

高放废物地质处置的安全管理与策略

周志超, 王驹, 陈亮, 赵敬波, 张明

核工业北京地质研究院, 中核高放废物地质处置评价技术重点实验室, 北京 100029

摘要 高放废物在数千年的人类生存环境中仍然存在危害性, 目前基于非能动安全所提出的地质处置方案是高放废物安全管理的首选策略, 其安全评价的时间尺度高达万年, 处置库场址的申请和建造的审批重点在于长期安全性的论证。因此, 地质处置的安全评价系统需要简化, 以便于计算和预测, 从而提高安全评价结果的置信度。介绍了高放废物地质处置的研究进展、地质处置的非能动安全及核技术的安全管理启示。鉴于地质处置安全的不确定性, 引入了安全监管的概念。

关键词 高放废物; 非能动安全; 地质处置; 放射性废物管理

核能以安全、经济和清洁等优点成为当前最具开发价值和发展潜力的能源之一, 已成为中国能源供应结构的重要组成部分, 同时兼具国家能源安全和经济安全保障等作用^[1]。核能与核技术的发展, 必然会产生一定量的高水平放射性废物(高放废物)。高放废物的安全处置关系到人类健康、环境安全和子孙后代的福祉, 已成为核能可持续发展的关键性制约因素之一^[2]。高放废物是指废物所含放射性核素活度浓度高, 衰变过程中会产生大量的热, 或者含有大量长寿命放射性核素, 需要更高层次的包容和隔离, 采取散热措施, 其活度浓度下限值为 4×10^{11} Bq/kg, 或释热率大于 $2 \text{ kW/m}^{3[3]}$ 。

从中国核电及军工核设施退役和废物治理工作的情况看, 目前放射性废物长期暂存于地表, 部分废物贮存时间过长, 管理成本和安全风险逐渐增加, 已成为环境中的一个安全隐患^[4]。自1957年美

国国家科学院提出“地质处置”为高放废物永久处置方案以来, 30多个开发核电的国家均开展了相关领域的研究工作, 在处置可行性研究、场址筛选与评价、地下实验室研究、工程设计及处置库许可申请等领域取得了大量的进展。高放废物地质处置是目前普遍接受且技术上可行的安全处置方案^[5-7], 已成为核能应用相关国家的必然选择。高放废物地质处置虽然在处置工程技术上具备可行性, 但对其长期安全性仍然存在不确定性因素, 因此仍然被认为是一个有争议的监管、社会和科学难题。目前, 基于KBS-3处置概念(图1), 负责芬兰乏燃料处置的公司Posiva于2012年12月向芬兰政府提交了Olkiluoto处置库建造许可申请, 并于2015年11月获得批准; 瑞典核废物管理公司SKB也于2011年向政府递交了Forsmark场址处置库建造许可申请, 目前仍处于审查阶段。

收稿日期: 2019-12-21; 修回日期: 2020-06-05

基金项目: 国防科工局核设施退役及放射性废物治理项目(科工二司[2017]405号); 生态环境部核与辐射安全监管项目(JD201756)

作者简介: 周志超, 高级工程师, 研究方向为高放废物地质处置, 电子信箱: zhouzhichao2006@163.com

引用格式: 周志超, 王驹, 陈亮, 等. 高放废物地质处置的安全管理与策略[J]. 科技导报, 2020, 38(16): 105-114; doi:10.3981/j.issn.1000-

7857.2020.16.012

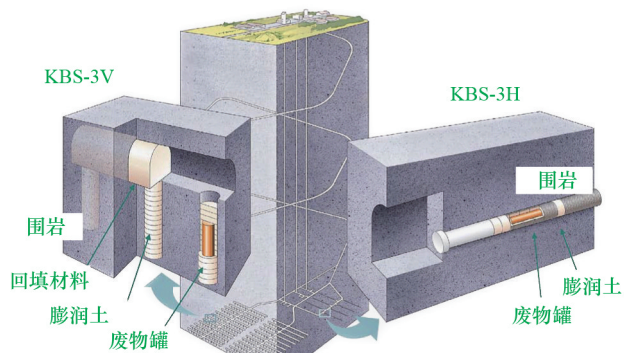


图1 高放废物处置库KBS-3概念模型

中国的相关法律法规也基本明确了高放废物的管理策略和安全要求。其中,2003年颁布的《中华人民共和国放射性污染防治法》第四十三条规定“高水平放射性固体废物实行集中的深地质处置”;2011年颁布的《放射性废物安全管理条例》第二十三条规定:“高水平放射性固体废物和 α 放射性固体废物深地质处置设施关闭后应满足1万年以上的安全隔离要求”;2013年,国家核安全局批准发布了《高水平放射性废物地质处置设施选址》(核安全导则HAD 401/06-2013),为中国高放废物、乏燃料、 α 放射性固体废物等地质处置设施选址提供了依据,对高放废物地质处置设施的选址目标、阶段划分、选址准则、所需资料和质量保证等方面提出了明确要求,为高水平放射性废物地质处置设施场址筛选与评价提供指导;2017年颁布的《中华人民共和国核安全法》第四十条规定:“放射性废物应当实行分类处置,其中高水平放射性废物实行集中深地质处置”;第四十二条规定:“国务院核工业主管部门会同国务院有关部门编制高水平放射性废物处置场所的选址规划,报国务院批准后组织实施”;由环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局组织制定,于2018年1月1日起实施的《放射性废物分类》是开展放射性废物处理活动的基础,为中国放射性废物管理战略提供基础^[8-9];2020年1月国家核安全局批准发布《放射性废物地质处置设施》(核安全导则HAD 401/10-2020),规定了放射性废物地质处置安全的一般要求,为地质处置设施的安全有序研发提供指导和建议。总体上,中国在高放废物管理方面与核能技术发达国家存在一定

