

核设施安全委员会技术见解报告

No.15

核燃料循环设施老化管理

阙 骥 译

曹芳芳、刘新华 校

环境保护部核与辐射安全中心

2018年10月

此译文的出版是由经合组织安排的。其不是经合组织的官方翻译。译文的质量及其与原文的一致性由译者负责。如果译文与原文存在任何差异，仅以原文为准。

本报告最初由经济合作与发展组织以英文发布，题为：OECD (2012), Ageing Management of Nuclear Fuel Cycle Facilities, CSNI Technical Opinion Papers, No. 15, NEA No. 6990, <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2012/csni-r2012-7.pdf>

© 2018 核与辐射安全中心拥有此中文版版权。

经济合作与发展组织

经济合作与发展组织是一个独特的论坛，34 个国家的政府在这里共同努力解决全球化带来的经济、社会和环境挑战。经济合作与发展组织也致力于理解和帮助政府应对新的发展和关注的问题，诸如公司治理、信息经济和人口老龄化面临的挑战。该组织提供了一个环境，使各国政府能够比较政策经验、寻求共同问题的解答，识别良好实践，并协调国内和国际政策。

经济合作与发展组织成员国有：澳大利亚、奥地利，比利时、加拿大、智利、捷克共和国、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、以色列、意大利、日本、卢森堡、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、韩国、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。欧盟委员会参与经济合作与发展组织的工作。

经济合作与发展组织出版物广泛传播该组织在经济、社会和环境领域的统计调查与研究成果，以及成员国商定的公约、指导方针和标准。

本项工作根据经济合作组织秘书处职责发布。

核能署

经济合作与发展组织核能署成立于 1958 年 2 月 1 日。目前，核能署成员国有 30 个经济合作与发展组织成员国：澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、捷克、共和国、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、日本、卢森堡、墨西哥、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、韩国、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。欧盟委员会也参与核能署的工作。

核能署的任务是：

-通过国际合作，协助成员国保持并进一步发展科学技术和法律基础，安全、环境友好且经济的和平利用核能；

-提供权威的评估，并在关键问题上达成共识，作为政府核能政策方面决策以及经合组织在能源和可持续发展等领域进行更广泛的政策分析的基础。

核能署的具体业务领域包括核活动的安全与监管、放射性废物管理、辐射防护、核科学、核燃料循环的经济和技术分析、核法律和责任、以及公共信息。

核能署数据库为参与国家提供核数据和计算机程序服务。在这些及其相关工作中，核能署与国际原子能机构以及核领域的其他国际组织密切合作。对此，核能署与国际原子能机构已经签署了合作协议。

本报告也有法文版可用，标题为：

Avis techniques du CSIN n° 15 – Gestion du vieillissement des installations du cycle du combustible nucléaire

本报告及其所载的任何地图对任何领土的地位或主权，国际边界和边界的划界，以及任何领土、城市或地区的名称不存在偏见。

序 言

经济合作与发展组织核能署核燃料循环安全工作组的目标是提高成员国监管机构 and 营运单位对核燃料循环安全相关方面的认识。

同其他核设施一样，核燃料循环设施的老化管理，即考虑随时间和使用所发生的变化，确保整个寿期内安全功能的可用性。这就要求对导致安全重要构筑物、系统和部件性能降级的物理老化和过时都要处理。所谓过时，即这些安全重要构筑物、系统和部件对于当前的知识、标准、法规和技术过时了（这有可能导致备用设备缺乏）。

2009年10月5日-7日，核能署核燃料循环安全工作组举办了一次核燃料循环设施老化管理研讨会。此次研讨会共有来自8个国家的40名与会者参加了为期两天半的交流和讨论。在研讨会总结期间，与会者向核燃料循环安全工作组指出需要继续开展核燃料循环老化管理工作，并且准备一份专门的技术见解报告。

致 谢

此技术见解是由一个编写小组完成的。Pierre Nocture（法国阿海珐）是主要作者，核能署向他表示特别感谢。协助人员有法国辐射防护与核安全研究所的Jean Paul Daubard、Veronique Lhomme 和 Dominique Martineau。

此外，Neil Blundell（英国核监管办公室）、Dorothee Conte（法国核安全局）、Martin Dobson（英国塞拉菲尔德有限公司）、Bernhard Gmal（德国核设备与反应堆安全协会）、Thomas Hiltz（美国核管理委员会）和 Yoshinori Ueda（日本核能安全组织）为本文的各个章节提供了有价值的输入，并对最终的编辑工作做出了重要贡献。

目 录

执行摘要.....	9
1. 引言.....	11
1.1. 安全与老化.....	11
1.2. 燃料循环特征.....	11
1.3. 概念.....	12
1.4. 监管方法.....	12
2. 定义和实例.....	16
2.1. 老化管理.....	16
2.2. 技术老化：磨损和过时.....	16
2.3. 非技术老化.....	17
3. 寿期内的老化考虑.....	19
3.1. 简介.....	19
3.2. 老化管理程序.....	19
3.3. 老化管理的技术挑战.....	19
3.4. 非技术挑战.....	23
4. 物理老化-良好实践实例.....	26
5. 物理老化-案例研究.....	28
5.1. 机械循环或震动引起的应力疲劳.....	28
5.2. 卡尔斯鲁尔 WAK 后处理中试厂气态流出物管线硝酸铵形成.....	28
5.3. 西门子哈瑙铀燃料元件制造厂废料回收排气淋洗器爆炸.....	29
6. 过时管理-良好实践实例.....	30
7. 安全重要构筑物、系统和部件过时-案例研究.....	31
7.1. 临界仪表控制系统-东海临界事故报警系统.....	31
7.2. 仪表控制系统老化管理-阿海珐 NC 后处理厂案例.....	31
8. 结论.....	33
参考文献.....	34
缩写词.....	34

