城市放射性废物库工程设计实践

李元岗，冀 东，何占飞，黄春锋，王宏良

（中核第四研究设计工程有限公司，河北 石家庄 050021）

摘要：为了保障核技术应用活动产生的低水平放射性废物的安全贮存，结合某直辖市城市放射性废物库设计实践，重点探讨了废物库工艺设计、安全防范系统、智能管理与数据传输系统等设计内容。设计结果满足了《核技术利用放射性废物库选址、设计与建造技术规范》（HJ 1258—2022）的相关要求，减少了操作人员的接触时间及附加外照射剂量，保障了放射性废物的核安全监管。

关键词：城市放射性废物库；设计实践；放射性废物；废旧放射源

中图分类号：TL93^{+}3 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)01-0097-06

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2022.06.02

城市放射性废物库是用于存放辖区各行业核技术应用活动产生的极短寿命放射性废物、极低水平放射性废物和低水平放射性废物（简称“废物”）以及不再使用的废（旧）放射源（简称“废源”）的专用贮存设施，属于社会公益性环保设施。城市放射性废物库和国家放射源集中贮存库，为我国核技术利用放射性废物的安全贮存起到了重要的保障作用[1-3]。目前部分区域的城市放射性废物库位于城市郊区，随着城市扩张和规划的调整，需要重新设计择址建设城市放射性废物库。

城市放射性废物库的设计内容主要包含：工艺设计、总图布置、建筑结构、通风系统、给排水、电气、火灾自动报警系统、安全防范系统、辐射防护等方面。其设计需满足辐射防护要求，保证废物库运行、检修和退役过程中废物接收、存放、回取等活动需求，保障废物和废源贮存的安全稳定，满足环境保护要求，以及对废物和废源应落实分区存放要求。

部分学者进行了城市放射性废物库设计实践，论述了废物库工艺技术设计方案以及公用工程的设计要点[1]104，对放射性废物库库型、吊装工具、防洪抗震、安全防御、污染防治等进行了阐述[2]39，讨论了废物库的优化和美化设计思想[3]12；但由于研究较早，其中对安全防范系统的论述已不满足现行规范[4]的要求。

城市放射性废物库内存放的大量废（旧）放射源造成库内背景辐射较高，一般在 1～30 μSv/h[5]，可能会产生放射性污染问题[6]。在某直辖市新建城市放射性废物库设计中，重点探讨了废物库工艺设计、安全防范系统、智能管理与数据传输系统等设计内容，旨在进一步保障放射性废物的安全贮存，为其他城市放射性废物库的设计提供借鉴。

1 废物源项

某城市放射性废物库接收的放射性废物包括：各种放射性污染材料（金属、非金属）及工具设备；零星低放废液的固化物；放射性实验用动物尸体或植株；废（旧）放射源（包括无主放射源、辐射事故放射源、Ⅳ或Ⅴ类废旧放射源、经监管部门批准可收储Ⅰ～Ⅲ类放射性源）。

根据该城市放射性废物库旧库的统计数据，废物库暂存的废物和废源大部分来自建材、医疗卫生、大专院校、化工制药、电力、机械、仪器仪表、钢铁、地质、石油、煤炭等行业，放射性废源与废物的主要核素种类组成及辐射特征见表 1。

收稿日期：2022-06-14

第一作者简介：李元岗（1985—），男，陕西宝鸡人，硕士，高级工程师，主要从事核工业环保设计与环境影响评价相关工作。

表 1 放射性废源和废物的核素组成及辐射特征

Table 1 Nuclides composition and radioactive characteristics of disused radiation sources and radioactive waste

核素名称	占比/%	半衰期/a	主要衰变方式	主要 γ 射线能量/MeV	活度/Bq
^{137}Cs	56.8	30.17	β^-	0.661 6	5.44×10^{11}
^{241}Am	10.3	432.2	α	0.059 5	2.75×10^{11}
^{90}Sr	6.5	28.1	β^-(纯 β)	无 γ 射线产生	2.08×10^{10}
^{238}Pu	5.5	87.7	α	0.152 7、0.099 8、0.043 5	3.23×10^{10}
^{226}Ra	4.7	1.62×10^{3}	α	0.186 0	1.05×10^{6}
^{60}Co	3.8	5.26	β^-	1.250 0	2.34×10^{10}
^{85}Kr	1.4	10.75	β^-	0.514 0	7.47×10^{10}
^{239}Pu	1.3	2.41×10^{4}	α	0.516 2	1.48×10^{10}
^{241}Am-Be	1.1	433			2.53×10^{11}
其他	9.2				3.66×10^{10}

