

高密度聚乙烯高完整容器屏蔽运输容器 研究现状及分类探讨

靳超然¹, 田启明², 李虹羽¹, 谢凯玲¹, 何炳希¹, 周焱², 杨牧²

¹国电投核安科技(重庆)有限公司, 重庆

²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6月30日

摘要

我国海阳核电采用了高密度聚乙烯高完整容器装填废树脂、过滤器芯, 由于货包表面剂量率较高, 需要配置专用的屏蔽运输容器。本文介绍了国内容器相关的研究现状, 并分析了HDPE-HIC运输容器分类, 以期为后续屏蔽运输容器的研制提供参考。

关键词

高密度聚乙烯高完整容器, 屏蔽运输容器, 法规分析

Research Status and Classification of High Density Polyethylene High Integrity Container Shielded Transshipment Container

Chaoran Jin¹, Qiming Tian², Hongyu Li¹, Kailing Xie¹, Bingxi He¹, Yan Zhou², Mu Yang²

¹SPIC HE-AN Technology (Chongqing) Co. Ltd., Chongqing

²Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co. Ltd., Shanghai

Received: May 11th, 2024; accepted: Jun. 13th, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

Haiyang Nuclear Power Plant used high-density polyethylene high integrity container to fill waste resin, filter core, due to the high dose rate of the package surface, it is necessary to configure a

文章引用: 靳超然, 田启明, 李虹羽, 谢凯玲, 何炳希, 周焱, 杨牧. 高密度聚乙烯高完整容器屏蔽运输容器研究现状及分类探讨[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(3): 663-668. DOI: 10.12677/aep.2024.143089

special shielded transport container. This paper introduces the research status of domestic container, and analyzes the classification of HDPE-HIC transport container, which provides reference for the subsequent development of shielded transport container.

Keywords

High-Density Polyethylene High Integrity Container, Shielded Transshipment Container, Analysis for regulations

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

随着国内核电建设规模扩大,放射性废物管理中的废物最小化日益受到重视,AP1000 作为第三代核电机组,首次采用了厂址废物处置设施(SRTF)处理来自各个机组的低水平放射性废物。我国海阳核电作为 AP1000 的依托项目,采用了高密度聚乙烯高完整容器(HDPE-HIC)装填工艺处理废树脂、过滤器芯等放射性等湿固体废物[1]。

根据《压水堆核电站放射性固体废物处理系统设计准则》(NB/T 20621-2021)规定,核电厂生产产生的放射性固体废物在暂存库的暂存时间不应超过 5 年。由于高密度聚乙烯高完整容器(HDPE-HIC)货包处置方案尚未确定,且该货包表面剂量率较高,需要配置相应的运输容器进行外运,目前该类货包均在核电厂内进行暂存。国内尚未对 HDPE-HIC 运输容器进行研制,本文通过对容器的研究进展,并根据我国法规标准对 HDPE-HIC 运输容器分类进行分析,可为后续运输容器的研制提供支持。

2. HDPE-HIC 运输研究现状

2.1. 国外研究现状

HDPE-HIC 在美国有较广泛的应用。美国 Energy Slutions 公司生产的 PL8-120 型交联聚乙烯高完整容器,如图 1 所示,直径为 1524 mm,高度为 1866 mm,有效容积约为 2.83 m³,用于贮存核岛产生的废树脂和废过滤器芯,根据贮存内容物的不同,其内部结构略有不同[2]。



Figure 1. PL8-120 HDPE-HIC

图 1. PL8-120 型 HDPE-HIC

根据 HIC 废树脂装填工艺流程, 废树脂在核岛装入 HIC 完成脱水操作, 然后通过运输容器(如图 2 所示)转运至 SRTF 暂存, 暂存 5 年后进行脱水验证, 再通过运输容器运至处置场[3]。



Figure 2. HDPE-HIC shielded transshipment container
图 2. HDPE-HIC 运输容器

2.2. 国内研究现状

国内外研究人员对 HDPE-HIC 货包开展了模拟和试验研究, 但未对 HDPE-HIC 运输容器开展相关研究。郑英杰[4]利用有限元分析的方法对聚乙烯高整体容器的完整性进行了评价, 对聚乙烯高整体容器建立了三维模型, 通过冲击动力学分析软件, 对跌落、贯穿进行仿真模拟试验, 通过结构力学分析软件, 对堆积的典型工况进行仿真模拟试验, 通过试验 HDPE-HIC 以最危险的倾角下落, 仍可以保证的结构完整性和密封性。胡丽丽[5]对交联高密度聚乙烯容器的性能进行了实验研究, 进行了包括材料的物理性能、力学性能、热性能、阻燃性能和抗霉菌性能在内的测试, 利用高速相机记录了自由跌落和贯穿试验, 发现内容物无泄漏、容器表面无破损, 进行了蠕变测试, 得出了时间与应力的曲线。周江[6]等研制了 HDPE-HIC 货包形式试验台架, 该台架可进行自由下落、贯穿、堆码、密封和喷淋等试验, 通过高速相机和模拟计算发现了角跌落为最危险状态, 应尽可能避免。费国胜[7]针对某种屏蔽运输容器在运输和吊运中可能发生的问题, 进行了优化设计, 利用有限元分析软件进行了分析测试, 研究结果表明改变承载力支撑柱结构对屏蔽转运容器跌落冲击过程最大应力值的减小作用不明显, 而容器底部增加天然橡胶制造的缓冲垫, 在跌落冲击过程中, 可有效减少最大应力值。

