

# SEC系统维修大纲周期延长论证方法浅析

王 位<sup>1,2</sup>, 杨立飞<sup>1,2</sup>, 马沂荩<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州

<sup>2</sup>国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心, 江苏 苏州

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2024年12月31日; 发布日期: 2025年1月26日

## 摘要

重要厂用水系统(SEC系统)作为冷源相关系统中重要的一部分,科学的研究维修大纲周期延长合理性,能够在保障机组可靠运行的前提下,合理的减少系统和设备的维修频次。本文以FMEA分析方法为基础,结合As-Found和定量化分析,优化重要厂用水的系统(SEC系统)维修策略周期以及大修排水检修方案。最终将CPR1000机组单次大修SEC系统两列排水改为单列排水,在保持机组核安全水平的前提下,实现大修工期缩短、降低运营成本、提高机组可用率。

## 关键词

重要厂用水系统, 贝类捕集器, 故障分析, 核电站

# A Brief Analysis on the Demonstration Methods for Extending the Maintenance Outline Cycle of the SEC System

Wei Wang<sup>1,2</sup>, Lifei Yang<sup>1,2</sup>, Yijin Ma<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Suzhou Nuclear Power Research Institute Co. Ltd., Suzhou Jiangsu

<sup>2</sup>National Engineering Research Center for Nuclear Power Plant Safety & Reliability, Suzhou Jiangsu

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 31<sup>st</sup>, 2024; published: Jan. 26<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The Essential Service Water System (SEC System), as an important part of the cooling source-related systems, scientifically researching the rationality of extending the maintenance outline cycle can reasonably reduce the maintenance frequency of the systems and equipment on the premise of ensuring the reliable operation of the units. Based on the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

method and combined with As-Found and quantitative analysis, this paper optimizes the maintenance strategy cycle of the Essential Service Water System (SEC System) and the overhaul drainage maintenance plan. Eventually, for the CPR1000 unit, the two-column drainage of the SEC System during a single overhaul is changed to single-column drainage. On the premise of maintaining the nuclear safety level of the unit, the overhaul period is shortened, the operating costs are reduced, and the availability rate of the unit is improved.

## Keywords

Essential Service Water System, Shellfish Traps, Fault Analysis, Nuclear Power Station

Copyright © 2025 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. 背景

目前，国内核电机组一般分为十年大修/首次换料大修，年度大修和短大修。根据某集团历次大修经验，如果要实现 25 天短大修，必须将大修计划工期控制在 22 天以内，而剩余 3 天的时间用来处理现场出现的设备异常以及启动过程中的异常[1]。该集团 30 年来的核电机组大修均采用重要厂用水系统(以下简称 SEC 系统)两个子列倒列排水的方式进行检修，而 SEC 系统设备需要整体隔离周期为 1C (一个燃料循环周期，约 18 个月)的预防性维修项目，占用大修关键路径约 3 天。按照目前双列倒列排水的大修方式，SEC 系统与设备能够稳定且可靠运行。如果将 SEC 系统相关维修大纲周期由 1C 延长至 2C，可实现单列排水检修的新型大修管理方案，将维修裕度充分释放。

