

核设施退役简述及国家电投集团退役工作建议

耿忠林¹, 杨广泽², 姚彤², 廖能斌¹, 任力¹

¹国电投核安科技(重庆)有限公司, 重庆

²国核铀业发展有限责任公司, 北京

收稿日期: 2023年6月16日; 录用日期: 2023年7月24日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

核设施退役是核工业发展的重要过程。自从上世纪90年代设立核设施退役治理专项计划以来,我国经过不断的发展,在核设施退役方面取得了一定的突破。本文介绍了核设施退役的流程,以及不同流程包括的具体内容。主要介绍了核设施退役技术中的拆除分解技术、去污技术以及厂址的修复技术。总结了目前国家电力投资集团在核设施退役方面取得的进展,分析了目前我国核设施退役存在的问题,并对此给出了国家电投集团未来在核设施退役行业的发展建议。

关键词

退役, 核设施, 拆除, 去污, 厂址修复

Decommissioning of Nuclear Facilities and Suggestions for SPIC

Zhonglin Geng¹, Guangze Yang², Tong Yao², Nengbin Liao¹, Li Ren¹

¹SPIC Hean Technology (Chongqing) CO., LTD., Chongqing

²State Nuclear Uranium Resource Development Company LTD., Beijing

Received: Jun. 16th, 2023; accepted: Jul. 24th, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

The decommissioning of nuclear facilities is an important process in the development of the nuclear industry. Since the establishment of the special project for decontamination of nuclear facilities in the 90s of the last century, China has made certain breakthroughs in the decommissioning of nuclear facilities after continuous development. This article describes the process of decommissioning a nuclear facility and what the different processes include. It mainly introduces the demolition and decomposition technology, decontamination technology and site repair technology in the

decommissioning technology of nuclear facilities. This paper summarizes the current progress of the State Power Investment Group in the decommissioning of nuclear facilities, analyzes the existing problems of the current decommissioning of nuclear facilities, and gives suggestions for the Group's future development in the decommissioning of nuclear facilities.

Keywords

Decommissioning, Nuclear Facility, Dismantling, Decontamination, Site-Restoration

Copyright © 2023 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

目前我国主要的发电方式有许多种,根据 2022 年国家统计局数据给出,核电在我国发电占比达到了 4.9%,发电量达到了 4177.8 千瓦时[1]。随着国家制定碳达峰碳中和策略,未来我国主要的火力发电占比将会逐渐下降,其他新型能源发电如水电、风电以及核电的占比将有所提高,因此对于这几种发电方式国家将进行大力的发展。

对于核电而言,整个发电的安全性、经济性相较于其他发电方式更高,发电效率也比其他能源形势更好。核电站整个生命周期包括了选址、设计、建造、运行和退役,其中退役是其周期中一个十分重要的环节。不仅关乎着核电站的持续发展,还直接影响着国家的能源发展安全。

核设施退役最早提出于 20 世纪 60 年代,但真正具体实施的时间则是 20 世纪 80 年代以后。21 世纪以前一些小型研究堆、放射性污染设施以及早期的核电站开始退役,而到了 21 世纪以后,许多的大型核设施也相继开始了退役。我国上世纪 90 年代开始涉及核退役方面工作,1990 年设立了“核设施退役去污”专项,而后在 2008 年将其改为“核设施退役及放射性废物治理”,至此我国全面开启了核设施退役工作[2]。

相较于欧美国家而言,我国在此方面的起步较晚,其技术储备和知识基础较为薄弱。但是多年以来,国家电力投资集团经过不断的发展以及开展相应的技术研究,掌握了退役关键技术和设备研发、退役放射性废物处理与处置技术服务等多方面能力。本文结合目前核设施退役的发展情况,介绍了核设施退役方面的相关内容,以及国内外的的发展情况。为后续核设施退役发展提供一定的总结性参考。

2. 核电站退役流程简介

核电站退役流程主要包括了三个阶段:前期准备阶段、实施阶段和收尾阶段。核设施退役是解除一座核设施的部分或全部监管控制所采用的行政或技术活动,退役的最终目标是无限限制开放或利用场址。但是核设施退役不包括铀矿山废石场和尾矿库与放射性废物处置(库)场的关闭[3]。其退役流程如图 1 所示。

