

我国低中放废物处置相关问题的研究

郑文棠, 程小久

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广州 510663)

摘要: 为了更好地编制国家标准《低、中水平放射性废物处置场岩土工程勘察规范》(GB/T 50983-2014), 介绍了我国低中放废物处置的现状和新编国家标准的意义, 探讨了低中放废物处置的废物类型、中英术语、处置深度、处置形式和多重屏障技术。研究表明: 新编国家标准解决了我国低中放废物处置场选址和建设各阶段勘察技术的标准问题, 界定了不同勘察阶段处置场的勘察范围, 统一了低中放废物处置相关术语, 给出的美国在建安德鲁低中放废物处置场案例对我国低中放废物处置场的多重屏障结构设计具有重要的指导意义。

关键词: 低中放废物; 处置场; 多重屏障; 国家标准

中图分类号: TL942

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2014)01-0075-08

Research on Related Problems of Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal in China

ZHENG Wentang, CHENG Xiaojie

(Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: For the better compilation of new national standard of code for site investigation of geotechnical engineering for Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal (GB/T 50983-2014), the current situation of LILW disposal and the significance of the new national standard are introduced, then the waste categories, terminology, disposal depth, disposal facility forms and multiple barriers of LILW disposal are researched. This study shows that the new national standard settles the technical standard questions of geotechnical investigation for each construction phase on the siting and construction of disposal facilities. The investigation scope and objects for each construction phase are concluded and the terminologies of LILW disposal are given clearer definitions. Finally, the Andrew disposal site on built in the USA which has special multiple barriers is studied to applicate in China.

Key words: LILW; disposal site; multiple barriers; national standard

核电站放射性固体废物的产生量, 与核电装机容量和管理水平两大因素直接相关。核废料按放射性活度及危害大小, 分为低、中、高三种。根据世界核学会的数据, 核废料中低中放废物占 97%。

1996 年我国核电装机容量仅有 2 GW, 至 2014 年 5 月, 我国在运核电机组总数达 20 座, 拥有秦山、大亚湾—岭澳、田湾、宁德、红沿河、阳江六大核电基地, 总装机容量为 18.07 GW; 在建核电机组 28 台, 总装机容量为 30.62 GW。其中大亚

湾、秦山和田湾核电基地 19 台核电机组已经随着运行时间的累积, 低中放废物的产生量和积累量与各基地暂存库的库容矛盾日益凸显。根据环保部核与辐射安全中心的数据, 截至 2010 年底, 核电厂低、中放射性废物存量已经有约 10 000 m³。若每台百万千瓦核电机组每年产生废物包体积按 50~60 m³ 计算, 对比中国目前在运、在建的核电装机容量, 以及核电中长期发展规划, 未来几年内核电站产生的低中放废物将是一个巨量数字。

我国对放射性固体废物实行分类处置, 即低中放废物实行区域近地表处置, 高放废物与 α 废物实行集中的深层地质处置。由于我国低中放废物处置场的选址地并不一定是核电站最集中的地区, 处置场所在地政府只有义务没有利益, 几十年来低中放

收稿日期: 2014-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372275)

作者简介: 郑文棠(1981), 男, 福建尤溪人, 高级工程师, 博士, 主要从事电力工程勘察设计(e-mail)zhengwentang@gedi.com.cn。

废物区域处置举步维艰, 难见实效。1996年规划的4个低中放废物处置场目前仅建成两座, 即甘肃玉门中核404厂内的西北处置场和广东大亚湾电站区域内的北龙处置场。根据环保部核与辐射中心测算, 拥有7座在运、2座在建、总装机容量6GW的秦山核电基地低中放废物暂存库已经满容, 其他核电基地的低中放废物暂存库超期服役也将陆续面临库满大限。在此情况下, 新规划的低中放废物处置场建设仍困难重重, 目前仅中核在四川飞凤山的西南处置场取得建造许可证, 中广核在粤北韶关拟建的遥田处置场因当地政府反对而停滞, 中核控股50%的辽宁徐大堡核电站和中电投的山东海阳核电站计划的处置场用地仍处于筹备阶段。在区域处置场迟迟不能开建的情况下, 核电公司已开始自谋出路, 目前中核、中广核和中电投等核电公司已经开始尝试采用自建处置场模式开始前期选址工作。

虽然我国从20世纪80年代起就开始研究放射性废物处置技术和政策, 并已发布了十几项国家及行业标准, 涉及处置场选址、设计、运营、关闭、环境监测和监护、安全评价、质量保证以及放射性废物的固化体性能、包装、接受等, 但均未涉及勘察技术方面, 《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)明确指出对核废料处理场地未涉及, 已有的放射性废物处置相关导则和规范中也没有给出可操作性的勘察技术标准, 这严重影响了我国低中放废物处置场的选址和建设。