2 废物库工艺设计

结合该市放射性废物的产生量及贮存需求，废物库库容设计为 600 m^3，包括存贮区、装卸大厅、控制室、更衣间、排风机房、车库及洗车设施、临时贮存间等，辅助建筑主要包括监控中心与门卫等。放射性废物贮存期按规定不超过 5 a[7]，废物库安全运行期为 50 a。

2.1 库型设计

废物库库型采用混凝土半地下式结构，具有防护性能强和安全性能高等优点。库内空间以库坑盖板为界分成两部分，盖板上为大厅，盖板下为库坑，库坑地上 1.0 m、地下 1.8 m。

2.2 库坑分区布置

为落实废物和废源分区存放要求，废物库内分为废物区与废源区，两区实行分区布置，分类贮存。靠近工作人员工作区的库坑贮存源强小、半衰期短的废物或废源，远离工作人员工作区的库坑贮存源强大、半衰期长的废物或废源。该方式有利于统一管理，方便单独存贮与回取，又尽可能减少工作人员的受照射危害。

废物区按废物污染核素的半衰期、活度浓度进行分类、分区存放，具体分为极短寿命废物区、极低水平废物区和低水平废物区 3 个小分区。

废源区分为强源区、中子源区、异型源区和弱源区。废物库贮存坑总计 19 个，考虑到废物与废源种类和数量的不确定性，库坑采用相同的设计，运营期可根据实际收贮的废物、废源种类与数量进行调整。废物库设计分区贮存情况见表 2。

表 2 废物库设计分区贮存情况

Table 2 Storage conditions of waste storage design zones

分类	小分区名称	半衰期	贮存废源与废物类型	库坑个数
废物区	极短寿命废物区	<100 d	极短半衰期的放射性废物	2
	极低水平废物区	/	极低活度浓度放射性废物	1
	低水平废物区	/	低活度浓度放射性废物	2
废源区	弱源坑	/	活度较低及暂时不用的废源	6
	异型源坑	/	体积较大或形状不规则的废源	2
	中子源坑	/	废(旧)中子源	2
	强源坑	/	活度较强的废源	4

2.3　行吊装置设计

废物库行吊用于吊装库坑盖板、装有废源或废物的标准废物钢桶，以及形状不规则的异型入库物品。行吊的起重量需满足吊装库坑盖板、最重废源及废物包装的要求，并留有裕量。目前，全国废物库库坑不同尺寸的盖板最大质量约为 2.0～3.0 t，所收贮的最重废源及废物包装质量一般不超过 1.0 t，考虑一定的裕量，设计行吊的起重量为 5 t。

废物库装卸大厅设置 1 台 5 t 的遥控电动双臂梁行吊装置，采用了远程控制系统、纯机械无动力自动抓具、伸缩套筒和变频调速技术，可在不更换抓具的情况下抓取库坑盖板和废物桶。行吊装置基于视觉识别技术，具备精准定位功能，操作人员通过控制室内监控设备的显示器观察废物库内部情况，并远程操控行吊装置，完成库内盖板、废物桶的吊运。该行吊装置的设计可实现人机交互操作，实现远程精准吊装，从而减少工作人员在库内的操作时间，保障人员职业健康安全。

另外，行吊装置主梁下方设置 1 台 3 t 的副起升电动葫芦，用于满足异型入库物品的吊装需求和应急吊装需求。

3　安全防范系统

《核技术利用放射性废物库选址、设计与建造技术规范》(HJ 1258—2022)中“附录 A　城市放射性废物库安全防范系统要求”明确了城市放射性废物库安全防范系统要求技术防范、实体防范、人力防范相结合，探测、延迟、反应相协调。

3.1　实体防范

实体防范一般指保护重要对象的建筑物、栅栏等屏障，主要功能在于延迟危险的发生，为处理危险赢取时间[8]。废物库实体防范主要包括库区周界、废物库库房和监控中心等。为有效延迟入侵者的入侵行为，为安全防范系统做出有效反应赢取足够的时间，在废物库库区周界设置 2.5 m 高的强钢链式栅栏，顶部加装张力刺丝，用以防范库区周界的攀爬入侵；在库房外窗、监控中心窗户、库房排风管道孔洞设置钢筋格架保护，库房、监控中心安装甲级防盗安全门，用以防范破坏门窗或通过库房孔洞入侵。废物库库坑由混凝土盖板封盖，只有使用行吊才能打开；且行吊异地控制，其电源控制装置安装在监控中心。

