

Comparison and Analysis of AP1000 Nuclear Reactor Waste Treatment Technology in China

Desheng Kong, Bin Li, Ruoxia Ma, Zhonglin Geng

CPI Yuanda Environmental-Protection Engineering CO. LTD., Chongqing
Email: bin.li@yuandaep.com

Received: Apr. 7th, 2017; accepted: Apr. 21st, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

Zhejiang Sanmen nuclear power plant and Shandong Haiyang nuclear power plant adopt the third-generation nuclear reactor named AP1000 which is developed by the United States. They are the first companies to use the combined process which combine with the nuclear waste disposal system and a site radwaste treatment facility (SRTF). However, the two plants have some differences in their SRTF processes. This paper contrasts and analyzes the processes of the two SRTF. It has played a positive role for making a comprehensive research on the treatment technologies of AP1000 reactor site radwaste and forming of standard and systematic treatment technologies and equipment. And it has a positive effect on realizing the safety management of the AP1000 reactor site radwaste and implementing the principle of waste minimization.

Keywords

Nuclear Power, SRTF, Routing, Comparative Analysis

对我国AP1000核电离堆废物处理技术的对比分析

孔德生, 李 斌, 马若霞, 耿忠林

中电投远达环保工程有限公司, 重庆
Email: bin.li@yuandaep.com

收稿日期: 2017年4月7日; 录用日期: 2017年4月21日; 发布日期: 2017年4月30日

摘 要

浙江三门核电站和山东海阳核电站采用美国开发研究的AP1000堆型第三代核电机组, 首次采用了核岛

废物处理系统与厂址废物处理设施(SRTF)相结合的处理模式,但两厂址废物处理设施(SRTF)处理工艺上存在一定的差异,本文针对两厂址废物处理设施(SRTF)处理工艺进行了对比分析。综合研究AP1000离堆废物处理技术,形成规范化的、系列化的处理技术及装备,对实现AP1000核电厂离堆废物的安全管理、落实废物最小化原则发挥积极作用。

关键词

核电, SRTF, 工艺路线, 对比分析

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 概述

我国浙江三门核电厂和山东海阳核电厂采用美国开发研究的 AP1000 堆型第三代核电机组(电功率 1250 MW, 热功率 3415 MW), 首次采用了核岛废物处理系统与厂址废物处理设施(SRTF)相结合的处理模式, 并运用多项国外先进成熟工艺, 不仅简化了系统、设备, 也降低了核电厂的投资、运行及维护成本, 更重要的是降低了工作人员职业照射, 减少了厂外放射性释放, 保障了环境和公众安全, 也保障了电厂安全、经济、可靠、高效运行[1] [2] [3]。

厂址废物处理设施(SRTF)作为 AP1000 核电厂的 BOP 子项之一, 其作用是实现全厂范围内放射性固体废物的集中处理和暂存以及部分液体废物的处理。浙江三门核电厂和山东海阳核电厂的 SRTF 设施, 在工艺设计上体现出了其各自不同的特点。

2. 浙江三门核电厂 SRTF 概况

浙江三门核电厂 SRTF 由上海核工程研究设计院负责总体设计, 关键工艺设备由德国汉莎公司提供。SRTF 设计能够满足包容 6 个机组的废物处理和中间暂存的能力。

2.1. 源项

浙江三门核电 RTF 废物设计源项均按 AP1000 DCD17 版数据。主要废物包括: 一回路树脂(包括树脂和湿活性炭)、废过滤器芯、化学废液、0.25% 燃料包壳破裂冷却剂和蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的液体废物, 可压实干废物、不可压实固体废物、HVAC 废过滤器芯。根据源项每台机组每年产生废物总量为 163 m³, 经过 SRTF 整备处理后, 浙江三门核电的最终货包体积约为 50 m³, 满足国家的现行标准。