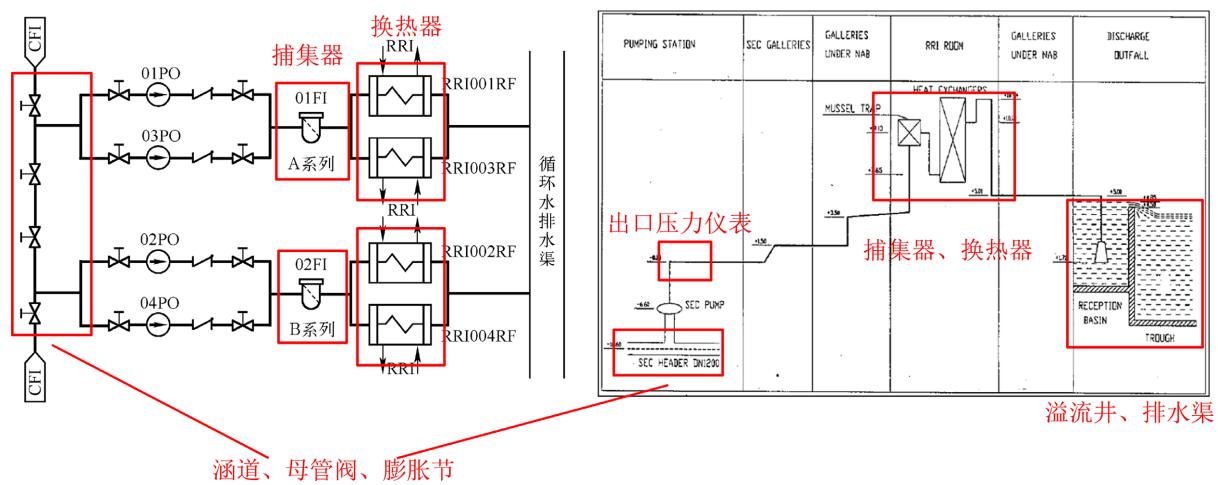
## 2. 系统介绍

CRP1000 型号机组 SEC 系统属于开式循环系统，其主要功能是在核电厂正常和事故工况下把设备冷却水系统(以下简称 RRI 系统)传输的热量带到海水中，是核岛的最终热阱。由于 SEC 系统属安全相关系统，所以在设计上考虑了系统的冗余性和独立性。即该系统由互相独立的、互不影响的两个系列(A 列和 B 列)组成。每个系列通过两台并联的 SEC 系统泵吸入海水，然后经过 SEC 管道、贝类捕集器，最终排放两台并联的 RRI/SEC 热交换器带走热量的海水至循环水排水渠。

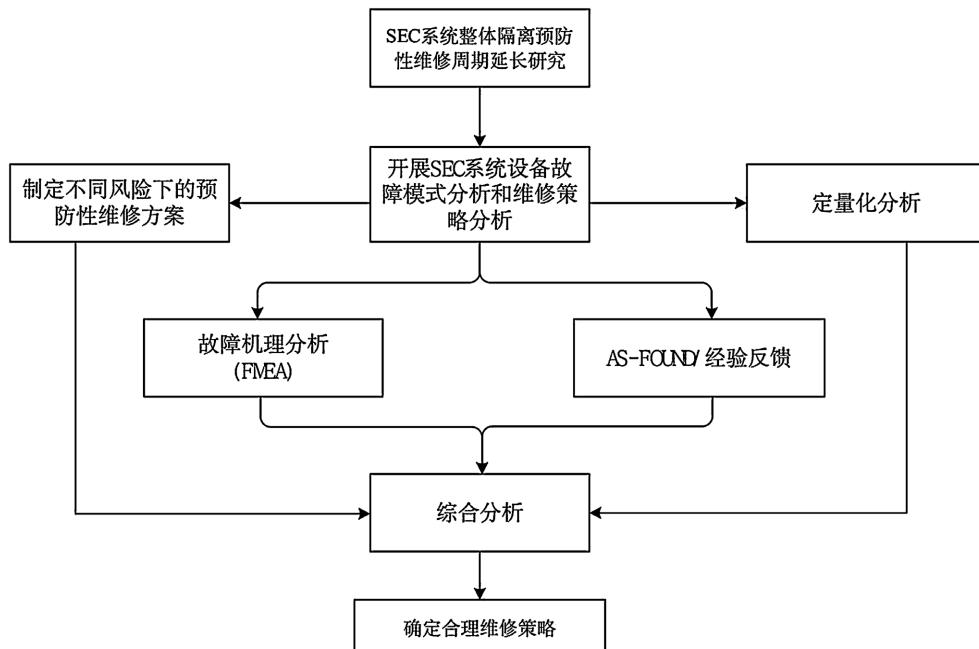
SEC 系统母管隔离阀/膨胀节内部检查、涵道清理、贝类捕集器内外部检查、压力仪表校验等 1C 大修项目的执行，需 SEC 排空检修(参考图 1)，其中 SEC 贝类捕集器、RRI/SEC 换热器位于系统高点，其他设备位于系统低点。

