

# 高密度聚乙烯高完整容器处置现状及标准研究

靳超然<sup>1</sup>, 田启明<sup>2</sup>, 李虹羽<sup>1</sup>, 谢凯玲<sup>1</sup>, 何炳希<sup>1</sup>, 王奕<sup>2</sup>, 吴涵<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国电投核安科技有限公司, 重庆

<sup>2</sup>上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海

收稿日期: 2024年5月11日; 录用日期: 2024年6月13日; 发布日期: 2024年8月6日

## 摘要

国内以海阳核电为代表的第三代核电首次采用了高密度聚乙烯高完整容器。文章介绍了美国Barnwell和Clive处置场HDPE-HIC的处置经验以及国内低放处置场的处置现状, 结合我国处置标准要求分析了HDPE-HIC处置要求, 并介绍了国内针对HDPE-HIC处置的堆码方案研究, 以期妥善处置HDPE-HIC提供参考。

## 关键词

高密度聚乙烯高完整容器, 处置, 标准

# Disposal Status and Standards Research of High-Density Polyethylene High Integrity Container

Chaoran Jin<sup>1</sup>, Qiming Tian<sup>2</sup>, Hongyu Li<sup>1</sup>, Kailing Xie<sup>1</sup>, Bingxi He<sup>1</sup>, Yi Wang<sup>2</sup>, Han Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SPIC HE-AN Technology Co, Ltd., Chongqing

<sup>2</sup>Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: May 11<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 13<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 6<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In China, the third-generation nuclear power plant represented by Haiyang Nuclear Power Plant used high-density polyethylene high integrity container for the first time. This paper introduces the disposal experience of HDPE-HIC in Barnwell and Clive disposal sites in the United States as well as the present disposal situation of low radioactive disposal sites in China. Combining with the requirements of China's disposal standards, the disposal requirements of HDPE-HIC are ana-

lyzed, and the stacking scheme research for HDPE-HIC disposal in China is introduced, in order to provide a reference for the proper disposal of HDPE-HIC.

## Keywords

High-Density Polyethylene High Integrity Container, Disposal, Standards

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高整体容器(HIC)具有强度高、化学稳定性和热稳定性高的特点,被用于未经过固化的放射性废物的装填。自 1981 年以来,在美国、加拿大、墨西哥和韩国等地,已有超过 22,000 个各类设计形式的 HIC 容器应用于核电及其他领域,从第一个 HIC 交付使用至今,没有容器失效的报告[1] [2]。以我国海阳核电为代表的第三代核电项目首次使用了高密度交联聚乙烯生产的高整体容器(HDPE-HIC),作为废树脂和废滤芯的包装容器。目前我国尚无处置 HDPE-HIC 货包的工程经验,相关法规标准也缺乏明确的规定,对国内外处置经验、法规标准要求以及处置方案进行梳理和分析,以期对后续妥善处置 HDPE-HIC 货包提供一些支撑。

## 2. 国内外处置现状

高密度聚乙烯高完整容器在美国具有较长的使用经验,其中 Barnwell 处置场和 Clive 处置场具有使用 HIC 货包处置低、中放废物的工程实践[3]。我国目前有西北处置场、白龙处置场、飞凤山处置场以及龙和处置场等 4 个低放废物处置场,但尚无处置 HDPE-HIC 货包的工程应用。

### 2.1. Barnwell 处置场

Barnwell 处置场位于美国南卡罗莱纳州,1971 年建成运营,设计年限为 50 年,已运行 50 年。该处置场可以接收钢桶、水泥桶、HIC 等多种包装方式的废物包以及报废的压力容器等大件废物。按照美国联邦法规 10CFR 61.55 规定:将可近地表处置的低放废物分为 A、B、C 三类,其中 A 类废物活度浓度较低,可单独处置;B 类废物比活度较高,废物的物理形式和特性必须符合更严格的要求以保证废物处置的稳定性;C 类废物比活度最高,除需满足 B 类废物要求外,还需要采取额外措施,保护其免受外部入侵,保证稳定性。Barnwell 处置场在处置 HDPE-HIC 时,如图 1 所示,对其增加了混凝土外包装以避免来做周围土壤的压力。混凝土外包装为立式圆柱体,外形尺寸为直径 1.85 m × 高 2.17 m,桶盖、桶底以及壁厚分别为 0.27 m、0.25 m、0.2 m。