2.2. 主要设计功能及基准

- SRTF 具有处理 6 台机组运行产生的放射性废物;
- 处理来自于核岛的化学液体废物、燃料包壳破裂率为 0.25% 情况下的一回路冷却剂和蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的液体废物;
- 处理核岛产生的废过滤器芯和放射性废树脂;
- 运输和处理核岛及其他放射性厂房产生的放射性干、湿固体废物;
- 固体放射性废物的暂存依照 4 台机组 5 年产生的废物量设计;
- 工作服的检测和洗涤;

➤ SRTF 主要设备设计寿命为 60 年。

2.3. 处理工艺及技术路线

2.3.1. 工艺流程(图 1)

核岛侧超标废水采用移动式装置进行处理，处理后的水送回至核岛排放监测槽监测排放，移动式装置产生的浓缩液通过化学废水处理系统收集，送往水泥固化计量槽进行固化处理。

化学废液处理系统通过蒸发、桶内干燥工艺来处理核岛与 SRTF 内产生的化学废液。

过滤器滤芯处理系统通过直接灌浆的工艺来处理核岛内(化学和容积控制系统、乏燃料池冷却系统、放射性液体废物处理系统等)产生的过滤器滤芯与少量来自移动式处理系统的过滤器滤芯。

核岛与 SRTF 的暖通系统产生的 HVAC 过滤器滤芯或其它来源产生的干废物/混合废物通过预处理(如：分拣、切割)、干燥、超级压缩、灌浆等处理工艺来处理。

废树脂处理系统采用热态超级压缩的减容处理工艺[4]。废树脂通过接收、脱水、干燥、装桶(160 L 桶)完成预处理工序。随后，装满干燥废树脂的 160 L 桶送往减容主要工序，即超级压缩机进行超压处理。压缩饼经优化组合后装入 200 L 桶灌浆固定。

工作服采用洗涤烘干，洗衣废液采用监测排放。

2.3.2. 系统描述

浙江三门核电厂 SRTF 主要由过滤器芯处理系统、HVAC 过滤器滤芯/干废物/混合废物处理系统、废树脂处理系统、化学废液处理系统、移动式处理系统等主工艺系统以及与之配套的辅助系统组成，其各主工艺系统的主要功能如下：

