

融合华龙一号技术规格书优化研究

Research on the Optimization of Integrated Hualong NO.1 Technical Specification

张帅 陈瑜

Shuai Zhang Yu Chen

中广核惠州核电有限公司 中国·广东 惠州 516003

CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516003, China

摘要: 融合华龙一号作为三代先进压水堆核电机组,其事故分析包络了全范围事故工况,相比 CPR1000 机组,将乏燃料水池相关事故以及低温低压下一回路破口类事故作为设计基准事故,导致技术规格书 TS 管理过于严格。通过分析以上两大问题说明融合华龙一号技术规格书对机组大修工期及运行灵活性的影响,给出目前的解决方案。

Abstract: As a third-generation advanced pressurized water reactor nuclear power unit, the accident analysis of Hualong No. 1 covers the full range of accident conditions. Compared with CPR1000 units, accidents related to spent fuel pools and primary circuit breaches under low temperature and low pressure are taken as design reference accidents, resulting in excessively strict management of technical specification TS. Through the analysis of the above two problems, the influence on the NPP overhaul period and operation flexibility is illustrated, and the current solution is given.

关键词: 技术规格书;乏燃料水池;大修工期;解决方案

Keywords: TS; spent fuel pool; overhaul period; solutions

DOI: 10.12346/etr.v3i11.4657

1 引言

华龙一号是中广核集团和中核集团在 ACPR1000 + 和 ACP1000 基础上进行充分研究论证和优化,共同开发、自主创新的第三代百万千瓦级压水堆核电机组。2017年4月,华龙国际积极实施国家核电发展战略,致力于持续融合华龙一号自主三代核电技术,正式形成了融合华龙一号技术方案,采用能动和非能动相结合。设计上将福岛核事故后的经验反馈充分融入设计中,设计基准事故分析包络了全范围事故工况,其中包括乏燃料水池相关事故以及低温低压下破口类事故。该设计一方面提升了设计的保守性,拓宽了电厂事故处理的覆盖面;但是另一方面,其验收准则关系着核电厂安全系统设计、大修工期、运维管理,导致技术规格书管理过严,影响了机组的整体经济性。根据目前设计现状,通过调研国内外法规标准和其他堆型的工程实践,对以上两个问题进行分析,并给出解决方案。

2 技术规格书要求

融合华龙一号技术规格书对部分设备要求过于严格,应急柴油机、冷源、电气盘只能在反应堆完全卸料时逐列检修,主控室冷却系统制约着电气盘 A/B 列检修,乏池液位保护仪控机柜没有检修窗口。根据设备维修大纲及设备检修工期,初步分析年度大修工期基本在 40 天以上,不满足《华龙一号核岛系统设计和建筑规则》中正常换料大修不超过 25 天的设计值,同时对比 CPR1000 机组平均大修工期约 28 天,可见其经济性偏低,灵活度大大降低,机组的可用率受到一定的影响。

3 乏燃料水池相关事故分析

国家核安全局 NNSA 发布的 HAD301-02《乏燃料贮存设施的设计》^[1] 2.1.4 规定:通常是首先将乏燃料在反应堆水池内贮存一段时间,然后将他们转移到乏燃料中间贮

【作者简介】张帅(1988-),男,中国河北保定人,本科,工程师,从事核电运行研究。

存实施。在反应堆水池这段初始贮存时间内，挥发性放射性核素的数量、辐射场的强度和预热的产生量都有相当大的衰减。这使得在乏燃料贮存设施内导致事故的各种条件的形成过程相对变慢，在他们达到极限条件之前有足够的时间采取纠正行动，从而使得乏燃料装卸和贮存操作的安全无需依赖于复杂的自动保护系统。

融合华龙一号基于 HAF102—2016《核动力厂设计安全规定》^[2]5.1.4 的规定：必须使用系统化的方法确定一套全面的假设始发事件，以在设计中考虑所有可预见的具有严重后果的事件和发生频率高的事件。故将乏池事故作为基准事故进行分析。经调研其他核电厂，各堆型对乏池事故的定位不一，但大部分堆型未将乏池事故纳入设计基准工况清单，例如：

