将其重点放在对安全重要问题上。虽然场址特定数据的收集应当集中在对安全重要的问题上，但营运组织也应当出于建立信任的目的收集场址特定数据和信息，虽然这些数据对于证明安全可能不是绝对必要的，但它们仍然是有用的，例如有助于支持安全论证文件中的多种推理。

6.17. 营运组织在制定场址表征计划时应当采用分级方法，以支持钻孔处置设施的开发、调试、运行、关闭和机构控制，从而使所付出的努力与废物的危害和风险水平相称。与典型的近地表或地质处置设施相比，一般安全评定[19]考虑的钻孔处置设施是一种规模相对较小的设施，预计可在各种场址条件下提供安全处置解决方案。参考文献[20]描述了钻孔处置设施关闭后安全评定的分级方法，并讨论了如何使用不同复杂程度的安全评定模式来指导场址表征（另见附录 I）。

6.18. 钻孔处置设施场址表征确定活动应当包括但不一定限于以下调查（另见附录 I）：

- (a) “区域”的地质和地质演化。这项调查应当涉及各种地面和地下活动，例如地球物理和钻孔调查以及收集岩石样品进行检验和表征。调查钻孔可能有助于确定钻孔穿透率、确定资源的存在和确定深层地质，包括可能影响钻孔处置设施性能的断层或其他地质特点的存在。
- (b) 区域的地貌和地貌演化。这项调查应当包括各种研究，以绘制地貌图并对其进行量化，并调查过去、现在和未来潜在的侵蚀过程和土地运动（如滑坡、断层、地震、火山活动）。
- (c) “区域”的水文地质和水文地质演变。该调查应当包括各种研究，以确定场址的地下水条件，包括上层滞水的存在、部分饱和或非饱和带的特性、到地下水位深度、测压管表面以及确定水力参数的试验结果（如水头梯度、渗透率、孔隙度、饱和度）。
- (d) “区域”内地表水体的水文和水文演变。这项调查应当涉及各种研究，以确定和确定地表水体对本地气象条件（如降水）的响应，包括对不利条件（如极端降雨、洪水）水文响应的研究。
- (e) 处置系统的地球化学和地质演变。这项调查应当包括各种研究，以确定矿物学并了解处置系统中岩石和水的地球化学。应当特别注意确定地下水的化学成分、氧化还原电位和物种形成，因为这些参数会强烈影响放射性核素的流动性。
- (f) 目前的气象条件及其演变，包括未来气候状况对地貌发展和场址条件的可能影响（例如，参考文献[41]）。
- (g) 该场址及其周围的生态。这项调查应当包括收集动植物数据的研究；
- (h) 场址及其周围的人口和行为。这项调查应当包括收集人口规模、场址和密度数据的研究；人类活动，包括土地使用（如农业），以及在过去、现在和潜在的未来条件下进行剂量评定所需的人类行为（例如，人们从哪里获得食物和水以及消耗率）。

6.19. 营运组织应当利用从第 6.15 段和第 6.18 段所述计划和研究中收集的信息，对场址的自然系统进行可信的科学描述，并表明对安全重要特点、事件和过程及其空间和时间范围和可变性（过去、现在和未来可能）的理解。营运组织应当使用这些信息来确定场址是否适合钻孔处置设施和/或评价场址现有处置设施的性能。

6.20. 营运组织应当充分了解自然事件和过程对钻孔处置设施提供的隔离和包容的潜在影响，使用场址表征信息和对破坏性事件和过程的概率和潜在后果的评定。除了描述一个场址的当前特征之外，营运组织还应当该整理和解释关于该场址过去和未来潜在演变的信息。此类信息应用于支持确定场址的各种假想方案，并用于评定可能影响处置设施性能的特点、事件和过程的相关性。考虑过去场址演变的时间表至少应当与安全评定中感兴趣的未来时间表相当。营运组织应当以这种理解为基础，选择钻孔处置设施的位置和设计，特别是处置钻孔和处置区的深度。

6.21. 营运组织应当根据适当的管理系统进行场址表征工作（见第 7.36—7.38 段和 GSG-16[26]）。管理系统应当包括处理来自场址表征的空间分布信息和时间序列数据以及建立监控基准的流程和程序。营运组织应当确保供应商进行的场址表征活动也符合管理系统。

钻孔处置设施的设计

6.22. SSR-5[4]要求 16 规定：

“处置设施及其工程屏障的设计必须能包容废物及其相关危害，在物理和化学上与所在地质构造和/或地表环境相容，并在关闭后提供安全特定，以确保补充宿主环境提供的那些特点。设施及其工程屏障的设计必须确保运行期间的安全。”

6.23. 放射性废物钻孔处置设施的设计可能大相径庭，这取决于待处置废物的类型以及所在的地质构造和/或地表环境。例如，废物可能包括废弃密封放射源，这些放射源被封装在钢桶内的混凝土中—这是以前推荐的实践，但现在已经过时。

6.24. 钻孔处置，特别是使用窄直径钻孔，适合于处置体积相对较小的废物（例如已宣布为废物的废弃密封放射源）。参考文献[19]描述并评定了此类废物钻孔处置设施的参考设计。已经为这类设施的特定场址设计进行了开发和评定，以便在一些国家实施。

6.25. 营运组织应当实施一项工作计划，以制定和完善钻孔处置设施的设计，该计划应当适当考虑对待处置废物的清单、场址表征的结果、安全评定的结果以及设施安全论证文件中的论据。营运组织应当与制定安全论证文件和进行安全评定的计划同时制定和完善处置设施的设计（见第 5 部分）。营运组织应当使用设计工作的结果来指导安全论证文件的开发和安全评定的进行。

6.26. 营运组织在开展钻孔处置设施的设计时应当考虑以下几个方面：

- (a) 废物库存，包括待处置废物的类型、数量、物理和化学特性以及存在的放射性核素；
- (b) 场址的地质条件（例如地质稳定性、地下水流量、岩石和地下水与工程屏障的化学相容性）以及这些条件如何影响钻孔数量、钻孔尺寸以及处置区的数量和深度等因素；
- (c) 工程屏障系统；
- (d) 钻孔处置设施的运行计划，包括废物放置和回填；
- (e) 钻孔封堵和钻孔处置设施关闭计划；
- (f) 关闭后时期的计划。

6.27. 营运组织应当考虑钻孔处置设施设计的各种备选方案，并应当记录所选设计的正当性。例如，可以选择在一个处置区较长的钻孔中或在两个或更多处置区较短的钻孔中处置一定库存的废物，作为优化演示的一部分，营运组织应当给出选择选项的理由。在选择设计时，营运组织应当评定不同类型的废物是否应当放置在处置设施的不同位置。营运组织还应当评定相邻钻孔之间可能发生的相互作用，以证明处置钻孔的选定位置是正当的。

废物库存

6.28. 营运组织应当在开发过程的早期阶段识别并量化待在设施中处置的废物库存。营运组织应当确定钻孔数量和钻孔尺寸，同时考虑到待处置废物的体积、拟使用的钻孔技术以及钻孔直径与废物货包尺寸一致的必要性。在制定钻孔处置设施的设计时，营运组织应当考虑使用适当的软件来确定废物中放射性核素的总库存、需要多少废物货包、钻孔内所需处置区的长度以及废物所需的钻孔数量。

地质与钻孔设计

6.29. 根据 SSR-5[4]第 4.30 段要求最佳利用宿主环境提供的安全特点。这是通过设计一个处置设施来实现的，该设施不会对场址造成不可接受的长期干扰，其本身受到场址的保护，并发挥补充自然屏障的安全功能。

6.30. 营运组织应当选择每个处置区的深度，以减少人类意外侵入的可能性，并确保处置区位于合适的岩石中（即具有适当的机械、水文地质和水文地球化学特性的岩石）。营运组织应当保持设施占地面积小，并在足够的深度处置废物，从而降低人类意外侵入的风险。在选择时处置区的深度，营运组织应当考虑从处置废物中排放的放射性核素迁移到生物圈所需的时间。在决定处置钻孔的数量时，营运组织应当考虑所需处置区的总长度，这取决于废物货包的数量和长度、它们的间距以及宿主岩石深处合适地层的几何构型（如厚度）。

工程部件

6.31. 营运组织应当确保工程部件系统的设计符合废物处置前管理计划和处置钻孔的设计，并确保该设计有助于将放射性核素控制在废物中。营运组织在设计用于特定场址的工程部件时，应当考虑到相关地质调查和研究与开发工作的结果。

6.32. 工程屏障应当包括一个废物货包，便于废物装卸和就位运行，并与宿主岩石的地球化学条件和其他工程屏障的材料相适应。营运组织应当考虑使用一个以上的包容屏障（例如，将污染源置于废物容器内的处置胶囊内）。营运组织应当使用适当的材料回填屏障之间的任何空间（例如，处置胶囊和容器之间、钻孔中废物容器之间和周围、钻孔套管和周围岩石之间，见图 1）。营运组织应当在设施开发过程中相对较早地决定废物货包的设计，

因为这将影响废物的处置前管理和处置操作。这些设计要素可以包括，例如，废物货包提供的屏蔽量（这可能影响废物货包是否需要远程装卸）；废物货包的尺寸和重量（这将影响提升、装卸和放置操作），所用材料的耐腐蚀性和耐辐射性（附录 II 提供了进一步的信息），以及废物货包在钻孔中的放置方法（这将影响操作的可行性和安全性）。营运组织还应当评定和考虑处置钻孔中废物货包的长期性能，因为这可能在处置系统关闭后的安全方面发挥重要作用。

6.33. 营运组织应当设计工程屏障，以密封钻孔并关闭钻孔处置设施。钻孔密封件可用于如包括放置在处理区上方钻孔中的粘土或水泥基塞子。这种密封件或塞子也可以放置在处理区的底部。

6.34. 营运组织应当考虑钻孔套管的必要性，以确保运行期间钻孔的稳定性，并促进废物的放置，并应当进一步考虑废物处置后是否应当移除部分套管。在作出这一决定时，营运组织应当铭记，留在处置区上方的套管可能会退化，并成为放射性核素向地表迁移的通道，另一方面，它应当考虑拆除套管的可行性、困难和影响（例如产生空隙）。营运组织应当考虑在深度和地表附近使用的回填材料的类型。营运组织还应当考虑纳入工程特点，以减少人类意外侵入的可能性（如偏转板）。

6.35. 根据 SSR-5[4]要求 7，营运组织需要使用多种安全功能方法，以便处置系统的性能不会过度依赖于单一屏障或单一安全功能。营运组织应当特定说明钻孔处置系统中每个部件的安全功能，并应当通过提供证据支持每个部件将履行其功能的合理预期，证明工程屏障和特征的材料选择是正当的。营运组织应当记录可能导致部件退化或停止履行其安全功能的特点、事件和过程的分析。

设计改进

6.36. 在安全论证文件和安全评定，营运组织应当为以下目的检查各种设计方案：

- (a) 评定某项设计是否有可能达到相关剂量和风险标准（如果不符合，则可将该设计排除在进一步评审之外）；
- (b) 评价处置系统及其组成部分的性能；
- (c) 为设计和优化决策提供信息。

6.37. 营运组织在决定钻孔处置设施的设计时，应当考虑一系列因素（包括安全、安保和社会经济因素）。例如，钻孔处置系统中含有放射性核素的天然屏障可能会影响到所需的工程包容水平或应当如何进行操作，进而可能会影响到成本和人力资源。

钻孔处置设施的建造

6.38. SSR-5[4]要求 17 规定：

“处置设施必须按照核准的安全论证文件和辅助安全评定中所述的设计建造。其建造方式必须能保留安全论证文件表明对关闭后的安全重要的宿主环境的安全功能。建造活动的进行方式必须确保运行期间的安全。”

6.39. 作为安全论证文件的一部分，营运组织应当制定书面建造方法以及相关的技术规范和程序。

6.40. 营运组织应当确保钻孔建造由具有适当资格和经验的人员进行，遵循建造方法和相关的技术规范和程序（见 GSG-16[26]第 5.75—5.86 段和第 5.172—5.177 段），并符合有效的授权。监管机构应当在设施建造期间进行视察，以核实营运组织是否有足够数量的合格且经验丰富的人员可用于建造活动。建造方法和相关的技术规范和程序应当以安全和成功的先前实践为基础，并应当随着进一步经验的积累而更新。

6.41. 为了支持关于建造授权的决定，监管机构应当评审营运组织准备的安全论证文件，包括运行和关闭后期间的安全评定以及建造方法和相关的技术规范和程序。监管机构应当考虑除其他外拟议建造方法是否能够实现拟议设计（例如，在钻孔尺寸、钻孔直线度、为废物就位提供合适条件的能力、就位和移除套管的方法以及回填和密封钻孔的方法方面），而不会对宿主环境产生显著的有害影响。监管机构应当考虑安全论证文件是否充分描述和判断了在建造期间发生异常事件时应当采取的措施，如钻头丢失、过量进水或钻孔壁意外损坏。

