

国外NUHOMS乏燃料干法贮存系统管理研究及启示

徐健¹, 殷敏², 张晓霞¹, 王伟³, 王祎峰¹

¹国防科工局核技术支持中心, 北京

²中核四〇四有限公司, 甘肃 兰州

³江苏核电有限公司, 江苏 连云港

收稿日期: 2022年2月28日; 录用日期: 2022年3月14日; 发布日期: 2022年4月20日

摘要

为妥善管理核电发展产生的乏燃料, 世界各核电大国在水池湿法贮存和干法贮存方面投入了大量研发, 美国研发的NUHOMS干法贮存系统。该技术路线作为模块化的压水堆乏燃料干法贮存技术, 应用于美国的很多核电站, 本文在阐述NUHOMS干法贮存系统组成与操作流程同时, 概要分析了美国在乏燃料贮存设施的安全监管、许可审查、容器评审与取证、法规体系建设等方面的情况, 在总结国外相关经验的基础上, 结合国内目前在干法贮存设施管理方面存在的不足, 提出了相关的管理建议和意见。

关键词

核电站, 乏燃料管理, NUHOMS干法贮存系统

Research and Inspiration on Management of Dry Storage of NUHOMS Spent Fuel

Jian Xu¹, Min Yin², Xiaoxia Zhang¹, Wei Wang³, Yifeng Wang¹

¹Nuclear Technology Support Center of SASTIND, Beijing

²404 Co., Ltd. of China Nuclear Industry Group, Lanzhou Gansu

³Jiangsu Nuclear Power Company, Lianyungang Jiangsu

Received: Feb. 28th, 2022; accepted: Mar. 14th, 2022; published: Apr. 20th, 2022

Abstract

Those developed countries with nuclear power have made a great devotion to developing the tech-

nology of Spent Fuel storage in order to manage Spent Fuel safely, especially in the dry storage and wet-pool storage. Being a Module system, NUHOMS dry storage system, which was developed by Transnuclear Inc. of the US, has been applied to many NPPs in the US among those storage technologies. This paper gives a brief introduction to component and operation progress of NUHOMS dry storage system, also, analyzes the management experience in spent fuel storage facilities in the US, such as safety supervision, licensing review, container assessment and legislation system. After making a conclusion on experience abroad, the paper gives some suggestions and advice based on the management shortage of spent fuel storage facilities.

Keywords

Nuclear Power Plant, Spent Fuel (SF) Management, NUHOMS Dry Storage System

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为核大国和核强国,美国一直是全球核发电机组最多的国家。按照美国《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》和能源网统计,截止到2020年底,美国在运核发电机组94台[1],总装机容量9655.3万千瓦,在建2台装机容量2234MWe机组,2020年核能发电量占总发电量19.6%,累计产生约8.2万吨乏燃料,并以每年2千吨速度递增。考虑到核扩散风险,美国于1977年暂停国内乏燃料后处理[2]。

在没有商业后处理能力且尤卡山处置场迟滞延期情况下,为妥善解决核电厂产生的大量乏燃料安全管理,美国在现有在堆水池湿法贮存基础上,通过对比两种贮存方法特点,针对干法贮存具有良好的经济性、环保性、灵活性等优点,研发了一系列干法贮存技术,并按照相关法规和许可规定要求,许可授权了14种以上涵盖离堆独立特定场址和在堆通用场址许可的乏燃料干法贮存设计方案,包括NAC国际公司NAC系列方案、跨核公司(Transnuclear INC) NUHOMS系列方案、通用公司CASTOR系列方案及霍尔泰克公司(HoltecInc)的HI-STAR系列方案等[3]。

核运输公司(Transnuclear INC)在干法贮存方案设计方面做了大量细致的研发工作,其研发的NUHOMS系列乏燃料干法贮存方案,包括NUHOMS-24P、NUHOMS-52P、NUHOMS-32PT、NUHOMS-HD及Advanced NUHOMS-24PT1等类型,均已取得美国核管会(NRC)的许可授权。