执行摘要

老化管理的目的是，采用一种系统性的方法处理所有随时间变化的且可能危及核燃料循环设施安全的参数。这是一个积极主动的过程，从设施设计就开始实施，直到退役拆解，以便确保采取了适当的措施应对安全重要构筑物、系统和部件的磨损机制，与当前标准相比已过时，以及诸如知识管理之类的非技术性挑战。这对设施寿期终了时决定是延寿、翻新、还是关闭和退役来说，非常关键。

除了所有核设施共同的老化管理方面之外，核燃料循环设施的老化管理需要应对一些特殊的情况，如核与化学危害并存，设计的独特性，运行寿期内设备、工艺、设施和操作的许多变化或增补等。非技术问题的老化管理强弱程度视设施的规模，以及设施运行末期所需要面临的知识问题和遗留情况而定。

核燃料循环设施具有不同物理和化学形式的放射性物质和化学物质，这些物质分散在相互连接的容器和设备内。危害因设施而异（如临界和/或化学危害），但都普遍涉及有害物质向其包容之外的释放。在本文的框架中，这意味着深入评估可能影响安全重要构筑物、系统和部件的技术老化机理需要特别关注物理损伤，即第一道屏障的腐蚀和磨损，以及第一道屏障内的堵塞和沉淀。

通过检验策略和行动能否应对包括工艺恶化在内的物理老化，确定出一系列良好实践，能够减轻核燃料循环设施老化管理。工艺恶化对于经常使用化学工艺的核燃料循环设施是特别重要的，因为其安全依赖于工艺能否按设计（和运行许可申请时所评估的）进行。

设计是核燃料循环设施老化管理的一个基本阶段。其作用是预测和降低安全重要构筑物、系统和部件变化的后果，特别是物理老化机制引起的。在任何情况下，考虑到这些老化机制，应严格采用纵深防御概念。与安全重要构筑物、系统和部件的服役条件和性能相关的要求应该确定。必须在设计阶段准备老化管理策略，保证安全重要构筑物、系统和部件的性能要求得以维持。

运行期间，应该记录安全重要构筑物、系统和部件所遭遇的条件，并将这些条件作为确定定期测试和维修以及适时的安全重要构筑物、系统和部件老化效应探测和缓解策略的输入。作为运行期间老化管理策略一部分的一些组织机构规定（如数据库、从员工中收集信息的文件）应该特别关注微小的事件，特别是反复

发生的。这些微小事件发生时看起来微不足道，但之后可能非常重要（如微泄漏和沾污、小的修改）。

核燃料循环设施运行阶段末期，应该采取适当地安排，确保安全重要构筑物、系统和部件仍然可用并能够实现退役和拆解操作，特别是与员工辐射防护有关的安全重要构筑物、系统和部件。

老化管理的设计和协作应该特别关注知识管理，即，替换和培训，老化相关的文档管理和运行经验反馈。这些各种部件需要在核燃料循环设施整个寿期内实施，特别关注那些需要先前运行阶段获取的运行记录和知识的退役和拆解操作的预期要求。

过时的管理也需要一个良好实践标杆支持。在此标杆中，依据过时的性质、可能导致安全重要构筑物、系统和部件维修问题的影响技术的改变（包含硬件和软件），当前标准和规章的改变，或者文件的过时等，确定和划分推荐的行动。对于设计成长期运行且不会因其关闭而实现安全状态的核燃料循环设施（如，高放废液贮存设施）来说，过时的管理是特别重要的。作为一个案例研究，本文提供了一些仪表和控制老化管理实例。

1. 引言

1.1. 安全与老化

核设施安全基于有限量的原理和概念。

为了预防和缓解事故,通过对相关安全活动使用多重防护,无论是组织上的、行为上的和设备相关的防护,贯彻了纵深防御的概念。贯穿设施设计和运行阶段,纵深防御对预期运行事件和事故工况,包括由设备失效或人误引起的,提供了多重防护。实施纵深防御,需要识别安全重要构筑物、系统和部件。专门设计和运行这些屏障是为了预防始发事件的发生,并在预防失效后缓解事故后果。

因此,老化管理的一个重要的问题是维持安全重要构筑物、系统和部件对设施安全所必须的能力。本文与“老化管理技术挑战”相关章节中进一步阐述了这一点。

非技术方面也可能因老化而受损,因此在整个设施寿期内,必须得到有效的实施和维持。用涉及组织机构、包含人力资源在内的资源管理、知识管理和培训、安全文化、质保、文件管理、以及所有可能受老化影响而需要定期核实的问题等方面的“安全管理”概念,重新对这些“软”的方面进行分组。本文将在老化管理“非技术”挑战相关章节中进一步阐述这一点。

1.2. 燃料循环特征

同其他核设施一样,核燃料循环设施的老化管理旨在整个寿期内维持设施具有高度的可运行性和安全水平。因此,老化管理是实现安全的一个基本资产,通常与生产和成本系统地协调在一起。老化管理是一个过程,有助于确保从设计到拆除的整个寿期内的设施安全。这对与整修或停工/退役决定有关的设施延寿特别重要。有效的老化管理程序,对降低正在老化设施的危害和风险有积极的影响;对新设施来说,某种程度上,也有利于适当地预测退役步骤和相应地减少废物产生量。

与其他核设施,如核动力厂相比,核燃料循环设施涵盖一个范围非常广的核设施,包括铀转化、富集、铀和铀钚混合氧化物燃料元件制造、乏燃料贮存、六氟化铀逆转化、乏燃料后处理及其相关的废物和流出物管理设施(如,高放废液

玻璃固化）、研发设施等。由于设施种类多样，老化管理政策和程序的贯彻实施将会依照其特定的核和化学危害潜在后果进行调整（由于设计的独特性）。

某个设施的变化（如工艺修改）可能影响到燃料循环其他方面和其他核燃料循环设施（可能位于其他厂址）的安全。因此，应该考虑进行老化审查。

本文的目的是，分享核燃料循环设施老化管理方面的良好实践。这些良好实践源自核燃料循环设施营运单位、监管机构及其技术支持部门之间的国际合作，考虑了运行和监管经验反馈。本文提供与老化管理有关的定义、建议和良好实践。还开发了一些案例研究，用来说明讨论。