6.42. 营运组织应当记录和实施试验和视察工作计划，以确认和证明钻孔处置设施的建造符合设计、建造方法和相关技术规范和程序，建造期间暴露的任何意外特点（如地层、断层、断裂带）符合安全论证文件。

6.43. 营运组织应当确保建造方法足够灵活，以应对空间变化的岩石条件。营运组织应当在钻孔过程中监控岩石状况（例如，通过收集岩石样品，使用钻孔测井方法），并应当及时采取适当行动，以应对不利条件（例如，断裂带）或意外事件（例如，钻孔壁破裂）。营运组织应当在建造方法中规定补救不太合适的钻孔或密封此类钻孔而不放置废物的方法。监管机构应当考虑安全论证文件是否充分描述和证明了密封“失效”钻孔（即废物放置被证明不可行的钻孔）的措施。

6.44. 营运组织应当在建造方法中规定避免对地质造成不必要干扰的方法，特别是在钻孔穿过不同水文地质状况的情况下。营运组织应当不在含水层内设立废物处置区。如果需要钻透含水层才能到达废物处置区，营运组织应当在钻孔穿过含水层的整个间隔期间对钻孔进行装箱，并使废物与含水层充分隔离，以避免放射性核素转移到含水层。在确定什么是充分隔离时，营运组织应当考虑岩石的特性以及废物和废物容器可能排放的任何放射性核素迁移到含水层的可能性。

6.45. 营运组织应当采取措施，防止钻孔及其周围的任何扰动岩石区提供通道，使放射性核素通过气体或地下水向地表或其他相对透射性较强的地质层输送。营运组织应当致力于确保回填钻孔和周围任何扰动岩石通过使用适当的回填材料和回填方法，它不会比周围的完整岩石更具渗透性。

6.46. 营运组织应当在建造方法中规定安装任何要使用的钻孔套管的方法，并酌情规定拆除该套管的方法。营运组织应当确保套管足够坚固，能够承受预期的垂直和水平载荷以及剪切力。营运组织应当通过记录设计决定的正当性来证明建造方法的正当性，例如使用某些类型的套管材料、在某些深度安装套管、将套管留在原位或从某些深度间隔移除套管的决定。

6.47. 营运组织在设施场址一次只能建造和运行一个处置钻孔。在现有钻孔处置设施的场址建造任何新钻孔，只能在先前的处置钻孔密封后进行，并应当由营运组织仔细计划，并得到监管机构的授权。

6.48. 营运组织应当创建并保留钻孔建造记录，以提供建造历史的完整描述，包括钻孔的时间、方式和建造人员、深度和直径、遇到的地质构造、钻孔速度、是否遇到水以及任何意外事件、事故或不符合建造方法的情况。

钻孔处置设施的调试

6.49. 营运组织应当在安全论证文件中描述设施和活动是如何调试和运行的。在钻孔处置设施开始运行之前，营运组织应当执行适当的调试活动，包括适当的处置前管理设施。在开始在钻孔处置设施中放置废物之前，营运组织应当试验并确认运行能够按照授权和安全论证文件中规定的条件成功地按计划进行。营运组织应当特别注意试验在钻孔中放置废物货包和将工程屏障放置到位的过程。在调试期间和放置每个废物货包之后，营运组织应检查钻孔中是否没有任何可能阻碍下一个废物货包成功放置的障碍物。在试点研究中，这是通过将非放射性的虚拟废物货包放入钻孔中，然后回取来实现的。营运组织应制定适当的调试试验计划，以核实场址制备的回填材料具有适当的特征（如含水量、密度、粒径、流变性、凝固时间）。监管机构应当对调试活动进行适当的视察。

钻孔处置设施的运行

6.50. SSR-5[4]要求 18 规定：

“处置设施必须按照许可证的条件和相关的监管要求运行，以便在运行期间保持安全，并保持在安全论证文件中承担的对关闭后安全重要的安全功能。”

6.51. 在钻孔处置设施，运行期应当在适当的调试活动之后开始。所有运行都应当按照书面运行程序进行。处置前管理操作（包括废物的临时贮存和废物整备）可以在废物放置之前立即进行，例如使用移动热室（见参考文献[24]）或移动工具包设施。处置操作包括接收废物、检查废物是否符合废物验收标准、将废物和回填物放置在废物货包之间，以及回填和密封钻孔。

6.52. 营运组织应当在安全论证文件中描述如何调试和运行钻孔处置设施。营运组织应当在安全论证文件中描述在正常情况下如何控制工作人员的剂量，以及在异常工况下（如事件、事故）将采取何种安排来保护工作人员和公众。

6.53. 在运行期间，监管机构应当评审和评定安全论证文件，并进行视察，以核实以下情况：

- (a) 营运组织正在应用其管理系统，以确保钻孔处置设施的安全运行；
- (b) 运行不损害钻孔处置设施关闭后安全所依赖的任何安全功能；
- (c) 只有符合废物验收标准的废物才被接受在钻孔处置设施中处置（见第 6.58—6.66 段）。

辐射防护计划

6.54. 根据 GSR Part 3[2]，特别是要求 19—28，要求营运组织在钻孔处置设施的整个运行过程中实施辐射防护计划。辐射防护计划是安全论证文件的重要组成部分，因此需要得到监管机构的批准。GSG-7[40]提供了应当在处置设施中应用的职业防护建议。营运组织应当使用具有适当资格和经验的人员来实施辐射防护计划。

运行程序

6.55. 根据管理系统，营运组织应当准备一套书面程序，以确保钻孔处置设施安全运行，并符合授权和安全论证文件的条件（见 GSG-16[26]）。这些运行程序应当源自运行的技术规范，而技术规范又应当与运行安全评定相一致。除了正常运行的书面程序外，营运组织还应当制定书面程序，以检测和预防意外事件和事故（例如，接收不符合废物验收标准的废物、钻孔壁坍塌、废物货包堵塞在钻孔中）并缓解其后果。运行程序应当规定何时应当根据授权向监管机构报告。营运组织应当培训人员使用运行程序。

6.56. 营运组织应当核实工作是根据运行程序进行的，工作达到了运行的设计目标，工作和运行已被安全评定和安全论证文件充分涵盖，这种核实应当通过适当的视察、监查和记录保存计划进行。

6.57. 营运组织应对运行程序或设备的变更建议应用正式的变更控制程序，并应当确保在对拟议变更做出决定时评定、理解和考虑安全影响。营运组织应当将可能对安全产生重大影响的变更通知监管机构并应当在实施此类变更之前获得监管机构的同意。

废物验收

6.58. SSR-5[4]要求 20 规定：

“接受放置在处置设施中的废物货包和未包装废物必须符合与正在运行和关闭后的处置设施的安全论证文件完全一致的标准。”

6.59. 营运组织应当根据授权中规定的限值、控制和条件运行钻孔处置设施，这些限值、控制和条件是根据监管机构批准的安全论证文件和运行程序建立和规定的。废物验收标准是这些限值、控制和条件的关键组成部分。营运组织应当制定废物验收标准，以确保在钻孔设施中接受处置的废物货包符合安全论证文件。废物验收标准应当由监管机构批准。营运组织应当使用废物验收标准来控制处置设施中处置的废物的类型、数量和特征。

6.60. 钻孔处置设施的安全部分取决于废物货包。因此，营运组织应当制定废物货包的规范。营运组织应当将拟议或请求（例如废物产生者的拟议或请求）纳入变更控制流程，其中包括营运组织的安全评审，并酌情进行监管评审。

6.61. 在制定废物货包规范时，营运组织应当考虑在废物处置前管理和处置期间进行的所有活动，以及在整个处置前管理和处置操作过程中以及废物处置后可能出现的所有情况，重点关注与安全相关的方面。例如，废物验收标准中包含的关于废物货包中 γ 发射体活度的限制可能主要基于处置前管理和运行安全考虑（例如废物货包表面剂量率）。对废物货包中 α 发射体活度的相应限制可能主要基于关闭后的安全考虑。

6.62. 营运组织应当制定和使用废物验收标准，以确保废物表格和废物货包能够履行安全论证文件中赋予它们的安全功能。营运组织应当考虑制定以下废物验收标准：

- (a) 限制只接受处置固态废弃密封放射源和在管理废弃密封放射源过程中产生的中低水平次生放射性废物；
- (b) 限制只接受具有稳定化学和物理特性的废物形状进行处置（例如，不含粉末，不含易腐、易反应或易爆材料或废物）；
- (c) 废物货包的重量和尺寸限值；
- (d) 废物货包表面污染程度的限值；

- (e) 胶囊和废物容器的规范（例如材料，制造和焊接方法，试验协议）；
- (f) 回填材料的规范（例如材料，回填方法，试验协议）；
- (g) 废物货包的热量输出限值；
- (h) 可能产生气体的废物处置限值；
- (i) 每个废物货包、每个钻孔中的废物和可在整个处置设施中处置的废物的总活度限值；
- (j) 每个废物货包、每个钻孔和整个处置设施的放射性核素含量限值；
- (k) 对废物货包内不同类型废弃密封放射源和/或放射性核素的混合进行控制；
- (l) 每个废物货包、每个钻孔和整个处置设施的裂变核素含量限值。

6.63. 针对单一处置钻孔的情况，对参考钻孔处置概念[19]进行的一般性评定表明：

- (a) 在处置操作中对工作人员的保护取决于可用的屏蔽类型，这在实践中可能会限制可接受用于处理和处置的强 γ 发射体和中子源的活度。
- (b) 关闭后的安全考虑可能会限制长寿命可以在钻孔处置设施中处理的放射性核素。
- (c) 为避免处置钻孔温度过高，每个废物货包产生的热量应当保持在几十瓦以下，这可能意味着可以接受的最大源具有不超过几十吉贝可的产热放射性核素活度（见参考文献[16]）。

6.64. 营运组织应当确保拟处置的废物在接受处置前具有充分的表征，并表明符合废物验收标准。根据 GSR Part 5[3]第 3.11 段要求营运组织按照管理系统保存所有处置前废物管理活动和接受处置的废物的记录（另见第 7.36—7.38 段）。

6.65. 营运组织应当尽可能建立和保存记录，详细说明每一个废弃密封放射源（包括其物理、化学和辐射特征）以及废弃密封放射源和接受处置和处置的其他废物的总库存。库存信息有时存在空白，例如，因为废弃密封放射源不受监管控制，后来被发现为无看管源，或者因为废弃密封放射源是从许多不同的用户和场址收集的，并由最初使用放射源的个人或组织以外的个人或组织贮存了相当长的时间。营运组织应当作出适当估计，包括利用国家放射源登记册（见 RS-G-1.9[23]），填补库存信息方面的空白。

6.66. 监管机构应当确保有适当的安排和程序来定义和控制废物产生者和钻孔处置设施的营运组织为处理任何不符合废物验收标准的废物货包而采取的行动。营运组织应当根据国家法律和监管框架以及对设施的授权，向监管机构提供关于废物验收和不符合项的信息。

废物放置

6.67. 营运组织应当根据授权和安全论证文件将废物货包放置在处置钻孔中。营运组织应当确保废物货包放置在钻孔的中央。为此，第 2.12—2.19 段所述参考钻孔处置概念的试点研究中考虑的设计采用了包括称为贴有“对中器”小标签的废物货包，这些标签由与废物货包相同的材料制成。营运组织应当使用适当的回填材料，以确保废物货包以适当的间距放置，以提供热量管理和废物货包之间的相互作用。营运组织在填筑废料和回填物（见第 6.70 段）时，其强度应当足以承受预期的垂直和水平负载及剪切力。²¹

6.68. 在更大的范围内，钻孔处置设施的运行可以使用连续或运动方法来执行。在连续运行的情况下，废物货包在产生时被放置在钻孔处置设施，因此，营运组织可能需要保持钻孔开放并对钻孔进行几年的控制。运动操作包括在贮存设施中积累废物，直到有足够的废物在短时间内（即几周到几个月）进行处置。在活动的基础上操作允许建造单一处置钻孔，接收废物并作为一个离散的项目进行密封，从而减少钻孔退化或管理不善的机会，如果它在单一废物放置操作之间保持长时间开放的话。在较大容量钻孔的情况下，连续运行可能是适当的，在这种情况下，在活动基础上运行将需要更广泛的废物贮存设施。在任何一种情况下，营运组织都应当在钻孔开放时防止雨水、地表水和地下水进入钻孔。这可以通过在废物放置、回填和密封运行之间提供钻孔套管、钻孔排水系统和钻孔上的安全覆盖物来实现。营运组织应当为在安全论证文件中运行处置设施的拟议方法提供正当性。

