

内陆 AP1000 放射性废液处理工艺改进分析

李元, 林建中, 汤东升

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广州 510663)

摘要: 为满足内陆核电厂放射性废液排放标准, 在分析 AP1000 放射性废液来源和放射性废液处理系统的基础上, 结合目前国内外成熟的放射性废液处理工艺, 提出了“絮凝沉淀 + 过滤 + CsTreat[®] + 离子交换”为主的处理工艺, 并对改进工艺进行了可行性评价, 该改进工艺可为内陆核电厂放射性废液处理系统设计提供借鉴。

关键词: 内陆核电厂; AP1000; 放射性废液; 处理工艺

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2014)01-0066-04

Improvement of Radioactive Wastewater Treatment Technology in Inland AP1000 Nuclear Power Plant

LI Yuan, LIN Jianzhong, TANG Dongsheng

(Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to meet the standard of effluent radioactive wastewater from inland nuclear power plant, the improvement of radioactive wastewater treatment technology in inland AP1000 nuclear power plant is determined. Based on the origin radioactive wastewater treatment technology of AP1000 nuclear power plant and the advanced radioactive wastewater treatment technology, an “Chemical precipitation + CsTreat^{RR} + Ion exchange” technology is proposed and evaluated. The improved technology can provide reference for inland nuclear power plant radioactive wastewater treatment system design.

Key words: inland nuclear power plant; AP1000; radioactive wastewater; treatment technology

为了提升我国的核电技术水平、加快核电建设的步伐、满足能源发展的需求、缓解资源和环境压力, 我国全面引进了美国西屋公司的第三代核电技术—非能动先进压水堆 AP1000, 并开工建设浙江三门、山东海阳两个自主化依托项目。随着滨海核电站厂址的逐渐紧张和内陆经济发展的需求, 建设内陆核电厂也成为我国核电发展的必然趋势, 并确定 AP1000 为内陆核电厂的首选机型。

相对于滨海核电, 内陆核电厂厂址的接纳水体为河流(或湖泊、水库), 环境容量更小, 对公众照射途径比近岸海域更多、更敏感, 因此国家对内陆核电厂放射性废液提出了严格的排放限值。国标

GB 14587-2011《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》规定^[1]: 对于滨河、滨湖或滨水库厂址, 系统排放出口除³H、¹⁴C 外其他放射性核素的总排放浓度上限为 100 Bq/L, 且总排放口下游 1 km 处接纳水体总 β 放射性浓度不得超过 1 Bq/L, ³H 浓度不得超过 100 Bq/L。引进的 AP1000 放射性废液处理系统的设计标准只满足滨海厂址原排放标准 3 700 Bq/L, 所以有必要对 AP1000 放射性废液处理工艺进行深入的论证分析, 并进行适当的改进, 以满足内陆核电厂放射性废液排放标准, 提出适合内陆 AP1000 的放射性废液处理工艺。

1 AP1000 放射性废液处理系统

1.1 AP1000 放射性废液来源

AP1000 核电厂产生的放射性废液包括 4 类: 反应堆冷却剂流出液、具有潜在高悬浮固体颗粒杂质的地面和设备疏水、洗涤剂废液和化学废液^[2]。

收稿日期: 2014-10-18

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2014M562227)

作者简介: 李元(1985), 男, 湖北仙桃人, 博士, 主要从事放射性废液处理技术的研究(e-mail)liyuan@gedi.com.cn。

其主要来源、产生量和放射性活度见表 1。根据废液的特点贮存在不同的容器中进行分类处理。

表 1 AP1000 核电厂放射性废液的来源
Table 1 The Source of AP1000 Nuclear Power Plant Radioactive Waste Water

贮存箱和废液源	放射性活度/(Bq/L)	计算基准	年废液体积/m ³
1. 流出液贮存箱			
化学容积系统排放水	3.7 × 10 ⁶	AP1000 特殊计算 (b)	602
安全壳内泄漏液	6.2 × 10 ⁶	ANSI/ANS -55.6 (c)	11
安全壳外泄漏液	3.7 × 10 ⁶	ANSI/ANS -55.6	88
取样系统排放水	3.7 × 10 ⁶	ANSI/ANS -55.6	221
2. 废液贮存箱			
反应堆冷却系统排水	3.7 × 10 ³	ANSI/ANS -55.6	553
乏燃料池衬管泄漏水	3.7 × 10 ³	ANSI/ANS -55.6	28
杂项废液	3.7 × 10 ³	ANSI/ANS -55.6	746
3. 洗涤废液			
洗浴废液	3.7	ANSI/ANS -55.6	0
洗手废液	3.7	ANSI/ANS -55.6	221
设备、厂区去污水	3.7 × 10 ³	ANSI/ANS -55.6	44
4. 化学废液			
	<3.7 × 10 ⁶	估算	2