前期准备阶段包括了:退役策略选取、职责分工划分、放射性源项调查、退役工作人员培训、编写退役文件以及估算退役成本几方面工作。其中退役策略的选取有立即拆除、延缓拆除和就地掩埋三种方式[4]。其选取主要是依据政治、社会、地理因素,技术因素及经济因素。退役策略的选取不单只采取其中一种,也可组合选择的方式进行。职责分工主要是对政府、监管机构以及被许可方对于核电站工作职责的划分。放射性源项调查不仅是对核电站内放射性元素的种类和分布进行检测,还包括调查其他危险

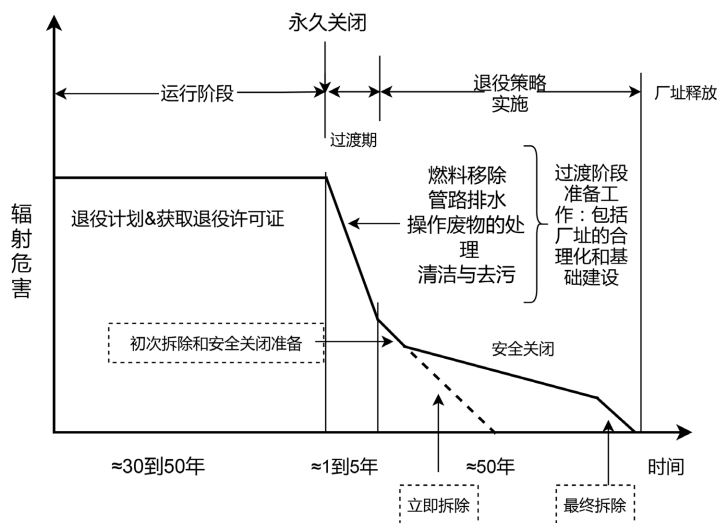


Figure 1. PDF for decommissioning
图 1. 核设施退役流程图[3]

物质(如石棉、金属钠、铍、汞、重金属等),有的还要求对设备和建筑物的老化和安全程度做出评价。从事此方面工作的人员需要对其进行专业的培训。而对与整个退役过程还需要进行多种文件的编写以及对退役资金的估算。

实施阶段主要包括:乏燃料的卸除、去污、反应堆的拆解以及退役废物管理。无论选取了哪种退役策略,反应堆在关闭后都需要对乏燃料进行卸除。经验表明,去除乏燃料是反应堆退役过程中非常重要的一步。最优先的方案是尽早将乏燃料移至储存设施、后处理厂或处置设施。去污是采用不同的手段,将放射性污染物从核设施表面或内部全部或者部分除去所进行的操作,主要目的是降低作业场所和作业对象的放射性水平以及受到污染的设备 and 材料的废物等级,使要分类的材料或作为固态放射性废物处理的材料的总量最小化,增加设备、材料或房屋回收和重新使用的可能性。反应堆通常都有多个系统及大量的金属构件和设备部件。因此,当核反应堆退役时,必然会涉及到这些金属构件和设备的解体 and 拆除问题:一则是要将这些构件和设备解体、拆除后移出原厂;二则是将它们切割成一定尺寸,以便进一步的处理。核设施退役过程中产生的放射性废物的管理是退役规划和时间安排中的一个重要因素,应当提前对其进行合理的规划安排。

收尾阶段工作主要包括厂址的修复和安全监管。指的是在核电站的所有放射性的材料、设备和部件都拆除以后,厂址可无限期的使用或恢复成绿化地带。但是不可能完全消除污染或将场地恢复到其背景条件,这可能既无法实现也没有必要。核电站修复项目的生命周期分为几个阶段:问题定义、修复调查、修复规划、修复行动、项目结束,以及潜在的安全管控。

3. 核电站退役技术简介

根据核设施退役通用技术体系,退役技术可以归纳为:源项调查、去污、拆除和解体、废物治理、废物分类检测、厂址修复等。本文介绍了拆除和分解技术、去污技术以及厂址修复技术。

3.1. 拆除分解技术简介

在核电站退役实施阶段,堆本体、堆内构件、一回路管道、主循环泵、蒸汽发生器、稳压器等部件均须要拆除分解。

针对金属构件,常用的切割技术可大致分为冷切割和热切割两大类。冷切割主要包括金刚石绳锯、高压水喷射切割、磨料喷射切割等。高压水切割的原理是利用射流速度约 900 m/s 的高压水冲击被切割材料,产生剪切力和腐蚀作用,能切通甚至穿透被切割材料,切割残渣也被射流水带走。热切割主要有氧炔焰切割、电弧切割、等离子体弧切割、爆炸切割、铝热剂反应喷枪切割及激光切割等方式。激光切割的原理是利用聚焦后的激光光束照射在被切割材料上产生局部高温,被切割材料从而发生物理及化学变化,材料被烧蚀或碳化,但是激光切割不能保证切得很干净。