的差距,相关法律法规还有待进一步完善,地质处置的安全管理技术、管理策略、组织结构及经费渠道等保障性措施亟待加强。

1 高放废物地质处置研究现状

1.1 中国高放废物现状

中国是世界少数几个拥有完整核工业体系的国家之一,进入21世纪后,中国核电产业进入快速发展阶段。2007年国务院发布《核电中长期发展规划(2005—2020年)》,指出到2020年“我国的核电运行装机总量预计将达到4000万kW,核电年发电量达到2600亿~2800亿kW·h,在建的核电机组装机总量将达到1800万kW”。截至2018年12月底,中国共有44台商业运行核电机组(不含台湾地区),装机容量达4464.516万kW(额定装机容量),13台在建核电机组,总装机容量1403万kW;2018年商运核电机组累计发电量为2865.11亿kW·h,占全国总发电量的4.22%,核电作为清洁能源发电中的重要一员,在中国能源转型中地位不断提高。2014年国务院发布《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》,将发展目标提高至到2020年“装机容量达到5800万kW,在建容量达到3000万kW以上”;若每台10⁶ kW核电机组每年产生废物包体积50~60 m³,则到2020年所有运行核电机组每年产生废物包体积为3000~3500 m³。中国已积累的高放废物仍然以高放废液的形式存放于废物罐中,尚未进行固化处理。同时中国采取乏燃料后处理的政策,乏燃料的后处理也将产生大量的高放废物^[10]。随着中国核电的快速发展,乏燃料和放射性废物产生量将持续增加,目前中国核燃料循环后端和放射性废物处置能力不足,亟需加快推进,加强规划和政策引导,推动重大项目实施,以实现核能产业的可持续发展。

1.2 高放废物地质处置现状

在国际上高放废物地质处置研发工作中,基于立法规定开展了处置策略、安全管理方案、研究开发规划及法规和标准等方面的研究,瑞典、芬兰、法国、德国及美国等均提出了系统的处置库规划;大

部分国际原子能机构成员国签署了《乏燃料安全管理与放射性废物安全管理公约》,国际原子能机构组织编制和颁布了一系列放射性废物安全标准和技术指导性文件,国际辐射防护委员会提出了高放废物地质处置的基本安全要求;各涉核国家均颁布了相应的法律法规,提出了安全管理的相关要求。总体上,在地质处置安全管理和策略方面均强调:非能动安全,即处置设施关闭后,安全管理不需要主动维护;多重屏障,即多种方法和措施确保安全;在一定时间范围内限制放射性核素,使其能够就地衰变到安全剂量;有效隔离废物,以减少人类活动

意外入侵的风险。

高放废物地质处置选址和场址评价方面,各国根据不同国情,选择了适宜的处置围岩,开展了不同程度的场址评价工作。例如,芬兰已确定了处置库场址,瑞典和法国等正在开展处置场址审评工作。处置工程研究方面,高放废物处置地下实验室的开发设计和建造技术已趋成熟,并开展了大量的现场试验等工作(表1);废物罐材料和结构设计、封装工艺、玻璃固化体及乏燃料长期稳定性研究、缓冲回填材料性能、多场耦合研究等均取得阶段性的研究成果。

