

秦山核电厂放射性废物处置方案

黄雅文 谷存礼 陈式

(核工业部辐射防护研究所, 太原)

一、前言

根据我国低中放废物按区域尽可能就近处置的原则,我们以秦山核电厂的废物为主要考虑对象,兼顾东南地区可能建造的其它核电厂的废物以及城市放射性废物,对该地区的低中放废物处置问题进行了调研,提出了可供选择的处置方案,并作了分析比较,为处置系统的概念设计提供了一个初步构想。

秦山一期工程 30 万 kW 核电厂将于 1990 年投入运行,二期工程也已进入设计阶段,无论从安全或经济角度分析,秦山核电厂投产后的固体废物有必要执行核安发[1987]76 号文件《核工业低中水平放射性固体废物管理规定》中关于“放射性废物在本单位暂存时间一般不应超过 1—2 年,要定期运至废物处置场”的规定。目前秦山核电厂一期工程已经投资 500 万元,用于建造废物贮存库,预计固体废物在厂内贮存 10—15 年。这不仅对核电厂的安全管理是一个沉重的负担,甚至存在废物不能回取的危险性,而且将来仍不可避免地把废物转运到处置场进行处置,需要支付贮存和处置两次费用。

秦山核电厂的废物由采取长期就地贮存方案转为采取短期贮存后送去处置的方案是完全可能的。因为在建设秦山核电厂的同时,有必要和可能同步地建设华东废物处置场。其根据是:首先,各科研和设计单位近几年来已在华东地区做了大量的初步调研工作,找到了一些有前途的预选处置场场址。本文将反映辐射防护研究所在这方面的工作进展;其次,从经济方面分析,实行分期建造是低中放废物处置场的固有特点,即是说华东废物处置场要根据华东地区核电发展进程分期建造和分期投入运行。第一期处置设施将着重满足秦山核电厂对废物处置的要求,这个办法可大大地减少当前所需基建投资和缩短工期,甚至可以设想秦山核电厂二期工程少建废物贮存库,将节省下来的钱用于华东废物处置场第一期建造;第三,华东地区是我国发展核电的重要地区,目前的发展规模虽小,预计下一世纪初将会加速,因此核电厂废物处置问题不容拖延。华东地区又是典型的多雨潮湿地区,需要积累在这一类地区处置废物的经验。

目前,世界范围内正在顺利地解决低中放废物处置问题。据不完全统计,在有核电厂运行的国家里,已经有 20 个国家的 22 个废物处置场正在运行,12 个处置场计划建造,8 个在研究中。其中浅埋场正在运行的有 18 个,计划建造的有 6 个,研究中的有 1 个;洞穴处置场正在运行的有 4 个,计划建造的有 6 个,研究中的有 7 个。由此可知,目前国外中低放废物处置技术路线的基本选择是陆地浅埋和包括废矿井在内的洞穴处置。表 1 和表 2 分别列出了目前世界上正在运行、建造和研究中的主要浅埋和洞穴处置场概况。

这些国家的处理经验主要是:(1) 处置场场址的选择对避免地下水浸蚀,滞留放射性核素,防止放射性核素迁移和弥散是至关重要的;(2) 对于水的控制,即防止地表水的渗

表 1 陆地浅埋场一览表^[1-4]

Table 1 Synopsis of Shallow Land Disposal

场 址	发 展 情 况	处 理 情 况
美国能源部	40年代开始运行,目前有 6 个主要处置场, 8 个小规模辅助处置场	截止1985年累计处置废物2,270,000m ³
美国商用场	60年代有 6 个处置场开始运行, 现 剩 3 个	截止1984年累计处置废物1,098,000m ³
加拿大乔克河	40年代开始运行	库容量40万m ³ ,至1983年已用去一半 其中 1 个库容量为1,000,000m ³ (位于巴黎东南150公里) 库容45万m ³
法国芒什	1969年开始运行	
法国两个新处置场	预计1990年运行	
英国Drigg	正在运行	
苏联	三个处置场正在运行	
南斯拉夫	预计1990年运行	处置核电厂废物
印度	正在运行	
捷克	二个正在运行	

表 2 岩 洞 处 置 场 一 览 表^[5]