对于高放射性的核设施而言,其拆除需要一个自动化的切割程序,在正式的切割之前,自动化的切割程序会对所要进行切割的设施进行数字模型的构建。Kim 等[5]人利用 3D 扫描获取现场真实信息,并应用空间信息处理技术更新核设施的数字模型,解决数字模型和实际现场环境数据在核设施部件的形状、位置和方向方面可能不同的问题。对于切割技术而言,Shin 等[6]人利用 6 千瓦激光器在水下进行了 50 毫米和 60 毫米厚的不锈钢板的切割实验,研发改进了一款具有较好切性能的水下切割头。国内原子能院在中放管沟的退役过程中开展了管沟的不锈钢覆面的拆除研究,利用了液压金属切割机作为钢覆面分隔了设备,采用了拆除前切割、拆除分割装备装桶等工艺路线。研发了放射性污染物混凝土破拆雾化压制粉尘技术[7][8]。

3.2. 去污技术简介

去污的定义是通过洗涤,加热,化学电化学,机械清洁和其他方法从表面上去除和清洁放射性污染的过程。去污的有效性是通过称为去污因子(DF)的公式计算的,它是去污前材料的污染水平与去污后材料的污染水平的比值。DF 越大,去污效果越好。去污作业前需要对放射性污染物的来源、放射性核素表面污染特性及主要污染核素进行分析。目前国内外主要应用的有传统四大去污技术:机械去污、化学去污、电化学去污及熔炼去污,及一些新的技术(泡沫去污、激光去污等)[9]。以下详细介绍了各种去污技术。

1) 机械去污:方法可分为表面清洁(如清扫、擦拭、洗刷)或表面清除(如喷砂、刮削、钻孔和剥落)。机械去污既可以作为化学去污的替代方法,也可以与化学去污同时进行,或者与化学去污依次进行。适用于研磨表面和通过剥落或划痕去除混凝土,其中一些也适用于非金属表面,如塑料。

2) 电化学去污:是通过电化学溶解原理,除去受到放射性污染的金属表面的薄膜层,从而达到去污的目的。适应于核设施退役过程中产生的碳钢、不锈钢、铝等金属表面深度去污,以实现清洁解控和再循环再利用。

3) 化学去污:是利用化学方法去除沉积在部件内外表面上的放射性物质,在拆除、拆卸之前,化学去污可以应用于无法进入的表面、设备和管道,通常可以远程进行。化学去污通常对多孔的表面无效。在使用化学去污时,必须注意空气中物质的产生、化学制剂的使用以及二次废物的处理和调节。

化学去污可分为化学泡沫法、化学凝胶法、氧化还原法以及气相等[10],根据使用试剂的不同,化学去污可分为两种工艺,即软工艺(使用稀释的化学品)和硬去污工艺(使用高浓度的化学品)。软工艺使用具有低腐蚀性的试剂,可以很容易地应用于整个一回路,但去污效果有限。相比之下,硬工艺可以达到更好的去污效果,但并不总是适用于整个一回路。目前,最经常使用的软工艺是加拿大去污和修复工艺(CANDEREM)、低氧化态金属离子(LOMI)、化学氧化还原去污(CORD)和退役用去污(DFD)。这些过程主要用于旨在减少剂量率的净化。一般来说,它们分两个或多个周期进行。所用去污剂一般可为无机酸(硫酸、硝酸、盐酸等)、有机酸(草酸、柠檬酸、酒石酸等)、氟硼酸等[11]。

4) 熔炼去污:是通过选择合适的炉型,将污染金属与特定组分的助熔剂一起熔炼,使废物中大部分放射性核素富集到炉渣和滤尘中。或者通过采用合理的炉衬配方来吸附部分放射性核素。可有效去除金

