

Research on the Optimization of False Alarms in High Radioactivity Monitoring Channel of Primary Coolant in Nuclear Power Plant

Xiuhe Yang

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong, 529228, China

Abstract

This paper takes the optimization of high radioactivity monitoring channel of primary coolant in a nuclear power plant as the research content. On the basis of summarizing the high radioactivity monitoring channel of primary coolant in a nuclear power plant, it analyzes the necessity and scheme of the optimization of high radioactivity monitoring channel of primary coolant. Finally, it analyzes the safety of the optimization of high radioactivity monitoring channel of primary coolant, and provides experience reference for the design optimization of high radioactivity monitoring channel of primary coolant in other nuclear power plants.

Keywords

nuclear power plant; primary coolant; high radioactivity; measuring channel; optimal design

核电站一回路冷却剂高放射性监测通道误报警优化研究

杨秀河

台山核电合营有限公司, 中国·广东 江门 529228

摘要

论文以一核电站一回路冷却剂高放射性监测通道误报警的优化为研究内容, 在对核电站一回路冷却剂高放射性监测通道进行概述的基础上, 分析了一回路冷却剂高放射性监测通道误报警优化的必要性和方案, 最后对一回路冷却剂高放射性监测通道优化后的安全性进行分析以及为其他核电站一回路冷却剂高放射性监测通道的设计优化提供经验参考。

关键词

核电站; 一回路冷却剂; 高放射性; 监测通道; 优化设计

1 引言

核电站的应用, 能够有效保障区域内的电能供应。但随着应用时间增加, 其设备控制优化的需求逐渐增加。其中, 一回路冷却剂高放射性监测通道的功能, 能够在线连续监测一回路冷却剂的放射性, 从而监测到燃料包壳的完整性。当监测到因燃料包壳破损导致一回路冷却剂高放射性时, 会自动隔离 RCV 系统和 REN 系统与一回路冷却剂相连接的管线, 阻止高放射性的一回路冷却剂经 RCV 系统和 REN 系统管线泄漏释放到反应堆厂房外。因此, 对一回路冷却剂高放射性监测通道误报警进行优化改良, 能够更准确地监测一回路冷却剂高放射性, 更准确地实现动作隔离 RCV 和 REN 系统管线, 为核电站一回路冷却剂高放射性监测通道的准确应用奠定扎实基础。

2 项目背景

一核电站机组自商运以来不久, 一回路冷却剂高放射性监测通道仪表 KRT2411/2412MAI 共发生四次超阈值报警, 自动隔离 RCV 系统下泄管线、主泵 1 号轴封回流管线和 REN 系统一回路取样管线, 但主泵轴封水持续注入, 稳压器 (PZR) 水位失去控制, 存在 PZR 高水位跳堆风险。根据现场报警问题出现, 对其报警原因进行深入分析探究可知, 三次超阈值报警为非燃料包壳破损的报警, 报警原因是 REN 系统管线内活化腐蚀产物随水流迁移经过仪表 KRT2411/2412MAI 测量管线引发报警并联动, 另外一次是由于设备故障触发超阈值误报警。因此, 针对活化腐蚀产物沉积、迁移和尖峰脉冲信号 (冒大值) 等可能触发一回路冷却剂高放射性监测通道 (KRT2411/2412MAI) 非燃料包壳破损真实报警的问题, 核电站启动一回路冷却剂高放射性监测通道的改造计划^[1]。