## 3. 分析方法介绍

目前核电厂预防性维修策略的制定通常采用“传统 RtCM 分析方法(以可靠性为中心的维修分析)”、“基于 AP-913 体系下的设备分级 + PM 模板”。在实际运行过程中，具体设备因其工作环境、运行条件等因素的动态变化，导致不同机组设备故障模式和概率发生变化。以上两种方式因为缺少定量化的计算，需要在维修策略实施过程中不断调整分析模型或维修方案。本论文中 SEC 系统维修大纲周期延长的论证工作，使用了 FMEA、As-Found、定量化分析方法相结合的方法对维修策略进行分析。该方法通过获取的精确数据支持，按照适用的分析方法和模型，针对不同机组制定不同的维修方案，就能够实现维修裕度的深度利用。



**Figure 1.** The main 1C maintenance items of the SEC system  
**图 1.** SEC 系统主要 1C 检修项目



**Figure 2.** General technical route  
**图 2.** 总体技术路线

SEC 系统维修大纲周期延长论证流程见图 2, 在识别需要隔离排空的 1C 检修任务后, 对分析范围内的维修大纲进行故障模式和维修策略分析(FMEA), 收集 As-Found 反馈和老化件的性能测试数据开展定量分析, 并以此综合分析制定不同类型的预防性维修方案。在分析的过程中需要结合目前已发生历史事件的故障机理、内外部经验反馈, 对共模故障进行统计与总结, 提出可靠性改进建议。确保以可靠性为中心基础上制定的预防性维修大纲, 得到合理的周期优化。

### 3.1. FMEA 分析方法介绍

故障模式和影响分析(Failure Mode and Effects Analysis—FMEA)是对系统进行分析, 以识别潜在失效

模式、失效原因及其对系统性能影响的系统化程序[2]。通过对 SEC 系统相关设备进行故障模式和维修策略的分析，制定不同类型的预防性维修方案，以此确定维修策略延长的限制条件。本节以 CRP1000 机组 SEC 贝类捕集器部件的故障模式和影响分析为例，对 FMEA 分析方法进行简述。

### 3.1.1. FMEA 分析过程

本项目的 FMEA 分析过程包括 4 个步骤：

- 1) 确定“SEC 系统整体隔离预防性维修周期延长研究”分析范围，见表 1；
- 2) 分析相关设备的功能、失效类别、故障后果，识别需要管理的失效类别；
- 3) 结合设备运行环境、结构特点、部件材质，分析和识别与失效类别相关的具体故障模式及现有维修手段，见表 2；
- 4) 根据 FMEA 分析确定制约“SEC 系统整体隔离预防性维修周期延长研究”的故障模式并分析合理的维修方案，见本文 3.4. 章节。

**Table 1.** List of analysis scope

**表 1.** 分析范围清单

类型	功能位置	大纲内容
机电仪大纲	SEC-001/002TY	海水涵道清理
	SEC-101/102/103/104VE	目视检查阀门
	SEC-001/002/003/004JD	膨胀节内部检查
	SEC-001MP/021SP 所在管线	定期吹扫和检查取样管线
	SEC	热交换器/捕集器引压管法兰解体清淤
	SEC-001/002FI	年度清洗检查，上下游管道检查
	SEC-001/002MD	超声波探头清洗
	RRI-001/002/003/004RF	大修中对 SEC/RRI 热交换器的 SEC 侧进行吸尘吹扫清理
防腐大纲	SEC-001/002FI	贝类捕集器内部防腐检查及处理
	SEC-001/002TY	海水涵道内部防腐检查及处理
	SEC	SEC 出水口的跌水井内管道支架腐蚀情况检查