- a. 每年按 292 天计算
- b. 按核燃料循环的平均值计算
- c. 按反应堆冷却剂 5% 计算

1.2 AP1000 放射性废液处理工艺

AP1000 的放射性废液处理系统设计用于控制、收集、处理、贮存和处理正常运行和预计运行时间下产生的放射性废物。AP1000 对反应堆冷却剂流出液、地面和设备疏水主要采用高效、经济的过滤

和离子交换处理工艺, 且共用 1 套设备, 后者通常放射性水平较低, 处理时可根据需要投入离子交换设备。该设备由前置过滤器、离子交换器和后置过滤器组成, 分别除去废液中的不溶性颗粒杂质、放射性离子杂质和夹带碎树脂。对于洗涤废液和化学废液, 如监测其放射性活度大于排放标准, 则接移动处理设备进行处理^[3]。具体流程见图 1, 其主要处理工艺为: 收集→存贮→前过滤→离子交换→后过滤→检测→排放。

2 AP1000 放射性废液处理工艺改进分析

2.1 进行改进的必要性

西屋的 AP1000 放射性废液处理系统采用稀释排放以达到 10CFR Part 20 规定的排放浓度限值, 但内陆水源有限, 且这种稀释排放不符合“as low as is reasonably achievable”的放射性废物处理原则。因此, 有必要对现有的 AP1000 放射性废液处理工艺进行必要的改进, 以提高放射性废液处理系统总的去污因子, 增加其净化能力, 满足国家相关法规和标准的要求。

另外, GB/T 9135《压水堆核电厂放射性废液处理系统设计》(报批稿)中指出, 应根据放射性废液的类型和采取的处理工艺分类收集, 防止各类放射性废液相互交叉污染^[6]。而现 AP1000 洗涤废液和化学废液共用一个废液贮存箱, 有必要将这两类放射性废液分类收集, 分开处理。AP1000 放射性废液采用了一种移动处理设备用于处理异常工况和

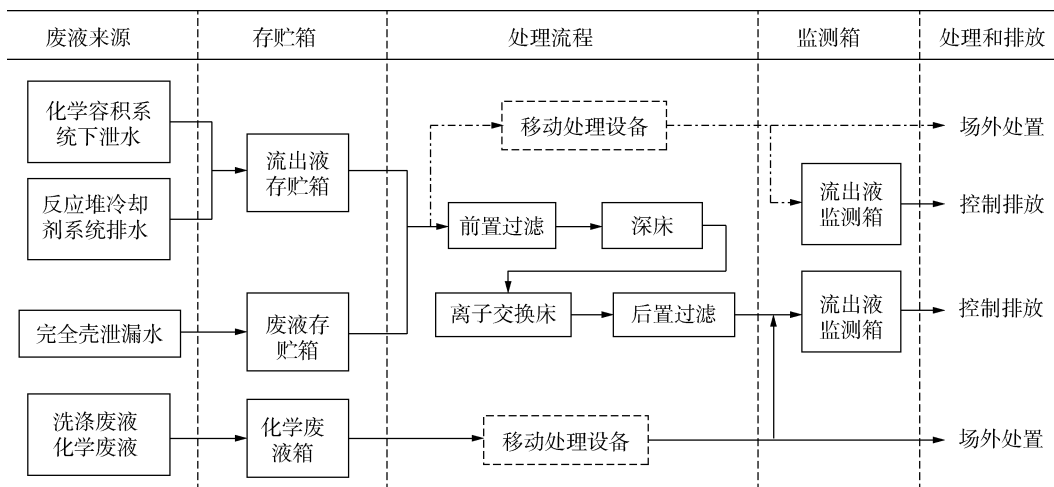


图 1 AP1000 核电厂放射性废液处理工艺流程

Fig. 1 Radioactive Wastewater Treatment Technology of AP1000 Nuclear Power Plant

难处理的放射性废液，该移动设备基本上是全套进口，过多的依赖这个设备不利于 AP1000 的自主创新。因此，有必要在改进现有放射性废液处理工艺的同时研发我国自主的放射性废液处理工艺，进一步加强 AP1000 自主创新的能力。

