

中国铀矿冶放射性废物管理战略研究

刘晓超¹, 曹凤波¹, 徐乐昌², 薛建新³

(1. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021;
2. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;
3. 中核铀业有限责任公司, 北京 100013)

摘要: 回顾了铀矿冶的发展历程, 介绍了铀矿冶放射性废物管理体系和废物处理处置现状, 分析了当前铀矿冶放射性废物管理中存在的问题, 提出了铀矿冶废物管理的基本思路、工作目标、重点任务和保障措施, 旨在为今后铀矿冶废物的科学管理提供指导。

关键词: 铀矿冶; 废物管理; 战略研究; 放射性废物

中图分类号: TL94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0072-04

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.04.01

中国铀矿冶行业经过 60 多年的发展, 在放射性废物管理方面取得了较好的成绩, 建立了较完整的放射性废物管理体系, 运行期和退役治理期产生的放射性废物基本得到安全处理处置, 废物管理总体可控^[1]。随着铀矿冶行业的发展, 也暴露出退役治理进度缓慢、治理技术有待提升等问题, 因此有必要立足中国铀矿冶现状, 制定铀矿冶放射性废物管理总体战略, 推动中国铀矿冶行业持续健康发展。

1 铀矿冶发展历程与现状

中国铀矿冶起步于 20 世纪 50 年代, 60 年代初陆续建成第一批铀矿冶企业, 经过创建成长 (1958—1984 年)、调整改革 (1985—2000 年)、恢复发展 (2001—2016 年) 和创新提升 (2017 年至今) 四个阶段, 到目前为止形成了以北方砂岩地浸为主、以南方硬岩堆浸为辅的铀矿采冶格局, 成为继美国之后第 2 个拥有先进铀矿采冶工艺体系的国家^[2]。

铀矿冶放射性废物管理随着铀矿冶行业的发展而不断推进, 尤其是退役治理工作, 随着部分铀矿山的资源枯竭或政策性关停, 从 20 世纪 80 年代至今, 已经先后开展整体或部分

矿点退役和环境治理项目 20 多个^[3], 妥善处置了相关放射性废物, 改善了区域辐射环境质量。

2 铀矿冶放射性废物管理现状

2.1 管理体系

铀矿冶作为中国核工业燃料循环体系的最前端, 是中国核工业体系的重要组成部分, 放射性废物管理受到国家国防科技工业主管部门和生态环境主管部门 (核安全主管部门) 的高度重视。多年来制定形成了以“一法五标准两导则”为主体的一整套法律法规标准体系, 其中“一法”即《放射性污染防治法》, “五标准”为《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》《铀矿冶辐射环境监测规定》《铀矿冶设施退役环境管理技术规定》《铀矿冶放射性废物环境管理技术规定》《地浸采铀环境保护技术规范》, “两导则”为《环境影响评价技术导则 铀矿冶》和《环境影响评价技术导则 铀矿冶退役》。目前, 《铀矿冶辐射环境监测规定》《铀矿冶设施退役环境管理技术规定》等正在修订过程中, 《建设项目竣工环境保护验收技术规范 铀矿冶》和《建设项目竣工环境保护验收技术规范 铀矿冶退役》已发布。

收稿日期: 2024-04-01

第一作者简介: 刘晓超 (1972—), 男, 河北石家庄人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事辐射防护与环境保护相关工作。

通信作者简介: 曹凤波 (1983—), 男, 河北石家庄人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事辐射防护与环境保护相关工作。

2.2 废物处理处置

2.2.1 运行期间的废物处理

铀矿冶运行期主要产生放射性废水、废气和固体废物。放射性废水主要来自硬岩矿山采冶过程中的工艺废水、尾矿(渣)库渗水和矿井涌水,以及砂岩地浸生产中的工艺废水。水冶工艺废水和尾矿(渣)库渗水采用石灰乳除铀、氯化钡除镭后槽式排放,矿井涌水利用树脂吸附达标后排放,地浸工艺废水排入蒸发池蒸发^[4]。

废气主要来自硬岩矿山矿石破碎的铀尘,以及硬岩矿山排风井、尾矿(渣)库、废石场和地浸采铀集液池、蒸发池释放的氡及其子体,铀尘通过增加含水率抑尘和除尘器捕集方式进行控制,氡及其子体随空气稀释扩散^[5]。