属废物中放射性核素，达到净化金属废物的目的，实现资源回收利用，并且便于放射性废物处理，实现放射性核素的包容。

5) 泡沫去污：是通过用含亲水基团或疏水基团的喷洒洗涤剂或润湿剂，以高压喷射来实现的。泡沫作为化学去污剂的载体，在待去污材料表面上形成，在净化后坍塌并被排出。它产生低容量的二次废物，并已应用于一系列具有复杂内部配置的大型碳钢阀门。与使用化学去污液相比，去污泡沫减少了 80% 的二次废物[12]。为了克服常规水性泡沫在冬季效率低下的问题。

6) 激光去污：是通过使用激光照射，物理剥离基体材料的上层来去除深埋在材料表面的污染物。该过程是非接触/非磨蚀去污过程，可以用于替代化学品或磨蚀性去。去污过程可以通过光纤光束传输系统远程进行，激光头可以由机器人操纵，从而避免工人暴露在潜在的放射性区域[13]。激光清洗的典型机制是蒸发、剥落、消融、产生冲击波。

各类去污技术在实际应用过程中，往往可以将几种方法结合起来使用，以达到理想的去污效果。对不同的去污对象，使用的去污方法也大不相同，常用去污方法优缺点比较如表 1 所示。

Table 1. Comparison of decontamination methods

表 1. 常用去污方法优缺点对比

去污技术	优点	缺点	适用范围
化学去污	所需工作时间较少，能够处理难以接近的表面污染物；能够实现就地去污和远程遥控操作两种操作模式；化学去污剂易于制取且能够重复使用；去污过程中产生的气载有害废物较少。	难以处理表面面积较大、多孔、易腐蚀等特性的表面；化学去污剂种类繁多，去污工艺复杂，运行成本及支持性费用较高；可能产生混合废物，液体废物量大。	主要应用于管道、设备、部件和设施表面放射性污染物的去除。如反应堆回路冷却剂系统之类系统的设备与管道，对整个系统或系统的一部分进行一揽子去污。
物理去污	对环境要求较低，工艺简单易控制，成本及操作风险较低；	产生的二次固体废物量较大，且部分表面去除技术对去污对象表面伤害较为严重。	对机器设备或其零部件和工具等一个个去污；对建筑构造无的钢筋混凝土、钢材及其图层、衬里等去污
电化学去污	操作时间较短，费用较低，对大面积或形状复杂的导电部件去污效果显著；去污操作对现场放射性气溶胶与人员外照射剂量影响均不大，对现场辐射防护要求较低。	要求去污表面导电，且需要将去污对象放置于电解槽内；去污过程中产生氢气和氧气，需保持较好的通风条件，对环境要求较高。	核设施退役过程中产生的碳钢、不锈钢、铝等金属表面深度去污，以实现清洁解控和再循环再利用
熔炼去污	能够有效地去除金属废物中的放射性核素，熔炼后便于处理富集放射性核素的固体废物。	前期处理工序复杂，去污成本高，烟气产生量大。	金属废物

3.3. 厂址整治及环境修复技术简介

在核设施运行过程中，由于管道泄漏等原因会造成土壤污染，在退役过程中，必须对这些污染土壤进行修复，已使厂址得到释放使用。土壤修复技术主要有三种，分别为化学修复、物理修复和植物修复技术[14]。

1) 化学淋洗：化学修复的一种方法，主要是利用化学药剂清洗土壤所含污染物，使土壤中的污染物在淋洗剂中的溶解度加大，使用液压压头驱动化学药剂，把药剂注入到污染土壤，从土壤提取溶有污染物的浸出液，利用水处理技术析出污染物。一般淋洗剂可以是无机淋洗剂(如酸、碱、盐等无机化合物)、

络合剂(如 EDTA、NTA、DTPA、柠檬酸、苹果酸等)、表面活性剂。

2) 玻璃固化: 物理修复的一种方法, 主要是将石墨电极插入需去污的土壤中, 产生大量的热量使土壤变为熔融态, 在地表熔融的同时电极随之下沉, 使熔融态土壤的量增加, 当石墨电极达到了要求的深度的时候, 切断电流, 使之冷却, 形成玻璃固化体, 将放射性物质被包在玻璃体中。

3) 植物修复技术: 主要将一些植物种植在将要修复的土壤中利用植物的茎、根、叶的特殊的吸附作用吸附放射性核素, 最后将该植物收集进行焚烧, 将焚烧后的残渣进行固化处置, 从而达到修复目的。单独的使用植物修复技术对土壤中的沾污核素富集提取的有效性是有限的, 一般情况下多是和一些化学试剂联合使用以强化植物的富集作用。