2.3. 国内外研究对比

美国 Energy Solutions 公司开发了用于处理废树脂和废过滤器芯的 HIC 容器及配套的运输容器。国内在 HDPE-HIC 方面, 仅通过模拟和实验的方式对 HIC 容器的性能开展相关研究, 未对运输容器开展相关研究工作, 放射性物品运输容器的研究多集中于核燃料及乏燃料。因此, 需要结合我国法规标准对 HDPE-HIC 运输容器分类进行分析, 明确试验要求, 为研制运输容器提供参考。

3. 放射性废物分类

3.1. 《放射性废物分类》的规定

《放射性废物分类》将放射性废物分为极短寿命放射性废物、极低水平放射性废物、低水平放射性

废物、中水平放射性废物和高水平放射性废物等五类，其中极短寿命放射性废物和极低水平放射性废物包含在低水平放射性废物范围内[8]。HDPE-HIC 主要用于装填废树脂等废物，核电厂正常运行产生的废树脂一般属于低水平放射性废物。表 1 为《放射性废物分类》中关于低水平放射性废物活度浓度的限值要求。

Table 1. Upper limits of activity concentration of low level radioactive wastes
表 1. 低水平放射性废物活度浓度上限值

放射性核素	半衰期	活度浓度(Bq/kg)
碳-14	5.73×10^3 a	1E+08
活化金属中的碳-14	5.73×10^3 a	5E+08
活化金属中的镍-59	7.50×10^4 a	1E+09
镍-63	96.0 a	1E+10
活化金属中的镍-63	96.0 a	5E+10
锶-90	29.1 a	1E+09
活化金属中的铈-94	2.03×10^4 a	1E+06
钨-99	2.13×10^5 a	1E+07
碘-129	1.57×10^7 a	1E+06
铯-137	30.0 a	1E+09
半衰期大于 5 年发射 α 粒子的超铀核素		4E+05 (平均) 4E+06 (单个废物包)

由于 HDPE-HIC 装填的废树脂包含不止一种放射性核素，《放射性废物分类》对于包含多种核素的废物限值计算方法也做了规定，即含多种人工放射性核素的废物，每种放射性核素的活度浓度与其对应活度浓度上限值的比值之和，应满足下列公式：

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i0}} \leq 1 \tag{1}$$

式中， C_i 为废物中第 i 种放射性核素的活度水平， C_{i0} 为第 i 种放射性核素的活度浓度上限值， n 是废物中放射性核素种类的数目。

满足上述条件的放射性废物可归类为低水平放射性废物。

3.2. HDPE-HIC 放射性分类的确定

以某核电 HDPE-HIC 装填的废树脂为例，主要核素为 Cs-137、Co-60、Mn-54，根据源项参数结合废物分类计算方法，对该电厂产生的衰变 5 年后的废树脂 HDPE-HIC 货包进行计算，分析结果如下：

1) 衰变 5 年后 HDPE-HIC 所含特征核素的比活度小于表 1 中的上限值。

2) 根据该核电厂源项，废树脂密度取 750 kg/m^3 ，年废树脂产生量约为 9.54 m^3 ，结合公式(1)计算，HDPE-HIC 所含多种核素比活度与其对应上限值的比值之和小于 1，如表 2 所示。

Table 2. Categorical calculations of radioactive wastes of HDPE-HIC
表 2. HDPE-HIC 放射性分类计算

核素	废树脂年放射量(Bq/a)	废树脂活度浓度(Bq/kg)	《放射性废物分类》中低放废物活度浓度限值(Bq/kg)	比值
Cs-137	5.61E+12	7.85E+08	1.00E+09	0.785
Mn-54	3.09E+10	4.32E+06	4.00E+11	<0.000
Co-60	2.72E+12	3.81E+08	4.00E+11	0.001
总计	1.57E+13	/	/	0.786

因此, 根据《放射性废物的分类》, 运行产生的 HDPE-HIC 判定为低水平放射性废物。

3.3. 放射性物品运输的规定

《放射性物品运输安全管理条例》根据放射性物品的特性及其对人体健康和环境的潜在危害程度, 将放射性物品分为一类、二类和三类[9]。HDPE-HIC 为低水平放射性废物, 按照分类属于三类放射性物品。《放射性物品运输安全管理条例》还明确了运输容器的设计、制造、使用以及物品的运输的监管要求。对于运输容器设计、试验等技术要求, 还需要通过《放射性物品安全运输规定》进一步分析。

