

国际原子能机构《核能丛书》

第 NF-T-3.3 号

基本原则

目的

导则

技术报告

乏燃料在运输进行
后处理或处置前
的贮存



IAEA

国际原子能机构

国际原子能机构《核能丛书》出版物

国际原子能机构《核能丛书》的结构

根据国际原子能机构（原子能机构）《规约》第三条 A 款第 3 项和第八条 C 款的规定，原子能机构授权“促进原子能和平利用的科学及技术情报的交换”。原子能机构《核能丛书》出版物介绍核反应堆、核燃料循环、放射性废物管理和退役领域的良好实践与技术进步及实例和经验，以及与核能有关的一般问题。原子能机构《核能丛书》的结构包括四个层次：

- (1) **核能基本原则**出版物描述和平利用核能的依据和愿景。
- (2) **《核能丛书》目标**出版物描述在不同实施阶段需要考虑的问题和各主题领域要实现的目标。
- (3) **《核能丛书》导则和方法学**提供关于如何实现与和平利用核能各专题和领域有关的目标的高级别导则和方法学。
- (4) **《核能丛书》技术报告**提供原子能机构《核能丛书》所探讨专题相关活动的更多、更详细信息。

原子能机构《核能丛书》出版物的编码如下：**NG**—核能（总则）；**NR**—核反应堆（原为“**NP**—核电”）；**NF**—核燃料循环；**NW**—放射性废物管理和退役。此外，这些出版物还载于原子能机构网站：

www.iaea.org/zh/chu-ban-wu

如需了解更多信息，请与原子能机构（Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria）联系。

欢迎原子能机构《核能丛书》出版物使用者向原子能机构告知其使用经验，以确保这些出版物不断满足使用者需求。信息可通过原子能机构网站提供，也可邮寄，也可通过电子邮件发送至 Official.Mail@iaea.org。

乏燃料在运输进行后处理
或处置前的贮存

下列国家是国际原子能机构的成员国：

阿富汗	格鲁吉亚	北马其顿
阿尔巴尼亚	德国	挪威
阿尔及利亚	加纳	阿曼
安哥拉	希腊	巴基斯坦
安提瓜和巴布达	格林纳达	帕劳
阿根廷	危地马拉	巴拿马
亚美尼亚	圭亚那	巴布亚新几内亚
澳大利亚	海地	巴拉圭
奥地利	教廷	秘鲁
阿塞拜疆	洪都拉斯	菲律宾
巴哈马	匈牙利	波兰
巴林	冰岛	葡萄牙
孟加拉国	印度	卡塔尔
巴巴多斯	印度尼西亚	摩尔多瓦共和国
白俄罗斯	伊朗伊斯兰共和国	罗马尼亚
比利时	伊拉克	俄罗斯联邦
伯利兹	爱尔兰	卢旺达
贝宁	以色列	圣卢西亚
多民族玻利维亚国	意大利	圣文森特和格林纳丁斯
波斯尼亚和黑塞哥维那	牙买加	萨摩亚
博茨瓦纳	日本	圣马力诺
巴西	约旦	沙特阿拉伯
文莱达鲁萨兰国	哈萨克斯坦	塞内加尔
保加利亚	肯尼亚	塞尔维亚
布基纳法索	大韩民国	塞舌尔
布隆迪	科威特	塞拉利昂
柬埔寨	吉尔吉斯斯坦	新加坡
喀麦隆	老挝人民民主共和国	斯洛伐克
加拿大	拉脱维亚	斯洛文尼亚
中非共和国	黎巴嫩	南非
乍得	莱索托	西班牙
智利	利比里亚	斯里兰卡
中国	利比亚	苏丹
哥伦比亚	列支敦士登	瑞典
科摩罗	立陶宛	瑞士
刚果	卢森堡	阿拉伯叙利亚共和国
哥斯达黎加	马达加斯加	塔吉克斯坦
科特迪瓦	马拉维	泰国
克罗地亚	马来西亚	多哥
古巴	马里	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
斯威士兰	尼泊尔	委内瑞拉玻利瓦尔共和国
埃塞俄比亚	荷兰	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	

原子能机构《规约》于1956年10月23日在纽约联合国总部召开的国际原子能机构规约会议上通过，于1957年7月29日生效。原子能机构总部设在维也纳。原子能机构的主要目标是“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《核能丛书》第 NF-T-3.3 号

乏燃料在运输进行后处理 或处置前的贮存

国际原子能机构
2021 年·维也纳

版权说明

国际原子能机构的所有科学和技术出版物均受 1952 年（伯尔尼）通过并于 1972 年（巴黎）修订的《世界版权公约》之条款的保护。自那时以来，世界知识产权组织（日内瓦）已将版权的范围扩大到包括电子形式和虚拟形式的知识产权。必须获得许可而且通常需要签订版税协议方能使用国际原子能机构印刷形式或电子形式出版物中所载全部或部分内容。欢迎有关非商业性翻印和翻译的建议并将在个案基础上予以考虑。垂询应按以下地址发至国际原子能机构出版科：

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

© 国际原子能机构·2021 年
国际原子能机构印制
2021 年 11 月·奥地利

乏燃料在运输进行后处理或处置前的贮存

国际原子能机构，奥地利，2021 年 11 月
STI/PUB/1846
ISBN 978-92-0-520421-5 (简装书：碱性纸)
ISBN 978-92-0-529921-1 (pdf 格式)
ISSN 2788-6808

前言

国际原子能机构（原子能机构）的法定目标之一是“谋求加速和扩大原子能对全世界和平、健康及繁荣的贡献。”实现这一目标的途径之一便是出版系列技术丛书。其中两套系列丛书是原子能机构《核能丛书》和原子能机构《安全标准丛书》。

根据原子能机构《规约》第三条 A 款第 6 项，安全标准确立“旨在保护健康及尽量减少对生命与财产的危险的安全标准”。安全标准包括“安全基本法则”、“安全要求”和“安全导则”。这些标准主要从监管角度编写，并对原子能机构自身的计划具有约束力。标准的主要用户是成员国的监管机构和其他国家当局。

国际原子能机构《核能丛书》包含旨在鼓励和援助为和平用途研发和应用核能的报告，列有供成员国电力公司业主和营运者、执行组织、学术界和政府官员等各方之用的实例。这类资料以导则、技术现状与进步报告以及基于国际专家意见的核能和平利用最佳实践的形式呈现。原子能机构《核能丛书》是原子能机构《安全标准丛书》的补充。

缺乏足够的政治意愿和公众支持给实施乏燃料管理终点（例如后处理或处置）带来重大挑战，导致需要更长的贮存期。鉴于目前和预计的核电使用率，加之对乏燃料后处理和处置的预测，预计乏燃料贮存期可能会延长几十年。

各国必须做出必要的政治决策，确定和实施负责任且可持续使用核电所需的乏燃料管理终点。这可以消除不必要的风险，包括在没有后处理或处置验收标准的情况下包装乏燃料相关的风险，还可以减少在更长贮存期内维持制度性管制和老化管理计划相关的非必要费用。

在此期间，重要的是确保在所有可预见的工况下安全、可靠和有效地贮存乏燃料。鉴于目前贮存期未知，本出版物探讨了实现这一目标的方案。它确定了与制定和实施后处理或处置能力充足具备之前适应未来各种情景的方案、政策、战略和计划有关的问题和挑战。本出版物并非旨在促进或鼓励延长乏燃料贮存期。

本出版物将帮助核工业宣传清晰、可信和可持续的乏燃料管理战略的重要性，并鼓励决策者考虑可能有助于解决乏燃料管理的贮存期未知和终点未确定所造成的不确定性的不同方案。本出版物适用于正在运营或已经运营动力堆和研究堆、材料试验堆或同位素生产堆的国家，以及考虑引入核动力的新加入国家。认识到具体的解决方案将因国家需要而异，以及本出版物中提出的方案将会因此而调整。

原子能机构谨向参与编写本出版物的所有人员表示感谢，并特别感谢主持技术会议和顾问会议并协调和促进起草和审查本出版物的 B·卡尔森（美利坚合众国）。原子能机构负责本出版物的官员是核燃料循环和废物技术司的 A·贝维拉夸和安帕罗·冈萨雷斯-埃斯帕特罗。

编者按

本出版物由国际原子能机构编辑人员在认为对读者有所帮助的必要范围内进行了编辑。本出版物不涉及与任何个人的作为或不作为有关的责任、法律或其他方面的问题。

虽已竭力保持本出版物中所载信息的准确性，但是国际原子能机构及其成员国对使用本出版物可能产生的后果均不承担任何责任。

本出版物所提供、叙述良好实践的导则系专家意见，并不构成在成员国协商一致基础上提出的建议。

使用某些国家或领土的特定名称并不意味着国际原子能机构作为出版者对这类国家或领土、其当局和机构或其边界划定的法律地位作出任何判断。

提及具体公司或产品的名称（不论表明注册与否）并不意味着国际原子能机构有意侵犯所有权，也不应被解释为国际原子能机构的认可或推介。

国际原子能机构对本出版物中提及的外部或第三方因特网网站的网址继续存在或准确与否不负有责任，而且不保证这类网站上的任何内容现在或将来仍然准确或适当。

目 录

概要	1
1. 导言	2
1.1. 背景	2
1.2. 目的	3
1.3. 范围	3
1.4. 结构	3
2. 概述	4
2.1. 逐步延长乏燃料贮存	4
2.2. 乏燃料贮存安全	5
2.2.1. 包容	5
2.2.2. 次临界度	5
2.2.3. 衰变热排出	6
2.2.4. 屏蔽	6
2.2.5. 可回取性和可运输性	6
2.2.6. 能动和非能动系统	6
2.3. 乏燃料贮存的可持续性	7
3. 老化管理计划	8
3.1. 乏燃料贮存老化管理	8
3.1.1. 计划	9
3.1.2. 执行	9
3.1.3. 检查	9
3.1.4. 行动	10
3.2. 弥补有关乏燃料贮存材料老化的数据空白	11
4. 未来乏燃料贮存系统的设计和选址	12
4.1. 系统设计基准	13
4.1.1. 老化管理和许可证更新考虑因素	14
4.1.2. 保障和安保考虑因素	15
4.2. 湿法贮存与干法贮存设施	16
4.3. 集中乏燃料贮存设施	17
4.4. 选址考虑因素	18

5. 乏燃料贮存配置	19
5.1. 密封容器和屏蔽容器	20
5.2. 裸露组件	21
6. 监管考虑因素	22
6.1. 监管者的作用	22
6.1.1. 监管研究活动	23
6.1.2. 许可证审批、检查和监督	23
6.1.3. 公众宣传	24
6.2. 延长贮存的监管框架	24
6.3. 风险知情、基于实绩的监管	25
7. 政策考虑因素	28
7.1. 确定的终点	29
7.2. 明确的乏燃料所有权和问责制	29
7.3. 可持续的乏燃料管理	30
7.4. 多国方案	30
7.5. 稳定的长期政策	31
7.6. 依靠近期解决方案	32
8. 其他主要考虑因素	33
8.1. 在整个燃料循环过程中管理接口	33
8.2. 公众信任	35
8.2.1. 公众信任困境	36
8.2.2. 感知风险与感知利益	37
8.2.3. 公众接受和乏燃料延长贮存	38
8.3. 有组织的控制	39
参考文献	41
文献目录	47
缩略语	53
参与起草和审订的人员名单	55
原子能机构《核能丛书》的结构	56

概 要

乏燃料贮存期远远超出最初的预期是一个现实。本出版物提供若干可供考虑的思路和方案以解决贮存时间不断延长问题。目的是提高认识、鼓励对话和提供如何管理乏燃料的思路。主要信息包括：

- 后处理或处置的延迟可能导致乏燃料贮存 100 年或更长时间。安全、可靠和有效的乏燃料贮存将管理燃料降质，同时保留未来的燃料循环选项。
- 老化管理计划采取工程、运行和维护措施，以确保在贮存、未来装卸和运输过程中保持安全。
- 选址及设施和设备设计可显著降低乏燃料更长期贮存的风险和成本。
- 可选用乏燃料贮存配置以适应不确定的贮存期、促进老化管理和提供适应未来终点（如后处理或处置）不确定性所需的灵活性。
- 考虑到多次许可证更新，可对监管框架进行设计，以确保在实现可接受终点之前安全贮存。
- 通过保持屏蔽、包容、衰变热排出和临界控制，可以确保安全。与维护乏燃料安全和安保或解决技术和经济方面问题相比，因应错综复杂的社会信仰和价值观以及政治制度对乏燃料管理而言已证明是一个更大的挑战。
- 可持续的乏燃料管理需要政策和战略来提供清晰、一致和稳定的方向，因为它们推动着对乏燃料贮存的需求以及实现可接受终点的可用方案和时间安排。除非各国进行乏燃料后处理和处置的规模足以容纳其卸出的乏燃料，否则越来越长期的贮存会成为事实上的终点——这被认为与保护人体健康和环境的责任不符。

有效的定期许可证更新过程可以确保有效的老化管理和强有力的有组织管制。因此，乏燃料可以安全和可靠地贮存必要长的时间，直至运输进行后处理或处置。然而，贮存不断增加的乏燃料存量的风险和成本将持续增加；在没有终点的情况下，它最终将成为沉重的社会负担。

1. 引言

1.1. 背景

核燃料循环包括与核能生产相关的所有作业，从地表铀勘探和开采到萃取，再到制造用于电力生产的核燃料，并在后处理产生的乏燃料或高放废物达到合适的终点时结束（见参考文献[1—4]）。目前所接受的终点是乏燃料和高放废物被安全地置于地下合适的地质处置库中。在世界范围内，原子能机构 30 个成员国的核电厂每年卸出约 10 000 吨重金属乏燃料（见图 1），而少数成员国对乏燃料进行后处理，合计年后处理能力为 4800 吨重金属（并非所有后处理能力都在运行）[5]。由于对清洁、可靠能源的需求日益增长，若干国家一直致力于扩大其核容量，从而进一步增加要贮存的乏燃料并强调确定和实施乏燃料终点¹（即后处理或处置）的必要性。

一些成员国指定乏燃料进行处置，而另一些成员国则对其进行后处理以回收燃料材料。在一些国家，政策的改变导致这种指定从一种改为另一种。在国家政策决定和实施之前，贮存的乏燃料不能开始运去后处理或处置。由于全世界需要几十年时间才能具备充足的后处理和处置能力，乏燃料和高放废物将继续累积在贮存设施中，乏燃料贮存设施的许可证期限将需要延长，而且可能是多次延长。尽管高放废物贮存不在本出版物的范围内，但所述问题有许多仍然适用。

图 1 中的虚线表示导致贮存存量增加的流量限制。各国可以通过代入适当的质量流量，并考虑乏燃料后处理和处置作业的能力、预计开始日期和置信水平来估计乏燃料贮存能力和期限。深部地质处置库运行的开始日期不确定意味着，即使是已决定逐步淘汰核电的国家也仍须管理其现有的乏燃料存量，管理的时间长短无法有信心地确定。