Table 2 Synopsis of Cavity Disposal Concepts

国 家	场 址 基 岩	洞 穴 类 型	发 展 情 况	废 物 处 置 情 况
加 拿 大	花岗岩	采掘坑道	概念设计、探索研究	处置低中放固化体
捷 克	(1) 石灰石	废坑道	1959—1963运行	处置同位素应用中的固体废物
	(2) 石灰石	废地下采石场	1964—运行	处置研究、同位素应用中的固体废物
芬 兰	花岗岩,片麻岩	人工洞穴	预选, 概念设计	处置反应堆废物, 水泥和沥青固化体
东 德	岩盐	废盐矿	运行中	处置低中放固化体
西 德	(1) 岩盐	人工挖掘	场地调查	处置低中放固化体
	(2) 岩盐	废矿井	1967—1969年控制运行, 待批	已处置低放废物 4 万 m ³ , 中放废物260m ³
	(3) 鲕状岩	废铁矿	场地调查	处置低放固体和固化块, 退役中放废物
西 班 牙	(1) 伟晶岩	废铀矿井	运行中	处置桶装低、中放固体废物
	(2) 火成岩		在调研中	
瑞 典	硬岩	人工洞穴	计划阶段, 场地选择	处置反应堆废物
瑞 士		人工洞穴	初步规划和场地调查	
英 国	(1) 沉积岩	人工洞穴	初钻	处置长寿命中放废物
	(2) 沉积岩和硬岩	天然洞穴	场地评价	处置低中放废物
南斯拉夫	沉积岩	天然和人工洞穴	一般调查	处置经减容的低中放废物
美 国	各种岩石	人工洞穴	初步研究	处置各类低中放废物

入,减少渗水在废物周围的停留时间,及时排除库底积水是处置库设计、建造的核心;
(3) 一个好的处置特性不仅是处置库本身因素造成的,而且是包括设计建造在内的综合管理系统(特别是质量管理)的产物。

二、秦山核电厂废物处置场预选方案

秦山位于浙江,浙江南临闽赣,北靠苏、沪,西依安徽,地处东南地区的中心地带,所以把浙江定为废物处置场的主要预选区块是合适的。另外,浙江境内有核工业部即将退役的铀矿,有性能良好的膨润土矿分布,这为我们选择废铀矿处理或浅沟埋藏场提供了得天独厚的条件。据此,我们对该地区进行了初步考察和调研,提出了废铀矿处置、浅沟埋藏和人工洞穴处置3个方案,并作出了初步的概念设计,且进行了分析比较。

1. 不涌水废铀矿处置方案

(1) 利用×××铀矿三工区作处置库的主要依据。×××矿地处浙江西南衢县,离浙赣线25 km,公路直抵工区巷道口,交通十分方便。该矿有四个工区,分布在丘陵山区,其中3工区将于1989年退役关闭,其它工区也将于2000年前后关闭。三工区的主要岩体为第二、第三流纹岩,岩质和花岗岩基本相同。矿区虽处于江山—绍兴断裂带内,但新构造运动并不强烈。当断裂层不发育时流纹岩具有隔水作用,为矿床相对隔水层。从20号坑道所见,无断层发育,无含水现象,岩石的稳定性良好,裂隙率每米0—7条,抗压强度456—1250 kg/cm²,抗剪强度136—470 kg/cm²。非含矿碎屑岩矿床露出3层,第3层厚度最大,平均25 m,分布稳定,具有良好的隔水作用。据CK 20,57岩心资料证实,裂隙不发育,线裂隙频率为2—10条/m,平均5条/m,岩石稳定性仅次于流纹岩。二号断层为控制本矿床地下水运动的断层。它由粘土、高岭土、夹砂粒、岩石碎屑组成。宽0.5—1 m,该断层本身不含水,具有良好的隔水性。矿床范围内第四纪复盖层厚度很小,地表物理地质现象轻微。本矿床的矿化特征是硫化矿极少,矿床具有碱性氧化条件。地下水pH和碱性离子随深度迅速增加的事实说明矿床氧化带发育深度不大。三工区地形陡峭,矿床西缘有近南北向的胜堂源河,平均流量为1.026 m³/s,虽年降雨量为1500—2000 mm,但自然排水良好。矿井平巷标高为178 m,山高340多米,主巷道底径为2.4—2.8 m。工区山体较大具有开拓远景。另外,三工区具有较完善的配套设施,例如供水、供电管网系统,机修车间、钢材、水泥、砖等料库,风机房、污水处理房、锅炉房、浴室、仪器设备库、绞车等附属设施,这些设施稍加改造即可利用。公路末端离巷口斜坡道只有100多米。在工区1 km范围内只有几户居民和少数职工家属。若将工区改作处置库不但交通方便、投资小,而且社会及环境影响可降至极小。由于废铀矿处置安全性好,周围居民的附加剂量可降至最低水平。另外,矿区现有的工程技术能力和放射性工作的管理系统完全可以承揽这一工程。据初步工程估算,每开掘1 m³空间约耗资90元。