笔者所在单位于2009年向住房和城乡建设部申请编制国家标准《低、中水平放射性废物处置场岩土工程勘察规范》(GB/T 50983-2014)^[1]。历时5年, 先后调研和总结了国内外9个处置场的勘察经验, 该规范将于2014年12月1日起实施, 为我国低中放废物处置场各阶段的岩土工程勘察提供技术指导, 这里结合规范术语章节编写中涉及的相关问题与国内同行进行讨论。

1 低中放废物处置的相关问题

1.1 低中放废物的定义

国内外规范中对介于豁免废物和高放废物之间的适用于近地表处置的放射性废物给出了多个术语定义, 如“低中放废物”、“低、中放废物”、“中低放废物”、“低中水平放射性废物”、“低中水平放射性固体废物”, 以及“极低放废物”、“低放废物”、“低

水平放射性废物”、“低水平放射性固体废物”、“中放废物”、“中水平放射性废物”、“中等水平放射性废物”、“极短寿命废物”、“短寿命低中放废物”、“长寿命低中放废物”等等。多种术语易造成读者混淆, 很有必要对术语进行统一定义。

GB 9132^[2]中浅地层处置的放射性废物系指“低水平放射性固体废物”, 定义为“任何包含放射性核素或被其沾污、其比活度超过国家规定限值的废物”。GB 13600^[3]和GB 11928^[4]中定义为“低中水平放射性固体废物”, 系指《放射性废物的分类》(GB 9133)^[5]中放射性废物分类系统表第I、II等级的固体废物。GB 9133给出了我国的放射性废物分类构架, 分别定义了“低水平放射性废物”和“中水平放射性废物”, 并对其放射性比活度和热释率值进行了规定。《核科学技术术语国家标准》GB/T 4960.8^[6]仅给出了“低放废物”和“中放废物”的定义。《核安全导则汇编》HAD 401/04^[7]中定义为“低中放废物”, 即“放射性核素的浓度量高于监管机构规定的免管水平的放射性废物, 但是其放射性核素和热功率又低于高放废物”, 同时HAD 401/04进一步将“低中放废物”分为“短寿命低中放废物”和“长寿命低中放废物”, 并说明短寿命低中放废物可以处置在近地表处置设施中, 而长寿命低中放废物处置在地质处置库中。

国际原子能机构(IAEA)最早在1970年出版了放射性废物分类标准的技术报告(IAEA No. 101)^[8], 1981年出版了安全标准(IAEA No. 54)^[9], 并于1994年将前两个标准修订为推荐到各成员国的安全导则(IAEA No. 111-G-1.1)^[10], 其将放射性废物分为4类:(1)豁免废物(EW); (2)低中放废物(LILW); (3)高放废物(HLW)。之后IAEA将低中放废物进一步区分为短寿命低中放废物(LILW-SL)、长寿命低中放废物(LILW-LL)和 α 废物。2007年, IAEA颁布的《国际原子能机构安全术语—核安全和辐射防护系列》(中文版^[11]定义为“中低放废物”(Low and Intermediate Level Waste, LILW)。2009年, IAEA出版了放射性废物分类的安全标准IAEA No. GSG-1^[12]和安全导则草案IAEA No. DS390^[13](将取代IAEA 111-G-1.1), 它们将放射性废物进一步分为豁免废物(EW)、极短寿命废物(VSLW)、极低放废物(VLLW)、低放废物(LLW)、中放废物(ILW)和

高放废物(HLW), 并推荐了各种废物的处置形式, 见图1。从国际原子能机构安全标准丛书《放射性废物近地表处置》^[14]第WS-R-1号中的要求可知, 近地表处置场接收的废物类型一般是指其放射性活度在很大程度上来自短寿命放射性核素且其长寿命放射性核素浓度低的固态或固化放射性废物, 但不涉及放射性废物的地质处置, 或采矿和水冶产生的废物, 或恢复活动产生的并仍留在场地的残留废物的处置。可见近地表处置场仅适用于具有低沥出率的固态或固化低中放废物, 在我国对应为GB 9133中的第I、II等级的固态或固化放射性废物。

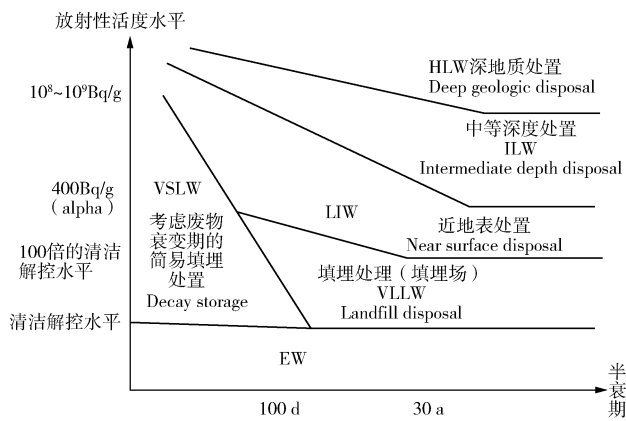


图1 国际原子能机构建议的放射性废物处置形式
Fig. 1 Disposal Forms of Radioactive Waste From IAEA

为与国际原子能机构的分类标准接轨, 本规范比较了国际原子能机构和我国制定的放射性废物分类体系, 对我国的放射性比活度高于清洁解控水平, 热功率约低于小于或等于 2 kW/m^3 , 即介于免管废物和高放废物之间的放射性废物类型进行了详细说明, 并统一定义为“低、中水平放射性废物”(Low and Intermediate Level Radioactive Waste; LILW, 简称“低中放废物”)。