固体废物主要来自硬岩矿山的废石和尾矿(渣)与工艺废水处理的沉淀渣,以及废旧设备、管道等,分别建设废石场、尾矿(渣)库和固体废弃物库进行贮存^[6]。

2.2.2 退役治理的废物管理

铀矿冶退役的废物管理主要是指废石场与尾矿(渣)库的安全稳定化、矿坑水治理、污染废旧金属的去污解控和地浸地下水的修复。对于废石场,除部分废石回填井下采空区外,其余采用清挖集中填埋或原地覆盖、覆土植被进行治理;尾矿(渣)库作为铀矿冶废物集中处置场所,待污染土壤等废物处置完成后闭库,进行表面覆土降氡隔水、恢复植被等封场措施^[7]。

针对矿坑水,采用两道混凝土墙封堵,在两墙间设疏水过滤池^[8];若治理完后矿坑水水质仍未达标,应保留矿坑水树脂吸附处理设施,目前正在研发PRB被动式水处理设施来处理未达标的矿坑水。

废旧金属清洗去污后,送专门废旧金属熔炼设施去污解控^[9],非金属污染固体废物粉碎后填埋入尾矿库。地浸地下水的修复是铀矿冶退役中的一个难点,近年来铀矿冶行业对地浸地下采场采用地下水抽出一废水处理一回注地下一添注还原剂—监控的修复技术进行治理,积累了一定的经验^[10]。

2.2.3 长期监护

铀矿冶设施退役治理完成后,对废石场、尾矿(渣)库等有限制开放或使用的设施应进行长期监护。到目前为止,除2个铀矿冶设施移交地方政

府监护外,其他设施均由原运营单位或其上级单位进行监护,从“十二五”起国家拨付专用经费用于监护工作。国家正在起草《铀矿冶设施长期监护管理规定》,明确监护范围、监护频次、监护内容等监护要求^[11]。

3 铀矿冶放射性废物管理存在的问题

3.1 废物处理处置技术有待提升

多年来,虽然铀矿冶放射性废物处理处置技术得到了长足发展,但仍有许多不足之处。运行期废物管理主要问题包括地浸采铀过程中地下水污染防治问题,这是地浸生产中放射性污染控制的首要问题。地浸废水产生量不断加大,废水处理处置的压力急剧增加,迫切需要寻找如深井处置等技术来解决。硬岩矿山尾矿(渣)的安全处置问题,目前仍然是将其存放于尾矿(渣)库进行集中处置,从短期来讲,处置方式是经济的;但从长期来讲,既占用大量土地,又存在长期的安全风险,未必是适宜的。硬岩矿山井下氡及子体,仍然是职业照射剂量的主要贡献者,需要提升监护手段和防控技术。

退役治理废物管理主要问题包括铀尾矿(渣)长期地表处置,除占用大量土地外,对地下水和地表水体的影响也不容忽视,更为重要的是其长期安全稳定需通过长期监护来维持,且就长期监护与综合利用的关系尚未开展过系统研究;地下水修复和放射性污染土壤修复标准及经济有效的修复技术,还处于研究过程中。

3.2 重要铀矿冶设施退役推进缓慢

随着铀矿冶设施退役工作的推进,重要铀矿冶设施退役有待加快。南方某尾矿库作为中国最大的铀尾矿库,至今已停用十几年,虽然开展了坝体治理,并开展了滩面治理技术和生物修复关键技术研究;但尾矿库的整体退役还未实施,对当地辐射环境构成潜在风险。中国西部某铀矿山到目前为止也未正式开展退役治理工作。

3.3 属地化关停铀矿山缺乏有效管控

中国铀矿冶关停设施中,部分属于地方政府和部队兴办或管理的铀矿山,由于关停时间较长,企业和隶属关系变动较大,导致资料数据难以查询,且未开展过源项调查;这类铀矿山的放射性废物数量不清楚、责任主体不明确,无法实现有效管控。

3.4 治理水平整体不高

铀矿冶设施在早期退役治理过程中,由于对废物管理理念认识不到位、技术能力不足,导致退役治理整体水平不高,加之退役治理经费不足,目前暴露出了地质塌陷、露天采坑废水放射性核素浓度偏高等一系列安全环保隐患,有待于进一步改进。随着社会和技术的进步、法律法规体系的完善和公众环保意识的提高,铀矿冶设施退役治理深度及标准有所提升;但在退役深度和理念上,与国际上仍存在较明显的差距,需进一步加强和完善。