1) 过滤器芯处理系统

过滤器芯处理系统用来处理核岛内产生的过滤器滤芯与少量来自移动式设备的过滤器滤芯。将过滤器芯装入 200 L 钢桶内，灌浆固定后送入暂存库内贮存。

2) HVAC 过滤器滤芯/干废物/混合废物处理系统

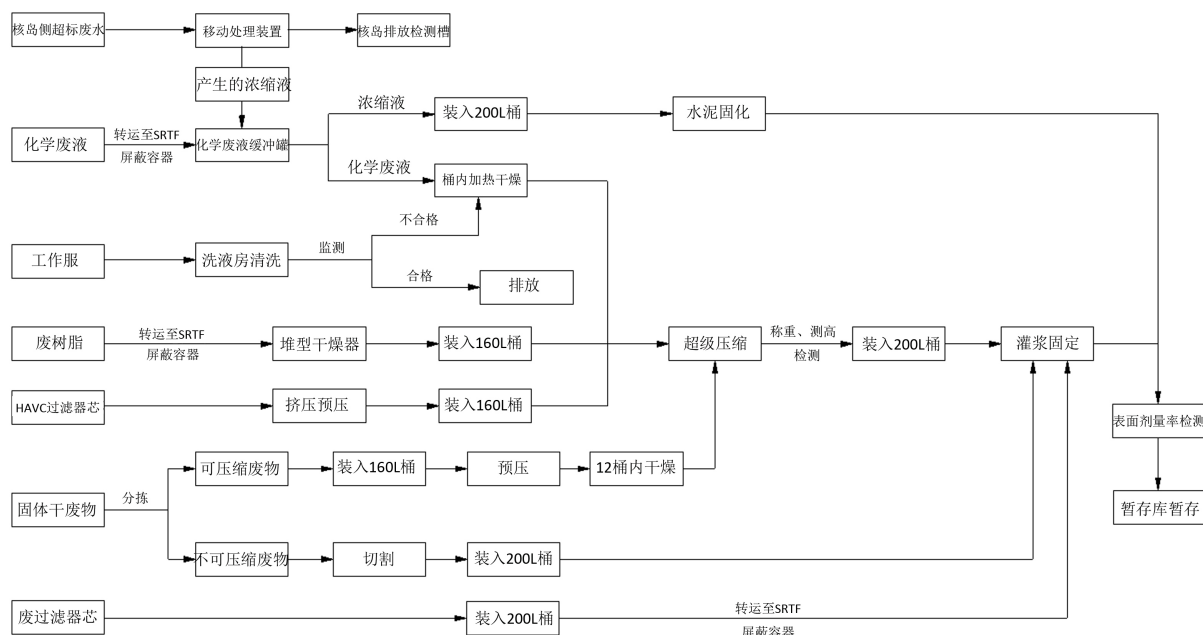


Figure 1. Process flow diagram of the three nuclear power SRTF

图 1. 三门核电 SRTF 工艺流程图

HVAC 过滤器滤芯/干废物/混合废物处理系统，通过预处理、烘干、超压、灌浆等处理工艺，处理核岛与 SRTF 产生的 HVAC 过滤器芯或其他来源产生的干废物/混合废物。

3) 废树脂处理系统

废树脂处理系统采用热态超级压缩的减容工艺。通过接收、除水、烘干、装桶(160 L 桶)完成预处理工序。装满烘干废树脂的 160 L 桶送往超级压缩机进行超压处理，超压饼经优化组合后装入 200 L 桶灌浆固定。

4) 化学废液处理系统

化学废液处理系统采用桶内干燥工艺来处理核岛与 SRTF 产生的化学废液。

5) 移动式处理系统

移动式处理系统主要用于处理 0.25%包壳破裂液体和蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)事故产生的废液，处理能力为 5 m³/hr，采用活性炭过滤、反渗透和离子交换的方法使处理后的液态流出物符合排放标准。移动式设备产生的浓缩液通过该系统收集，进行水泥固化处理。

3. 山东海阳核电厂 SRTF 概况

山东海阳核电厂 SRTF 由中电投远达环保工程有限公司 EP 总承包，关键工艺设备由美国 ES (Energy Solution)公司供货，其余设备由国内采购。SRTF 按满足 6 台 AP1000 核电机组同时运行的处理能力进行设计建造，并考虑满足 8 台机组的处理能力。

3.1. 源项

山东海阳核电厂 SRTF 废物设计源项均按 AP1000 DCD17 版数据。主要废物包括：一回路树脂(包括树脂和湿活性炭)、废过滤器芯、化学废液、0.25%燃料包壳破裂冷却剂和蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的液体废物,可压实干废物、不可压实固体废物、HVAC 废过滤器芯。根据源项每台机组每年产生废物总量为 163 m³，经过 SRTF 整备处理后，山东海阳核电厂的最终货包体积约为 50 m³，满足国家的现行标准。

3.2. 主要设计功能及基准

- SRTF 具有处理 6 台机组运行产生的放射性废物，并留有扩展 8 台机组处理能力；
- 处理来自核岛的化学液体废物、燃料包壳破裂率为 0.25%情况下的一回路冷却剂和蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的液体废物；
- 处理核岛产生的废过滤器芯和放射性废树脂；
- 运输和处理核岛及其他放射性厂房产生的放射性干、湿固体废物；
- 收集和处理 SRTF 产生的废物(包括放射性超标废液的处理)；
- 固体放射性废物的暂存依照 8 台机组 5 年产生的废物量设计；
- 工作服的检测和洗涤。洗衣房的能力依据 2 台机组换料大修，6 台机组正常运行原则设计；
- SRTF 主要设备设计寿命为 60 年；

3.3. 处理工艺及技术路线

3.3.1. 工艺流程(图 2)

核岛侧超标废水以及化学废液采用移动式装置进行处理，处理后的水送回至核岛排放监测槽监测排放。废树脂和废水过滤器滤芯过滤器和废树脂采用直接装 HIC 后进行脱水处理，脱水后的游离水小于 1%，再经表面剂量检测后送暂存库暂存。