3.2　技术防范

技术防范是利用信息技术增强人防和物防的防护能力，是对人力防范和实体防范在防护手段上的补充和加强。废物库技术防范主要包括入侵报警系统、视频安防监控系统、出入口控制系统、电子巡查系统和安防专用通讯系统等。

3.2.1　入侵报警系统

当出现非法入侵/破坏时，入侵报警系统能发出报警信息、指明报警部位，提醒相关人员尽快到达现场处置；同时向视频安防监控系统、出入口控制系统发出联动信息，启动相关设备，并采取必要措施[9]。

设计对库区周界栅栏设置振动光缆探测器，当有车辆冲撞周界栅栏闯入时发出报警。栅栏顶部设置张力刺丝入侵探测器，周界大门顶端设置激光雷达探测器，当有人翻越周界栅栏或大门入侵时发出报警。周界大门内侧、库房外窗及监控中心窗户外侧设置红外栅栏探测器，库房大门和人员通道门内侧设置红外幕帘探测器，库房内的控制室、工作服更衣间、库房大厅设置红外/微波双鉴探测器，当有人入侵上述探测区域时，红外光束被遮挡发出报警。

库房控制室内窗设置玻璃破碎探测器，防止人为破坏入侵。库房和监控中心内在隐蔽位置安装紧急报警按钮，遇突发事件时，工作人员或安保人员可实现一键快速报警。库房与监控中心内外分别设置声光报警器，当库区任意一处报警发生时，发出强烈的声光报警信号，起到警示威慑作用。

3.2.2　视频安防监控系统

视频安防监控系统主要用于对入侵报警系统和出入口控制系统的报警信号进行复核，协助安保人员及时采取有效措施，为有关部门提供现场视频图像证据。

根据不同的应用场景和监控需求，选用不同类型的红外高清摄像机。沿库区周界栅栏顶部设置室外枪型摄像机，用于对周界入侵探测器报警的复核。库区周界大门内侧和废物库院区设置室外快球摄像机，用于对库区周界出入口、库区主要道路及出入库区的人员与车辆进行监控。库房和监控中心的外墙设置室外枪型摄像机，用于对入侵探测器报警的复核。排风机房和监控中心室内设置室内枪型摄像机，用于对出入口的监控。库房装卸大厅设置室内枪型摄像机与快球摄像机，用于对废物

存储区域的监控和入侵探测器报警的复核。

3.2.3 出入口控制系统

设置出入口控制系统是为了增加非法入侵难度，延长入侵时间。为此，采取设置路障机、门禁等设施，管理和监督库区、库房与监控中心的正常出入。

为了防范外来车辆非法冲撞，在库区周界电动折叠门内侧设置翻板路障机，在废物库库房大门外安装电动柱式路障机。在废物库装卸区门、排风机房门、人员通道外门设置门禁系统，刷卡进入，按钮出门；在监控中心出入口设置刷卡＋密码组合验证式门禁系统。当非法刷卡和破坏门禁系统行为发生时，发出报警信号并联动视频监控系统记录图像信号，信号传输至监控中心。

3.2.4 安防专用通讯系统

监控中心作为报警控制中心，通过安防系统联动程序集成整个安全防范系统，控制和显示采用高清矩阵切换器进行切换控制。监控中心设置电视墙，进行视频图像显示，图像存储采用磁盘阵列存储，存储周期为 90 d。当遭遇非法闯入时，安防系统发出报警并联动相应位置的摄像机，及时记录图像信号，以供查找或取证之用。所有探测报警信号传输至监控中心报警主机上。视频信号可通过监控中心内的路由器经通信光缆传至废物库管理部门，由管理人员实时监控。

监控中心设置可视对讲系统，用于安保人员对来访者进行观察及通讯联络。监控中心设置无线对讲分机，用于安保值班人员与巡更人员的通讯联系。

3.2.5 电子巡查系统

电子巡查系统是安防管理中人防与技防的结合，通过预先编制的巡更软件，对安保人员巡更的进度状态进行记录和监督，并对意外情况及时报警。设计采用在线式电子巡更系统，在库区周界围墙、库房外墙等重点区域设置巡更点，为安保人员配备多功能主动式手持巡更机，对重点区域定时巡更并更新巡更信息。