3.5 长期监护管理体系不健全

针对退役铀矿冶设施长期监护,虽然中国出台了相关的管理要求,但仅提出了原则要求,对长期监护的具体工作内容,如监护内容、监护范围、监护程度等涉及较少。铀矿冶长期监护管理体系不够健全,导致当前监护经费保障严重不足,监护的方法体系不完善,对监护设施的辐射安全构成一定的不确定性。

4 铀矿冶放射性废物管理战略

4.1 管理思路

铀矿冶放射性废物管理的总体思路为:吸收与借鉴国际先进经验,依托国内科研与技术力量,开展重点领域科技攻关,提升废物处置技术水平,并强化废物处理处置经费支持以及进一步完善安全管理体系,从而大力推进铀矿冶放射性废物安全处理处置,实现铀矿冶放射性废物管理的长期有效管控。

4.2 工作目标

现阶段,稳步推进铀矿冶已关停场址的退役治理工作,同时掌握中国属地化关停铀矿山放射性废物现状;中长期,基本完成铀矿冶已关停场址的退役治理工作,铀矿冶放射性废物得到及时安全处理处置,重点问题得到基本解决,技术能力明显提升,实现铀矿冶放射性废物管理达到国际先进水平的目标。

4.3 重点任务与保障措施

4.3.1 开展重点领域科技攻关

开展地下水污染防治技术研究。重点开展地浸地下水污染防治技术研究、铀煤协调开采条件下多重防御地下水污染防治技术、酸性与中性浸出地浸采场地下水治理技术研究、原地爆破浸出

铀矿山退役地下水治理技术研究、尾矿(渣)库地下水治理技术研究,建立不同工艺条件、不同阶段的地下水污染防治技术体系,实现地下水环境影响最小化。

加快放射性废水深井处置研究,推动深井处置产业化。开展废水深井处置场址筛选研究、深井钻井成井技术研究、深井处置模拟与环境影响研究、深井注入监控技术研究、工程示范研究和推广应用研究^[12]。

开展铀尾矿(渣)地下充填技术研究。开展铀尾矿(渣)地下充填工程技术研究、放射性核素在地下水中迁移扩散与防控技术研究、地下充填井下氡防控技术研究,从而建立尾矿(渣)地下充填控制措施及工程技术体系。

开展铀矿井防氡控氡技术研究。构建铀矿井下通风降氡虚拟仿真平台与辐射防护安全监控系统,开展氡析出与氡渗流变化规律理论基础、与采矿方法相适应的降氡技术、井下铀矿尘颗粒物净化机理和装备、辐射安全信息化管理与监测预警等四个方面的研究,建立适应中国铀矿冶现状的井下高效通风降氡及辐射防护技术体系。

开展铀尾矿(渣)库长期安全稳定研究。开展尾矿坝安全稳定性与风险防控技术研究、尾矿(渣)库放射性核素稳定化技术研究、尾矿(渣)库渗水高效处理技术研究、尾矿(渣)库防渗与地下水污染防治技术研究、放射性核素在不同土壤介质中迁移规律研究、尾矿(渣)库的退役治理场地保护性开发利用研究,确保尾矿(渣)库的长期安全稳定。

开展放射性土壤治理限值及修复技术研究。建立土壤限值-剂量-治理代价计算模式,开展基于辐射防护最优化条件的土壤治理限值研究。开展磁吸附、吸附淋洗等放射性土壤修复技术研究,对土壤中放射性核素进行有效去除,以最大限度实现污染场址的无限制开放或使用。

4.3.2 多视角推进退役与长期监护

加快中国重要铀矿冶设施退役进度。中国南方某大型尾矿库,作为中国最大的铀尾矿库,备受国家和社会的关注,多年来由于渗出水多、污染物协调治理技术难度大等原因,治理进度缓慢。因此应加大技术研发投入,加快治理进度。中国西部某铀矿山,也应尽快开展治理工作。

