

# Radioactive Waste Treatment Technology of Marine Nuclear Power Platform

Li Mao

SPIC Yuanda Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Chongqing  
Email: icelily53@163.com

Received: May 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jun. 11<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 18<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The marine nuclear power platform is an energy supply platform with nuclear energy as the primary energy, among which, the marine nuclear power device is the "heart" of the marine nuclear power platform, and is the energy source for the output of external electricity or fresh water or for the navigation of ships. During normal operation, expected operational events and maintenance, marine nuclear power plants will produce radioactive gas waste, liquid waste and solid waste. Analyzed the source term characteristics of all kinds of radioactive waste of a marine nuclear power platform demonstration project, and combining with existing mainstream treatment process technology of radioactive waste in nuclear power plants on land were analyzed, determine the applicable radioactive waste treatment technology of all kinds of radioactive wastes for marine nuclear power platform, and put forward the specific development and test requirements for key equipments. It played a positive role for promoting the formation of standardized, serialized treatment process technology and equipment, promoting radioactive waste safety management of marine nuclear power platform and carrying out the radioactive waste minimization principle.

## Keywords

Marine Nuclear Power Platform, Radioactive Waste, Treatment Process, Decontamination Factor, Volume Reduction Factor

---

# 海洋核动力平台放射性废物处理工艺技术

毛莉

国家电投集团远达环保工程有限公司, 重庆  
Email: icelily53@163.com

收稿日期: 2020年5月25日; 录用日期: 2020年6月11日; 发布日期: 2020年6月18日

## 摘要

海洋核动力平台是以核能作为一次能源的能源供应平台,其中,海洋核动力装置是海洋核动力平台的“心脏”,是产生用于对外电力或淡水输出或作为动力推进船舶航行的能量源泉。海洋核动力装置在正常运行、预期运行事件和维修期间会产生带放射性的废气、废液及固体废物。分析了海洋核动力平台示范工程各类放射性废物的源项特征,并结合陆上核电站放射性废物现有主流处理工艺进行对比分析,确定了适用于海洋核动力平台各类放射性废物处理的工艺技术,并对所需关键设备的研制和试验提出了具体要求,为促进形成规范化、系列化的处理技术及装备,推动海洋核动力平台放射性废物安全管理、落实废物最小化原则发挥了积极作用。

## 关键词

海洋核动力平台,放射性废物,处理工艺,去污因子,减容因子

Copyright © 2020 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

海洋核动力平台又称海上浮动核电站,是船与核的有机结合,可对外持续提供电力、淡水等能源保障,具有机动性好、一次装料运行周期长、功率密度大、节能环保等特点,在海洋资源开发、岛礁建设的若干能源保障方案中具有明显优势,是未来船舶发展的重要方向[1]。

针对我国海洋核动力平台的建造需求,有必要开展平台放射性废物处理工艺技术的研究。目前为止,国内尚无适用于海洋核动力平台放射性废物处理技术的相关经验,也无现成的可用于船用环境条件的放射性废物处理成套设备供应商。需要借鉴陆上核电站放射性废物处理的成熟经验并结合海洋核动力平台的自身特点,研究确定出适用于海洋核动力平台的放射性废物处理工艺技术。

## 2. 概况

### 2.1. 放射性废物处理系统概述

本海洋核动力平台示范工程平台长期系泊运行于特定海域,平台采用双堆并排运行,总热功率 $2 \times 100$  WM,单堆换料周期18个月,其放射性废物处理系统用于对平台正常运行、预期运行事件和维修期间产生的放射性废物进行收集、处理和暂存,使放射性废物始终处于可控状态,不对平台工作人员和外部海洋环境造成不利影响。在满足平台安全和核安全要求的前提下,尽量简化废物处理工艺系统。

放射性废物处理系统包含三个主工艺系统,即放射性废气处理系统、放射性废液处理系统和放射性固体废物处理系统。

### 2.2. 废物源项

平台双堆运行一个周期的放射性废气、废液及固体废物源项如表1所示,其中放射性废液共计 $263 \text{ m}^3$ ,放射性固体废物共计 $19.5 \text{ m}^3$ 。

