

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.02.007

## 高放废物地质处置安全评价研究

段先哲<sup>1,2</sup>,王灿州<sup>1,2</sup>,唐振平<sup>1,2\*</sup>,王 驹<sup>3</sup>,凌 辉<sup>3</sup>,马艾阳<sup>1,2</sup>,牛苏娟<sup>1</sup>

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;2. 稀有金属矿产开发与废物地质处置技术湖南省重点实验室,湖南 衡阳 421001;3. 中核集团核工业北京地质研究院,北京 100029)

**摘要:**高放废物安全处置是放射性废物管理的重难点问题之一。目前全球拥有核工业的国家正在积极探索安全处置高放废物的高科技研究新课题,但至今尚无高放废物处置库投入运作。本文综述了国内外高放废物地质处置安全评价研究工作,介绍了我国高放废物地质处置库安全评价的一些进展,旨在为我国高放废物地质处置安全评价提供建议与参考。

**关键词:**高放废物;地质处置;安全评价

**中图分类号:**TL942 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-0062(2020)02-0042-08

## The Study of Safety Assessment for the Geological Disposal of High Level Radioactive Waste (HLW)

DUAN Xianzhe<sup>1,2</sup>, WANG Canzhou<sup>1,2</sup>, TANG Zhenping<sup>1,2\*</sup>, WANG Ju<sup>3</sup>,  
LING Hui<sup>3</sup>, MA Aiyang<sup>1,2</sup>, NIU Sujuan<sup>1</sup>

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001 China; 2. Hunan Key Laboratory of Rare Metal Minerals Exploitation and Geological Disposal of Waste, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. CNNC, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The Safety assessment of High Level Radioactive Waste (HLW) is one of the key problems in radioactive waste management. At present, all the countries with nuclear industry are actively exploring new high-tech research topics for the safety assessment of HLW, but so far there is no HLW disposal bank in the world. This study reviewed the progress of safety assessment of the geological disposal of the HLW, as required by the safe assessment of HLW, and introduced the progress in studies of safe assessment in China in or-

收稿日期:2019-11-29

基金项目:环境保护部核与辐射安全监管明细项目(JD201756);湖南省自然科学基金项目(2017JJ3261)

作者简介:段先哲(1985-),男,副教授,博士,主要从事地球化学、矿业工程和安全评价方面的研究。E-mail:duanxianzhe@126.com。\*通信作者:唐振平(1962-),男,研究员,博士,主要从事放射性辐射防护、矿业工程和安全评价方面的研究。E-mail:zptang01@yahoo.com.cn

der to further provide suggestions and references for the development of safety evaluation in China.

**key words:** High Level Radioactive Waste (HLW); geological disposal; safety assessment

## 0 引言

1986年4月26日,切尔诺贝利核电站发生爆炸,这场事故共造成了9.6万人死亡,27万人罹患癌症,约有 $13 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的土地受到了污染,受辐射的核心地带数万年都不再适合人类居住,释放出的辐射尘飘散到了欧洲,对乌克兰、土耳其、希腊、芬兰、丹麦、挪威、瑞典、奥地利、匈牙利、捷克、斯洛伐克、波兰、瑞士、德国、意大利、法国、英国等国家都是长久的危害,全球约有20亿人受到影响,这场事故也间接导致了苏联解体。当年耗费几十亿美元建造了临时隔离辐射的“石棺”到现在已经严重损坏,而在2012年又建造的新石棺寿命也只有100年,100年后怎么办,无人知晓,因为核反应堆这样的辐射源头,从来都没有人拥有真正“安全”处理的经验。

核技术为人类提供了宝贵的能源,同时也产生了放射性废物<sup>[1]</sup>。如今,全世界有400多座核电站,就算不发生事故,它们也要每年产生约1万tHM的乏燃料。目前全世界储存有约20万tHM的乏燃料<sup>[2]</sup>。但至今,世界上几乎没有可以“安全”存放放射性核废料的地方。按照我国的核电发展规划,预计到2020年核电发电量将占总发电量的4%,届时每年产生的乏燃料预计将达到2000tHM<sup>[1]</sup>。我国目前暂存了一定量的放射性废物急需安全处置。