【作者简介】杨秀河 (1980-), 男, 侗族, 中国贵州黔东南人, 本科, 工程师, 从事核电站设计改造研究。

3 优化改造必要性

通过对核电厂故障报警情况的分析, KRT2411/2412MAI 非燃料包壳破损真实报警的直接原因是活化产物的沉积和迁移, 根本原因是一回路冷却剂高放射性监测的设计存在缺陷。首先, KRT2411/2412MAI 测量的 REN 系统管线管径较小 REN2231/2233TY 的公称直径仅为 DN8, 且水平低位布置如图 1 所示, 容易造成活化腐蚀产物沉积, 触发超阈值报警。其次, KRT2411MAI 和 KRT2412MAI 冗余设计, 满足单一故障准则, 但其报警逻辑设计 (1/2 逻辑) 存在易误联动的风险。最后, KRT2411/2412MAI 的超阈值报警信号未做延迟, 高放射性活化腐蚀热粒子迁移和尖峰脉冲信号 (最大值) 容易触发瞬时超阈值报警信号。因此, 针对活化腐蚀产物沉积、高放射性热粒子迁移、监测设备的尖峰脉冲 (最大值), 均可触发 KRT2411MAI 和 KRT2412MAI 非燃料包壳破损真实报警的问题, 有必要对一回路冷却剂高放射性监测的设计进行改进, 才能彻底解决现场问题。

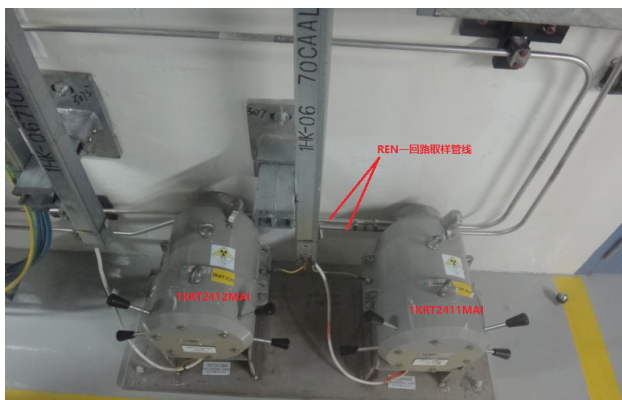


图 1 KRT2411MAI/KRT2412MAI 布置

4 优化改造方案

论文提出的一核电站一回路冷却剂高放射性监测通道优化改造方案, 主要改造目标为解决因活化腐蚀产物沉积、高放射性热粒子迁移和尖峰脉冲信号 (最大值) 触发一回路冷却剂高放射性监测通道非燃料包壳破损真实报警的问题。针对 KRT 系统一回路冷却剂高放射性监测存在的设计缺陷, 在满足改造基本原则的前提下, 从增加 RCV 下泄管线剂量率监测通道 KRT2421/2422MAI、优化 KRT2411/2412MAI 布置、报警信号延时设置和改进报警逻辑及报警信息四个方面对一回路冷却剂高放射性监测进行改进。

4.1 增加 RCV 下泄管线剂量率监测

RCV 系统下泄管线管径较大 (公称直径为 DN150), 活化腐蚀产物沉积不易沉积, 对一回路冷却剂高放射性监测的影响较小, 同时考虑仪表测量布置的多样性, 防止共模故障导致不能真实测量一回路冷却剂高放射性, 因此在 RCV 下泄管线增加剂量率监测通道 KRT2421/2422MAI 如图 2 所示, 在线连续监测 RCV 系统下泄管线内一回路冷

却剂产生的 γ 剂量率, 实现一回路冷却剂高放射性监测, KRT2421/2422MAI 与 KRT2411/2412MAI 共同执行一回路冷却剂高放射性隔离功能^[2]。

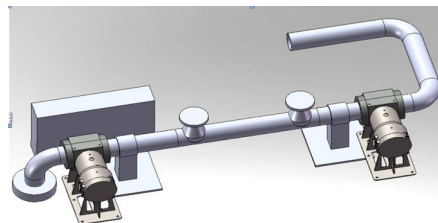


图 2 KRT2421/2422MAI 探测器布置

4.2 优化 KRT2411/2412MAI 的布置

KRT2411/2412MAI 测量位置为水平低位布置管线, 活化腐蚀产物易沉积, 影响测量结果准确性, 容易触发非燃料包壳破损真实报警。为了减少活化腐蚀产物沉积的影响, 将 KRT2411/2412MAI 测量位置调整至垂直管线上, 如图 3 所示, 并优化 REN2231/2233TY 的布置。