本文定义的“低中放废物”, 放射性特征介于免管废物与高放废物之间的放射性废物, 主要为短寿命废物, 也包括部分长寿命废物。一般指可采用近地表处置的固态或固化放射性废物。目前, 适用我国的低中放废物类型包括了放射性核素的比活度及释热率满足我国近地表处置要求的短寿命废物、长寿命废物和 α 废物, 这里建议加入原国标和行业规范中未指明的极低放废物和极短寿命废物, 见表1。目前我国西南已经开展极低放废物处置场的选址工作, 见2006年出版的《西南山区某极低放废物处置

场I号场址地下水环境影响评价》^[15]。注意本条的低中放废物系指固态或固化放射性废物, 不包括气载废物和液体废物, 也不包括铀、钍及其伴生矿的矿冶过程产生的废物, 或恢复活动产生的并仍留在场地的残留废物。低中放废物的典型特征是: 放射性比活度高于清洁解控水平, 热功率约低于小于或等于 2 kW/m^3 , 介于免管废物和高放废物之间。低中放废物处置场属于核设施, 而采用工程防护措施的填埋场虽然也可作为极低放废物处置的近地表处置场地, 但它不属于核设施。

1.2 低中放废物的处置深度

近地表处置场的处置深度, 不同标准中的释义略有不同, GB 9132 和 GB/T 1595^[16]中“近地表处置”指“地表或地表下、半地下的、具有防护覆盖层的、有工程屏障或没有工程屏障的浅埋处置, 深度一般在地下50m以内”。HAD 401/05 定义为“在地表上或地表下, 有工程屏障或无工程屏障处置废物, 最终保护覆盖层约几米厚; 或者在地表下数十米深的洞室内处置废物。典型的短寿命低中放废物采用这种方式处置”。GB/T 4960.8 中定义为: “将放射性废物放置在地表面或地表面下几十米深的设施中, 设置或不设置工程屏障, 最后加几米厚的防护覆盖层; 或者是将废物埋藏在地表下几十米深的洞穴中的处置。注: 这样的处置库适宜短寿命废物和低、中放废物的处置”。国际原子能机构安全标准丛书第WS-R-1号中对近地表处置的定义为“通过将某些类型的固态或固化放射性废物放置在地表附近而实现的处置。这种‘近地表处置’涵盖多种方案, 包括在地面专设构筑物中的处置, 在几米深的简单土沟中的处置, 在专设的混凝土库中的处置, 以及在地表下几十米深的岩石洞穴中的处置”。可见国内导则、标准均模糊定义为地表以下数十米深或几十米深。国际原子能机构出版的安全标准中一般指地面下30m以内。笔者认为, 结合我国国情, 低中放废物处置深度可定义为50m以内。

注意到低中放废物近地表处置场不包括近地表的天然和人工岩洞(矿井)内处置, 岩洞处置是将放射性废物放置在地表以下不同深度、不同地质建造和不同类型的岩石洞穴中的处置, 包括近地表的洞穴处置、中等深度处置和深地质处置。国外有些土地资源较少的国家也将低中放废物处置在地表以下几百米至几千米, 见图2。