### 3.1.2. SEC 贝类捕集器反冲洗唇缘橡胶故障模式分析

贝类捕集器 SEC-001/002FI 使用 TAPROGGE (达极)生产的网孔为  $\Phi 2$  mm 或  $\Phi 3$  mm 的球形过滤器。球形过滤器本体由上/下过滤器腔室、轴承组件、回转轴、滤网、检查孔共 6 部分组成，在过滤器底部设计有一个排污阀。贝类捕集器日常运行期间可以在主控室手动启动捕集器的反冲洗，或由时间继电器控制反冲洗电机和排污阀的开启进行反冲洗，也可以通过压差控制反冲洗功能。正常运行时，海水从滤网凹侧流入过滤器，当启动反冲洗时，打开反冲洗阀门，通过反冲洗斗(橡胶材质)的旋转，刮除滤网表面异物，并通过系统压力对异物进行冲洗排出。贝类捕集器反冲洗唇缘橡胶横档与网板之间有 8 mm 的间隙，但网片表面有一条 10 mm 的挡条，作用是防止橡胶横档带动贝壳杂质旋转，当杂质行至挡条位置即被刮进反洗斗排放出去。因橡胶横档与网板之间的 8 mm 间隙小于 10 mm 挡条的高度，每当橡胶横档旋转一周到此位置，都会受到向内部折弯的力。长期运行，橡胶横档会因老化与疲劳损坏最终导致贝类捕集器反冲洗功能丧失，影响 SEC 系统功能。反冲洗唇缘橡胶目前只能定期更换管理(见表 2 应对措施)，因此其使用寿命影响 SEC 系统维修策略是否能够由 1C 延长至 2C。

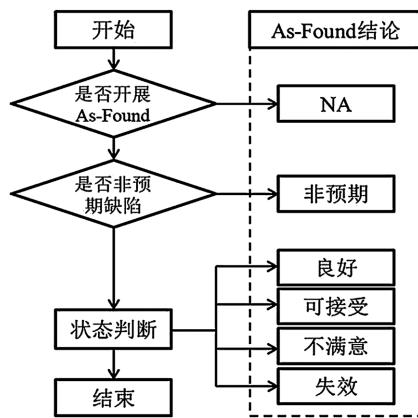
**Table 2. FMEA Analysis of Shellfish Traps (Related to 1C Inspection Items)**  
**表 2. 贝类捕集器 FMEA 分析(1C 检查项目相关)**

设备	部件	时间相关故障模式	故障原因	设备级故障影响	应对措施
贝类捕集器	反冲洗唇	反冲洗唇缘橡胶划伤	贝壳割裂	轻微划伤不影响刮板功能	/
		反冲洗唇缘橡胶	橡胶老化	反冲洗能力降低	定期更换
		反冲洗唇缘橡胶断裂	橡胶经过挡条 机械应力损伤	反冲洗能力降低	定期更换
	滤网	贝壳或碎片卡入网孔	少量无影响, 可能划伤刮板	定期清理/监测压差	
		海生物爆发	堵塞过滤器, 导致 SEC/RRI 流量不足	启动连续反冲洗	
		滤网孔隙变大	缝隙腐蚀	滤网过滤能力下降	滤网边缘加强防腐