1.3. 概念

如同其他设施，核燃料循环设施经历两类技术老化：

1. 安全重要构筑物、系统和部件的物理老化，其导致性能降低，即：安全重要构筑物、系统和部件的物理特性逐渐退化。
2. 安全重要构筑物、系统和部件的陈旧，即：与当前的知识、标准和技术相比，过时了（这可能导致备用设备缺乏）。

核燃料循环设施的安全重要构筑物、系统和部件的物理老化和陈旧的影响评估是一个持续的过程。其将在定期安全评价或类似的系统性安全再评估程序中定期的进行。

核燃料循环设施的特点通常是运行模式或工艺方面有很多改变。这些运行模式或工艺高度依赖于经常从事涉及有害物质工作的员工。因此，需要考虑非技术方面的老化（如知识管理、文件管理）。

1.4. 监管方法

考虑到上述安全重要构筑物、系统和部件的物理老化和陈旧，定期安全审查评估任何与工艺、设备、运行规程、组织机构、运行经验或技术发展相关设施修改的累积效应。

1.4.1. 法国和日本¹：每 10 年一次定期安全审查

定期安全审查期间，营运单位必须对安全重要构筑物、系统和部件实施一系列恰当的验证、测试和控制，特别是对那些受老化影响的安全重要构筑物、系统

¹ 在日本，第一次定期审查是在运行后的 20 年，之后的定期审查每 10 年一次。

和部件（“符合性检查”）。

在定期安全审查框架中，老化管理的目的是确定是否需要改进。使用一个严密的结构化方法分析老化预防措施（设计、建造、运行、监测和维修）的充分性，以确定可能的变化和解决方法。

应该使用定期安全审查中老化管理审查结论，以便：

- 确定核燃料循环设施或者特定的安全重要构筑物、系统和部件是否能够在未来特定期限内（例如，当前安全审查到下一次审查期间）安全运行，是否需要必要的安全改进；

- 为周期测试、控制和维修程序改进、更新安全分析、运行条件或设计修改提供输入。

1.4.2. 英国监管制度和老化管理

不同于其他国家的监管制度，英国的核设施监管实施一种目标设置制度，即要求核设施营运单位满足一系列安全目标，但允许其利用自己的方法（过程）和设备来实现这些目标。

营运单位必须向监管单位证明这些方法和设备满足了这些要求，其已经采取了所有合理可行的措施确保工作人员和公众的安全。

只有当营运单位证明他们已经做到这一点时，才被允许运行。

在英国，这些主要通过颁发许可证和后续的重大变更所要求的附加许可来实现。

其中有重要意义的是许可证条件 15，其要求持证者进行一个周期性系统性审查，并对其安全实例进行再评估。英国卫生与安全管理局期望，这一审查应依据当前最新标准，且周期不超过 10 年。

具体的审查周期通过卫生与安全管理局与持证者根据设施的特定情况单独约定。这种约定还可以包括监管机构和持证者之间如何沟通的协议。

接近寿期末的设施，审查的周期可能更短。对于因安全要求，设施不能够关闭的情况，设施可能有一个连续的审查。

这些协议确保设施是依据审查当下的安全和可靠性标准以及技术进行判断的。其旨在确保识别出设施、人员和工艺的实际状态和当前标准之间的差异和不

足。其确保持证者制定了一个计划，来解决这些差异，并在监管机构允许后执行这一计划。

有针对性的评估通过书面安全实例和相关的定期安全审查来实施。同时也定期进行相应的一致性检查。

一致性检查确认：

- 持证者采用了其安全实例中规定的系统和工艺；
- 改进措施正在依照监管机构批准的程序实施；
- 设施和人员正在按预期退化或改善。退化，即安全实例预期的磨损，或人力减少，或所允许的。改善，即定期安全审查寻求的额外合理可行的升级。

无论检查还是评估表明持证者没有满足预期，那么将引入一个渐进实施系统。从发布建议或简单信件到完全实施是一个渐进过程。执行行动的性质取决于预期与交货之间的差距，以及同一区域先前执行的程度。

因此，老化管理是英国定期安全审查过程不可或缺的一部分。

1.4.3. 美国：连续监管方法

核管理委员会提供了一个持续的评估和审查过程，确保设施寿期内的公众健康和安。通过持续的核管理委员会监管过程、许可证基础的监督、许可证的更新、持证者所作的相对于规章超前的行动来维持和提高设施的安全。

核管理委员会实施许多监管活动。这些活动共同构成了一个过程，此过程提供了一个连续的保障，确保核燃料循环设施许可依据提供了一个可接受的安全水平，并且老化影响得到了恰当的管理。这一过程包括检查（定期安全检查以及驻地检查员对某些设施的日常监督）、审计、调查、运行经验评估、监管研究、以及解决已发现问题的监管行动。通过颁布新法规或修订法规，接受持证者修改设施设计和程序的承诺，以及颁布命令或确认行动信件，核管理委员会的活动可能引起设施许可依据的变化。当有新的安全信息可用时，核管理委员会和持证者将考虑这些信息。该机构还通过通用通信文件发布运行经验分析、研究或其他适当分析的结果。对于接受一个新的超过最初运行的许可的设施，这一过程将继续下去。

在 2000 年，核管理委员会要求某些核燃料循环设施实施一个综合安全分析。通过要求核燃料循环设施完成一个广泛且综合的分析，核管理委员会通过一个风

险导向和基于业绩的监管方法，寻求提高安全。此方法包括：（1）识别事故预防及其后果缓解的性能要求；（2）综合安全分析识别潜在设施和安全依赖项的性能；（3）执行确保安全依赖项在需要时可用和可靠的措施；（4）安全基础的维持，包括向核管理委员会报告；（5）持证者进行的事先没有取得核管理委员会批准的更改其安全程序和设施的默认。

综合安全分析是一种系统性的分析，旨在识别设施内外部的危害及其引起事故序列的可能性，潜在事故序列及其可能性和后果，以及安全依赖项。“综合”一词，即联合考虑并预防所有内外部相关危害（火灾、临界、跌落、爆炸、洪水、地震……），特别是涉及放射性或化学物质的。