表1 放射性废物类型及处置形式

Table 1 Category and Disposal Forms of Radioactive Waste

| 定义 | 废物类型 | 属性 | 处置方式 | |
|---|---|---|--|------------------------------------|
| 低、中水平放射性废物 (LILW) Low and Intermediate Level Waste | 豁免废物 (EW) Exempt Waste | 对公众个人照射所造成的年有效剂量当量不超过 0.01mSv 的废物, 及小概率暴露事件下造成的年有效剂量当量不超过 1mSv 的含极少放射性核素的废物。豁免废物是经审管部门批准, 免除对其进行监管控制的废物。 | 无需监管, 简易包装和简易填埋, 采用浅层填埋场处置。 | |
| | 极低放废物 (VLLW) very low level radioactive waste | 监管机构认为适合在规定的条件下与非专设的放射性废物处置设施中的普通废物一起进行授权处置的放射性废物。主要为核设施退役和环境整治过程的产生的比活度略高于清洁解控水平, 却又低于低放废物比活度的放射性废物。极低放废物占退役废物总量的 50% ~ 75%。 | 经有关审管部门批准, 可处置在有工程防护措施的浅层填埋场中, 监控 30 年场址后可以开放使用。或作为低放废物, 采用近地表处置。 | |
| | 按比活度分类 | 低放废物 (LLW) Low Level Waste | 放射性核素的比活度比较低, 在正常操作和运输过程中通常不需要屏蔽的放射性废物。 | 近地表处置或地质处置 |
| | | 中放废物 (ILW) Intermediate Level Waste | 放射性核素的比活度及释热率虽然均低于高放废物, 但在正常操作和运输过程中需要采取适当屏蔽防护措施的放射性废物。 | |
| | | 极短寿命废物 (VSLW) Very Short Live Waste | 主要含半衰期小于或等于 100 天的放射性核素, 短期内比活度降低到清洁解控水平, 如含 ¹⁹² Ir、 ^{99m} Tc 放射性元素的工业和医疗废物。 | |
| | 按半衰期分类 | 短寿命低中放废物 (LILW-SL) Short Live Waste | 主要含半衰期小于 30 年的放射性核素, 限制长寿命核素的比活度 (长寿命 α 辐射放射性核素) 在单个货包中不超过 4×10^6 Bq/kg, 平均每个货包不超过 4×10^5 Bq/kg | 地质处置, 对某些长寿命的低中放废物可采用屏障性能优良的近地表处置库 |
| | | 长寿命低中放废物 (LILW-LL) Long Lived Waste | 含有大量的半衰期大于 30 年的长寿命放射性核素, 其比活度大于 4×10^6 Bq/kg, 且释热率小于或等于 2 kW/m^3 的放射性废物 (不包括 α 废物) | |
| | | α 废物 Alpha Bearing Waste | 含半衰期大于 30 年的 α 发射体, 其比活度在单个包装中大于 4×10^6 Bq/kg 的长寿命废物。采用近地表处置时, α 废物的比活度在多个包装中的平均值大于 4×10^5 Bq/kg, 要求性能更好的工程屏障措施与生物圈长期隔离。 | |
| | 高放废物 (HLW) 和乏燃料 Level Waste and Spent Fuel Waste | 长寿命放射性核素含量高于短寿命废物 (比活度大于 4×10^{10} Bq/kg), 释热率大于 2 kW/m^3 。 | 深地质处置 | |
| | [铀(钍)]矿冶废物 Mining and Milling Waste | 铀(钍)矿开采产生的废石和铀(钍)矿石化学处理提取铀(钍)所产生的废物, 通常指废石、尾矿、堆浸渣、泥浆、滤饼和流出物。 | 尾矿库堆存或地质处置 | |

中等深度处置的特点是将放射性废物放置在地下几十米至几百米深的岩穴或钻孔处置设施中, 其主要用于处置长寿命的放射性核素, 一般处置深度在 30 ~ 300 m 之间。岩石洞穴型的中等深度处置库一般建于废弃的矿井(洞、舱)或专门开挖的岩石洞穴中, 典型的例子有捷克的 Richard II 处置库, 其位于废弃石灰岩矿洞中; 钻孔处置也是一种中等深部处置, 其将废物注入中等深度的地质体中, 典型的例子有美国内华达处置场的高封闭性钻孔处置设施、澳大利亚的 Mt. Walton East 钻孔处置设施和南非的 DSRS Phase III 钻孔处置设施。

深地质处置是将放射性废物放置在地下几百米深或更深处稳定的地质层中, 采用天然屏障和工程屏障使长寿命废物、高放废物和 α 废物与人类生存环境隔离的地质处置。这种稳定的深部地质层也称

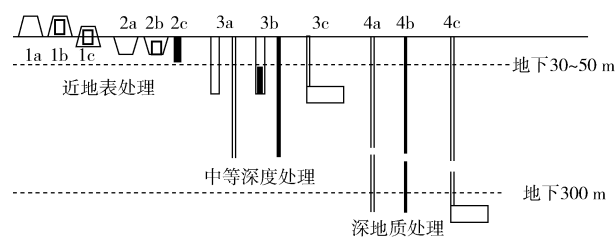


图2 低中放废物的处置类型和深度示意图

Fig. 2 The Sketch Map of Disposal Depth and Forms of LILW

之为“主岩”(host rock), 作为处置库的主岩应具有足够的规模(体积或厚度)、良好的工程地质稳定性和热稳定性以及阻滞放射性核素迁移的能力, 通常包括结晶岩(花岗岩、闪长岩和片麻岩)、黏土岩(页岩)及塑性黏土、岩盐、凝灰岩和玄武岩等。中国、加拿大、瑞典、芬兰、捷克、印度和韩国等拟选择花岗岩作为主岩, 美国选择凝灰岩和盐岩为主

岩, 德国选择岩盐为主岩, 而法国、瑞士和日本拟选花岗岩或黏土岩为主岩。

1.3 低中放废物处置场的组成

GB 9132 定义处置场为“指处置废物的一个陆地处置设施区, 它由若干处置单元、构筑物和场区所组成。处置场有界限限定, 并由许可证持有者控制”。HAD 401/05 中将处置场定义为“用于处置放射性废物的核设施, 将来不打算再把废物回取出来”。本文定义为用于处置低中放废物的有界限限定, 并受到有组织控制的近地表陆地处置设施区, 并指明处置场属核设施, 由处置设施、辅助建(构)筑物和场区所组成, 典型近地表低中放废物处置场见图3^[17]。

