

文章编号:1000-582X(2003)04-0130-05

放射性废物处置中的地质学问题及研究现状*

王青海^{1,2}, 李晓红¹, 靳晓光¹

(1. 重庆大学 西南资源开发与环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 新疆马兰 63653 部队, 新疆 马兰 841700)

摘要:放射性废物地质处置是一个涉及放射性化学、原子物理、水文地质学、水文地球化学、构造地质学、土木工程学多学科的复杂的系统工程, 其中由于处置库建设的主体工程是地质工程, 因此地质工作在放射性废物地质处置中占有重要的地位。在分析国内外有关资料基础上, 结合放射性废物地质处置工作中的经验, 指出了低中放射性废物和高放射性废物地质处置工程中地质工作的研究内容、研究范围及国内外研究现状, 并强调了地质构造、水文地质、水文地球化学、地球物理、矿物岩石、岩土工程和地质灾害等地质工作在放射性废物地质处置中的作用。

关键词:放射性废物; 地质处置; 系统工程

中图分类号:X705

文献标识码:A

1 概述

放射性废物作为 20 世纪大量涌现的新型垃圾, 它与其它生活垃圾、工业垃圾和一般的化学污染的主要区别在于前者具有放射性, 而且与存在的化学状态无关。每一种放射性核素都有一定的半衰期, 能放射出具有一定能量的射线, 除了在核反应条件下, 任何化学物理或生化的处理都不能改变放射性这一特征。当这些核素释放到环境中去以后, 可通过外照射或内照射作用于人体。此外, 放射性废物中还往往含有其他对环境和人体有害有毒作用的化学物质。因此对放射性废物处置的根本目的就是将它们与人类环境隔离开来, 确保随后返回到环境之中的放射性核素不会对人类造成不适当的照射, 以保护生态环境、人类的健康和安全。然而由于人类对放射性物质的认识和了解有一个过程, 因此, 对放射性废物的处置方式也在不断的变化。其发展大致可以分为 3 个阶段^[1]。

20 世纪初期, 人类对放射性的认识还很肤浅, 当时只知道可用放射性进行治疗(如镭), 而没有意识到它对人类身体和环境的危害, 所以最初的放射性废物大多采取就地填埋方式^[2], 处置过程不存在选址过程, 因此也就没有什么处置程序。

随着人类对放射性及其废物认识的深入, 其处置方式发生了变化, 20 世纪 40-60 年代期间, 美国、英

国、法国、前苏联等放射性废物大国对放射性废物采取了陆地简单浅埋及海洋处置方式, 但随后出现的一系列事故(如美国 1982-1984 年地下水污染事故^[3]等)证明简单浅埋方式还是很不安全。

进入到 20 世纪 70 年代以后, 随着人类环境意识的逐渐提高以及对放射性废物的进一步了解和认识, 人类对放射性废物处置程序逐渐走向规范和完善, 环境保护和人类健康保护被放到了很重要的位置, 而且世界各国都把经过严格地质选址程序(严格的场址选址、设计、建造、运行管理)的地质处置看作是较为理想的处置方式^[4]。

我国的放射性废物处置方面的研究工作自 20 世纪 70 年代开始的, 但其中也有一个认识的过程。在 70 年代末, 我国在开始为低、中放废物处置做准备时, 曾经以为这是一个比较简单的事情。经过 20 年经验和挫折的积累, 才逐渐明白了低、中放废物并不纯粹是一个工程技术问题, 首先它是一个与特定场址和特定处置工程设施有关的工程安全、环境保护、公众辐射防护和社会可接受性问题, 要求做很多的地质基础工作, 要求包括地质体在内的多重屏障效能的可靠性。

总之, 放射性废物处置阶段变化, 反映出了人类对放射性废物处置中地质处置方案的认识和重视。而其地质处置的核心问题就是处置场的选址和环境评价, 其中涉及的专业领域十分广泛, 除了放射性化学、原子

* 收稿日期: 2003-01-15

作者简介: 王青海(1969-), 男, 湖南祁东人, 重庆大学副研究员, 博士后, 主要从事岩土工程和环境评价方面的研究。

物理、管理学等专业知识外,还涉及到地质学问题,如土壤物理学、岩体力学、水文学、水文地质学、水文地球化学、构造地质学、土木工程学、地球物理学等^[5]。从当前 IAEA(国际原子能机构)和我国制定的场址选址程序和评价标准来看,地质学问题是放射性废物处置过程中极其重要的一个问题,它直接关系到处置库的封闭性能和安全运行,因此各个国家都十分重视废物处置中的地质学研究。

