

Study on the Standardized Treatment and Control Measures of Radioactive Waste in Nuclear Power Operation

Maokun Cao Lihe Wang Junqiang Yang

Lufeng Nuclear Power Co., Ltd., Shanwei, Guangdong, 516500, China

Abstract

As the global energy transition accelerates, nuclear power—recognized as a clean and efficient low-carbon energy source—has seen its share in the energy supply system steadily increase. However, radioactive waste generated during nuclear operations, if improperly managed and controlled, poses potential threats to the ecological environment and public health, thereby constraining the sustainable development of the nuclear industry. Based on real-world nuclear operation scenarios, this paper first analyzes the core influencing factors of standardized radioactive waste management and control. It then proposes a tiered standardized approach from four dimensions: classified treatment, end-to-end process control, emergency response, and workflow optimization. These recommendations aim to provide theoretical support and practical guidance for nuclear enterprises to enhance radioactive waste management capabilities and mitigate environmental risks.

Keywords

classification processing; full-process control; emergency response; environmental avoidance

核电运行中放射性废物的规范化处理与管控措施研究

曹茂坤 汪立和 杨俊强

陆丰核电有限公司, 中国·广东 汕尾 516500

摘要

伴随全球能源结构转型加速这一情况, 核电作为清洁又高效的低碳能源, 在能源供给体系里面的占比持续提升。不过, 核电运行过程当中所产生出来的放射性废物, 如果处理以及管控方面做得不当, 就将会对生态环境、公众健康形成潜在的威胁, 从而制约住核电行业的可持续发展。本文以核电运行的实际场景作为基础, 先开展该放射性废物规范化处理以及管控的核心影响因素的分析工作, 再从分类处理、全流程管控、应急处置以及流程优化这四个维度, 提出来分层规范化处理以及管控的方法, 给核电企业提升放射性废物管理水平、规避环境风险提供理论方面的支撑以及实践方面的参考。

关键词

分类处理; 全流程管控; 应急处置; 规避环境

1 引言

在“双碳”目标发挥引领作用之下, 核电依靠低排放、高稳定性的好处, 变成我国能源战略布局的重要组成部分。到目前为止, 我国核电装机容量已经处在全球前列, 并且多个新建核电项目在稳步推进, 核电产业正在进入规模化发展的一个新阶段。然而, 核电运行过程之中不可避免地会产生放射性废物, 这类废物有着放射性强、危害周期长、处理难度大等特点, 它的处理与管控质量直接和核电项目的合规运营、生态环境安全以及社会稳定有联系^[1]。所以, 深入研究核电运行中放射性废物的规范化处理与管控措施, 优化管理流程、提升管控效能, 对于推动核电行业实现安全、绿色、

可持续发展具有重要的现实意义。

2 核电运行中放射性废物规范化处理与管控的核心影响因素

2.1 废物自身特性对处理与管控的基础影响

从放射性活度的角度来看, 可以分成高、中、低水平放射性废物, 高放废物放射性强、危害程度大, 需要采用屏蔽、固化等特殊处理的工艺, 而且管控过程要满足更为严苛的安全标准; 中低放废物占据核电运行废物总量的 90% 以上, 虽说危害相对较低, 但仍然需要进行针对性地分类处置, 防止累积性风险的出现。半衰期直接决定了废物的危害周期, 长半衰期废物(例如铀-238、钚-239)的危害周期能够达到数万年乃至更长时间, 需要进行深度处置从而实现长期隔离; 短半衰期废物(例如碘-131、铯-137)能够通过衰变储存到安全水平之后再开展后续处理工作, 管控周期相

【作者简介】曹茂坤(1989-), 男, 中国湖南益阳人, 本科, 工程师, 从事电力能源系统, 核电站运行研究。

对比较短。

2.2 处理工艺与设备性能对管控成效的关键作用

处理工艺的先进性以及设备性能的稳定性,是保障放射性废物管控成效的核心支撑部分。目前,核电放射性废物处理工艺已经形成比较成熟的技术体系,不过不同工艺的适配性、安全性以及效率存在差异,直接对管控质量产生影响。比如,把高放废液进行玻璃固化的那个工艺,能够把放射性的物质稳稳当当地封装到玻璃基质里面去,让泄漏的风险降低,不过这个工艺对于温度、反应时间等这些参数的控制要求特别高,要是工艺参数和标准有偏离,就会使得固化体的性能达不到标准;对中低放固体废物进行压缩减容的工艺,可以有效地让废物体积变小,把储存和处置的成本降低,但是在压缩过程中要是操作不正确,就有可能让废物包装出现破损,引起放射性泄漏。