处置场的处置单元存放有放射性的固体废物, 一旦损坏或失效会造成放射性物质外逸危险, 因此处置场隶属于核设施, 在岩土工程勘察和抗震分析中应按对应的抗震物项的相关要求进行。从术语上看, 处置场具有3个重要特性: “有界限限定”、“有组织的控制”和“近地表”。

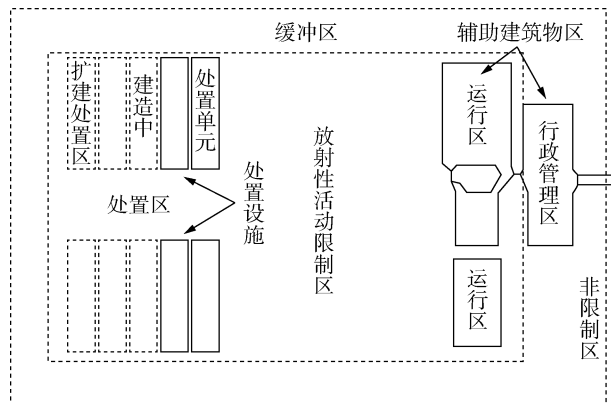


图3 典型的低中放废物处置场示意图

Fig. 3 The Sketch Map of a Typical LILW Disposal Site

“有界限限定”是指处置场是受监管控制的区域。GB 9132 定义处置场由若干处置单元、构筑物和场区所组成, 本规范从岩土工程勘察的分区角度将处置场分为处置设施、辅助建筑物和场区, 并进一步将场区分为处置区、缓冲区和辅助建筑物区。本规范中场区的定义与国内相关法规中的定义有所差异。HAD 401/01-06 中将场区分为近场(near-field)和远场(far-field)。近场是靠近废物包、回填材料、封闭材料和那些可能会受处置库或其内装物影响而改变特性的挖掘区及其附近的地质体; 远场是处置库近场外一定距离内的地质体, 这是从放射

性活动的角度进行划分。本规范从岩土工程勘察分区的角度将场区划分为处置区、缓冲区和辅助建筑物区, 这有利于根据处置设施和辅助建筑物的特点展开不同的勘察方法。处置区是处置设施所在的具有放射性活动限制的区域, 其处置单元的基坑(即处置坑槽)的勘察深度和内容比常规建筑物的基坑具有更高的要求。缓冲区设置在处置场边界和放射性活动限制区域之间, 确保处置单元与公众使用的或可接近的场所之间有足够的防护距离, 一般无基坑和建筑物, 而是布置一些放射性核素运移监测系统, 以便在意外事件中可及时阻滞、截断放射性核素运移, 并采取补救措施。辅助建筑物区包括无放射性活动限制的行政管理区和与废物整备、贮存、去污等相关的运行区。典型的低中放废物处置场中, 除处置单元外, 还包括提供放射性废物的接收、检查、搬运、贮存和处置、放射性辐射和污染控制、场地景观美化和维护、职工辐射安全和污染控制、环境监测的处置单元附属设施。之所以要在本规范中区分处置区和辅助建筑物区, 是因为对应的处置设施和辅助建筑物的使用寿命年限不同, 处置设施的寿命是贯穿整个处置场的生命周期, 因此其处置坑槽的勘察要求、检验和监测标准与常规建筑物的基坑也不同, 参见本规范的地基基础的检验和监测章节。

“有组织的控制(institutional control)”的定义参照了HAD 401/01-06 和 GB/T 4960.8。HAD 401/01-06 中指依据国家法律指定的权威机构或组织对放射性废物场址(如处置场、退役核设施场址等)的控制。这种控制可以使主动的(监测、监管、维修工作)或被动的(土地使用控制), 是核设施(如近地表处置设施)设计中考虑的一个因素。GB/T 4960.8 中指根据国家法律规定, 由审管部门或其指定的单位对废物场址(如处置场址、退役场址)进行的控制。这种控制可以是主动的(监测、监督和补救工作)或被动的(限制土地使用)控制。

“近地表”强调了处置场的处置形式。一般来说, 处置场是近地表处置场(含洞穴处置设施)、地质处置库(包括中等深度处置和深地质处置)等的统称。本标准中限定为采用近地表处置的废物处置设施区, 强调放射性废物放置在地表或地下几十米深的设施中。

现有的核安全导则及规范是从水文地质的角度

将处置场场区划分为近场和远场,这并不适合地震地质及岩土工程勘察工作量的布置。笔者建议处置场的范围定义参见核安全导则汇编中对核电厂厂址范围的定义。核电厂调查范围划分为4个:区域、近区域、厂址附近和厂址地区。区域的调查半径一般为150 km或更大些,近区域的调查半径一般应直到25 km的地区;厂址附近的研究,调查半径应直到5 km的地区,厂址地区的范围必须对核电厂所在地区1平方公里或更大范围进行有代表性的调查。处置场也属于核设施,因此,将处置场的场址附近范围定义为以场址为中心,半径不小于5 km的地区。