**Table 1.** Expected estimated production of radioactive waste  
**表 1.** 放射性废物预期产生量估计

类别	来源	产生量	备注
放射性废气			
安全壳排风(含氧废气)	安全壳	3600 m <sup>3</sup> /h	检修时排风
反应堆舱排风(含氧废气)	堆舱	9000 m <sup>3</sup> /h	连续排风
核辅设备舱负压排气(含氧废气)	核辅设备舱	9000 m <sup>3</sup> /h	连续排气
卸压箱排气(含氢废气)	安全壳卸压箱	3.6 m <sup>3</sup> /次	3 次/周期
放射性废液			
工艺废液	一回路各系统运行、取样、检修等过程	120.4 m <sup>3</sup>	平均活度浓度: 6.8E+06 Bq/L
化学废液	化学分析、去污、检修等过程	88.8 m <sup>3</sup>	平均活度浓度: 6.0E+05 Bq/L
舱底废液	调试、检修、去污、安全壳泄漏等过程	53.8 m <sup>3</sup>	平均活度浓度: 6.8E+06 Bq/L
放射性固体废物			
可压缩废物	洗消室监测区	6.5 m <sup>3</sup>	极低放
不可压缩废物	检修零部件、管路附件、维修工具	2.0 m <sup>3</sup>	极低放
HVAC 过滤器芯	空气净化处理机组	3.7 m <sup>3</sup>	低放
废树脂/废活性炭	一回路、乏燃料水池净化系统、放射性	4.5 m <sup>3</sup>	中放
废水过滤器芯	废液处理系统	0.1 m <sup>3</sup>	中放
盐饼	放射性废液处理系统桶内干燥装置	2.6 m <sup>3</sup>	中放

### 3. 放射性废物处理工艺

放射性废物处理工艺系统按照三代核电的要求, 尽量选用成熟、可靠、安全的工艺技术和设备装置, 确保辐射安全[2]。本示范工程放射性废物处理系统主要布置于平台核辅设备舱不同标高的舱室内, 最终形成的废物包通过转运船定期转运至陆上废物处理中心。

#### 3.1. 放射性废气处理工艺

放射性废气处理系统用于处理由安全壳排风、反应堆舱排风、核辅设备舱负压排气、卸压箱排气在平台正常运行和预期运行事件中产生的放射性含氧废气和含氢废气。

陆上核电站对于含氢废气的处理工艺主要有活性炭吸附滞留衰变和压缩贮存衰变两种方式。API000 核电站放射性气体废物处理系统采用的是常温活性炭吸附滞留衰变处理工艺; M310 核电站常采用压缩贮存衰变处理工艺, 其中包括大亚湾、秦山二期、岭澳一期、岭澳二期、红沿河以及宁德等核电站[3] [4]。活性炭吸附滞留衰变工艺具有非能动及选择性吸附的优点, 通过活性炭对放射性核素的连续吸附与解析平衡保证短寿命核素的充分衰变, 但从国外引进该处理技术时未将在滞留衰变中起关键作用的活性炭实现国产化, 阻碍了该技术在国内的广泛应用[5]。

压缩贮存衰变工艺简单易行, 成熟可靠, 已在多个核电站中得到运用, 但其需要隔膜压缩机等能动设备, 在设计中需要充分考虑设备故障问题, 可通过设置备用设备满足系统可用率要求。鉴于上述原因, 本示范工程含氢废气采用压缩贮存衰变处理工艺。对于含氧废气, 各核电站普遍采用过滤和除碘的处理工艺, 该工艺同样适用于本示范工程(图 1)。

放射性废气处理系统将不同来源的放射性废气进行分类收集，其中安全壳卸压箱排气首先进入缓冲箱，再经隔膜压缩机送至衰变箱，存储衰变 60 天，以降低废气的放射性水平，之后进入碘吸附净化机组进一步处理。核辅设备舱负压排风、安全壳排风及反应堆舱排风经碘吸附净化机组处理后排放。碘吸附净化机组过滤效率大于 99.99%，经处理后废气满足 GB6249《核动力厂环境辐射防护规定》中气载放射性流出物的排放要求。放射性废气处理工艺流程如图 1 所示，主要设备包括缓冲箱、隔膜压缩机、衰变箱、碘吸附净化机组、风机等。