持证者被要求执行“管理措施”。管理措施是持证者实施一些功能，通常是持续实施，这些功能用于安全依赖项，确保这些物项在需要时可用和可靠。管理措施包括配置管理、维修、培训和资质管理、程序、审计和评估、事件调查、记录管理、以及其他质量保证要素。

综合安全分析是一个活动的文件，需要定期更新和审查，以反映新的信息，或设施工艺的变化。例如，系统和部件的老化和恶化在事件频率的定期审查中考虑，这可能需要加强现场程序或“管理措施”。

此外，当前的检查和监督程序收集持证者表现方面的信息，评估这些信息对安全的重要性，并提供适当的持证者和核管理委员会的响应，包括矫正和执法行动。核管理委员会正在考虑一个修订和强化的核燃料循环监管程序。核管理委员会的工作人员认识到核燃料循环工业已经成熟，正在识别和纠正自己的问题。这一认识至关重要，使核管理委员会能够将其检查资源用于安全或安保性能下降的燃料循环设施。若此程序获得批准，则将建立一个更加风险指引、基于性能的监管程序，将提供更加客观、可预测、可重复并透明的持证者表现的评估。

如许多国家一样，美国核燃料循环设施持证者对其设施安全负责。这一职责嵌入进其许可证和和监管委员会监管基础之中。在监管保护之下，持证者定期评估新技术、非正常工况、运行经验、以及行业趋势，对其设施的安全和工艺改进作出明智的决定。

2. 定义和实例

2.1. 老化管理

老化管理是指保证在寿期内设施的安全水平不会随时间而变化。

这要求通过控制安全重要构筑物、系统和部件的技术老化，以及解决非技术的人因和组织机构方面的老化，来维持安全功能。

2.2. 技术老化：磨损和过时

下表提供给了一个技术老化机制清单。

设备初始设计应该考虑清单中的物理老化机制，并贯彻到设备或运行程序中，以预防和缓解泄漏或沉淀；设计应该裕量，避免或限制机械退化；设计应允许备件替换或减轻的备件的使用。

表 1 技术老化和过时：实例

技术老化	
物理老化主要机制	实例
工艺恶化	
堵塞	管线和运输系统（蒸汽喷嘴）堵塞
沉淀	容器、管线和工艺设备中的沉淀
机械部件	
腐蚀（化学、热点）、应力腐蚀	容器、管线、焊缝的腐蚀
辐照	有机部件的辐照(包容的密封件)
机械循环或震动引起的应力疲劳	容器、管线、焊接处的疲劳
磨蚀	漏斗、滑道的磨蚀
微生物引起的腐蚀	供水系统、热交换柴油机腐蚀
机械磨损、微动磨损	转动系统的微动磨损
缠绕、磨损	泵和阀门内部件的缠绕、磨损
电器仪表和控制部件	
绝缘退化	电缆、马达线圈、变压器退化
部分放电	电池放电

氧化	继电器和断路器触电、润滑、绝缘材料的氧化
土木工程	
混凝土老化（化学侵蚀、碳化、建造质量缺陷和嵌入的钢筋的腐蚀的影响）	混凝土结构老化、运行中高温引起的蠕变、湿气腐蚀、化学腐蚀
缩水和蠕变	结构强度的过度置换和减少
融冻过程引起的物质损失（收缩、破裂和层裂）	混凝土成分的损失
其他	
中子吸收体	储存容器、储存井中中子吸收体的退化
过时的主要机制	实例
含有计算机硬件的设备	备件缺乏，如仪表与控制系统影响职业照射（特别是维修期间）的旧设计，例如手套箱的设计
软件	软件维修和修改供应的丧失，如编程语言的过时。
当前监管的偏离	监管改变，例如消防、设计基准地震标准的变更
工艺	相比新近工艺较老的工艺，如干法转化和湿法转化、离心和扩散

2.3. 非技术老化

下表列出了整个设施寿期内应该考虑和解决的非技术老化。

表 2 非技术老化：实例

非技术老化	
安全管理	
知识管理：记录	老化管理相关的数据收集和记录保留上的缺陷； 如果不适当的获取和更新导致的知识丧失，例如工程图、安全辩护、运行经验反馈……

知识管理：人员候补和培训……	运行专门知识的丧失，例如产业重组或员工退休相关的
领导和组织机构	老化管理组织机构的缺陷 安全和质量系统与监督之间整合的缺乏，例如因通讯的缺乏、薄弱的安全文化引起的运行安全的缺陷（学习过程）

3. 寿期内的老化考虑

3.1. 简介

核燃料循环设施老化管理包括确保设施寿期内安全所采取的所有措施和规定。这一目标要求适当的措施或规定：

- 考虑所有的技术老化机制，即物理老化和过时。
- 处理非技术挑战。

鉴于核燃料循环设施差异巨大，基于安全分析识别出安全重要构筑物、系统和部件。这些安全重要构筑物、系统和部件包括所有专门用于防止始发事件的发生，探测并缓解事件或事故对工作人员、公众和环境造成的辐射或化学后果的设备。

在整个寿期阶段，即设计、制造和施工、调试、运行（包括维修或修改）、退役和拆卸，应当主动实施安全重要构筑物、系统和部件的老化管理。

这通常通过一个专门的“老化管理程序”来实现。此程序根据安全论证和安全分析的重要部分，识别和论证需求和措施。

3.2. 老化管理程序

老化管理程序从设计阶段开始，安全重要构筑物、系统和部件及其所需条件和性能也同时被识别出。“老化管理程序”应该在设施开始运行时是可操作的。

这些性能必须在老化的制约因素和机制中加以维持，并且设计中建立的老化应对策略必须依照可接受准则制定和评估。在制造/建造/调试阶段，应该证实其得到了恰当的执行。运行期间，安全重要构筑物、系统和部件所遭遇的状况应该被记录，并且用作确定维修、定期测试和检查制度的输入。此制度规定了及时探测和缓解安全重要构筑物、系统和部件的老化效应。