### 2.2. Clive 处置场

Clive 处置场位于美国犹他州,气候环境干旱少雨,占地面积 1 平方英里。该处置场主要接收装填废树脂的 HDPE-HIC、建筑废物、铀尾矿三类废物。Clive 处置场在处置 HDPE-HIC 时,如图 2 所示,在四周码放低剂量水平的废物箱体(BOX),中间码放聚乙烯 HIC 桶,每个处置单元的处置井可以放多个聚乙烯 HIC, HIC 桶之间用沙进行填充。每码放一层 HIC,均要在其上做内部覆盖层处理,直到达到设计高度,然后再做最终的顶部覆盖层处理,完成处置单元。

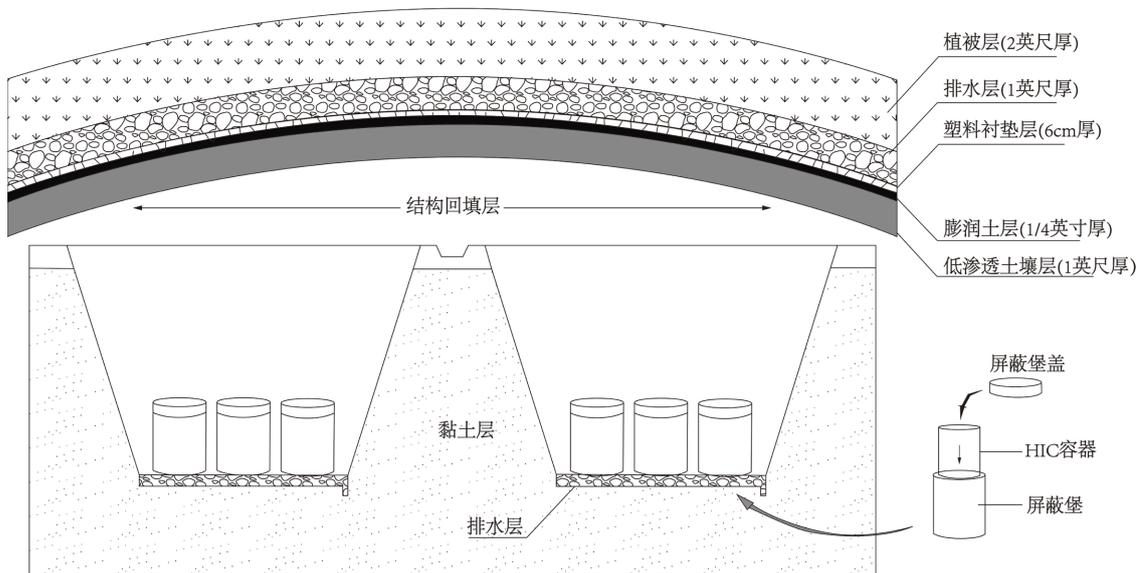


Figure 1. HIC disposal in Barnwell site  
图 1. Barnwell 处置场 HIC 处置示意图

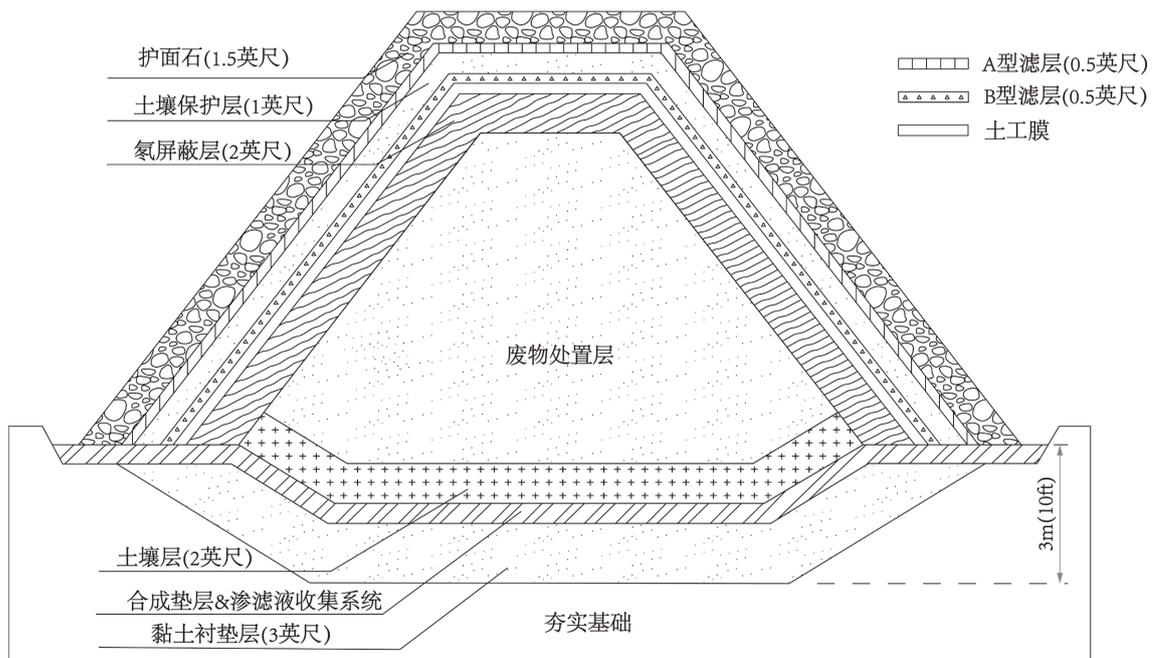


Figure 2. HIC disposal in Clive site  
图 2. Clive 处置场 HIC 处置示意图

### 2.3. 西北处置场

西北处置场于 1995 年开工建设，1999 年开始试运行，直到 2011 年获得国家核安全局颁发的正式运行许可证后。西北处置场是我国首座区域低、中放水平固体废物处置场，用于处置核工业历年积存的退役过程中产生的低、中放固体废物，已累计接收约 27,000 m<sup>3</sup> 固体废物。该处置场目前接收和处置货包主要为 200 L、400 L 废物桶等标准货包，接收处置的放射性废物货包需满足：表面剂量率  $\leq 2$  mSv/h，1 m 处剂量率  $\leq 0.1$  mSv/h，表面污染水平，总  $\alpha \leq 0.4$  Bq/cm<sup>2</sup>，总  $\beta \leq 4$  Bq/cm<sup>2</sup> [4]。