4. 货包类别分析

4.1. 《放射性物品安全运输规定》的要求

《放射性物品安全运输规定》(GB11806-2019)对货包的分类进行了确定, 对于放射性核素的类别和各自放射性活度均为已知的含多种放射性核素的混合物的 A 型货包的放射性内容物应能满足下述关系式[10]:

$$\sum_i \frac{B(i)}{A_1(i)} + \sum_j \frac{C(j)}{A_2(j)} \leq 1 \quad (2)$$

式中:

$B(i)$ ——特殊形式放射性物品的放射性核素 i 的放射性活度;

$A_1(i)$ ——放射性核素 i 的 A_1 值;

$C(j)$ ——非特殊形式放射性物品的放射性核素 j 的放射性活度;

$A_2(j)$ ——放射性核素 j 的 A_2 值。

满足上述条件的盛放放射性物品的货包可归类为 A 类货包。

4.2. HDPE-HIC 货包类别的确定

以 HDPE-HIC 装填的废树脂为例, 主要核素为 Cs-137、Co-60、Mn-54, 核素衰变 5 年后的放射性核素活度与 A_1 的比值计算如表 3 所示, 其多种核素计算值求和后大于 1, 同时考虑 HDPE-HIC 不进行国际运输, 可以确定 HDPE-HIC 运输容器从货包分类上应为 B(U)类货包。

4.3. 《放射性物品和名录》的分析

《放射性物品和名录》将《放射性物品运输安全管理条例》中放射性物品的分类和《放射性物品安全运输规定》的货包分类进行了对应, 同时也明确放射性物品分类不改变货包分类及相关设计要求。《放

射性物品和名录》中将 B(U)类货包对应为一类或二类放射性物品[11], 但 HDPE-HIC 装填的废树脂属于低水平放射性废物, 属于三类放射性物品。由于 HDPE-HIC 属于相关较新的一种货包类型, 在规章制度中可能未对该货包做特别考虑。

Table 3. Calculations of activity concentration of HDPE-HIC
表 3. HDPE-HIC 放射性活度计算

序号	核素	5年后比活度 Bq/kg	活度值 TBq	A ₁ 值	B(i)/A ₁ (i)
1	Cs-137	8.23 × 10 ⁸	1.59	2	0.79
2	Co-60	3.99 × 10 ⁸	0.77	0.4	1.92
3	Mn-54	4.53 × 10 ⁶	0.009	1	0.01
				合计	2.72 > 1

5. 总结

(1) HDPE-HIC 作为一种新形式的货包, 在国内无相关外运经验, 需要结合我国法规标准, 针对 HDPE-HIC 做针对性分析, 以指导后续包装容器的设计。

(2) 根据《放射性废物分类》, 某核电正常运行产生的装填废树脂的 HDPE-HIC 属于低放射性废物。

(3) 结合《放射性物品运输安全管理条例》, 低水平放射性废物属于三类放射性物品, 运输容器的设计、制造、使用以及废物的运输需要满足三类放射性物品的监管要求。

(4) 根据《放射性物品安全运输规定》(GB11806-2019), 装填废树脂的 HDPE-HIC 货包为 B(U)型货包, 需满足规定的设计和试验要求。

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] 裴勇, 潘跃龙. 高整体容器在我国放射性废物管理中的应用分析[J]. 核动力工程, 2012, 33(3): 125-128.
- [2] 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.
- [3] 方祥洪, 耿忠林, 马若霞, 等. AP1000 核电厂固体放射性废物处理工艺研究[J]. 科技创新导报, 2016, 13(31): 52-53, 55.
- [4] 郑英杰. 基于有限元模拟的聚乙烯高整体容器的完整性评价[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2024.
- [5] 胡丽丽. 基于试验测试的聚乙烯高整体容器的安全性评估[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2016.
- [6] 周江, 蒲江, 李坤锋, 等. 中低放射性废物包装容器试验台架的研制[J]. 中国塑料, 2020, 34(11): 48-51.
- [7] 费国胜. 屏蔽转运容器与封装平台优化设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [8] 环境保护部, 工业和信息化部, 国家国防科技工业局. 关于发布《放射性废物分类》的公告: 公告 2017 年第 65 号[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171212_427756.htm, 2024-04-22.
- [9] 国务院. 放射性物品运输安全管理条例: 中华人民共和国国务院令 第 562 号[EB/OL]. https://www.gov.cn/zwgg/2009-09/22/content_1423508.htm, 2024-04-22.
- [10] 放射性物品安全运输规定. GB11806-2019. 放射性物品安全运输规定[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.
- [11] 环境保护部. 关于发布《放射性物品分类和名录》(试行)的公告: 公告 2010 年第 31 号[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201003/t20100324_187258.htm, 2024-04-22.