对上下游设施有直接或间接影响的生产设施，设施安全分析必须考虑这些设施之间相互影响的潜在后果。

3.3. 老化管理的技术挑战

3.3.1 设计期间的策略

新核燃料循环设施的设计是基础阶段，其预测安全重要构筑物、系统和部件

的变化，特别是物理老化机制引起的变化，或减轻变化产生的后果，并在界定安全屏障时，通过考虑这些机理，严格应用纵深防御的概念。

在核燃料循环设施设计中：

- 应该采用严谨且结构化的方法处理老化问题，此方法应该考虑所有可用的信息。特别是，设计者和供应商应该审查并使用其他设施的经验反馈和老化效应研究项目获取的数据。必要时，应该进一步学习或研究，以提高一些特定老化问题的知识。

- 应该识别、评估并考虑所有可能影响到能动或非能动安全重要构筑物、系统和部件的安全功能实施的老化机理。应该识别可能的联合效应。此识别考虑可能导致提供纵深防御的一级或多级防护措施损伤的设备的共因失效（即，物理屏障和冗余部件的同时恶化）。

- 应该考虑使用对可预见的物理老化效应更有抵抗力的材料（例如，对化学腐蚀、磨损、热、辐照脆化、疲劳、环境效应有更高抵抗力的材料）。应该考虑同时起作用的老化机制的综合效应。

- 为确保安全重要构筑物、系统和部件执行其安全功能的能力，考虑到相关的老化效应和可能的恶化，设计应该提供适当的安全裕量，特别是对不可能或难以进行定期测试、维修或更换的安全重要构筑物、系统和部件，例如，因高水平辐射。在这种情况下，容器或管道必须有腐蚀/磨损裕度，应该实施工艺温度/压力限制和临界控制参数。裕量的确定应该考虑可能的设施运行要求或安全监管的变化。

- 应该确定适度的安全屏障，以缓解预期事件的后果，确保设施的设计遵守纵深防御的理念（例如，水箱下设置滴水盘，包容设备周围设置其他包容屏障）。在此方面，应该在为老化管理和运行提供更多的灵活性的范围内，考虑设备的冗余，也许其没有通过安全评估严格证明。

- 为了实现废物最小化并且在人员干预期间遵守合理可行尽量低原则，安全重要构筑物、系统和部件的设计和布置应该易于去污，便于定期测试、检查、维修或更换。对于难以测试、检查、维修或更换的安全重要构筑物、系统和部件，应该给与特别关注。特别是，对于人为干预不可预见的安全重要构筑物、系统和部件，应该预先考虑特殊措施去维修或更换这些安全重要构筑物、系统和部件

（如，通过机器人远程介入）。

- 应该尽可能地限制不能定期测试或维修的安全重要构筑物、系统和部件（特别是位于高辐射水平区域的安全重要构筑物、系统和部件）的数量。为了快速地探测到老化引起的恶化，设计上应该预先考虑补偿性的间接测试措施（如，采取化学分析探测不可接近的容器的腐蚀，采用测量每次输运后发送器和接收器体积差的仪表控制系统探测不可接近的管线泄漏）。

- 营运单位应该文档化老化管理程序，并应该能够证明设施的设计已经充分地处理了老化问题。在选择供应商时，应该特别关注他们的管理系统。

3.3.2 制造、建造和试运行期间的策略

这些阶段的策略包括：

- 影响安全重要构筑物、系统和部件制造商老化管理的相关规定，包括操作限制和服务条件。

- 证实安全重要构筑物、系统和部件制造遵从设计确定的老化安全特征的检查。特别是，应该注意发现伪造安全重要构筑物、系统和部件（例如，用于制造阀门或管线的对化学腐蚀有高抵抗力的材料的质量）。应该收集并记录与安全重要构筑物、系统和部件制造、检查、运输和储存条件相关的数据。

- 对包括质保记录（不符合项、修改、竣工图纸……）和安全论证（安全评估和设计之间迭代的记录）在内的广泛的技术文件进行适当管理，确定出设施运行中老化的起因，改进老化的预测模型。

- 试运行期间，应该确定出能够影响老化恶化的参数（如，剂量率、化学产物浓度、温度等），包括可接受准则，并且在设施寿期内追踪这些参数。

3.3.3 运行期间的策略

运行期间的策略取决于上述定义的老化管理程序的实施。

应该依照安全实例（安全报告、运行限值和条件），建立和实施一个安全重要构筑物、系统和部件定期测试程序和维修。

应该采用一个积极主动的方法，优先采用预防性维修，而不是治疗性维修。

使用所有涉及老化引起的安全重要构筑物、系统和部件变化的可用数据，包括安全重要构筑物、系统和部件制造商建议，确定维修和定期测试程序（包括频率）和相关的程序。

具体的组织规定（如，数据库、记录从职员获得的信息的文件）是运行期间策略的一部分，将在非技术老化一节描述。

应该关注安全重要构筑物、系统和部件的可靠性和维修历史，以便探测任何与设施安全论证假设的不相符，并适宜地解决。

应该采取所有措施，包括总务、适当的废物、流出物和试剂的管理，确保设施的安全运行。

可以依照下列核查清单评估老化管理、定期测试和检查程序的有效性。下列清单旨在理解、预防、探测、控制或缓解老化效应：

- 理解老化现象，例如，通过老化现象的预测模型；
- 减小和控制老化退化的预防行动，如，限制可能的安全重要构筑物、系统和部件退化的服役条件和运行实践；
- 结构或部件失效前老化效应的探测（适宜的检查、测试和监测方法）以及老化效应的监测和趋势（状态指示和参数监测）；
- 评估是否需要矫正行动所依照的验收准则；
- 如果部件不能满足验收准则，则采取缓解行动；
- 预测模型的运行经验反馈和更新；
- 收集数据、记录实践、更新模型和指示器的质量管理，确保预防行动是适当的和所有的矫正行动是有效的。