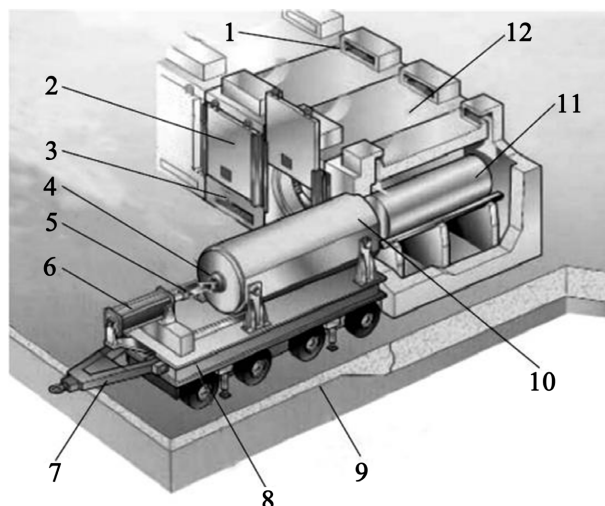
在发展干法贮存技术的同时,通过逐步摸索安全审查和取证机制,美国核管会及能源部针对性的建立了一套乏燃料干法贮存设施监管法规和技术标准体系,为确保乏燃料安全管理提供了技术和制度保障。

本文重点介绍了核运输公司(Transnuclear INC)研发的乏燃料水平干法贮存 NUHOMS 系统相关组成、操作流程和干法贮存管理经验[4],并结合国内目前情况,提出了相关建议。

2. NUHOMS 干法贮存概况

2.1. NUHOMS 干法贮存系统组成

NUHOMS 贮存系统是在混凝土水平贮存模块(HSM)中干法贮存封装好的乏燃料组件[5]。系统主要设备包括不锈钢干法屏蔽容器(DSC)、钢筋混凝土水平贮存模块(HSM)、中间转运设备和辅助设备几部分,如下图1。转运系统包括转运容器、容器吊具、液压缸系统、牵引车、转运拖车、容器支撑滑架和滑架定位系统等。辅助设备有转运容器/DSC 环形密封圈、真空干燥系统和焊接系统等。



1——空气出口；2——屏蔽门；3——空气入口；4——附加屏蔽；5——抓物件；6——液压缸；7——转运拖车；8——容器支撑滑架和定位系统；9——搭板；10——场内转运容器。

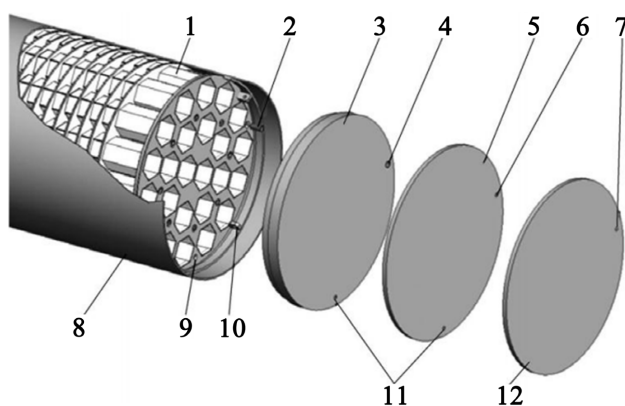
Figure 1. NUHOMS storage system [5]

图 1. NUHOMS 贮存系统[5]

乏燃料组件在 NUHOMS 干式贮存系统中贮存时，衰变热的导出和扩散采取非能动方式。NUHOMS 贮存系统通过热传导、辐射和自然对流将衰变热从乏燃料组件扩散到 DSC，再从 DSC 最终扩散到环境中。

1) 干法屏蔽容器(DSC)

以 24VTH 型 DSC 为例，其主要由壳体和吊篮两部分组成，结构如图 2。壳体主要由筒体、外盖、内盖、顶部屏蔽塞、抓取环，支撑环、吊耳和底部壳体等部件组成。DSC 筒体外壳是高完整性的不锈钢焊接容器，主要功能是包容放射性物质、DSC 内腔惰性气体介质封闭和屏蔽的功能。吊篮组件由四边形的不锈钢管、不锈钢板、铝板、拉杆、中子吸收板等组合而成。