表1 高放废物地质处置研发主要现场试验类型及典型实例

主要试验类型	典型实例与进展
开挖技术试验	(1) 比利时 URF: 塑性黏土中的平巷开挖试验 (2) 芬兰 ONKALO: 处置坑开挖技术研究 (3) 瑞士 GTS: 花岗岩的开挖技术研究
围岩开挖损伤区试验	(1) 瑞典 Äspö: 开挖损伤区控制及渗透特性试验 (2) 瑞士 GTS: 开挖损伤区试验 (3) 瑞士 Mt.Terri: 各项开挖扰动与监测试验 (4) 加拿大 URL: 工程开挖响应与监测试验
场址特性评价	(1) 芬兰 ONKALO(花岗岩): 处置巷道全尺寸试验、原位验证试验 (2) 瑞士 GTS、Mt.Terri 和瑞典 Stripa: 地球物理综合探测方法的应用 (3) 芬兰 ONKALO(花岗岩): 地下水监测系统研发 (4) 瑞典 Äspö: 场址地下水流研究与数值模拟研究 (5) 瑞士 Mt.Terri: 各类现场水文地质试验 (6) 美国尤卡山 ESF: 非饱和带渗透特性试验及优势流分析 (7) 法国、芬兰、瑞典及美国等: 地下水同位素定年技术研究
核素及气体迁移试验	(1) 瑞士 GTS: 放射性核素阻滞实验 (2) 美国尤卡山 ESF: 非饱和带核素迁移试验 (3) 加拿大 URL: 溶质迁移与扩散对比试验 (4) 芬兰 ONKALO: 岩石基质吸附与阻滞试验 (5) 瑞典 Äspö: 核素阻滞试验、大尺度气体注入试验
多场耦合试验(热、核素迁移、力学扰动等)	(1) 加拿大 URL: CERBERUS 试验、热-水-力多场耦合试验 (2) 瑞典 Äspö: 缓冲材料高温试验 (3) 德国 Asse: TSS 试验 (4) 瑞士 GTS: FEBEX 试验、加热试验 (5) 美国尤卡山 ESF: 全巷道规模加热试验和热-水-力-化学耦合试验 (6) 瑞士 Mt.Terri: 加热试验 (7) 比利时 URF 和捷克 UEF: Mock-up 试验
工程屏障制造和性能	(1) 瑞典 Stripa: 钻孔封孔与缓冲材料试验 (2) 瑞典 Äspö: 纯铜废物罐性能和制造技术研究、缓冲材料回填和封堵试验 (3) 加拿大 URL: 缓冲材料与废物罐试验

表1 高放废物地质处置研发主要现场试验类型及典型实例(续)

主要试验类型	典型实例与进展
工程屏障制造和性能	(4) 比利时 URF: 封堵试验
	(5) 瑞士 GTS: 工程屏障封闭性试验
	(6) 比利时 URF 和捷克 UEF: 缓冲回填材料 1:1 原型试验
地质处置系统长期性能综合试验	(1) 比利时 URF: 处置概念示范试验
	(2) 日本釜石: 热-水-力耦合作用现场试验及模型验证
	(3) 瑞典 Äspö: 示范处置库试验、处置技术论证试验
	(4) 加拿大 URL: 热-水-力多场耦合试验
	(5) 美国尤卡山 ESF: 全巷道加热试验
原型处置库试验	(1) 瑞典 Äspö: 原型处置库试验
	(2) 美国尤卡山 ESF: 全巷道加热试验, 10 t 乏燃料处置试验

高放废物地质处置安全性评价方面,国际原子能机构和世界经合组织核能署目前在高放废物处置领域开发并逐渐形成了安全全过程分析(safety case)的一整套指导性技术方案。各国均开展了处置库长期安全性能的相关研究。例如,芬兰核安全和放射委员会发布了放射性废物处置监管导则,芬兰放射性废物管理公司 Posiva 于 2012 年完成并提交了安全评价报告 TURVA-2012, 作为为处置库建造申请的技术报告;瑞典核燃料和废物管理公司 SKB 于 2014 年提交了 SFR 处置场长期安全分析报告,对 SFR 处置库工程关闭后的长期安全性进行论证,以评价 Forsmark 处置库场址的长期安全性能;美国于 2008 年提交申领尤卡山处置库建造许可证的 TSPA 性能评价报告,但受政治及经济社会等因素影响未能通过审查;法国国家放射性废物管理局(ANDRA)负责高放废物处置,提交了高放废物地质处置安全评价的综合研究报告^[11-12]。

高放废物地质处置库长期安全评价模型与软件开发方面,美国、瑞典、芬兰、法国及俄罗斯等国普遍开展了持续数 10 年的专项模型与评价软件研究。一方面,通过多尺度的模型和试验,研究放射性核素迁移规律和机理,完善安全评价标准、模式与方法;另一方面,围绕地下水流模拟和核素迁移分析,开发自主可控的计算程序和软件(表 2),例如 MARFA、COMP23、GoldSim、FARF31 等,形成了相对可靠的量化安全评价计算能力。其中,以美国 GoldSim 软件最为典型,经过近 30 年的迭代发展

可实现万年尺度、复杂边界条件下各类放射性核素的迁移模拟分析,为长期安全评价提供决策依据。总体上,高放废物地质处置库长期安全评价系统应具备以下特性:针对处置概念和处置场址的模型和数据,需真实可靠且管理过程规范;涵盖影响处置

表2 高放废物地质处置安全评价相关软件

评价内容	软件
处置库系统性能分析、评价	GoldSim
处置库场址长期安全评价	MARFA
缓冲材料和围岩温度场、近场地应力场、围岩开裂及剥落过程	3DEC
缓冲回填材料热-水-力耦合条件下饱和过程、膨胀过程	Abaqus
处置洞室裂隙迹线展布	Matlab
远场地球化学环境、缓冲材料化学反应、氧气消耗过程	PHAST
护壁退化过程、缓冲回填材料膨胀过程	Code-Bright
地下水渗流场、溶质运移过程	Darcy Tools
缓冲材料化学反应过程	TOUGHREACT
地下水渗流场	Connect Flow
地下水冻融循环过程	PHREEQC
近场核素迁移过程	COMP23
远场核素迁移过程	FARF31
远场核素迁移过程	MARFA
生物圈扩散过程	Ecolego
生物圈扩散过程	MIKE_SHE
生物圈扩散过程	Pandora
生物圈扩散过程	Erica
冰川过程模型	UMISM