## 1 高放废物

这些核反应堆乏燃料后处理所产生的废液及其固体,以及不打算后处理、准备直接处置(一次通过式)的乏燃料元件,放射性活度浓度高、释热量大、毒性大、含有长半衰期核素、其潜在危害持续时间达百万年之久,被称为高水平放射性废物(简称高放废物)<sup>[3-6]</sup>。

我国的高放废物主要来源于核电站,核废料的存储已经快接近饱和<sup>[6]</sup>。高放废物的一系列特性,决定了它的处置工程要求安全级别高、周期较长。《放射性废物安全管理条例》规定高放废物地质处置的安全隔离期不得少于1万年。长期安全是高放废物地质处置的基本核心,因此安全

评价是高放废物处置研究的重点难点,并且刻不容缓<sup>[5]</sup>。高放废物的妥善处置,不仅是有核国家正在积极探索的高新课题之一,也是民众关注的焦点,更关乎到我国核工业的可持续发展<sup>[4,6]</sup>。

## 2 国外研究现状

从上个世纪50年代开始世界各国开展高放废物地质处置研究以来,已经取得了不同程度的进展(表1)<sup>[4]</sup>。目前世界上研究高放废物地质处置最先进的国家有美国、法国、日本。同时有核国家也提出了多种处置方案(表2),各国的相关政策不同,最终处置方案也不同。但就从费用、风险、法规等角度来评判,提出的“太空处置”、“嬗变处置”、“冰川处置”、“海岛处置”、“海底处置”、“深岩层熔融处置”这些方案可行性都不大<sup>[1-2,4]</sup>。经过长期多方的验证,最安全可靠已经形成广泛共识的只有“地质处置”方案。该方案具有隔离性能好,稳定时间长等优点。到了21世纪初,高放废物地质处置方案已被大多数国家所接受,并投入了大量的研究,但是至今尚未有一个真正的处置库投入运作<sup>[7]</sup>。

“地质处置”简称“挖坑埋”,是一种矿山式地下工程的形式,即把高放废物经过处理实现玻璃固化装入容器,经过适当选址再将其置入距离地表500~1000m左右的地质构造稳定的精心设计的设施中,同时回填缓冲材料,通过天然屏障和工程屏障实现高放废物与生物圈有效且长期的隔离圈闭。处置高放废物的地下工程就被称为高放废物地质处置库<sup>[8]</sup>。它采用的是利用自然地质环境构造的复合屏障系统(multi-barrier system),以放射性核素固化、包容、隔离为核心内容,以多重屏障系统为设计思路,以尽可能长期有效地阻隔放射性物质向生物圈迁移为基本目标的极其复杂的系统工程。

## 3 国内研究现状

我国高放废物地质处置研究从上个世纪80年代开始,起步较晚。迄今为止可粗略分为3个阶段:1)20世纪80年代前期为准备阶段,主要工作是初步的文献研究,中低放废物的试验及其对比等;2)80年代后期为逐步发展阶段,主要工作

是系统的文献调研和全国规模的学术交流以及国际上国家之间的合作;3)90年代到现在主要为野外试验、模拟开发和在工程设计中进行安全评价<sup>[1]</sup>。

表1 一些国家高放废物处置基本情况

Table 1 Basic situation of high level radioactive waste disposal in some countries