设备的性能是工艺能够落地的重要保障条件,处理设备所具有的精度、稳定性、耐腐蚀以及抗辐射的能力,直接地决定处理的效果和运行的安全状况。要是设备出现老化、精度不够的情况,就会让处理参数失去控制,对废物处理的达标率产生影响;要是设备缺少有效的抗辐射、耐腐蚀方面的设计,长时间在放射性环境当中运行很容易出现故障,不但对处理效率有影响,还可能引发安全方面事故。除此之外,设备的自动化水平也会对管控的成效产生影响,自动化的设备可以减少人工的干预,降低作业人员受到辐射的风险,同时还能提升处理过程的可追溯性,方便进行全程的监管,而手动操作很容易因为人为的失误造成管控方面的漏洞。

2.3 作业场景与监管要求对管控过程的约束影响

作业场景的复杂状况和监管要求的严苛程度,对放射性废物管控的过程形成重要的约束作用。从作业场景方面来看,核电放射性废物是在反应堆运行、设备检修、燃料更换等多个环节产生的,不同场景的作业环境、废物产生的数量以及风险等级差别比较大。例如,反应堆核心区域所产生的废物放射性活度高、辐射环境复杂,作业人员需要穿戴专业的防护装备,采用远程操作的方式进行处理,管控的难度非常大;而常规检修环节产生的中低放废物,作业环境相对比较安全,管控的重点主要集中在分类收集和临时储存方面。此外,核电场地的空间有限,废物临时储存场地的布局、屏蔽设施的完善程度,也会对管控过程的安全性和便捷性产生影响。

监管要求是推动管控规范化的重要外部约束因素,各个国家都对放射性废物的处理、储存、运输、处置整个流程制定了严格的监管标准。我国采用“国家监管、地方协同、企业负责”的监管体系,生态环境部门通过现场检查、在线监测、数据核查等方式,对核电企业的放射性废物管理工作进行全过程的监管,要求企业建立完善的管理体系、落实管控的责任、留存完整的过程记录。要是企业没有达到监管要

求,就会面临行政处罚、停产整改等后果。同时,监管要求也在不断地升级,随着环保意识的提高和技术的发展,对放射性废物的处理效率、排放限值、处置安全性等方面的要求越来越严苛,倒逼企业持续地优化管控的措施,提升管理的水平。

3 核电运行中放射性废物的分层规范化处理与管控方法

3.1 不同类型放射性废物的分类处理适配性管控方法

中低放的废物存在占比高以及来源广的情况,需要对分类管控进行细化。对于中低放的液体废物,采用“净化然后浓缩接着复用或者排放”这样的处理流程,通过像离子交换、蒸发浓缩等工艺去把放射性物质去除掉,处理之后的废水需要达到排放标准才可以排放或者循环利用,浓缩液则在固化之后进行处置;中低放的固体废物分成可压缩和不可压缩这两类,可压缩的废物(例如污染的衣物、纸张)在经过压缩减容之后,采用水泥固化、沥青固化等工艺来进行封装,不可压缩的废物(例如废弃的设备、构件)在经过去污处理之后,如果达标就能够回收利用,不然就在封装之后送到专用的处置场;中低放的气体废物在经过高效过滤、活性炭吸附等工艺净化之后,通过高空排放筒排放出去,排放之前需要实时监测放射性活度,保证符合排放限值。

此外,对于含有特殊化学成分的放射性废物,需要在分类处理之前进行预处理,比如腐蚀性的废物需要做中和处理,易燃性的废物需要做惰性化处理,避免对后续处理工艺的安全性和稳定性产生影响。同时,要建立完善的分类标识体系,对不同类型的废物进行清晰标注,把放射性活度、半衰期、产生环节等信息注明,确保全程能够追溯,避免出现混存、混运的问题。

3.2 全流程处置环节的规范化管控可靠性方法

收集环节需要遵循“分类收集、定点存放”的原则,在各个废物产生点设置专用的收集容器,容器需要具备抗辐射、耐腐蚀、密封性能良好等特点,并且根据废物类型配备对应的屏蔽设施;收集过程当中需要小心轻放,避免容器破损,同时做好收集记录,把废物来源、数量、特性等信息明确,实现源头追溯。储存环节分成临时储存和长期储存,临时储存的库房需要合理布局,划分出不同类型废物的储存区域,设置多重屏蔽、通风、监测设施,实时监测库房里面的放射性活度、温度、湿度等参数,定期对储存容器进行检查,发现破损、泄漏等问题及时处理;长期储存需要根据废物特性选择合适的储存方式,高放废物采用深地质储存,中低放废物可以采用近地表处置场储存,保证储存过程安全可控^[2]。

运输这个环节属于管控方面的薄弱那种环节,需要严格去依照《放射性物品运输安全管理条例》来做事,去挑选符合标准类的专门用来运输的车辆,车辆需要配备具有屏蔽作用、防护功能、应急用处之类的设施,运输所走的路