1.4 低中放废物的处置形式

处置设施是为放射性废物提供具有多重屏障的永久性处置系统,由于处置设施受各国国情、接收废物类型和容量、处置场地形、岩土特性、以及废物容器尺寸限制,因此具有多种形式。以近地表的处置设施来说,早期一般为简单的无衬砌壕沟,目前一般采用多重屏障的全地下式、全地上式和半地下式处置设施,如几米深的简单壕沟、处置沟,设有工程屏障的的土丘、穹室、窖仓、土丘混凝土库、混凝土模組箱等。

常见的低中放废物处置形式可由图2来说明。其中:1a为全地上式的简易近地表处置设施或山体洞穴、废弃矿洞,处置单元置于地面之上,主要依靠天然材料来延滞或阻止放射性核素从处置单元运移到生物圈;1b代表有工程屏障的全地上式近地表处置设施,完全依靠混凝土结构来延滞或阻止放射性核素从处置单元运移到生物圈;1c为半地下式近地表处置设施。2a为全地下式的简易近地表处置设施,如壕沟;2b代表有工程屏障的地下式近地表处置设施,如穹室、窖仓;2c代表近地表钻孔处置或竖井设施;3a和3b代表中等深度的不设置或设置工程屏障系统的竖井和钻孔设施;3c代表中等深度的处置库,如矿井(洞、舱)、筒仓、岩石洞穴等;4a和4b分布代表不设置或设置工程屏障系统的深井注入处置;4c代表深地质处置库,如矿井(洞、舱)、筒仓、岩石洞穴等。关于各类处置设施形式的详细介绍,可参考美国能源部1994年出版的研究报告《低放废物管理指南—美国商业低放废物处置简史》(DOE/LLW-103)^[18]的附录C——处置技术。本规范中只考虑近地表处置,对于埋藏在地表

下几十米深及更深的有无工程屏障的近地表钻孔处置、深井注入处置、竖井、废弃矿井(洞)、矿舱、筒仓、专门开挖的岩石洞穴等其它处置形式则不在讨论范围之内。

不同形式的处置设施术语经常在国际原子能机构的出版物中出现,目前尚未有统一的中英对译标准,这里附上本文建议的中英对译的术语,见表2。

表2 国际原子能机构出版物中的处置设施术语
Table 2 Terminology of Disposal Facilities of IAEA Publication

| 处置形式 | 不同处置形式对应的处置设施术语 |
|--------------|---|
| 近地表处置 | 壕沟(trench)、处置沟(pit)、土丘(mound)、穹室(tumuli)、窖仓(vault)、土丘混凝土库(earth-mounded concrete vaults/bunker/tumulus)、混凝土模組箱(modular concrete canister) |
| 中等深度处置和深地质处置 | 深部钻孔处置(deep borehole disposal)、深井注入(deep well injection)、竖井(shaft)、矿洞(mined chamber)、筒仓(silo)、岩石洞穴(rock cavity)等 |

如上所述,处置设施的形式多种多样,推荐一种通用的最佳形式是不可能的,而是应该从特定场址的条件出发,选择最合适的安全且经济的设计方案。实际上,各国对低中放废物处置的方针政策都是依据本国国情而制定,受公众接受度和政策影响,在一些国家中,低中放废物(尤其是长寿命的中放废物)不仅可以进行近地表处置,同时还有地面以下30~300 m左右的中等深度岩穴处置、钻孔处置和深度大于300 m的深层地质库处置。美国幅员辽阔,以近地表陆地处置为低中放废物处置的基本原则,如华盛顿州的Richland处置场、南卡罗莱纳州的Barnwell处置场、犹他州的Enviocare处置场、德克萨斯州的Andrew处置场,同时美国也允许在深度为655 m的WIPP深地质处置库(新墨西哥州的Waste Isolation Pilot Plant)接收大于C等级(GTCC)的低中放废物。德国和瑞士的放射性废物处置政策规定所有放射性废物(包括低中放废物)不允许采用近地表处置,而采用深地质库处置,如深度为800~1300 m的德国Konrad处置库。结合我国低中放废物处置的国情来看,我国与美国类似,低中放废物的处置政策以近地表陆地处置为主。我国近地表处置可采用的形式包括全地下式、全地上式和半地下式,如设有工程屏障的壕沟、处置坑、土丘、穹室、窖仓、土丘混凝土库、混凝土模組箱

等^[19]。广东北龙处置场采用了全地上式, 甘肃北山处置场采用的全地下式。对于未来我国拟建的处置场究竟采用哪种形式, 要根据特定场址特性选定, 一般来说, 在潮湿多雨的地区采用半地下式和全地上式为佳, 而在干旱少雨地区则采用全地下式为好。但无论采用哪一种处置形式, 都必须考虑多重屏障设计。