后处理或处置等确定的终点取决于未来的资金、立法、许可证审批和其他无法确切预测的条件。本出版物探讨如何在设计、许可证审批、管理战略和政策决策中考虑这种不确定性。

¹ 终点被定义为放射性物质在其管理的最后阶段的状态，在该阶段放射性物质具有非能动安全性，并且不依赖于有组织的控制。

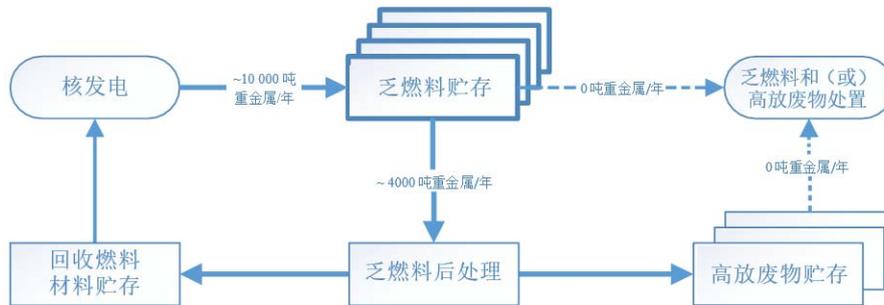


图 1. 乏燃料贮存。

1.2. 目的

本出版物为负责制定乏燃料管理政策和计划的主要政策制定者和决策者提供信息，并确定在延长贮存时有必要考虑的技术和非技术因素。本出版物确认在确定乏燃料贮存期限方面的不确定性，并帮助确定与相关技术和监管不确定性有关的方案和折衷问题。

1.3. 范围

本出版物述及若干被认为对安全、可靠和有效地延长乏燃料贮存重要的专题，并提出避免或减少不必要风险和成本的可能途径。尽管本出版物主要关注商业运行中的核动力堆乏燃料贮存，但所述原则同样适用于研究堆、材料试验堆和同位素生产堆的乏燃料。高放废物贮存不在本出版物的范围内；然而，许多相同的问题亦适用。本出版物中所提供的叙述良好实践的导则系专家意见，而不构成在成员国协商一致基础上提出的建议。

1.4. 结构

本出版物第 2 部分概述乏燃料贮存安全和乏燃料管理可持续性。第 3 部分概括老化管理计划和消除知识差距。第 4 部分提出未来乏燃料贮存系统设计和选址的考虑因素，第 5 部分描述乏燃料贮存配置。第 6 部分和第 7 部分分别研究监管和政策考虑因素，第 8 部分总结其他主要考虑因素。

2. 概述

过去对乏燃料后处理和处置可用能力的假设往往是错误的，导致错失了实施政策和战略的机会。例如，干法容器贮存系统最初的设想是释放反应堆乏燃料池的空间，并在后处理或深部地质处置能力充分具备之前提供长达 20 年的乏燃料贮存。数百个干法容器贮存系统目前在世界各地使用，而且对它们的依赖将远远超出其最初设想的设计寿命。

由于对核能以及深部地质处置库的选址和许可证审批的公众和政治辩论仍在持续进行，贮存期和预计的乏燃料存量无法确定。在这种不确定性情况下，向前推进则需要有信心能够安全地贮存乏燃料，直至充分的乏燃料后处理或深部地质处置可以利用。因此，许多成员国正在重新考虑与延长贮存期相关的公共、政治、技术和监管问题（见参考文献[6—8]）。

桥梁、大坝和其他公共结构和设备可能发生故障，造成重大生命和财产损失。然而，尽管存在这种不确定性，风险仍被接受。公众了解并重视此类结构的好处，并充分相信在灾难性事故发生前能够识别并解决相关安全关切。对基本设备进行维护，并在某个时候使其退役以及在故障发生前予以更换。同样地，问题不在于乏燃料能否得到安全地贮存，而是需要什么来让人们充分相信与年龄有关的降质问题无论贮存时间长短都将得到识别和解决，以防止发生不可接受的安全后果。安全基准和乏燃料管理战略无需依靠不可知的未来。可以确定战略并开发适当的基础结构来确保不依赖于时间的安全乏燃料贮存。与延长乏燃料贮存相关的风险和不确定性永远无法完全消除。但是，可以对其进行管理，以确保意外事件发生的可能性足够低，从而充分地缓解其后果，使风险处于可接受的低水平。

2.1. 逐步延长乏燃料贮存

历史上，一直使用短期贮存、临时贮存、长期贮存、延长贮存或超长期贮存等术语提及乏燃料贮存。每个术语都隐含有有关贮存期的假设。在事先不知道乏燃料运输进行后处理或处置之前将需要多少个连续期限情况下，可以考虑将乏燃料贮存期再延长一个固定的许可证审批有效期。

潜在的危害、可利用的技术和适用的要求会随时间发生变化[9]。通过制定一项允许连续展期必要长时间的技术和监管方案，可以避免预测或确定贮存期结束日期的需要[9]。因此，本出版物的范围不限于任何具体贮存

期限。然而，在终点一后处理或处置—可供利用之前，可通过逐步延长乏燃料贮存解决贮存期的不确定性问题。

理论上，只要经证明符合要求，许可证更新次数就无需受到限制。然而，在实践中，保持合规（即维护和升级）的累积成本可能最终有利于升级到新的贮存系统[9]。

2.2. 乏燃料贮存安全

乏燃料已安全贮存 50 多年，必要的安全原则众所周知。新出现的挑战在其成为安全问题之前可以得到识别和纠正。原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-15 号《乏核燃料贮存》[10]为确保乏燃料贮存的安全提供指导[10]。在所有正常、异常和设计基准事故工况以及处理超设计基准事故工况期间，如《安全标准丛书》第 SSG-15 号第 1.3 段所述，“乏燃料贮存设施及其中贮存的乏燃料的安全通过以下方式得到保证：所涉放射性核素的适当包容、临界安全、排热、辐射屏蔽和可回取性”。虽然无法准确地预测未来的要求，但以下基本的乏燃料贮存安全功能将不随贮存期的延长而改变，因此可以合理地假设它们将奠定未来任何乏燃料贮存监管的基础[9]。

2.2.1. 包容

包容防止放射性物质向环境释放，系由乏燃料包壳和贮存系统（如焊接或螺栓连接的密封容器或屏蔽容器）提供。随着贮存时间的延长，材料降质的可能性增加。因此，可能有必要将包容功能转移到更易于检查和维护的部件上。

2.2.2. 次临界度

次临界度防止非计划临界事件。确保次临界度通常依赖于几何形状控制。然而，由于材料降质会对乏燃料和贮存系统部件（如篮子、中子吸收体、密封容器或屏蔽容器）的结构完整性产生不利影响，在较长贮存期内保持乏燃料的几何形状可能会变得更具挑战性。临界控制功能可转移到其他更易于保证、检查和维护的结构、系统和部件上。这些包括控制易裂变物质含量、限制几何形状、加入中子吸收体和移除足量的慢化剂。

2.2.3. 衰变热排出

衰变热排出防止可能会降低其他安全功能安全裕度的几何形状损失。温度限制防止包壳及其他对安全很重要的结构、系统和部件完整性丧失。包壳完整性对于维持可能影响次临界度、屏蔽和包容安全裕度的乏燃料组件几何形状非常重要。有效排出衰变热很重要，因为许多对乏燃料完整性有不利影响的现象都依靠热激活。延长贮存期间的衰变热排出可能挑战性不大，因为乏燃料随时间会变得越来越冷。另一方面，由于包壳可能脆化，低温在长期贮存后的运输过程中可能是一个问题。

2.2.4. 屏蔽

屏蔽确保辐射照射保持在安全限度内，系由贮存系统提供。随着贮存期的延长，乏燃料的放射性衰变和相关的屏蔽需求将减少。

2.2.5. 可回取性和可运输性

与前四种安全功能不同，可回取性不是维持安全所必需的。虽然在不保持可回收性的情况下可以实现安全，但在贮存之后回取乏燃料组件或含有乏燃料的贮存系统部件，可能是实现乏燃料管理后续阶段所必需的。如果未来的乏燃料管理阶段需启封货包和装卸乏燃料组件而这些却不易回取，则将产生额外费用。因此，保持可回取性很重要，因为它可以最大程度地降低未来乏燃料管理方案的成本和复杂性。

可运输性虽然通常不被列为一项关键的安全功能，但在整个乏燃料贮存过程中也需要予以保持，以确保乏燃料能够被转移到后处理或处置设施，甚至被转移到具备在必要时进行检查和重新包装能力的新贮存设施。由于材料降质的可能性增加，在延长贮存期间，保持可回取性和可运输性可能变得更具挑战性。

2.2.6. 能动和非能动系统

安全功能可由能动或非能动系统执行。非能动系统不依靠能源供应和机械作动器等外部输入来执行其功能，尽管可能需要定期进行一些人工操作来确认非能动特性保持功能正常（例如，核查入口/出口没有被冷却剂堵塞）。随着乏燃料贮存期的延长，非能动控制因其提高了可靠性、降低了运行成本和减少了对维护有组织控制的依赖而变得越来越重要[9]。

虽然确保目前和延长期安全贮存乏燃料的必要原则已十分清楚，但现有乏燃料贮存系统可能并未按照目前设想的时间框架进行设计，而且安全分析可能未充分考虑目前设想的时间框架。本出版物探讨在延长现有乏燃料贮存系统的运行寿期时如何保持这些安全原则，以及如何通过在未来的设计和监管框架中纳入延长贮存的可能性来提高未来系统的有效性。

2.3. 乏燃料贮存的可持续性

《安全标准丛书》第 SSG-15 号[10]将短期贮存定义为可持续至约 50 年，将长期贮存定义为超过约 50 年并有确定的终点（后处理或处置）。《安全标准丛书》第 SSG-15 号[10]指出，长期贮存预计不会持续超过约 100 年，这被判断为确定未来燃料管理步骤的充足时间。

原子能机构报告称，由于目前没有正在运行的乏燃料或高放废物深部地质处置设施，贮存的乏燃料存量正在不断增加，这些乏燃料大多将不得不贮存比最初预期更长的时间，可能将长于 100 年[11]。美国核管理委员会认为，300 年的贮存期对于表征和预测延长贮存和运输的老化影响和老化管理问题是适当的[7]。

在没有对明确确定的终点做出全面承诺的情况下持续的乏燃料生产和贮存不是一项可持续的政策。正如《安全标准丛书》第 SSG-15 号[10]第 1.6 段所述，“贮存不能被视为乏燃料管理的最终解决方案，为了确保安全，乏燃料管理需要后处理或处置等确定的终点。”越来越长时期的贮存被认为不符合保护人类和环境而不给子孙后代施加不当负担的责任[2、3]。根据定义，贮存是一种提供乏燃料包容的临时措施，目的是在今后某个时间回取进行后处理、处理或处置[4、10、12]。

一些人认为，深部地质处置是唯一普遍接受的乏燃料或乏燃料后处理产生的高放废物的终点。其他人则认为，深部地质处置可能剥夺子孙后代利用这些材料实现有益目的的能力。鉴于乏燃料贮存期无法准确地确定，维持乏燃料管理的可持续性就需要制定政策来确保持续的乏燃料贮存不会给子孙后代施加不当负担。如果受益的几代人为所有贮存的乏燃料存量提供用于安全贮存和实现可接受终点的财政、治理、技术和监管基础结构，这是可能的。

3. 老化管理计划

如原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-48 号《核电厂的老化管理和长期运行计划制定》[13]中所述，老化管理计划确保通过及时探测和控制与年龄有关的降质及其他可能危及未来装卸和运输的情况来维持安全。老化管理已被广泛应用于核电厂和乏燃料贮存设施，并涉及安全相关结构、系统和部件的物理老化和过时问题[13—17]。与监管者商定的定期安全评定旨在确保电厂老化管理计划持续的充分性，并帮助建立许可证更新的技术基础。当上一个许可证有效期即将到期时，同样的原则和方案也适用于乏燃料贮存设施的许可证更新。妥善执行的老化管理计划将防止出现可能降低安全或安保裕度或导致在较长贮存期内产生不必要治理成本的非计划或未经分析的工况。老化管理活动所产生的信息可作为确定需求和相关研发目标优先次序的基线。它还为公众和政策制定者适当了解相对风险提供背景。老化管理计划还需要考虑与贮存期延长相关的政策和监管要求的变化。

3.1. 乏燃料贮存老化管理

评价物理老化和设备过时累积影响的后果是一项持续的活动，通过将戴明“计划-执行-检查-行动”循环适应于结构、系统和部件的老化管理对此作了说明，并针对乏燃料贮存设施进行了修改（见图 2）[13]。

正如《安全标准丛书》第 SSG-48 号[13]第 2.21 段所述：

“图[2]中的闭环表示在相关运行经验反馈、研发结果以及自评定和同行评审结果基础上的老化管理的持续和改进，以帮助确保新出现的老化问题将得到解决。”

了解结构、系统和部件的老化是有效老化管理的关键，包括以下步骤：

- (a) 确定结构、系统和部件：在设计中以及规划监测和维护计划时，适当考虑和确定难以检查、维修或更换的结构、系统和部件。
- (b) 确定适用的降质机理：有效的老化管理需要了解化学、热工、机械和辐射诱发降质过程及其综合效应。可能需要进行研究、开发和测试以了解后果，并确定在乏燃料贮存设施延长运行期间防止、减少或减轻结构、系统和部件降质的方法。
- (c) 考虑与乏燃料贮存相关的新技术和监管变化等外部因素。

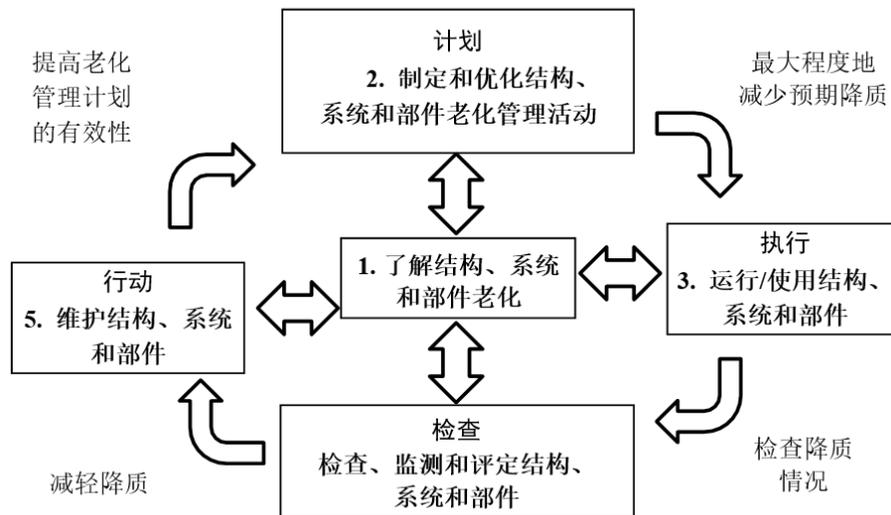


图 2. 乏燃料贮存设施的结构、系统和部件老化管理系统性方案。

3.1.1. 计划

图 2 中的“计划”活动涉及对现有计划进行有效协调和修改以及制定新计划，以确保将预防、探测和减轻对结构、系统和部件的老化影响纳入乏燃料贮存设施的运行、维护、监控和检查计划，例如在装载乏燃料前干燥屏蔽容器内腔和螺栓孔以期在更长的干法贮存期内减少腐蚀的计划。

3.1.2. 执行

“执行”活动通过按照作业程序和技术规格细致操作来确保结构、系统和部件的正常运行。有效的运行和维护计划确保安全相关结构、系统和部件在必要时得到维护、维修或更换，从而防止安全功能受损。

3.1.3. 检查

“检查”活动涉及通过有效的监测和检查计划及时探测和评定延长贮存期间结构、系统和部件的任何降质情况，但前提是对数据进行妥善管理和保存。对结构、系统和部件进行持续测量（监测）以及定期观察、测量、测试和检验（检查）。确定监测参数和检查间隔时间，以确保在任何安全功能丧失或出现可能危及未来装卸和运输的工况之前及早探测降质情况。这些参数和间隔时间需要在更长贮存期内进行定期重新评价，以考虑