## 2.4. 北龙处置场

北龙处置场于 2001 年投入使用,是国家规划的五个区域处置场之一,主要处置广东及邻近地区核电站及其他单位产生的低、中放固体废物,设计容量 80,000 m<sup>3</sup>,可累计处置总活度约为  $5.4 \times 10^{15}$  Bq 的中、低放固体废物[5]。该处置场首期建造 8 个处置单元,单个处置单元尺寸为 17 m × 17 m × 7 m,容积为 2023 m<sup>3</sup>,货包采用混装方式,下三层装填 C1、C2、C3 型混凝土桶 300 个,C4 型混凝土桶 132 个,上三层按照每层 25 × 25 的方式,装填 1875 个金属桶,容积利用率 57.2%。

## 2.5. 飞凤山处置场

飞凤山处置场位于四川,是我国第三座低、中放处置场,主要用于处置西南地区的低、中放固体废物,设计容量 180,000 m<sup>3</sup>,处置放射性总活度为  $1.9 \times 10^{16}$  Bq,已建成容量为 32,000 m<sup>3</sup> 的 14 个处置单元。飞凤山处置场可接收处置表面剂量率最高达 45.5 mSv/h 的货包,为了解决处置堆码时的天空反散射和人员辐射防护问题,在处置单元内部采用了分格堆码的方式,对于表面剂量率 < 1.5 mSv/h 的废物包不进行分格直接处置,对于表面剂量率在 1.5 mSv/h~10 mSv/h 区间的废物包将处置单元分为 6 格处置,对于表面剂量率在 10 mSv/h~45.5 mSv/h 区间的废物包将处置单元分为 25 格处置,采用分格堆码后,处置单元外墙 1 m 的  $\gamma$  剂量率为每小时 0.43~1.82  $\mu$ Sv [6]。