²¹ 在第 2.12—2.19 段所述参考钻孔处置概念的试点研究中发现，就避免在处置区形成不必要的空隙而言，将每个废物货包放置在已经放置在钻孔中的定量湿水泥基回填灌浆（水泥浆）中更为有效。为了遵循这种方法，需要具有适当流变和凝固时间的回填，以便废物货包可以沉入水泥浆，然后回填可以在下一个废物货包放置之前凝固。营运组织应在实际条件下进行适当的试验，以证明用于制造回填的材料和加工产生的混合物具有所需的特性（例如，适当的流变和凝固时间）。

6.69. 营运组织应当考虑是否制定废物放置策略，例如将含有高活度或长寿命废物的废物货包放置在处置区底部，将含有低活度短寿命放射性核素的废物货包放置在处置区顶部。理论上，这可以提高关闭后的安全限制人类意外侵入的后果。然而，需要大量的场址表征数据和详细的安全评定模式来证明这种放置策略的正当性，而且在实践中也可能难以实施，因为它们可能需要更长的贮存时间、更复杂的贮存安排以及对单一废物货包的放置和管理的更大保证，并可能导致对工作人员的总剂量更大。一般而言，营运组织应当致力于一个简单而稳健的废物放置策略，在该策略，任何废物货包都可以在处置设施的任何位置安全处置。在不可能做到这一点的情况下，例如有大量高活度源需要处置的情况下，应当考虑更复杂的废物放置策略。在安全论证文件中，营运组织应当为拟议废物放置策略提供正当性。

处置钻孔的回填

6.70. 在处置钻孔中完成废物放置后，营运组织应当回填处置区上方钻孔中的空间，直至将放置钻孔密封的点，回填应当及时进行，并符合授权和安全论证文件。处置钻孔应当回填，以防止它们成为地下水或气体流动以及放射性核素迁移的通道。营运组织应当回填钻孔，使其不比周围完整岩石更具渗透性。可能适合作为回填材料的材料包括水泥和沙子的混合物、膨润土以及膨润土和沙子的混合物。营运组织应当采取措施，如分阶段回填，以减少回填中留下空隙的可能性。

处置钻孔的密封

6.71. 回填处置钻孔后，营运组织应当密封钻孔，密封应当及时完成，并符合授权和安全论证文件。营运组织应当记录安全论证文件中钻孔密封的方法和设计。营运组织应当确保密封材料形成液压密封。处置钻孔应当密封，以防止它们成为地下水或气体流动以及放射性核素迁移的通道。营运组织应当密封钻孔，使其不比周围完整岩石更具渗透性。

6.72. 营运组织应当考虑到钻孔的大小、钻孔是否有套管以及场址的地质情况，选择用于钻孔密封的技术。在窄直径钻孔的情况下，标准钻孔密封技术可能是合适的。

6.73. 回填物上方钻孔的顶部几米应当填充土壤，以便在没有特殊设备的情况下无法探测到钻孔[15]。可以使用各种回填材料和深度间隔，但在所有情况下，营运组织都应当证明材料的选择和处置设施部件的设计是正当的，同时考虑到它们的预期目的、安全功能和在处置系统条件下的性能。例如，根据场址的特定条件，营运组织可以考虑使用粘土基回填和/或土壤来填充岩石区上方的钻孔顶部。

视察和评审

6.74. 监管机构应当要求营运组织进行定期评审，涵盖质量保证监查、运行工况、环境取样和分析、职业健康和安全以及记录维护等问题。营运组织应当向监管机构提交这些评审的结果。

6.75. 监管机构应对处置运行进行独立监查、视察和评审，以确保实施了适当的监管控制并开展了适当的技术工作。营运组织应当根据要求及时采取适当的纠正措施。

记录

6.76. 应当建立可追溯的记录，描述和描述放射性废物和所开展的废物管理活动。记录应当酌情包括以下各类信息（见 GSG-16[26]第 5.64 段）：

- (a) 废物的来源及其产生过程；
- (b) 废物的物理和化学形状及特性（例如，废物整备所用材料及其放射性核素保留特性）；
- (c) 废物中放射性核素的活度、浓度和总活度；
- (d) 废物中裂变核素的质量、活度浓度和总活度；
- (e) 废物货包的类型；
- (f) 废物货包表面的辐射水平；
- (g) 废物货包的表面污染程度；
- (h) 废物或废物货包的质量和重量；
- (i) 废物处理日期；
- (j) 用于描述和表征废物以及确认符合既定废物验收标准的方法、设备和程序。

6.77. 还应当创建和保留描述放射性废物管理设施历史的记录，如在设施设计、建造、调试、运行和关闭期间获得的数据。这些记录酌情包括以下内容（见 GSG-16[26]第 5.66 段）：

- (a) 授权（如执照、许可证、修正案）；
- (b) 调试记录；
- (c) 安全论证文件和安全评定；
- (d) 环境影响评定；
- (e) 同行审评报告；
- (f) 技术规范和修正案；
- (g) 设计备选方案、概念、文件、计算和图纸；
- (h) 实际建造设施的记录（“竣工”记录）；
- (i) 核准的设计变更；
- (j) 结构、系统和部件的采购记录；
- (k) 运行程序；
- (l) 应急准备和响应安排的执行、评审、更新和维持记录，包括培训、演习、对实际紧急情况响应、查明的经验教训和实施的纠正措施；
- (m) 废物放置计划；
- (n) 设施运行期间产生的记录，包括放置废物货包的记录；
- (o) 流程和活动的评定、视察和核实记录；
- (p) 任何不符合项和纠正措施的记录；
- (q) 人员的培训、经验和资格记录；
- (r) 监控数据；
- (s) 已发生的任何事件，包括事故的记录；
- (t) 营运组织与监管机构之间的互动记录（如会议、视察）。

6.78. 应当在管理系统中规定要记录的信息范围和详细程度，采用分级方法。GSG-16[26]第 5.64—5.74 段提供了关于记录及其维护和保存的进一步建议。

钻孔处置设施的关闭

6.79. SSR-5[4]要求 19 规定：

“处置设施的关闭方式必须规定安全论证文件表明在关闭后具有重要的安全功能。关闭计划，包括从设施的能动管理过渡，必须明确界定并切实可行，以便能够在适当时间安全地进行关闭。”

6.80. 当钻孔处置设施的地面设施退役（见第 6.13 段）且用于废物放置的所有钻孔都已回填和密封时，该设施应当关闭。营运组织应当按照监管机构批准的安全论证文件中包含的设施关闭计划关闭设施。

6.81. 为了获得监管机构对钻孔处置设施关闭的批准，营运组织应当根据当前数据（包括设施建造和运行的记录）制定并向监管机构提供更新的安全论证文件，并为实现关闭后的安全提供合理保证。

6.82. 为了获得监管机构对钻孔处置设施关闭的批准，营运组织应当根据当前数据（包括设施建造和运行的记录）制定并向监管机构提供更新的安全论证文件，并为实现关闭后的安全提供合理保证。

6.83. 关闭后将场址的责任移交给另一个组织的任何安排都应当按照监管规定进行要求并清楚地记录在案。当关闭操作圆满完成时，关闭后的机构控制期即可开始。根据监管框架和授权条件，过渡到关闭后机构控制期可能需要单独的监管批准。

7. 钻孔处置设施的安全保证

钻孔处置设施监控计划

7.1. SSR-5[4]要求 21 规定：

“在处置设施建造和运行之前和期间以及关闭之后，如果这是安全论证文件的一部分，必须执行监控计划。该计划必须旨在收集和更新防护和安全所需的信息。必须获取信息以确认设施运行期间工作人员和公众安全以及环境保护所需的条件。还必须进行监控以确认关闭后不存在可能影响设施安全的任何情况。”

7.2. 监控是对放射性或其他参数的连续或定期测量，或对结构、系统或部件状态的确定[5]。根据 SSR-5[4]要求 5，处置设施的安全必须尽可能通过非能动手段提供，并且必须最大限度地减少其对监视等未来行动的依赖。因此，对钻孔处置设施的监控应当以确保安全为目的。

7.3. 营运组织在设计钻孔处置设施监控计划时，应当考虑废物造成的危害程度，并相应地采用分级方法。营运组织应当记录监控计划的正当性和计划本身，包括其目标和范围。

7.4. 监控计划应当具有以下目标：

- (a) 符合适用法律及监管规定；
- (b) 适用于设施开发、调试、运行、关闭和机构控制期间；
- (c) 包括收集和更新信息，以帮助评定处置设施及其结构、系统和部件的行为，以及废物处置系统对公众和环境的影响；
- (d) 通过提供可用于证明符合情况和试验假设的衡量标准，帮助建立对设施安全的信心，并制定安全论证文件；
- (e) 提供可用于向包括公众在内的相关各方保证设施安全的信息。

7.5. 营运组织应当描述并判断哪些参数需要监控，以及监控的方式、场址、频率和持续时间。营运组织应当酌情在监控计划中列入放射性、环境和工程参数的测量，例如放射性本底水平，水的水位、流量和成分，以及岩石应力。在决定测量什么时，营运组织应当注意到，从处置设施中的废物迁移到将来可能影响受体（如人）的场址（如生物圈中的地下水排放点）的放射性核素浓度很可能很低无法测量。对于钻孔处置设施，特别是对于含有短寿命放射性核素的废物，预计这些废物在废物容器中会大量衰变，监控计划在空间范围和持续时间方面都可能非常有限。

7.6. 根据 SSR-5[4]要求 21，要求在钻孔处置设施开始运行之前开始监控。在场址表征期间，营运组织应当使用监控计划建立环境条件（如地下水位）的基准，据此可以比较和评定后续的测量和变化（如钻孔）（见 SSG-31[37]第 6.3—6.6 段）。随着钻孔处置计划从一个阶段进入下一个阶段，营运组织应当更新监控计划的目标，从而更新监控活动。

7.7. 根据 SSR-5[4]第 5.4 段要求设计和实施监控计划,以便在设施关闭后不降低设施的总体安全水平。在启用钻孔处置设施之前,营运组织应当密封场址或附近可能降低设施安全的任何监控钻孔或其他钻孔,例如充当地下水或气体流动以及放射性核素迁移的通道。应当根据授权和安全论证文件及时进行密封,并确保密封的钻孔不比周围完整岩石更具渗透性。

7.8. 营运组织应当明确记录监控计划的目标、范围和结果,并向相关各方通报,同时适当考虑结果和相关各方的意见。

7.9. 营运组织应当利用监控结果来更新和建立对钻孔处置设施安全论证文件的信心,并帮助对未来步骤做出决策。营运组织应当利用监控结果来获得和增进对潜在放射性核素转移途径和潜在排放场址的了解。营运组织应当尽可能利用监控计划的结果,协助开发和校准用于安全评定的地圈和生物圈模式。

7.10. 营运组织应当建立应对意外监控结果的方法。意外的监控结果并不一定意味着必须采取治理行动或保护措施(见 SSG-31[37]第 8.11—8.15 段)。应对措施可能各不相同,从不采取行动,到增加取样频率以确定或确认空间和时间趋势,到改变设计或程序,到采取重大治理行动,甚至到回收填埋的废物。营运组织在监控结果时应当强调确定趋势,而不是赋予太多的重要性个人测量。只有在非常仔细的研究和正当性,包括考虑与治理行动相关的风险之后,才能采取废物回收等行动(见 SSG-31[37]第 8.15 段)。

7.11. 监管机构应当就根据国家监管框架建立适当的监控计划提供指导,并应当定期评审营运组织的监控安排和结果。监管机构应当考虑进行独立监控。

关闭后的时期和机构控制

7.12. SSR-5[4]要求 22 规定:

“必须为关闭后的一段时间编写计划,以解决机构控制和保持处置设施信息可用性的安排问题。这些计划必须符合非能动安全特点,并必须构成批准关闭设施所依据的安全正当性的一部分。”

7.13. 营运组织负责在整个授权期内实施和维持对钻孔处置场址和设施的能动机构控制。这一责任包括对设施关闭后的时期进行计划。机构控制一般分为能动控制和非能动控制。

7.14. 能动机构控制措施包括：

- (a) 按照授权经营场址及设施；
- (b) 在核准场址维持标志、围栏及警卫，例如，防止未经授权的接触和意外的辐射照射；
- (c) 提供核安保；
- (d) 监控和监视活动；
- (e) 可能必要的治理工作。

7.15. 非能动机构控制包括：

- (a) 处置设施记录的存档；
- (b) 对土地所有权的控制；
- (c) 限制土地使用。

7.16. 在能动机构控制期之后，应当该是非能动机构控制提供安全保证的时期。营运组织应当在关闭和机构控制计划中特定说明将实施哪些能动和非能动控制，以及能动机构控制将维持多长时间。