(2) 废矿井处置库概念设计。我们以×××矿三工区为预选处置库,进行概念设计。原采区经过适当开掘和整修即可作处置库,但远景处置宜穿过断层向东北、东南方向发展,那里山体厚,面积大,适于开拓。开掘时宜先将主巷道开至顶端,然后从顶端向后逐一开凿支状处置库,用1个,凿1个,封1个。每个库底径为10 m,拱顶半径为5 m,长15 m(或更长些)库与主巷道连结部采用壶腔通道,以利封闭(图1),库底开凿盲沟并和主巷道

排水系统相连。根据废物及包装特性决定是否用水泥砂浆喷灌回填废物桶间的空隙,废物填满后用砖或混凝土墙封口,每个库容约 500 m³,约为秦山核电厂二期工程全面运行后半年的废物量。主巷道退至一定容量后也可逐段堆置废物,逐段填封。主巷道底部开凿排水沟并与洞口保持一定的坡度,以便将汇水及时排出巷外。巷口设集水槽,以便定期监测废物中的核素是否被浸出。库区四周应适当开凿观察井,供监测用。本方案的优点是不惊扰居民,不破坏地表,不占农田,从开工到运行的周期短,关闭后维护简单、不受气候的干扰,完全性好,不新增更多的附属设施,不修公路铁路、一次性投资少,矿区已有放射性工作的管理系统,但地质构造

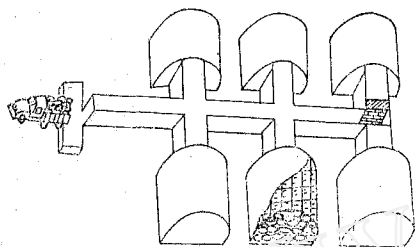


图 1 废矿井洞穴处置设置图
Fig.1 Disposal in Mined Cavities

的稳定性、长期投资的总经费是否可以被接受尚需进一步论证。

2. 带工程屏障的浅沟埋藏方案

(1) 选择浙西北浅沟埋藏的主要依据。浅沟埋藏是目前世界上用得较为广泛的处置方法,在我国浙西北和浙北乌镇—临安断层北西侧和吴兴—昌化加里东陆缘隆起与钱塘拗陷交界处丘陵山区的平山、仇山和安吉埋藏着丰富的膨润土矿,由于膨润土离子交换容量大,膨胀性好、渗水性低是废物处置库的优质回填材料。膨润土作为处置库基质则对可能浸出的放射性核素具有良好的阻滞能力。如果我们在浙西北和浙北膨润土矿体边缘(无开采价值)选择一合适的地方构筑浅沟处置库,是十分理想的。那里交通方便,离秦山仅 200 多 km 左右,且属丘陵山区,人烟相对稀少,地下水位较低。

(2) 处置库概念设计。处置场宜选用地下水位较低的地方,地下水流速应尽可能慢。处置沟长可从几十米到几百米,根据场地条件来选定,沟宽 15—20 米,深几米到十几米,但沟底离地下水位应保持几米的距离。为避免澡盆效应,沟底应有一定的坡度,并经压实或夯实,沿沟底的较低一侧铺设盲沟,每隔一段设一集水槽,并通过竖管将集水排出库外。沟底铺 30—50 cm 厚砾石或卵石层以利疏水和加固地基,砾石或卵石层上堆置标准化废物包装桶,废物桶间的空隙用砂子填充,废物桶边界与沟墙之间保持一定的空间,用砂子回填。这种回填方法可减少渗透水在废物桶周围的停留时间,使之很快排入沟底,汇至集水沟槽中,并通过竖管排至沟外。

顶盖的设计将是废物和生物圈隔离的关键,沟盖控制着地表水的渗透和库中气体的释放以及生物的侵入。同时,沟盖还必须有助于植被,抵御风化侵蚀和场地排水。沟中废物填满后上面先复盖一层砂子,顶部修成一定的坡度(或弧形),再以低渗透性透土(如膨润土)复盖。这两种不同渗透性的复盖物挨在一起,当水垂直透过粘土碰到砂层时即受到“毛细屏蔽”,由于水对粘土中很细的毛细孔具有很大的亲和力,所以不进入砂粒间的大孔中,直至粘土被水饱和。如果在这两层中间保持一明显界面并筑成一定的坡度,那末,粘土中的水在未饱和和以前将沿界面水平地流向排水系统,而不进入盖着砂子的废物中^[6]。粘土层上面复盖一层砾石-卵石层,实验证明,它即能有效地防止植物根部接触到废物,又能有效地控制地鼠打洞。砾石-卵石层上覆盖一层土壤,最后覆盖植被(图 2)。需要注意的是