库安全的特征、事件及作用过程,且需确保工程屏障性能和核素迁移全过程模拟;具备不确定性分析能力,模型中参数变化敏感性低。但鉴于高放废物地质处置系统各单元的过程和相互关系等演化往往难以评估,长期安全评价如果需要完全涵盖这些内容,则必然会降低安全评价结果的可信度。因此,高放废物地质处置安全评价设计应该尽可能简化,以便通过对数据和多场耦合的合理概化来评价子系统间的演化关系;论证高放废物地质处置系统长期安全的可信论据,就需要尽可能减少多场耦合过程,减少影响系统演化过程以及各种不确定性的因素,简化评价模型,从而在清晰的特征、事件和过程条件下进行评价。

中国高放废物地质处置研究工作始于20世纪80年代中期,1985年原中国核工业总公司提出“中国高放废物深地质处置研究发展计划”,开始了中国的高放废物的地质处置研发工作。经过30多年的工作,在处置选址、场址评价、核素迁移、概念设计、安全评价及地下实验室前期科研等方面取得一

系列的研究成果。通过对华东、华南、西南、内蒙古和西北5个预选区的筛选评价,经审查于2011年确定了甘肃北山预选区为中国高放废物地质处置库的首选预选区;开展了甘肃北山预选区新场、沙枣园及算井子等重点地段的选址评价工作,初步筛选了一批候选场址;通过甘肃北山、新疆和内蒙古3个预选区的地下实验室候选场址综合比选(图2),于2016年确定了北山预选区新场为中国首个高放废物地质处置地下实验室的场址,沙枣园为备选场址,并在甘肃北山建设了北山坑探设施,研发了地下实验室建造技术;高放废物处置库黏土岩预选地段筛选与评价工作也正积极推进中;确定了内蒙古高庙子膨润土为中国高放废物处置库的首选缓冲回填材料,获得了一批关键放射性核素的迁移行为数据,开展了初步的安全评价等;在国际合作方面,与国际原子能机构开展了长期的技术合作,与瑞典、芬兰和法国等签订了合作备忘录,重点开展地下实验室选址和设计方面的合作^[13]。

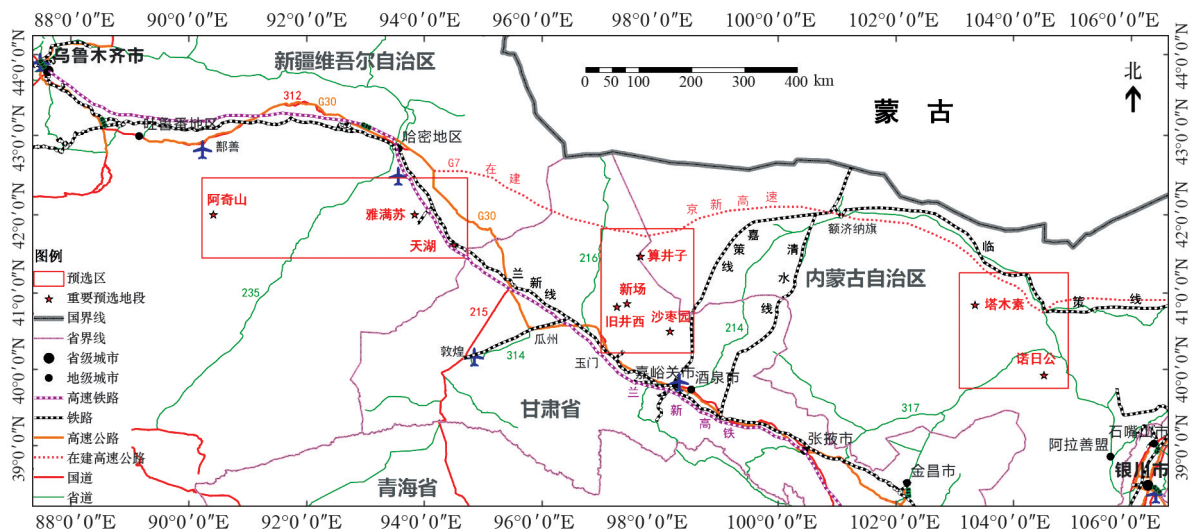


图2 高放废物地质处置地下实验室候选场址

1.3 中国高放废物地质处置研发规划

2006年,国防科工委、科技部和国家环保总局联合发布了《高放废物地质处置研究开发规划指南》,明确了处置库开发的技术路线和总体设想。

2007年,国务院批准了《国家核电中长期发展规划(2005—2020年)》,提出2020年前建成高放废物地质处置地下实验室,完成高放废物最终处置场规划。2016年3月,国家发改委、国家能源局发布《能