历史趋势、以往检查的结果以及除其他外，特别是从行业中汲取的经验教训。还有必要根据不断演进的法规和技术对乏燃料贮存系统工况进行定期重新评定，以防止陈旧过时和确保在整个贮存期间符合贮存许可证审批依据。监测计划包括工况和性能监测。

工况监测查明是否存在影响结构、系统和部件的老化机理及其程度。这项工作包括进行测量，以确定水池结构、基岩、混凝土基座以及支架、保护涂层、电缆和重要仪器仪表等其他结构、系统和部件的工况。一些结构、系统和部件只有在维修期间才可直接检查，而其他结构、系统和部件（如高辐射场的部件）可能需要远程或以其他方式进行检查和评价[18]。一般来说，与干法贮存相比，在湿法贮存中更容易观察乏燃料组件和乏燃料贮存支架。

性能监测则核查结构、系统和部件执行其预期功能的能力，例如：

- (a) 屏蔽：实际辐射水平和经计算辐射水平之间的趋势偏差可能表明屏蔽退化。
- (b) 包容：对于金属贮存屏蔽容器，通过屏蔽容器盖之间的压力监测进行泄漏检查可以确认金属垫片随贮存时间延长的包容功能。对于混凝土屏蔽容器，可以通过测量内部经焊接密封容器顶部和底部的温差来检查包容功能，从而确认是否存在氦气[19]。
- (c) 乏燃料完整性：在湿法贮存中，监测和控制水化学将有助于探测乏燃料故障；而在干法贮存中，可能需要穿透密封容器或屏蔽容器进行腔内气体取样。Matsumara 等[20]提出了一种通过测量密封容器中受损乏燃料组件释放的氦-85 的伽马射线来探测乏燃料组件故障的无损方法。
- (d) 乏燃料贮存设施中的混凝土结构：施密特锤测试可用于探测任何降质。

3.1.4. 行动

“行动”活动涉及评定探测到的降质（如目视检查、泄漏测试和辐射剂量绘图），以及制定和实施适当的纠正或减缓计划，以确保不丧失安全功能。“行动”可能包括以下内容：

- 维护；

- 组件维修；
- 更换；
- 设计修改；
- 运行、维护、监测和检查计划的更新。

图 2 利用相关运行经验反馈、自评定和研发活动的结果以及从行业内汲取的教训，确保发现和解决新出现的老化管理问题。在美利坚合众国有一个图 2 中反馈环的实例，其中，将影响干法容器贮存系统的老化过程与适当的时限老化分析一同进行编制，以帮助许可证持有者和监管者了解与延长贮存期乏燃料贮存许可证更新相关的问题和必要的行动[21]。随着乏燃料贮存设施老化，有助于制定适当设计、运行和监管框架的相关知识体系将继续发展和演进。

3.2. 弥补有关乏燃料贮存材料老化的数据空白

需要充分了解乏燃料和所依赖的所有系统部件的材料降质情况，以确保封隔、屏蔽、衰变热排出和临界安全，并保持安全装卸、回取和运输乏燃料货包的能力。对于水池贮存或干法贮存库，这包括水池衬垫材料和设施结构等部件。对于干法容器贮存系统，主要重点是确保密封容器或屏蔽容器的完整性，包括屏蔽容器主体、耳轴、封记、中子屏蔽和篮子使用的材料。Carlsen 等[9]报告（另见参考文献[15、22—37]）称：

“尽管在现有乏燃料组件和乏燃料贮存设施材料的行为方面有广泛的知识基础，但有关超过几十年贮存期的参考资料很少能找到……此外，不断演进的运行工况和材料如更高燃耗燃料和新燃料以及包壳类型也可能需要进行测试，以了解在乏燃料延长贮存下与年限有关的相关降质。

……

“最近开展了几项研究，以确定可能的降质机理，分析其随乏燃料贮存期延长可能对安全的影响，以及确定预期技术需求与现有技术数据之间的知识差距……^[2]此外，一些研究已确定，作为发展技术基础的一个重要组成部分，有必要实施一个全尺寸高燃耗乏燃料贮存和运输确认性示范项目”。

² 根据相关风险对确定的差距进行了优先排序[33、34]。

为消除这些知识差距，一些国家和国际努力正在进行中，包括[9]：

- 原子能机构的“乏燃料和相关贮存系统部件在超长期贮存期间的性能验证”协调研究项目；
- 电力研究所制定的“延长贮存协作计划”；
- 美国能源部开展的“乏燃料处置运动”；
- 经合组织核能机构的核装置安全委员会。

消除这些知识差距将使得能够更好地模拟和分析老化影响，从而能够在更长时期内高效设计及有效管理和控制乏燃料贮存设施。同时，认识到这些差距可使工程设计解决方案考虑到相关的不确定因素，从而能够实现持续安全的乏燃料贮存，例如，与包壳性能相关的知识差距可通过减少或避免对包壳完整性依赖的安全策略和设计方案来解决[38、39]。

4. 未来乏燃料贮存系统的设计和选址

选址及设施和设备设计可显著降低乏燃料延长贮存的风险和成本。目前，乏燃料贮存在：(1) 水池；(2) 放置在混凝土贮仓、屏蔽容器或贮存库中的焊接金属密封容器；或 (3) 提供屏蔽和其他确保安全所需功能的有螺栓盖金属屏蔽容器。湿法和干法贮存技术均用于厂内在堆或离堆贮存设施以及厂外贮存设施（见参考文献[40]的摘要）。

对延长贮存的关注主要集中在发展技术基础上，以确保现有的乏燃料组件和包装部件在延长贮存期间能够继续执行其应有的安全功能。虽然这是延长现有设施贮存期的必要活动，但承认和接受乏燃料可经多个许可证审批有效期进行贮存为纳入前期设计和将提高未来乏燃料贮存设施有效性的功能要求提供了机会。

目前贮存的乏燃料存量是一个相对较小但正在发展的行业仅仅 50 年的结果。鉴于核电目前和未来可能发挥的作用，现有乏燃料存量将只是未来在后处理或处置能力充分具备之前需贮存的存量的一小部分。因此，所需的乏燃料贮存设施大多数尚未设计或建造。

通过在设计上考虑便于延长贮存期限并且能够适应可能因延长贮存期间工况、法规和社会价值观发生改变而必需的不同安全策略，未来的乏燃料贮存设施能够受益。虽然这些设计考虑因素可能导致前期投资增加，但寿期成本可能低于假定乏燃料贮存设施寿期内静态条件的更传统方案所产生的成本。设施设计、选址和乏燃料贮存配置能够显著地影响延长贮存问题和相关成本。

4.1. 系统设计基准

为适应延长贮存而设计的乏燃料贮存系统将需要考虑更长时间内可能发生的更广泛的假想方案。这些假想方案包括因洪水和地震等自然现象而导致挑战的规模和发生率增加的可能性、老化的累积效应以及不断变化的社会价值观和政策的影响[9]。因此，对于旨在适应不确定乏燃料贮存期的设计，考虑增加安全裕度以适应更长贮存时间内可能遇到的更广泛的潜在状况是合适的。乏燃料延长贮存的设计需要包括减少安全相关结构、系统和部件的年限相关应激因素的规定。应选择包装和干燥技术，以降低未来包壳破损的可能性。燃料贮存和货包配置应为检查和监测系统提供便利。需要考虑机械、热工、化学、辐射和其他能够随时间累积或变化的应激因素等现象。简单而坚固的系统设计以及适当的材料选择和质量控制被认为对实现放射性屏障以及安全和安保所依赖的其他系统的长期可靠性至关重要。需要选择结构材料并控制环境条件，以充分防止腐蚀、应力腐蚀开裂和其他年限相关降质。降低温度循环和机械装卸等运行瞬变的频率和幅度的设计和运行控制将进一步减轻结构材料的疲劳和其他挑战。乏燃料延长贮存的设计还需要考虑与维持更长贮存期所需的质量控制和记录相关的挑战。

除了确保长寿期和促进安全相关结构、系统和部件的维护，乏燃料贮存设施的设计还需要考虑维持公众信心的重要性。因此，场地、涂料和标示正在对设施进行适当维护的其他可见标志也很重要。出于同样原因，未来的设计可能考虑促进与公众互动和提供其他社区利益的特性。³

³ 荷兰 HABOG 设施内的高放废物将逐渐衰变，直到后代人和政府就放射性废物处置方法作出决定。这栋建筑物的橙色系其设计者埃伍德·范霍夫选择用来象征这一衰变过程，因为橙色介于红色和绿色之间。建筑物的外部将定期重新粉刷成逐渐变浅的色度，直到大约 100 年后变成白色，届时废物的热输出将减少一个数量级。

乏燃料贮存设施和设备的延长贮存设计要考虑贮存的乏燃料可能需要治理的可能性，以确保安全运输和与未来乏燃料管理步骤的相容性。因此，乏燃料贮存设施应能够维护、确认并在必要时恢复可运输性。随着贮存期的延长，促进可回取性和实现装卸设备标准化的措施等考虑因素变得越来越重要。例如，在贮存之前，将一个或多个乏燃料组件放入标准化篮中，可以为一些目标提供支持。使用这种篮子可以：

- 提供标准化装卸各种乏燃料的功能；
- 提供便利监测、检查和适当数据管理与保存的功能；
- 提供确保可回取乏燃料进行检查或重新包装而不依靠保持乏燃料组件结构完整性的手段；
- 通过为几何形状控制提供额外的结构支持和为添加中子毒物或更换慢化剂提供一种手段，加强临界安全；
- 允许将乏燃料贮存在各种配置（如屏蔽容器、水池和贮存库）中，并在需要时能够方便地从一种配置转移到另一种配置。

理论上，乏燃料贮存设施可以设计成在材料、检查和维护能力上能够支持可能数百年的运行。然而，当考虑到相关的成本，在某些情况下可能更可取的做法是设计一个更适中的寿期，并有目的地规划设施和设备的重大整修以及届时可能的乏燃料重新包装。最终退役的方法和手段也是在设计新的乏燃料贮存设施和扩大现有设施时的主要考虑因素。

4.1.1. 老化管理和许可证更新考虑因素

可适应不确定贮存期的新乏燃料贮存系统不仅将以往老化管理中汲取的经验教训纳入其设计基准，而且还考虑促进未来老化管理计划的设计特性。这些特性可以包括提供监测和检查系统以及维修或更换关键部件的手段。在延长贮存期间可能必要的整修实例包括维修混凝土结构（水池或屏蔽容器），将乏燃料重新打包装入新的贮存密封容器中，或更换乏燃料池中的中子吸收板。

监测和检查系统能够更好地支持延长贮存，为此可考虑使用先进的监视和无损检验技术来监测贮存工况，以及通过提供以下方面的预防维护和预测维护支持老化管理：

- 接触关键部件进行定期监视；

- 准确的基线和在役检查记录，包括材料测试样品和其他便于明确解释检查结果的特性；
- 探测可能给材料性能造成挑战或加速降质的运行工况；
- 早期探测和准确分析影响安全相关结构、系统和部件的降质情况。

鉴于可能的延长贮存时间框架，乏燃料贮存设施可考虑额外的基础结构，如热室、水池和远程操作设备，以便在需要时维护、维修和整修或更换关键部件。能力可能包括实现以下目标的手段：

- 治理、重新包装或搬迁在贮存期间已经降质或无法核查是否符合适用要求的乏燃料或包装部件；
- 如果不能证明乏燃料货包满足延长贮存后的要求（即乏燃料货包工况或运输要求可能发生改变），则恢复可运输性；
- 管理放射性废物流。

通过开发和纳入有助于老化管理的设计特性、开展材料性能研究和确保持续安全所需的许可证再审批活动，与乏燃料延长贮存相关的成本和风险可大幅降低。

4.1.2. 保障和安保考虑因素

乏燃料延长贮存设施将需要满足有关保障和实物保护的相关公约和条约规定的当前和未来的要求。从保障角度看，有能力核查贮存的核材料并保持对核材料了解的连续性非常重要。通过设计实施保障[41、42]并遵守国家法规也很重要。需要采取适当措施防止擅自接触或转移放射性物质。因此，安全和安保考虑因素需要成为设施设计和选址的一个组成部分。

许多对安全很重要的技术考虑因素也适用于保障和安保。乏燃料贮存技术旨在严重自然事件下维持其安全功能。这些属性也提供防止转用或假设攻击的类似保护。然而，在延长贮存情况下，由于辐射场随乏燃料老化而减弱，最终将需要额外的屏障和监测系统来满足保障和安保要求。这种辐射是确定安保特性以防范盗窃和转用的一个重要因素。虽然减弱的辐

射场减少了安全风险，但也降低了乏燃料的自我保护特性⁴，这可能导致需要额外的实体屏障、监测和人员需求来保护燃料。

除了自我保护特性的最终丧失之外，安保要求也会随时间的推移发生显著变化。保护乏燃料所需的安保部分地基于已察觉的威胁，而这种威胁会因外部事件而发生显著变化。因此，制定合理和现实的威胁假想方案并定期进行审查将作为一种工具，用来对确保乏燃料在延长贮存期间得到适当保护所需的安保措施进行评定。

4.2. 湿法贮存与干法贮存设施

乏燃料从反应堆卸出后通常在冷却水池中贮存至少 3 至 5 年。为了给新卸出的乏燃料腾出空间，或者当反应堆设施最终退役时，这些乏燃料最终将从冷却水池中取出，并转移到水池、干法贮存库或干法容器贮存系统中。

贮存乏燃料的注水池已证明能够可靠和安全地运行数十年。衰变热被水移除，通过热交换传递到冷却水或环境空气中。通过控制水温和化学成分，降质和随之发生的放射性存量释放的可能性保持在低水平。此外，大量池水的巨大热惯性为电厂异常工况或事故时采取补救行动提供了相当长的宽限期。乏燃料池的潜在缺点包括对能动安全控制（例如，维持水位、水化学、冷却和补给系统以及泄漏检测）的依赖增加以及处于潮湿环境中可能导致更多降质机理。乏燃料湿法贮存需要更多的放射性废物管理作业（如液体废物处理），并产生需要额外废物处理的废物流。

乏燃料干法贮存系统包括为单个密封容器或屏蔽容器设计的干法容器贮存系统，以及为贮存多个乏燃料组件设计的大型贮存库。乏燃料干法贮存系统通常设计成依靠非能动安全特性。衰变热通过传导和辐射传递到贮存包容系统的表面，并通过自然对流传递到环境空气中。乏燃料干法贮存

⁴ 国际易裂变材料问题小组报告[43]：“在大约第一个 100 年里，轻水堆乏燃料以大于每小时 1 希沃特的剂量率发出伽马辐射，这将在三到四小时内对大约 50% 的成人造成致命伤害。在这种照射量下，原子能机构认为经辐照的乏燃料具有充分的放射性，以致于只能用专门设备和设施进行转移和处理，这超出了次国家团体的实际能力，因此具有‘自我保护性’。”