7.17. 能动机构控制期的持续时间应当在授权过程中确定，并由监管机构批准。营运组织应当在安全论证文件的基础上为拟议能动机构控制期提供正当性。营运组织应当使用安全论证文件来评定场址的特定特征以及废物造成的当前和未来危害（例如，作为放射性衰变、环境变化和人类意外侵入的可能性的函数）。从能动机构控制向非能动机构控制转变的时间可能与钻孔处置设施关闭的完成时间一致，也可能在较晚的日期发生。在能动机构控制期间，应当定期评审向非能动机构控制转变的计划时间，并应当得到监管机构的批准。

7.18. 在大于建议最小深度的深度处置废物的钻孔处置设施的安全应当不取决于能动机构控制，根据安全情况，关闭后相当短时间的能动机构控制可能是正当的。在这种情况下，有可能在短短几年内将处置场址转为其他用途，可能需要一些持续的非能动机构控制（例如对土地所有权的控制）。

在比建议的最小深度浅的深度处置废物的钻孔处置设施，应当包含由安全论证文件确定的主要具有短寿命放射性核素的废物，因此，此类设施的安全也应当不依赖于关闭后长期的能动机构控制。

7.19. 视国家法律和法规而定，为钻孔处置设施的安全评定计算而假定的机构控制期可能长达几百年（例如 100—300 年）。机构控制不一定需要或这么长时间有效，也不一定在这一时期后停止，相反，几百年是一个营运组织在安全论证文件中应当该要求的最长期限。能动机构控制维持的时间越长就需要更多的资源。

7.20. 营运组织应当拟议并尽可能在授权终止后的一段时间内启动适当的非能动机构控制。在营运组织能动机构控制期结束时，钻孔处置设施的责任可能会移交给监管机构或政府，或者场址可能会完全解除控制。在场址移交或释放之前，营运组织应当将钻孔处置设施的所有相关信息存档。记录的存档应当保持对设施的位置和特征的了解机构。钻孔处置设施应当存档的信息包括：

- (a) 处置设施的位置；
- (b) 处置设施场址的地质、地球化学和水文资料，包括从场址表征中得出的数据（见第 6.14—6.21 段和附录 I）；
- (c) 设施设计的详细情况，包括钻孔的位置和说明以及相关的工程结构、系统和部件（例如钻孔回填、套管、密封）（见第 6.22—6.26 段），以及废物和废物货包的说明，包括废物的来源、存在的放射性核素、使用的废物容器和废物处置的深度；
- (d) 说明设施的建造和运行情况，包括日期和细节，如测得的流入钻孔的水量，以及任何不符合项和为纠正这些不符合项而采取的行动（见第 6.38—6.48 段）；
- (e) 已经发生的任何事件，包括事故的记录；
- (f) 安全论证文件和安全评定，包括说明关闭后期间的安排、监控计划和监控结果（第 7.1—7.11 段）；
- (g) 监管机构颁发的授权（即许可证和执照）。

7.21. 营运组织应当作出安排，尽可能长时间地保留信息，并应当考虑为此目的利用国家档案。如果场址的责任已移交给另一个实体（如监管机构、政府），营运组织应当在可能的情况下应当要求向该实体提供援助。

核材料的衡算和控制

7.22. SSR-5[4]要求 23 规定：

“在受核材料衡算和控制协定约束的处置设施的设计和运行，必须考虑确保安全不因核材料衡算和控制系统所要求的措施而受到损害”。

7.23. 已经制定了核材料衡算和控制系统，规定了核材料的问责制，以便在短期和中期内及时发现核材料被转用于未经授权或未知目的的情况。政府应当以不损害安全的方式促进核材料衡算和控制的有效实施。

7.24. 本“安全导则”范围内的钻孔处置设施应当仅接收第 1.1 段规定类型的放射性废物。这些废物大多不包括核材料，因此不属于核材料衡算和控制系统的范畴。一些废弃密封放射源含有裂变核素，但由于裂变核素含量较低，不属于核材料衡算和控制系统的范畴。在适用的情况下，应当在设计钻孔处置设施的早期阶段考虑核材料的衡算和控制系统。

7.25. 一些废弃密封放射源的屏蔽含有原子能机构保障所适用的足够贫化铀。原子能机构的保障在适用的情况下适用于钻孔处置设施的整个开发、调试、运行、关闭和机构控制。在包括裂变材料在内的废物钻孔处置设施投入使用前和投入使用期间，为原子能机构保障的目的进行监视，目的是确保对裂变材料的了解持续不断，并确保场址不存在与此类材料相关的任何未申报活动。按照目前的安排，原子能机构的保障活动取决于能动的监视和控制（见 SSR-5[4]第 5.16 段和第 5.17 段）。

7.26. 如果核材料衡算和控制系统适用于封闭钻孔处置设施，则必须避免侵入性方法。如果原子能机构的保障适用于封闭钻孔处置设施，则应当通过远程手段（如卫星监控、航空摄影、微震监视、行政安排）实施保障控制措施。

7.27. 还可能需要对核材料和核设施采取实物保护措施，原子能机构《核安保丛书》第 13 号《关于核材料和核设施实物保护的核安保建议》（INFCIRC/225/Revision 5）[42]阐述了这些措施。

管理安全和安保之间的接口

7.28. SSR-5[4]要求 24 规定：

“必须采取措施，确保在处置放射性废物时采取综合的安全措施和核安保措施。”

7.29. 如参考文献[8]所示。政府应当在废弃密封放射源的管理中对安全和安保采取分级方法。负责放射源安全和安保的组织应当促进适当的安全文化和核安保文化（见参考文献[8]，GSR Part 2[25]和原子能机构《核安保丛书》第 7 号《核安保文化》[43]）。

7.30. 政府应当确保废弃密封放射源的长期贮存设施和处置设施在获得监管机构授权之前接受安全和安保评定，并根据安全和安保监管要求酌情选址、设计、建造、运行、退役或关闭[8]。

7.31. 监管机构应当规定废弃源的长期贮存和处置的安全和核安保要求[8]。根据 GSR Part 1（Rev.1）[28]第 2.40 段，要求营运组织以综合方式设计和实施安全措施和核安保措施，以便核安保措施不损害安全，安全措施不损害核安保。

7.32. 根据原子能机构《核安保丛书》第 11-G（Rev.1）号《使用和贮存中的放射性物质及相关设施的安保》[44]，营运组织应当设计和实施一个核安保系统，通过实施安保措施来保护放射性物质，以解决威慑、探测、延迟和响应三大安保功能以及安保管理问题。核安保措施的范围应当反映对设施的潜在损害和未经授权移除放射性物质或放射性废物的评定风险。安保系统应当包括一套综合的核安保措施，旨在防止在场址运行、关闭和关闭后任何能动机构控制期间发生恶意行为。鼓励通过与相关主管当局的安排和适当联络进行合作，以便在发生恶意行为时提供援助。核安保措施应当以风险知情分级方法为基础以便为在恶意行为中使用能够导致类似潜在放射性后果的材料提供类似的安保保障（见原子能机构《核安保丛书》第 11-G

号[44]）。原子能机构《核安保丛书》第 14 号《放射性物质和相关设施的核安保建议》[45]提供了进一步的建议。

7.33. 根据本“安全导则”提供的建议，钻孔处置应当导致第 1.1 段描述的放射性废物的永久处置。深度大于建议的地表下最小深度，从而保证安全和核安保。如果钻孔处置设施中的废物处置深度大于建议的最小深度，则只要处置场址的任何钻孔保持开放，就需要在该场址采取安保措施。在密封钻孔和关闭设施和场址时，主管当局可根据风险知情分级方法考虑取消安保措施。

7.34. 构成显著核安保风险的废物可能需要特殊的安保考虑和进一步的监管授权。例如，一个废弃小型密封放射源可能仍含有大量铯-137，因此，如果出于恶意目的，将构成核安保风险。如果此类废物是在地表附近处置的，则在处置设施关闭后可能需要继续采取核安保措施，以防止人类侵入和未经授权移走废物。这种措施应当继续存在，直到废料不再构成潜在的核安保风险或危害，并应当成为能动机构控制的一部分。然而，为了满足通过非能动手段提供安全的要求（见 SSR-5[4]要求 5），安全不能依赖于能动机构控制的无限期维护。

7.35. 如果钻孔处置设施将设在现有核场址，新的活动应当在该场址的核安保计划中加以考虑。

管理系统

7.36. SSR-5[4]要求 25 规定（脚注略）：

“提供质量保证的管理系统必须适用于处置的开发和运行的所有步骤中所有与安全相关的活动、系统和部件设施。每一要素的保证水平必须与其对安全的重要性相称。”

7.37. GSR Part 2[25]规定了管理系统的一般要求，GSG-16[26]提供了关于如何在放射性废物的处置前管理和处置期间满足要求的建议。监管机构和营运组织应当开发、实施、监控并寻求持续改进适合其设施和活动范围的管理系统。管理系统应当旨在确保保护人员和环境，应当分配明确的安全责任，应当解决安全领导问题，应当确保将安全纳入管理系统，并应当解决安全文化问题。GSG-16[26]附录为参与放射性废物管理或其监管监督

的组织提供了管理系统的要素清单。一个组织的管理系统所包含的要素以及流程和程序所包含的详细程度应当反映相关组织的性质及其角色和情况，并应当按照分级方法加以应用。

7.38. 监管机构应当评审营运组织的管理系统，并评审其在处置前管理和钻孔处置活动中的应用。就第 2 部分所述的参考钻孔处置概念而言，这种评审和监查的关键领域包括：

- (a) 收集和解释场址表征数据的充分性，以及在安全评定模式中使用这些数据的充分性；
- (b) 培训将从事处置前管理和处置操作的工作人员；
- (c) 所雇用的任何承包商的能力（例如钻孔建造）；
- (d) 妥善管理废物堆放以及各种事件和事故。

核或辐射紧急情况的准备和响应

7.39. 原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 7 号《核或辐射紧急情况的准备和响应》[46]采用分级方法，将各种类型的设施分为应急准备级别：例如，核电厂属于第一级，研究堆属于第二级，一些使用强力密封放射源的医院属于第三级。废弃密封放射源和管理过程中产生的少量中低水平次生废物的钻孔处置设施将属于第三级。

7.40. GSR Part 7[46]第 4.16 段指出：

“营运组织必须按照适用的要求，为其负责的设施或活动的核或辐射紧急情况建立和维持场内准备和响应安排”。

7.41. GSR Part 7[46]第 4.17 段指出：

“营运组织必须表明，并必须向监管机构保证，已作出应急安排，以便在场址有效响应与其负责的设施或活动相关的核或辐射紧急情况。”

7.42. GSR Part 7[46]第 6.19 段指出：

“设施或第一级、第二级、第三级或第四级活动的营运组织必须编写应急计划。该应急计划必须与负责核或辐射紧急情况的所有其他机构，包括公共当局的应急计划协调，并必须提交监管机构批准。”

7.43. GSR Part 7[46]第 6.17 段指出：

“应急计划必须特定说明如何酌情在场内、场外和跨越国界履行应急响应中的运行管理职责。”

7.44. 如果钻孔处置设施将设在现有核场址上，则应当修改该场址的应急计划，以考虑到新设施（见 GSR Part 7[46]第 4.26 段）。

8. 现有钻孔处置设施

8.1. SSR-5[4]要求 26 规定：

“在许可证终止之前，必须定期评定现有处置设施的安全。在此期间，当计划对安全进行显著改造或授权条件发生变化时，也必须评定安全。如果不符合[SSR-5]规定的任何要求，必须采取措施提高设施的安全，同时考虑到经济和社会因素。”

8.2. 监管机构应当要求钻孔设施的营运组织在整个授权期间定期再评定设施的安全，同时考虑与场址和设施相关的新信息，包括监控结果。一个钻孔处置设施可能需要几年到十年的时间来开发，在此期间之后可能会有一个持续几十年到几个世纪的能动机构控制期。根据 SSR-5[4]要求 26，营运组织需要在此期间多次评定设施的安全。

8.3. 营运组织应当评定对钻孔处置设施进行潜在显著改造的安全，例如增加另一个处置钻孔。对钻孔处置设施的潜在显著改造还可能包括拟议接受以前在安全论证文件中未考虑的一种废物。监管机构应当在早期阶段明确定期安全评定和设施改造评定的要求，以及钻孔处置设施和设施任何改造的授权方法。

8.4. 政府应当确保建立和实施安排，定期评定不再有营运组织的钻孔处置设施的安全。

8.5. 标准、程序和实践随着时间的推移而改变，现有的钻孔处置设施可能无法继续满足安全要求（例如参考文献[47]和参考文献[48]第 B.2.1 节）。特定而言，一旦能动机构控制停止，一些现有钻孔设施的暴露可能导致剂量水平超过应当考虑采取治理行动的水平。一些设施的意外侵入可能导致剂量超过每年 20 毫希沃特，甚至高达 100 毫希沃特 — 一个一般参考水平，超过这个水平，提高安全的治理行动几乎总是被认为是正当的（另见第 3.28 段）。

