

高放废物处置安全研究

Securities for Disposal of Super-Radioactive Waste

罗上庚

(中国原子能科学研究院放射化学研究所所长, 研究员)

提 要 高水平放射性废物(简称高放废物)能否安全处置是公众关注的问题,是影响核电发展的关键,世界有关科技人员正在为攻克这一堡垒而努力。本文从任务提出、解决途径、采取措施、现状和问题等方面作了分析和评论,并对我国应该采取的策略提出了建议。

核反应为人类提供了宝贵的电能和热能,同时也产生了放射性废物。众所周知,低、中水平放射性废物已有比较满意的处理和处置方法,但高放废物能不能安全处置,这是今天人们普遍关注的问题。

一、高放废物处置的任务

高放废物通常指乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体,以及将直接当作废物处置(所谓一次通过式)的乏燃料元件。

高放废物的体积虽然不足核燃料循环所产生的放射性废物体积的1%,但其所含放射性量却超过核燃料循环总放射性量的99%。由于高放废物有极强 β - γ 辐照水平,释热率高,含有较多半衰期长和毒性大的 α 放射性核素,因此其最终处置难度大,费用高,任务艰巨。

1. 高放废物处置目标

高放废物处置是把高放废物同人类生活圈隔离起来,使放射性核素进入人类生活环境给职业人员和公众在现在和将来造成的总危害低于允许水平,但是,对于放射性废物的处理,并不要求也不可能做到把它与生物圈绝对隔离开来。另外,还要求放射性废物的处置不仅对当代人负责,还要求不给后代人带来后患。

2. 高放废物隔离期限

高放废物中包含的放射性核素很多,处置所须考虑的核素为长寿命锕系元素和长寿命裂变产

物、活化产物核素,例如:U—233、Np—237、Pu—239和—240、Am—241和—243、Cm—242和—244、Ra—226、I—129、Cs—135和—137、Sr—90、Tc—99、C—14、Cl—36、Se—79。根据它们的半衰期、发热率和生物毒性,高放废物处置可划分为三个时期:

第一时期 头1000年, ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 起主要作用,有强释热。

第二时期 $10^3 \sim 10^5$ 年,锕系元素起主要作用。

第三时期 $10^5 \sim 10^8$ 年, ^{99}Tc 、 ^{129}I 等长寿命裂变元素起主要作用。

经过许多学科的科学家和工程技术人员的密切配合、精心策划和研究,现已找到了解决高放废物长期隔离的途径。

二、解决途径

从60年代初开始研究高放废物处置以来,已经提出了许多处置方案(见表1)。但现实可行又为各国普遍接受的只有深地层巷道布置垂直钻孔叠堆处置法,这里所用的是多重屏障、纵深隔离原则。

多重屏障隔离体系,可以分为工程屏障(高放废物体、包装容器、外包装、缓冲介质、回填材料和处置库工程构筑物)与天然屏障(基岩和外围土层)两大部分。

高放废物体,推荐用很低浸出率和高稳定性

的硼硅酸盐玻璃固化体,或者陶瓷固化体和人造岩石固化体。

包装容器和外包装,采用高耐蚀材料制成,提出的候选材料有304L不锈钢、316L不锈钢、高镍合金(合金825)、高纯铜(无氧)、70/30铜—镍合金、铝青铜、不锈钢衬铅、钢包钛等。

缓冲材料和回填材料,推荐用压实的钠硼润土和砂的混合物,因它们对核素有较高亲合力,吸附性好;导水率较低,导热率较高,受水、热和射线作用影响小,对容器腐蚀作用小。

表1 高放废物处置方案

处置方法	基本思想	可行性
深地层处置	地下库巷道钻垂直孔埋藏 选择适当地质层在600~1000米深层开设巷道,适当布置掘钻孔,将固化体放置在钻孔中(叠堆积)。	研究最多,具有实用性,可行性
	超深钻孔埋藏 将废物放置在3~15km深的超深钻孔中	技术难度大,投资高
	深岩层中熔融处置 将高放废物(或高放废液)不经中间贮存冷却,直接放入(或注入)深岩层中,利用衰变热使废物和岩石一起熔成固熔体	尚待评价和研究开发
海洋底沉积层处置	将废物置于深洋底下沉积层中	IAEA正组织一些国家专家在研究评价
分离—嬗变(核焚烧)	将锕系核素和长寿命裂变元素从废物中分离出来,送到高能加速器或反应堆中,将其转变成短寿命核素	又在重新评价其风险,代价和利益
冰层处置	将废物埋藏于格林兰或南极洲冰层底下	国际公约不允许
宇宙处置	将废物送到其它星体上	费用昂贵,风险大