设施也已证明能够可靠地运行数十年。乏燃料干法贮存系统的潜在缺点包括以下方面：

- 更高的燃料温度和相关的热负荷限度；
- 如果在干燥环境中装卸裸露燃料组件，则需要更复杂的设备和放射防护措施；
- 无法直接接触乏燃料进行检查。

湿法贮存水池和大多数干法贮存库设施通常将乏燃料作为裸露组件贮存，而对于干法容器贮存系统，乏燃料通常在贮存前被置于密闭密封容器或屏蔽容器中（见第 5 部分）。干法容器贮存系统可在反应堆贮存水池达到容量时随时部署，并根据需要逐步添加。这种“按需付费”方案可以减少乏燃料贮存所需的前期资本投资。由于对安全和安保非能动特性的依赖增加，运行成本连同运输成本也可能降低，因为可避免在运输和接收设施装卸裸露乏燃料。相对于目前干法容器贮存系统的设计，乏燃料贮存水池或干法贮存库设施的建设需要更大的资本承诺，还可能导致与水处理或供暖、通风和空调系统等能动系统相关的运行费用增加。然而，这种额外费用可能被利用规模经济的更大容量的水池和干法贮存库设施所抵消。

4.3. 集中乏燃料贮存设施

目前的乏燃料贮存设施通常并置在反应堆厂址内。如果在许可证批准的反应堆服务寿期结束前未完成乏燃料的后处理或处置，这可能导致在相关反应堆退役后很长时间内需要对厂内（在堆或离堆）乏燃料贮存设施进行维护。其后果可能是，由于厂内运行基础设施的减少而导致风险增加，或者增加贮存运行成本达到单纯为支持乏燃料持续贮存而维护该基础设施的程度本。此外，由于乏燃料贮存设施仍在厂内，这也可能削弱及时退役反应堆的动因，从而导致更大的挑战和更高的风险，以及维护记录和保存知识的额外挑战。此外，受影响的社区可能既不会考虑也不会同意这些反应堆厂址成为长期乏燃料贮存设施。

在一个或多个地区乏燃料贮存设施中贮存乏燃料有若干好处。除了使反应堆厂址能够消除重大放射性危害并在反应堆寿期结束时完全退役之外，集中乏燃料贮存设施还可以通过避免在许多厂址重复运行、维护和安保费用需求而显著地降低这些相同成本。例如，集中乏燃料贮存使得能够

为下述目的整合信息、专门知识、设备和其他基础设施，从而减轻许可证审批负担：

- 信息管理系统和其他有组织的控制；
- 检查、监测和分析乏燃料及其包装部件；
- 维修、整修或更换与安全相关的或其他关键的结构、系统和部件；
- 应对意外情况或其他事件所需的重新包装或其他设备；
- 处置或后处理之前所需的任何准备或预先准备步骤。

对综合乏燃料贮存设施的设备进行标准化和维护也能降低与设备过时相关的风险。Carlsen 等[9]发现，“特别是，如果老化乏燃料货包的运输成为问题，因为恢复可运输性的基础设施（即检查、重新包装、外包装等）倘若在多个厂址重复则可能代价高昂。”此外，规模经济还将允许考虑水池、贮存室和对于多个较小设施可能不具有成本效益的其他贮存替代方案。同样地，由于集中设施的设备和装卸方法标准化，未来运输和装卸的成本和复杂性可能大大降低。

集中乏燃料贮存的一个潜在障碍是难以找到满足技术、社会和政治标准的场址。如果所在社区从产生乏燃料的反应堆运行中得不到任何受益，或者担心该场址成为事实上的处置库，那么要获得所在社区公众接受可能会特别困难[9]。其他障碍包括：(1) 可能影响整个贮存燃料的严重事件的潜在更大后果；(2) 运输到设施的额外费用和 risk（尽管很小）；以及 (3) 集中贮存的前期投资成本，该成本在短时间内可能高于现有场址的增量贮存成本，但在比较总寿命成本并包括重新包装风险的或有费用时，可能被规模经济所抵消。

4.4. 选址考虑因素

在后处理或处置能力充分具备之前贮存乏燃料所需的大多数设施尚未设计、获得许可证或建造。这为通过谨慎进行新乏燃料贮存设施选址，大幅减少与乏燃料延长贮存相关的许多风险和成本因素提供了机会：

- 将设施建在干燥、温和的气候环境可以显著减少腐蚀和其他对材料性能的挑战。

- 选择严重事件（如洪水和地震）发生概率低的场所可以显著减少自然危害。
- 在远离工业或其他潜在危险并易于防范敌对行动的区域选择场址可以显著减少人为危害。
- 建造后果少（如人口少、水和土地使用有限或业已受到限制）的设施可显著减少意外事件的潜在环境和安全影响。
- 由于湿法贮存设施和干法贮存设施都将衰变热转移到环境中，所以冷却水可得性和环境空气温度是考虑因素。
- 对于共处设施，乏燃料贮存、后处理和处置设施之间的运输路线和设备兼容性更容易管理，而且如果与处置设施共处一地，连运输都不需要了。

原子能机构《安全标准丛书》第 NS-R-3 (Rev.1) 号《核装置的厂址评价》[44]载有在乏燃料贮存设施选址方面可以分级方案采用的准则和方法。

5. 乏燃料贮存配置

乏燃料贮存配置能适应不确定的贮存期，以便于老化管理，并为未来采取步骤实现可接受的终点提供灵活性。选择乏燃料贮存配置以满足当前和未来需求的关键决定涉及乏燃料将如何贮存、是否将对乏燃料进行包装以便在贮存前或贮存后进行运输或处置、将依赖哪些部件执行基本安全功能以及如何充分确定地证明安全性能以满足监管要求。每个决定都会影响未来的选择。对可利用的替代方案进行评价，以选择一种在延长贮存期间能够持续同时又保持灵活性和适应性以因应各种可能的未来假想方案的战略。

地质处置库将要求把乏燃料先置于合适的处置容器中再放置到地下。对于许多寻求处置库的国家，处置容器的设计（如容量和材料规格）和内含废物形式的验收标准尚未确定。就如何和何时将乏燃料置于容器中而言，这对乏燃料贮存具有重要意义。

5.1. 密封容器和屏蔽容器

贮存前将乏燃料置于坚固的密封容器或屏蔽容器中有很多好处。通常赖以封闭放射性物质并保持屏蔽和临界安全所需几何形状的乏燃料包壳很难检查，也无法维修或更换。密封容器或屏蔽容器充当额外屏障，“因为它确保封闭放射性核素，通过阻止慢化剂侵入加强临界安全，并保持一个阻隔可能引发或加快降质过程的氧气、潮湿空气和水的惰性环境”[9]。乏燃料密封容器或屏蔽容器还提供一种在燃料结构完整性受损情况下进行回取和装卸的手段。简而言之，密封容器或屏蔽容器可作为能够执行关键的安全功能的可检查、可维修和（或）可更换的部件，从而减少对依靠乏燃料及其包壳的完整性来确保延长贮存期间安全的需求[9]。支持将乏燃料贮存于密封容器或屏蔽容器的其他考虑因素是，乏燃料处于能够比较容易搬迁的配置中，并且密封容器还可以提供对严重事故工况的增强的坚固性。

然而，对于密封在贮存密封容器或屏蔽容器中的乏燃料，监测能力有限，并且无法直接接触检查乏燃料或密封容器内部构件。了解乏燃料及其包装的工况和结构完整性是目前贮存和装卸安全基准的一个重要部分，也是证明符合贮存后运输和后处理或处置验收要求的安全基准的一个重要部分。很少直接接触检查将必然产生额外的费用，涉及制定设计和许可证审批基准以适应与乏燃料及其包装老化工况相关的额外不确定性。无法接触乏燃料和密封容器或屏蔽容器内部构件进行定期检查也可能导致错失早期探测和缓解意外降质机理的机会。

没有直接检查的可能性，就需要具有更全面的降解机理预测能力。这可能增加制定可证明乏燃料及其包装将符合贮存后贮存和运输适用要求的技术和监管基准所需的研究、开发和验证工作。此外，额外包装材料的尺寸和重量可能限制运输和装卸方案。后处理和处置设施的未来验收标准也可能对材料的形式和成分施加限制。出于这些原因，可能有必要在贮存前将已包装好的乏燃料打开并进行重新包装。避免将来重新包装需要的成功包装战略需要适合于贮存期限、随后运输和最终处置（如果这是终点）的密封容器或屏蔽容器。这种方案将受益于：

- 成功的老化管理计划；
- 选择符合可预见的处置库验收标准的密封容器或屏蔽容器（即几何形状、热负荷、临界安全措施和材料）；

- 适用政策和法规的稳定性；
- 在重新包装变得必要之前完成后处理或处置。

如果在贮存前包装乏燃料，一个比较稳健的战略可能是假设重新包装最终将是必要的，并设计包装和作业战略为其提供便利。计划定期重新包装的方案可以：

- 为成本规划提供依据；
- 实现定期检查，以确认符合性能要求，并获得数据以支持研发需求和加强乏燃料性能预测能力；
- 允许更换和更新乏燃料组件和包装部件以及监测设备，以利用新技术并满足新的或变更的要求。

然而，重新包装会增加风险、成本和人员受照量，还会产生放射性废物。未来重新包装的成本估算在很大程度上取决于贴现率和经济分析中使用的其他假设。一些估算表明，定期重新包装可能使成本增加一个或几个数量级。美国政府问责局在关于终止尤卡山处置库计划的报告中估计，基于每 100 年进行一次重新包装作业的假设，干法容器贮存系统的成本可能从每座反应堆 3000 万至 6000 万美元增加到 1.8 亿至 5 亿美元[45]。

虽然重新包装的成本和影响可以通过简单地对现有货包进行外包装来降低，但决策者应对简单地将货包放入后续外包装中的重新包装方案保持谨慎。经验表明，这可能会增加未来作业的复杂性和不确定性。每个额外的包装部件都加大了检查的难度，增加了货包的尺寸和重量，并减少了热传递。这些改变会负面影响货包对运行状态和事故工况的性能。

5.2. 裸露组件

贮存前包装乏燃料的替代方案是将其作为裸露组件贮存。裸露的乏燃料可以贮存在提供屏蔽和其他必要安全特性的水池或干法贮存库中。贮存裸露的未包装乏燃料的一个主要优点是在整个贮存期间加强接触监测和检查。因此，更容易检测到延长贮存期间可能出现的任何降质。这大大有助于证明在贮存期间符合保障要求，以及在延长贮存期后符合运输要求。它支持装卸和运输设备的设计提供了额外信息，并减少不确定性及扩大设计和安全裕度的相关需求。此外，由于贮存期间释热和辐射减少，对屏蔽

和排热的需求随时间的推移而下降，从而可使未来包装的尺寸、重量和成本减少。

将包装推迟到贮存期之后的另一个优点是，相对于运输要求和后处理或处置的验收标准，不确定性要小得多，从而最大程度地减少需要重新包装的可能性。推迟包装还将允许未来的包装设计利用未来的技术和材料，并将为贮存后运输和装卸提供“新鲜”包装。这可以大大减少技术差距和预测贮存于密封容器的乏燃料状况所需的相关研发工作。因此，依靠密封容器或一个个罐子而不是乏燃料包壳完整性的工程方案可以减轻屏蔽容器设计者和监管者就乏燃料包壳特性开展广泛研究的负担[39]。最后，在贮存后可包装进行运输和处置的裸露乏燃料贮存可使处置库的设计和选择继续进行而不受乏燃料包装相关决定的限制或影响。

由于乏燃料及其包装部件的状况以及监管要求发生变化的可能性会随时间的推移而增加，因此也可以合理假设需要重新包装或采取其他缓解措施的可能性与乏燃料最后一次包装和最后一次运输之间的时间间隔呈正相关。因此，采用推迟包装或包括检查乏燃料和包装部件以及在需要时进行治理或重新包装的预备手段的战略，满足未来要求更容易实现。

6. 监管考虑因素

考虑到多次许可证更新的可能性，可对监管框架进行设计，以确保在实现可接受终点之前可能需要的贮存期期间的安全。

6.1. 监管者的作用

在实现可接受的终点之前，监管者对乏燃料管理活动进行监督。监管审查和监督通过以下方式为确保安全和保持主动控制提供结合点[9]：

- (a) 定期更新或重新评定贮存设施的安全基准和相关老化管理计划；
- (b) 批准新技术；
- (c) 利用新方案（如风险知情导则）加强当前监管框架，以解决不确定性，同时保持延长贮存期间的安全；
- (d) 确保与后处理和处置监管框架（当前和未来）适当兼容和整合。

关键监管作用可包括（但不限于）以下方面[9]：(1) 为监管框架提供信息、制定许可证审批依据和为决策提供支持的研究活动；(2) 加强和实施许可证审批、检查和监督活动；(3) 公众宣传和交流。一般认为，监管者的责任可能无法包括其中的每一项，这取决于当事国。例如，一些监管当局可能没有独立的研究责任。然而，它们可以负责根据可获得的研究做出知情决定。根据体制情况，监管者还可能承担与延长乏燃料贮存期相关的额外责任。

6.1.1. 监管研究活动

监管者、行业和研究机构需要从整体上考虑老化管理和贮存概念。监管研究活动可能包括实验、技术研究和分析，以期：

- 评定潜在技术问题的安全意义；
- 制定长期许可证审批依据；
- 提高乏燃料贮存系统的长期耐久性。

研究需要面向评价新的老化管理和设计方案，以及评价和核查老化管理计划（例如，设施的定期重新评定）。这包括实施和核查时限老化分析所需的研究（见第 3.1 部分）及监测、维护和缓解活动，以确保许可证审批有效期期间的安全。为确定研究需求，监管者、行业和研究机构开展监管差距研究，以确定优先事项。确定和实施准备期长的研究项目非常重要，这些项目可能需要早期规划以满足未来几年的需求。

6.1.2. 许可证审批、检查和监督

监管者的作用是确保有充分的法规、导则和检查计划，以指导制定将在每个后续许可证审批有效期内确保安全并保持贮存和运输能力的老化管理计划，以及评定其实施情况。监管者还确保在贮存期间收集运行经验，并更新规则以解决新出现的问题。

许可证更新审查或定期重新评定的主要重点将是时限老化分析的有效性和针对每个具体贮存设计提出的老化管理计划的充分性（即包括需要对主要屏蔽容器部件进行检查或更新的频率）。监管检查计划的一个关键要素是核查每项老化管理计划的实际执行情况以及许可证持有者采取的适当纠正行动。此外，监管者可以制定运行经验计划以确定一般技术问题和老化趋势，以及其他计划或要求以确保记录、知识管理和其他基础结构得到

维护，从而确保持续的安全贮存并证明符合未来的运输、后处理或处置标准。基于可能大幅延长贮存期的多次更新的可能性，监管者重新考虑设计基准事故工况的可能性和严重程度也是适当之举[9]。

作为许可证更新的一部分，监管者确保始终有充足的财政资源来履行财政义务。乏燃料贮存成本包括运行、安保人员、监测、设备和设施维护与更换、可能的检查和重新包装作业以及最终退役。随着乏燃料存量增长以及乏燃料贮存设备和设施老化，这些持续运行成本将增加。因此，随着贮存期的延长，财务责任和相关的财务保证需求可能会大幅增加。

每个国家都有不同的法律和财务结构来实现财务保证。考虑到贮存时间框架的不确定性，监管者需要考虑各种可行的假想方案，并根据需要定期重新评价和调整假想方案，以确保在乏燃料贮存期间始终有财政资源可供用于履行这些义务。

6.1.3. 公众宣传

公众信心是确保可持续乏燃料管理并从而确保可持续核电的关键。监管范畴内的公众宣传是将乏燃料贮存若干期限未知的时段直至实现终点的一个基本要素。通过积极的外宣，该行业可以接触有关各方以解释延长贮存活动以及促进安全、安保和人类与环境保护的依据。监管者可以着重于提高对贮存活动的实际风险和影响的理解，以及增强对其加强安全的作用的信心。监管者还通过有效地宣传正在进行的的活动，并（根据法律酌情）寻求对影响延长贮存的政策变化和法规的反馈来影响公众的接受。

