

# Experimental Study on Treatment of Radioactive Wastewater with High Salt Content by Membrane Process

Ruoxia Ma, Yang Yang, Ling Wu, Qiang Liu

SPIC Yuanda Environmental Protection Co. Ltd., Chongqing Science and Technology Branch, Chongqing  
Email: 124555005@qq.com

Received: Oct. 3<sup>rd</sup>, 2019; accepted: Oct. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Oct. 25<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The nuclear power plants in our country are mainly located at the coastal areas and use the huge cooling capacity of the ocean to cool the reactors. In the event of a serious accident exceeding the design Benchmark, it is highly likely that seawater will be mixed into the coolant as an emergency measure for cooling core, which will result in radioactive wastewater with high salt content. Based on this background, this paper has carried on the experimental research of membrane process to treat the radioactive wastewater with high salt content.

## Keywords

Membrane Process, High Salt Content, Radioactive Wastewater

---

# 膜工艺处理高盐含量放射性废水的试验研究

马若霞, 杨洋, 伍灵, 刘强

国家电投远达环保工程有限公司重庆科技分公司, 重庆  
Email: 124555005@qq.com

收稿日期: 2019年10月3日; 录用日期: 2019年10月18日; 发布日期: 2019年10月25日

---

## 摘要

我国的核电站主要分布在沿海地区, 利用海洋巨大的冷却能力对反应堆进行冷却。一旦发生超设计基准

的严重事故,海水极有可能混入冷却剂中成为冷却堆芯的应急措施,从而产生高盐含量的放射性废水。本文基于此背景,进行了膜工艺处理高盐含量放射性废水的试验研究,初步验证了工艺的可行性和适应性,对工程设计和应用具有参考价值。

## 关键词

膜工艺, 高盐含量, 放射性废水

Copyright © 2019 by author(s) 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[1]-[10]

一般而言,核反应堆的严重事故可以分为两大类:一类为堆芯融化事故,另一类为堆芯解体事故。堆芯融化事故的主要原因是堆芯失水而导致冷却不充分,引起堆芯裸露、升温和熔化的过程,其发展较为缓慢,时间尺度为小时量级。而堆芯解体事故,是由于快速引入巨大的正反应性,引起功率陡增和燃料破裂的过程,其发展非常迅速,时间尺度为秒量级。由于固有的反应性负温度反馈特性和专设的安全设施,堆芯解体事故发生在轻水反应堆中的可能性极小。

1979年美国三哩岛事故、1986年前苏联切尔诺贝利核电厂事故和2011年日本福岛事故是目前核反应堆严重事故仅有的实例。在三哩岛事故中,发生事故的反应堆是三哩岛核电厂的2号机组,此机组堆型为压水反应堆。这次事故由给水丧失引起瞬变开始,经过一系列事件造成了堆芯部分熔化,大量裂变产物释放到安全壳内。堆芯上部有30%~40%的燃料熔化,估计事故中大约有70%惰性气体(主要是 $^{133}\text{Xe}$ ),30%的碘和50%的铯以及少量其他裂变产物释放进入了主冷却剂系统。切尔诺贝利事故发生在切尔诺贝利核电站的4号机组,堆型为石墨慢化轻水冷却的压力管式反应堆,此事故属于堆芯解体事故,收集的资料中未见有关于反应堆冷却剂源项的描述。2011年日本9级特大地震加上超设计基准的海啸引起的福岛核电事故,其1号机组堆芯熔毁比例为55%,2号机组堆芯熔毁比例为35%,3号机组堆芯熔毁比例为30%,产生的放射性废液的放射性浓度为 $10^{10}$  Bq/L,主要放射性核素为 $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 等。

我国的核电站主要分布在沿海地区,利用海洋巨大的冷却能力对反应堆进行冷却。一旦发生超设计基准的严重事故,海水极有可能混入冷却剂中成为冷却堆芯的应急措施,从而产生高盐含量的放射性废水。本文基于此背景,进行了膜工艺处理高盐含量放射性废水的试验研究,初步验证了工艺的可行性和适应性,对工程设计和应用具有参考价值。

## 2. 膜工艺处理高盐含量放射性废水的试验研究

### 2.1. 模拟废水配置

本文的试验研究,在模拟废水配置时,采用氯化钠 $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 模拟海水中的盐,采用硝酸锶( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ )、硝酸铯( $\text{CsNO}_3$ )、硝酸钴( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ )模拟放射性核素。

配制含有锶( $\text{Sr}$ )、铯( $\text{Cs}$ )、钴( $\text{Co}$ )各100 mg/L、模拟海水浓度分别为7 g/L的溶液 $1 \text{ m}^3$ 。每次试验前均取原水样分析检测。每次试验配水 $1 \text{ m}^3$ 。