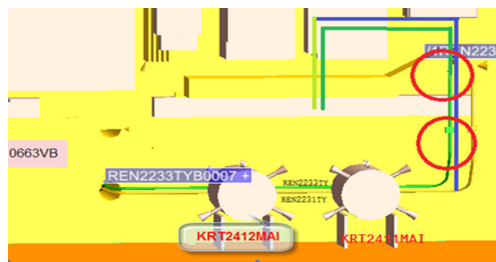


图 3 REN 管线优化布置示意图

同时为减少活化腐蚀产物在 REN 系统管线内的沉积, 在 KRT2411/2412MAI 测量位置上游的 REN 系统管线上设置排污阀和排污管线, 机组停堆期间对 REN 系统管线进行去污, 去污水排至 RPE 系统。

KRT2411MAI 和 KRT2412MAI 布置位置调整后, 其测量对象未变化, 安全功能分级和仪控分级未变化。按照抗震分级 SC1-O 的要求, 制造符合该抗震分级要求的抗震支架支撑两个监测通道的探测器, 保证 KRT2411MAI 和 KRT2412MAI 抗震分级满足 SC1-O 要求。

4.3 报警信号延时设置

一回路冷却剂高放射性监测通道 (KRT2411/2412MAI 和 KRT2421/2422MAI) 超阈值报警信号设置 5s 延时, 可以有效解决高放射性活化腐蚀热粒子迁移和尖峰脉冲信号 (最大值) 容易触发瞬时超阈值报警信号的问题, 同时增加 5s 延时将增加高放射性一回路冷却剂经 RCV 系统和 REN 系统管线向反应堆厂房外的释放量, 但对核岛厂房内辐射防护影响和公众产生影响有限。

当发生燃料包壳破损时, 高放射性的一回路冷却剂通过 RCV 系统下泄管线迁移至燃料厂房和核辅助厂房的放射性总活度不超过 $1.76E+10Bq$ (惰性气体贡献最大), 通过 REN 系统一回路取样管线迁移至燃料厂房和核辅助

厂房的放射性总活度不超过 1.06E+08Bq (惰性气体贡献最大)。保守假定 REN 管道和 RCV 管道 (前置过滤器 RCV2130FI、RCV2150FI- 和 RCV2170FI- 上游的 RCV 主管道) 内放射性流体均为 0.25% 燃料包壳破损条件下一回路冷却剂源项, 采用点核积分计算程序 Microshield 7.02 计算得到管道内放射性流体所致剂量率满足管道所在房间辐射分区的要求。

在发生燃料包壳破损时, 一回路冷却剂高放射性浓度监测通道 (KRT2411/2412MAI 和 KRT2421/2422MAI) 的报警信号延时 5s, 高放射性的一回路冷却剂将通过 RCV 系统下泄管线和 REN 系统一回路取样管线从反应堆厂房迁移到燃料厂房。同时考虑叠加 REN 系统和 RCV 系统管道破裂, 发生安全壳外一回路冷却剂的管线破裂事故时, 增加了向环境的放射性物质释放量, 在 60min 释放量基础上增加约 0.14%, 放射性物质释放量增加比例非常少, 对公众产生的剂量增加可忽略不计。