国家	围岩	深度/m	废物体形式	废物罐材料	处置库进展
美国	凝灰岩,玄武岩,岩盐	500 ~ 1 130	乏燃料和玻璃固化体	多层镍基合金	水平放置,选址在美国尤卡山,场址评价已完成,性能评价也已完成 <sup>[9-14]</sup>
法国	粘土岩,花岗岩,岩盐	500	玻璃固化体	碳钢	地下实验室已建成,水平放置,评价工作已完成
芬兰	结晶岩(花岗片麻岩)	500	乏燃料	铜加铸铁内衬	单个钻孔,竖直放置,用膨润土作缓冲材料
英国	未定(硬岩,黏土层)		高放废物体		
德国	岩盐(花岗岩)	870	玻璃固化体、乏燃料	铁质	水平放置,无缓冲回填材料,岩盐回填
加拿大	结晶岩(花岗岩),页岩,辉长石	500 ~ 1 000	乏燃料(CADUN堆)	钛	单一竖直钻孔,用黏土作缓冲回填材料
瑞士	结晶岩(花岗岩)或粘土岩	600	乏燃料和玻璃固化体	碳钢	建有2个地下实验室 <sup>[11-14]</sup> ,水平放置,厚膨润土缓冲材料
瑞典	结晶岩(花岗片麻岩)	500	乏燃料	铜加铸铁内衬	确定 Olkiluoto 为处置库场址,单个钻孔,竖直放置,用膨润土作缓冲材料,2020年拟投入运营 <sup>[9-14]</sup>
比利时	黏土层(页岩)	220	高放废物体		
意大利	黏土层		高放废物体		
日本	结晶岩(花岗岩)或沉积岩		玻璃固化体	碳钢	在建2个地下实验室,分别位于瑞浪和幌延,用膨润土作缓冲材料 <sup>[9-15]</sup>
印度	片麻岩、花岗岩		高放废物体		

表2 高放废物处置方案

Table 2 High level radioactive waste disposal schemes

处置方法	基本思想	可行性	
太空处置	将废物送到宇宙或者其它星体上	费用高昂,风险大,技术上不允许	
冰层处置	将废物埋藏于南极洲冰盖下	国际法规公约不允许	
嬗变处置	将高放射性核素从废物中分离出来,通过技术处理转变为短寿命核素	技术难度大,费用高昂,效率不明	
海岛处置	将废物封存在荒无人烟的海岛上	国际法规公约不允许	
海底处置	将废物置于深海底下沉积层中	正在评价其风险和利益	
深 低 层 处 置	深岩层熔融处置	将高放废物不经处理直接注入深地熔融岩浆中	尚未开始研究
	超深钻孔埋藏处置	将废物置于距离地表3~15 km深的超深钻孔中	技术难度大,费用高昂
	地下库巷道地质处置	选址适当地质层在距离地表500~1 000 m开挖巷道布置处置库	研究最多,具有可行性

虽然国内的高放废物地质处理工作已经落后于发达国家,但是科研工作者30多年来开展了大量工作,在法律法规、处置规划和选址、处置库围岩研究、工程屏障、缓冲材料、核素迁移研究等方面取得了显著成果。工程设计、安全评价也取得了一定进展<sup>[2-3,5-6]</sup>。目前已经初步选定高放废物采用玻璃固化,以甘肃北山为重点预选场址,将花岗岩作为处置库的主要岩型,以内蒙古高庙子膨润土矿床作为我国处置库缓冲回填基础材料,并且确定了添加剂的配方<sup>[16-17]</sup>。处置库以长期安全为核心,尽可能长时间地阻隔放射性核素在系统内的迁移。

同时,我国第十届全国人民代表大会常务委员会第三次会议于2003年6月28日通过的《中华人民共和国放射性污染防治法》和2012年国务院施行的《放射性废物安全管理条例》已明确规定高水平放射性固体废物实行集中的深地质处置<sup>[18-19]</sup>。国防科工委、科技部和环保总局三部门联合发布的《高放废物地质处置研究开发规划指南》也提出了选址→地下实验室→处置库的3个建设技术路线阶段:实验室研究和选址阶段(2006~2020);地下实验室试验阶段(2021~2040);处置库建设阶段(2041~本世纪中叶)<sup>[6,19]</sup>。目前高放废物地质处置地下实验室项目已经获得国务院立项批复,预计2020年开工建设。