2.2 改进设想

对 AP1000 放射性废液处理工艺进行改进，不仅要满足内陆核电站放射性废液的排放标准，还要和其它因素结合考虑。改进的处理工艺不影响原系统的处理流量，应保证现实源项工况下处理流量为 $17 \text{ m}^3/\text{h}$ 和设计基准工况下处理流量 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。改进工艺还需保证放射性水平较高的废液能够满足排放标准，去污因子应达到 $3.7 \times 10^6/100 = 37\ 000$ ，因此在 AP1000 现过滤和离子交换处理去污因子为 1 000 的基础上，改进的工艺需要提高去污因子 37 倍，以达到内陆排放限值的要求。同时，改进工艺的选择应满足放射性废物处理的基本原则，避免产生过多的二次废物。改进工艺所用设备要进行全面技术经济比较，还要考虑设备的辐射防护要求和厂房的布置空间要求。

为此，根据现有的 AP1000 放射性废液的放射性源项、工艺现状和处理目标，选用合适的工艺进行改进，使原系统能充分利用，并满足内陆核电站的放射性废物排放标准。结合目前国际或国内成熟的放射性废液处理技术，对内陆 AP1000 放射性废液的处理工艺提出了如下的改进方案，改进后的工艺流程见图 2，灰色为改动部分。

(1) 增加一套用于贮存洗涤废液的存贮罐和预处理的过滤装置。

(2) 增加一个絮凝沉淀的预处理工艺。

(3) 离子交换工艺前增加一套 CsTreat[®] 处理工艺。

2.3 改进工艺可行性分析

(1) 改进工艺的去污因子是否达到要求。

核电站放射性废液中放射性核素在水中大多以离子和胶体微粒形式存在，通过增加絮凝沉淀装置可以去除绝大部分的胶体微粒和部分的离子态核素，同时还能去除其它非放射性的污染物，起到初步净化的作用，常见的絮凝沉淀装置的去污因子可以达到 10 ~ 100。加入 CsTreat[®] 目的主要是考虑 AP1000 放射性废液中放射性核素 Cs 的含量较高，常见的处理工艺对 Cs 的去除效果较差。AP1000 设计基准年排放的放射性 Cs 占总的放射性核素的 11.6%，另据文献报道，类似 AP1000 设计源项废液放射性 ¹³⁴Cs、¹³⁶Cs、¹³⁷Cs 占总活度的 85% 以上^[3]，引入 Fortum 公司的 CsTreat[®] 系统可以有针对性的去除放射性 Cs，缓解后续工艺的净化压力。CsTreat[®] 系统对 Cs 的去污因子可达 1 000 以上，絮凝沉淀工艺取保守值 10，结合整套 AP1000 放射性废水处理工艺，整个改进工艺的去污因子可达 10^6 ，处理后的放射性核素活度可达 $3.7 \times 10^6/10^6 = 3.7 \text{ Bq/L}$ ，满足内陆核电站放射性废液的排放要求。

(2) 改进工艺选取的设备是否成熟。

改进工艺增加了一个絮凝沉淀装置，因其系统

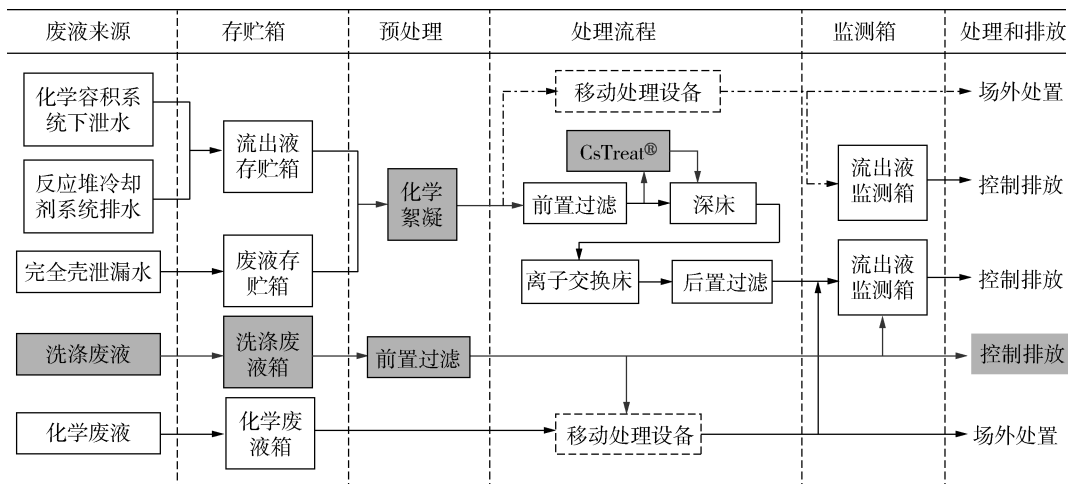


图 2 AP1000 核电站放射性废液改进处理工艺流程

Fig. 2 The Improvement Radioactive Wastewater Treatment Technology of AP1000 Nuclear Power Plant

