

入库为安——IAEA 发布乏燃料干式贮存系统老化管理报告

国际原子能机构（IAEA）发布了乏燃料干式贮存系统老化管理十年研究成果。



加利福尼亚州南部的圣奥诺弗雷核电站正在将乏核燃料从湿式贮存设施转移至干式贮存设施

据 IAEA 估算，截至 2024 年底，全球核电站卸出的乏燃料已超 40 万吨重金属（ktHM）。其中 10.6 万吨重金属处于干式贮存状态，与湿式贮存相比，这一长期贮存方式正日趋普遍。

多数 IAEA 成员国距建成乏燃料永久贮存库尚需数十年，这意味着干式贮存系统很可能需要在其设计寿期之外继续安全运行。湿式贮存已运行数十年，IAEA 表示，此类设施的老化管理总体上已有充分认识。电力公司选择干式贮存，看重的是其非能动安

全特性，且许多干式贮存设施已获准延期运行。IAEA 预计，干式贮存需求将继续增长，使用期限将远超 20 至 40 年的原始许可期，甚至需要达到 120 年以上。因此需要制定老化管理计划（AMP）来验证其持续安全运行。

今年，IAEA 发布了《乏燃料干式贮存系统老化管理计划》，系“乏燃料干式贮存系统老化管理计划协调研究项目”的最终报告。该项目汇集了参与成员国 2016 年 10 月至 2021 年 10 月的研究成果，旨在总结各国制定和实施干式贮存系统老化管理计划的方法论经验，并通过不同国家的案例和参考实例，支持各国推进老化管理计划。

老化管理计划的构成要素

鉴于目前有数十种干式贮存设计在使用中，IAEA 指出老化管理计划应针对其所适用的贮存系统专门设计。由于部分设计为同时获准用于贮存和运输的两用容器（DPC），IAEA 运输安全标准委员会（TRANSSC）也成立了工作组，讨论运输货包的老化管理问题。

国际原子能机构的报告列举了多种不同的技术。报告指出，首先需要区分两类设施：一类是可用于运输的、可获得 B（U）型货包批准的容器，另一类则是并不打算用于运输的贮存结构。

就容器而言，目前按主体材料分为两类：金属容器，或带金属内衬的混凝土容器。无论哪种类型，乏燃料均以密封罐或裸燃料装入吊篮的形式贮存。贮存构筑物的区分标准则在于设备和

复杂程度。乏燃料可以简单存放于密封罐中，无论通风与否；密封罐或裸燃料也可存放于贮存厂房（或贮存库）内，并配备起重机等附加设备。贮存单元中的燃料可采用垂直（单个或多个单元）或水平布置，可位于地面以上或地下。

老化管理计划的第一步，是参照安全评估和许可依据，逐一确定适用范围内各构筑物、系统和部件（SSC）的材料及环境条件（如湿度、温度、盐分含量）。报告列举的环境包括：室外空气、去离子水、氦气、地下水/土壤、遮蔽环境、全封闭或带内衬环境，以及嵌入混凝土、金属或中子屏蔽材料的环境。



干式贮存 SSC 须确保临界安全、屏蔽、包容、热传导、结构完整性和可回取性

老化管理计划应识别可信的老化效应并制定管理方案，涵盖：混凝土外包装和支撑垫板、乏燃料组件材料，以及干式容器贮存系统中各类部件的材料。仅靠检测 SSC 故障的计划不能算有效的老化管理计划。需要借助有效的检查、试验和监测手段，