源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》,该行动计划重点任务的第六项“乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术创新”中,提出高放废物安全处置的主要任务,即“开展高放废物地质处置地下实验室建设、地质处置及安全技术研究,完善高放废物地质处置理论和技术体系”。提出的创新目标是:2020年建成高放废物地质处置地下实验室,掌握实验室现场试验关键技术体系,掌握场址评价方法,提出3~5个高放废物处置库候选场址,确定工程屏障选材,完成高放废物固化体多重介质多因素蚀变与核素迁移中间规模试验,提出废石墨、重水堆乏燃料等特殊废物的最终处置方案,完成可行性研究;2030年确定高放废物处置库推荐场址,完成处置库工程设计,掌握地质处置技术和安全评价技术,具备建库条件;2050年掌握高放废物地质处置工业化技术,建成高放废物处置库并运行。

2018年3月,国家国防科技工业局发布《核设施退役及放射性废物治理项目申报指南(2018—2020年)》,重点支持高放废物处置技术领域,提出研究目标:掌握地下实验室设计与建造的关键技术,开展甘肃北山预选区重点地段候选场址和其他花岗岩场址适宜性研究,黏土岩候选场址筛选评价;深入开展地质处置工程、处置化学、安全评价等方面的研究工作,初步形成中国高放废物地质处置研究开发技术体系;重点研究内容:地下实验室设计与建设的关键技术研究;甘肃北山预选区重点地段候选场址和其他花岗岩场址适宜性研究;黏土岩候选场址筛选评价;深钻孔处置技术研究;处置库条件下裂隙岩体工程特性研究;缓冲回填材料及添加剂工程性能研究;工程屏障性能演化研究;处置系统大数据集成及大规模科学计算方法研究;模拟处置条件下关键核素释出、迁移行为研究;高放废液玻璃固化体、陶瓷固化体的长期化学稳定性评估;地质处置安全评价技术研究,长期性能评价的时间尺度不小于1万年。相关规划基本明确了今后一段时期内中国高放废物地质处置研发和技术创新的工作重点、主攻方向及重点创新行动的时间表和路线图。

2 核技术安全管理与启示

2.1 核安全的内涵

安全是一个定义的概念和标准,即该状态下无任何问题(伤害/意外/事故/未遂事故),但是绝对的安全在现实中往往难以实现^[14]。核能设施的运行也只能尽可能地安全,通过充分识别危险源,采取合理的防护措施,以确保无不可接受的危险或风险;这种基于“充分”“合理”和“可接受”的理论方法,体现了核安全性理论、认知和现实的多维性和复杂性。在高放废物管理领域,由于利益攸关者较多,安全性较为复杂且难以界定,存在许多不确定因素,此外,还涉及到上万年长时间跨度等安全问题^[15]。高放废物地质处置研发和监管中,安全更多地是强调现在及未来对人类和生态环境的保护,以远离辐射危险。

为实现高放废物的安全管理,基于非能动安全理念的首选安全管理策略是深地质处置。能动安全和非能动安全的区别在于是否依靠人类活动以确保安全性,由于人类的工程措施难以保障高放废物在上万年长时间尺度上的安全性。因此,地质处置的安全性论证需要围绕非能动安全开展,即处置库的安全性应为其固有属性,在运行和关闭后,处置库本身是安全的,其安全性与人类活动的存在与否无关。高放废物处置库的非能动安全可以基于物理、化学和地质参数的对比计算和预测来评价^[16-17]。实际上无视人类社会因素的安全问题是不存在的,理性的安全性需要描述技术、自然和社会等方面及其相互作用^[18]。高放废物处置库系统需要关注整个处置过程,不仅包括技术层面,而且还包括行政管理等措施,难免会涉及到人类的活。因此,在处置库运行、关闭和监测之后的一些阶段,能动安全将过渡到非能动安全,高放废物处置库的许可最终是基于非能动安全的技术和地质环境条件而提出。

2.2 核技术安全管理的启示

核技术中能动和非能动安全区分的依据在于是否存在人类活动的行为,虽然这种差异性很直

接,但仍容易产生语义上的歧义,例如非能动安全组件和非能动安全设计或系统之间的差异,通常解释为完全的非能动安全设计仅取决于对流、重力或耐高温等物理现象,与工程部件的功能无关^[19]。核反应堆技术的进步在于强调了非能动安全组件的发展,例如基于自然空气和重力驱动的水循环冷却系统,可增强隔离反应堆系统内的放射性密封结构的功能。由于人为失误的存在,尤其是在三里岛和切尔诺贝利事故后,非能动安全受到高度的重视。虽然技术层面上可实现辐射的安全防护,但可接受的方案并不能完全消除事故的可能性,社会也难免会对核反应堆系统的安全性提出质疑。2011年,日本福岛核事故后,法国提出构建工程防护装置,建立了一支专业的核应急专业队伍,以应对风险预测的不确定性,即核电站的非能动安全部分旨在解决不可预见的低概率事件。核应急专业队伍作为能动安全措施的防护,是基于非能动安全无论设计如何完美,都存在不确定性,因此须先发制人地制定应对措施^[20]。