8.6. 应当为下列目的再评定现有钻孔处置设施的安全：

- (a) 根据《基本安全原则》[1]和 GSR Part 3[2]和 GSR Part 5[4]规定的要求，评定该设施是否为子孙后代和环境提供了令人满意的辐射防护；
- (b) 在没有提供令人满意的防护情况下，协助就是否有正当性采取治理行动以提高设施的安全作出决定，例如增加进一步的实物和/或行政保护或回收废物。

8.7. 根据 GSR Part 3[2]第 2.9 段，任何治理措施都必须是正当的和最优化的，并预期产生足够的收益，以超过与采取治理措施相关的损害。就钻孔设施而言，这意味着负责就治理行动做出决定的机构应当确定各种备选方案，然后评定和比较这些备选方案，以便为就首选行动做出决定提供投入。应当根据其对人类和环境的放射性和非放射性影响，并根据广泛的社会经济因素，对各种备选方案进行比较。可行性研究和论证可以支持决策过程。相关各方（如本地社区）应当参与确定、评定和比较潜在的治理行动。原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-15 号《受过去活动或事件影响地区的治理策略和过程》[49]提供了关于治理行动的正当性和最优化的进一步建议。

附录 I

钻孔处置设施选址和场址表征

钻孔处置设施的选址

I.1. 根据 SSR-5[4]要求 1，政府负责定义处置设施的开发、运行和关闭的总体流程，包括选址，并确保相关各方在适当阶段参与决策。营运组织需要进行选址和评价的所有必要活动[4]。除了评审安全论证文件之外，监管机构还应当从安全角度评定场址的适宜性，作为其评审和评定过程的一部分（见 GSG-13[30]第 3.170 段）。

I.2. 在选择钻孔处置设施的场址时，营运组织应当该选择一个可以开发安全设施的场址，而不是试图确定一个概念上的“最佳”或“最安全”的场址。

I.3. 在选址钻孔处置设施时，安全应当是首要考虑因素。如果能够为在几个候选场址开发钻孔处置设施提供合理的安全保证，营运组织在从这些场址中进行选择时，应当考虑一系列其他因素（见第 I.7 段）。

安全相关因素

I.4. 在选择钻孔处置设施的场址时，营运组织应当提供正当的安全保证，并适当考虑以下方面：

- (a) 场址和周围地区的地质和地质演化。该场址应当在地质上稳定，一些事件和过程可能会使处置的废物更接近地表环境，导致隔离丧失，并导致人员暴露在辐射下。这些事件和过程包括侵蚀、构造隆起、冰川作用和永久冻土融化。应当根据相关事件和过程的证据（例如近期或历史上的构造事件和过程、断层和地震活动、原地应力、土壤液化、火山作用）。地质稳定性通常与缺乏有能力的断层、底辟、盐丘和火山等特征以及不存在大的地应力差相一致。场址的地质应当包括具有适合用作处置区特征的地层或层位，并且具有足够的厚度来包容废物，并将处置的废物与任何具有更大渗透性的上覆或下伏区域分开。

- (b) 场址和周围地区的地貌和地貌演变，以及可能影响设施运行的事件和过程。该场址应当地貌稳定；这通常与缺少山地地形等特点相一致陡峭的坡度或有活动沉降或滑坡的区域。
- (c) 水文和水文地质演变。用于评价水文和水文地质条件的信息应当包括但不一定限于岩石渗透性和孔隙度、地下水流速和方向、水力传导率、水头和梯度以及地下水井的存在。倾向于有利于钻孔处置设施选址的特征包括低渗透性、低水头梯度和低深层地下水流速的岩石，这些特征通常与低地形以及没有含水层和渗透性高的岩石（如喀斯特）相一致。可能影响钻孔处置设施运行的事件和过程包括洪水，因此需要考虑设施区域的气候和极端天气条件。参考文献[19]包含的一般安全评定表明，可以开发安全的钻孔设施，在水文不饱和或饱和条件下处置废弃密封放射源，但建议避免在地下水位随时间变化的区域处置废物（另见第 1.39 段）。营运组织应当通过适当的设施设计，确保处置的废物与场址存在的任何含有饮用水的含水层充分隔离（见第 6.44 段）。
- (d) 地球化学和地球化学演化。用于评价地球化学条件的信息应当包括但不一定限于岩石类型和矿物学，以及岩石和地下水的成分和年龄。倾向于有利于钻孔处置设施选址的特征包括旧地下水的存在，这往往表明过去地下水流量低，以及地下水的地球化学通常不会与现有的岩石和工程屏障系统的材料发生反应。但是，应当不假定不能在场址建立安全处置设施具有其他特征，如存在含盐地下水，这些场址的适宜性应当通过安全评定来确定。
- (e) 人类意外侵入。营运组织应当将钻孔处置设施设置在远离矿产、石油、天然气、地热、水或其他资源的区域，以减少人类意外侵入的可能性。

I.5. 第 2 部分中描述的参考钻孔处置概念已被评定为在各种地质和气候条件下实施具有潜在的安全（见参考文献[19]）因此，根据待处置废物存量大小，应当该有可能满足许多场所的安全要求。

I.6. 虽然上述确定的因素很少代表钻孔处置设施选址的绝对排除标准，但选择一个兼顾有利特征和避免不利特征的场址，可以比其他情况更容易、更经济地证明安全，使该场址更容易为相关各方所接受。

其他因素

I.7. 营运组织应当适当考虑其他（如科学、技术、社会经济）因素，包括核安保，相关各方的意见，保护人类和环境免受非放射性风险（包括地下水资源可能受到的污染），信息的可用性，成本，土地所有权，基础设施需求（如场址无障碍、水电等服务的提供），运输、法律和计划方面的考虑；以及该场址靠近人口中心、国家公园、自然保护区、具有特殊科学价值的场址、危害设施、文化和宗教场所、有争议的边界和国界。将钻孔处置设施设在现有核设施的场址上，可以提供现有的核安保基础设施，并酌情提供保障基础设施。

选址程序

I.8. 根据适用的法律法规以及相关政策和策略，营运组织应当制定、沟通和领导一个精心计划和系统的选址流程，让相关各方在适当阶段做出决策。营运组织应当确保选址过程中的步骤清晰、正当，并以可追溯的方式记录下来。

I.9. SSG-29[9]关于近地表处置设施选址的附录 I 描述了一个过程，在该过程，从大面积（可能是整个国家）开始，使用一系列预定义的技术和社会经济适宜性或不适宜性（筛选）标准循序渐进缩小处置设施的潜在位置，以产生潜在选址区域的候选名单。同样的过程可以应用于钻孔处置设施的选址。一旦确定了潜在的选址区域，营运组织应当进行更详细的调查，以确定它们是否适合钻孔处置。营运组织应当考虑潜在选址区域是否包括任何现有核设施（包括放射性废物贮存设施和处置设施）或可能适合钻孔处置设施的政府拥有土地。

I.10. 政府可以简单地决定指定一个场址来开发处置设施，然而不建议这样做，因为在一些情况下，这种实践未能获得社会认可。一些放射性废物处置设施选址和开发计划涉及与政府的合作以及与本地社区和营运组织的伙伴关系。这种伙伴关系方法的主要收益是增强本地社区在影响其未来的决策中的权能。伙伴关系方法可能涉及寻求那些表示有兴趣参与确定某一场址是否适合放射性废物处置设施的进程的志愿社区。这种意向表达可以由机构群体的适当代表传达（例如，来自本地政府机构），可以是应当营运组织或政府的邀请做出的，也可以是主动提供的。志愿者社区应当有正式或非正式的权利退出这一进程，并可以获得适当的社区福利待遇。

I.11. 在确定了潜在合适场址的短名单后，营运组织应当根据安全相关因素和其他因素对每个场址进行评定（见第 I.4—I.7 段）。制定令人置信的安全论证文件的相对容易程度也可能是在备选场址之间进行选择的一个因素。营运组织应当符合预先确定的选址过程，并应当让相关各方参与选址评定。营运组织应当确保所符合的流程包括申报利益冲突的适当安排。营运组织应当以透明的对所考虑的因素进行推理，根据这些因素对场址进行排名，并就选择哪个场址提出建议。

钻孔处置设施场址表征

I.12. 钻孔处置设施场址表征的目的是支持对场址特征以及场址将如何随时间演变的一般理解（见 SSR-5[4]要求 15）。营运组织的钻孔处置设施场址表征计划应当包括调查地貌、地质、水文地质、水文、地球化学、气候、天气和生态，以及土地利用和人类行为如何影响环境。该计划应当包括对场址及其周围生物圈的描述，特别是对设施放射性核素污染的地下水可能排入地区的描述。该计划还应当包括收集关于土地使用、本地居民习惯（特别是关于食物消费的数据）和饮用水来源的信息，营运组织应当利用这些信息来帮助识别关键群体和潜在照射群体，以评定潜在剂量和风险。

场址表征分级方法

I.13. 一般而言，场址表征计划的范围（包括场址勘察钻孔的数量）和所需的场址表征信息量将取决于场址的复杂性和安全评定中指出的必要安全裕量。由于各种原因，可能会产生较大的安全裕量，例如废物库存包括少量长寿命放射性核素、场址缺乏地下水或地表条件非常干旱。在安全裕量较大的情况下，营运组织有可能提供合理保证，确保钻孔处置设施将满足相关剂量和风险标准，尽管不太广泛的场址表征计划带来了不确定性。

I.14. 第 2 部分描述的参考钻孔处置概念旨在提供高水平的隔离，并已被证明是在各种场址条件下适当少量废弃密封放射源库存的安全处置解决方案[19]。在许多国家，待处置的废弃密封放射源的库存很少，包括很高比例的短寿命放射性核素，与钻孔相关的风险这种废物的处置量被认为很低。在这种情况下，钻孔处置设施场址表征应当比近地表处置设施或地质处置设施的大量废物库存的场址表征更少。

I.15. 对于少量废弃密封放射源库存的钻孔处置设施，主要含有短寿命放射性核素，营运组织应当将收集场址特定数据的重点放在与所用评定模式相关的参数上。出于建立信任的目的，可能会收集其他特定于场址的数据和信息，虽然这些数据对于证明钻孔处置设施的安全可能不是必要的，但它们仍然是有用的，例如在证明对场址的理解和在安全论证文件中开发多种推理方式方面。

I.16. 参考文献[19]描述的一般安全评定。确定了预计将对废弃密封放射源参考钻孔处置概念的安全产生最大影响的参数。这些问题属于水文地质学和地球化学领域，它们共同决定了不锈钢处置胶囊和容器的腐蚀速度以及放射性核素通过地圈的迁移速度。这些知识对于确定场址表征计划和利用从计划中获得的理解为场址特定设计提供信息特别有价值。

I.17. 关键参数（即对安全最重要的参数）的识别，允许场址表征计划的重点，是开发参考文献[20]提出的分层建模方法的关键动机。描述了 5 个模式，最简单的模式（第 1 层）需要最少的信息，最复杂的模式（第 5 层）需要最多的信息。本“安全导则”表 1 列出了不同模式所需的场址特定信息。

基于桌面场址表征研究

I.18. 营运组织为开发钻孔处置设施而制定的场址表征计划一般应当从桌面研究开始。营运组织应力求最大限度地利用场址表征范围内各学科的现有信息（见第 I.12 段）。营运组织应当咨询相关的国家和其他图书馆、调查、记录和研究所（例如地质学、水文学、水文地质学和气象学）以及本地专家，以收集与场址相关的详细知识和信息。如果拟议在现有核（或其他）设施所在地建立钻孔处置设施，钻孔处置设施的营运组织应当要求并利用现有设施营运组织掌握的信息，包括现有的任何安全论证文件、安全评定或类似分析。

表 1. 第 1 层至第 5 层模式所需的场址特定参数摘要
(基于参考文献[20])

层级	近场	地圈	生物圈
1	放射性核素库存	-	-
2	放射性核素库存 钻孔处置区： • 内径 • 垂直长度	-	-
3	放射性核素 库存处置胶囊 和容器 ^a ： • 外径 • 垂直长度 • 壁厚 • 焊缝厚度 包容屏障 ^a ： • 垂直长度 • 间隙厚度	水文地质： • 渗滤率^b • 饱和度^b • 总孔隙度^b • 导水率 • 水力梯度 • 充水孔隙度 地球化学： • 酸碱度 • Eh • 氯化物浓度 • 硫酸盐浓度 • 总无机碳浓度	-
4	放射性核素库存 扩散系数 吸附系数 渗滤率 ^b 饱和度 ^b 总孔隙度 ^b 颗粒密度 导水率 水力梯度 充水孔隙度 处置胶囊故障次数	扩散系数 吸附系数 渗滤率 ^b 饱和度 ^b 总孔隙度 ^b 颗粒密度 导水率 水力梯度 充水孔隙度 受污染水供应的水需求 比例	集中系数 房屋尺寸 房屋通风率 土壤总孔隙度 土壤饱和度 渗滤率 摄入率 吸入率 入住率 灌溉率 作物产量