每层覆盖都必须压实。据我国古墓葬的经验^[7],埋藏物朽蚀的程度主要取决于密封程度(即是否有湿空气相对交换流动)。为降低地表径流的侵入和渗透,覆盖层宜作成土墩形,边坡设疏水排水沟。

需要指出的是如果我们所选的场址地质介质没有良好的滞溜能力或常年雨水十分充沛,上述的复盖层难以避免地表水渗入库中,那么处置库拟加一个混凝土壳体(图3),必要时还可在混凝土墙外铺设防水层。这样可以将废物和周围地质介质隔开。

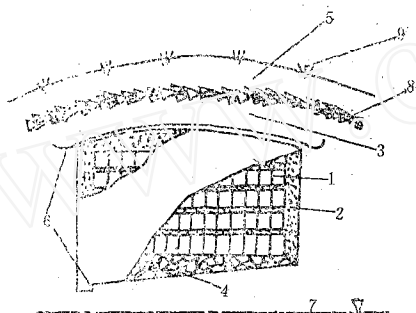


图 2 沟槽处置库结构图

Fig.2 Waste trench with engineered barriers

1—废物; 2—砂子; 3—粘土; 4—砾石(或卵石); 5—土壤; 6—排水系统; 7—地下水位; 8—砾石-卵石层; 9—植被。

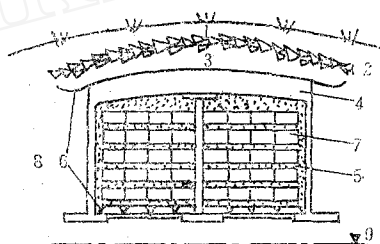


图 3 混凝土壳体处置库示意图

Fig.3 Waste repository with engineered barriers

1—土壤; 2—砾石-卵石层; 3—粘土; 4—混凝土壳体; 5—砂子; 6—排水系统; 7—废物; 8—基质; 9—地下水位。

沟槽处置法的主要优点是技术上容易实现、较简便、经济、安全。但是施工要打开地面,占用农田,破坏自然环境,要动员更多的人搬迁,造成较大的社会和心理影响,施工和运行易受气象气候影响,易受动植物的侵扰。关闭后需要较严格的维护、保养和监督。

3. 地下人工洞穴处置库

根据我国地下洞穴的挖掘技术,地下人工洞穴处置库应选地质稳定(非断裂带和地震区),地下水位宜在30 m以下的粘土和软土地带。处置洞穴挖在地下12—25 m之间,采用盾构机械,预制混凝土管片支护技术。目前我国盾构掘进的最小直径为2.9 m,最大直径为11.3 m,掘进成本随直径的增大而减少,每开掘1 m³空间约耗资350—3000元。洞穴底部设排水系统,并有竖管伸出洞外,废物填满后用水泥砂浆喷灌填封。本方案安全性好,施工、运行基本上不受气候条件的影响,对环境和农田的破坏较小,但开凿投资较其它方法大。

三、处置场建设进程、规模和经费粗估

1. 建设进程

根据国外的经验建造一个处置场的周期为5年左右,如果要使秦山核电厂二期工程的废物及时送入假想中的处置库,则我们必须以表3列出的进度进行工作。

2. 规模

根据国外经验,一个处置场的运行时间约为30年。假设处置场于1996年投入运行,至2026年封闭。如果按照假定的华东地区核电发展进程,到2026年废物总积蓄量将达到

表 3 处置方案计划进度表

项 目	年 份							
	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
可行性研究	-----		-----					
概念设计	-----							
场址审批		-----		-----				
施工设计			-----		-----			
最后审批				-----		-----		
施工建造					-----		-----	

——为浅沟处置方案（8年）；·····为废铀矿处置方案（5年）。

81,000m³，加上秦山一期工程退役废物和核技术应用废物共约 10 万 m³。这是华东废物处置场的总规模。估计第一期处置设施的建造规模为 1.5 万 m³废物容量，可使用到 2005 年。浅埋场的占地面积约 11 × 10⁴m²。