## 2.6. 龙和处置场

龙和处置场位于甘肃省酒泉市,主要用于接收田湾核电、宁德核电和秦山核电等产生的低放固体废物,设计总容量为 100 万立方米,拟分五期建设,一期处置容量 24 万立方米,二期处置容量 24 万立方米,三期处置容量 20 万立方米,四期处置容量 18 万立方米,五期处置容量 14 万立方米。其中一期一阶段工程于 2022 年完成建设并且投运,处置容量 4 万立方米,共 20 个处置单元。该处置场接收货包主要为 CD1 混凝土桶、150 L 桶、200 L 桶、400 L 桶,其主要废物为可燃废物和水泥固化/固定废物。目前龙和处置场已经接受并处置废物约 2280 m<sup>3</sup>,总活度约  $4.35 \times 10^{13}$  Bq。

## 2.7. 国内外处置现状对比分析

美国 Barnwell 处置场采用处置壕沟的形式进行处置,壕沟底层为高密度的黏土层,货包之间的空隙使用沙子填满,而国内处置场一般采用混凝土处置单元的形式,货包之间的空隙一般也采用混凝土进行填充。可以看出国外虽有 HDPE-HIC 的处置经验,但其处置形式并不适用于国内,HDPE-HIC 作为一种新引进的货包形式,在国内也无处置案例,需要结合货包特点和国内处置要求进行分析研究。

# 3. HDPE-HIC 处置相关要求研究

## 3.1. HDPE-HIC 货包的特点

《低、中水平放射性固体废物包安全标准》(GB12711-2018)规定,“废物包中游离液体体积应小于固体废物体积的 1%” [7]。针对某核电 HDPE-HIC 装填工艺,HDPE-HIC 主要用于废树脂、废滤芯的处理。废树脂、废滤芯等废物在核岛辅助厂房进行 HDPE-HIC 装填和脱水,保证 HDPE-HIC 内游离水含量小于 1%。随后通过专用 HDPE-HIC 运输容器将 HDPE-HIC 运输至厂址废物处理设施(SRTF)的暂存库中暂存。HDPE-HIC 暂存满 5 年后,再通过脱水验证堡对 HDPE-HIC 内含水量进行验证,确保含水量率小于 1%后,再外运处置。根据上述 HDPE-HIC 进出库流程,可以确定 HDPE-HIC 虽然未对废物进行任何物理和化学处理,但仍满足标准对于包装内容物游离水含量小于 1%的要求。

### 3.2. 处置要求

《低、中水平放射性固体废物近地表处置安全规定》(GB9132-2018)规定,“废物包应具有稳定性,不会发生结构上的破坏,并且不会因废物包塌陷、坍塌而影响处置场的总体稳定性”、“废物包在处置单元内的码放方案应实现废物包放置的最优化(根据废物的类型和尺寸、表面剂量率等),以便占用最少的处置空间和产生最小的辐射影响”[8]。《低、中水平放射性固体废物包安全标准》(GB12711-2018)规定,“直接操作进行装卸、搬运、贮存和处置的低、中水平放射性固体废物包,其外表面上任意一点的剂量率应 $\leq 2.0$  mSv/h。超过此限值者,应采取外加屏蔽(如外包装容器等)或采用远距离操作”。

根据某核电废物设计源项,装有废树脂的 HDPE-HIC 在核电厂暂存五年后,废物包表面剂量率如表 1 所示。

**Table 1.** The surface effective dose rate of waste packets temporarily stored for five years

**表 1.** 某核电暂存五年的废物包表面有效剂量率

货包	顶部表面最大 (mSv/h)	侧表面最大 (mSv/h)	底部表面最大 (mSv/h)
废树脂 HDPE-HIC	177	334	397

HDPE-HIC 属于低水平放射性废物,可进行近地表处置,但其表面剂量率过高,需加屏蔽(如外包装容器等)或采用远距离操作。此外,由于 HDPE-HIC 自身强度不够,还需要进一步开展 HDPE-HIC 处置方案研究,确定 HDPE-HIC 堆码形式,处置单元大小。