HVAC 过滤器滤芯/干废物/混合废物系统通过预处理(如：分拣、预压)、超级压缩、灌浆等处理。

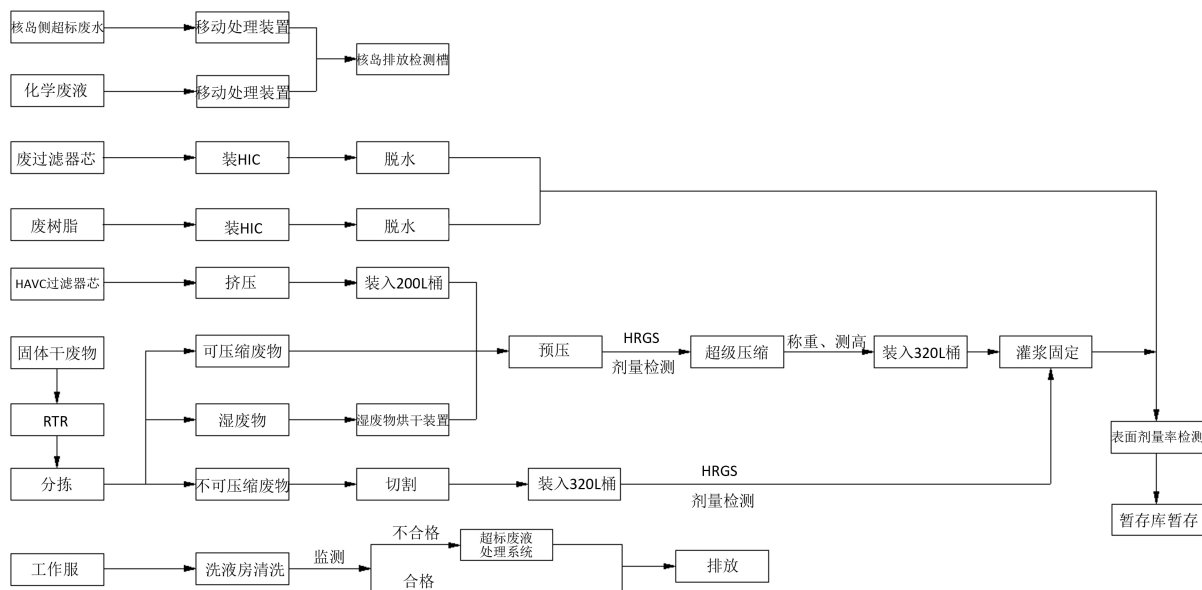


Figure 2. Haiyang nuclear power SRTF process flow chart
图 2. 海阳核电 SRTF 工艺流程图

工作服采用洗涤烘干，洗衣废液采用监测排放处理。

3.3.2. 系统描述

山东海阳 SRTF 主要由化学废液处理系统、0.25%包壳破裂液体处理系统、SGTR 液体处理系统、HIC 装料和脱水系统、分拣和压缩系统等主工艺系统组成以及与之配套的辅助系统组成，其各主工艺系统的功能如下：

1) 化学废液处理系统

化学废液采用移动式处理装置处理，处理能力为 1.14 m³/hr，其工艺采用化学絮凝和离子交换的方法使处理后的液态流出物符合排放标准。

2) 0.25%包壳破裂液体处理系统

0.25%包壳破裂液体移动式处理装置处理，处理能力为 1.14 m³/hr，其作用是处理 0.25%燃料包壳破损产生的废液，采用化学絮凝和离子交换的方法使处理后的液态流出物符合排放标准。该设施在 SRTF 中存放和检修。系统与 SGTR 液体处理系统串联使用，SGTR 液体处理系统是对经前级系统处理后的 0.25%包壳破损废液的流出液作净化处理。

3) SGTR 液体处理系统

SGTR 液体处理系统是移动式处理设施，可以对 0.25%包壳破裂液体处理系统处理后的废液作净化处理，也可用于处理蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)事故产生的废液，处理能力为 4.54 m³/hr，采用化学絮凝和离子交换的方法使处理后的液态流出物符合排放标准。该设施在 SRTF 中存放和检修。