纵深防御是能动和非能动安全措施的结合,也是核反应堆设计的基础。核反应堆技术的纵深防御目标是在安全措施中提供备用和多样性防护,对反应堆内部和外部提供最佳的防范,包括事故预防、控制、缓解和应急计划等措施^[21]。后来演变为包含风险的防护措施、环境监测、厂内和厂外应急管理以及一系列与安全有关的特征和理念。因此,反应堆安全的能动防御倾向于能动和非能动以及系统内和外部安全组件的组合^[22]。对于高放废物地质处置而言,更需要对纵深防御进行评价,通过多重屏障来保障正常运行时对高放废物的有效隔离,以及在事故发生时部分屏障措施仍然有效。高放废物处置库安全功能不能依赖单个部件或控制程序,而是通过多重屏障来实现安全目标。由于纵深防御涉及组织管理行为和技术设计等安全相关的要素和活动,严格意义上难以采用安全概率评价等方法来确定,仍然需要进一步发展整体安全观念和综合风险决策技术,以提高对影响安全要素的识别。因此,国际原子能机构支持整合各安全要素,包括安全标准、实践运行经验、确定性和概率因素、

组织因素、安全考虑、以及与经济或辐射防护有关的其他因素^[23]。总之,核技术领域的安全通过结合非能动和能动安全措施、组织管理和技术因素来实现。由于人为角色的存在,在操作或维护程序中不可预测的行为可能是纵深防御的潜在失效因素。因此,非能动安全部件设计在安全管理中就显得尤为重要,开展非能动措施的研究是必要的,这是高放废物的安全管理需要关注和借鉴的。

3 高放废物地质处置的安全管理与策略

3.1 高放废物地质处置的安全性

乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约中定义的“处置”是指将乏燃料或放射性废物置于合适的设施内并且不打算回取,但仍可考虑可回取性。与其他核设施不同,高放废物地质处置对环境的影响方式不同(未来自然变化、自然资源及水文地质条件等)、处置场址无应急问题但要求更为严格、公众接受度的问题更加复杂。处置场址适宜性评价包括选址程序适宜性(管理层面)和场址处置条件的适宜性(技术层面)。高放废物地质处置技术很大程度上是基于非能动安全的定义和描述,地质处置的目标是将高放废物埋入地下深处,以便随着时间的推移天然放射性产生衰变,并且任何从工程屏障释放的放射性核素都会受阻滞并被适宜的地质屏障所稀释,以远离且不影响人类生存环境,同时人类活动入侵的可能性被认为是有限的,以便天然地质屏障在工程屏障的配合下实现长期安全的目标^[24]。高放废物管理的实施者和监管者负责地质处置设施“运营期”的安全,以充分发挥能动安全的作用,但处置库关闭后的长期安全则需要废物罐、地下设施和围岩(例如花岗岩、黏土岩或盐岩等)的非能动功能来实现。

纵深防御也是高放废物管理中的一项重要策略,对于高放废物地质处置技术,意味着“多重安全功能”,以便能够依靠不同的机制或组件来保障长期安全功能。由于高放废物地质处置的安全时间尺度高达万年以上,其人类行为或社会组织管理等

因素基本可排除在最终设计和功能之外,地质处置安全系统的构思和评估由非人类行为组成,包括废物的形态、废物罐、缓冲回填、围岩环境和地质机制。高放废物处置后,处置库被回填并关闭以获得物理(地质屏障)和化学(厌氧环境)稳定性。关闭后的处置库完全依靠工程和自然安全功能的组合,特别是放射性核素阻滞(废物罐与缓冲材料)、放射性核素隔离和阻滞作用(结合自然衰变和通过人工屏障和天然屏障阻滞放射性核素迁移)^[25]。可见,地质处置库关闭后的所有安全控制措施都是内置的,并且是非能动的物理和化学的性质或过程构成,例如低渗透性、低腐蚀性、溶解、浸出速率和溶解度等特性。

3.2 高放废物地质处置的非能动安全

国际原子能机构(IAEA)提出“放射性废物必须以避免给子孙后代造成不合理负担的方式进行管理,即产生废物的这几代人必须为废物的长期管理寻求并采用安全、切实可行和环境可接受的解决方案,并考虑回收和重复利用的可能性;对所有放射性废物管理的优选策略是,包容放射性废物并把它与生物圈安全隔离”。因此,非能动安全被描述为一种道德目标,即不会给后代带来不必要的负担;同时,非能动安全还具有社会技术层面的必然性,因为能动安全所需的财政、制度和技术难以长期得到保证。地质处置设施许可证的申请需要基于合理的科学和技术原则,通过明确的推理来证明其长期安全性。高放废物处置库最重要的安全功能只有在关闭后才开始,且实际上不包括能动安全措施,对于高放废物管理而言人类活动等行为是难以预测的,威胁着非能动设计安全系统^[26-27]。对于必须运行数千年乃至上万年的地质处置技术而言,可信的安全方案根本无法在能动安全性背景下设计,未来人类入侵的后果不应被要求达到监管保护的目标,也不宜作为处置库优化的关键标准,这就要求非能动安全功能(含天然和人工屏障)必须足够强大,处置库选址需要足够的深度和无可利用的自然资源来确保并将人类活动干扰的风险降到足够低。