6.2. 延长贮存的监管框架

监管框架包括为确保乏燃料贮存的持续安全、安保和环境保护而制定的国家政策、规则、导则和技术标准。政策制定者和监管者定期重新评定，以确保监管框架适当地反映技术进步、不断变化的社会价值观和需求、行业需求和其他新出现的问题。

在可预见的未来，由于乏燃料卸料量将超出处置和后处理能力，因此，安全地延长乏燃料贮存期的方法将是有效乏燃料管理计划的一个内含的组成部分。可预见的乏燃料存量大幅增加，加上乏燃料贮存期的不确定性，为重新审查支持乏燃料贮存许可证审批过程的方案和假设提供了时机。Carlsen 等[9]发现：

“主要的许可证审批考虑因素可能包括许可证再审批的频度、启动许可证再审批的准备期、应为老化性能分析设定的适当时间长度以及关键老化管理行动的频度。”

许可证到期并不代表对乏燃料可安全地贮存的期限的限制。许可证期限通常由监管或政策考虑因素决定，一般系指被认为能满足预期乏燃料贮存期的足够长的时间间隔。图 3 说明如何设计监管框架，以纳入定期许可证更新，从而解决当前情况（即贮存期未知），同时确保在关于乏燃料终态的国家政策得到决定和实施之前安全贮存。图中上方的循环表示许可证更新过程。Carlsen 等[9]报告称：

“这种方案的成功取决于能够可靠地查明在下一个许可证审批有效期内可能危及成功的乏燃料贮存的任何薄弱环节的许可证更新过程，还取决于许可证持有者在必要时采取有效纠正行动以获得许可证延长资格的能力。许可证申请将需要在许可证到期之前及早提交，以便为任何必要的纠正行动提供充足时间。纠正行动的范围可以从加强监测或检查计划到治理降质的乏燃料容器或贮存设施、重新包装乏燃料组件，甚至是搬迁到新设施。”

如果图 3 所示方案得以有效实施，则许可证更新次数无需被限制，因为每次都将是有限制的步骤（即许可证审批有效期）评定和确认符合要求情况。

6.3. 风险知情、基于实绩的监管

监管者可能考虑风险知情、基于实绩方案对解决长期贮存的技术不确定性的优势[9]。目前，一些监管框架基于确定性方案，这种方案对于特定的系列运行状态和事故工况必须满足性能目标（如剂量限值）和辅助设计要求。基于保守的工程判断，老化管理计划在本质上通常也是确定性或规定性的。

根据核管理委员会的定义[46]：

“监管决策的‘风险知情’方案代表一种理念，据此可结合其他因素考虑风险认识，以确定要求，使许可证持有者和监管者注意力更加集中在与对健康和安全性的重要性相称的设计和运行问题上。”

美国法规即美国联邦法规 10 CFR 63 《内华达州尤卡山地质处置库高放废物处置》[47]纳入了很多这些原则（例如，关闭前运行期间异常和事故工况的剂量限值与假想情景的可能性相关）。类似的原则可适用于监管与延长乏燃料贮存期相关的风险。

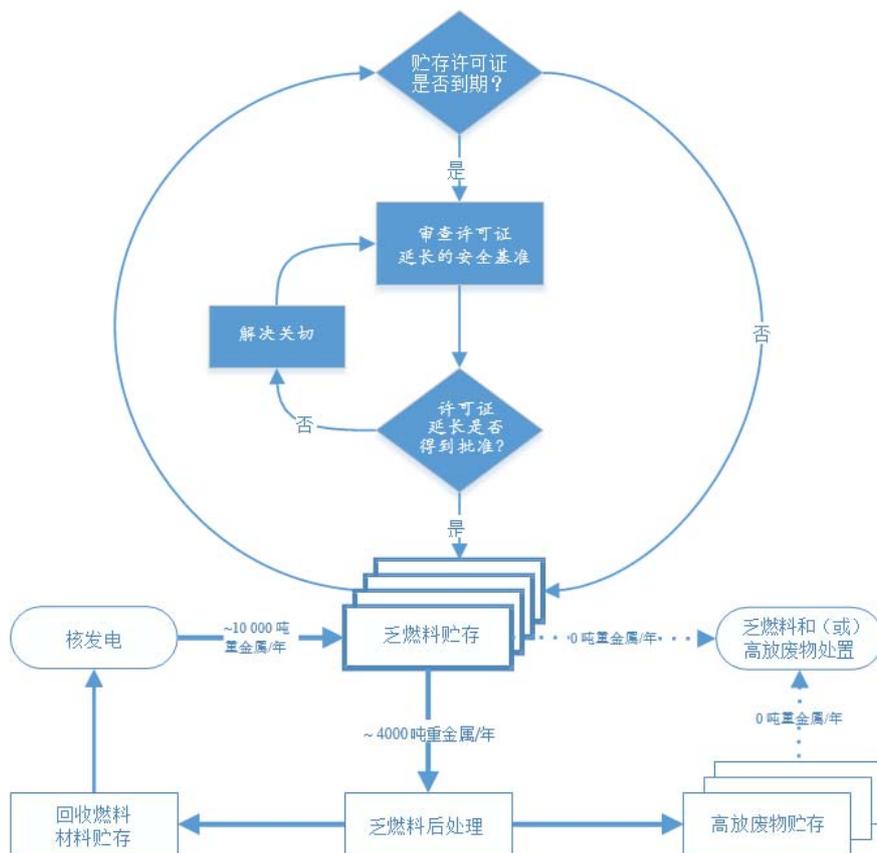


图3. 在实现后处理或处置之前许可证更新。

风险知情方案还可以通过允许明确考虑一系列更广泛的潜在安全挑战，以及通过提供根据风险重大性、运行经验和工程判断对挑战进行优先排序的逻辑手段，加强传统的老化管理和设计要求。风险知情分析的发展也将有助于更好地了解传统确定性方案提供的保护水平。

风险分析提供了对具体老化降质故障的概率和后果的更好了解，这可能为确保安全提供见解和替代方案。例如，一些乏燃料贮存安全功能通常分配给乏燃料包壳，以此帮助密封放射性物质并保持乏燃料组件的几何形状。包壳的完整性很难检查，维修或更换也不可行。对于延长的贮存期，考虑将安全功能转移到更易于监测和检查并且在需要时更易于维修或替换的乏燃料包装部件或乏燃料设施特性上的安全战略可能是慎重之举。这类类似于目前的“装罐”做法，为可疑的乏燃料组件提供额外屏障和装卸手段。减少依赖包壳完整性相关风险的其他解决方案包括使用包装和烘干技术来防范未来的包壳故障，以及使用便于检查和监测的系统定期评定内部乏燃料贮存环境和燃料包壳状况的设计。

基于实绩的方案在满足特定实绩标准而没有明确规定满足标准的方法基础上确定要求。考虑到与可能进行多次乏燃料贮存许可证展期相关的不确定性，风险知情和基于实绩的方案可能鼓励开发新技术和更有效的方案来确保长期安全[9]。

监管和运行框架有时包含以下方面的隐含假设：贮存期限；燃料状况、包装和运输时使用的设备技术；或者乏燃料管理的后续阶段。这些隐含的假设可能影响或不必要地限制潜在解决方案。

基于实绩的监管方案也不依赖于有关未来可能会怎样的假设。它注重确保安全工况，同时在满足既定安全标准的手段方面赋予许可证持有者灵活性。因此，基于实绩的监管可以为适应不断发展的技术和政策提供灵活性。在提供这种灵活性时，还鼓励监管者考虑许可证持有者对明确规定的客观要求的需要。

通过风险知情和基于实绩的方案加强贮存、运输和处置监管框架重点关注最重要的活动，并根据风险认识建立客观标准来评价实绩。以这种方式实施新的贮存和运输方案的主要挑战包括：(1) 确定可接受的乏燃料贮存风险水平；(2) 为评定风险所需的数据收集和分析提供前期资源投资；(3) 确定适当的风险衡量标准和实绩要求，为许可证持有者提供明确客观的指导；以及(4) 保持适当的纵深防御水平。其他挑战包括整个燃料循环后端的风险知情框架一体化。

7. 政策考虑因素

可持续的乏燃料管理需要政策和战略来提供清晰、一致和稳定的方向，因为它们推动对乏燃料贮存的需求以及实现后处理或处置等可接受终点的可用方案和时间安排。在各国进行乏燃料后处理或处置的规模足以适应其乏燃料卸料量之前，更长时期的贮存将是必要的。这被认为不符合保护人体健康和环境而不给子孙后代施加不当负担的责任[2、3]。

乏燃料管理政策的制定是一个复杂的过程，涉及政治、经济、资源节约、环境保护和公众认知，而公众认知已成为许多国家的一个主导因素[48]。政策决定在很大程度上影响着核能的轨迹，并确定管理整个核燃料循环的范畴。

在日益增长的全球能源需求中，对核能需求的预测差异巨大，这主要归因于政策相关变量。国家能源战略和政策影响倾向、补贴和授权，这反过来又影响能源决定的经济环境。在政策有利于减少碳排放或不利于特定类别能源的模型中，预计核能需求通常会高得多[49]。

顾及各种变化并考虑到福岛事件之后政策变化的影响，预计核发电容量到 2030 年将增长 35%至 100%，从 2010 年的 370 吉瓦（电）增长到 500 至 750 吉瓦（电）[11]。此外，减少温室气体排放的环境和社会压力以及潜在的核电新市场（如氢生产和水净化）代表着未来巨大的需求。

由于乏燃料卸料量将随核电生产⁵成比例增加，鼓励有效的长期乏燃料管理决定的合理政策至关重要。政策决定直接影响乏燃料的数量和将需要贮存的时间。它们还影响贮存技术和设计方案等技术考虑因素，并显著地影响对核燃料循环的整体信任度。认识到乏燃料管理问题之间的相互联系并在制定影响乏燃料管理的政策时从整体上予以考虑非常重要。

⁵ 快堆驱动的下一代核电厂可以将每单位产能卸载的乏燃料减少约 100 倍，并提供其他固有的安全和安保益处。然而，以商业规模开发并实施这些技术将需要几十年的时间。开发和使用这些反应堆技术的明确和可信的政策对于吸引投资和持续承诺以开发、许可和实施先进核燃料循环是必要的。

7.1. 确定的终点

国家政策决定乏燃料的终点 — 无论是后处理还是处置。同样，厂内还是厂外集中或区域乏燃料贮存设施等关键决定也主要属于国家政策问题。因此，明确的政策、目标和战略对于乏燃料管理的安全和可持续性至关重要，对于在跨越几代人的时间框架内适当分配财政和人力资源也非常重要[50]。

明确确定的和可信的乏燃料终点对有效的决策和规划是必要的。尽管在燃料循环的后端乏燃料贮存有若干有益目的（例如减少放射性和热量，以及有技术开发的时间），但这些益处只有通过明确确定的终点和实现该终点的战略才能充分实现。没有一个确定的终点作为目标，就只有对乏燃料管理采取“等等看”或“发现并修复”的方案。在例如因乏燃料或包装部件意外降质或乏燃料政策或要求发生变更而有必要对贮存配置或设施做出修改的情况下，任一种修改都可能代价不菲。

7.2. 明确的乏燃料所有权和问责制

国家政策确定了负责核燃料循环每个部分和乏燃料管理范围内每项活动的实体的所有权、问责制和责任。不同实体往往对影响乏燃料特性及其贮存配置和条件的决定负有责任。这包括燃料设计（如燃料和包壳材料选择以及制造技术）、反应堆运行（如损耗）和乏燃料管理（如包装配置和贮存条件）。

每个实体都倾向于作出对有关其职责的绩效进行优化的决定。因此，燃料设计者和反应堆营运者可能优化燃料设计和运行参数以实现最有效的电力生产。这种局部优化的趋势可能限制贮存和处置方案，或者不必要地增加成本和复杂性。

确定所有权、问责制和责任的决策影响乏燃料管理的时间跨度和决定考量。正如第 5 部分所述，关于何时和如何包装乏燃料的乏燃料管理决定能够显著地影响未来贮存、运输和处置的成本和方案。存在着若干可利用的战略，每种战略的相对成本和收益取决于乏燃料贮存时长和谁支付贮存费用、谁支付包装费用和必要时的任何重新包装费用，以及谁支付处置费用。此外，如果可以集中贮存，还有不同的贮存和包装方案。这些考虑因素中的每一项都主要属于政策问题。

正如第 8.1 部分所讨论的，重要的是设计和实施乏燃料政策，以此鼓励核燃料循环的所有参与者采取整体方案，并作出适当考虑燃料循环的其他部分以及对有效达到终点的影响的决定。由于政府最终将承担长期管理的责任，因此政策应考虑建立基础结构的好处，以便利在乏燃料管理的适当阶段进行集中管理和监管。

7.3. 可持续的乏燃料管理

正如第 2.2 部分所述，如果确保可接受终点的手段也一并传承，就无需将延长乏燃料贮存视为给予子孙后代传递不当负担。这将包括除其他外，特别是必要的财政资源、治理和监管基础机构、技术能力以及记录和信息 [10]。

对于拥有可能需要数十年的核电生产来累积实施终点所需资本的小规模核计划的国家而言，这项方案可能很有吸引力，甚至是必要的。例如，荷兰已设计和建造了一个旨在贮存高放废物至少 100 年的设施，目标是完成开发工作，并在这 100 年期间积累手段，使下一代能够就实施终点、继续贮存（通过适当更新和许可证再审批）或考虑届时可供使用的其他替代方案作出决定。

这种方案可被视为使子孙后代能够在感知到的风险、社会需要和价值观以及未来可用的技术背景下，就继续贮存、有益再利用或实施终点作出自己的决定。然而，将选择交给子孙后代伴有一些风险。提供适当的基础结构和财政储备只有在稳定的经济和政治环境中才能确保可持续性。此外，国家可能误判所需资源或其保护资源的能力。子孙后代可能会失去或滥用资源，从而剥夺其他后代人享有同样的机会。这些都是政策制定者需要权衡的合理关切。然而，如果乏燃料被视为一种有价值的资源，那么乏燃料贮存成为子孙后代负担的风险就很小。

7.4. 多国方案

将乏燃料贮存合并到一个或多个区域设施（见第 4.3 部分）有若干优点。接受来自若干国家的燃料的多国乏燃料贮存设施可以更大规模地提供类似益处。多国乏燃料贮存设施的经济效益可能尤其有利于相互紧邻或核计划规模相对较小的国家。然而，这种设施在应对多个国家的独特价值观以及驾驭更复杂的政治、法律和财政挑战方面可能带来额外的挑战。

7.5. 稳定的长期政策

核设施的选址、设计和许可证审批已证明是一个长达数十年的过程，成功的不确定性相对较高，这主要是由于与公众接受和在这些时间框架内发生的政治支持变化有关的挑战。经验表明，基于对未来成果进行预测或立法尝试的政策并不成功。

稳定的乏燃料管理政策在很多国家都一直难以实现。社会对核电的认知从 20 世纪 50 年代无拘无束的乐观发展成 20 世纪 80 年代毫无根据的恐惧，并又回到谨慎乐观。这些循环在一定程度上因国家而异，并受到三里岛、切尔诺贝利和福岛等核事故以及其他能源成本和可利用性的影响。对核电的态度仍然受到公众舆论和其他不利于核政策长期稳定的因素的强烈影响。因此，有效的乏燃料管理政策旨在不受短期或由事件驱动的政治反应或公众舆论摇摆的影响，同时仍能对基本社会价值观的较长期变化作出响应。⁶