线需要避开人口是密集状态的区域、生态为敏感状况的区域，在运输进行的过程当中安排专门的人员去进行押运，实时地开展对放射性活度的监测，同时配备能够应急处置的设备，用来应对突然发生泄漏的事件。处置这个环节需要严格按照行业的标准以及监管的要求来执行操作，高放废物的深地质处置需要选取地质条件是稳定状态、隔离性能是良好情形的区域，去构建有多重防护功能的屏障，保证废物能够长时间地被隔离；中低放废物的处置需要保证处置场的防渗、屏蔽之类的设施达到标准，定时对处置场周边的环境进行监测，防止放射性物质发生扩散。

3.3 极端工况下放射性废物的应急管控处置方法

针对存在差异的各种极端工况，采取具有差别性的应急管控相关措施。要是发生像地震、洪水这样的自然灾害，优先开启人员疏散的预案，保证作业人员的安全，同时对储存、处理这些设施进行紧急加固操作，防止设施出现破损从而导致放射性泄漏的情况；要是发生设备出现故障的情况，马上停止和其相关的处理作业，切断出现故障设备与其他系统之间的连接，组织专业方面的人员去进行抢修，同时对出现故障区域的放射性活度开展实时监测，要是出现泄漏的状况，及时采取封堵、吸附等措施去控制污染的范围。要是发生放射性泄漏的事故，马上启动泄漏应急处置的流程，划定受到污染的区域，设置警示意义的标识，组织人员穿戴专门的防护装备去开展泄漏清理的工作，使用吸附材料、中和剂等去处理发生泄漏的放射性物质，同时对受到污染区域的空气、水体、土壤进行全面的监测，依据监测得到的结果去调整处置方面的措施，一直到污染被有效地控制住。

此外，建立能够应急物资的储备体系，储备有足够数量的防护装备、泄漏处置的设备、监测用的仪器、应急所需的药品等物资，保证在极端工况状况下能够快速地调配使用；同时增强和应急管理、生态环境等部门之间的协同联动作用，构建达成应急处置方面的合力，提升应急管控所取得的成效。

3.4 管控效果导向的处理流程优化迭代方法

把管控效果当成核心方面的导向，建立处理流程优化迭代的机制，持续不断地提升放射性废物处理以及管控的科学性、高效特性。首先，构建完善健全的管控效果评价体系，从处理达到标准的比率、放射性泄漏的比率、废物减少量化的程度、作业人员接受辐射的剂量、成本控制的水平等多个

不同的维度，设定可以量化的评价指标，定时对放射性废物处理以及管控工作开展全面的评价，精准地识别流程当中的薄弱部分以及潜在的问题。根据评价得出的结果，有针对性地开展对流程进行优化的工作^[9]。在对工艺进行优化这件事情上，引入先进的用来处理的技术以及设备，提高废物处理的效率还有达标比率。比如说采用新型且高效的过滤材料来提高气体废物净化的效果，引入自动化的处理设备以减少人工方面的干预；与此同时，依据废物的特性对工艺参数进行优化，提高处理工艺的适配性能还有稳定性能，降低能源消耗以及成本。在对管理流程进行优化这一方面，建立全流程的数字化管控体系，运用物联网、大数据、人工智能等技术，对废物从产生、收集、储存、运输到处置各个环节开展实时的监测、对数据进行追溯以及进行智能的分析，达成管控过程的可视状态、精准状态，及时发现并解决管控当中出现的异常问题。

4 结论

放射性废物的按照规范进行处理以及管控是核电行业安全、绿色、能够持续发展的核心保障，它受到废物自身具有的特性、处理工艺以及设备具备的性能、作业场景以及监管提出的要求等多种因素的影响，管控的难度比较大、专业性比较强。为了提高管控取得的成效，需要构建分层的规范化的管控体系，针对不同类型的放射性废物制定具有适配性的处理方案，强化全流程处置环节的可靠管控，完善极端工况之下的应急处置机制，建立以管控效果为导向的流程优化迭代机制，实现放射性废物处理以及管控的精准状态、全链条状态、智能状态。核电企业作为放射性废物管理的责任主体，需要严格落实法律法规以及行业标准，加大技术研发以及设备方面的投入，完善管理体系，提高作业人员的专业素养；同时加强和监管部门、科研机构的协同联动，积极引入先进的技术以及管理方面的经验，持续对处理以及管控流程进行优化。

参考文献

- [1] 郭治军.放射性废物处置化学专辑[J].核化学与放射化学,2025,47(06):593-594.
- [2] 李科,刘丹,黄后顺,等.核电厂放射性废活性炭清洁解控实践[J].辐射防护,2025,45(05):530-539.
- [3] 程建军,李建宇,杨光成,等.核电站放射性废物处理系统与安全管理[J].化纤与纺织技术,2025,54(06):151-153.