三种不同的修复技术有着不同的优缺点。利用化学淋洗的效果更好, 操作也更为简单, 使用范围广, 但是容易导致二次污染。玻璃固化的方式适用面积小, 程度较高的放射性污染, 但是其成本较高, 工程量较大。植物修复技术投资和维护成本低, 操作简便, 不造成二次污染, 不破坏生态环境, 可以永久性解决土壤放射性污染的问题, 然而存在吸附放射性核素的植物后期处理难度大, 修复的时间周期长的问题[15]。

4. 国内外核设施退役情况介绍

4.1. 国外核设施退役情况

根据世界核能协会统计, 截止到 2022 年 7 月, 全世界共有 439 座正在运行的反应堆[16]。截至 2021 年 12 月, 全球共有 202 座反应堆已经关停, 有的正在退役, 有的已经成功退役。在欧美地区, 核电站主要退役国家有美国、法国、德国、俄罗斯等。而亚洲地区主要为日本、韩国。

欧盟因政策影响, 除法国外 1/3 的反应堆至 2025 年都被计划关停。但受乌克兰战争带来的能源危机影响, 德国决定延缓该国部分核电反应堆的退役计划, 到 2023 年 4 月 15 日, 德国关闭了最后三座核反应堆。俄罗斯目前有 35 座反应堆, 其中的 25 座已经超过设计寿命仍在服役。到目前为止有 5 台机组已经停止运行并卸除燃料, 但拆除工作尚未开始。亚洲有 14% 的世界反应堆处于永久关闭状态, 日本有 23 座反应堆, 韩国有 2 座。福岛第一核电站事件发生后, 日本和韩国提高了对核电站的安全要求, 并承诺逐步淘汰核电。结果是日本 33 座运行中的 24 座仍在关闭, 9 座反应堆已经重新启动。其中 6 座将于 2020~2030 年关闭。韩国没有计划关闭任何核电站, 但其国内的核电站正在逐步的老化。北美有 25% 的反应堆处于永久关闭状态, 美国有 37 个, 加拿大有 6 个。在美国, 有 53 座反应堆(约占全国核电站总数的 54%) 的运行反应堆已经使用了 40 年或更长时间。所有这些反应堆都已获得美国核管理委员会(NRC) 的 20 年许可证续签。这些许可证将持续至 2050 年。据估计, 到 2030 年全球约有 200 多台现役的核电机组将关闭, 其数量约占全球现役核电机组的一半, 退役的市值规模估计将炒股 1000 亿美元。其中欧洲约有 150 台现役机组将关闭, 占到了全球退役份额的 70% 左右, 其欧洲退役市值估计将达到 800 多亿美元。东亚地区主要是日本, 北美地区则主要是加拿大。美国在 2030 年后大部分的机组都将达到延长后的服役寿命。随着这些反应堆的关闭和退役, 全球核设施退役行业也将在未来不断的增长[17]。

国外核设施退役技术较为成熟, 全球范围内核设施退役解决方案核心厂商主要包括美国的 Energy Solutions、NorthStar Group Services Inc.、Holtec Decommissioning International 和 Westing House (西屋电气)。法国的 Orano 等。德国的塞拉菲尔德有限公司、Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH 等。这些企业具有完善的退役解决方案以及核心退役技术, 参与了众多核设施退役工程。

4.2. 国内核设施退役情况

截止到 2022 年末, 我国共有 22 座核电站, 运行核电机组为 55 台, 装机容量为 56985.74 MWe。目

前我国核电事业正处于发展的上升期，核电站的投产使用时间较晚，大约 72%的核电机组运行堆年限少于 10 年，然而全球 64%的核电机组运行年限都超过 30 年。如果按照核电站服役时长 60 年考虑，我国目前还未达到核电站退役的时间。并且相比较欧美国家大型核电设施的退役经验较为薄弱。我国的核设施退役始于上世纪 90 年代初，主要针对的是早起军用核设施。最早运行的秦山仪器核电站要到 2024 年后才开始关闭退役。对于我国第一个核反应堆 101 重水核反应堆是 1995 年我国从苏联进口的，经过了五十年安全的运行，直到 2007 年底永久的关闭，进入到了退役阶段[18]。其整个退役时间流程如下所示：