### 3.2. As-Found 及经验反馈分析过程介绍

某核电集团于 2018 年在下属核电厂推广实施“*As-Found Equipment Condition* 维修前设备状态”见证(简称 As-Found), 建立全面的维修执行反馈机制。As-Found 为核电厂设备可靠性管理(AP913)PM 执行情况中的一部分; 开展 As-Found 验证的目的是在维修前检查关键部件的状态, 验证预防性维修大纲是否合适[3]。SEC 系统维修大纲周期延长论证根据设备类、厂家、型号、功能位置等, 对 As-Found 数据进行统计, 尤其是在 1C 检修周期项目的 As-Found 总体状态评估。通过图 3 的流程推导 As-Found 结论, 按照维修大纲有效性的判断进行打分: 良好(A: 100 分), 可接受(B: 80 分); 不满意(C: 60 分); 失效(D: 40 分), 纠正性维修(E: 40 分), 维修大纲有效性状态监测。将设备按关键度等级依次分为 CCM、C、S、E、R 共 5 级。CCM 设备 95~100 分, C/S 类设备 85~100 分, E 类设备 75~100 分, R 类设备 60~100 分, 代表设备存在过维修, 需要开展减项的大纲评估。

$$\text{维修大纲有效性} = \frac{100 \times A + 80 \times B + 60 \times C + 40 \times D + 40 \times E}{A + B + C + D + E}$$



**Figure 3. Conclusion of As-Found condition**  
**图 3. As-found 状态结论**

### 3.3. 定量化分析

关键设备维修策略的优化, 需要在依托 FMEA 分析及现场 As-Found 状态评价的基础上, 通过出厂

试验数据和材料试验数据进行定量化分析,确认 SEC 系统设备易老化材料的真实寿命,给予维修建议。本节以 CRP1000 机组 SEC 贝类捕集器反冲唇缘橡胶刮板寿命分析为例,简述定量化分析过程。

### 3.3.1. 出厂试验数据分析

核电现场 SEC 贝类捕集器电机转速 1400 rpm, 输出转速 87 rpm, 贝类捕集器蜗轮蜗杆转速比 40:1, 贝类捕集器实际转速 2.15 rpm。按照目前每次 1 小时, 每次 2 分钟的冲洗设定频率, 贝类捕集器定期启动, 橡胶刮板如果运行 2C 会旋转经过刮板挡条 111,456 次。如果启动连续运转功能, 橡胶刮板每天旋转经过刮板挡条运行 3096 次。

根据厂家进行的耐久试验数据,选用的 3 个 SBR 材质橡胶刮板样本,1#样本持续 37,875 次疲劳试验,结构完整无缺;2#样本,在 556,295 次疲劳试验时,结构出现了裂纹;3#样本,在 241,900 次疲劳试验时,结构出现了裂纹。按照 2#、3#样本疲劳寿命计算,在 SEC 贝类捕集器定期更换橡胶刮板工作由 1C 延长至 2C 后,根据“剩余可连续运转天数=(刮板疲劳寿命(2#/3#)-运转寿命)/每天旋转次数”可得出贝类捕集器在解体周期由 1C 延长至 2C 后,橡胶刮板连续运转预期寿命仍有 42~143 天。

### 3.3.2. 现场设备试验数据分析

SEC 系统贝类捕集器所使用的反冲洗刮板采用丁苯橡胶材料,根据文献[4]的研究,在相同的温度下,老化初期在海水中 SBR 的性能变化比在空气中的快,而老化后期在空气中的性能变化比在海水中快。依据该理论,对现场拆卸的反冲洗刮板,分别对不同放置条件的橡胶刮板共计 6 个样品进行老化研究。所选取的 6 个试验样本,均在水下使用 1C 左右,并在水上放置 1 个月至 2 年不等间隔时间。

分别开展宏观、微观形貌观察、并根据 GB/T531.1-2008《硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度试验方法第 1 部分:邵氏硬度计法(邵尔硬度)》、GB/T533-2008《硫化橡胶或热塑性橡胶密度的测定》、标准 GB/T528-2009《硫化橡胶或热塑性拉伸应力变能的测定》、GB/T6040-2019《红外光谱分析方法通则》,进行硬度、密度、拉伸性能、材质分析,最终对贝类捕集器橡胶横档样品进行屈挠疲劳性能测试(见表 3)。开展综合性能评价,得出剩余预期寿命,为周期论证提供理论依据。