在构筑物或系统丧失功能或失效之前发现老化效应。



识别干式容器贮存系统中各类部件的可信老化效应并制定管理方案是 AMP 的第一步

必须明确计划数据何时、何地、如何收集，并参照相关规范 and 标准，对所用方法或技术（如目视检查、体积检查或表面检查）及其频率作出论证。

在有效的性能监测计划中，“老化效应检测”这一要素讨论并确立将用于性能监测的方法，同时论证实施这些监测活动的频率。

何为“安全重要物项”？

安全重要 SSC（及相关子部件）需确保以下安全功能：临

界安全、屏蔽、包容、热传导、结构完整性和可回取性。另一种定义方式如下：

包容边界： 在正常、异常和事故工况下包容放射性物质

临界控制： 在正常、异常和事故工况下维持次临界构型

辐射屏蔽： 在正常、非正常和事故工况下降低内装物释放的辐射

热传导： 在正常工况下排出衰变热，在异常和事故工况下保护铅屏蔽和密封件等温度敏感部件

结构支撑： 在正常、非正常和事故工况下维持内装物安全

燃料可回取性： 为装料、卸料、维护、监测或运输等操作提供支持，若该功能失效，可能导致无法从湿式或干式贮存中取出单个或封装燃料组件，或无法从贮存容器、外包装或贮存位置取出装载有组件的密封罐。

运行经验

仅美国就有 50 多种干式贮存设施获美国核监管委员会（NRC）通用批准。密封罐尺寸和混凝土外包装设计五花八门，可达性问题也随之复杂——环隙和宽度、进入通道、焊接工艺、材料、焊缝位置各不相同。不过，全球 95% 的库存都为含裸燃料的螺栓式容器系统，或含焊接密封罐的混凝土贮存外包装。螺栓式容器系统在美国更常见，焊接密封罐则多见于美国以外。螺栓式容器系统已历经 30 至 35 年发展。报告称：“它们已是成熟的工业技术，从未发生过严重事件或事故，即便是福岛第一核电

站事故期间装载燃料的容器也安然无恙。”

螺栓式容器系统的监管检查技术难度较低，所有外部部件均可目视检查。如因运行需要吊起容器，可顺便检查底部。内部部件由氮气或氦气保护，通过压力监测检测泄漏。



美国有 50 多种干式贮存设施获 NRC 批准

例行检查在原位进行，通常无需动用吊装和搬运系统，不过容器可能每 10 年移至专用区域接受更详细的目视检查。正常运行期间随时可接近容器，外表面的腐蚀无需专门检查即可发现。迄今经验表明，仅见磨损痕迹和搬运中油漆破损造成的局部有限腐蚀。

已发生若干起耳轴螺栓腐蚀的运行事件，可能影响容器的安全搬运。控制措施是检查腐蚀情况，必要时更换螺栓并重新密封。新型容器采用改进设计，所有耳轴螺栓均由带密封的不锈钢环保护，可防止装料时含硼水渗入螺栓轴孔。

美国核能研究所（NEI）委托核电运行研究所（INPO）建立了干式容器贮存 SSC 老化信息交换中心。该中心汇集了确认贮存完整性的正面检查结果，以及可能需要全行业采取纠正行动的经验教训。33 份检查报告之后，业界尚未采取重大修复行动。

2016 年 9 月，哈奇核电站一台 Holtec HI-STORM 100 外包装的碳钢外壳上发现腐蚀迹象。腐蚀发生在一块脱落的辐射警示牌后面，经喷砂除锈并重新涂漆后修复。2020 年 10 月，萨斯奎哈纳核电站标准化的 NUHOMS HSM 和不锈钢密封罐接受直接检查和摄像检查，发现密封罐上有氯化物沉积，取样结果表明其未对安全功能构成威胁。



Orano 公司的 NUHOMS MATRIX 是全球众多干贮设计之一

北安娜核电站的螺栓式容器老化管理提供了一个典型案例：Orano TN-32 干式贮存容器被涂成白色，以便于目视检查并提供一般腐蚀防护。

延长贮存设施寿期

一些干式贮存系统已达到预期寿期，但贮存系统状况调查支持延长许可寿期。

许多国家的老化管理计划提供了此类信息，同时借鉴了核电站的老化管理经验，并任用具有电厂经验的人员担任贮存设施操作员。IAEA 报告指出，在报告编写期间，检查领域取得了显著技术进展，已从实验室规模发展为常规运行，现已纳入美国贮存许可延续流程。例如，利用密封罐不同位置的温度数据进行监

测。随着传感器技术日臻成熟，有望带来全新的监测可能。

报告总结道：“随着贮存期限持续延长，老化管理计划仍将是干式贮存系统的重要安全依托。”

对外交流合作部 张灵宇 供稿

编译自《国际核工程》官网

文章内容不代表本公众号观点