安全评价方面正在引进国外软件并加以消化,预计将有可能对我国的处置库系统进行总体评价。总的来说,我国的地质处置安全评价研究不仅与国际水平相差很远,基础相对薄弱,没有政府的专项规划,缺乏相关的法规、标准和研究平台,未明确实施责任的主体,而且关键技术还没有掌握,不能满足长期地质处置研发工作的需要<sup>[2,19]</sup>。

## 4 高放废物地质处置安全评价研究

安全评价适用范围非常广泛,既适用于一个小的生产经营单位,也适用于对某一特定的场所。高放废物地质处置的研究主要包含两个方面,一个是处置技术的研究和改进,一个是处置系统的安全评价。由于高放废物处置巨大的空间和时间跨度,使得后者显得尤为困难。它有别于一般废物的处置评价。首先,它所考虑的时间长,通常是一万年以上,超越了一般意义下技术所涉及的时间尺度;其次,它所选用的岩体具有不均匀的特征。这种时间长和复杂的非均质空间系统给安全

评价带来了许多不确定因素<sup>[21]</sup>。通过一些研究得出,高放废物地质处置安全评价所涉及的不确定性因素可分为3个方面:情景的不确定性、模型的不确定性和和数据资料的不确定性。

情景的不确定性(scenario uncertainty)主要来源于人们认知水平的局限,主要包括:1)系统中一些缓慢演化的过程(如核素的迁移等)的不确定性;2)未来地质环境的变化(如地震、崩塌等)的不确定性;3)未来人类活动的不确定性。模型的不确定性(model uncertainty)主要包括:1)模型选取的不确定性;2)模型预报长时间范围结论的误差;3)由于数学或者公式简化模型产生的误差。数据资料的不确定性(data uncertainty)主要包括:1)数据的量取或者观测的直接误差;2)试验或者计算结果的误差;3)类比研究条件误差<sup>[4]</sup>。

安全评价需要充分考虑可能出现的情况避免遗漏,并且用于评价的模型必须经过严格的验证和对比。图1给出了国际上普遍采用的方法,其通常流程一般是:先进行资料收集和现场勘查,确定评价内容;再确定要分析的目标系统的整体情况和单元情况;然后,分析演变过程构想未来可能遇到的各种事件或者作用,来构建处置库可能产生的各种情形,这一过程即情景分析;通过建立的模型模拟可能发生的情形,并对相应的情况进行安全性分析和危险性分析;最后,将模拟的结果与有关规范或者相应指标进行对比以评价系统的安全性,同时给出技术修改意见或者操作建议,从而找出最佳方案。其中,在情景分析的过程中,不能遗漏潜在的危险和可能转化生产的危险,着重对危险的种类、性质、条件、概率、范围进行分析从而估算概率。难点是如何合理地确定需要评价的情形以及在这些情况下的模型构建,对已查明的危险通过建模来量化,为最终的决策者提供准确的依据<sup>[3]</sup>。

### 4.1 情景分析

高放废物地质处置系统安全评价的未来情景可分为2大类:屏障隔离失效情景和地下水情景(图2)。

其中屏障隔离失效情景主要是指由于高放废物地质处置系统受到多种因素的综合影响导致该处置系统屏蔽作用失效。失效情景可分为敏感情景和基准情景。敏感情景主要假设处置设施有缺陷,人类活动可能会导致放射性核素快速入侵生

物圈<sup>[19]</sup>。主要考虑工程屏障的原始缺陷,例如玻璃固化体的核素的选择性溶滤、密封材料的施工问题、回填材料在封闭过程中所出现的问题等。基准情景主要假设处置设施按照预期过程演化,预期的效果也是最佳的。地下水情景可分为基本情景和不确定情景。不确定情景分析时主要考虑:1)自然现象,包括地震、火山活动、地面升降或者侵蚀作用、气候和海平面变化等。2)未来的人类活动,分为有意识的和无意识的。例如在处置库周围开发矿产资源或者地下水资源,就可能直接地或者间接地接触到放射性核素。如果是有意识的,未来的人类可能会利用其所掌握的的知识和技术来进行防范和处理;而对于后者,人类会