最近的核电增长预测主要受不断增长的能源需求推动，这是因为对需要减少碳和其他温室气体排放的共识不断增加，再加上认识到化石燃料供应以及可再生能源成本和可扩展性受到的限制。对照没有核电的能源未来的长期风险权衡核电的长期风险似乎提供了一种有利于核能生产发展的视角。促进这种较长期远景并将其纳入乏燃料管理政策非常重要。

以往的尝试假定了乏燃料及其副产品管理的可预见未来。然而，由于无法虑及意外事件和政策改变的影响，经常会发生大量费用和出现拖延。认识到未来的政治不可预测，许多国家现在正努力制定分阶段的适应性战略，以缓慢、慎重的步骤向终点迈进。这种方案为公众和政策制定者提供了时间来熟悉问题、技术、成本和收益，以及在作出承诺之前制定相互都能接受的协议。稳定、长期的政策可能最好通过深思熟虑地纳入相关规定以允许走一条随未来发展缓慢地演进和适应的道路来实现。

⁶ 例如，由于与恐怖主义威胁以及福岛第一核电站事故相关的关切增加，一些国家的政策制定者推定湿法贮存涉及更高风险，并推出了可能不必要地限制了贮存方案或导致额外成本和人员受照而没有相称的安全益处的政策[51]。

乏燃料管理是一项长期主张。条件、信息、可用的资源和技术、政治和社会价值观随时间发生变化。因此，有必要定期评定政策及其对乏燃料管理的影响，以确保这些政策鼓励采用一种客观、全面和整体的方案并确保在迈向终点方面取得令人满意的进展。有效的评定将考虑实施乏燃料后处理或处置的现实的的时间框架和假想方案，以及相关的环境、财政和社会风险与折衷方案。最后，这种评定让社会相信其关切得到倾听和适当解决。

7.6. 依靠近期解决方案

发展充足的乏燃料后处理或处置能力以实现乏燃料终点需要几十年的大量资本投资。此外，处置库选址和许可证审批带来了重大技术挑战以及许多社会和政治障碍。另一方面，乏燃料贮存技术已证明是安全和相对经济的。因此，争取政治意愿来拨付必要的财政和政治资本来实现可接受的终点一直非常困难。尽管如此，随着乏燃料存量增加和贮存期延长，与维持乏燃料贮存相关的成本和风险将继续增加，如果不加以解决，最终将成为重大社会负担。

贮存的乏燃料的累积可被视为一种问题的征兆，对此有两种可行途径——短期处理办法和根本解决方案。根本解决方案是提供充足的后处理和处置能力。这属于资本密集型方案，在实现收益之前需要持续的长期承诺。因此，继续依靠只增加贮存能力和延长贮存期限这一短期处理办法非常有吸引力。然而，尽管这种对症解决方案可以立即起到缓解作用，但它往往会进一步削弱政治意愿，并且随着时间的推移还会削弱实现根本解决方案所需的社会资源。

在系统动力学中，这种众所周知的模式通常被称为“转移负担”。⁷虽然认识到有时需要对症解决方案作为稳定体系或推迟到可以适用根本解决方案之时的过渡解决方案，但认识和管理这种行为模式至关重要，因为它往往会导致反复适用不可持续的对症解决方案，而损害实现持久解决方案的能力。

⁷ 见 www.systems-thinking.org/theWay/ssb/sb.htm。

就乏燃料管理而言，确保在必要长的期限内安全和有效地贮存乏燃料是一项职业和道德义务。然而，发展安全地延长贮存期的能力不能被用作延迟执行实现可接受终点所需过程的借口。延迟根本解决方案将导致存量和乏燃料管理成本不断攀升，从而使其逐渐地愈发难以管理。取决于公众对深部地质处置库相关风险相对于持续乏燃料贮存相关风险的认知，延迟达到终点和乏燃料存量的不断增加也可能对推进持久解决方案所需的公众信心产生负面影响。因此，已给出强烈警告，即依赖持续乏燃料贮存的政策尽管目前是必要的，但应加以管理，以确保致力于实现可持续的乏燃料管理政策。

8. 其他主要考虑因素

8.1. 在整个燃料循环过程中管理接口

核燃料循环包括三个主要阶段：前端、反应堆运行和后端。这些阶段被分为紧密相关的不连续时段（例如，贮存、运输和后端的后处理或处置）。每个阶段的决定、考虑因素和可用方案可能不仅受之前各阶段的决定、考虑因素和可用方案的限制，而且可能还影响到后续各阶段的决定、考虑因素和可用方案。认识到这一点，2011年7月19日关于建立负责任和安全地管理乏燃料和放射性废物的共同体框架的第2011/70/Euratom号理事会指令第5条[52]指出：

“1. 成员国应建立和维护乏燃料和放射性废物管理的国家立法、监管和组织框架（‘国家框架’），以此分配责任并规定相关主管机构之间的协调。”

第4(3)条[52]规定“国家政策应以下列原则为基础：……(b) 应考虑乏燃料和放射性废物的产生与管理的所有步骤之间的相互依赖关系”。乏燃料贮存、运输和后处理或处置方面的一些监管框架或不同的安全方案或实践随着乏燃料贮存期延长可能导致可能增加成本或风险的相容性问题。例如，设计、运行和监管决定可能未必考虑到乏燃料在密封密封容器中延期贮存的假想方案。这可能导致需要检查包装和乏燃料组件，而且可能需要重新包装，以满足进一步贮存、运输或处置要求。

就安全、可靠、有效和可持续的乏燃料管理作出合理决定的一个关键挑战是，需要明确包括乏燃料后处理或处置在内的所有阶段的总体责任、问责制和所有权。在燃料循环的不同阶段未经有关各方之间的充分互动划分这种责任会促成可能限制未来方案和增加寿期成本的局部决定。随着乏燃料贮存期延长，对整个燃料循环进行管理的整体性方案变得越来越重要。它使得能够作出考虑整个寿期的决定，防止以损害系统的整体性能为代价实现局部优化。

跨燃料循环管理的设计、运行、监管和政策整合使得能够作出确保材料、运行、设备、包装和废物形式与未来的乏燃料管理步骤相容的决定，从而降低风险和寿期成本。例如，与地质处置库的预期时间安排和验收要求相关的决定将影响各种贮存配置的相对优势和劣势。这些贮存技术选择反过来显著地影响延长贮存的成本和影响。贮存技术决定也可能影响未来处置库设计和选址的设计标准、方案和成本。核燃料循环中的这种相互依赖性适用于核燃料循环的所有阶段。对燃料循环各阶段影响的实例包括以下方面：

- (a) 燃料制造和反应堆堆芯管理与运行：电力公司管理运行成本，同时保持高可靠性和安全标准。短期成本考虑因素有利于实现更高燃耗和最大程度地减少燃料故障的燃料设计和运行参数。这鼓励继续开发和和使用新设计和先进材料用于燃料、包壳和组件结构以及反应堆冷却剂化学。这些参数的改变能够影响乏燃料和包壳材料的结构特性和腐蚀性，并从而影响延长贮存和后续运输的可用方案和成本。
- (b) 乏燃料贮存：贮存与随后的后处理或处置运输之间的相互依存关系极大地影响如何及何时包装乏燃料的决定。例如，地质处置设施的设计和选址有两种截然不同的方案。一种方案寻求不受任何现有包装限制的最佳处置系统。另一种方案寻求能够容纳现有乏燃料货包的处置系统。显然，负责处置库的实体倾向于前者，而负责贮存的实体倾向于后者（即允许为贮存目的以最佳方式包装燃料）。因此，如果一个实体（如电力公司）负责乏燃料贮存决定，而另一个实体（如政府）负责运输或处置，那么贮存期间的乏燃料管理决定不可能充分考虑其在乏燃料贮存之后的影响，并可能限制或显著影响未来的运输和处置成本。

- (c) 乏燃料运输：运输许可证可能在燃料贮存期间到期，或者贮存许可证和运输许可证的要求可能不完全兼容。因此，对于在贮乏燃料，要同时持有运输许可证和贮存许可证，这在一些国家是一项要求。例如，在日本，确定了持有 50 年贮存和运输许可证的整体方案。随着贮存期的延长，同样的原则也可以适用。
- (d) 乏燃料后处理：后处理作业通常使用未受损燃料来减少卸载运输货包时的污染。如果接收在贮存期间可能已降质的乏燃料，就可能需要对后处理设施的设计和运行进行更改，以管理潜在污染。此外，如果准确表征乏燃料变得困难或代价很高，贮存期间的严重降质可能影响后处理。
- (e) 乏燃料处置：挖掘式深部地质处置库的当前设计通常使用处置包，其具有比许多正在使用的两用屏蔽容器要小的热容量、重量和裂变材料容量。然而，趋势是使用通过最大程度地增加有效载荷（即增加尺寸、裂变和热限值）来降低制造和运行成本的屏蔽容器。此外，满足处置库验收标准所需的材料和结构要求尚未明确作出规定。因此，可能的情况是，目前在贮的乏燃料可能需要在处置前进行重新包装。⁸ 验收并重新包装现有密封容器或处置现有密封容器设计的必要性可能对未来深部地质处置库的营运者施加大量额外的选址和设计限制。

8.2. 公众信任

公众对乏燃料管理的信任是贮存和处置设施选址和许可证审批的一个关键因素。已对影响公众信任的因素进行广泛研究，并且可利用一些资源帮助了解和解决这个主题（见参考文献[53]）。尽管如此，获得社会的接受和相关的政治摇摆不定已证明是比维护安全和安保更大的挑战。Seaborn [54]认为：

“公众对核燃料废物和核电的关切和不安通常……除其他外，特别是源于：

⁸ 有建议认为，装入较小的密封容器或屏蔽容器将增强与未来贮存、运输和处置配置相兼容的可能性。使用较小的货包将提供更大的灵活性，但也增加成本和运行影响，因为无法保证这种投资将排除未来重新包装的需要。

- 与核武器和切尔诺贝利事件等过往灾难的联系；
- 对于大多数人而言，围绕核裂变和辐射持久性的神秘感；
- 害怕如果“某些东西出错”所带来的灾难性后果，而无论从统计角度来看“某些东西出错”是多么不可能；
- 对没有设想无限期监测处置室和周围地圈发生的情况的废物管理系统感到不安；
- 对科学家预测距现在一万年可能发生的情况的能力缺乏信心；
- 当我们现在就我们产生的核废物作出决定时，很难确定如何最好地保护未来子孙后代的利益；
- 感觉一定有某种更好和更少危险的方法生产我们需要的电力。

“这些忧虑和怀疑中有一些可以在某个层面上通过科学论据予以推翻。但关切依然存在，而且是现实的。在民主社会制定公共政策时，必须对此予以认真关注。”

8.2.1. 公众信任困境

公众对乏燃料和高放废物管理的信任因感知风险以及对乏燃料管理缺乏信心或了解而受到严重影响。为了直接解决这些关切，在共享信息以及保证和展示安全方面进行了大量投入，但对于建立公众信任仍成效有限。

未能获得充分的公众支持一直是维持必需的政治意愿以促进处置乏燃料或高放废物的深部地质处置库的成功选址和许可证审批的困难、延迟和挑战的根源。无法获得承诺和持续难以取得实质性进展强化了风险感知，并进一步削弱公众对能够可持续地管理乏燃料和高放废物的信心，从而增加乏燃料的数量和乏燃料贮存期限，并进一步增加与乏燃料贮存设施的选址和许可证审批相关的挑战。这种循环效应如图 4 所示。不无讽刺的是，对解决乏燃料管理问题的公众信任和政治意愿的缺乏会陷入循环而毫无进展，最终使局势进一步恶化，阻碍持久的解决。然而，公众信任不仅受到感知风险影响，而且也受到感知利益的影响，这表明这两个领域都为加强公众信任提供了机会。

8.2.2. 感知风险与感知利益

从图 4 观察到的一个关键方面是，公众信任实际上是兼顾风险与回报之平衡的一部分。因此，尽管充分的安全实绩是必要的，但仅凭降低风险和风险认知可能不足以扭转该循环。这将需要对利益也要认可和重视。⁹ 建立公众信任需要公众认识到相对于他们的价值观获得实际好处或避免实际成本的机会。没有这种激励，就没有采取立场的动机。

尽管公众信任已证明是相对地抵触以往辩护或改善核安全记录的努力，但随着在许多国家公众支持不断增加，公众信任也已证明能够接受核电的利益。¹⁰ 即便在考虑海啸及随后对福岛第一核电站造成破坏的影响之后，这也是实情。公众对核能认知方面的最近变化在很大程度上归因于人们认识到核电相对于其他大规模能源生产技术的利益（例如，寿期碳排放量非常低，能源安全得到加强）。

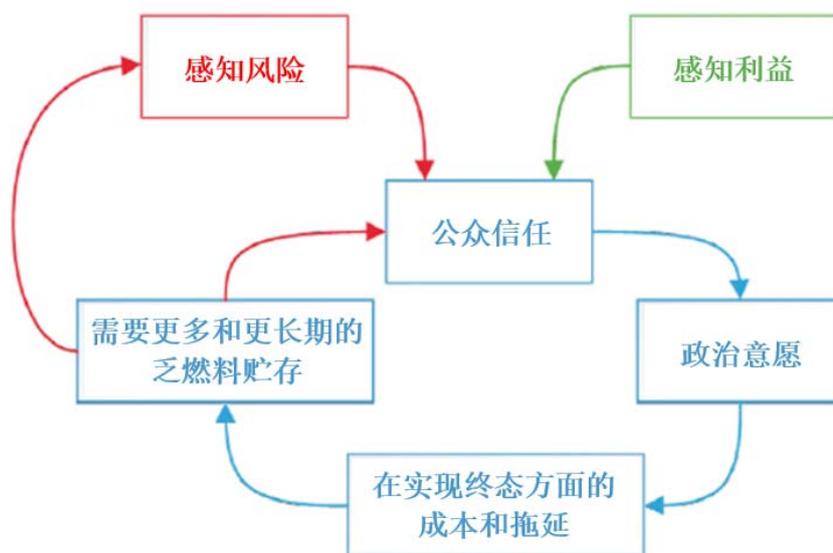


图 4. 公众信任和反馈。

⁹ 感知风险与感知利益受到许多因素的影响，例如，风险认知受到除其他外，特别是对核现象的了解程度、对核当局的信任以及核安全记录等因素的影响。对核能利益的认知受到能源需求和成本的影响。

¹⁰ 见 www.foratom.org/publications/#topical_publications。

乏燃料能够而且必须得到安全管理。然而，公众信任不仅取决于感知风险，而且还取决于感知利益。经验表明，出色的安全记录不足以获得公众信任。还必须认识到与感知风险相应的利益。为建立乏燃料贮存设施的有效选址和运行所必需的公众信任，也需要使社会认知并重视核电的利益。提供必要服务的社区需要相应地受益。有效的选址过程利用这些利益，使被选为乏燃料管理设施所在地的社区认为自己是赢家而不是输家。

核电的利益包括可靠性、低碳排放、稳定的长期燃料供应、地域灵活性以及出色的环境和安全记录。乏燃料贮存设施所在社区的获利随后可以持续很长时间，包括就业增加带来的经济实力、基础结构和与接纳该设施相关的其他激励措施。然而，实现这些利益并赢得取得进展所需的信任将需要为更好地理解 and 更有效地沟通相关问题作出不懈努力，发展稳定和适应不确定经济和政治情况的利益，以及做出坚持到底所需的长期投资和承诺的政治意愿。