2 低中放废物处置的多重屏障

低中放废物处置场的另外一个特点是多重屏障 (multiple barriers)。GB/T 4960.8 分别定义了屏障、天然屏障、工程屏障、多重屏障和防闯入屏障术语。屏障是阻止或延迟一个系统(如: 一座处置场)内核素或其他物质在各组成部分间运动(如: 运移)的实体障碍物, 通常包括工程屏障和天然屏障。多重屏障指处置场中用来隔离放射性废物, 并阻止放射性核素运移的两种或两种以上天然屏障和工程屏障。天然屏障是天然存在的屏障, 包括各种地质体和土壤等; 工程屏障是人工建造的屏障, 如废物固化体、废物包装容器、缓冲材料、处置单元、防护覆盖层、回填材料、防排水系统等。

防护覆盖层一般从上至下可分为: (1) 植被层, 表面种植植被, 可防止水土流失和风化侵蚀; (2) 回填土层, 可支持植被层并具有防水作用; (3) 排水层, 采用渗透性较大的粗粒径的砾石、卵石等铺设, 有排水和防生物侵扰功能; (4) 防渗层, 采用致密的低渗透性粘土阻滞地表水下渗; (5) 导水层, 采用石英砂或小砾石铺设, 当少量渗滤液透过防渗层后可沿其两侧排水设施汇集排出, 阻止下渗; (6) 回填材料层, 用于阻滞核素迁移; (7) 顶板, 布置于处置单元顶部, 起防水和支撑作用。

图 4 给出了美国在建处置场——新墨西哥州 Andrew 处置场处置设施的结构示意图, 详细说明了处置单元、防护覆盖层、回填材料、防排水系统的组成。其中防护覆盖层一共分为防蒸散层 (evapotranspiration cover system)、生物屏障层 (biobarrier cover system) 和高密封性顶盖层 (performance cover system)。防蒸散层由植被层和回填土层组成; 生物屏障层由排水层和层间回填土层组成; 高密封性顶盖层由导水层 (侧向排水层)、防渗层 (高密封性顶盖)、回填材料层 (层间回填层) 和顶板 (钢筋混凝土顶板) 组成。

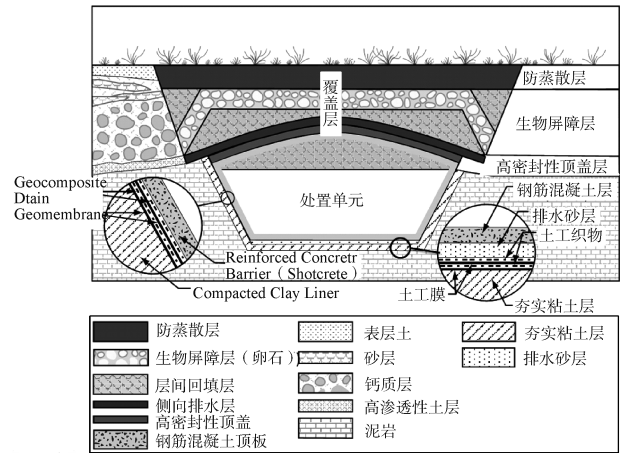


图 4 美国在建 Andrew 处置场多重屏障示意图
Fig. 4 The Sketch Map of Multiple Barriers in Andrew Disposal Site on Built in U. S. A

3 结论

本文结合新编国家标准《低、中水平放射性废物处置场岩土工程勘察规范》(GB/T 50983—2014), 对低中放废物的现状、术语、处置深度、处置场组成、处置形式和多重屏障进行了探讨, 结论如下:

(1) 根据我国目前在运、在建核电装机容量, 以及核电中长期发展规划, 现有 2 座低中放处置场及 1 个在建处置场不能满足未来低中放废物处置需求。未来核电公司将分别开展前期选址工作, 新编国家标准意义重大, 解决了当前低中放处置场各阶段勘察技术的标准问题。

(2) 国内外规范对介于豁免废物和高放废物之间的适用于近地表处置的放射性废物定义混乱, 新规范参照国际原子能机构的分类标准, 将其定义为放射性比活度高于清洁解控水平, 热功率约低于小于或等于 2 kW/m^3 , 介于免管废物和高放废物之间的放射性废物, 术语为“低、中水平放射性废物” (Low and Intermediate Level Radioactive Waste; LILW, 简称“低中放废物”)。

(3) 我国的低中放废物近地表处置场不包括近地表的天然和人工岩洞 (矿井) 内处置, 也不涉及中等深部处置和深部处置, 处置深度在低中放废物处置深度定义为 50 m 以内。

(4) 从岩土工程勘察的角度将处置场分为处置设施、辅助建筑物和场区, 并进一步将场区分为处置区、缓冲区和辅助建筑物区, 对不同勘察阶段处置场的勘察范围给予了界定, 同时新定义了处置坑