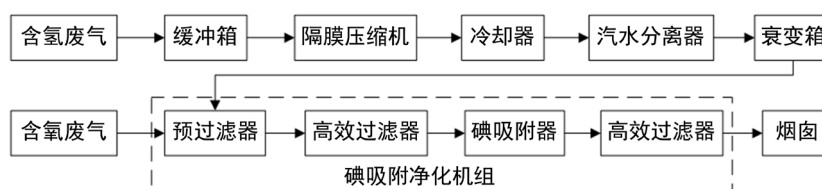


Figure 1. Process flow chart of radioactive gas waste treatment

图 1. 放射性废气处理工艺流程图

### 3.2. 放射性废液处理工艺

平台需要处理的放射性废液分为工艺废液、化学废液和舱底废液三类。陆上核电站对工艺废液通常采用离子交换或蒸发工艺处理，对化学废液和杂项废液通常采用蒸发工艺处理。离子交换工艺无能耗、系统简单、处理效率高，但对进水水质和预处理的要求较高，会产生离子交换树脂二次废物，废液预处理设备还会产生废水过滤器芯和活性炭等二次废物。离子交换树脂和活性炭等二次废物在平台上需要较大的暂存空间且二次废物从产生设备至中间贮存设备以及从中间贮存设备至废物转运船的转运过程较复杂，涉及的转运设备较多。

另外，由于平台舱室空间限制，核辅设备舱舱室层高较矮，对各类处理设备及转运设备的外形尺寸和操作空间要求严格，因此需要根据平台的结构特点尽可能选择对废液性质适用性强、系统集成度及可靠性高、设备数量少、外形尺寸小及二次废物少的处理工艺和设备。

蒸发工艺适用性强，其中以热泵蒸发+桶内干燥为代表的处理工艺具有去污系数高、整体结构紧凑、占用空间小、能适应工艺废液、化学废液和舱底废液等各种水质条件且处理过程不产生新的废物等特点。国内三门、田湾核电站已采用此技术[6][7]，成熟度高、减容比高，可行性高，适用于本示范工程放射性废液的处理。目前，热泵蒸发和桶内干燥装置国产化程度和能力尚不足，其可靠性仍依赖于进口设备。所选热泵蒸发装置处理能力 250 L/h，去污因子 $\geq 10^5$ ，经处理后废液放射性活度浓度小于 100 Bq/L，满足 GB14587《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》的相关规定。考虑到蒸发装置故障时蒸发冷凝液的放射性活度浓度可能超过排放标准，因此设计一套离子交换装置作为超标冷凝液的备用处理手段。

工艺废液、化学废液、舱底废液通过收集分别进入工艺废液罐、化学废液罐和舱底废液罐中，暂存衰变 50 天后再将各类废液送至热泵蒸发装置进行蒸发处理，蒸发冷凝液进入冷凝液箱，经检测放射性活度浓度满足排放管理限值后排入监测排放槽。

蒸残液进入蒸残液箱，之后送至桶内干燥装置进一步烘干形成盐饼，桶内干燥装置烘干速率为 4 L/h，盐饼含水量 $\leq 1\%$ ，热泵蒸发 + 桶内干燥工艺综合减容因子可达 75。监测排放槽中废液经放射性检测满足排放要求后，通过转运船送至指定海域排放。

放射性废液处理工艺流程如图 2 所示，主要设备包括工艺废液罐，化学废液罐、舱底废液罐、给料箱、蒸发装置、冷凝液箱、蒸残液箱、桶内干燥装置、监测排放槽、疏水箱、废液转运泵、化学试剂添加装置等。

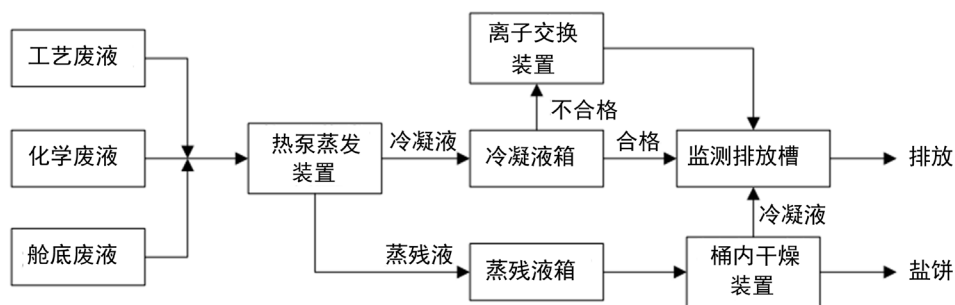


Figure 2. Process flow chart of radioactive liquid waste treatment  
图 2. 放射性废液处理工艺流程图