8.2.3. 公众接受和乏燃料延长贮存

生产和使用核电的决定代表着社会对长期管理所产生乏燃料（即安全贮存、后处理或处置）的一种承诺。即使已选择逐步淘汰核电的国家，也存在着从以往使用产生的乏燃料和高放废物；况且全世界继续产生大量的乏燃料。

乏燃料贮存是核燃料循环的一个重要组成部分，乏燃料延长贮存对整个乏燃料管理具有若干好处。额外的冷却时间将减少热量、辐射以及相关的安全和设计限制。它也有利于制定和实施乏燃料管理政策和相关技术。尽管有这些潜在好处，但乏燃料延长贮存也可能被视为在继续推迟决定的道路上迈出的第一步，从而使贮存设施成为事实上的处置场所。当没有有关深部地质处置库的可靠规划时，或者如果国家已经对过去关于移除乏燃料的承诺摇摆不定，政府官员便不能轻易反驳这一观点。

导致需要持续贮存的同样因素（即没有明确确定的终点或在实现终点方面出现拖延）也给实现公众接受新乏燃料贮存设施选址和现有乏燃料贮存设施的许可证延长带来挑战。如果没有基于后处理或处置等明确和可信的终点对乏燃料进行积极的管理，则乏燃料的持续贮存很可能被视为不充分或失败政策的结果。如果乏燃料延长贮存被视为是推迟决定或缺少替代

方案导致的不可取但却必要的临时步骤，则乏燃料延长贮存的必要性和利益不太可能被接受。

尽管许多国家都在努力为深部地质处置库选址，但已成功获得更高公众和政治支持度的国家之间有一些共同点。这些经验教训也可以应用于新乏燃料贮存设施的选址和现有设施的许可证再审批。正在成功推进的国家间的一个共同之处是选址过程不是强推或者强加给公众，而是由他们通过既涉及风险又考虑利益的公开对话进行选择（见参考文献[55]）。其他因素包括：

- (a) 负责乏燃料管理的组织以及监管者及早、坦诚和持续地沟通，以解决公众关切和消除不信任。
- (b) 分步实施，使当地公众认识和熟悉风险，并在充分承诺之前既了解利益又开始获得利益。

关注已经接纳核设施的社区。他们最为利益攸关，而且更熟悉核电及其相关风险。世界各地的经验表明，选址工作在这些社区中进展最快。

在对国际处置库发展计划进行广泛审查后，美利坚合众国蓝带委员会“建议选址过程基于同意、透明、分阶段、具有适应性、基于标准和科学并受联邦政府和所在地辖区之间有法律约束力的协议制约”[8]。

8.3. 有组织的控制

与处置库不同，乏燃料贮存按定义将始终处于有组织的控制之下，直至实现可接受终点将。适用的有组织控制包括第 6 部分中讨论的全部监管要求。正如第 6.2 部分所述，基于定期更新的监管框架不需要假设贮存期可以持续多长时间。每次更新都将单独确认在整个许可证审批期内确保安全所需的组织、财政、技术和材料要求得到满足。这有些类似于办理飞机和车辆许可证的方式。它们不会基于年龄而被迫退役，而是只要符合适用要求就可以继续使用。此外，定期许可证再审批过程为有组织的控制随社会需求和价值观的变化而发展以及考虑可能出现的新技术和方案提供了一个机会。

与依靠定期许可证再审批来评价和确认乏燃料贮存将继续满足适用要求相关的一个潜在关切是，如果没有满足要求，不颁发贮存许可证并不会消除风险。如果许可证持有者因任何原因未能令人满意地继续持有许可证，加强执行要求和确保安全的责任最终将落在政府身上。因此，明确界定职责和责任以及相关财务保证的需要变得越来越重要。存在着一些有组织的控制已持续几个世纪的类似社会现象。监狱、教育、保健、艺术、宗教和文化传统已持续许多代。¹¹ 社会关注被视为重要的事情，因此，只要乏燃料被视为一种危害，预计它将一直处于有组织的控制之下。乏燃料在许多个世纪内仍将具有危害性，因此有组织的控制问题在很大程度上变成适当适用伦理和可持续性原则的问题——具体而言是确保这一负担不会传递给子孙后代的问题。关于乏燃料延长贮存，适当考虑有组织的控制在很大程度上是一个确保安全和有效地贮存和处置或后处理乏燃料以及处置任何相关废物所需的财政、人力和技术资源的问题。因此，在延长乏燃料贮存期的许可证再审批过程中，需要定期评价维持这些资源充分性的状况和基础结构。

鉴于这一危害的持久性、未知的贮存期限以及乏燃料管理后续阶段的不确定性，保存记录、知识和记忆尤其有意义。经合组织核能机构发起了一项多学科活动，目的是在制定和实施保存记录、知识和记忆的计划方面加强合作和确定最佳实践。¹² 虽然主要侧重于与地质处置库开发和管理有关的过程，但其中许多原则和汲取的经验教训也可适用于乏燃料延长贮存。

¹¹ 实例包括：成立于 1670 年的哈德逊湾公司（加拿大）；自 1400 年代以来，巴黎地下采石场的持续安全管理（法国）；自 700 年代以来每 20 年重建一次的伊势神宫式年迁宫（日本）。

¹² 见 www.oecd-nea.org/rwm/rkm。

参考文献

- [1] 国际原子能机构,《核燃料循环目标》,国际原子能机构《核能丛书》第 NF-O 号,国际原子能机构,维也纳(2013 年)。
- [2] 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、经合组织核能机构、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)。
- [3] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste: Practices and Potentialities in OECD Countries, OECD, Paris (2006)。
- [4] 国际原子能机构,《国际原子能机构安全术语》(核安全和辐射防护系列)(2007 年版),国际原子能机构,维也纳(2007 年)。
- [5] 国际原子能机构,《2015 年核技术评论》,国际原子能机构,维也纳(2015 年)。
- [6] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Nuclear Sector Roadmaps: Used Fuel and High-Level Waste Management, EPRI, Palo Alto, CA (2013)。
- [7] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Plan for the Long-term Update to the Waste Confidence Rule and Integration with the Extended Storage and Transportation Initiative, Rep. SECY-11-0029, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011)。
- [8] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, USDOE, Washington, DC (2013)。
- [9] CARLSEN, B., et al., “Challenges Associated with Extending Spent Fuel Storage until Reprocessing or Disposal”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 43-60。

- [10] 国际原子能机构,《乏核燃料贮存》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-15 号,国际原子能机构,维也纳(2012年)。
- [11]《2012 年国际核电状况与前景:总干事的报告》,GOV/INF/2012/12-GC(56)/INF/6 号文件,国际原子能机构,维也纳(2012年)。
- [12]《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》,INFCIR/546 号文件,国际原子能机构,维也纳(1997年)。
- [13] 国际原子能机构,《核电厂的老化管理和长期运行计划制定》,国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-48 号,国际原子能机构,维也纳(2018年)。
- [14] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Review of License Renewal Applications for Nuclear Power Plants, Rep. NUREG-1800, Rev.2, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC (2010)。
- [15] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Rep. NUREG-1801, Rev.2, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC (2010)。
- [16] 国际原子能机构,《轻水堆长期运行的电厂寿期管理:原则和导则》,国际原子能机构《技术报告丛书》第 448 号,国际原子能机构,维也纳(2006年)。
- [17] 国际原子能机构,《核电厂长期运行的电厂寿期管理模型》,国际原子能机构《核能丛书》第 NP-T-3.18 号,国际原子能机构,维也纳(2015年)。
- [18] 国际原子能机构,《认识和管理乏燃料贮存设施材料老化》,《技术报告丛书》第 443 号,国际原子能机构,维也纳(2006年)。
- [19] TAKEDA, H., WATARU, M., SHIRAI, K., SAEGUSA, T., Development of the detecting method of helium gas leak from canister, Nucl. Eng. Des. **238** (2008) 1220-1226。

- [20] MATSUMURA, T., SASAHARA, A., NAUCHI, Y., SAEGUSA, T., Development of monitoring technique for the confirmation of spent fuel integrity during storage, Nucl. Eng. Des. **238** (2008) 1260-1263.
- [21] ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Managing Aging Effects on Dry Cask Storage Systems for Extended Long-term Storage and Transportation of Used Fuel, Rev.0, ANL (2012).
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Guide for Evaluation of Materials Used in Extended Service of Interim Spent Nuclear Fuel Dry Storage Systems, ASTM C1562-10 (2018), ASTM, West Conshohocken, PA (2010).
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Practice for Evaluation of the Long-Term Behavior of Materials Used in Engineered Barrier Systems (EBS) for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, ASTM C1174-17, ASTM, West Conshohocken, PA (2017).
- [24] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance, Rep. NUREG-1927, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011).
- [25] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Dry Cask Storage Characterization Project — Phase 1: CASTOR V/21 Cask Opening and Examination, Rep. NUREG/CR-6745, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC (2001).
- [26] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Examination of Spent PWR Fuel Rods after 15 Years in Dry Storage, Rep. NUREG/CR-6831, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC (2003).
- [27] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Dry Cask Storage Characterization Project, Rep. 1002882, EPRI, Palo Alto, CA (2002).
- [28] HANSON, B., et al., Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel, Rev.0 (2012).

- [29] UNITED STATES NUCLEAR WASTE TECHNICAL REVIEW BOARD, Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, NWTRB, Arlington, VA (2010).
- [30] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Materials Aging Issues and Aging Management for Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel, Rep. NUREG/CR-7116, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011).
- [31] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Extended Storage Collaboration Program (ESCP): Progress Report and Review of Gap Analyses, Technical Report 1022914, EPRI, Palo Alto, CA (2011).
- [32] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Extended Storage Collaboration Program: International Subcommittee Report — International Perspectives on Technical Data Gaps Associated with Extended Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, Technical Report 1026481, EPRI, Palo Alto, CA (2012).
- [33] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Identification and Prioritization of the Technical Information Needs Affecting Potential Regulation of Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel, NRC, Washington, DC (2012).
- [34] STOCKMAN, C.T., HANSON, B.D., ALSAED, A.A., “Used nuclear fuel storage and transportation data gap prioritization” , Integrating Storage, Transportation, and Disposal (Proc. 14th Int. High-level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2013), Vol.1, Curran Associates, Red Hook, NY (2013) 503-508.
- [35] BLUE RIBBON COMMISSION ON AMERICA’S NUCLEAR FUTURE, Report to the Secretary of Energy, United States Department of Energy, Washington, DC (2012).
- [36] XIHUA HE, et al., Development and Evaluation of Cask Demonstration Programs (2011).

- [37] NICHOL, M., et al., “Concept plan for a high burn-up fuel storage and transportation confirmatory data project ” , Integrating Storage, Transportation, and Disposal (Proc. 14th Int. High-level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2013), Vol.1, Curran Associates, Red Hook, NY (2013) 94-103。
- [38] WEAVER, D., “ Future licensing strategies for the storage and transportation of spent fuel ” , presentation at the 27th Spent Fuel Management Sem. Arlington, 2012。
- [39] EASTON, E.P., BAJWA, C.S., ZHIAN LI, GORDON, M., “Licensing strategies for the future transportation of high burnup spent nuclear fuel”, presentation at the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Division Conf. Toronto, 2012。
- [40] 国际原子能机构,《乏燃料湿法和干法贮存调查》,国际原子能机构《技术文件》第 1100 号,国际原子能机构,维也纳(1999 年)。
- [41] 国际原子能机构,《便利执行原子能机构保障的设施设计和电厂运作特征》,第 STR-360 号,国际原子能机构,维也纳(2009 年)。
- [42] 国际原子能机构,《核设施设计和建造中的国际保障》,国际原子能机构《核能丛书》第 NP-T-2.8 号,国际原子能机构,维也纳(2013 年)。
- [43] INTERNATIONAL PANEL ON FISSILE MATERIALS, Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World, IPFM (2011)。
- [44] 国际原子能机构,《核装置场址评价》,原子能机构《安全标准丛书》第 NS-R-3 (Rev.1) 号,国际原子能机构,维也纳(2016 年)。
- [45] UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, Commercial Nuclear Waste: Effects of a Termination of the Yucca Mountain Repository Program and Lessons Learned, GAO-11-229, GAO, Washington, DC (2011)。

- [46] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, White Paper on Risk-informed and Performance-based Regulation, SECY-98-144, NRC, Washington, DC (1999)。
- [47] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 10 CFR 63。
- [48] 国际原子能机构,《乏燃料后处理状况和趋势》,国际原子能机构《技术文件》第 1467 号,国际原子能机构,维也纳(2005 年)。
- [49] SON H. KIM, WADA, K., KUROSAWA, A., ROBERTS, M., Nuclear energy response in the EMF27 study, *Clim. Change* **123** (2014) 443-460。
- [50] 国际原子能机构,《放射性废物管理政策和战略》,国际原子能机构《核能丛书》第 NW-G-1.1 号,国际原子能机构,维也纳(2009 年)。
- [51] “Risks and benefits of accelerated fuel transfer examined”, *Nucl. News* **55** (2012) 38-41。
- [52] Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste, *Official Journal of the European Union* No. L 199, Publications Office of the European Union, Luxembourg (2011)。
- [53] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management: An Annotated Glossary of Key Terms, OECD, Paris (2013)。
- [54] SEABORN, B., “Criteria for public support for a waste management concept: The Environmental Assessment Panel’s recommendations”, *Public Confidence in the Management of Radioactive Waste: The Canadian Context (Workshop Proc. Ottawa, 2002)*, OECD, Paris (2003) 71-74。
- [55] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY SECRETARIAT, “International perspective”, *Ibid.*, pp. 31-33。

文献目录

老化管理计划

BENDERESKAYA, O.S., et al., “Corrosion of research reactor Al-clad spent fuel in water, reduced enrichment for research and test reactors” (Proc. Int. Mtg San Carlos de Bariloche, 2002)。

BERNSTEIN, R., GILLEN K.T., Fluorosilicone and Silicone O-ring Aging Study, Sandia Report SAND2007-6781, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2007)。

BILLINGTON, D.S., CRAWFORD, J.H., Radiation Damage in Solids, Princeton University Press, Princeton, NJ (1961)。

BOLTON, G., “Innovative technologies for condition monitoring of waste containers”, paper presented at Nuclear Interim Storage 2011, London, 2011。

CALVERT CLIFFS NUCLEAR POWER PLANT, Calvert Cliffs Independent Spent Fuel Storage Installation Lead and Supplemental Canister Inspection Report, CCNPP (2012)。

电力研究所（加利福尼亚州帕洛阿尔托）

Class I Structures License Renewal Industry Report, Rev. 1, TR-103842 (1994)。
Technical Basis for Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, Rep. 1003416 (2002)。

Effects of Marine Environments on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels, Rep. 1011820 (2005)。

Climatic Corrosion Considerations for Independent Spent Fuel Storage Installations in Marine Environments, Rep. 1013524 (2006)。

ERHARD, A., VÖLZKE, H., WOLFF, D., “Ageing management”, paper presented at IAEA Tech. Mtg on Very Long Term Storage of Used Nuclear Fuel, Vienna, 2011。

核废物管理委员会（波恩）

ESK Recommendations for Guides to the Performance of Periodic Safety Reviews for Interim Storage Facilities for Spent Fuel and Heat-generating Radioactive Waste (PSÜ-ZL) (2010)。