2 放射性废物处置中的地质问题

放射性废物地质处置的根本目的就是要以地质观点选择合适的处置场所,使被处置的废物在处置后数百年(中低放废物)乃至上万年的时间(高放废物)跨度里,被封闭在一个有限的地质空间内,不致危及到人类的生存环境和生命健康。其中涉及的地质问题主要有:地质构造、水文地质、水文地球化学、地球物理、矿物岩石、岩土工程和地质灾害等。

2.1 地质构造

为保障处置库及其地面设施的安全运行,防止放射性废物的泄漏,在处置库选址中,必须查明场地的地质构造环境,其中主要包括地震活动史、活断层分布及火山分布和活动情况。

由于放射性废物处置库的运行时间长达 300 ~ 500 a 至 10 万 a,在如此长的时间跨度里,放射性废物处置库必须是稳定的,不能因地震活动或活断层的活动或火山活动导致处置库破坏。因此在选址时,尽量避开活断层分布区,地震活动带和火山活动区,将处置库建在地质构造相对简单、地质构造环境稳定的“安全岛”内。

各个国家在选址时,都十分重视地质构造环境的安全。美国在雅卡山场地特征研究计划中,提出满足该场址地质稳定的具体要求是^[2]:1)在地面设施有效使用年限内,区内断层发生的净总位移不能超过 0.5 cm;2)设施

工程所在地一定范围内无速率大于 1×10^{-5} m/a 的活断层或被错动地层年代小于 10 万 a 的断层。对地震的要求是该区域的最大可能地震不应在浅地表产生裂缝。

我国大陆地处欧亚板块的东南隅,为印度板块、太平洋板块和菲律宾海板块所夹持,板块的相互作用使我国的大陆构造十分强烈,晚第四纪以来断裂活动显著、强烈地震时有发生^[6]。在我国进行放射性废物处置时,这些都是必须考虑和认真调查的问题。

然而人类有地震记录、火山活动记录的历史不过千余年(我国有地震记录的历史只有 1 000 a),而放射性废物处置库场址的安全运行需要跨度上万年,如何根据短暂的历史记录资料确定遥远的未来地质稳定性事件,是一个世界性的地质科学难题。

2.2 水文地质

放射性废物处置场址的水文地质条件是放射性废物地质处置安全评价的关键因素之一,因为水体是被核素向外界环境迁移的主要载体。在大多数的概念模型中,性能评价实际上是依赖于地下水的核素迁移模式,因而,场址地质调查工作的大部分不可避免地是要为地下水流动模式提供数据,并勾画出古水文地质模式,以帮助验证模式的预测能力^[7]。在放射性废物处置库选址时,一般要求场址的水文地质条件应能限制核素随水流沿着较长的流径向外迁移。

由于放射性废物处置库,特别是高放废物处置库一般都建在和计划建在基岩中,如花岗岩、玄武岩、盐岩、泥质岩^[8]等等(如表 1),在这些基岩中,往往存在断层、节理,它们是核素向环境迁移的最主要通道。核废物在基岩介质中进行地质处置是否可以确保安全,在相当程度上取决于裂隙岩体对核素的屏障功能和作为核素迁移载体的裂隙水的运动特征,因此研究裂隙介质中核素迁移问题,具有重要的理论意义和实际意义。

表 1 世界部分国家或地区放射性废物处置库围岩类型

国家或地区	低中水平放射性废物 处置库围岩类型	高放废物处置 库围岩类型	国家或地区	低中水平放射性废物 处置库围岩类型	高放废物处置 库围岩类型
白俄罗斯	粘土、岩盐	粘土、岩盐	日本		1)
比利时	粘土	粘土	韩国	安山岩	
保加利亚		花岗岩、泥灰岩	荷兰		岩盐
加拿大		花岗岩	波兰	1)	1)
中国	粘土、花岗岩、碎屑岩	花岗岩	斯洛伐克	1)	1)
克罗地亚	1)		西班牙	1)	2)
捷克		花岗岩	瑞典	2)	花岗岩
芬兰		花岗岩	瑞士	泥灰岩	花岗岩、粘土
德国	铁矿井、岩盐	岩盐	台湾	1)	