表 1. 第 1 层至第 5 层模式所需的场址特定参数摘要
(基于参考文献[20]) (续)

层级	近场	地圈	生物圈
5	放射性核素库存	扩散系数	浓度系数
	扩散系数	吸附系数	花园尺寸
	吸附系数	渗滤率 ^b	房屋尺寸
	渗滤率 ^b	饱和度 ^b	房屋通风率
	饱和度 ^b	总孔隙度 ^b	土壤总孔隙度
	总孔隙度 ^b	颗粒密度	土壤饱和度
	颗粒密度	导水率	渗滤率
	导水率	水力梯度	可吸入粉尘浓度
	水力梯度	充水孔隙度	侵蚀速率
	充水孔隙度	受污染水供应的水需求比	摄入率
	近场部件的故障/退化 时间	例	吸入率
			居留率
			灌溉率
			作物产量

说明:

- ^a 预计不同系统大致相似。
- ^b 仅当处置区位于非饱和区时才需要。
- 无需任何数据。

I.19. 营运组织应当查阅该区域的长期（即几年）气象记录，表明对该期间发生的气象条件范围的理解，并评定预计未来会发生的条件范围。营运组织应当评定场址对恶劣天气事件（如风暴、洪水）的易感性。营运组织应当使用气象数据来估计场址的蒸散率和补给量。

I.20. 营运组织应当收集信息，以描述场址和周围地区的地质、水文、水文地质和地球化学表征，特别是确定和描述本地地下水（深层和浅层）的来源以及设施附近地下水可能排放的区域。营运组织应当利用这一信息确定处置设施中的放射性核素可能导致放射性照射的潜在途径。

I.21. 营运组织应当收集关于人口规模、场址和密度的信息；人类活动，包括土地使用（如农业），关于人类行为（如食物消费率），以及当前和潜在未来条件下剂量评定所需的饮用水源。营运组织应当利用关于当前生物圈性质的信息，为安全评定中使用的模式设定背景。营运组织应当使用关于人群和习惯的信息来识别代表人和潜在照射群体，以便在安全评定中考虑。

基于地表场址表征研究

I.22. 营运组织应当进行调查、实地工作和基于地表调查，作为场址表征计划的一部分，以增加关于场址及其周围环境的知识和信息。营运组织应当进行安全评定，以解释关于处置系统的现有知识和信息，并确保进一步的场址表征活动侧重于与废物处置安全相关的问题。

I.23. 营运组织应当进行基于地表的研究，以收集相关场址及其周围地区的地貌和水文信息（如地貌、侵蚀、土地运动、滑坡、断层、地震、湖泊、河流、沉积、海岸线），包括过去气候状态对地貌发展的影响。

I.24. 营运组织应当进行基于地表的地质研究，以收集现有岩石类型的信息（特别是在处置深度），并了解其矿物学、空间分布、可变性和结构，包括断层、裂缝和组构的存在。

I.25. 营运组织应当进行地面地球物理研究，以收集相关地质、地质结构和水文地质信息深度。除非已有足够质量和相关性的数据，否则营运组织应当进行适合场址规模和处置设施拟议深度的地震折射测量，并适当安排测量线（例如在处置场址周围形成正方形或矩形阵列）。营运组织应当使用适当的基于计算机的技术来解释已经收集的数据，并应当尝试了解风化和完整基岩的空间分布以及断层和其他地质结构的位置。即使对于可能有多种解释的复杂场址，地震调查通常也是无需钻孔即可了解地下地质的最有效方法。营运组织应当考虑进行电阻率调查，以补充地震调查的结果，并进一步了解场址的地质和水文地质。

I.26. 营运组织应当按照管理系统中的相关程序，对基于桌面和基于地表的研究中收集的数据进行记录 and 文件化。营运组织应当以场址初步概念模式的形式解释数据，该模式从地表向下延伸至少最深处置区的底部。营运组织应当记录概念模式和数据之间的任何重大不一致之处（例如模式不能很好地解释观察结果的方面），应当认识到这些不确定因素，并应当计划和进行必要的进一步研究，以减少不确定因素。

I.27. 营运组织应当使用从基于桌面和基于地面的场址表征研究中获得的数据、模式和理解，以帮助决定场址表征钻孔的位置以及处置钻孔的潜在位置和处置区的深度。

基于钻孔场址表征研究

I.28. 营运组织应当认真执行一项计划，根据规定的程序，计划基于钻孔场址表征研究。除非场址已经存在合适的钻孔，否则营运组织应当钻一个或多个场址表征钻孔。场址表征钻孔的数量和位置应当符合信息安全论证文件和分级方法的需要。营运组织应当使用一种钻孔方法和钻探方法以最大限度地减少对待表征的处置系统的干扰，避免地下水被钻探活动污染的可能性，并包括纠正任何确实发生污染的方法。

I.29. 建议场址表征钻孔的直径为 100 毫米或更小。在可能的情况下，营运组织应当进行场址表征钻孔，直到拟议进行废物处理的地层底部，并应当确认不存在可能对钻孔处置设施的性能产生负面和显著影响的特点，如高压区。如果钻探到这样的深度不可行，可能是因为主地层的底部非常深，那么场址表征钻孔的底部应当至少在最深处置区底部以下几十米，营运组织应当提供所选深度的正当性。如果拟议在水文不饱和区进行废物处置，营运组织应当至少钻至地下水位深度的场址表征钻孔。

I.30. 在可能的情况下，营运组织应当设计和钻探场址表征和其他（如处置）钻孔，以便能够提取岩芯进行研究。在无法提取岩芯的情况下，营运组织应当收集和研究的钻探产生的岩石碎片。营运组织应当使用最佳实践来确定采集岩石样品（包括岩芯和岩石碎片）的位置和深度，并应当保持仔细、详细的记录。营运组织应当使用岩芯和/或岩石碎片来确定岩石的地质序列和矿物学。应当保存岩石样品以便进行更详细的检验（例如，用于评定岩石的放射性核素延迟特性）。

I.31. 营运组织应当在钻孔程序中指示钻孔工作人员记录水冲击、出水量、钻孔速度、裂缝和任何意外事件，如压缩空气损失（表明可能存在接缝或裂缝）、穿透率变化（表明可能存在岩性或构造变化）、岩石样品颜色的急剧变化（表明可能存在岩性变化或风化）和钻屑尺寸的急剧变化（表明可能存在裂缝）。营运组织应当利用记录的相关信息（例如地质层序和地下水位深度）来校准第 I.25 段所述的地球物理勘察。

I.32. 营运组织应当使用地球物理电缆测井技术监控场址表征钻孔的形状和直径，检测裂缝和破裂，并调查岩石的声学 and 电学特性（应用于帮助解释地震和电地球物理勘察）及其天然 γ 放射性。

I.33. 营运组织应当考虑进行进一步的钻孔研究，以支持适当的安全论证文件。表 2 列出了废弃密封放射源钻孔处置示范项目期间使用的探头和相关参数清单。

I.34. 如果场址表征钻孔含有地下水，营运组织应当进行水文地质调查，包括酌情测量水压、水头和坡度，以及在放置封隔器的情况下测量不同层位的水流入和流出速率（酌情使用泵试验、流量恢复试验和孔间试验），结果应用于确定岩石的水文地质特性。如果水文地质试验在露天钻孔中进行（没有封隔器），测量值往往会受到高流速区域的强烈影响，例如在钻孔的上部。

表 2. 钻孔下测井探头及相关参数

探头类型相关参数	探头类型相关参数
光学钻孔成像探头	光学钻孔图像
声波钻孔成像探头	钻孔倾斜度
双感应电导探头	天然 γ 放射性
聚焦电测探头	声波钻孔图像
三臂卡钳探头	钻孔倾斜度
全波声波探头	天然 γ 放射性
流量计 γ 温度电导率探头	中长间距感应电导率
热脉冲流量计探头	天然 γ 放射性

I.35. 如果场址表征钻孔含有地下水，营运组织应当进行地球化学调查，包括收集水样和测定水的化学成分，如（如有可能）其氧化还原电位（Eh）、酸碱度（pH）以及溶质、胶体和微粒的含量。营运组织应当考虑测量水的电导率，以提供关于离子含量和盐度的进一步信息。营运组织在收集、运输和分析样品时应当采用最佳实践（例如使用密封容器，尽量减少空气空间），以避免人为因素（例如氧化）和污染。

I.36. 营运组织应当尝试确定地下水中氯离子、硫酸盐、碳酸盐、碳酸氢盐和硝酸盐阴离子的浓度。在可能的情况下，营运组织应当利用地下水中氯化物和硫酸盐含量的信息，为工程屏障系统材料的决策提供信息（氯化物可能影响废物容器的腐蚀速度，硫酸盐可能在一些水泥基材料中引起不良反应）。在可能的情况下，营运组织应当在场址测量氧化还原电位，特别是在处置区，方法是在钻孔中使用适当的探针和封隔器，将被测量的深度区间与钻孔的其他部分分开。在不可能场址测量氧化还原电位的情况下，营运组织应当通过测量从钻孔中提取水样的氧化还原电位并进行校正以考虑到化学物种形成的变化、使用从相邻深度区间场址收集的数据以及使用岩石矿物学信息来估计氧化还原电位。

I.37. 对于处置区位于饱和、低渗透率岩石（如塑性粘土）中的场址表征钻孔，进水率可能非常低，甚至无法检测，这使得水文地质特性的测量和水样的收集变得困难。在这种情况下，营运组织应当尝试从提取的岩芯中提取水样，以确定宿主岩石的渗透性和相关扩散系数。营运组织可能需要根据进入钻孔的水的可探测性限值来估计地下水流速。营运组织应当测量宿主岩石层的厚度，并确定处置区与渗透性更强的岩石之间的距离。

I.38. 对于位于干旱地区的场址表征钻孔，地下水只能在深处找到，处置区可以位于不饱和环境。将处置区设在非饱和岩石中可能有利于关闭后的安全，因为在没有地下水的条件下，废物中的放射性核素与饱和区地下水之间的相互作用会大大延迟，从而为放射性核素衰变留出时间，并降低地下水途径的潜在剂量和风险[19]。对于处置区位于非饱和岩石中的场址表征钻孔，营运组织应当采取以下措施，合理保证宿主岩石在整个评定期内保持非饱和状态：

- (a) 根据过去和现在的地下水位和下伏岩石中地下水的特征，包括地下水化学、来源、年代、流量和压力的详细情况，收集关于水通过非饱和区渗漏的数量和速度的信息和证据；
- (b) 考虑到过去和现在的水文地质条件、未来可能的气候条件和侵蚀速度，对地下水位未来可能的移动和处置区岩石暂时饱和的可能性进行评定。

I.39. 营运组织应当不将处置区设在可能周期性（如季节性或每隔几年）饱和的岩石，因为这种短暂的地下水往往具有氧化特性，可能含有高浓度的溶质，这些特征会大大加速钢制废物容器的腐蚀。

附录 II

钻孔处置设施关闭后一般安全评定

II.1. 本附录的目的是解决与钻孔处置设施特别相关的安全评定问题。SSG-23[35]提供了关于放射性废物处置设施安全论证文件和安全评定发展的建议，此处不再重复。

II.2. 虽然本附录中的信息特定涉及根据第 2 部分中描述的参考钻孔处置概念开发的钻孔处置设施，但本“安全导则”的一些更一般的方面（例如，与假想方案开发相关的方面）可能适用于根据其他钻孔处置概念开发的设施。

钻孔处置一般安全评定

II.3. 在本“安全导则”，一般安全评定是对不基于特定场址的处置概念的初始安全评定。如果尚未选定场址，营运组织应当考虑进行一般安全评定，以协助在处置计划的早期阶段进行计划。例如，可以在概念开发阶段进行一般安全评定，以支持场址筛选和选择，帮助确定可能适合（或不适合）某一特定处置概念的废物库存，确定工程屏障和其他设计方面的需求，并确定可能适合（或不适合）的场址。当选定一个潜在的合适场址进行进一步调查时，营运组织应当考虑将一般安全评定的结果用于以下目的：

- (a) 帮助确定需要收集的关键数据和参数并进行评定，以便进行特定场址评价；
- (b) 帮助确定所需场址表征的程度；
- (c) 作为特定场址评价的基础。

第 3—5 类废弃密封放射源的钻孔处置一般安全评定

II.4. 参考文献[19]介绍的窄直径钻孔中废弃密封放射源处置的一般关闭后安全评定，是在几年的时间里发展起来的，它考虑了在废弃密封放射源中发现的 31 种最相关的放射性核素，并假设它们已在一系列不同的地圈条件下，在第 2 部分所述的带有不锈钢和水泥基屏障的钻孔中进行了处置。对非饱和条件下的废物处理和饱和条件下的废物处理进行单独的安全评定