3. 经费粗略

较为精确的经费估算只能在场址确定后，进行初步设计时才能作出。这里根据假想的场地，就征地、搬迁、土石方、开凿、建筑、设备、仪器、道路、不可预见费等作十分粗略的估算。估算结果是浅沟埋藏处置一次投资约 1000—1200 万元，远期投资约 540—860 万元。废铀矿处置一次投资为 500—700 万元，远期投资为 1200—1650 万元。

四、初步看法

以上三个处置方案，我们认为废铀矿处置已具备了足够的条件，一次投资省、安全性好、社会及环境影响小，在短期内最容易实现。膨润土矿带浅地沟槽处置是一个较为简便、易行、经济的方案。人工洞穴处置安全性好，但技术难度较大，工程造价较高，在现阶段难以实施。

本文所提的方案及概念设计为我国低中放废物处置场的选址、设计、建造和运行中可能遇到的问题及解决办法提供一个初步的构想，在具体实施时尚需作进一步的可行性和论证试验。

工作得到 × × × 矿高鸿生和核电公司缪宝书同志的帮助，谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] Benda Gary, *Radioactive Waste Technology*, New York, The American Society of Mechanical Engineers, 466(1987).
- [2] Chee, T. C. et al., *Proceedings of the 1987 International Waste Management Conference*, New York, The American Society of Mechanical Engineers, 66(1987).
- [3] IAEA, SM-289/5,11,12,15,135,(1986).
- [4] IAEA, SM-289/13,16,18,19,(1986).
- [5] Heinoen, J. U. et al., IAEA, CN-43/143,133,(1984).
- [6] Mazge, L. J., ORNL/TM-9156.
- [7] 黄雅文, 谷存礼, 中国古墓葬和中低放废物处置, 放射性废物管理, 原子能出版社, 北京, 48(1987).

(编辑部收到日期: 1988年6月1日)

THE SCHEMES OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FOR QINSHAN NUCLEAR POWER PLANT

HUANG YAWEN GU CUNLI CHEN SHI

(Institute for Radiation Protection, MNI, Taiyuan)

我国首台强流中子发生器在兰州大学研制成功，主要技术指标达到世界先进水平

兰州大学研制成功的 3.3×10^{12} 中子/s 强流中子发生器，最近通过由国家教委主持的部级鉴定。来自北大、清华、中国原子能研究院、原子核研究所、近代物理所、中国工程物理研究院等全国 18 所高校和科研单位的 34 位专家教授一致认为，这台中子发生器是我国第一台中子产额达到 10^{12} 中子/s 的强流中子发生器，其主要技术指标达到国际现有同类中子发生器的先进水平。它的建成，标志着我国中子发生器的研制水平已步入国际先进行列。

通常把中子产额达到或超过 10^{12} 中子/s 量级的中子发生器称为“强流”中子发生器。目前世界上只有少数国家拥有这种设备。我国科研、教学和国防等部门原有的一批中子发生器没有一台达到这一水平。因此，在许多应用中受到限制。近年来，我国国防、高技术计划和“七五”攻关项目中一些重要课题陆续提上日程，强流中子发生器在核聚变-裂变混合堆材料辐射损伤研究、半导体器件加固中子辐照研究和中子核参数测量中是不可缺的关键设备。兰州大学强流中子发生器的研制成功，无疑将使这些研究变成现实。此外，它在快中子治癌试验研究中也是重要的基础条件，这一成果亦为研制更强的专用中子治癌机打下良好的技术基础。

兰州大学的强流中子发生器为卧式结构。它主要由双等离子体离子源，束流加速和传输系统，直流稳压高压电源、旋转靶系统、真空系统和氦净化系统、控制系统和中子测量系统等组成。它的研制成功，使我国中子发生器技术取得了突破性进展，一些单项关键技术有较大提高。研制中较好地解决了大面积高速旋转靶技术，加速器含氦气体排放的净化技术和 10^{12} 中子/s 量级的中子绝对测量技术。同时，实现了数十毫安离子束的传输。双等离子体离子源和大功率高压稳压电源也各具特色，工作性能优良。

近几个月来，用这设备初步测量了一些核反应截面，进行了一些半导体器件和种子的辐照实验。随着设备性能和使用条件在实际应用中不断完善，这台强流中子发生器必将在我国国防建设、工农业生产、核科学和医学研究中发挥越来越大的作用。

中国科学院近代物理研究所 宋文杰