基岩则可选用结晶岩(花岗岩、玄武岩、凝灰岩、片麻岩、辉长岩等)、蒸发岩(盐岩、盐丘)、泥质岩(粘土、页岩)等三种类型。

据计算,这样的工程屏障屏蔽隔离作用至少可达1000年,以后的屏蔽隔离作用则主要依靠天然屏障。

放射性核素从处置库中的高放废物体转移到人类生活环境,主要媒介是地下水。在正常情况下,地下水到达处置库,容器被腐蚀,放射性核素被溶出,输运到食物链,到达人体,其动力学过程是极其缓慢的,输运量也微乎其微。因为除了核素本身衰变外,还存在着一系列逆过程,如稀释分散、介质吸附、凝聚、沉淀、矿化、离子交换,等等。

预料造成高放废物处置库破坏的事故可能有火山爆发、地震、断层、冰川、陨石坠落等自然事故和采矿、钻井、地下水汲取、战争等造成的人为事故及废物感生事件(如热、辐射、应力作用、乏燃料的临界事件等)造成的事故。但是研究表明,这些事故的风险几率很小($10^{-9} \sim 10^{-13}$ /年)。当然,由

于水文地质情况的复杂性和不确定性、自然事件和人为事件的不确定性,以及人口分布和人们生活习性改变的不确定性,这一几率也存在不确定性。

三、采取措施

长期以来,人们为了证明多重屏障体系的安全性、可靠性,并实现高放废物的安全处置,做了大量的工作。

1. 实验室研究

首先,在实验室里模拟处置条件作了很多实验:如高放固化体浸出试验,核素在各种介质中的迁移试验,温度、辐照、应力影响试验,材料腐蚀试验等,并建立了分析方法。

在实验室数据基础上建立了数学模型和计算程序。迄今各国开发的模型和程序已经很多,归纳起来,大致可分为以下三类:

(1)释放模型或核素浸出模型,重点计算分析放射性核素从固化体或乏燃料元件中被地下水的浸出,描述源项问题。

(2)核素迁移模型,包括近场处置库迁移模型和远场地质圈迁移模型,重点计算分析溶出的放射性核素输运出处置库和通过岩石裂缝输运到近地表,描述过程问题。

(3)剂量效应模型或生物圈食物链模型,重点计算分析进入地表水中的放射性核素,通过食物链到达人体,产生内照射、外照射的剂量,描述后果效应。

2. 地下实验室研究

实验室研究工作受时间、空间和实验条件的限制,有很大的局限性,在此基础上建立起来的数学模型作了很多简化和假设,因此其正确性和可靠性须进行验证。验证办法之一就是地下实验室研究。

一些先进核工业国家已经建立了一些地下实验室,它们所进行的研究大致包括以下方面:地下水流动、地下水化学组成研究;岩层力学性质研究;热传导能力和影响研究;核素迁移示踪研究;挖掘、回填封闭技术的可行性验证;实验室数据、数学模型和评价模式的验证,等等。

地下实验室一般只作研究验证之用,不实际处置高放废物。因地下实验室的建设投资很大(加拿大地下实验室和美合作投资近亿美元,法国为建造地下实验室准备投资十亿法郎),所以都是在选定的地质构造类型建造地下实验室,以便取得有实用意义的数据和经验。

3. 自然类比研究

自然类比研究是研究与地质处置放射性废物

类似的天然现象及天然或人造物质经过漫长历史年代之后的变化。自然类比研究的对象是不受人控制的自然过程,它能提供实验室和地下实验研究所不可能获得的数据和证明。自然类比研究可分为以下三类:

(1) 铀、钍矿自然类比研究。铀、钍矿可以类比作放射性废物处置库,研究核素迁移速率及地下水、胶体、有机物、微生物和地质变迁对核素迁移的影响;核素向生物圈的输运,在土壤、地表水、饮用水、动植物体中分布规律等。

(2) 天然物考古自然类比研究。奥克洛(Oklo)天然反应堆考证研究是突出例子。西非加蓬共和国奥克洛原是一个沥青铀矿,经过地壳变迁,形成罕见富铀带(^{235}U 达到3.75%),大约在20亿年前发生了链式裂变反应,持续约70万年,产生了大量裂片元素和锕系元素。但现在挖掘发现,奥克洛地区虽然是高孔隙、高渗透性,含有丰富的粘土沉积层,经过20亿年,裂片元素和锕系元素仅仅迁移几厘米到几米远。这是地质构造可以安全隔离放射性废物的有力佐证。