4) HIC 装料和脱水系统

HIC 装料和脱水系统可将废树脂从核岛一回路系统废树脂传输到 HIC，也可将 NPP 废过滤器放入 HIC。加料过程完成后，连接到 HIC 内部的过滤系统为树脂或过滤器脱水。

5) 分拣和压缩系统

分拣和压缩系统的功能如下：

用于接收和处理从核电站产生的放射性固体废物；

用非破坏性检验方法目视检查桶内废物，确认是否有违禁物品或不能减容的物品；

预压实(如需要)前分拣桶内废物；

灌浆前对废物的同位素分析；

通过超压减容(适用于可压实废物)；

将超压桶(饼块)装入外包装桶；

废物桶在操作单元间的转运；

超压后的废物桶或不能压缩的废物桶灌浆。

该系统的设计可用来处理 6 台机组产生的放射性废物，并具有 8 台机组产生的放射性废物处理能力。

4. 对比分析

4.1. 源项

浙江三门核电与山东海阳核电 SRTF 废物设计源项均按 AP1000 DCD17 版数据。废物种类和数量一致，经过 SRTF 整备处理后最终货包体积约为 50 m³，均满足国家的现行标准。

4.2. 主要设计功能及基准

浙江三门核电与山东海阳 SRTF 主要设计功能及基准基本一致，但山东海阳核电 SRTF 具有处理 6 台机组运行产生的放射性废物，并留有扩展 8 台机组处理能力，浙江三门核电 SRTF 具有处理 6 台机组运行产生的放射性废物。

4.3. 处理工艺对比

浙江三门核电与山东海阳核电 SRTF 处理工艺如下表 1。

从上表可知可压实干废物、不可压实固体废物以及 HVAC 废过滤器芯三种废物，浙江三门核电与山东海阳核电 SRTF 的处理工艺基本一致；0.25%包壳破损冷却剂、蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的废液、化学废液、废树脂(包括树脂和湿活性炭)以及废过滤器芯的处理工艺存在一定的差异。

4.3.1. 处理工艺相同部分

可压实废物两电厂 SRTF 均采用了分拣、烘干、预压、超压、灌浆固定的处理工艺；不可压实废物采用切割、直接灌浆固定的处理工艺；HVAC 过滤器芯采用挤压、预压、超压、灌浆固定的处理工艺。但山东海阳核电采用 200 L 钢桶收集，压饼装入 320 L 钢桶灌浆固定，三门核电采用 160 L 钢桶收集，压饼装入 200 L 钢桶灌浆固定。

4.3.2. 处理工艺不同部分

1) 废树脂(包括树脂和湿活性炭)

浙江三门核电采用热态超级压缩处理工艺，山东海阳核电采用直接装入 HIC (高整体容器)的处理工艺，比较分析见表 2。

以上两种工艺均为物理方法，相对于传统的水泥固化均有一定的减容效果，但从废物最小化和处置因素考虑，在后续建造的废物处理设施中，废树脂的处理工艺可以采用减容因子更大，最终货包物性更为稳定的工艺，如湿法氧化、蒸汽重整等。

2) 化学废液

浙江三门核电将化学废液转运至 SRTF 厂房采用桶内干燥+压缩固定工艺进行处理，山东海阳核电通过移动式处理装置采用化学注入、深床过滤、离子交换工艺进行处理，比较分析见表 3。