1——吊篮组件；2——排水管；3——顶部屏蔽器；4、6——排水孔；5——内盖；7——测试塞；8——筒体；9、11——排气孔；10——吊具；12——外盖。

Figure 2. DSC structure diagram [5]

图 2. DSC 结构示意图[5]

顶盖、顶部屏蔽塞和外壳底部为 DSC 燃料装载操作和贮存过程提供屏蔽。抓取环焊接到底部壳体或外底盖板，用于将 DSC 送入水平贮存模块(HSM)或从 HSM 回取 DSC。吊篮顶部四个吊耳用于燃料装载操作前 DSC 的吊运。吊篮上设置了排水口和排气孔，用于排水和充气操作。

2) 水平贮存模块(HSM)

水平贮存模块(HSM)由钢筋混凝土和钢结构构成,可以提供充足的中子和 γ 屏蔽。整个模块安装在由钢筋混凝土基础底板构成的承载基础上,模块不与基础底板连接。每个 HSM 为封装在 DSC 中乏燃料提供了独立贮存结构。

按照设计, HSM 具有良好的抗震功能、屏蔽性能、衰变热导出能力及抵抗事故能力。

HSM 形成了独立非能动系统,确保乏燃料干法贮存的安全。HSM 模块通过辐射、热传导和对流相结合的方式将乏燃料衰变热导出。为保护混凝土表面和强化传热,在每个 HSM 模块内顶部设置金属挡热板。空气由 HSM 下部进风口进入,流经 DSC 和挡热板周围,并由 HSM 顶部空气流出口排出。具体流动路径见图 3。HSM 非能动冷却系统设计确保乏燃料长期贮存过程中包壳峰值温度低于可接受限值,以确保包壳完整性,并在每个 HSM 模块内还设有温度监测仪。

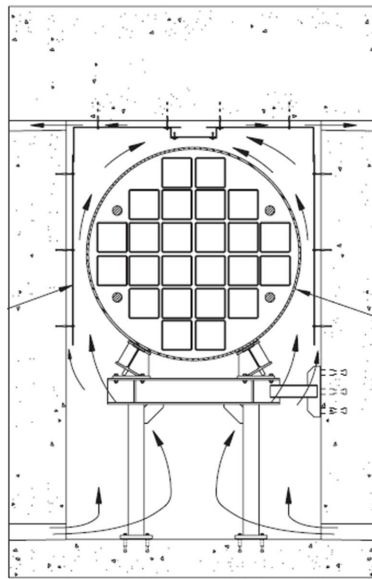


Figure 3. Routine of air flow [5]

图 3. 空气流动路线[5]

HSM 模块安装在由钢筋混凝土基础底板基础上,不与基础底板连接,并为 DSC 提供纵向约束,防止 DSC 在地震时发生移动。HSM 排列可以模块化扩展,可以单排排列或背靠背排列,已减少空间、使屏蔽效应最大化。在排列阵列两端和外侧采用厚混凝土补充墙,以降低辐射水平。根据设计, HSM 顶部和墙,以及 HSM 模块阵列两端的单独屏蔽墙形成足够的屏蔽厚度,以尽量减少相邻 HSM 装料和回取操作的剂量率。

3) 转运系统

转运系统由场内转运容器(TC) (如图 4)和其他转运设备组成。其中,转运容器主要是在 DSC 装料、密封操作和转运到 HSM 过程中起到屏蔽和防止潜在危害作用,由不锈钢同心内/外筒体和非不锈钢部件组成,内筒和外筒的顶部和底部用封头法兰焊接。非不锈钢部件包括内壳和外壳之间的铅屏蔽、O 形密封圈、树脂和水中子屏蔽材料以及碳钢螺栓。

其他转运设备包括转运拖车、容器支撑滑轨和液压缸。转运拖车用于在堆水池与干法贮存系统之间运输空容器、支撑滑轨、负载运输容器。容器支撑滑轨安装在转运拖车上防止拖车牵引时 DSC 发生滑动。液压缸系统用于将 DSC 插入 HSM 或将 DSC 从 HSM 回取。