续表 1

国家或地区	低中水平放射性废物 处置库围岩类型	高放废物处置 库围岩类型	国家或地区	低中水平放射性废物 处置库围岩类型	高放废物处置 库围岩类型
法国	2)	1)	乌克兰		花岗岩、岩盐
匈牙利		粘土岩	英国		火山岩
印度		花岗岩	美国		凝灰岩
印度尼西亚		玄武岩	斯洛文尼亚		泥灰岩

说明:1)尚未决定;2)仅有地面设施。

2.3 水文地球化学

地下水的化学性质,是含水层化学性质和水岩反应一同造成的,大气降水在地表下渗,其中的氧大多消耗在土壤及岩石中的流径上,生物活动主要在土壤中进行,它消耗氧、产生二氧化碳,地下水在与岩石接触过程中,不断与岩石发生离子交换反应或其他类型的化学反应,使水中的化学成分发生变化,地下水的形成过程就是自然界大气降水与岩石圈长期相互作用的结果,不同的岩土环境产生不同的水化学成分。

被处置核素在地下水中的迁移能力强烈依赖于核素在水中的化学形态,而后者则完全受水化学成分、pH 值以及水的 Eh 所左右^[9-10]。放射性核素从废物体进入地下水后,它的存在形态因地下水中的某些成分而发生转化,它可能呈简单阳离子、配位物阴离子或中性分子等溶解状态,也可能以胶体粒子或微粒存在。一种核素的不同存在状态,其吸附行为往往差异很大^[11-12]。所以说处置场址的水文地球化学研究是被处置核素分配系数、阻滞参数及工程屏障材料学研究的基础和前提。

2.4 矿物岩石学

当被处置的放射性核素从包装体释出后,其迁移过程受工程屏障(如粘土)和地质介质的阻滞作用,这种作用主要表现为核素与岩石矿物之间的吸附反应:离子交换、物理吸附、表面配合、矿化等,其吸附机理严格受地质介质的矿物成分影响和控制。例如据有关专家研究,铀元素的 UO_2^{2+} 形式是酸性体,容易被岩土中的负电荷胶体吸附固定,在天然水中的迁移范围通常很小; $[UO_2(CO_3)_2]^{2-}$ 和 $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ 的形式是碱性体^[13],在一般以带负电荷胶体占优势的岩土中不易被吸附,因此可以稳定地迁移很远。

作者曾就花岗岩和砂岩对⁹⁰Sr 的吸附和阻滞作用进行研究。其中砂岩的主要矿物成分是石英和长石,钙质及泥质胶结,花岗岩的主要矿物成分是长石、云母和石英,为了探讨岩石介质-砂岩和花岗岩介质对铯的吸附机制^[14],对本征扩散实验前后岩石中的主要元

素含量进行对比分析,其测试结果如表 2。其结果表现为组成花岗岩矿物中的 Ca 离子与⁹⁰Sr 离子之间的离子交换。

表 2 花岗岩和砂岩在吸附铯前后各主要原子百分数 %

主要原子	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Al ³⁺	Si ⁴⁺	Fe ²⁺	Si ²⁺
花岗岩	吸附前	1.71	2.30	3.77	3.52	8.72	25.43	6.32
	吸附后	1.06	1.06	3.83	1.36	8.59	26.97	5.96
砂岩	吸附前	1.87	3.79	0.99	4.77	4.51	28.23	0.81
	吸附后	2.58	1.75	0.78	1.82	4.95	26.89	1.00

放射性废物处置中的矿物岩石学主要是从微观上研究地质介质对核素的吸附机制,并为工程屏障材料的选择提供理论依据。研究的内容包括矿物成分、性质、包裹体、蚀变、组合、和岩石的化学特性、粒度、结构构造、电性、磁性等。

2.5 岩土工程

与所有的建筑一样,放射性废物地质处置选址和建造过程需要在岩土工程方面做大量的工作。其中包括岩石力学参数的测试、岩石力学性质随温度场的变化、热应力作用下、岩体介质材料的损伤特性^[15]。

2.6 热力学效应

放射性废物在地下处置过程中,由于放射性同位素衰变,将产生大量的热量,导致贮存库围岩地质介质温度升高。这不仅影响岩体的应力场和水体的渗流场,同时也影响着岩体的物理性质、地下水的物理性质、地下水化学成分、核素迁移速率以及水-岩之间的相互作用。这种热力学效应是放射性废物处置、特别是高放废物地质处置安全评价中关键问题之一。