### 3.3. 放射性固体废物处理工艺

放射性固体废物处理系统需处理的放射性固体废物总量尽可能限制在  $19.5 \text{ m}^3$ /周期, 平台对废物包的暂存能力至少 18 个月, 废物包装容器采用 200L、400L 钢桶以及球墨铸铁高完整性容器(HIC)等满足国家相关标准规范要求的标准容器。

陆上核电站对放射性固体废物的处理工艺多为分拣 - 预压 - 高分辨率伽玛射线谱仪(HRGS)核素分析 - 超级压缩 - 灌浆固定, 该处理工艺是各核电站固体废物处理的主流减容工艺, 技术成熟、应用广泛[8]。

鉴于受平台空间限制, 无法布置体积庞大、系统复杂的超级压缩及水泥灌浆系统, 因此在平台上仅对可压缩废物、HVAC 过滤器芯做初步减容处理后暂存; 对废树脂/活性炭、水过滤器芯进行收集和暂存。各类固体废物最终通过转运船送至陆上废物处理中心进行后续处理。

#### 3.3.1. 可压缩/不可压缩废物的处理

利用湿废物烘干装置对湿废物进行烘干, 烘干后作为可压缩废物处理。将装有可压缩废物的 200L 钢桶送至分拣及桶内压实机进行分拣和压实, 直至 200L 钢桶装填率达到 90% 左右, 分拣及桶内压实机压力  $8\sim 20 \text{ t}$ , 减容因子  $\geq 2$ 。不可压缩废物直接装入 400L 钢桶。通过液压推车将 200L、400L 钢桶运至核辅设备舱废物桶暂存区暂存。

#### 3.3.2. HVAC 过滤器芯的处理

HVAC 过滤器芯取出后, 放入塑料袋中, 运送至过滤器芯挤压机进行挤压, 挤压后装入 200L 钢桶, 送至桶内压实机进一步压实后送至废物桶暂存区暂存。

#### 3.3.3. 废树脂/活性炭的处理

废树脂/活性炭从产生设备通过除盐水输送至废树脂贮存槽暂存衰变, 待外部转运时, 将废树脂/活性炭从废树脂贮存槽送至树脂屏蔽转运容器中, 树脂屏蔽转运容器有效容积  $1 \text{ m}^3$ , 待需进行树脂转运时, 由转运船运送至平台使用, 使用后通过转运船送至陆上废物处理中心进行后续处理。

#### 3.3.4. 废水过滤器芯

利用滤芯屏蔽转运装置将废水过滤器芯从水过滤器中取出, 放置于滤芯搁架中进行沥干处理, 待外部转运时, 将滤芯从搁架中取出放入滤芯屏蔽容器中, 通过转运船运至陆上三废处理中心进行后续处理。

#### 3.3.5. 盐饼的处理

经桶内干燥装置处理后形成的装有盐饼的 200L 钢桶经封盖后, 通过自动吊装装置放入球墨铸铁 HIC 中, 利用电动小车将球墨铸铁 HIC 送至废物桶暂存区暂存。

放射性固体废物处理工艺流程如图3所示,主要设备包括湿废物烘干装置、分拣及桶内压实机、HVAC过滤器芯挤压机、废树脂贮存槽、树脂转运泵、树脂屏蔽转运容器、滤芯屏蔽转运装置、滤芯屏蔽容器、电动小车等。