对所面临的危险毫无意识。因此,在考虑未来活动时,应侧重考虑人类的无意识活动。基本情景是情景分析的基本出发点,一般分析时假设:1)系统所处环境稳定,地质条件不变,处置库围岩热力学性质、水文地质和地球化学性质恒定。2)地表气候环境和地表水在预报时间内保持不变。3)工程屏障系统没有发生任何的故障,金属容器、缓冲回填材料、玻璃固化体、密闭材料按照预期效能发挥作用。4)处置系统不受外界影响。由于高放废物地质处置系统所考虑的安全评价时间较长,所以说这些情形有很大的不确定性,因此安全评价通过假设不确定情形来预估各种可能的演化过程<sup>[4]</sup>。

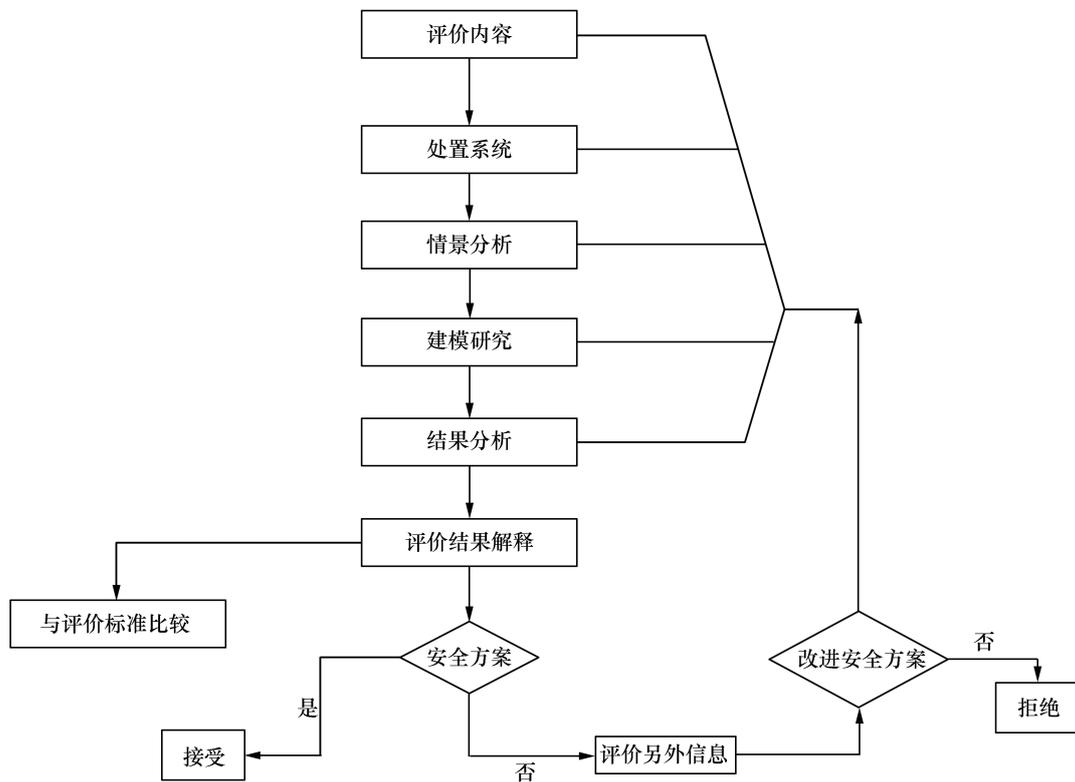


图1 高放废物地质处置系统安全评价方法

Fig. 1 Safety assessment method for geological disposal of high level radioactive waste system