1) 2004~2007.12: 运行状态及退役前期技术准备；

2) 2007.12: 反应堆最终关停；

3) 2008.1~2010.12: 停堆封存过渡期(停堆监护期)；

4) 2011.1~2020.12: 实施退役(其中 2011.1~2015.12 堆外系统、部件以及构筑物退役、2016.1~2020.12 堆本体部件及构筑物退役)；

5) 2021.1~2030.12: 收尾、并最终完成退役；

中国退役治理的主要技术力量集中于中核集团，中核集团作为中国早期核设施退役治理的主要力量，承担了中国大陆绝大部分老旧核设施的退役工作，已经实施了多项重大退役工作。具有较为成熟的退役技术和经验。中核集团退役力量主要在中核 404 有限公司、中国核电工程有限公司、中核四川环保有限公司、中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院等。

中核集团下属的中核 404 有限公司参与了上海应用物理研究所小型反应堆、中国工程物理研究院 300 堆、清华大学 200 堆等核设施退役项目。并针对我国退役治理中的难点，开发了包含去污、源项调查、拆除及废物转运检测的多种工装，加快了退役进程，培养了专业人员团队，提高了其在国际核退役市场的竞争力。

中辐院是我国最早从事核设施退役与放射性废物治理研究和工程实施的单位之一，是我国首个核设施退役项目的总承包单位。中辐院具有丰富的退役经验，退役的核设施包括天津铀同位素浓缩试验装置、青海 221 厂、750 厂及中国工程物理研究院核设施，其优势领域在于源项调查能力、去污技术、废物最小化、水泥固化技术。但是，其对于退役后产生的废物处置领域仅局限于安全评价阶段，后续的处置厂设计、工程施工及核素迁移未曾涉足。

中广核集团有限公司的退役治理业务由其下属中广核工程有限公司、中广核铀业发展有限公司负责。中广核工程有限公司是集团退役业务、退役能力建设责任单位，负责退役项目的组织实施，核心技术及产品的研发。中广核铀业发展有限公司作为中广核后端业务总揽单位，参与公海铁联运体系，拥有放射性物质铁路商运资质。

5. 存在问题以及发展建议

5.1. 目前退役行业存在的问题

就目前看来，核电站退役的核心技术仍然由一些欧美国家把控，我国在核设施退役方面仍有许多地方需要加强和提高，不仅仅在技术层面需要加强，在政策监管方面也同样需要提高。针对目前我国核电站退役的相关发展情况，总结出存在以下方面的问题。

1) 监管机构: 许多国家都建立了独立的核安全监管机构，这些机构受国会、总统或内阁的直接领导，同时保持足够的独立性和权威。目前，中国仍然缺乏一个独立的核退役监管机构，且监督核退役的相关部门的职能一定程度上是重叠的，而这些部门本身并没有以有效的方式协调；

2) 法律法规: 新《核安全法》中的许多条款仍然过于模糊，需要其他行政法规的支持。这一特点使

得法律不明确, 执行的结果可能不一致, 特别是对外国投资者而言; 多项标准, 如《核电厂退役费用编制方法》《核设施退役厂址土壤中残留放射性水平规定》等, 均处于征求意见阶段, 未能达到实施标准, 无法指导退役规划; 管理整个核部门和行业的基本法——《中华人民共和国原子能法》尚未通过, 也没有通过该法的确切日期, 这是一部可以整合目前零散的法律框架并加强国家核损害责任制度的重要立法;

3) 人员及预算: 核设施退役需要大量的人力财力, 中国目前的退役人员和预算仍然低于全球的平均标准。目前我国核设施退役尚处于起步阶段, 退役资金费用估算计算、乏燃料及放废管理费用尚无标准。退役许可证制度不完善, 无法满足未来的退役需求。

4) 核心技术: 退役关键技术仍然有待进一步的发展。

5) 应急预案: 核设施退役过程存在污染辐射问题, 风险管控应急预案仍需要进一步的加强和完善。

6) 乏燃料处理: 在对乏燃料进行移除时, 存在不可预见问题, 比如运行商计划将其运输回供应商, 存在是否可行的问题。

5.2. 国家电投集团退役行业发展状况

国家电力投资集团秉承“市场化、专业化、企业化”的理念, 发展专业化退役公司, 加大关键技术与工程能力建设, 鼓励更多企业进入退役市场, 完善便于许可证转让、基金管理等法规政策。近年来通过不断的发展也取得了一定阶段性的成果:

1) 整合了内部资源, 优化退役业务顶层设计

2021 年国家电投下属公司国核铀业进行资源整合, 拓展机构和业务规模, 并成立核环保产业创新中心, 初步完成核环保业务顶层设计。其下属企业上海核工院、重庆核安科技、国电投科学技术研究院均拥有专业设备齐全、技术能力领先的专业团队。已具备退役咨询服务、EPC 总包、关键技术及设备研发等能力。制定了集团核环保产业的“十四五”发展, 将退役咨询服务、经济型评价、核心技术研发等纳入了集团的发展战略。

2) SDCZC 项目取得突破

2021 年, 在国防科工局的大力支持下, 项目先后取得同意开展前期工作的“小 routes”文件和同意开展项目建设的核准文件, 取得了历史性的突破进展。项目一期一阶段工程计划 2025 年建成投运, 为山东区域核设施运行及退役放射性废物的妥善处置提供有力保障。

3) 退役关键技术和能力

国家电投在退役源项分析、设备去污及切割解体技术、退役废物处理处置、退役仿真平台建设等方面科研攻关, 取得一定新进展。

在退役源项分析方面: 已经掌握了一套较为完善的源项和屏蔽分析程序系统, 如 DOORS 程序包、ORIGEN-S 和 CORA 程序等, 并自主研发了结构材料三维活化源项分析程序, 可以支持活化源项和沉积源项分析和控制措施研究。

在设备去污方面: 掌握了多种先进高效的去污技术, 能结合特定去污对象, 提出针对性的去污方案。在秦山三厂厂区去污热检修车间内开展了干冰去污技术的探索性试验, 去污效果满足去污热检修车间清洗标准。

在设备切割解体方面: 积累了一定的研究经验与成果, 重点掌握了高放射性大型设备切割和拆除的工艺和技术, 具备制定整体工艺与技术方案的能力。

在废物处理处置方面: 已陆续开展与退役废物管理相关的技术研究, 如退役废物产生量预测与分析等, 并在成功设计秦山一期、红沿河等传统电厂三废处理工艺的基础上, 引进消化吸收了 AP1000 三废处理技术, 开展了大量三废处理与高效减容工艺的技术研究, 同时也开展了近地表处置场的设计和评价

工作，具备扎实的三废处理处置工艺设计和分析能力。

在退役仿真平台建设方面：针对便于退役的数据库要求搭建了仿真平台，实现了目前主流软件和系统的数据接口，对辐射场的数据进行接入和可视化，在此基础上实现了比较详细的退役活动三维仿真与分析。

4) 国内外合作交流

2020 年以来，国家电投已与安萨尔多、EnergySolutions、HOLTEC、法马通、西屋等国际专业退役公司建立良好的战略合作关系。在国内方面，在国防科工局和中核集团的大力支持下，国核铀业加入原子能院 101 重水堆退役工程联盟，并与相关企业合作实现了退役业务的实质性突破。此外，国家电投积极参加国家行业主管部门牵头的等多项核环保课题研究，学习中核、中广核集团先进经验模式，结合自身情况特点，谋划集团相关策略。

5.3. 国家电投集团未来退役行业发展建议

结合目前我国核设施退役所存在的一系列问题，国家电力投资集团总结出以下几点发展建议。

1) 完善法律法规

设立独立的核设施退役监督管理机构，避免不同部门的职能重叠，提高监管效率。明确和细化核设施退役的相关法律条例，加强执行力度。加速通过《中华人名共和国原子能法》，使得相关法律得到整合。

2) 加强技术攻关

核设施退役涉及技术范围广、难度大、复杂性强，必须集中精力开展技术攻关，重点在拆解、去污等领域研发优势技术。研发适用于 AP/CAP 系列堆型的退役技术及装备，提高竞争力，在厂址环境修复技术方面，积极开展应用研究，探索多种修复技术结合，为后续开展相关工作提供技术储备。实行试点先行的政策，对创新技术开展实验室规模小试、工程大试及热式，积累经验为技术成熟铺路。对于急需且有成熟应用的退役技术，也可采用引进，消化吸收，再创新的方式，掌握相关技术。

3) 优化管理方式

核设施退役管理直接影响整个退役过程的全部方面，需要与合理的管理方式。针对此问题，可参考秦山 1 号、大亚湾 1、2 号机组的退役示范工程，学习参考管理方式、标准制定等，为海阳核电站退役提供参考。