计算。假设岩石能够表现为多孔岩石或裂隙岩石。考虑饱和区的一系列地下水流速，并进行一系列安全评定计算，假设流速为低、中、高。分析了各种地下水地球化学条件（如氧化还原电位、pH 值、氯化物和硫酸盐含量），以调查地球化学对系统中工程部件性能的影响。

II.5. 参考文献[19]提出的一般安全评定。包括对假想方案开发中使用的特点、事件和过程的全面分析。确定并定义了以下方案：

- (a) 设计方案。在这种情况下，假设处置设施已按设计建造、运行和关闭，并在关闭后期间按预期发展。
- (b) 缺陷假想方案。在该假想方案下，假设由于废物货包制造缺陷（如焊接缺陷）或钻孔处置概念实施缺陷（如回填物放置不当），近场的所有部件并非都如设计假想方案所设想的那样运行。考虑了缺陷情况的几种变体，所有这些都导致放射性核素从近场提前排放。
- (c) 意外地质特征假想方案。在该假想方案下，假设地圈的实际性能比预期性能差（例如，地圈遭受了意外的地震事件，导致高渗透率裂缝重新激活和/或相关吸附特性的改变）。
- (d) 不断变化的环境条件假想方案。在该假想方案下，假定处置系统受到气候变化的影响，导致某些地质特征（例如地下水）发生变化补给率和生物圈特征（如需水量、地表侵蚀率）。
- (e) 钻孔扰动假想方案。在该假想方案下，假设在处置钻孔附近钻一个取水钻孔导致人类更早暴露于放射性核素（例如，由于使用了取水钻孔中的污染水）。

II.6. 在一般关闭后安全评定[19]，有人认为，意外地质特征假想方案和不断变化的环境条件假想方案的潜在后果受已评定的地圈和生物圈特征范围以及针对设计假想方案进行的参数敏感性分析的限制。

II.7. 在一般关闭后安全评定[19]，由于处置区的深度、处置钻孔的占地面积小以及设施位于没有自然资源的区域，可能导致大规模的地面挖掘或地下采矿，钻孔干扰假想方案被排除（筛选）在更详细的考虑中。所有这些假设都表明，人类意外侵入直接影响处置钻孔的可能性极低。

II.8. 一般关闭后安全评定[19]表明,通过适当的库存、处置设施设计以及地质和水文地球化学环境,钻孔处置概念可以为处置包含长寿命或短寿命放射性核素的第 3—5 类废弃密封放射源(见 RS-G-1.9[23])提供安全的长期管理解决方案。

II.9. 在参考文献[15]所述的钻孔处置系统中,除了长寿命放射性核素之外,所有放射性核素预计都将在处置区衰变到可以忽略不计的活度水平。虽然不可能提供数百至数千年的这种密封的证明,但对制造处置胶囊和容器的不锈钢测量的极低腐蚀率意味着这种密封时间。²² 此外,可能导致腐蚀速率的增加是众所周知的,并被认为是低概率的(见参考文献[19]附录 IX),为近场内短寿命核素的包容提供了合理的信心。

II.10. 参考文献[19]介绍的一般关闭后安全评定表明,在无故障条件下(例如,密封处置胶囊或容器没有缺陷),即使半衰期长达镭-226(半衰期 = 1600 年)的放射性核素也可以几乎无限量地安全处置。对于长寿命放射性核素,如钷-239、镅-241 和镆-237,处置胶囊和容器将延迟其排放到处置区周围的地圈,但不会完全阻止其排放,对于这些放射性核素,钻孔处置系统的性能还取决于地圈的密封性(这是由多种因素综合造成的,包括放射性核素扩散缓慢、地下水传播时间长、放射性衰变和放射性核素吸附)。根据场址和处置设施的设计,可能有必要限制可处置的长寿命放射性核素的库存。

II.11. 如本“安全导则”第 4 部分和第 5 部分所述,营运组织需要进行场址特定的安全评定,并建立和应用适当的废物验收标准。

第 1 类和第 2 类废弃密封放射源钻孔处置的进一步一般性研究

II.12. 还进行了几项一般性研究,以评定钻孔处置废弃密封放射源的安全,特别是第 1 类和第 2 类放射源的安全,其中包括:

- (a) 作为一般安全评定的一部分开发的不锈钢腐蚀模式和回填材料退化模式被纳入钻孔处置概念范围界定工具。该工具可以评价处置胶囊和容器在关闭后期间提供的密封性以及回填物的化学和物理退化。该工具还允许使用不考虑放射性核素延迟作用的保守模式评价放射性核素通过饮用水途径的迁移和随后的人体暴露在运输过程中。钻孔处置概念

²² 在这种情况下,容器焊缝的质量也很重要,因为焊缝可能会优先腐蚀(见参考文献[19])。

范围界定工具最初是为第 3—5 类废弃密封放射源开发的,但现已扩展到允许考虑第 1 类和第 2 类的放射源。

- (b) 参考文献[19]提出的一般关闭后安全评定没有明确考虑辐解、临界或热过程,因为这些过程对第 3—5 类典型废弃密封放射源的处置影响不显著。但是,对于第 1 类和第 2 类源的处置,营运组织应当评定辐解、临界和热过程的潜在影响。参考文献[17]阐述了处置第 1 类和第 2 类废弃密封放射源对钻孔处置概念的关闭后安全的潜在影响。参考文献[17]描述的研究是基于保守的假设和计算,研究表明,虽然不存在临界问题,但处置第 1 类和第 2 类一些废弃密封放射源可能会导致高温和高辐射场,从而大大缩短废物处置货包的预期寿命。因此,进行了不太保守的计算,以更好地了解第 1 类和第 2 类以及第 3—5 类代表性废弃密封放射源钻孔中的热和辐射条件。参考文献[17]描述的工作得到了使用 CHEMSIMUL[50]和 MicroShield[51]软件进行的计算的支持,并导致了处置胶囊和容器的各种规范的开发,以便它们可以用于包容第 1 类和第 2 类废弃密封放射源。
- (c) 已经分析了不锈钢在水泥环境中的一般和局部腐蚀速率(例如参考文献[20])。该分析还考虑了混凝土中碳钢和不锈钢之间 γ 辐射和电偶腐蚀的潜在影响,重点是 304 和 316 级奥氏体不锈钢。这导致有人建议,根据场址天然屏障的性能,超级奥氏体或超级双相不锈钢或含钼钛合金可用于处置第 1 类和第 2 类产生热量和排放 γ 射线的废弃密封放射源的胶囊和容器。
- (d) 参考文献[17]所述的工作突出表明,有必要将参考文献[24]所述的移动式热室纳入第 1 类和第 2 类废弃密封放射源的整备和处置操作。

参 考 文 献

- [1] 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)。<https://doi.org/10.61092/iaea.hmxn-vw0a>
- [2] 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)。<https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>
- [3] 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)。
- [4] 国际原子能机构《放射性废物处置》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-5 号,国际原子能机构,维也纳(2011 年)。
- [5] 国际原子能机构《核安全与安保术语:用于核安全、核安保、辐射防护、应急准备与响应》2022 年(暂定版),国际原子能机构,维也纳(2022 年)。<https://doi.org/10.61092/iaea.rrxi-t56z>
- [6] 《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)。
- [7] 国际原子能机构《放射源安全和安保行为准则》,国际原子能机构,维也纳(2004 年)。
- [8] 国际原子能机构《弃用放射源管理手册》(2018 年版),国际原子能机构,维也纳(2018 年)。
- [9] 国际原子能机构《放射性废物近地表处置设施》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-29 号,国际原子能机构,维也纳(2014 年)。
- [10] 国际原子能机构《放射性废物地质处置设施》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-14 号,国际原子能机构,维也纳(2011 年)。

- [11] 国际原子能机构《放射性废物的分类》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-1 号，国际原子能机构，维也纳（2009 年）。
- [12] 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）。
- [13] 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）。
- [14] 经济合作与发展组织核能机构《放射性废物的浅层处理：接受长寿命放射性核素的参考水平：核能机构专家组的报告》，经济合作与发展组织，巴黎（1987 年）。
- [15] 国际原子能机构《BOSS：钻孔处置废弃密封源—技术手册》，国际原子能机构《技术文件》第 1644 号，国际原子能机构，维也纳（2011 年）。
- [16] 国际原子能机构《戈尼亚辐射事故》，国际原子能机构，维也纳（1988 年）。
- [17] LITTLE, R.H., BOND, A.E., EMERY, P., METCALFE, R., THATCHER, K.E., “将国际原子能机构的 GSA 钻孔处置概念扩展到包括高活度源”，第 QRS-1668A-1 号报告，亨利，昆蒂萨（2016 年）。
- [18] COCHRAN, J.R.等，“国际原子能机构密封放射源钻孔处置概念的実施 — 18545”，WM2018：年度废物管理会议论文集，凤凰城，2018 年，废物管理研讨会，坦佩（2018 年）。
- [19] 国际原子能机构《窄直径钻孔中废弃密封放射源处置的通用封井后安全评定》，国际原子能机构《技术文件》第 1824 号，国际原子能机构，维也纳（2017 年）。
- [20] 国际原子能机构《钻孔内废弃密封放射源处置关闭后安全评定分级方法的应用》，国际原子能机构《技术文件》第 1928 号，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。

- [21] 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）。
- [22] 国际原子能机构《医学、工业、农业、研究和教育中使用放射性物质产生的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-45 号，国际原子能机构，维也纳（2019 年）。
- [23] 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）。
- [24] LIEBENBERG, G.R., AL-MUGHRABI, M., “开发用于整备废高放射性源（SHARS）的移动式热室设施”，WM2008：2008 年废物管理研讨会会议论文，凤凰城，2008 年，废物管理研讨会（2018 年）。
- [25] 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）。
<https://doi.org/10.61092/iaea.cq1k-j5z3>。
- [26] 国际原子能机构《放射性废物管理中安全领导、管理和文化》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-16 号，国际原子能机构，维也纳（2022 年）。
- [27] 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）。
- [28] 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）。
- [29] 国际原子能机构《放射性废物钻孔处置设施示范条例》，国际原子能机构《技术文件》第 1827 号，国际原子能机构，维也纳（2017 年）。
- [30] 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）。
- [31] 国际原子能机构《研究堆的调试》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-80 号，国际原子能机构，维也纳（2023 年）。

- [32] 国际原子能机构《核安全监管机构的组织、管理和人员配备》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-12 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [33] 国际放射防护委员会《国际放射防护委员会 2007 年建议书》，国际放射防护委员会第 103 号出版物，爱思唯尔，牛津（2007 年）。
- [34] 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）。
- [35] 国际原子能机构《放射性废物处置的安全论证文件与安全评定》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-23 号，国际原子能机构，维也纳（2012 年）。
- [36] 国际原子能机构《应用于处置前废物管理的安全评定方法》，国际原子能机构《技术文件》第 1777 号，国际原子能机构，维也纳（2015 年）。
- [37] 国际原子能机构《放射性废物处置设施的监控和监视》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-31 号，国际原子能机构，维也纳（2014 年）。
- [38] 国际原子能机构《放射性废物近地表处置安全论证文件的内容和论据样品》，国际原子能机构《技术文件》第 1814 号，国际原子能机构，维也纳（2017 年）。
- [39] KOZAK, M.W., “低水平放射性废物处置安全评定的决策分析”，《放射性废物管理》第 18 期（1994 年）第 209 页。
- [40] 国际原子能机构、国际劳工组织，《职业辐射防护》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-7 号，国际原子能机构，维也纳（2018 年）。
- [41] LINDBORG, T.等, “固态放射性废物处置关闭后安全评定中的气候变化和景观发展：国际原子能机构倡议的结果”，《放射性环境杂志》第 183 期（2018 年）第 41—53 页，
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.006>

- [42] 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）。
<https://doi.org/10.61092/iaea.ko2c-dc4q>
- [43] 国际原子能机构《核安保文化》，国际原子能机构《核安保丛书》第 7 号，国际原子能机构，维也纳（2008 年）。
- [44] 国际原子能机构《使用和贮存中的放射性物质及相关设施的安保》，国际原子能机构《核安保丛书》第 11-G（Rev.1）号，国际原子能机构，维也纳（2019 年）。
- [45] 国际原子能机构《放射性物质和相关设施的核安保建议》，国际原子能机构《核安保丛书》第 14 号，国际原子能机构，维也纳（2011 年）。
- [46] 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）。
<https://doi.org/10.61092/iaea.3dbe-055p>
- [47] 国际原子能机构《放射性废物近地表贮存库的升级》，《技术报告丛书》第 433 号，国际原子能机构，维也纳（2005 年）。
- [48] 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）。
- [49] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、联合国开发计划署、联合国环境规划署、联合国人道主义事务协调办公室，《受过去活动或事件影响地区的治理策略和过程》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-15 号，国际原子能机构，维也纳（2022 年）。