槽为处置单元基础施工的地下砌筑作业空间。

(5)介绍了低中放废物处置场的多种屏障理念,结合美国在建 Andrew 处置场,对多重屏障的结构进行了研究。

参考文献:

- [1] GB/T 50983—2014, 低、中水平放射性废物处置场岩土工程勘察规范 [S].
GB/T 50983—2014, Code for Site Investigation of Geotechnical Engineering for Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal [S].
- [2] GB 9132—1988, 低中水平放射性固体废物的浅地层处置规定 [S].
GB 9132—1988, Regulations for Shallow Ground Disposal of Solidlow-Land-Intermediate-Level Radioactive Wastes [S].
- [3] GB 13600—1992, 低中水平放射性固体废物的岩洞处置规定 [S].
GB 13600—1992, Regulations for Disposal of Solid Low-And Intermediate Level Radioactive Wastes in Rock Cavities [S].
- [4] GB 11928—1989, 低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定 [S].
GB 11928—1989, Regulations for Interim Storage of Low-And Intermediate-Level Radioactive Solid Wastes [S].
- [5] GB 9133—1995, 放射性废物的分类 [S].
GB 9133—1995, Classification of Radioactive Waste [S].
- [6] GB/T 4960.8—2008, 核科学技术术语 第 8 部分:放射性废物管理 [S].
GB/T 4960.8—2008, Glossary of Term: Nuclear Science and Technology-Part 8: Radioactive Waste Management [S].
- [7] HAD 401—04, 放射性废物的分类 [S].
HAD 401—04, Classification of Radioactive Waste [S].
- [8] 技术标准第 101 号, 放射性废物分类 [S]. 国际原子能机构, 1970.
IAEA Technical Reports Series No. 101, Standardization of Radioactive Waste Categories [S]. International Atomic Energy Agency, 1970.
- [9] 安全标准系列第 54 号, 放射性废物地下处置的一般导则 [S]. 国际原子能机构, 1981.
IAEA Safety Series No. 54, Underground Disposal of Radioactive Waste: Basic Guidance [S]. International Atomic Energy Agency, 1981.
- [10] 安全标准系列第 111-G-1.1 号, 放射性废物的分类 [S]. 国际原子能机构, 1994.
IAEA Safety Series No. 111-G-1.1, Classification of Radioactive Waste [S]. International Atomic Energy Agency, 1994.
- [11] 安全术语系列—核安全和辐射防护 [S]. 国际原子能机构, 2007.
IAEA Safety Glossary, Terminology used in Nuclear Safety and Radiation Protection [S]. International Atomic Energy Agency, 2007.
- [12] 安全标准系列第 GSG-1 号, 放射性废物的分类 [S]. 国际原子能机构, 2009.
IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. Classification of Radioactive Waste [S]. International Atomic Energy Agency, 2009.
- [13] 安全标准草案第 DS 390 号(将替代第 111-G-1.1 号), 放射性废物的分类 [S]. 国际原子能机构, 2011.
IAEA Draft Safety Guide No. Ds 390 (Supersedes No. 111-G-1.1), Classification of Radioactive Waste [S]. International Atomic Energy Agency, 2011.
- [14] 安全标准系列编号 WS-G-1.1, 放射性废物近地表处置安全评估安全导则 [S]. 国际原子能机构, 1999.
IAEA Safety Standards Series No. WS-G-1.1, Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste Safety Guide [S]. International Atomic Energy Agency, 1999.
- [15] 李瑾. 西南山区某极低放废物处置场 I 号场址地下水环境影响评价 [D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
LI Jing. The Environmental Impact Assessment of a Nuclear Waste Dipsosal No. 1 Site in Southwest Mountainous Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [16] GB/T 15950—1995, 低、中水平放射性废物近地表处置场环境辐射监测的一般要求 [S].
GB/T 15950—1995, General Requirements for Environmental-radiation Monitoring around Near Surface Disposal Site of Iow-Intermediatelevel Radioactive Solid Waste [S].
- [17] KITTEL J H, 近地表陆地处置—放射性废物管理手册(第一卷) [M]. 程小久, 汪华安, 郑文棠, 等译. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010.
KITTEL J H, Near-surface Land Disposal — Radioactive Waste Management Handbook (Volume 1) [M]. Translated by CHENG Xiaojiu, WANG Huaan, ZHENG Wentang, et al. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010.
- [18] Idaho National Engineering Laboratory. Directions in Low-Level Radioactive Waste Management: A Brief History of Commercial Low-Level Radioactive Waste Disposal [R]. DOE/LLW-103, 1994.
- [19] 易树平, 马海毅, 郑春苗. 放射性废物处置研究进展 [J]. 地球学报, 2011, 32(5): 592—600.
YI Shuping, MA Haiyi, ZHENG Chunmiao. Advances in Research on Disposal of Radioactive Waste [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(5): 592—600.

(责任编辑 林希平)