必须在设施的整个寿期内连续的关注设施安全。长期运行的关键是定期安全审查或类似的活动（见上文）。定期安全审查旨在考虑安全要求、专业知识、设施环境、运行经验反馈的变化，以及评估设施的修改或老化效应。

3.3.4 运行后清洁、退役和拆除期间的策略

无论是运行的设施还是其关闭后直到被拆解，老化管理的基本原理都是一样的。在这方面，上述提到的针对老化管理的组织规定也应该在退役和拆解期间被实施：安全重要构筑物、系统和部件定期测试、维修、运行经验反馈管理、安全运行（总务、废物管理……，定期安全审查……）。

由于老化，在退役和拆解的安全分析中不得不考虑安全重要构筑物、系统和部件可能的变化或失效。此分析应该考虑战略计划（如，运行命令和延续）和相应的工作人员的安全和辐射防护。应该相应的定期更新安全重要构筑物、系统和

部件的老化管理工程，直到这些操作结束。

应该进行适当的安排，确保安全重要构筑物、系统和部件，特别是与工作人员辐射防护相关的（通风等），仍然可用于退役和拆解操作。

3.4. 非技术挑战

核燃料循环设施非技术方面的老化管理包括机构和人因、数据收集和记录保持、老化管理审查、以及必要资源相关的要求（人力资源、财政资源、工具和设备、外部资源等）。

3.4.1 安全管理

3.4.1.1 领导和组织

老化管理的综合性性质要求在运行机构中指派具体人员协调老化管理的实施，收集和考虑来自其他设施的潜在运行经验反馈。

这可能会要求营运单位之外的支持：

- 依据老化问题的复杂程度，营运单位的参加人员应该包括运行、维修、工程、设备资格、设计和研发等方面的专家；
- 应该请求外部机构（如，所有者团队，研究、设计和制造机构）对特殊问题提供专业服务，如环境评估、研究以及标准的发展。

核燃料循环设施非技术老化管理的有效性应该审查，并定期评估，例如定期安全审查期间。

3.4.1.2 知识管理：代替和培训

营运单位应该防止与当前运行、维修和工程有关的员工丧失资格、技能和专业知识。在这种情况下，根据设施的状态：

- 应该制定一个关键岗位及其概况（员工资质、技能、专有技术）清单，并定期审查；
- 应依据此清单管理员工招聘，按照书面程序抵消任何损失；
- 应该通过培训、教育、辅导或其他适当的方式让员工保持有足够资质；
- 对待转包商时，应特别关注资质、技能、专有技术……

营运单位应该为运行、维修和工程员工提供安全重要构筑物、系统和部件老化管理方面的培训，使他们能够为老化管理作出明智和积极的贡献。

培训主题应该特别关注：

- 老化管理概念和实践的认识和理解；
- 对于某个既定工作，正确程序、工具和材料的可用性和使用；
- 从老化相关的事件中获得的通用和特定的设施运行经验反馈；
- 安全重要构筑物、系统和部件可靠性和维修历史方面数据库的使用；
- 老化管理程序框架下所做的审查、检查、评估和改进的结果。

3.4.1.3 知识管理：记录

设施寿命相关的记录应该保持更新。这要求建立文件编制和修改、数据和记录搜集方面的机构指令，以保存和提供涉及基准、运行和维修历史方面的全面准确的设施信息。

运行、维修和工程单位的代表应该参与数据库的设计，以便从设施运行、维修和工程中获取符合质量和数量要求的老化相关数据。

收集的数据和保留的记录应该包括所有老化管理相关的信息，例如：

- 设施或安全重要构筑物、系统和部件的设计（设计说明、制造商数据、例如设备的预期寿命）、制造和建造方面的参考数据（基础数据）和服役期开始的条件，包括试运行期间设备质量测试、试运行测试和环境条件测绘的结果。
- 收集安全报告和涉及安全理由的相关安全文件（安全分析，裕量）；
- 数据，包括设施运行历史（例如，轮班报告和记录），设计修改，安全重要构筑物、系统和部件服役条件，安全重要构筑物、系统和部件可用性和失效测试数据（例如，出现老化现象），在役检查结果，设备和结构的材料监视；
- 维修历史数据，包括部件和结构的运行条件和维修的监测数据；安全重要构筑物、系统和部件老化失效或显著恶化的评估数据，包括根本原因分析结果；
- 安全重要构筑物、系统和部件老化评价和条件评估记录；
- 内外部运行经验反馈记录和研究结果。

维修和运行人员应该将数据输入数据库。数据输入应该进行适当的质量控制。从个人处收集信息，应执行一些规定。特别应该关注较小的事件，特别是看起来微小但可能对后续影响重大的重复发生的事件（如，微量的泄漏和污染，较小的修改）。

存储的数据应该在很长的一个时间内仍然可用。在这方面，应该建立程序，确保相关的数据库得到备份，确保适当地操作和储存所得到的数据储存介质，确

保相关的数据储存介质仍然可读。也应该建立数据库升级和维修方面的程序。

3.4.1.4 老化管理经费

对于结构化的长期老化管理，应该估计其花费，并给予资助。

4. 物理老化-良好实践实例

通常可以将安全重要构筑物、系统和部件的老化分为三类，对应 3 种不同的策略：

分类	实例	策略
容易替换的安全重要构筑物、系统和部件		通过维修、更可取的预测或使用定期程序进行早期失效探测来处理老化。
设计成不能替换的安全重要构筑物、系统和部件	如，土木结构和不易接近的设备。	老化管理程序（确定出寿命限制特征）。
很快陈旧的安全重要构筑物、系统和部件	如，仪表控制系统。	备件安全措施