**Table 3.** Test results of flexural fatigue performance

**表 3. 屈挠疲劳性能试验结果**

样品编号	使用情况	次数(次)	龟裂等级[注]	龟裂尺寸(mm)	理论剩余寿命
1#大	海水中 1C/水上 2 年	68,000	6 级	3.87	大于 1C
2#大	海水中 1C/水上 2 年	68,000	6 级	4.69	大于 1C
3#大	海水中 1C/水上 2 年	86,009	6 级	>10	大于 1C
4#大	海水中 1C/水上 2 年	59,409	断裂	/	小于 1C
5#大	海水中 1C/水上 1.5 年	166,564	6 级	>10	大于 2C
6#大	海水中 1C/水上 1 个月	114,937	6 级	3.78	大于 2C
1#大	海水中 1C/水上 2 年	68,000	6 级	3.87	大于 1C

注:龟裂等级分类:1 级:试样出现肉眼可见象“针刺点”样的龟裂点数目为 10 个或 10 个以下;2 级:龟裂点数目超过 10 个或有个别龟裂点有明显的长度,但长度不超过 0.5 mm;3 级:龟裂点有明显的长度和较小的深度,长度大于 0.5 mm,但不大于 1 mm;4 级:最大龟裂点长度大于 1 mm,但不大于 1.5 mm;5 级:最大龟裂点长度大于 1.5 mm,但不大于 3.0 mm;6 级:最大龟裂点长度大于 3.0 mm。

### 3.4. 预防性维修方案的制定

预防性维修方案的制定需要以最大限度提高设备的使用可靠性为目的,应用可得到的安全性和可靠

性数据, 判别哪些子系统和零部件处于临界状态, 哪些需要修复、改进或重新设计, 确定维修的必要性和可行性, 对维修要求进行评估, 最终制订出实用、合理的维修计划或大纲。确定纠正性维修(CM)策略、定期维修(PM)策略、预测性维修(PdM)策略的合理选择[5]。按照状态监测、定期维护、定期更换、定期试验、设计改进的决断逻辑顺序进行分析[6], 为处理各种不同类型的故障和需求, 制定合理的维修方案。

SEC 系统主要功能是为核岛设备提供冷却, 如果 SEC 系统不能正常工作或其冷却能力下降, 可能会导致被冷却设备温度过高。对于核电机组而言, 高温可能会影响设备的性能和安全, 如导致反应堆压力容器等关键设备超温, 进而影响其结构完整性, 增加安全风险。通过“FMEA + As-Found + 定量化分析”的方法论证后, 确认部分核电机组维修任务周期由 1C 延长至 2C 仍存在一定安全风险。为了消除该部分风险, 制定管理加强措施进行消除, 具体方案见表 4。