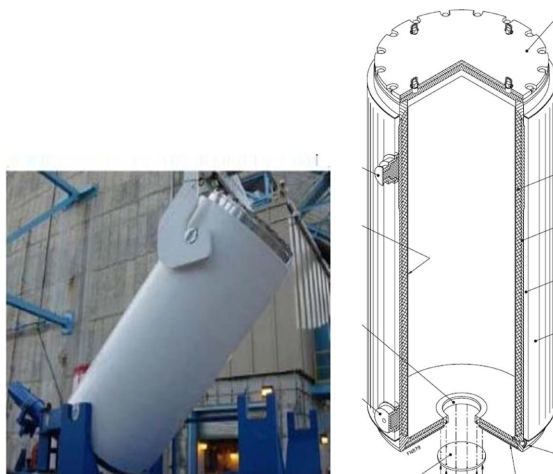
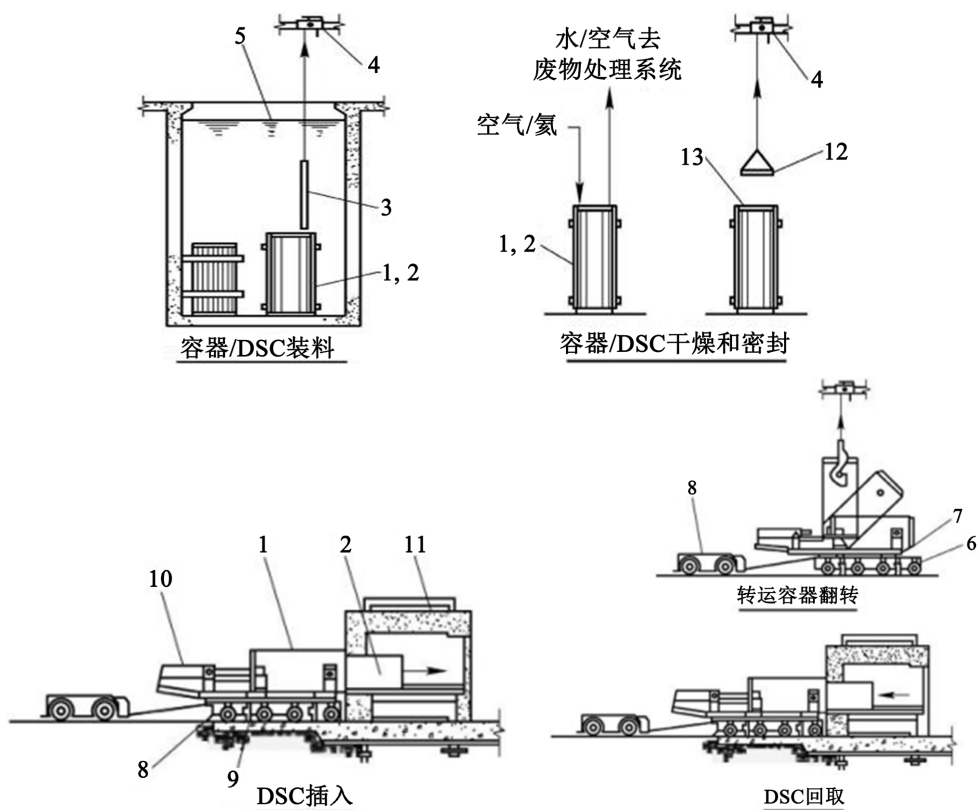


Figure 4. Transfer container (TC) [5]

图 4. 转运容器(TC) [5]

2.2. NUHOMS 干法贮存系统操作流程

NUHOMS 干法贮存系统的操作由乏燃料组件装料、运输和贮存等过程组成，具体包括容器准备、燃料装料、DSC 密封处理、运往干式贮存区域、将装料 DSC 送入 HSM 等操作流程。详细操作流程见图 5。



1——转运容器；2——干式屏蔽罐；3——乏燃料组件；4——吊车；5——乏燃料池；6——转运拖车；7——一支撑滑架，8——牵引车；9——滑架定位系统；10——液压缸；11——水平贮存模块；12——容器盖；13——DSC 盖。