处置库的演化和各部分的相互作用往往难以

评估,当长期安全评估需要涵盖这些内容时,就会降低评估结果的可信度。因此,处置库长期安全评价的系统设计应该尽可能简化,以便合理概化数据和演化过程,并在清晰的特征、事件和过程条件下,采用相对简单可信的模型,得出令人信服的论据,且其长期安全性能是基于非能动系统的。此外,高放废物管理领域的纵深防御原则也包含技术、人员或组织管理的失效,所提出的地质处置战略也试图完全消除对故障敏感的变量,并将天然地质屏障作为安全的最终保障。因此,安全被定义为地质处置系统的固有的、静态的、基于设计特性、纵深防御的非能动功能的组合^[28]。

3.3 高放废物的安全监管

核技术的安全属性往往被描述为反映动态、迭代、综合技术和社会因素的经验与知识的积累,而地质处置的安全属性论述则反映了一种静态的、基于优化的设计、试图排除人为因素和组织管理因素的影响,人类社会行为不参与地质处置的长期安全性能^[29]。尽管多项研究证明了地质处置万年尺度上地质屏障的稳定性,现今条件下的非能动地质环境,未来可能成为一个活跃的环境(例如地热能开采,CO₂储存,石油或天然气压裂开采等)。地质处置的安全性不仅取决于物理、化学和地质环境,还取决于人文、政治和地理环境,鉴于人类活动的不可预测性,地质处置的安全并非一种固有的和静态的特征,而是可能在技术研发和实施过程中不断调整。因此,为保障地质处置的长期安全,还有必要引入“监管”的概念,作为非能动安全设计的补充来控制人类活动的偶然性。由于目前对监管内涵的定义还不明确,非能动性作为地质处置设计功能的条件,并不能完全体现高放废物安全管理的需求,需要更多地关注社会活动的多元化和不确定性,也是对风险管理策略的补充^[30]。

高放废物安全管理中监管概念的提出,可以加强和深化安全管理的策略及其内涵,尽管目前这一概念尚不完善,但监管概念的提出促进了对处置库安全性策略的思考,尤其是长期安全性的批判性思维应该成为安全策略的组成部分。综合评价高放废物地质处置的技术性安全和社会可接受性,将有

助于发展地质处置安全管理策略,从长远来看,监管工作的引入将使得地质处置的安全管理更为负责有效且更具灵活性。

4 结论

鉴于高放废物地质处置的重要性和长期安全性等特点,亟需进一步加强高放废物管理的顶层设计,从国家层面上确定中长期的处置政策和处置战略,与核工业发展规划相匹配;注重加强法律规范的可操作性,赋予有关监管机构的独立性;确定责任主体,平衡利益攸关方,统筹规划高放废物处置工作,尤其是高放废物处置库的选址规划和建造申请许可,并保障其工作的独立性;加强高放废物管理档案及处置档案的管理工作,尽快制定相关标准与规范;保障公众知情权,加强与地方政府和公众的沟通;重视科学与技术研发,集中优势资源与团队,解决高放废物地质处置的关键科学与技术问题;尽快确定中国高放废物处置库场址和处置概念,依托于地下实验室等研发设施掌握高放废物地质处置工程的核心技术,重视高放废物地质处置中安全管理和策略的导向作用。

高放废物的安全管理需加强对非能动性安全的研究,处置库基于多重屏障系统来保障其长期安全性,但天然地质屏障的非能动安全是处置库的最终保障,工程屏障和监管策略可作为长期安全性的补充,从而将人类活动等风险降到最低。与其他核设施相比,高放废物处置库选址重在安全,更多地依赖于处置场址和工程屏障的非能动安全,而且其安全要求长期且稳定。因此,亟需出台国家层面的高放废物处置库选址规划,从选址程序适宜性(管理层面)和场址处置条件的适宜性(技术层面)角度,开展处置库候选场址适宜性研究,确定处置场址并明确处置概念,在此基础上,进一步加强高放废物处置库的长期安全评价等工作。

参考文献(References)