4) 深化国内外合作

在国内，围绕 101 重水堆退役工程联盟研究讨论深化合作，参与装备供应等更多退役业务，为集团核电站退役打好基础；积极与中核集团、原子能院深化合作，学习先进技术及管理经验。国际上，积极参与核退役市场，学习国际先进理念和先进技术，汲取国际经验和教训。在现有技术基础上，坚持以我为主的原则，与国际先进退役企业沟通合作，消化吸收优势技术，推进集团优势技术项目研发落地。

5) 完善退役计划

核设施退役持续时间长，复杂程度高，德国 Greifswald 核电厂因退役仓促，缺乏退役准备，自 1995 年收到许可至今仍未完成，因此必须在永久关闭前做好退役准备。坚持“一机一策”原则，实行机组建档立卡管理，运行期间完善各项关键参数的记录，做到“一项不缺，一项不漏”，为制定机组退役计划做足准备。

6) 强化风险控制

核设施退役人员会接触到污染强、辐射剂量率高、易燃有毒等多种危险物质，退役过程中会产生放射性废物，必须有针对性地开展必要的准备工作，应及早考虑将来可能面临的潜在风险，做好完善的应

急预案, 减少未来付出的代价。

7) 加强人才队伍建设

核设施退役是多钟技术组合的复杂工程, 需要一支专业能力强、技术齐全的队伍, 有必要整合培养集团内退役相关专业人才, 同时引进国内外一流退役人才, 形成一支专业化的退役团队。

参考文献

- [1] 中国大连高级经理学院. 中国能源发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022: 94-95.
- [2] 吴杰, 张生栋, 刘刘, 等. CIAE 核设施退役技术研究现状及展望[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(S1): 143-150.
- [3] 任宪文. 核设施退役的环境安全[J]. 辐射防护通讯, 2006(1): 1-5.
- [4] 徐乐瑾, 沈慧怡, 杨军. 核设施退役现状及技术研究展望[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 65-76.
- [5] Kim, I., Hynn, D., Joo, S., *et al.* (2020) A Methodology for Migital Mockup Update Based on the 3D Scanned Spatial Information for the Automated Dismantling of Nuclear Facilities. *Annals of Nuclear Energy*, **139**, Article ID: 107238. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107238>
- [6] Shin, J.S., Yong, S.O., Park, H., *et al.* (2019) Underwater Cutting of 50 and 60 mm Thick Stainless Steel Plates Using a 6-kW Fiber Laser for Dismantling Nuclear Facilities. *Optics & Laser Technology*, **115**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.02.005>
- [7] 朱欣研. 中放管沟不锈钢覆面拆除装备技术研究[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2011: 226.
- [8] 朱昕研. 开放场所放射性污染混凝土破拆雾化压制粉尘技术[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2011: 225.
- [9] 邹树梁, 徐守龙, 杨雯, 等. 核设施退役去污技术的现状及发展[J]. 中国核电, 2017, 10(2): 279-285.
- [10] 陆海燕, 孙颖. 化学去污技术的发展及其在核设施退役中的应用[J]. 环境技术, 2002(1): 25-32.
- [11] 李江波. 核设施化学去污技术的研究现状[J]. 铀矿冶, 2010, 29(1): 41-44.
- [12] 刘雨昕, 郑佐西, 张忆, 等. 臭氧预处理方法在不锈钢去污过程中的应用[J]. 核化学与放射化学, 2016, 38(4): 247-251.
- [13] 马梅花, 高智星, 汤秀章, 等. 不锈钢放射性模拟样片在空气中的激光去污技术研究[J]. 核化学与放射化学, 2017, 39(1): 69-71.
- [14] 刘义, 刘庆广, 黄永凤. 土壤修复技术研究进展[J]. 德州学院学报, 2019, 35(6): 47-51.
- [15] 周骏, 闫国杰, 施曙东. 土壤修复技术进展及国外发展趋势[J]. 广州化工, 2016, 44(22): 12-14.
- [16] Sama, B. (2021) World Nuclear Performance Association 2021. World Nuclear Association, Douglas, 4-13.
- [17] 中国产业研究院. 2022-2026 年国际重点核退役发展运行及竞争趋势分析报告[M]. 北京: 中国产业研究院, 2022: 15.
- [18] 夏延龄. 101 重水研究堆退役[C]//中国核学会. 21 世纪初辐射防护论坛第三次会议暨 21 世纪初核安全论坛第一次会议论文集. 北京: 中国原子能出版社, 2004: 51-58.