Figure 5. Operation procedure of NUHOMS storage system [5]

图 5. NUHOMS 贮存系统的操作流程[5]

1) 容器准备

容器准备包括转运容器 TC 和干法屏蔽容器 DSC 的准备, 包括: 转运容器 TC 翻转直立; 干法屏蔽容器 DSC 吊入转运容器 TC 组装为一体; 干法屏蔽容器 DSC 在转运容器 TC 中位置调整; 中子屏蔽层、环隙填充介质; 干法屏蔽容器 DSC 内填充介质。

2) 燃料装料

燃料装料, 即将贮存在在堆水池中的乏燃料组件按要求装入干法屏蔽容器(DSC), 为后续操作做准备, 包括吊装转运容器 TC 进入水池换料井并装载乏燃料; 水下安装干法屏蔽容器 DSC 顶部屏蔽塞; 转运容器 TC 吊出水池。

3) DSC 密封处理

干法屏蔽容器(DSC)密封处理包括 DSC 密封、干燥和充气等操作, 具体包括: 干法屏蔽容器 DSC 内部及环隙初步排水; 安装焊机并焊接干法屏蔽容器 DSC 内盖; 并对 DSC 最终排水、真空干燥并充氦; 排水口和排气孔焊接, 以及 DSC 外盖焊接。

4) 运往干法贮存区域装入 HSM 贮存

将载带装料干法屏蔽容器(DSC)的转运容器(TC)吊到转运拖车上, 运往干法贮存区域, 并将干法屏蔽容器(DSC)从转运容器(TC)推入水平贮存模块(HSM)干式贮存。

3. 美国干法贮存设施管理情况

3.1. 设施监管

为确保乏燃料干法贮存设施在设计寿命期内安全稳定运行, 美国核管会联合能源部及相关营运单位进一步加强和完善了核安全法规和干法贮存相关技术标准。从选址、容器设备设计制造、系统和设施设计、建造、装料运行、回取及退役等方面对干法贮存设施全寿命相关事项进行了全面管控[6]。根据美国电力研究协会的一项统计分析, 美国核管会对核电厂乏燃料干法贮存项目历年的审批数量如图 6 所示。

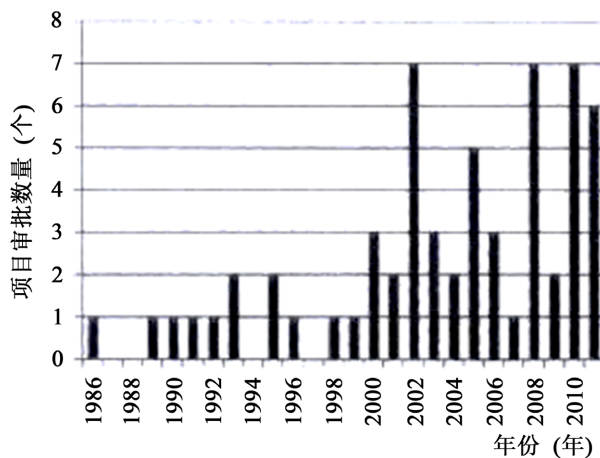


Figure 6. Trend of Approved SNF Storage Project in US [5]

图 6. 美国的乏燃料贮存项目批准数量趋势[5]

1) 制定完善的法规标准

在美国的核安全法规标准体系中, 从联邦法规, 到核安全导则、技术文件、工作细则, 再到工业标准, 均有专门针对核电厂乏燃料干法贮存的核安全要求[7]。如联邦法规《独立乏燃料贮存设施及高放废物取证要求》(10 CFR 72), 用于反应堆厂址内或离堆厂址的乏燃料干法及湿法贮存系统的取证申请; 美

国核管会 RG 系列管理导则, 包括《乏燃料贮存设施的设计准则》(RG1.13)、《乏燃料贮存设施的设计》(RG3.60)、《乏燃料干法贮存容器安全分析报告标准格式与内容》(RG3.61)、《乏燃料厂内干法容器贮存安全分析报告标准格式与内容》(RG3.62)等, 以及《破损燃料处理措施》(ISG-I)《乏燃料运输和贮存期间包壳要求》(ISG-11)等 20 份 ISG 工作导则。