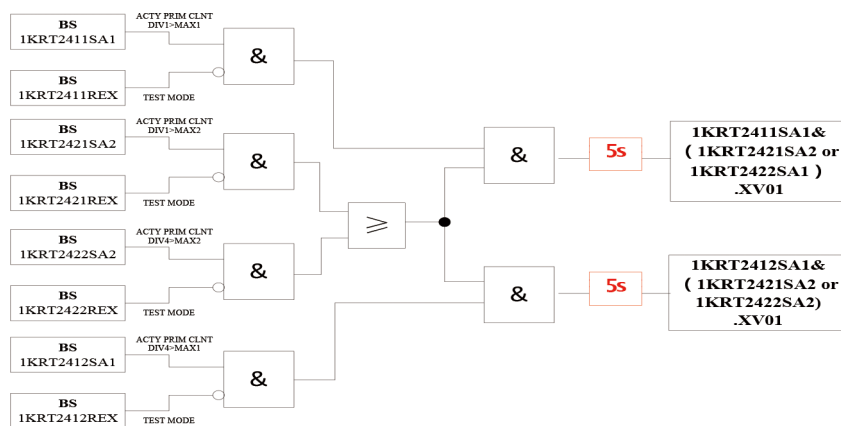


图 4 报警逻辑简图

5 结论

针对一回路冷却剂高放射性监测原设计方案存在的问题, 改造方案增加 RCV 下泄管线剂量率监测通道 KRT2421/2422MAI、优化 KRT2411/2412MAI 布置、报警信号延迟设置和改进报警逻辑及报警信息。改造方案采用相互独立, 多样化的两组监测通道执行一回路冷却剂高放射性监测的安全功能, 能够消除一回路冷却剂高放射性监测原设计的缺陷, 提高一回路冷却剂高放射性监测通道的可靠性, 解决因活化腐蚀产物沉积、高放射性热粒子迁移和尖峰脉冲信号 (最大值) 触发一回路冷却剂高放射性监测通道非燃料包壳破损真实报警的问题, 消除由此引发的跳堆风险。改进后一回路冷却剂高放射性监测通道 (KRT2411/2412MAI 和 KRT2421/2422MAI) 执行的安全功能与原设计一致。改进后两组监测通道的安全功能分级为 F1B、仪控分级为 E1B、抗震分级为 SC1-O, 与原设计方案一致, 并满足单一故障准则。改进后一回路冷却剂高放射性监测通道的超阈值报警信号延迟 5s, 因为高放射性一回路冷却剂经 RCV 系统和 REN

4.4 改进报警逻辑及报警信息

根据改进目标与原则, 改进后的报警逻辑实现一回路冷却剂高放射性监测功能, 执行 REN 系统一回路取样管线和 RCV 系统下泄管线自动隔离功能。改进后满足 F1B 安全功能分级和 E1B 仪控分级要求, 改进后一回路冷却剂高放射性监测通道实现逻辑为 KRT2421MAI 二级报警信号与 KRT2422MAI 二级报警信号先做或逻辑, 再与 KRT2411MAI 一级报警信号做与逻辑, 然后将报警信号延时 5s 处理, 产生信号 KRT2411SA1&(KRT2421SA2 or KRT2422SA2).XV01; KRT2421MAI 二级报警信号与 KRT2422MAI 二级报警信号先做或逻辑, 再与 KRT2412MAI 一级报警信号做与逻辑, 然后将报警信号延时 5s 处理, 产生信号 KRT2412SA1&(KRT2421SA2 or KRT2422SA2).XV01, 信号 KRT2411SA1&(KRT2421SA2 or KRT2422SA2).XV 和 KRT2412SA1&(KRT2421SA2 or KRT2422SA2).XV01 执行 REN 系统一回路取样管线和 RCV 系统下泄管线自动隔离功能。改进后的逻辑简图如图 4 所示。

系统管线迁移至燃料厂房与核辅助厂房产生的放射性后果影响很小, 电厂可接受。同时考虑叠加工况在发生安全壳外一回路冷却剂的管线破裂事故时, 向环境的放射性物质释放量对公众产生的剂量增加可忽略不计^[3]。

综上所述, 一回路冷却剂高放射性监测通道改造方案不仅不会降低原设计安全功能和原设计的安全功能分级、仪控分级和抗震分级, 也不会造成高放射性一回路冷却剂释放到安全壳外对厂内工作人员和厂外公众带来不可忽视的辐射风险, 改造方案提高了一回路冷却剂高放射性监测的可靠性, 一定程度上提升了机组的安全性。

参考文献

- [1] 李中, 郑素红, 洪远进. 一种单通道多个区域在线放射性监测设备在田湾核电的原有[J]. 中国核科学技术进展报告, 2021(2):37-41.
- [2] 李大庆. 通道式核辐射监测系统在口岸放射性监测中的应用[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2019, 32(5):432-434.
- [3] 冯梅, 唐智辉, 韦应靖, 等. 通道式车辆放射性监测系统的性能测试研究[J]. 中国测试, 2021(1):193-197.