## 2.2. 试验系统

根据模拟废水的盐含量及模拟核素浓度, 采用苦咸水反渗透膜(BWRO)、海水淡化反渗透膜(SWRO)和低压反渗透膜(RO)组成的工艺系统进行试验, 试验系统的处理能力为 50 L/h。试验流程如图 1。

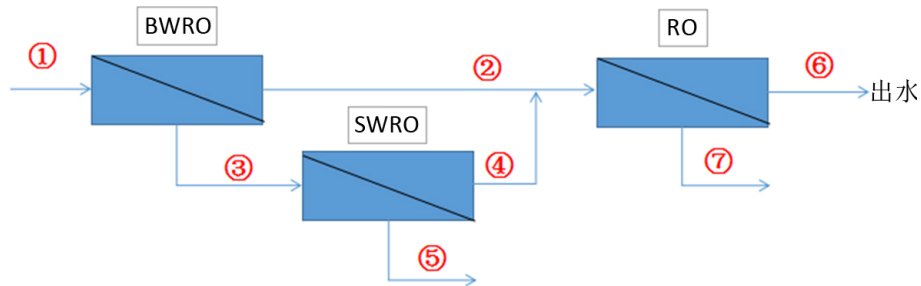


Figure 1. System flow diagram  
图 1. 系统流程简图

工艺流程介绍: 模拟废水①首先经过 BWRO 膜, 浓水③进入 SWRO 膜, SWRO 膜的净水④与 BWRO 膜的净水②混合后进入 RO 膜处理后排出。SWRO 膜的浓水⑤收集后进入蒸发装置蒸发处理, RO 膜的浓水⑦回到原水箱进一步处理。

## 2.3. 操作步骤

- 1) 完成设备安装调试, 准备好实验原材料及工器具, 将配制模拟废水, 装入原水箱, 取原水样, 测量原水电导率。
- 2) 检查各阀门处于正确的状态。
- 3) 依次打开 BWRO 增压泵, BWRO 高压泵, BWRO 系统稳定运行。
- 4) 取 BWRO 浓水样、BWRO 产水样, 记录 BWRO 浓水体积、产水体积, 记录 BWRO 高压泵压力。
- 5) 依次打开 SWRO 增压泵, SWRO 高压泵, SWRO 系统稳定运行。
- 6) 取 SWRO 浓水样、SWRO 产水样, 记录 SWRO 浓水体积、产水体积, 记录 SWRO 高压泵压力。
- 7) 依次打开 RO 增压泵, RO 高压泵, RO 系统稳定运行。
- 8) 取 RO 产水样。

## 2.4. 试验结果分析

各核素的 DF 值如表 1 和图 2 所示。

Table 1. Decontamination Factor (DF)  
表 1. 去污因子

	BWRO 的 DF 值	SWRO 的 DF 值	RO 的 DF 值	总 DF	综合 DF
Cs	19.49	14.29	11.14	198.13	
Co	187.17	119.21	80.34	11931.82	428.00
Sr	118.02	90.77	35.87	2519.23	

各处理单元对各核素的DF值

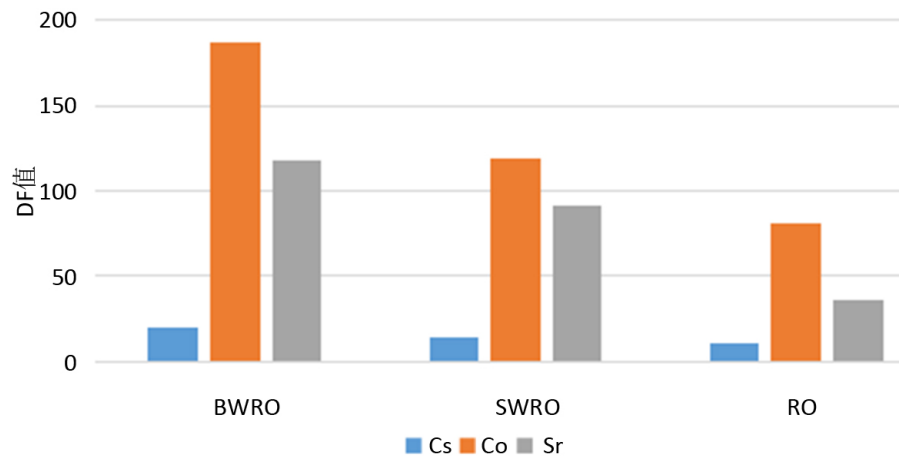


Figure 2. The DFs of each processing unit of the system

图 2. 系统各处理单元对各元素的 DF 值

从表 1 和图 2 中可以看出, 系统对铯的总 DF 值为 198.13, 对钴的总 DF 值为 11,931.82, 对锶的总 DF 值为 2519.23, 对各核素的综合 DF 值为 428。