下表概述了老化管理中应该考虑的条件及其影响，以及建议的行动。

条件	老化的影响	老化管理行动
工艺恶化	传输系统的退化（管线、喷嘴、空气提升）； 容器、管线和工艺设备的不可用； 核临界质量控制措施的退化（评估沉淀）。	确保系统性地确定出沉淀，和堵塞恶化； 提供完全和精确的临界安全控制（沉积质量估计）； 提供备件； 为将来的安全重要构筑物、系统和部件替换准备一个修改计划； 提供文档记录，支持安全重要构筑物、系统和部件维修和替换。
机械部件的退化（腐蚀、应力腐蚀、辐照、疲劳、磨损、微生物腐蚀）	容器，管线、工艺设备的不可用； 安全功能的退化； （包容、辐射防护、临	确保系统性地识别出工艺设备包容的腐蚀、泄漏和退化。 设计上预留裕量（腐蚀额外厚度）。 为设备可能的修理准备一个干预

	界、冷却)。	计划(在不可接近的单元采用机器人介入)； 为将来的安全重要构筑物、系统和部件的替换准备一个修改计划。
电器和仪表控制系统部件的退化(绝缘退化、氧化)	高压绝缘质量退化(存在盐沉积的环境)。	定期核查； 重新设计(屏蔽、辐照时间限制、遥控介入)。
土木结构的退化,混凝土老化(化学侵蚀、高温、嵌入钢筋的腐蚀)	混凝土结构的退化。	确保系统性地确定出混凝土结构的退化。

5. 物理老化-案例研究

5.1. 机械循环或震动引起的应力疲劳

疲劳是一种在反复或波动应力下断裂的现象。此反复或波动应力的最大值小于材料抗拉强度。疲劳裂纹是渐进性的，在脉动应力作用下生长。

振动和循环热载荷引起的疲劳指的是波动载荷（例如，振动载荷）和温度产生的应力/应变往复循环导致的结构恶化。循环载荷往复足够次数后，微结构损伤可能累积，从而导致最脆弱区域萌生宏观裂纹。后续的机械或热循环载荷可能引起萌生的裂纹生长。振动也会引起部件的循环疲劳，以及剪切或磨损。振动通常由外部设备运行引起，也可能是流体系统中泵或阀门中的流动共振或运动引起的。裂纹萌生和生长阻力受这些因素控制，包括应力范围、平均应力、载荷频率、和表面状态。

运行经验审查识别出了大量的振动疲劳引起工厂部件断裂的实例。

其中一个实例是 2005 年 4 月 21 日英国热氧化物后处理厂发生的事件。

进料澄清小室监视器显示 83000 L 的溶解液从破损的计量槽进料管泄漏到小室地坑内。调查表明，溶解液已经泄漏许多月，可能从 2004 年 7 月便开始泄漏。可以确信的是，2005 年 1 月 15 日左右，进料管遭受了一个严重的破坏。

因计量槽和进料管之间的相对移动引起疲劳，最终导致进料管破裂。

5.2. 卡尔斯鲁尔 WAK 后处理中试厂气态流出物管线硝酸铵形成

1994 年，卡尔斯鲁尔 WAK 燃料后处理中试厂拆除期间，在拆除 U/Pu 分离工艺排风系统过程中，发现在冷凝器和消液器之间沉积有白色粉末沉积。分析表明，这些粉末是硝酸铵粉末。

这些管道拆除工作被迫停止，直到这些硝酸铵被冲洗掉。大约清洗出 9kg 的粉末。

国际原子能机构/核能署核燃料事件通告与分析系统 No.64 表反映了此事件。此表显示，沉积是设施多年来运行（处理了 200 吨燃料）的累积结果。根据最近德国核设施与安全研究中心提供的信息，硝酸铵粉末的形成可能与叠氮酸（HN₃）非爆炸分解产生的气态硝酸和氨混合物有关。这种极易挥发的酸是在 U/Pu 分离

过程中使用的联氨分解过程少量生成的。

5.3. 西门子哈瑙铀燃料元件制造厂废料回收排气淋洗器爆炸

1990年12月12日，德国哈瑙铀燃料元件制造厂废料回收排气洗涤塔发生爆炸。洗涤塔是废液铀回收和处理装置的一部分，用于尾气净化。洗涤塔下部由钢制成，被爆炸所撕裂。底部被爆飞。上部由PVC制成，被炸成许多碎片。循环泵的外壳也被炸成很小的碎片。一些储存箱被这些小碎片打穿。大厅的屋顶也被打出一些小洞。临近的储存箱、管道和开关柜被冲击破冲击变形。两个工人受伤，其中一个很严重。按国际核事故分级系统分级，此事件为2级。

调查认为，正常运行期间，排气净化装置不得不处理来自不同系统的具有不同化学性质的气体或蒸汽：铀氧化物回收溶解槽排放的氮氧化物气体、氨气、重铀酸铵滤饼煅烧和澄清底泥干燥过程排放的有机物或氟化物。这导致洗涤塔水箱内存在硝酸铵、氟化物和有机物。

由于液位控制失效，洗涤液中硝酸铵浓度会因洗涤液的蒸发而增加，从而可能形成结晶或泥浆。爆炸可能由循环泵在太高的温度下运行引起。洗涤塔残骸中残余液体中硝酸铵典型浓度高达50%（重量百分比），氟化物浓度约10%，亚硝酸盐浓度约1%。氟化物和铀以及有机物可能起到催化作用。

6. 过时管理-良好实践实例

条件	老化影响	管理行动
技术改变（工艺、设计标准、包括计算机硬件在内的设备、软件）	新旧设备的不兼容性。 无供应商。 备件不足或缺乏。	确保系统的识别出有用的服役寿期和预期的过时。为将来过时的安全重要构筑物、系统和部件替换准备一个修改计划。为计划服役寿期提供备件或者确定替代的供应商。与其他工业共享数据。提供完整和精确的文档记录以支持安全重要构筑物、系统和部件维修和替换。
安全管理的改变（文档记录过时）	安全运行信息的缺乏。	建立一个有效的包含配置管理在内的综合管理系统。
标准和规章的变化	实践、标准和规章过时。 偏离当前标准和规章。	确保与当前的标准和规章一致。 必要时，考虑修改安全重要构筑物、系统和部件。