Table 1. Comparative analysis table
表 1. 对比分析表

序号	废物名称	产生(收集)区域	浙江三门核电 SRTF 处理工艺	山东海阳核电 SRTF 处理工艺
1	0.25%包壳破损冷却剂	核岛	移动式处理装置 (机械过滤、活性炭过滤、反渗透、离子交换)	移动式处理装置 (先进注入、活性炭过滤、离子交换)
2	蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的废液	常规岛	移动式处理装置 (机械过滤、活性炭过滤、反渗透、离子交换)	移动式处理装置 (先进注入、活性炭过滤、离子交换)
3	化学废液	核岛	桶内干燥	移动式处理装置 (先进注入、活性炭过滤、离子交换)
4	废树脂 (包括树脂和湿活性炭)	核岛、移动式处理车	锥型烘干	直接装 HIC
5	废过滤器芯	核岛	水泥固定	直接装 HIC
6	可压实干废物	核岛	预压、超压、灌浆固定	预压、超压、灌浆固定
7	不可压实固体废物	核岛	灌浆固定	灌浆固定
8	HVAC 废过滤器芯	核岛	挤压、预压、超压、灌浆固定	挤压、预压、超压、灌浆固定
9	浓缩液	移动式处理车	水泥固化	无

Table 2. Comparison of waste resin treatment process
表 2. 废树脂处理工艺对比分析表

序号	内容	浙江三门核电	山东海阳核电
1	工艺流程	核岛侧废树脂→屏蔽转运→缓冲罐→计量罐→ 锥型干燥器→装桶→超压→装桶→灌浆固定→暂存	核岛侧废树脂→装 HIC (高整体容器)→脱水→屏蔽转运→暂存
2	工艺说明	核岛侧废树脂通过屏蔽转运车转运至 SRTF 厂房、脱水、 烘干、装桶(160 L)完成预处理工序,送超级压缩机进行 超压处理。压饼装入 200 L 包装桶进行灌浆固定。 在干燥的过程中,为防止树脂反弹,加入 25% 添加剂。	核岛侧废树脂装桶接收、脱水(含水率小于 1%), 屏蔽容器转运到 SRTF 暂存库进行暂存。
3	主要设备	屏蔽转运容器 2 个、锥型干燥器 1 台、缓冲罐 2 个、计量罐 2 个、 添加剂计量装置 2 套,灌浆系统,160 L 和 200 L 钢桶。	脱水头 1 套、屏蔽转运 容器 1 个、HIC 容器
4	特点	相对水泥固化工艺有一定的减容效果;但工艺相对复杂、 系统设备多,操作维护难度较大;处理后的包装体不满足 近地表处置要求,在处置时需加装高整体容器。	相对水泥固化工艺有一定的减容 效果,工艺简单,操作维护简便。

Table 3. Comparison of chemical waste treatment process
表 3. 化学废液处理工艺对比分析表

序号	内容	浙江三门核电	山东海阳核电
1	工艺流程	核岛侧化学废液→屏蔽转运→SRTF 化学废液缓冲罐 →桶内干燥装置→超压→装桶→灌浆固定→暂存	核岛侧化学废液→移动式处理装置净化处理
2	工艺说明	核岛侧化学废液通过屏蔽转运车转运至 SRTF 化学废液 缓冲罐,经过桶内干燥处理后形成盐块,送超级压缩机 进行超压处理,压饼装入 200L 包装桶进行灌浆固定。	该工艺为移动式处理装置处理工艺,主要包括先进 化学注入、深床过滤和离子交换的组合,以去除化学 废液中含有放射性核素的颗粒物、悬浮物和离子。
3	主要设备	屏蔽转运容器 1 个、化学废液缓冲罐 1 个、 桶内干燥装置 2 套、灌浆系统、160L 和 200L 钢桶。	移动式处理装置 1 套
4	特点	该工艺减容效果好,为热态处理,能耗相对较高,处理后的 包装体不满足近地表处置要求,在处置时需加装高整体容器。	该工艺减容效果好,为冷态处理, 能耗低。可移动,处理地点灵活。

3) 0.25%包壳破裂废液和蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的废液

浙江三门核电和山东海阳核电均采用移动式处理装置,浙江三门核电的移动装置处理工艺为深床过

Table 4. Comparative analysis of waste treatment processes resulting from 0.25% cladding rupture waste and steam generator pipe rupture (SGTR)**表 4.** 0.25%包壳破裂废液和蒸汽发生器管道破裂(SGTR)产生的废液处理工艺对比分析表