开展属地化关停铀矿山的普查工作。开展属

地化关停铀矿山的源项普查及退役治理总体方案研究,掌握属地化关停铀矿山总体情况,提出退役治理总体方案及治理规划建设,为有序开展属地化关停铀矿山退役提供支撑,并在此基础上进一步明确属地化关停铀矿山的主体与退役治理模式、退役设施监护主体和移交方式等,从而进一步完善中国铀矿冶放射性废物管理体系。

强化经费支持,提升退役治理整体安全水平。国家应强化铀矿冶退役经费支持,提升退役治理安全管理体系,进一步完善退役治理法规标准体系,实现退役治理水平整体提升,保障退役设施整体安全度。针对退役治理中存在的技术难题,国家和企业应加大经费投入,开展科研攻关。

建立铀矿冶退役长期监护管理体系,制定铀矿冶退役设施长期监护管理办法,建立长期监护机制,完善监护方式,落实长期监护资源保障,确保退役治理设施长治久安。

4.3.3 建设科技研发基地

建立地浸采铀地下水修复研发基地。分别以酸法和中性地浸采铀矿山为研究对象,建设地浸地下水修复研发基地。开展源项调查,确定地下水修复范围和修复因子。开展室内试验,研究采场退役时地下水污染情况,明确地下水中主要污染物类型、性质及其空间分布情况;根据地下水中污染物性质,研究不同还原剂对地下水的修复效果,选择合适的还原剂作为修复地下水的化学试剂。建立井场地下水数值模型,指导地下水修复方案的设计,并在修复工程试验过程中及时反馈信息并优化数值模型,进而全过程指导地下水修复技术工程试验。开展工程试验,研究不同修复技术的修复效果,最终确定该类型铀矿退役采场地下水修复工艺及修复目标值,为此类工程地浸退役后地下水修复工程的开展奠定技术基础。

5 结语

中国铀矿冶行业经过60多年的发展,已经建立了较完善的放射性废物管理体系,铀矿冶放射

性废物也基本得到妥善处置,铀矿冶退役与长期监护工作稳步推进,辐射环境质量得到有效改善;但在废物处置技术、重要设施退役进度、属地化铀矿山管控、退役治理水平与长期监护管理体系等方面还存在很多不足。

根据当前存在的问题,结合铀矿冶实际情况,确定了与新时代铀矿冶废物管控相适应的基本思路和工作目标,重点提出了科技攻关、以机制推进退役、建立示范工程和研发基地的重点任务和保障措施,为有效推进中国铀矿冶放射性废物科学管理奠定了基础。

参考文献:

- [1] 潘自强,胡思得,刘森林,等. 中国放射性废物管理发展战略研究[M]. 北京:中国原子能出版社,2021.
- [2] 苏学斌,常京涛. 中国铀矿采冶技术重大成就与发展方向[C]//中国铀矿冶创建60周年科技成果交流论文集. 北京,2018:1.
- [3] 刘晓超,谢占军,詹乐音,等. 铀矿冶退役设施长期监护现状与建议[J]. 铀矿冶,2023,42(2):83-88.
- [4] 胡鄂明,邵二言,赵静. 含铀废水处理技术研究进展[J]. 湖南生态科学学报,2016,3(1):42-48.
- [5] 马尧,胡宝群,孙占学. 浅论铀矿山的三废污染及治理方法[J]. 铀矿冶,2007,26(1):35-39.
- [6] 潘英杰,徐乐昌,刘晓超,等. 铀矿冶放射性废物最小化[M]. 北京:中国原子能出版社,2014.
- [7] 李韧杰,潘英杰. 铀矿冶退役与环境治理[M]. 北京:中国原子能出版社,2001.
- [8] 张栋泰. 铀矿地质勘探遗留设施的环境影响及退役治理[J]. 中国锰业,2017,35(3):165-168.
- [9] 陈安全. 铀矿冶放射性污染金属熔炼去污与再生利用[J]. 铀矿冶,2011,30(2):95-99.
- [10] 连国玺,孙娟,李梦姣,等. 我国地浸采铀地下水修复若干问题的思考[J]. 中国矿业,2023,32(10):80-87.
- [11] 刘晓超,杜娟. 铀矿冶退役设施的长期监护管理[J]. 铀矿冶,2012,31(3):162-163.
- [12] 潘英杰,徐乐昌,刘晓超,等. 核能矿产资源强国战略研究[M]. 北京:中国原子能出版社,2020.

(下转第111页)