- [50] Kirkegaard, P., Bjergbakke, E., Olsen, J.V., “CHEMSIMUL: 化学动力学软件包”, 丹麦国家能源实验室, Risoe-R 第 1630 (EN) 号, 丹麦罗斯基勒,
<https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/6278806/ris-r-1630.pdf>
- [51] 格罗夫工程股份有限公司《MicroShield 第 12 版》, 格罗夫软件股份有限公司, 弗吉尼亚州林奇堡, <http://www.radiationsoftware.com>

附件 I

其他钻孔处置概念

I-1. 本附件提供了除本“安全导则”第 2 部分描述的参考概念之外的几个钻孔处置概念的示例，这些概念已被拟议或实施用于放射性废物贮存或各种类型放射性废物的处置。这些示例载于附件以供参考，它们的引入并不意味着它们符合相关的安全要求。

I-2. 过去，一些国家曾使用浅钻孔来贮存和处置放射性废物[I-1]。例如，在俄罗斯联邦，使用近地表钻孔的经验可以追溯到 1960 年代[I-2]。这些钻孔最初是为处置废弃密封放射源而设计的，但现在已被重新指定为贮存设施。最近的设计可以包容桶装废物，深度接近 40 米，尽管最上面的废物货包仅在地表下几米[I-3]，该等设施亦被指定为贮存设施。在西澳大利亚非常干旱的沃尔顿山东部的棘手废物处置设施，浅钻孔也被用于放射性废物处理。该设施包括两个直径为 2 米的钻孔，其中桶装低放和中放废物堆放在地表下 5.8—28 米的层中。这些钻孔在 1992 年和 1994 年的两次处置活动中投入使用，棘手废物处置设施最近的处理是在近地表沟槽中进行的[I-4]。

I-3. 在美国，至少有两个“更大的密封处理”设施使用了直径为 3 米的钻孔或用大型螺旋钻钻的竖井。在萨凡纳河场址，更大的密封处置试验设施由 80 个竖井组成的方形阵列组成，每个竖井深 6 米，用于处置美国 B 级废物[I-5]。1980 年代，内华达试验场使用了第二种更大的密封处置设施，以处置国防活动产生的放射性废物（类似于商业“大于 C 级”的低放射性废物），其中包括废弃密封放射源和一些超铀元素。该设施的处置深度至少为 21 米，并规定高于地下水位 120 米以上[I-6]。

I-4. 2007 年，为了处置大于 C 级的低放废物，再次在内华达再评价了更大限制处置概念试验场[I-7]。估计废物总量为 2500 立方米，其活度约为 780 万太贝可。在这种情况下，废物将在至少 30 米的深度进行处置，因为根据美国法规[I-8]，较浅的深度要求将处置归类为近地表。预计最大深度为 300 米，需要 930 个钻孔，分布在 44 公顷的面积上（意味着钻孔之间的间距约为 22 米）。这一拟议最终被否决，取而代之的是一种既利用商业处置设施又利用废物隔离示范工厂—新墨西哥州的一个地质处置设施[I-9]方法。

I-5. 对在地质处置相关深度的钻孔或钻孔巷道中处置包括乏燃料在内的高放废物的概念进行了各种研究（例如参考文献[I-10]¹）或甚至更深（例如参考文献[I-11]）。在这些概念，处置钻孔或巷道的直径在大约 0.5—2 米的范围内变化。20 世纪 70 年代有人建议对放射性废物进行非常深的钻孔处置（即在几百米以上的钻孔中处置）（例如参考文献[I-12]），从那时起，这个想法就被断断续续地研究过。已经提出了各种概念，包括涉及利用放射性废物产生的热量熔化周围岩石，从而形成放射性核素迁移屏障的概念（例如参考文献[I-13]），涉及不涉及岩石熔化的深达 5 公里的钻孔概念，其安全主要依赖于钻孔提供的大深度和高度隔离（例如参考文献[I-14]），以及设想将产生热量的放射性废物的处理与地热能的生产结合起来的观念，方法是通过在含有放射性废物的钻孔之间非常深的钻孔抽水[I-15]。

I-6. 英国[I-16]、瑞典[I-17]、德国[I-18]和美国[I-19]在不同时期为国家放射性废物处置计划评审了各种非常深的钻孔处置概念。关于美国，参考文献[I-19]指出了仍然存在的各种不确定性（例如，与岩石的非均质性和在如此深的深度描述岩石表征的能力相关），并得出结论认为，与传统的地质处置相比，非常深的钻孔处置几乎没有明显的优势，包括在安全或实施处置的速度方面。

¹ 参考文献[I-10]描述的处置概念被认为是地质处置的一种形式。

附件 I 参考文献

- [I-1] 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）。
- [I-2] SOBOLEV, I.A., OJOVAN, M.I., KARLINA, O.K., “俄罗斯区域设施‘氦’废密封放射源的管理”，第八届放射性废物管理和环境修复国际会议论文集，布鲁日，2001 年，美国机械工程师学会，纽约（2002 年）。
- [I-3] PROZOROV, L., TKATCHENKO, A., TITKOV, V., KORNEVA, S., “在‘氦’场址建造大直径竖井的展望”，废物管理 2001 会议论文集，图森（2001 年）。
- [I-4] 西澳大利亚州政府财政部《困难处置废物处置设施，东沃尔顿山，信息手册》，西澳大利亚政府，珀斯（2021 年）。
- [I-5] COOK, J.R., TOWLER, O.A., PETERSON, D.L., JOHNSON, G.M., HELTON, B.D., “萨凡纳河工厂的更严格包容处理计划”，废物管理 1984 年会议文集，图森研讨会（1984 年）。
- [I-6] COCHRAN, J.R., CROWE, B.M., COLARUSSO, A., “内华达试验场处置的分类超铀废物的性能评定结果”，废物管理 2001 年会议文集，图森（2001 年）。
- [I-7] TONKAY, D.W., JOYCE, J.L., COCHRAN, J.R., “对大于 C 级低水平放射性废物更大密封钻孔处置的重新审视”，废物管理 2007 年会议文集，图森（2007 年）。
- [I-8] 美国核管制委员会《联邦法规》第 10 CFR 61.2 号，核管制委员会，华盛顿特区（2017 年）。
- [I-9] 美国能源部《大于 C 类低水平放射性废物和大于 C 类废物处置的替代方案》，提交国会报告，华盛顿特区（2017 年）。
- [I-10] POSIVA OY, 瑞典核燃料和废物管理公司，《KBS-3H 系统设计阶段 2011—2016: 最终报告》，POSIVA SKB 报告 06, SKB ID 1538999, Posivas ID RDOC-104827, 赫尔辛基和斯德哥尔摩（2017 年）。

- [I-11] FINSTERLE, S., MULLER, R.A., GRIMSICH, J., APPS, J., BALTZER, R., “通用水平钻孔贮存库中乏核燃料处置的关闭后安全计算”, *Energies* **13**, 2599, (2020 年), <https://doi.org/10.3390/en13102599>。
- [I-12] SCHNEIDER, K.J., PLATT, A.M. (编), 《高水平放射性废物管理替代方案》, 第 BNWL-1900 号报告, 巴特尔太平洋西北实验室, 华盛顿州里奇兰 (1974 年), <https://doi.org/10.2172/4290391>。
- [I-13] GIBB, F.G.F., “高放射性废物超深地质处置的新方案”, 《地球科学综合杂志》第 **157** 期 (2000 年) 第 27—36 页, <https://doi.org/10.1144/jgs.157.1.27>。
- [I-14] BRADY, P.V.等, “核废物的深孔处理: 美国视角”, 《乏核燃料和放射性废物安全处置地质储存库系统》第 2 版 (APTED, M., AHN, J., 编), Woodhead 出版社, 剑桥 (2017 年) 第 89—112 页, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100642-9.00004-9>。
- [I-15] PUSCH, R., WESTON, R., KASBOHM, J., “用于贮存反应堆乏燃料和使用加热岩石生产电能或用于加热目的的热流体的深孔”, 《地球科学岩土工程》第 **101** 期 (2020 年) 第 127—153 页。
- [I-16] 英国 NIREX 有限公司“放射性废物深井处置概念综述”, NIREX 第 N/108 号报告, 牛津哈维尔 (2004 年)。
- [I-17] PUSCH, R., BÖRGESSON, L., “PASS—替代系统研究项目, VDH、KBS-3 和 VLH 三种贮存库概念中膨润土屏障的性能评定”SKB 技术报告第 92-40 号, 瑞典核燃料和废物管理公司, 斯德哥尔摩 (1992 年)。
- [I-18] BRACKE, G., CHARLIER, F., LIEBSCHER, A., SCHILLING, F., RÖCKEL, T., “德国有机会对高放废物进行深孔处理吗?”《国际核电杂志》第 **621** 期 (2017 年) 第 46—54 页, 2017 年。
- [I-19] 美国核废料技术审查委员会《提交美国国会和能源部长的报告: 美国能源部深井处置研究与开发计划的技术评价》, 核废料技术审查委员会, 弗吉尼亚州阿灵顿 (2016 年)。

附件 II

处置深度

II-1. 本“安全导则”¹的前一版本依赖于 1987 年的一份报告[II-1]，该报告建议在钻孔处置设施中处置废物的最小深度。这一最小深度为 30 米，当时被认为是人类侵入的深度，超过这一深度，人类侵入将限于钻探和重大挖掘活动，如挖掘隧道、采石和采矿。自参考文献[II-1]发表后，高层建筑和其他基础设施的建设取得了重大进展，深度超过 30 米的其他类型的挖掘已经变得很常见。例如，参考文献[II-2]提供了日本地下结构深度的数据，高层建筑、高速公路和铁路的钻孔和挖掘活动数据集中在大约 30—50 米深的范围内，并延伸到大约 80 米深的深度。参考文献[II-2]还展示，日本地下结构的深度在 1910—1980 年期间显著增加。

II-2. 实际上，有许多在几十米深处处理低水平放射性废物的近地表处置设施在运行，其中一些还接受寿命短的中水平放射性废物。几个处置设施正在运行，用于处置深度高达约 120 米的拱顶和筒仓中的低放射性废物和短寿命中水平放射性废物。例如，瑞典短寿命放射性废物的最终处置库接受低水平放射性废物和短寿命放射性废物，以便在大约 60—120 米的深度进行处置[II-3]。

II-3. 出于若干原因—包括需要将废物放置在本地地形之下和靠近地表的风化岩石区之下，在热带环境，地表风化岩石区通常有几十米厚—马来西亚和加纳的两个废弃密封放射源钻孔处置示范项目的处置区深度超过 100 米。在马来西亚，拟议处置区位于 115—175 米的深度，而在加纳，拟议处置区深度位于 135—150 米之间。

II-4. 几个成员国的经验（例如，参考文献[II-4]和参考文献[II-5]第 B.2.1 节）表明，一些现有的浅钻孔处置设施后来不得不再被重新分类为贮存设施，废物应当从中回收，否则应当提升安全（另见本“安全导则”第 8 部分）。

¹ 国际原子能机构《放射性废物钻孔处置设施》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-1 号，国际原子能机构，维也纳（2009 年）。

附件 II 参考文献

- [II-1] 经济合作与发展组织核能机构《放射性废物的近地表处置：接受长寿命放射性核素的参考水平》，国家能源局专家组的报告，经济合作与发展组织，巴黎（1987 年）。
- [II-2] SAKAMOTO, Y.等，“考虑人类侵入 TRU 废物库的地下结构深度分布调查”，Nippon Genshiryoku Gakkai Shi, **38** 6（1996 年）第 442—447 页，<https://doi.org/10.3327/jaesj.38.442>。
- [II-3] 瑞典核燃料和废物管理公司《SFR 长期安全的安全分析：安全评定主报告 SR-PSU》，瑞典科学技术研究院第 TR-14-01 号报告修订版，瑞典科学技术研究院，斯德哥尔摩（2017 年）。
- [II-4] 国际原子能机构《放射性废物近地表贮存库的升级》，《技术报告丛书》第 433 号，国际原子能机构，维也纳（2005 年）。
- [II-5] 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）。

参与起草和审订人员

Bennett, D.G.	国际原子能机构
Bruno, G.	国际原子能机构
Clark, A.	国际原子能机构
Crossland, I.	顾问（英国）
Little, R.	顾问（英国）
Van Blerk, J.	顾问（南非）
Wright, R.	国际原子能机构

通过国际标准促进安全