各元素的去除率如表 2 和图 3 所示。

Table 2. Removal rate of nuclides from each processing unit

表 2. 各处理单元对各核素的去除率

	BWRO (%)	SWRO (%)	RO (%)	总去除率(%)
Cs	94.87	93.00	94.38	99.50
Co	99.47	99.16	99.33	99.99
Sr	99.15	98.90	98.58	99.96
Mg	99.54	99.16	99.42	99.98
Na	93.54	94.34	94.08	99.69

各处理单元对各核素的去除率

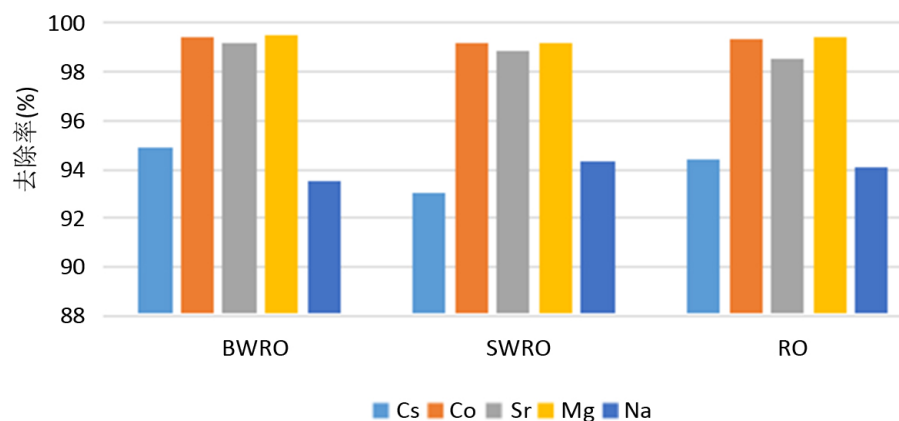


Figure 3. Removal rate of nuclides from each processing unit

图 3. 各处理单元对各核素的去除率

从表 2 和图 3 中可以看出, 各类膜组件对元素都能达到比较高的去除率, 系统总的去除率均达到 99.5% 以上。

### 3. 结论及建议

#### 3.1. 结论

从本文试验的结果来看, 各类膜组件对元素都能达到比较高的去除率, 系统总的去除率均达到 99.5% 以上, 但由于计算方法不同, 系统各处理单元对各元素的 DF 值却并不高, 系统对铯的总 DF 值为 198.13, 对钴的总 DF 值为 11,931.82, 对锶的总 DF 值为 2519.23, 对各核素的综合 DF 值为 428。因此, 本系统可以作为高盐含量放射性废水的预处理工艺, 或作为应急处理系统的前端装置, 起到对盐和核素的浓缩作用。

#### 3.2. 建议

鉴于本试验装置对高盐放射性废水中核素的综合 DF 值不高, 若要求对废水达到较高的处理要求, 则需要在后端增加处理工艺, 鉴于本系统出水后的盐浓度较低, 可采用比较成熟的离子交换工艺, 既可以节约成本, 也可保证后端出水达到处理要求。

### 基金项目

国家重点研发计划: 核电站放射性泄露区高浓度事故废液处理技术研究(课题编号: 2016YFC1402506)。

### 参考文献

- [1] 阎昌琪, 曹夏昕. 核反应堆安全传热[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [2] 朱继洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000
- [3] 王海洋, 王晓霞, 黄树明, 尤伟. 福岛第一核电厂事故源项估算及方法比较[J]. 核安全, 2011(2): 14-19.
- [4] 信萍萍. 福岛核事故放射性废液的处理与启示[J]. 放射性废物管理与核设施退役, 2012(2): 26-38.
- [5] 王建龙, 刘海洋. 放射性废水的膜处理技术研究进展[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2639-2656.
- [6] 孔劲松, 郭卫群. 反渗透技术在放射性废水处理中的应用进展[J]. 核动力工程, 2012, 33(3): 121-124.
- [7] 赵卷. 膜法处理低浓度放射性废水的应用及研究进展[C]//中国核学会. 2007 年核化工三废处理处置学术交流会, 2007: 105-113.
- [8] 张维润, 樊雄. 膜分离技术处理放射性废水[J]. 水处理技术, 2009, 35(10): 1-5.
- [9] IAEA TRS431\_Application of Membrane Technologies for Liquid Radioactive Waste Processing.
- [10] 罗上庚. 放射性废物处理与处置[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.