- [1] 潘自强, 钱七虎. 高放废物地质处置战略研究[M]. 北京: 原子能出版社, 2009: 1-15.
- [2] 刘新华, 徐春艳, 汪萍, 等. 对放射性废物分类管理的几点思考[J]. 辐射防护, 2013, 11(4): 322-326.
- [3] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801-812.
- [4] 吴浩, 徐春艳, 刘新华, 等. 放射性废物处置——核能可持续发展的关键[J]. 核安全, 2013, 12(增刊 1): 155-159.
- [5] European Commission. Establishing a community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste: Council directive 2011/70/EURATOM[R]. Brussels: EURATOM, 2011.
- [6] International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards for protecting people and the environment: Disposal of radioactive waste[R]. Vienna: IAEA, 2011.
- [7] International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste[R]. Ottawa: ICRP, 2013.
- [8] 王驹. 高放废物地质处置: 进展与挑战[J]. 中国工程科学, 2008, 10(3): 58-65.
- [9] 徐健, 熊先祥, 雷奇峰, 等. 我国高放废物地质处置法规体系的若干问题探讨[J]. 世界核地质科学, 2014, 31(4): 601-606.
- [10] 王驹. 高水平放射性废物地质处置: 关键科学问题和相关进展[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 51-55.
- [11] 王驹, 凌辉, 陈伟明. 高放废物地质处置库安全特性研究[J]. 中国核电, 2017(2): 270-278.
- [12] 凌辉, 王驹, 陈伟明, 等. 高放废物地质处置安全全过程系统分析研究进展[J]. 辐射防护, 2018, 38(2): 101-109.
- [13] Ju W, Liang C, Rui S, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.
- [14] Erik H. Is safety a subject for science[J]. Safety Science, 2014, 67: 21-24.
- [15] OECD Nuclear Energy Agency. Regulating the long-term safety of geological disposal: Towards a common understanding of the main objectives and bases of safety criteria[R]. Paris: OECD-NEA, 2007.
- [16] Weiss W, Larsson C M, Mckenney C, et al. ICRP PUBLICATION 122: Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste[J]. Annals of the ICRP, 2013, 42(3): 1-57.
- [17] International Atomic Energy Agency. IAEA safety stan-

- dards for protecting people and the environment: Disposal of radioactive waste[R]. Vienna: IAEA, 2011.
- [18] Hommels A, Mesman J, Wiebe E. Vulnerability in technological cultures: New directions in research and governance[M]. Cambridge: MIT Press, 2014: 1–22.
- [19] Macpherson H G, Bohm R A. Safety of nuclear power reactors[M]. Cambridge: Ballinger Publishing Co., 1982.
- [20] Declan B. France 'imagines the unimaginable': Regulator demands safety upgrades for nuclear plants to guard against a Fukushima-like disaster[J]. *Nature*, 2012, 481: 121–122.
- [21] Scott de Martinville E, Herviou K. Safety for Gen 3 reactors: EPR case. Presented at: Topical day on Generation III Reactors[R]. Brussels: SCK-CEN, 2010.
- [22] International Atomic Energy Agency. Defence in depth in nuclear safety: A report by the International Nuclear Safety Advisory Group[R]. Vienna: IAEA, 1996.
- [23] International Atomic Energy Agency. Framework for an integrated risk informed decision making process INSAG-25[R]. Vienna: IAEA, 2011.
- [24] International Commission on Radiological Protection. Leaflet on radiological protection and geological disposal: The guiding principles and recommendations of the international commission on radiological protection[R]. Ottawa: ICRP, 2013.
- [25] Weetjens E, Marivoet J, Seetharam S. Performance indicators quantifying the contribution of safety functions to the confinement of radionuclides in a geological repository system[C]//Materials Research Society Spring Meeting 2010. San Francisco: Materials Research Society, 2010.
- [26] Krupar S R. Transnatural ethics: Revisiting the nuclear cleanup of Rocky Flats, CO, through the queer ecology of nuclear waste[J]. *Cultural Geographies*, 2012, 19(3): 303–327.
- [27] International Atomic Energy Agency. Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: IAEA International Law Series No.1[R]. Vienna: IAEA, 2006.
- [28] OECD Nuclear Energy Agency. Radioactive waste management towards transparent, proportionate and deliverable regulation for geological disposal[J]. *SourceOECD Nuclear Energy*, 2010 (1): i–197.
- [29] Apter M, Ahn J. Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste[M]. 2nd Ed. Cambridge: Woodhead. Publishing Press, 2017.
- [30] Schröder J. Geological disposal of radioactive waste: A long-term sociotechnical experiment[J]. *Science & Engineering Ethics*, 2016, 22(3): 687–705.

Safety management and strategy for geological disposal of high level radioactive waste

ZHOU Zhichao, WANG Ju, CHEN Liang, ZHAO Jingbo, ZHANG Ming

CNNC Key Laboratory on Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract The high level-radioactive waste might lead to sustainable harms to the environment for thousands of years, and the geological disposal has been considered as a preferred proposal for the high-level radioactive waste safety management based on the passive safety. The time scale of the safety assessment could be up to ten thousand years, and the long-term safety assessment is the focus for the application and approval process of the repository site. Therefore, the safety assessment system needs to be simplified for the calculation and the prediction to improve the reliability of the assessment results. This paper reviews the research progress of the geological disposal for the high-level radioactive waste, the passive safety of the geological disposal and the safe management enlightenment of the nuclear technology. Based on the uncertainty safety principle of the geological disposal, the concept of the safety supervision is introduced to provide the technical support for the safe management of the high-level radioactive waste geological disposal.

Keywords High-level radioactive waste; passive safety; geological disposal; radioactive waste management ●



(责任编辑 祝叶华)