此外,美国、日本、瑞士、瑞典、法国等国科学家正在研究天然玻璃体和铁矿石的风化腐蚀情况,论证高放玻璃固化体和包装容器的耐久性。

(3) 人造和考古自然类比研究。例如瑞典对青铜古炮的研究,发现纯青铜在10万年后腐蚀深度不到5毫米,因此可选用纯铜作乏燃料直接处置的包装容器。我国甘肃发掘的有5 000年历史的新石器时代的混凝土,抗压强度还保持在100公斤/厘米²,长沙出土的有2 100年历史的马王堆女尸及其随葬品,保存非常完好,证明隔水、绝氧对防腐有重要作用。这些都对高放废物安全处置的论证有重要价值。

四、现状、问题和对策

1. 现状

从60年代初开始研究高放废物处置,虽然美国、法国、瑞典处于领先地位,基本上确定了场址(见表2),但是还没有一个国家已建成高放废物处置库。美国早先计划在1998年建成第一个高放废物处置库,后来推迟到2003年,现在预计要推迟到2010年。多数国家的高放废物处置工作还处在选址(初选)阶段,预期要在2020年后才有希望建成高放废物处置库。

进展迟缓的原因主要有以下几方面:

(1) 政策上的原因,由于高放废物在头几十年强烈释热,延长中间贮存(玻璃固化体至少30年,乏燃料元件至少40年)有利于减少对处置场地的容积要求和处置费用负担,因此最终处置变得不

那么迫切;

- (2) 公众反对和地方政府不支持;
- (3) 选址困难;
- (4) 标准规范提高,审批程序复杂化;
- (5) 投资不断升高,美国建第一座高放废物处置库投资,1984年预算为22亿美元,1987年预算上升到48亿美元。

表 2 一些国家高放废物处置开发状况

国家	选择地质层	深度,m	处置对象	实施部门	监督部门
美国	凝灰岩,玄武岩,岩盐	500~1130	乏燃料,高放固化体	DOE(能源部)	NRC(核管会), EPA(环保局)
法国	花岗岩,片麻岩,岩盐,粘土	1000	高放固化体	ANDRA(放射性废物管理局)	SCPRI(电离辐射防护中心机构) SCSIN
德国	岩盐(花岗岩)	660~900	高放固化体	PTB(联邦技术局)	各州政府
瑞典	花岗岩	500	乏燃料	SKBF(核燃料和核废物管理局)	SKI(瑞典核电监察检查机构) SSI(国家辐射防护研究所)
瑞士	花岗岩(粘土,硬石膏)	600	返回固化体	NAGRA(放射性废物管理局)	联邦内阁
加拿大	花岗岩,页岩,辉长岩	500~1000	乏燃料	AECL(加拿大原子能公司)	AECB(原子能控制局)
比利时	粘土层(页岩)	220	高放固化体	ONDRAF(核燃料废物管理局)	核工业部
日本	未定(凝灰岩,辉绿岩)		高放固化体	JNFS(日本核燃料服务公司) PNC(动燃团)	JAEC 日本原子能委员会
意大利	粘土层		高放固化体	CNEH	环保部,国家辐射防护局
英国	未定(硬岩,粘土层)		高放固化体	BNFL(英国核燃料公司)	英国环境部,国家放射防护局
印度	片麻岩、花岗岩		高放固化体		

2. 公众接受已成为关键问题

经验表明,核能前景受制于高放废物的安全处置,高放废物的安全处置又受制于公众的接受。公众接受是影响选址建库的关键因素。低、中放废物处置是这样,高放废物库更是这样。例如:

(1) 韩国低中放废物处置(陆地人造岩洞库)最初提出25个候选场址,到1987年筛选出7个,后

来集中对东南岸的3个场址做调查,但由于当地居民的反对,调查工作在1989年终止。1990年又在西海岸选择了一个场址,也因为当地人反对而被迫终止。现在汉城大学又从47个沿海地区调查点提出6个候选场址。按原计划1995年建成第一座低中放废物处置库,1990年选定场址,实际上至今场址尚未落实。

(2) 英国的Drigg浅地处置场已经贮满。原拟从4个候选场址中选择一个较浅的建低中放废物处置场,而中放废物处置场建一个稍深一些的地质处置库。由于群众强烈反对,只能撤销建浅地处置库计划,改为建一个稍深一点的地质处置库,低中放废物一起在那里处置。高放废物处置库选址工作推后考虑。