### 4. HDPE-HIC 处置方案研究进展

国内工程技术人员针对 HDPE-HIC 的处置也开展了一些研究。杨彬等[9]提出了三种 HDPE-HIC 的处置方案,第一种是对 HDPE-HIC 增加混凝土外包装,以提供一定的支撑,处置流程为先将混凝土外包装放入处置单元再将 HDPE-HIC 货包吊入外包装中,采用井字形堆码,两层堆码后使用水泥砂浆或砂土对空隙进行填充,最后加上黏土覆盖层;第二种是 HDPE-HIC 不加外包装,将 320 L 桶和 HDPE-HIC 混合堆码,2 层 320 L 桶的高度与 HIC 高度相近,在处置单元内可在 HDPE-HIC 外围堆码 320 L 桶,以增加结构强度,堆码完成后用水泥砂浆填充空隙、浇筑顶盖,再进行第二层 HIC 的码放;第三种 HDPE-HIC 同样不加外包装,而是将处置单位分割为若干个小格,提供支撑结构,每个小格放一个 HIC 再用水泥砂浆填充空隙。马若霞等[10]针对 HDPE-HIC 的处置也提出了三种方案,第一种与美国处置经验相同,HDPE-HIC 增加混凝土外包装放入处置壕沟,壕沟底部为排水层和砂质黏土层,上部采用植被层、排水层、塑料衬垫层、膨润土层、低渗透土壤层、结构回填层进行覆盖;第二种是将 4 个 HDPE-HIC 放入一个混凝土箱中,再放入处置单元,每个处置单元堆码三层,每层放 16 个混凝土箱;第三种是也采用 320 L 桶和 HDPE-HIC 混合堆码,处置单元内均布 35~40 个 HIC,外围堆码 2 层 320 L 桶,一层完成后浇筑混凝土,再进行第二层堆码。

### 5. 结论

1) HDPE-HIC 的处置在国外已有成熟的工程实践,我国由于使用该类包装容器时间较晚,现有的近地表处置场均无处置经验。

2) 结合我国低放固体废物处置的相关法规,HDPE-HIC 基本符合相关要求,但在处置时需考虑货包表面剂量率以及结构稳定性的问题。

3) 结合国内已经开展的关于 HDPE-HIC 处置方案的研究,可为后续 HDPE-HIC 处置方案设计提供一定参考。

## 基金项目

聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)处置方案及运输装备设计研究(169001JX0120230008)。

## 参考文献

- [1] 耿忠林, 方祥洪, 李斌. 聚乙烯高整体性容器(HIC)处置方案研究[J]. 化学工程与技术, 2015, 5(4): 72-79.
- [2] 耿忠林, 方祥洪, 李斌. 聚乙烯高整体性容器(HIC)暂存库在核电站中的应用研究[J]. 核科学与技术, 2015, 3(3): 97-102.
- [3] 姚勇, 王彩霞, 万皓宇, 等. 交联聚乙烯 HIC 在美国处置场应用实践及对我国的启示[J]. 辐射防护, 2021, 41(5): 453-458.
- [4] 刘超, 钱海, 翟健, 等. 西北处置场低、中放固体废物处置实践[J]. 辐射防护通讯, 2011.
- [5] 赵滢. 北龙处置场废物处置工艺对处置安全的贡献[C]//“21 世纪初辐射防护论坛”第四次会议暨低中放废物管理和放射性物质运输学术研讨会论文集, 2005.
- [6] 周兆宇, 王杰. 飞凤山低、中放固体废物处置场运行与处置管理实践[J]. 核安全, 2020, 19(4): 1-7.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. GB12711-2018 低、中水平放射性固体废物包装安全标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. GB9132-2018 低、中水平放射性固体废物近地表处置安全规定[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [9] 杨彬, 任力, 华伟, 等. 国内 AP1000 核电低、中水平放射性废物处置浅析[C]//废物地下处置学术研讨会, 2014.
- [10] 马若霞, 杨彬. 交联高密度聚乙烯高完整性容器的处置方案研究[J]. 中国高新科技, 2019(5): 117-119.