3.3 人力防范

人力防范指具有相应素质的人员进行的有组织的防范、处置等安全管理行为。废物库第一响应力量为废物库专职安保人员，第二响应力量为城市 110 警力及其他响应力量。监控中心由安保人员全天候轮班值守，并配备防刺背心、头盔、电警棍、防刺手套、急救包等防护器具。

4 智能管理与数据传输系统

目前，各城市放射性废物库的废源（废物）信息管理系统、安全防范系统与辐射监测系统均独立运行，不便于放射性废物的管理和信息存储。为了安全高效进行放射性废物的记录跟踪和日常管理，废物库设计采用智能管理与数据传输系统，该系统包括核心数据库和主程序、RFID（即无线射频识别）系统程序、移动管理 APP，并整合了安全防范系统与环境剂量率在线监测系统管理程序。

4.1 核心数据库和主程序

建立智能平台统一管理废物库安全防范系统、RFID 系统程序及环境剂量率在线监测系统，并将存储数据在 2 套服务器中进行热备份，在 1 套平台软件上通过不同的子页面实现全面的废物收贮流程管理。智能平台总拓扑图如图 1 所示。

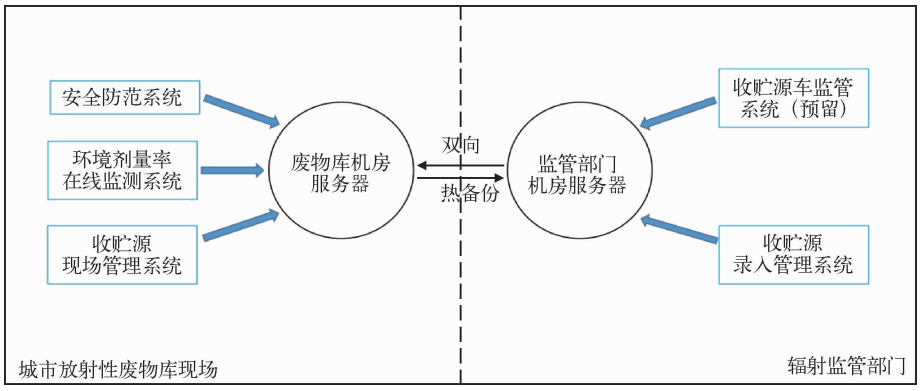


图 1 智能平台总拓扑图

Fig. 1 Total topology of intelligent platform

4.2　RFID 系统程序

RFID 技术是一种利用射频实现非接触双向射频的自动识别技术，具有 ID 唯一、成本低、易操作、隐蔽性好、可溯源、全过程跟踪等优点[10]。RFID 技术现已应用于危险废物、医疗废物的全过程可追溯管控实践中，显著提高了危险废物、医疗废物污染防治工作的效率[11-12]。

废物库设计采用 RFID 系统对收贮废物或废源的信息进行管理，建立放射性废物全程管理信息化管控平台，实现放射性废物运输、贮存、转移、处置等全过程追溯管理，该系统包括收贮源现场管理和收贮源录入管理 2 个子系统。

收贮现场管理子系统可在现场利用电子标签和移动式 RFID 手持终端机，扫描记录已收贮废物或废源的核素、收贮活度、数量、存放坑号、废物桶编号、收贮时间等信息，上述信息可以任意编组或分类查询。在废物库现场安装 1 台显示屏，对废物库坑道贮源进行可视化优化管理，以保证收贮废源（废物桶）的录入系统可在现场进行二次确认，从而保证每个废源（废物桶）的具体位置准确可靠。

收贮源录入管理子系统利用电子标签优化录入系统，每个收贮废源（废物桶）在录入信息系统时绑定唯一序列号电子标签，并合理统筹安排坑道位置，同时在收贮完成确认后可以随时查看与管理已有废源（废物桶）的可视化位置和信息。

每个库坑内壁安装 4 个 RFID 接收天线，实时扫描库坑内收贮废源（废物桶）上绑定的电子标签，获取相关信息后上传至 RFID 主机，然后经主机上传至系统平台。在废物装卸厅大门和废物大厅与更衣间通道门两侧各安装 2 个 RFID 接收天线，用于监测废源（或废物）出入库操作和防止非法携带出库。