常规的岩石热物理学实验表明,岩体在外界高温场条件下,将产生大量的微裂隙^[4],岩体的热物理特性及其中的各种不连续面(节理、断层)分别对热传导及地下水渗流起着重要的控制作用,处置库围岩介质的这种改变发生在核废物处置场关闭后的缓慢过程中。这一过程是围岩温度场-应力场-渗流场环境演化和岩体破坏累积的一个协同作用过程。

2.7 其它地质灾害

在放射性废物处置场选址时,像泥石流、滑坡、山

洪、江河洪水、海啸等能量大、破坏力强的地质灾害是必须回避的。因此,选址过程都要对场址当地可能发生的地质灾害进行调查分析的,并在此基础上做出风险性评价。

我国地域辽阔,不同地区有不同的主要地质灾害及其组合类型。在我国进行放射性废物处置场场址勘选时,要根据当地的具体环境分析。其中在西南地区对废物处置工程设施有影响的地质灾害类型主要有洪灾、崩塌、滑坡、泥石流,该地区大量的崩塌、滑坡和泥石流时间密集地分布在鄂西、湘西、云贵川和西藏东部的深切沟谷地带。东北地区内对废物处置有影响的地质灾害主要是洪涝、低温;华北地区主要是洪涝、土壤盐碱化;西北黄土高原地区主要是暴雨、滑坡和水土流失,西北干旱地区主要需要考虑土地盐碱化、风蚀、雪灾;长江中下游江湖平原地区需要注意的是洪涝和沿海地带的风暴、海啸;在我国华南地区和福建、浙江地区主要是暴雨、洪水、风暴潮^[6]。

3 放射性废物处置中的地质问题研究现状

从 20 世纪 60 - 70 年代开始,世界上许多国家开

始对放射性废物地质处置进行了积极的探索和研究。世界上一些国家,如美国、德国、瑞典、日本等国在放射性废物的地质处置和相关方面的研究开展得比较早,特别是低、中水平放射性废物处理,目前已有 50 多个国家共建造了和计划建造的中低放废物处置库达 140 多个^[16],对于高放废物的处置,基本上处于规划和研究阶段。

经过几十年的发展,在放射性废物地质处置中的地质学问题上已经制定出了基本的程序构架,并取得了丰富的成果。特别是在低中放废物地质问题上,从处置场的概念设计和计划到区域地质调查再到场址特征调查,在地质学问题上的思路可以说是清晰的、已经规范化了的。但是由于放射性废物地质处置是一个复杂的系统工程,地质学方面的研究内容多,工作量大。因此,很多方面还处在不断完善的阶段,尤其是高放废物地质处置中的地质学研究。

对于放射性废物地质处置中的地质学研究,除了常规的研究之外,很多国家还开展了地下实验室研究工作(如表 3)。这些地下实验室在处置库开发过程中主要起以下几个作用^[9]。

表 3 国外部分地下研究实验室^[17]

序号	地下实验室名称	围岩介质	实验室深度/m	地点	备注
1	URF	塑性粘土	230	比利时	1984 年运行
2	Olkiluoto	花岗岩	60 ~ 100	芬兰	1992 年运行
3	Gorleben	盐岩	900	德国	1985 年始建
4	WIPP	盐岩	650	美国	1982 年运行
5	ESF	凝灰岩	300	美国	1996 年运行
6	East France	粘土岩	500	法国	2000 年始建
7	花岗岩地下实验室	花岗岩	450	法国	选址工作
8	Aspo	花岗岩	460	瑞典	1990 年始建
9	Grimsel	花岗岩	450	瑞士	1983 年运行
10	URL	花岗岩	240 ~ 420	加拿大	1984 年运行
11	Tono	沉积岩	135	日本	1986 年运行

1) 了解深部地质环境和地应力状况,获取深部岩石和水样品,并为其它地质研究提供实验样品;

2) 开展 1: 1 工程尺度实验,在真实的深部地质环境中研究工程屏障和地质屏障的性能和矿物岩石学;

3) 研究放射性核素在裂隙介质和粘土岩中的迁移行为;

4) 放射性核素衰变残生的热应力对处置库安全的影响;