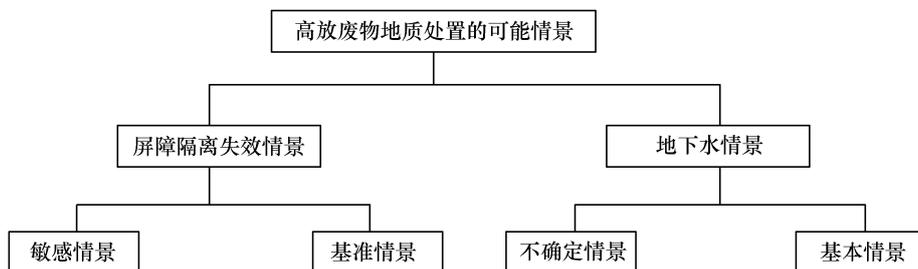


图2 高放废物地质处置的情景分类

Fig. 2 Situation classification of the geological disposal of high level radioactive waste

## 4.2 建模研究

建模分析就是在情景分析的基础上,通过模型刻画系统未来可能的演变过程,定量分析各种可能出现的行为。在高放废物地质处置系统中,一般认为放射性核素从玻璃固化体溶滤出来以后,经地下水流动作用穿过屏障系统迁移至生物圈。因此,模型中的核素迁移研究在高放废物地质处置系统安全评价中显得尤为重要。具体模拟时,首先以地下水情景为基本情形模拟核素迁移的通量;然后,通过建立的一系列情景模拟其灵敏性;最后将所得结果与评价标准进行比较得出系统的安全性。

我国在“十二五”期间已经初步建立了安全评价的技术框架,引进并消化了 Goldsim、Ecolego、Melode 等评价软件<sup>[6]</sup>。其中 Melode 软件就侧重于对屏障隔离失效的情形进行分析,在辐射、热作用下对屏障的安全特性研究,主要分为:1) 常规失效的破坏机制研究;2) 加速老化的破坏机制研究;3) 长期演变机理研究<sup>[10]</sup>。但是由于高放废物处置系统的复杂性,导致这些模拟都是复杂的工程,里边设计到了岩石力学、地球化学、热力学以及溶滤迁移等问题,所建立的模型也应该是包括应力场、化学场、温度场、渗流场等在内的多个场的耦合,或者说是这些场所建立的模型所组成的综合模型。在情景分析中需要开发多种安全评价模式,并且还要是分阶段迭代的、针对特定场址和工程设计的评价模式。因为涉及多个场以及多方面因素,要考究多方面情形下的综合影响效果,所以建模分析的时候要尽量全面。建完模之后还应通过地下实验室的试验对模型进行验证,因为在试验的基础上建立模型是系统安全评价的必然要求<sup>[20]</sup>。

## 4.3 结果分析

通过建模分析得出的结果,主要侧重分析以下几个方面:1) 核素在系统中的主要迁移方式以及影响核素迁移的滞留体;2) 密封材料是控制核素迁移的主要手段,密封材料的性质对核素迁移的速率影响几个数量级;3) 巷井的物理性质对安全结果的影响;4) 屏障的性质对核素迁移的影响以及对安全结果的影响;5) 乏燃料构件的降解对核素迁移通量的影响数量级。

## 4.4 评价标准

用于高放废物地质处置系统安全评价的指标须满足可靠、简便、直观、实用等要求。这些指标直接服务于安全评价,用来评估和证实相关系统

性能,使处置系统具有可检查性和可监控性的特征。目前 IAEA(国际原子能机构)尚未完成高放废物地质处置系统安全评价的评价标准的制定,国际上普遍采用辐射计量或者风险因子作为评价的主要指标。

其中辐射剂量作为评价指标具有概念简明、已被人们广泛接受等许多优点,不足之处是没有考虑未来人类受到辐射的可能性。使用风险因子作为高放废物地质处置系统安全评价指标则弥补了上述不足。除了这两种评价指标之外,国际上还推荐核素浓度、核素通量、迁移时间等辅助指标来评价其安全性。欧洲习惯对系统的放射性评价,结果一般以辐射值表示;美国习惯对系统性能评价,结果以工程的稳定性表示<sup>[4]</sup>。两者本质上没有任何区别。