序号	内容	浙江三门核电	山东海阳核电
1	工艺流程	核岛侧 0.25%包壳破裂废液和 SGTR 废液→移动式处理装置净化处理	核岛侧 0.25%包壳破裂废液和 SGTR 废液→移动式处理装置净化处理
2	工艺说明	该工艺主要包括机械过滤、活性炭吸附、R/O膜(反渗透)和离子交换的组合,以去除混合废液中含有放射性核素的颗粒物、悬浮物和离子。该装置设有反渗透单元,在处理过程中会产生浓缩液,产生的浓缩液送到 SRTF 进行水泥固化。	该工艺主要包括先进化学注入、深床过滤和离子交换的组合,以去除化学废液中含有放射性核素的颗粒物、悬浮物和离子。
3	主要设备	移动式处理车 1 套、固化站	移动式处理车 2 套
4	特点	产生浓缩液,需进行固化处理。	不产生浓缩液,二次废物处理简单。

Table 5. Waste water filter core treatment process comparison analysis table**表 5.** 废水过滤器芯处理工艺对比分析表

序号	内容	浙江三门核电	山东海阳核电
1	工艺流程	核岛侧废过滤器芯→装桶→屏蔽转运→灌浆固定→暂存	核岛侧过滤器芯→装 HIC (高整体容器)→脱水→屏蔽转运→暂存
2	工艺说明	装 200L 桶后,用屏蔽容器转运到 SRTF 进行灌浆固定。	核岛侧废过滤器芯装桶接收、脱水(含水率小于 1%),屏蔽容器转运到 SRTF 暂存库进行暂存。
3	主要设备	屏蔽转运容器 1 个,灌浆系统, 200L 桶。	脱水头 1 套、屏蔽转运容器 1 个、HIC 容器
4	特点	工艺简单、固定体较稳定,但整备后的增容体积较大,处理后的包装体不满足近地表处置要求,在处置时需加装高整体容器。	工艺简单,运行维护方便,包装体完全满足处置场接收要求。

滤 + 反渗透 + 离子交换,山东海阳核电的处理工艺为深床过滤+离子交换。山东海阳核电移动式处理装置只产生废树脂和活性炭二次废物,不产生浓缩液,其处理方式与核岛侧的方式一致;而浙江三门核电移动式处理装置由于多了反渗透单元,其装置除产生废树脂和活性炭外,还将产生一定量的浓缩液,需进一步处理。比较分析见表 4。

4) 废水过滤器芯

浙江三门核电采用灌浆固定工艺,山东海阳核电采用直接装入 HIC (高整体容器)的处理工艺,比较分析见表 5。

5. 结束语

综上所述,浙江三门核电与山东海阳核电在废物的源项、设计功能以及整备处理后的包装废物量基本一致,但部分废物的处理工艺存在一定的差异,主要是废树脂、化学废液、废水过滤器芯以及 0.25%包壳破裂废液和 SGTR 废液,总体来讲双方工艺技术上各有特点,均采用较为先进的处理工艺,但浙江三门核电 SRTF 处理工艺相对复杂,设备较多。

AP1000 核电机组作为国家核电自主化依托课题予以重点发展的第三代先进的压水堆型,对国家的经济发展有着积极的作用。采用安全可靠的方法对 AP1000 核电机组离堆废物进行处理(整备)、贮存,完善废物的管理措施,将对 AP1000 核电技术的发展产生积极影响。综合研究 AP1000 离堆废物处理技术,形成规范化的、系列化的处理技术及装备,实现 AP1000 核电厂离堆废物的安全管理、落实废物最小化原

则发挥积极作用。

参考文献 (References)

- [1] 顾军. AP1000 核电厂系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2010: 4.
- [2] 林诚格. 非能动安全先进核电厂 AP1000[M]. 北京: 原子能出版社, 2008: 8.
- [3] 杨洋. 浅谈 AP1000 核电厂放射性废物处理[J]. 核电运行与维护, 2006 (3): 6.
- [4] 陈斌. 核电厂低中放废树脂处理工艺[J]. 辐射防护通讯, 2010, 30(1): 13-16.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: nst@hanspub.org