乏燃料干法贮存监管文件层面, 美国核管会发布了《干法贮存设施标准审查大纲》(NUREG1567)、《干法贮存系统标准审查大纲》(NUREG1536)、《独立乏燃料储存装置信息手册》(NUREG1571)等文件。技术标准层面主要参考 ASME 标准第三卷、ANSI/ANS 标准、ASTM 标准及 ACI 标准。

2) 分类进行许可取证

美国核管会对乏燃料干法贮存系统的许可管理方式分两种。一是特定场址专用许可, 用于独立乏燃料干法贮存设施, 取证要求与核电厂类似, 需进行独立安全审查和环境审查。二是通用许可, 主要应用于核设施厂址内乏燃料贮存系统, 可视为对所在核设施许可证的补充, 不需进行独立安全审查和环境审查。

3) 许可安全审查

针对乏燃料干法贮存设施的选址、设计、建造及运行等, 美国核管会建立了完善的安全审查制度。

10 CFR 第 72-L 部分中对乏燃料干式贮存容器设计、制造及运行规定了具体审核标准和详细的制造要求, 以便通用执照持有者使用。同时考虑了持有 NRC CoC 的设计换照要求及需考虑情况、记录和汇报要求、修改 CoC 的程序、安全分析报告定期更新及适用于设施及证书持有人的质保(QA)要求等方面。

《干式容器贮存系统标准审查计划 - 最终报告》(NUREG-1536)和《乏燃料干式贮存设施标准审查计划》(NUREG-1567)明确了设施设计安全审查的具体要求, 确保审查质量及一致性。

运行许可批准后, NRC 对乏燃料干法贮存设施本身及其中开展的活动进行检查、监测和试验, 并通过结果来验证、审查安全评估预测, 内容涉及乏燃料装料贮存和回取活动各个方面。通过长期研究干法贮存系统及乏燃料本身性能变化, 发布了 NUREG/CR-6831《压水堆乏燃料棒存于干式容器 15 年后的试验》。

4) 定期安全审查

为了证明设施能够满足长期安全性能要求, 核管会根据《干式容器贮存系统标准审查计划 - 最终报告》(NUREG-1536)和《乏燃料干式贮存设施标准审查计划》(NUREG-1567)的相关要求对乏燃料干式贮存设施开展定期安全审查, 审查范围涵盖核设施设计、事故分析、危险分析、规程、应急计划、辐射环境影响、建(构)筑物、系统和部件的实际状态、设备合格鉴定、老化、安全性能、运行管理、质量保证体系运转等方面。审查频次一般为 2~3 年。对运行稳定性较好的干式贮存设施类型, 要根据具体设施类型及以往安全审查结果, 确定评估及审查的频率和方式。

5) 监督检查

为确保设施安全运行, NRC 对乏燃料干法贮存设施相关活动及运行管理开展了各种监督检查执法活动, 以确认乏燃料能够持续保持完整。检查内容涵盖了放射性废物及废液管理等方面[8]。同时, NRC 还对供方活动进行检查及评估, 以最大程度减少安全风险。将检查结果、强制整改措施及后续跟踪调查等检查过程形成检查报告, 为同行业者和监管机构提供参考。

对在运乏燃料干法贮存设施, NRC 根据以往检查情况、许可证持有者业绩表现、经验反馈、突发事件或计划内事项等, 适当调整检查频率。此外, 也会检查干式贮罐卸料情况。NRC 监督员将对许可证持有者对老化管理项目各项活动的执行情况开展评估。

NRC 每年对其管辖内的乏燃料管理设施进行约 900 次检查, 涵盖人员培训、辐射防护、人员剂量记录、安保、乏燃料完整性等。

3.2. 设施操作技术要求

NUHOMS 乏燃料干式贮存系统的设计目标旨在长期安全贮存乏燃料。为确保这一目标的实现,从将乏燃料从水池中装入屏蔽容器到进入干式贮存模块进行长期贮存,甚至中间回取等具体操作和运行管理过程中,必须按照下面的技术要求开展相关活动和长期运行管理:

1) 在装卸料、回取等操作开展前,必须严格按照相关规定对前提条件进行全面详细的检查,包括吊装设备完整性及其功能正常与否、水池厂房内通风照明等系统运行状态、各种操作文件的编制审核等方面。

2) 干法屏蔽容器在乏燃料池内进行操作的全过程中,要对因容器入水导致水池水位升高而引起的各种影响提前采取响应的管控措施,并在应急预案中制定相应的应急措施。同时,为防止外表面污染,在进出水池前后必须用去离子水对所有进出水池的设备表面进行冲洗去污。

3) 详细梳理整个操作过程中涉及到的高处作业内容,有针对性的采取相应的防护措施,同时,在应急预案中应给出针对性的管控措施。

4) 为防止热粒子嵌入干法屏蔽容器底部,必须用不锈钢保护盖对进入水池的屏蔽容器底部进行保护。同时,要时刻测量转运容器在吊装过程中厂房等的环境温度,如果高于设计温度,必须停止吊装作业。

5) 在将转运容器(TC)/干法屏蔽容器(DSC)吊离乏燃料池时,容器表面剂量率将有所升高。在容器吊装及后续操作过程中,辐射防护人员应到场持续监测场所剂量率,在设施运行期间应持续监测场所剂量率。其中,容器外表面剂量率 ≤ 2 mSv/h 或 10 mSv/h, HSM 外表面剂量率 ≤ 1 mSv/h。

6) 在从水池到干式贮存模块贮存的整个转运过程中,转运拖车(TT)的运行速度要严格执行操作规程相关要求,不能过快。

4. 启示

综合考虑美国的乏燃料干法贮存监管经验和我国核安全监管工作开展情况,可以得出以下几方面的启示:

1) 行政许可方式和审批办法

美国乏燃料干法贮存许可方式分为通用许可和特定场址许可两类,适用于在堆干式和离堆独立贮存两种情况,鉴于我国核电分布情况和核电厂面临实际形势的差异性,可以结合实际情况,灵活应用两种方式并在建立相关的法规规章时明确相关的要求。

2) 关于容器的审评

无论转运屏蔽容器还是贮存容器,均是乏燃料干法贮存系统中最为关键的设备,是美国核管会关注的焦点和核心。针对乏燃料干法贮存相关的容器,核管会建立了一整套相关的技术标准和规范及专门的取证机制。其中,《干式容器贮存系统标准审查计划-最终报告》(NUREG-1536)、10CFR72 的 L 部分以及《乏燃料干式容器贮存系统的标准检查计划》明确了具体审核标准、详细的制造和取证要求,规定了乏燃料贮存罐设计、建造、测试和维护必须满足的条款。国内可以参考该体系,综合考虑相关经验和国内实际情况,针对性的建立适合于我国国情的乏燃料干式贮存容器取证和审查机制。

3) 管理技术的成熟和多样化

美国“一次通过”的开式核燃料循环政策决定其所有核电站乏燃料都必须长期贮存。基于此,美国在湿法贮存和干法贮存方面都积累了丰富经验。对目前已有的 8 万多吨乏燃料,除每个核电站配套建设的在堆贮存水池外,几乎所有核电站都根据需求提出并建造了干法贮存设施,以应对地质处置库延迟建造的滞后形势。同时,美国开发了一系列湿法干法贮存技术及与之配套的容器和法规技术标准文件,为

拓展国外市场奠定了坚实的基础。国内可以统筹规划闭式循环政策及能力建设,并根据实际的乏燃料贮存需求,启动相关标准制定和技术研发、技术储备,保持技术水平与国际水平同步。