4.3　移动管理 APP

通过手持终端机与移动管理 APP 配合，实现移动管理与报警信息推送。手持终端机安装基于安卓系统的管理 APP，将 RFID 收贮现场管理的多项功能整合，实现随时随地、方便快捷地查询废物库状态、剂量率实况和历史曲线、报警信息；并可以通过搜索功能，实时查看每个废源（废物桶）的基本情况和收贮状态。当任何子系统出现报警时，管理 APP 都将收到报警与短信推送，在极端情况下会采用电话回呼的方式告警管理人员。

5　结语

在废物库设计中，对废物贮存与废源贮存实行分区域布置、分子区存放，便于放射性废物的安全管理以及废物的回取与库容周转。选用具备远程操控、精准位移的行吊设施，能够减少工作人员接触时间及附加外照射剂量。采用智能管理与数据传输系统，通过 RFID 技术，对放射性废物运输、暂存、回取等过程实行信息化、智能化监控，更有效地保障放射性废物的核安全监管。废物库安防系统设计满足《核技术利用放射性废物库选址、设计与建造技术规范》（HJ 1258—2022）的要求。

参考文献：

[1] 荣峰，李金艳，王金明. 省级城市放射性废物库工程设计[J]. 核动力工程，2009，30(6)：104-107.

[2] 张伯明，张蕊雪，王凤英. 城市放射性废物库设计探讨[J]. 核安全，2010(2)：39-42.

[3] 马海卫，李文辉，刘赫，等. 城市放射性废物库的优化与美化设计[J]. 辐射防护通讯，2005，25(5)：12-18.

[4] 生态环境部. 核技术利用放射性废物库选址、设计与建造技术规范：HJ 1258—2022[S]. 北京：中国环境出版社，2022.

[5] 龚杰，董志强，张洁萍，等. 城市库废放射源治理工作中的剂量控制[J]. 同位素，2017，30(3)：221-224.

[6] 陈德育，汤泽平，龚杰. 我国城市放射性废物库潜在污染因素分析及对策建议[J]. 核安全，2020，19(5)：22-26.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 放射性废物管理规定：GB 14500—2002 [S]. 北京：中国标准出版社，2002.

[8] 吕海涛. 安全防范系统效能评估关键技术研究[D]. 武汉：武汉大学，2014.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 安全防范工程技术标准：GB 50348—2018[S]. 北京：中国计划出版社，2018.

[10] 曹明华，叶扬. RFID(射频识别)在危险废物全过程管理应用中的创新与实践[J]. 四川环境，2021，40(6)：213-218.

[11] 靳晓勤，霍慧敏，贾佳，等. 危险废物全过程信息化可追溯管控[J]. 环境与可持续发展，2021(4)：99-104.

[12] 罗松，钟年丙，曹雪梅，等. 基于 RFID 和 GPRS 技术的医疗废物管理系统构建[J]. 重庆工学院学报(自然科学版)，2009，23(12)：106-110.

Engineering Design Practice of Urban Radwaste Repository

LI Yuangang, JI Dong, HE Zhanfei, HUANG Chunfeng, WANG Hongliang
(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In order to ensure the safe storage of low-level radioactive waste generated by nuclear technology application activities, combined with the design practice of an urban radwaste repository in a municipality directly under the central government, the design contents of waste warehouse process design, safety protection system, intelligent management and data transmission system were discussed. The design results meet the requirements of *Technical specifications for siting, design and construction of radioactive waste repository for nuclear technology application* (HJ 1258—2022), reduce the exposure time of the operator and the additional external radiation dose, ensure the nuclear safety supervision of radioactive wastes.

Key words: urban radwaste repository; design practice; radioactive waste; waste radioactive source

《铀矿冶》论文网络首发公告

《铀矿冶》编辑部与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签署了《CAJ-N 网络首发学术期刊合作出版协议》,从 2023 年起经本刊审定录用的稿件,可在年、卷、期和页码暂不确定的情况下,通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)出版平台进行网络首发;待确定刊期后,再出版纸质期刊。

网络首发有助于确保学术成果的首发权和加快传播速度。网络首发论文视为正式出版论文,本刊编辑部与电子杂志社共同为作者颁发论文网络首发证书,欢迎广大科研技术人员踊跃投稿。