评价标准是高放废物地质处置系统安全评价研究过程中的一个关键节点,但是现今还未确定以何种数值为主要指标,只是综合已有研究给出了建议(表3)。国内应该吸取发达国家的经验教训,预先开展此方面的研究,并尽早制定相关标准。同时为各个子系统制定完备的技术性能标准,以满足性能评价的需要,例如处置库稳定性标准、水文地质标准、地球化学特征、处置库场址标准、热特性和力学特性等,还应有工程屏障相配套的标准。这些标准的制定离不开安全评价研究优化的进程,以及经济上的考虑<sup>[20]</sup>。

表3 我国高放废物地质处置安全评价指标的建议  
Table 3 Suggestions on the safety assessment indexes of geological disposal of high level radioactive waste in China

	指标	范围或作用
安全指标	有效剂量率	系统关闭后的早期阶段(1 000 年以内)
	生物圈的放射性浓度	系统关闭后的中间时间(1 000 到 1 万年)
	岩石圈的放射性通量	系统关闭后的遥远时期(1 万年以后)
性能指标	屏障中的放射性总量	不同时期放射性核素的分布
	屏障外的放射性总量	对核素释放的延迟作用
	屏障内的放射性总量	屏障内放射性元素的稀释
	通过屏障的时间	各核素对放射毒性释放的贡献

## 5 高放废物地质处置研发的问题、建议和展望

### 5.1 现阶段的问题

迄今为止还没有一个国家已建成高放废物处置库,多数国家的工作还停留在初选阶段。造成这种现状的原因是多方面的:1)政策上的原因;2)公众的不接受和地方政府的不支持;3)标准有待制定,程序审批的复杂化;4)选址困难;5)投资的不断升高;6)关键技术亟待突破。其中公众的接受已成为关键问题,甚至影响到了选址与建库。关键技术主要包括:深部地质环境的特点和演化、深部地质环境下核素迁移的地球化学行为、处置库屏障系统地质环境的精准预测、地质处置系统的安全评价、针对地质处置系统的大规模计算机仿真以及建模<sup>[1]</sup>。

### 5.2 相关建议和对策

针对以上问题,建议采取一些妥善措施:1)扩大乏燃料的贮存能力。由于各国不同的经济政策和能源策略,各国的乏燃料政策也不同。例如英国、法国、日本、我国采取后处理方案;加拿大和瑞典采取直接处理的方案;德国将原件运回卖主国,高放废物固化体运回本国。2)加强评审和监督,加快规范和标准的制定。高放废物处置是千万年大计的工程项目,一系列的选址、设计、建设、运行、封闭都应该在规范下操作,这些规范和标准应该受到国际公认和国家审议通过。3)争取公众的信任和支持。多举办展览会、报告会、宣传会,通过各种出版刊物、宣传小册子、电视广播等媒体,让公众了解和相信放射性废物是可以安全处置的,不仅不会危害他们的健康,也不会损坏他们的利益,还能促进当地的经济。让公众参与进来,了解到给他们带来的好处,使公众变得乐于接受。4)加强国际间的交流合作,吸取国外的成熟经验。组织相关学科的专家,充分借鉴国际先进技术,注重相关科研院所和大学进行合作,对关键的安全问题达成共识,稳步推进处置库建设<sup>[1,19]</sup>。

### 5.3 展望

核能前景受制于高放废物的妥善处置,而安全评价研究又是高放废物地质处置的重要一环,应该用长期发展的眼光来审视,即使这样,未来的多种状况也会看不准,给安全评价研究带来挑战。安全评价贯穿整个规划和建设阶段,不仅要想到系统的安全,还要兼顾最优成本管理,因为高放废

物安全处置是很花钱的,这就要求研究人员在保证工程质量的前提下确定最经济的方案。

随着国家的重视、国际合作的加强、法律法规的完善、经费的增加、研究的深入,我国的高放废物地质处置将会逐渐提高并取得突破,为我国核事业的长远发展提供强有力的保证。

## 6 结论

本文通过对我国高放废物地质处置安全评价的研究,最终得出以下结论:

1)我国已经确定甘肃北山为处置库预选区,2020年建设高放废物地质处置地下实验室、21世纪中叶建成处置库的目标。开展相应的安全评价工作也要提上日程。

2)要有一个权威的机构负责这项工作,制定科学、合理的规划,与国际接轨的标准和规范。

3)要加强不同科研单位的交流,加深国际间的合作,从而在技术上建立一套可行性的模型。

4)要根据国情来开发,做好宣传教育工作,获得公众的信任与支持。

总之,高放废物安全处置任务是艰巨的,要确保当代人的健康和后代人的安全。它影响我国核能事业的发展,必须予以高度重视,做好相关工作。

### 参考文献:

- [1] 王驹. 中国高放废物地质处置 21 世纪进展[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 2072-2082.
- [2] 王驹. 安全处置高放废物 确保核能可持续发展[J]. 中国核工业, 2008(6): 16-19.
- [3] 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, 10(2): 270-278.
- [4] 李金轩. 高放废物地质处置系统安全评价及其指标体系[C]//钱七虎院士论文集:中国岩石力学与工程学会, 2007: 8.
- [5] 李洪辉, 赵帅维, 贾梅兰, 等. 高放废物地质处置安全评价准则研究[J]. 核科学与工程, 2016, 36(3): 313-322.
- [6] 王驹. 高放废物深地质处置: 回顾与展望[J]. 铀矿地质, 2009, 25(2): 71-77.
- [7] 苏锐, 程琦福, 王驹, 等. 我国高放废物地质处置库场址筛选总体技术思路探讨[J]. 世界核地质科学, 2011, 28(1): 45-51.
- [8] 李洪辉, 赵帅维, 刘建琴, 等. 高放废物地质处置安全评价初步思考[C]//第 5 届废物地下处置学术研讨会. 第 5 届废物地下处置学术研讨会论文集: 2014 年

- 卷. 绵阳:中国岩石力学与工程学会,2014:324-328.
- [9] 魏方欣,刘新华,徐春艳,等. 我国高放废物地质处置地下实验室安全问题探析[J]. 中国核电,2019,12(3):259-263.
- [10] 杨仲田,梁栋,孙庆红,等. 高放废物地质处置安全评价的模拟与验证试验研究初步建议[C]//第3届废物地下处置学术研讨会. 第3届废物地下处置学术研讨会论文集:2010年卷. 杭州:中国岩石力学与工程学会,2010:273-277.
- [11] 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.
- [12] 凌辉,王驹,唐振平,等. 花岗岩高放废物地质处置库选址与安全评价[J]. 南华大学学报(自然科学版),2018,32(5):38-43.
- [13] 郝卿,刘长良,杜子冰. 核废料处理方法及管理策略研究[J]. 科技信息,2012(32):159-160.
- [14] 杨策明,田浩天. 国外几例高放废物地质处置设施选址探讨[J]. 辐射防护通讯,2018,38(1):8-13.
- [15] 贾梅兰,刘敏,李澎,等. 日本乏燃料的安全管理及对我国的启示[J]. 核安全,2019,18(4):33-40;94.
- [16] 王驹,苏锐,陈亮,等. 甘肃北山高放废物地质处置地下实验室若干战略问题的考虑[C]//第5届废物地下处置学术研讨会. 第5届废物地下处置学术研讨会论文集:2014年卷. 绵阳:中国岩石力学与工程学会,2014:14-19.
- [17] 马特奇,梁威,徐辉,等. 放射性废物玻璃固化体溶解行为及机理研究进展[J]. 核化学与放射化学,2019,41(5):411-417.
- [18] 李洪辉,王亮,余少青,等. 高放废物地质处置各屏障系统安全要求研究[J]. 世界核地质科学,2016,33(4):229-236.
- [19] 罗建军,商照荣,孙庆红,等. 对法国高放废物处置安全审评的分析研究[J]. 核安全,2009(3):38-46;63.
- [20] 张强勇,郑阳,吴冬,等. 高放废物地质处置地下实验室施工风险评价[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(6):1684-1691.

(责任编辑:扶文静)