简单、操作简单,目前絮凝沉淀装置已广泛应用于各类废水处理工艺中。国外已有多个核电站成功运行的经验,国内上海核工院开展了核电站废液化学絮凝处理工艺试验及装置研制,成功开发了 $17\text{ m}^3/\text{h}$ 废液絮凝处理装置,并已形成样机,该化学絮凝处理装置可应用到内陆核电厂的放射性废液处理工程中^[7]。Fortum公司的CsTreat[®]系统是基于一种高效Cs离子交换剂的综合成套装置,对Cs的去污因子高达 $1\ 000\sim 5\ 000$,并且该系统能在高含盐量和广泛的pH值范围内工作^[8]。



图3 化学絮凝试验样机

Fig. 3 Chemical Flocculation Experiment Equipment



图4 CsTreat[®]系统样机

Fig. 4 CsTreat[®] Demonstration Equipment

目前该系统已经在日本福岛核泄漏放射性废水处理中得到了应用,设备成熟可靠,可以应用于内陆核电厂放射性废液处理中。另外,增加的洗涤废液过滤装置是为了满足GB/T 9135《压水堆核电厂放射性废液处理系统设计》(报批稿)中对洗涤废液的处理要求,应根据洗涤废液的污染特性选取合适的过滤装置,过滤装置已经在核电厂放射性废液处理过程中多次应用,设备也成熟可靠。

(3)改进工艺是否经济可行。

改进工艺无需对厂房进行改动,节省厂房改动投资,但需添加少量设备、泵、管道和阀门。絮凝设备会产生一定的放射性废物,在一定程度上增加了放射性废物固化处理成本,但增加了该设备后,后续离子交换单元产生的废树脂会减少,也会减少放射性废树脂的处理费用,总的来说,在保证放射性废液排放达到内陆核电厂标准的前提下,增加的

费用在可以接受的范围。

针对内陆厂址进行改进的AP1000放射性废液处理工艺,增加了絮凝沉淀和CsTreat[®]系统,从原理上是可行的,去污能力能满足相关规定的要求,且系统简单,不需要对厂房进行调整,增加的设备投资成本较少,相关设备和工艺成熟可靠,已有成功运行经验,改进工艺也有利于AP1000的自主创新。

3 结语

AP1000放射性废液处理工艺主要以离子交换技术为主,但由于内陆核电厂的特殊性和放射性废液排放限值的要求,如果将原放射性废液处理系统移植到内陆厂址,需对AP1000放射性废液处理工艺进行适当的改进。根据目前核电厂放射性废液的处理技术研究进展,选取了“絮凝沉淀+过滤+CsTreat[®]+离子交换”为主要的处理工艺,改进系统的去污能力能满足内陆核电厂放射性废液排放要求,并且工艺设备成熟可靠,国内外已有相关的工程应用。该改进工艺不仅可为内陆核电厂放射性废液处理系统设计提供参考,还能提升我国核电厂研发设计的自主创新能力。

参考文献:

- [1] GB 14587—2011,核电厂放射性液态流出物排放技术要求[S].
- [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.
- [3] 李俊雄,顾健,王晓伟,等.内陆AP1000核电厂放射性废液处理系统设计改进[J].电力建设,2014,35(4):96-100. LI Junxiong, GU Jian, WANG Xiaowei, et al. Design Improvement of Radioactive Waste Liquid Processing System in Inland AP1000 Nuclear Power Plant [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(4): 96-100.
- [4] 10 CFR 20 Appendix B, Annual Limits on Intake (ALIs) and Derived Air Concentrations (DACs) of Radionuclides for Occupational Exposure: Effluent Concentrations, Concentrations for Release to Sewerage[S].
- [5] GB 6249-2011,核动力厂环境辐射防护规定[S].
- [6] GB/T 9135,压水堆核电厂放射性废液处理系统设计(报批稿)[S].
- [7] 柳丹,王鑫.“AP1000三废系统关键技术研究”科研课题顺利通过验收[EB/OL].(2013-05-07).http://www.sner-di.com.cn/InfoShow.aspx?Id=707c1c8c-7d2c-4c79-b841-0faca0290a58.
- [8] Fortum. NURES - Nuclide Removal System for radioactive liquid purification[EB/OL].(2013-05-20).http://www.fortum.com/en/products-and-services/power-solutions/products/nures/nures-references/pages/default.aspx.

(责任编辑 沈明芳)