① AP1000 的设计基准工况清单中未考虑乏池事故，但在乏池系统设计中考虑了乏池冷却失效的情况，并为其配置了安全级的补水手段（冲洗池水源，PCCWST 水源）。其验收准则为补水保证乏燃料淹没。

② EPR 设计基准工况清单中未考虑乏池事故，但在乏池系统设计中考虑了乏池冷却失效的情况，并为其配置了三列安全级冷却，可以进行非安全级的能动补水。其验收准则为控制乏池温度。

③ CPR1000 的设计基准工况清单中未考虑乏池事故，其安全级缓解手段为冷却，其配置两列安全级冷却，同时 RRI 冷源侧通过母管供冷，在全部失冷条件下，有能动的非安全级补水。其验收准则为控制乏池温度。

由以上分析，乏池事故相对较慢，事故风险较低，根据 IAEA SSG—2^[3] 的规定，对于总风险贡献比较小时，始发事件中可以不考虑。另外，中国其他堆型在设计基准事故中并未纳入乏池事故工况。因此，建议从设计基准事故工况清单中移除，当前的乏池补水及冷却系统配置仍保留，从而释放机组运维的灵活性。

4 低温低压下一回路破口类事故分析

对于破口类事故，美国 NRC 发布的 NUREG 0800 3.6.2^[4] 节 Section B 规定：安全壳贯穿区域的中能管道在某些情况下可不需假设破裂，与应用 LBB 高能管道相连的中能管道不需假设破裂。NUREG 1431—2012 3.5 节规定：对模式 5 和模式 6 下应急冷却系统的可用情况不作要求，意即不假设模式 5、模式 6 情况下的破口事故（模式 5、模式 6 对应的一回路平均温度低于 90℃）。

融合华龙一号机组将冷停堆及装卸料期间的一回路破口

和余热排出管线连接期间的 RHR 管道破口作为设计基准事故，另外，该事故分析与其他设计基准工况分析相同，采用保守的分析方法，即考虑始发事件叠加单一故障。停堆工况下一回路压力 < 2MPa.g，温度 < 90℃，这些管道的温度压力条件相比电厂功率运行期间要低很多，定性判断诱发破口的可能性低于功率运行工况。由上分析，低温低压状态下的破口类事故不论从诱发机理还是验收准则均过于保守，不仅影响了系统设备的设计，还影响了电厂的运维管理、大修排期，削弱了电厂经济性及运维灵活性。根据国际 NUREG、10CFR 等标准和 AP1000、中国其他核电技术等三代堆型的工程实践，对低温低压条件下管道破口不作要求。因此，建议将该事故移出设计基准事故工况清单。

5 技术规格书优化

根据以上分析，若两个事故工况不作为设计基准事故，对电厂的各系统的影响较大，对运维灵活性及大修工期均有较大的贡献，如表 1 所示。

表 1 工况优化后对技术规格书的影响分析

系统或功能	优化前	优化后
乏池冷却	三列	无要求
柴油机	两列	无要求
配电盘	三列	无要求
冷源	三列	无要求
仪控保护	两列保护组，三列专设	无要求
ASG/VDA	模式 5、6：两列	无要求
中压安注	模式 4、5、6：三列	模式 5、6：两列
RRI/SEC	模式 5、6：三列	模式 5、6：两列
安全壳	模式 5：安全壳及安全壳隔离	无要求

6 结语

技术规格书优化后乏池相关冷却功能则不在技术规格书中管理，对维修灵活性和大修工期贡献很大，以上功能在技术要求手册中管理，不考虑单一故障准则，可通过大修再供电等临时措施替代，管理则较为宽松。对于低温低压下一回路破口类事故，部分功能有所放松，增加了机组运维灵活性。

参考文献

- [1] 国家核安全局.HAD301/02 乏燃料贮存设施的设计[S].
- [2] 国家核安全局.HAF102—2016核动力厂设计安全规定[S].
- [3] IAEA, SSG-2. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants[Z].2012.
- [4] U.S. NRC, NUREG—0800,Standard Review Plan[Z].2007.