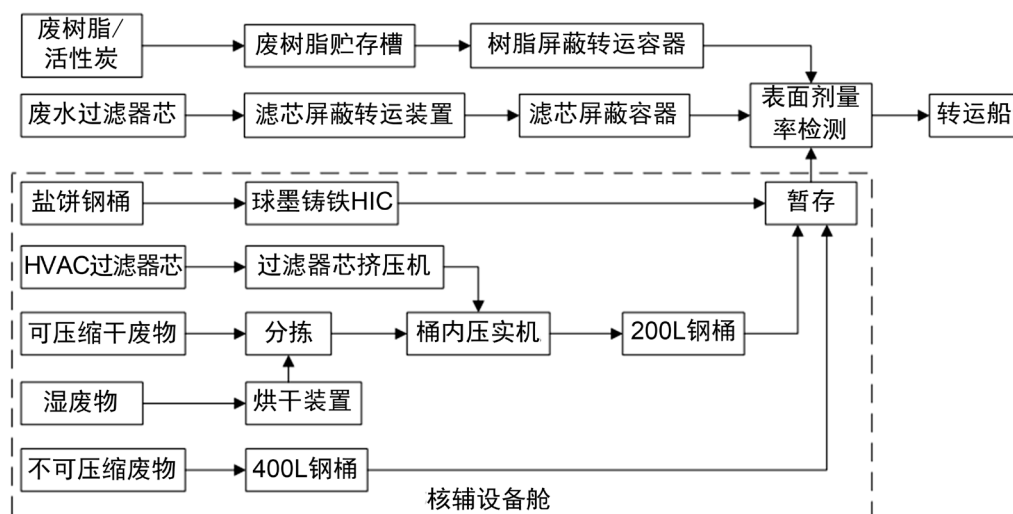


Figure 3. Process flow chart of radioactive solid waste treatment  
图3. 放射性固体废物处理工艺流程图

### 3.3.6. 废物包数量

正常运行工况下,海洋核动力平台一个运行周期产生的放射性固体废物包数量为:200 L 钢桶 38 个;400 L 钢桶 7 个;球磨铸铁 HIC16 个;共计 61 个。

## 4. 关键设备研制和试验

放射性废物处理系统主要设备均为成熟可靠设备,在陆上核电站已有成熟运行经验,但该类设备若用于船用环境条件,需要在设备的机械结构、内部构造、外形尺寸、安装方式、材质选择等设计上充分考虑船体倾斜、摇摆、冲击和振动等因素,尽量减小船用环境条件对设备功能的影响,提高设备的可用率和可靠性。

关键设备如热泵蒸发装置、桶内干燥装置、分拣及桶内压实机、HVAC 过滤器芯挤压机、滤芯屏蔽转运装置等均需在现有成熟产品的基础上进行适应性改造,并模拟船用条件进行性能试验和抗震抗冲击等试验,充分验证船用环境条件下设备的安全性、可用率和可靠性。

目前国内尚无现成的可用于船用环境条件的放射性废物处理成套设备供应商,在海洋核动力平台示范工程落地过程中需要加强与现有各成熟设备供应商之间的合作交流,充分认识运行过程中可能出现的外部环境事件,通过联合研制或进行适应性改造等方式研制出满足平台使用环境要求的设备。

## 5. 结论

建造核动力船舶是我国船舶行业对国家核能发展战略的积极响应,满足可持续发展的需求。根据海洋核动力平台各类放射性废物的源项特征,并借鉴陆上核电站放射性废物处理的相关标准和成熟处理技术,对比分析各类废物处理工艺在船用环境条件下的适用性,确定了适用于海洋核动力平台的放射性废物处理工艺。对关键设备提出了进行船用环境适应性改造的要求,以保证放射性废物处理系统的安全、可靠运行。

## 参考文献

- [1] 马强, 石磊, 陈慧玲, 等. 涉核建造安全保障标准规范在船舶行业的应用浅析[J]. 船舶标准化与质量, 2018(3): 2-9.
- [2] 王钰, 陈力生, 蔡琦, 等. 海上小型核动力厂设计中若干安全问题[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(30): 9-15.
- [3] 李永国, 张计荣, 梁飞, 等. 不同堆型核电站放射性废气处理系统工艺流程差异分析[J]. 环境工程, 2015(33): 424-426.
- [4] 祝杰, 李文钰, 陈先林, 等. 浅谈核电放射性废气净化技术[J]. 广东化工, 2016, 43(20): 124-126.
- [5] 倪依雨, 王鑫, 谈遗海, 等. 核电厂放射性废气处理系统专用活性炭的性能研究[J]. 核安全, 2014, 13(3): 73-77.
- [6] 余达万, 徐宏明, 周辰昊, 等. 秦山核电基地放射性废物最小化技术实践与探讨[J]. 辐射防护, 2019, 39(3): 213-220.
- [7] 靳海睿. 三门核电厂放射性废物处理工艺[J]. 辐射防护通讯, 2015, 35(2): 1-6.
- [8] 孔德生, 李斌, 马若霞, 等. 对我国 AP1000 核电离堆废物处理技术的对比分析[J]. 核科学与技术, 2017, 5(2): 94-102.