5) 研究构造应力场以及构造应力场在地质年代范围内对处置库所在的岩体区域造成的后果;

6) 测量处置场内放射性核素溶解度和络合情况的基本化学数据;

7) 确定以胶体、有机络合物和其它存在形式的放射性核素的迁移速率、浓度及稳定性;

8) 确定放射性核素由于吸附和扩散、弥散等在岩石介质和回填材料中形成的滞留量;

9) 通过现场实验,建立合适的核素迁移模式和安全评价模式。

我国从 20 世纪 80 年代到目前近 20 a 间一共策划了 4 个区域性处置场和两个专业性处置场,如甘肃西北处置场,青海二二一核设施退役工程处置场,广东

北龙商业化处置场等。目前研究的地质介质主要是孔隙介质,如黄土、膨润土,对岩石介质,特别是核素在基岩裂隙系统中的迁移行为方面研究得很少。

在高放废物地质处置上,我国尚处在规划阶段,我国第一个地下实验室将在甘肃北山建造,届时将进行有关方面的地质学研究工作。

参考文献:

- [1] 陈式,马明燮. 中低水平放射性废物的安全处置[M]. 北京:原子能出版社,1998.
- [2] 罗嗣海. 雅卡山核废物处置场的区域稳定性[J]. 华东地质学院学报,1995,15(3):28-31.
- [3] 宋妙发,强亦忠. 核环境学基础[M]. 北京:原子能出版社,1999.
- [4] 邓广哲,杨梅忠. 核岩土工程问题及其研究现状[J]. 西安科技学院学报,2000,19(4):51-56.
- [5] 刘元方. 当前核素迁移研究的若干进展[J]. 核化学与放射化学,1990,21(1):21-24.
- [6] 杨达源,阎国年. 自然灾害学[M]. 河北:测绘出版社,1993.
- [7] 罗上庚,李学群. 放射性废物管理(三)[M]. 北京:海洋出版社,1992.
- [8] 王驹. 国际高放废物地质处置的发展方向[J]. 国土资源科技进展,2000,19(5):52-56.
- [9] 李宽良. 水文地球化学热力学[M]. 北京:原子能出版社,1993.
- [10] 何燧源. 环境化学计算[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [11] 叶明吕,陆誓俊. 放射性铯在沸石中的吸附与迁移研究[J]. 核化学与放射化学,1994,35(4):46-49.
- [12] 叶明吕,陆誓俊. 各种因素对放射性铯在花岗岩上的吸附与迁移影响的研究[J]. 核化学与放射化学,1993,34(2):11-15.
- [13] 庄慧娥. 核废物处置中的核素迁移研究[J]. 原子能科学技术,1985,21(1):46-49.
- [14] 赵欣,魏连生. 元素在花岗岩表面吸附的 XPS 研究[J]. 核化学与放射化学,1993,34(2):21-26.
- [15] 金远新,徐国庆,高永良. 高放废物库址围岩模拟样品的岩石学研究[R]. 北京:核工业北京地质研究院科研成果报告,1991.
- [16] 崔霖沛. 瑞典高放废物处置的地质研究与开发——现状和未来计划[I]. 国土资源科技进展,2000,17(4):46-49.
- [17] (英)查普曼 N A, (瑞士)麦金利 G 著. 核废物的地质处置[M]. 谢运锦译. 北京:原子能出版社,1992.

Geology Problems in the Disposal of Radioactive Waste and Its Research Situation

WANG Qing-hai^{1,2}, LI Xiao-hong¹, JIN Xiao-guang¹

- (1. Key Laboratory China Southwest Resource Exploitation and the Environmental Disaster Control Engineering under the state Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Malan 63653 troops xinjiang, Malan 841700, China)

Abstract: The geological disposal of radioactive waste is a complicated system engineering that involves many disciplines, such as, radiochemistry, atom physics, geohydrology, hydrogeochemistry, tectonic geology and civil engineering. The geological work is very important in the geological disposal of radioactive waste because the main body engineering of the warehouse building is geological engineering. Based on literature survey and the author's experience, this paper introduces the research content and the research scope and its situation of the geological disposal of low and intermediate-level waste and the high level waste, all of are significant, including geologic structure geohydrology, hydrogeochemistry, earth physics, mineral & rock, engineering, and geology hazard.

Key words: radioactive waste; geological disposal; system engineering

(责任编辑 姚 飞)