(3) 美国的高放废物库选址原先集中在西部地区,已筛选出三个候选场址。考虑地区分布不均匀,又提出在东部地区也进行选址,但遭公众强烈反对,只能终止。就是西部地区已选定的内华达场址,也因为该地印第安部落和当地政府强烈反对,进度一拖再拖。

3. 对策和措施

(1) 求得公众的了解、信任和支持。为此,需要他们了解和相信放射性废物是可以安全隔离的,不会危害环境和人体健康,也不会损害他们的利益,还会促进该地区经济发展。

举行公众报告会,公开审评讨论会,举办展览会,组织现场参观活动,出版各种刊物和小册子,通过电视广播进行多种形式、生动活泼的宣传教育都是求得公众了解的办法。有的国家还吸收公众代表参加管理和监督机构,让他们参与处置库的兴建和运行,了解给他们带来经济实惠,使他们从反对变成为乐意接受。

(2) 加强评审和监督。高放处置库的建设真是千万年大计的工程项目。选址、设计、建设、运行、封闭都必须按标准规范进行,这种标准和规范应该是国际公认的。国际原子能机构、欧洲共同体和国际合作和发展组织的核能机构都在组织有关专家进行这方面工作。

很多国家建立了专门评审委员会,评审处置活动方案报告、计划和规划。美国还规定高放废物处置库的建设最后要报总统批准。

(3) 扩大乏燃料贮存能力,缓解、延缓处置的影响。由于不同能源策略和经济、技术、政治等原因,各国乏燃料政策不同,归纳起来有四种做法:后处理方案,如法国、英国、日本、印度、前苏联和我国都是采取这种方案;直接处置方案,已决定采用这方案的有加拿大和瑞典,美国也考虑这么做;等等看方案,先贮存起来等待政府决策;运到元件卖主国处理,高放固化体运回本国。

目前,核电国家采用后两种方案比较多。全世界已经后处理的动力堆乏燃料不足1/10。一般,反应堆现场贮存水池设计十年贮存容量,由于高放废物处置进展迟缓,不少国家已须扩大贮存容量。采取措施:第一,扩大反应堆现场水池贮存能力,例如密堆积可以成倍提高贮存量。第二,在反应堆现场建造空气冷却贮存设施。第三,在远离反应堆的地方建集中贮存设施。美国动力堆乏燃料元件已积累1万多吨,预计到2000年达到4万吨。现在美国高放废物处置库要推迟到2010年才能建成,美国决定先建有监督可回取贮存设施(MRS),预计1998年建成,投资30亿美元。据报道,韩国、台湾也在酝酿建这样的贮存设施。

(4) 分离嬗变技术又受重视,期望减少高放废物。在60~70年代,不少国家科学家探讨分离—嬗变技术(Partitioning—Transmutation,简称P—T技术),即把高放废物中锕系元素和长寿命裂变元素分离出来,通过高能加速器、快中子堆或聚变堆嬗变为短寿命或稳定元素。但是由于技术、经济、环保、社会等种种原因,80年代初这个方案被搁置下来。现在又重新提出,其原因有以下两个方面:第一,分离技术与快堆技术有了长足的发展,高温冶金工艺使得可以金属态回收,碘可通过氯化物熔融回收。第二,P—T技术可充分利用核能资源。

为把高放废液分成大体积的非 α 放射性部分和小体积的 α 放射性部分,美国开发了TRUEX—CMPO萃取流程,日本开发了DIDPA萃取流程,我国原子能科学院研究了DHDECMP萃取流程,清华大学研究了TRPO流程。应该说,实现分离是比较容易的第一步,真正实现P—T技术难度相当大,是一项巨大的研究课题和复杂的系统工程,现在还只是在评价风险和分析代价/利益阶段。

结 束 语

综合分析,高放废物处置是可以确保人类健康和后代安全的,不会给当代人和后代人带来危害。但是高放废物处置任务是艰巨的。因为它影响核能发展。我国必须予以高度重视,为此建议

- (1) 要有一个确定和稳定的政策;
- (2) 要有一个权威性机构来负责这项工作;
- (3) 要制定科学、合理、为公众接受、与国际接近的标准和规范;
- (4) 要根据国情做好开发研究工作;
- (5) 要加强宣传教育工作,取得公众的信任和支持。

(责任编辑 刘先曙)