**Table 4.** Strengthening measures for the management of SEC system equipment

**表 4.** SEC 系统设备的管理加强措施

维修任务	排水项目周期延长 2C 后的风险	概率	加强管理措施	改进成本
海水涵道清理任务	增加系统管道泥沙含量, 增加 SEC 贝类捕集器、换热器压差高的误报警几率。	低	在满足机组运行的条件下, 应尽量减少 SEC 泵的停运时间, 保证 SEC 泵的定期切换, 避免水力部件的长期影响。	低
SEC 膨胀节内部检查	膨胀节内部损伤无法及时发现, 如果外部也出现破损, 海水外漏导致一列 SEC 系统不可用。	低	在内部检查维修工作包中明确增加表面硬度测量, 尽可能提前发现膨胀节可能出现的早期故障; 增加定期更换任务。	低
母管隔离阀内部目视检查任务	密封不严, 影响 SEC 系统隔离维修和 CFI 取水功能, 导致一列 SEC 系统不可用。	低	根据检查情况, 增加解体任务。	低
SEC-001MP/021SP 所在管线定期吹扫和检查取样管线	仪表取样管线堵塞, 当运行列母管压力低, 无法提供压力低信号, 备用泵无法自动启动, 换热器有冷却不足风险。主控室可以通过换热器 RRI 侧出口温度温度异常报警和 SEC001/002MP 交叉对比, 发现故障, 手动启动备用泵。	低	加强日常的仪表管线排污冲洗工作, 避免泥沙长期淤积附着。	低
SEC 贝类捕集器、换热器引压管线法兰解体清淤	增加 SEC 贝类捕集器、换热器压差高的误报警几率; 部分情况可能出现报警无法触发。	高	淤泥收集冲排装置改造	高
SEC 贝类捕集器年度清洗检查, 上下游管道检查	贝类捕集器堵塞几率增加, 部件腐蚀几率增加。	中	加强滤网边缘防腐: 手动打磨锈蚀部位至 ST3 级, 涂装一道环氧耐磨漆 90, 填充滤网边缘缝隙, 防止出现电离腐蚀。 严格执行厂家的维修安装准则: 确认挡条为圆倒角; 滤网与刮板间隙保持 8~10 mm; 挡条固定螺帽上紧力矩固定为 9 Nm, 未压到位可以增加垫片。	低
			必要时, 日常进行清洗工作。	低

续表

SEC 超声波流量计探头清洗	误发报警风险增加, 影响主控发现报警后, 通知专业现场处理, 对设备运行无影响。 拒绝报警风险增加, 当双泵运行或单泵运行母管流量低时, 主控 KIC 无报警, 有 RRI 换热器冷却不足风险。最终, 主控室可以通过换热器 RRI 侧出口温度异常报警, 可以发现。	低	替代为非插入式的流量计	中
SEC 出水口的跌水井内管道支架腐蚀情况检查	管道支撑腐蚀无法及时发现	低	确保首次更换时彻底表面处理, 实施重防腐涂料, 如 Interzone 954、Ceramic Polymer CN200)	低

因海水泥沙沉积严重, 部分电厂的 SEC 贝类补集器、换热器引压管线的解体清理任务周期延长后系统安全风险明显增加。受限于不同机组特点和改进成本, 管理加强措施需要分阶段实现。目前阶段为了实现深度利用 SEC 系统设备的维修裕度, 需要根据不同核电机组根据实际海洋泥沙含量制定两种不同的预防性维修策略优化方案。

**方案 1, 局部排水检修方案: SEC 系统全部排水项目检修周期延长至 2C, 80% 排水的检修项目, 选择性延长至 2C。**

对于热交换器、贝类捕集器如法兰面清理工作, 维修方式为 SEC 系统局部排水项目保持 1C 不变, 其余项目根据现场状态选择性延长至 2C (见表 5)。

**方案 2, 全部排水检修方案: 需排空 SEC 系统的 1C 项目全部延长至 2C。**

表 5 中, SEC 系统需排水检修的 1C 机电仪大纲项目全部延长至 2C, 执行方案 2 的前提需要满足以下必要条件:

- 1) 现场对仪表引压管线加强监测与日常冲洗;
- 2) 完成适合本电厂的管线、换热器改造实施, 并经过 1 个循环验证其改造效果良好。

**Table 5.** The 1C item of the SEC system needs to be drained and overhauled

**表 5.** SEC 系统需排水检修的 1C 机项目

功能位置	大纲内容	维修方式	方案 1 周期	方案 2 周期
SEC-001/002TY	海水涵道清理, 目视检查 SEC101-104VE 阀门	全部排水	2C	2C
SEC	SEC 出水口的跌水井内管道支架腐蚀情况检查	80% 排水	1C/2C	2C
SEC-001/002/003/004JD	膨胀节内部检查	全部排水	2C	2C
SEC-001MP/021SP 所在管线	定期吹扫和检查取样管线	80% 排水	1C/2C	2C
SEC	热交换器/捕集器引压管法兰解体清淤	局部排水	1C	2C
SEC	检查管道内部海生物附着情况并清理	全部排水	2C	2C
SEC-001/002FI	贝类捕集器年度清洗检查, 上下游管道检查	80% 排水	1C/2C	2C
SEC-001/002MD	超声波探头清洗	80% 排水	1C/2C	2C
RRI-001/002/003/004RF	大修中对 SEC/RRI 热交换器的 SEC 侧进行吸尘吹扫清理	局部排水	1C	2C