7. 安全重要构筑物、系统和部件过时-案例研究

7.1. 临界仪表控制系统-东海临界事故报警系统

1973年，日本东海后处理厂安装了一套临界事故报警系统。1984年，这一套系统被新系统替换。在超过25年的运行历史中，新系统具有优异的运行记录，没有任何严重的问题，包括任何误报警。然而由于此系统主要部件近些年来逐渐过时，此系统寿期也将至。

从另一个方面来说，东海后处理厂安全基准没有改变，仍然要求临界事故报警系统执行安全功能。最新的临界事故报警系统已经被研制，以满足此要求，并解决过时的问题。通过采用下列设计特征，其可靠性和性价比也将提高。

此最新系统的探测器由塑料闪烁体连接一个安装在镉衬里聚乙烯慢化体内的光电倍增管组成，既能够响应中子也能够响应伽马射线。这使得探测器不必使用裂变物质。信号界面与现有的伽马探测器兼容。由于最新的辐射计算分析方法，探测器的部署被最优化了，这减少了探测器数量。

使用脉冲堆 TRACY 进行了探测器及其信号处理单位的功能测试，其性能顺利得到验证。从2009年10月开始，最新的临界事故报警系统已在东海后处理厂中使用。

7.2. 仪表控制系统老化管理-阿海珐 NC 后处理厂案例

仪表控制系统老化管理包括物理老化，但主要问题是过时（硬件和软件两方面）。

在 LA Hague 项目框架中，阿海珐 NC 决定控制硬件生产和软件升级所需要的措施，即，得到系统设计文件所有权，保持在诸如操作系统和电子线路板等基本部件领域的技术专长。类似其他工业部门一样，例如，能源行业或飞机制造业，在后处理设施中，电子线路板及其元器件的长期有效性是一个具有挑战性的问题，因为电子元器件的市场寿命短于10年。

阿海珐与法国的其他主要工业一起成立了一个委员会，致力于电子元器件的过时和维修，以便这些过时的电子元器件能够达到同样的质量水平。对于市场上不再有的元器件，建立了一个逆向工程、再制造和向初始环境和更老的技术环境

移植的通用平台。

自 2002 年以来，内部培训一直在进行，培训内容是学习设施内部知识保持和整个仪表控制系统构架控制方面的经验教训。

8. 结论

严格且系统性地老化管理，对于确保核燃料循环设施的安全是很重要的。这是全世界的营运单位、国家安全部门及其技术支持机构的共识。经济合作与发展组织核能署于 2009 年 1 月组织召开的讨论会确认了这一点。此次讨论会认识到了建议和最佳实践的界定和分享对处理核燃料循环设施老化技术和非技术问题的好处。

与其他核设施相比，核燃料循环设施老化管理需要解决核燃料循环设施的特异性，如危害的性质，通常具有核和化学双重危害；化工过程也可能随时间恶化；设计的独特性；设备设计和/或设施运行的经常变化。

通过检验一些策略和良好实践能否应对设施设计到退役期间的物理老化和过时，本文识别了一系列良好实践。

核燃料循环设施的设计是预期安全重要构筑物、系统和部件变化和降低物理老化后果的基本阶段。考虑到老化，应该严格执行纵深防御的概念。对于新设施，应该依据设施风险的大小，建立一个具体的老化管理程序，并在设施的早期阶段实施。核燃料循环设施运行阶段，主要实施预防性维修，以便获取并追踪设施的运行和维修历史。

可以依照过时的性质，将对过时的管理区分为：影响可能导致安全重要构筑物、系统和部件维修相关问题的技术（包括硬件和软件）的变化；标准和规章的变化，或者文档过时。对核燃料循环设施来说，过时的管理是非常重要的，因为这些设施被设计成长期运行，同时关闭设施可能不会使设施处于安全状态。

参考文献

IAEA NS-R-5: “Safety of Nuclear Fuel Cycle facilities – Safety Requirements” (2008).

IAEA NS-G-2.12: “Ageing Management for Nuclear Power Plant” (2009).

IAEA SSG-10: “Ageing Management for Research Reactors” (2010).

缩写词

ALARA	合理可行尽量低
CAAS	临界事故报警系统
CSNI	经济合作与发展组织核能署核设施安全委员会
DiD	纵深防御
FCF	核燃料循环设施
FCOP	核燃料循环监督过程
FINAS	国际原子能机构/核能署核燃料事件通告与分析系统
GRS	德国核设施与安全研究中心
HALW	高放废液
HSE	英国卫生与安全管理局
I&C	仪表与控制
IAEA	国际原子能机构
INES	国际核事故分级系统
IRSN	法国辐射防护与核安全研究所
ISA	综合安全分析
JNES	日本核能安全组织
MOX	混合氧化物燃料
NEA	经济合作与发展组织核能署
NPP	核电厂

NRC	美国核管理委员会
OECD	经济合作与发展组织
OEF	运行经验反馈
ONR	英国核监管办公室
PSR	定期安全审查
QA	质量保证
SSCs	安全重要构筑物、系统和部件
THORP	英国热氧化物后处理厂
TRP	东海后处理厂
WGFCs	经济合作与发展组织核能署核设施安全委员会核燃料循环安全工作组

核能署出版物和信息

完整的出版物名录可在网站 www.oecd-nea.org/pub 查询。

除了机构及其工作计划的基本信息，核能署网站提供数百份技术和政策导向报告的免费下载。

核能署每月的电子公告免费分发给订户，其提供新的结果、事件和出版物的更新。用户注册网址为 www.oecdnea.org/bulletin/。

可以通过 Facebook 网址 www.facebook.com/OECDNuclearEnergyAgency 访问核能署，或者在推特上关注核能署（@OECD_NEA）。

核设施安全委员会技术见解报告

No.50

如其他核设施一样，管理核燃料循环设施老化应考虑其随时间和使用所发生的变化，确保整个寿期内安全功能的可用性。本技术见解报告通过检验一些策略和良好实践能否应对设施设计到退役期间的物理老化和过时，识别出了一系列良好实践。核安全监管机构、核燃料循环设施营运单位和核燃料循环研究者应该会对本报告特别感兴趣。