4) 完善的法规标准体系和日常管理模式

美国在乏燃料管理方面搭建了营运单位到政府部门自下而上、相互互动的良性循环局面。形成以政府部门为主体、技术支持单位支撑、营运单位全面参与、外围科研单位和咨询机构积极参与的成熟机制,建立了一套涵盖法律、法规、部门规章、技术导则标准、推荐建议、技术报告等在内的层次分明、内容详细、涉及面广的乏燃料管理法规标准体系,在长期的实践应用过程中,逐步完善、发展和优化。同时,针对设施本身,建立了政府定期监督、组织同行评估和专题交流,营运单位在做好日常运维同时,积极与相关研发单位、同类贮存设施单位开展定期交流。为确保乏燃料安全管理提供了保障。

5. 建议

目前,国内在乏燃料干法贮存方面仍处于起步阶段[9],针对干法贮存系统的设计准则、监管制度、技术标准、监控手段、设备自主化等方面还存在一些不足,在政府监管、设施设计、取证申请、技术导则等方面尚未形成体系化能力,建议在相关领域管理可以参考国外做法,群策群力,充分发挥行业参与者的能力和积极性,共同进一步完善适合我国国情的乏燃料干法贮存管理模式。

1) NUHORMS 是一种新的技术,现有的标准并未明确部分干法贮存系统的量化设计参数,只是给出了定性化要求。国内可以通过对设施运行阶段的管理,可以进一步优化安全管理限值及相关量化指标,包括设施设计运行寿期、容器密封性、排风口出口温度和出口剂量率。

2) 加强设施运行状态的监督检查工作。包括:a) 例行或非例行的综合性监督检查和专项监督检查,从核安全管理体系、制度建设及核安全文化建设、法规和许可条件执行、质保体系运转、运行相关核安全物项和活动、实物保护、消防安全、放射性废物管理、辐射防护、应急准备响应及其它方面开展;b) 日常监督。对在运乏燃料干法贮存设施日常管理规范性和有效性开展检查;c) 监督见证。主要是对乏燃料干法贮存设施物项和活动的关键节点或重要试验进行现场监督检查,确保相关活动符合经认可的程序和有关技术标准的要求。

3) 开展核安全定期审评工作。根据乏燃料干法贮存系统的特点,以5年为周期定期评价,内容应涵盖设施设计、事故分析、危险分析、规程制度、应急计划、辐射防护、建(构)筑物、系统和部件实际状态、设备合格鉴定、老化、安全性能、运行管理、质量保证体系运转等,特别是贮存模块本身。

4) 结合国外,特别是法国经验,对设施开展专项检查,针对容器设备、贮存罐、通风系统、混凝土贮存模块等安全重要物项,以及装卸料、回取及应急演练等活动,不定期开展专题性核安全监督检查。

5) 从监管层面和营运单位层面有组织的开展国内外同行交流,就干法贮存系统安全性、运行经验及 NUHOMS 系统本身开展定期交流或同行评估。

6) 营运单位要做好日常巡查管理,确保整个系统在运行期间,各个分区能够正常实现其设计功能和安全目标。同时,强化培训和应急演练,加强核安全文化,不断提升人员技术水平和安全意识。

参考文献

- [1] 2020 年我国核电发电量居世界第二[EB/OL]. 中国能源网.
http://www.cnenergynews.cn/kuaixun/2021/02/08/detail_2021020890703.html, 2021-02-08.
- [2] 美国核未来蓝带委员会. 致美国能源部的报告[R]. 2012.
- [3] (July, 2010) Industry Spent Fuel Storage Handbook. Final Report, Electric Power Research Institute, Washington, DC.
- [4] IAEA. 乏燃料管理方案[R]. 2008.
- [5] 徐健, 万力, 宗自华, 等, 编著. 乏燃料贮存技术与管理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2020.

- [6] 徐健, 王伟, 等. 国外核电厂乏燃料贮存方式对比研究[J]. 中国核电, 2021, 14(6): 901-909.
- [7] 王崇翔, 侯伟. 关于对核电厂内乏燃料干法贮存系统核安全监管要求的研究[J]. 核安全, 2016, 15(1): 11-16.
- [8] 《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》第七次审议会议, 中华人民共和国国家报告(报批稿) [Z]. 2020.
- [9] 洪哲, 赵善桂, 张春龙, 等. 我国乏燃料离堆贮存需求分析[J]. 核科学与工程, 2016, 36(3): 411-418.