Recommendation of the Nuclear Waste Management Commission (ESK): Guidelines for Dry Cask Storage of Spent Fuel and Heat-generating Waste (2013)。

GILBERT, E., et al., Advances in technology for storing light water reactor spent fuel, Nucl. Technol. 89 (1990) 141-161。

HOFFMAN, E.N., SKIDMORE, T.E., DAUGHERTY, W.L., DUNN, K.A., Long Term Aging and Surveillance of 9975 Package Components, SRNL-STI-2009-00733, Savannah River National Laboratory, Aiken, SC (2009)。

国际原子能机构（维也纳）

《水堆乏燃料在水池中的贮存：世界经验调查》，《技术报告丛书》第 218 号（1982 年）。

《加深燃耗对核燃料循环的影响》，国际原子能机构《技术文件》第 699 号（1993 年）。

《乏燃料性能评定和研究》，国际原子能机构《技术文件》第 1343 号（2003 年）。

《乏燃料长期贮存中的屏蔽容器设计和容器装载优化战略》，国际原子能机构《技术文件》第 1523 号（2006 年）。

JOHNSON, A.B., Jr., BURKE, S.P., K Basin Corrosion Program Report, Rep. WHC-EP-0877, Westinghouse Hanford, Richland, WA (1995)。

KESSLER, J., “Used fuel extended storage: What the US industry wants from DOE”, paper presented at the NEI Used Fuel Management Conf. Baltimore, 2011。

KOIZUMI, S., SHIRAI, K., “Demonstration program of long-term storage (FY2004 - 2008): SCC of MPC under the condition of sea salt deposition”, presentation to the Nuclear Regulatory Commission, 2004。

KOJIMA, S., “The new approach to regulating long-term storage of spent fuel”, paper presented at the NRC Regulatory Information Conf. 2011。

KOWALEWSKY, H., et al., “Safety assessment of leak tightness criteria for radioactive materials transport packages” (Proc. 12th Int. Conf. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 1998)。

KUMAR MEHTA, P., Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ (1986)。

KUSTAS, F.M., et al., Investigation of the Condition of Spent Fuel Pool Components, Rep. PNL-3513, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA (1981)。

核管理委员会（华盛顿哥伦比亚特区）

Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities, NUREG-1567 (2000)。

Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Nuclear Fuel, NUREG-1617 (2000)。

Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility: Final Report, NUREG-1536, Revision 1 (2010)。

PALMQUIST, C.A., 105-C Reactor Interim Safe Storage Project Final Report, Rep. BHI-01231, Bechtel Hanford, Richland, WA (1998)。

PESCATORE, C., COWGILL, M., Temperature Limit Determination for the Inert Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, EPRI TR-103949, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (1994)。

PROBST, U., et al., Investigation of seal effects according to axial compression variation of metal seals for transport and storage casks, Packag. Transp. Storage Secur. Radioact. Mater. 19 (2008) 47-52。

SASSOULAS, et al., Ageing of metallic gaskets for spent fuel casks: Century-long life forecast from 25 000-h-long experiments, Nucl. Eng. Des. **236** (2006) 2411-2417。

SELWYN, H., FINLAY, R., BULL, P., IRWIN, A., “Storage, inspection and sip testing of spent nuclear fuel from the HIFAR materials test reactor” , ENS RRFM 2002 (Trans. Int. Top. Mtg on Research Reactor Fuel Management, Ghent), European Nuclear Society, Berne (2002) 114-118。

SHIRAI, K., WATARU, M., SAEGUSA, T., ITO, C., “Long-term containment performance test of metal cask” (Proc. 13th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2011)。

SKIDMORE, E., Performance Evaluation of O-ring Seals in the SAFKEG 3940A Package in KAMS (U), Rep. WSRC-TR-2003-00198, Rev. 0, Savannah River Technology Center, Aiken, SC (2003)。

STEELE, L.E., et al., “Neutron irradiation embrittlement of several higher strength steels”, *Effects of Radiation on Structural Materials* (Proc. Symp. ASTM STP-426, Atlantic City, 1966), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1967) 346-368.

VIVEKANAND KAIN, AGARWAL, K., DE, P.K., SEETHARAMAIIH, P., Environmental degradation of materials during wet storage of spent nuclear fuels, *J. Mater. Eng. Perfor.* **9** (2000) 317-323.

VÖLZKE, H., PROBST, U., WOLFF, D., NAGELSCHMIDT, S., SCHULZ, S., “Investigations on the long-term behavior of metal seals for spent fuel storage casks” (Proc. 52nd INMM Annual Mtg, 2011).

— “Seal and closure performance in long term storage” (Proc. PSAM11 & ESREL 2012, Helsinki, 2012).

VON DER EHE, K., JAUNICH, M., WOLFF, D., BÖHNING, M., GOERING, H., “Radiation induced structural changes of (U)HMW polyethylene with regard to its application for radiation shielding” (Proc. PATRAM 2010: 16th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, London, 2010).

WATARU, M., SHIRAI, K., SAEGUSA, T., ITO, C., “Long-term containment test using two full-scale lid models of DPC with metal gaskets for interim storage”, paper presented at 3rd East Asia Forum on Radwaste Management: 2010EAFORM, 2010.

WOLFF, D., VON DER EHE, K., JAUNICH, M., BÖHNING, M., “Performance of neutron radiation shielding material (U)HMW-PE influenced by gamma radiation” (Proc. PSAM11 & ESREL 2012, Helsinki, 2012).

未来乏燃料贮存系统的设计和选址

BLUE RIBBON COMMISSION ON AMERICA’S NUCLEAR FUTURE, Transportation and Storage Subcommittee Report to the Full Commission: Updated Report, BRC, Washington, DC (2012).

CODÉE, H., “Long-term storage in the Netherlands”, paper presented at IAEA Tech. Mtg on Very Long Term Storage of Used Nuclear Fuel, IAEA, Vienna, 2011.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Industry Spent Fuel Storage Handbook, Rep. 1021048, EPRI, Palo Alto, CA (2010).

REACTOR SAFETY COMMISSION RSK, Recommendation of the Reactor Safety Commission (RSK): Safety Guidelines for Dry Interim Storage of Irradiated Fuel Assemblies in Storage Casks, RSK, Bonn (2001)。

WASINGER, K., HUMMELSHEIM, K., GMAL, B., SPANN, H., FABER, W., “Present status and trends of spent fuel management in Germany”, paper presented at IAEA Tech. Working Group on Nuclear Fuel Cycle Options Mtg, Vienna, 2007。

乏燃料贮存配置

国际原子能机构，《破损乏核燃料管理》，国际原子能机构《核能丛书》第 NF-T-3.6 号，国际原子能机构，维也纳（2009 年）。

KESSLER, J., WALDROP, K., “Extended used fuel storage: EPRI perspective and collaboration initiatives”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 63-82。

LEVIN, A., “Technical and regulatory paths forward for accelerating implementation of the Blue Ribbon Commission recommendations”, paper presented at American Nuclear Society Summer Mtg, Chicago, 2012。

NICHOL, M., “Operational challenges of extended dry storage of spent nuclear fuel” (Proc. WM2012 Conf. Phoenix, 2012)。

监管考虑因素

国际原子能机构，《乏核燃料贮存成本核算》，国际原子能机构《核能丛书》第 NF-T-3.5 号，国际原子能机构，维也纳（2009 年）。

ROJAS DE DIEGO, J., Economics of spent-fuel storage: A description of the methodology developed by IAEA for analysing costs, Int. At. Energy Agency Bull. 3 (1990) 34-38。

政策考虑因素

APARICIO, L. (Ed.), Making Nuclear Waste Governable: Deep Underground Disposal and the Challenge of Reversibility, Andra, Chatenay-Malabry (2010)。

国际原子能机构，《放射性废物的长期贮存：安全和可持续性》，国际原子能机构，维也纳（2003 年）。

LATOURRETTE, T., LIGHT, T., KNOPMAN, D., BARTIS, J.T., Managing Spent Nuclear Fuel: Strategy Alternatives and Policy Implications, RAND Corporation, Santa Monica, CA (2010)。

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, Disposition of High-level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, National Academy Press, Washington, DC (2001)。

经合组织核能机构（巴黎）

Geological Disposal of Radioactive Waste: Review of the Development in the Last Decade (1999)。

Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management: Experience, Issues and Guiding Principles (2004)。

其他主要考虑因素

国际原子能机构（维也纳）

《地区乏燃料贮存设施的技术、经济和体制问题》，国际原子能机构《技术文件》第 1482 号（2005 年）。

《核工业组织中知识流失的风险管理》（2006 年）。

《在核能系统评定中应用革新型核反应堆和燃料循环国际项目方法学的介绍》，国际原子能机构《核能丛书》第 NP-T-1.12 号（2010 年）。

《核知识保存方法和工具比较分析》，国际原子能机构《核能丛书》第 NG-T-6.7 号（2011 年）。

IZURU, H., “使用贮存/运输两用干式金属屏蔽容器的贮存设施贮存和运输之间出现的接口问题”，核动力堆乏燃料管理（《国际会议文集》，维也纳，2010 年），国际原子能机构，维也纳（2015 年）只读光盘。

NATIONAL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AGENCY, 2009 Sustainable Development Report, Andra, Chatenay-Malabry (2010)。

PESCATORE, C., “Preserving records, knowledge and memory over decades and more, lessons from the NEA RK&M Project”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 285-297。

VERHEUL, I., Networking for Digital Preservation: Current Practice in 15 National Libraries, K.G. Saur, Munich (2006)。

缩 略 语

DCSS	干法容器贮存系统
HLW	高放废物
OECD	经济合作与发展组织
SFA	乏燃料组件
SFM	乏燃料管理
SFS	乏燃料贮存
SSCs	结构、系统和部件

参与起草和审订的人员名单

A. Bevilacqua	国际原子能机构
B. Carlsen	爱达荷国家实验室（美利坚合众国）
M. Chiguer	阿雷瓦核电集团公司（法国）
A. González-Espartero	国际原子能机构
P. Grahn	核燃料和废物管理公司（瑞典）
T. Saegusa	中央电力工业研究所（日本）
M. Sampson	美国核管理委员会（美利坚合众国）
I. Seelev	国家原子能公司（俄罗斯联邦）
K. Wasinger	阿雷瓦核电集团公司（德国）
M. Waters	美国核管理委员会（美利坚合众国）
D. Wolff	联邦材料研究与试验研究所（德国）

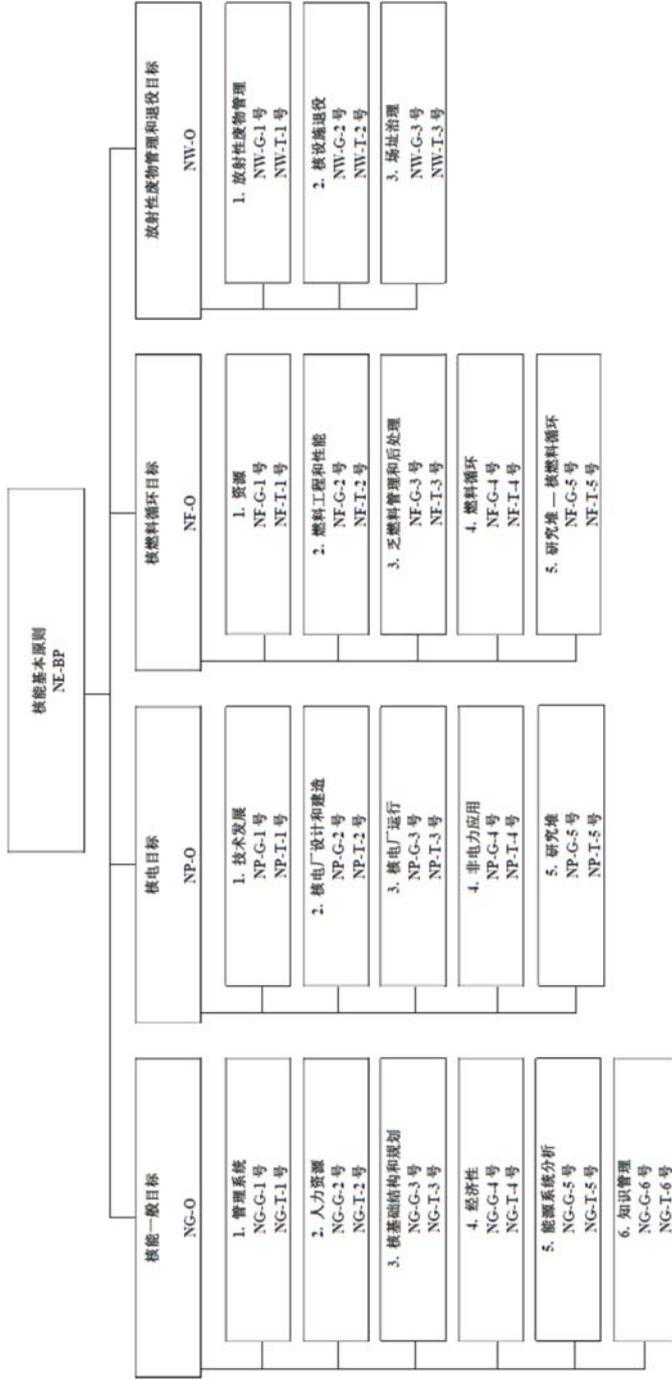
技术会议

奥地利维也纳：2011年4月26—28日、2012年10月22—24日

顾问会议

奥地利维也纳：2010年10月11—13日、2011年4月26—29日、
2012年7月16—19日、2012年10月22—25日、2013年5月27—29日

原子能机构《核能丛书》的结构



略语表

BP: 基本原则
O: 目标
G: 导则
T: 技术报告
I-6: 专题名称
号: 导则或报告编号 (1、2、3、4等)

举例

NG-G-3.1号: 核能总则 (NG)、导则、核基础结构和规划 (专题3)、1号
NP-I-5.4号: 核电 (NP)、报告 (T)、研究堆 (专题5)、4号
NF-T-3.6号: 核燃料 (NF)、报告 (T)、乏燃料管理和后处理 (专题3)、6号
NW-G-1.1号: 放射性废物管理和退役 (NW)、导则、放射性废物 (专题1)、1号

当地订购

国际原子能机构的定价出版物可从下列来源或当地主要书商处购买。
未定价出版物应直接向国际原子能机构发订单。联系方式见本列表末尾。

北美

Bernan / Rowman & Littlefield

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, USA
电话: +1 800 462 6420 • 传真: +1 800 338 4550
电子信箱: orders@rowman.com • 网址: www.rowman.com/bernan

世界其他地区

请联系您当地的首选供应商或我们的主要经销商:

Eurospan Group

Gray's Inn House
127 Clerkenwell Road
London EC1R 5DB
United Kingdom

交易订单和查询:

电话: +44 (0) 176 760 4972 • 传真: +44 (0) 176 760 1640
电子信箱: eurospan@turpin-distribution.com

单个订单:

www.eurospanbookstore.com/iaea

欲了解更多信息:

电话: +44 (0) 207 240 0856 • 传真: +44 (0) 207 379 0609
电子信箱: info@eurospangroup.com • 网址: www.eurospangroup.com

定价和未定价出版物的订单均可直接发送至:

Marketing and Sales Unit
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria
电话: +43 1 2600 22529 或 22530 • 传真: +43 1 26007 22529
电子信箱: sales.publications@iaea.org • 网址: <https://www.iaea.org/zh/chu-ban-wu>