## 4. 核电机组的应用及长远影响

### 4.1. 核电机组应用收益

某集团 CPR1000 机组为实现冷源检修模式优化推动设备改进方案，在做好充分的论证，落实管理加强措施后在 2023 年 9 月完成示范机组应用，通过方案 1 实现冷源检修模式优化。创新性的将 SEC 排水检修方案由每次大修修两列改为长大修修两列，为机组大修节约了 24 小时关键路径，支持 CRP1000 机组实现 14.6 天超短大修工期。截至本文撰写日期，该集团另外两个电厂的 1 号机的第 6 轮大修及第 8 轮大修也实现了推广应用，各为本电厂的 1 号机组节约 12 小时和 24 小时的大修关键路径。已获得的发电收益=节约工期(60 h) \* 每小时发电量(约 100 万千瓦时) \* 上网电价(约 0.4 元/千瓦时)，约 2 千 400 万的经济收益。

该集团目前在运的可应用电站共计 24 台机组，单机组每两年一次短大修，每次短大修预期节约 12-24 小时大修关键路径，可节约 480~960 万。核电机组按照 60 年运行寿命计算，共计 40 个换料周期，其中有 20 个短大修。60 年预期收益 = 短大修次数(20 次) \* 机组数量(24 台) \* 发电收益(480~960 万/次)，所以核电机组 60 年运行寿命的经济预期收益在 23.04 亿元到 46.08 亿元区间。

### 4.2. 长远影响

目前核电的短大修计划工期能够控制在 22 天以内，如果能够将短大修规划成“无低低水位”大修，大修工期可以常态化规划在 20 天，甚至更短。而需 SEC 排空检修的 1C 大纲项目延长周期，可以为实现 20 天创优工期提供先决条件。“FMEA + As-Found + 定量化分析”方法，尽量降低了传统维修策略分析方法在最初制定维修策略后，较难及时适应不同机组设备运行动态变化的影响。该方法在核电机组上的推广应用，也为后续同类维修策略的优化研究提供了技术思路和实践经验。

## 5. 结论

SEC 系统维修大纲周期延长论证的过程中以 FMEA 分析方法为基础，通过 As-Found 反馈和老化件的试验测试引入定量化分析结论，提高了维修大纲周期延长论证的精准性和适用性。按照此分析方法，能够综合系统各项任务关系在合理的成本控制下提出适当的设计改进意见并加强日常管理，最终实现在保障核电机组可靠运行的前提下，合理的减少系统和设备的维修频次，减少维修引入的风险，缩短大修工期降低运营成本，提高机组可用率和核心竞争力的目的。

## 参考文献

- [1] 王先锋, 匡波. 核电站短工期换料大修方案初步探讨[J]. 大亚湾核电期刊, 2008, 48(2): 30-32.
- [2] 系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析(FMEA)程序: GB/T 7826-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 1-2.
- [3] (2018) Equipment Reliability Process Description: INPO AP-913, INPO, Atlanta, 25-26.
- [4] 余超, 文庆珍, 余宏伟, 朱金华. 丁苯橡胶在热空气和海水中老化性能的比较[J]. 合成橡胶工业, 2010, 33(1): 59.
- [5] 陈雯, 马沂蕊, 张涛. RCM 在第三代核电机组 AP1000 中的应用[J]. 能源与节能, 2013, 98(11): 93.
- [6] (英)约翰·莫布雷. 以可靠性为中心的维修[M]. 第 2 版. 康建设, 何耀欣, 译, 北京: 军械工程学院, 2002: 1138-1140.