

文章编号: 0258-0926(2016)S1-0026-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0026

田湾核电厂 3、4 号机组 JNA、FAK 衰变余热导出功能分析

罗 峰, 曾小康

中国核动力研究设计院反应堆工程研究所, 成都, 610213

摘要: 采用热负荷保守计算的方法对燃料组件变更后田湾核电厂 3、4 号机组堆芯余热导出系统 (JNA)、乏燃料水池冷却系统 (FAK) 导出衰变余热的能力进行评价。评价结果表明, 田湾核电厂 3、4 号机组 JNA 现有设计可以满足正常工况、预期运行事件和事故工况下导出堆芯衰变余热的能力要求, FAK 乏燃料水池容量满足乏燃料组件存放的要求, FAK 现有设计满足导出乏燃料水池衰变余热的能力要求。

关键词: 田湾核电厂; 燃料组件; 乏燃料水池; 衰变余热

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A

Analysis on Removing Ability of Decay Residual Heat of JNA、FAK System of Third and Fourth Unit in Tianwan Nuclear Power Plant

Luo Feng, Zeng Xiaokang

Nuclear Reactor Engineering Institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Based on the heat load method, an analysis is performed for the removing ability of decay residual heat of core and spent fuel pool of core decay heat recovery circuit (JNA)、spent fuel pool cooling system (FAK) of The Third and Fourth Unit in Tianwan Nuclear Power Plant after the modification of fuel assembly. The results show that the removing ability of decay residual heat of JNA system of The Third and Fourth Unit in Tianwan Nuclear Power Plant could satisfy the need of removing of decay residual heat under normal condition, anticipated operating condition and accident condition. It is also pointed out that the ability of FAK system can satisfy the need of removing of decay residual heat of spent fuel pool.

Key words: Tianwan nuclear power plant, Fuel assembly, Spent fuel pool, Decay residual heat

0 引言

田湾核电厂 3、4 号机组以一期工程为参考堆型, 采用“翻版加改进”的原则进行设计。核岛继续采用俄罗斯设计制造的轻水冷却反应堆 (VVER-1000/428 型反应堆), 核安全系统设计基本不变; 首循环装载采用铀钚一体化先进燃料组件 (AFA); 循环长度 306 等效满功率天 (EFPD)。初步安全分析报告 (PSAR) 已获得

核安全局批准。考虑到改进型燃料组件 (TVS-2M 组件) 抗辐照、抗变形、刚性等各方面的性能优于 AFA 组件, 田湾核电厂 3、4 号机组从首循环开始装载 TVS-2M 型组件, 仍采用年换料。

与 AFA 组件相比, TVS-2M 组件增加了铀装量, 燃料棒活性区两端增长以及芯块外径增加、芯块中心孔减小。田湾核电厂 3、4 号机组堆芯燃料组件从 AFA 组件更换为 TVS-2M 组件后, 堆芯

衰变余热和乏燃料水池衰变余热都有所变化，必然影响堆芯衰变余热和乏燃料水池衰变余热导出的相关系统，包括反应堆堆芯余热导出系统（JNA）、乏燃料水池冷却系统（FAK）。

由于燃料组件变更为核电站重大改动项^[1]，核电站必须向核安全局提交相应的安全论证材料。本文采用热负荷保守计算法计算 JNA 和 FAK 所需导出的衰变余热，并与该系统的换热器换热功率设计值进行比较，验证 JNA 和 FAK 现有设计是否满足衰变余热导出要求。

1 论证原始数据

表 1 给出了用于安全分析的 TVS-2M 堆芯和 AFA 堆芯衰变余热随时间的变化，反应堆堆芯额定热功率（FP）为 3000 MW，采用年换料循环。从表 1 中可以看出，停堆 1 s 后，TVS-2M 堆芯衰变余热大于 AFA 堆芯衰变余热，最大偏差为 0.17% FP，即 5.2 MW。

表 1 TVS-2M 和 AFA 堆芯衰变余热变化
Table 1 Core Decay Heat of TVS-2M and AFA

时间/s	堆芯衰变余热/%FP	
	AFA 堆芯	TVS-2M 堆芯
1.00	7.2109	7.3844
2.00	7.0148	7.019
10.00	5.3813	5.5222
100.00	3.5167	3.6124
1000.00	2.1871	2.2686
10000.00	1.1094	1.1504
100000.00	0.5854	0.6323

按照换料规程，田湾核电站 3、4 号机组堆芯装载 AFA 组件循环结束后计划换料的燃料组件为 55 组，而装载 TVS-2M 组件计划换料的燃料组件为 49 组。表 2 给出了用于安全分析的 TVS-2M 单个乏燃料组件和 AFA 乏燃料组件衰变余热随时间的变化。从表 2 中可以看出，田湾核电站 3、4 号机组装载 TVS-2M 组件后单个乏燃料组件的衰变余热大于等于装载 AFA 组件单个乏燃料组件的衰变余热，在乏燃料水池存放 3~10 a 后，两者的偏差较大，最大偏差为 0.18 kW。

2 JNA 功能论证

在正常运行工况、预期运行事件和设计基准事故工况下，需要由 JNA 导出的热量包括堆芯衰变余热、反应堆装置以一定速率进行冷却时所需导出的热量以及反应堆主泵的热量。JNA 功能论

表 2 TVS-2M 和 AFA 乏燃料组件衰变余热变化

Table 2 Decay Heat of TVS-2M and AFA Spent Fuel Assembly

放置时间	单个乏燃料组件衰变余热/kW	
	AFA 组件	TVS-2M 组件
3 d	86.4	86.4
30 d	33.2	33.2
1 a	6.9	7
2 a	3.7	3.7
3 a	2.5	2.53
4 a	1.8	1.8
5 a	1.4	1.41
6 a	1	1.33
7 a	1	1.1
8 a	1	1.02
9 a	1	1.06
10 a	1	0.92

证的内容是分析田湾核电站 3、4 号机组装载 TVS-2M 组件在不同工况下 JNA 的热负荷是否超过了安全壳喷淋系统（JMN）换热器的设计值。

2.1 正常运行工况

在正常运行工况和预期运行事件下，反应堆停堆后计划冷却和应急冷却期间，当一回路温度降至 150 ℃ 以下和一回路压力降至 2 MPa 以下，JNA 投入，按计划冷却工况导出堆芯衰变余热。

在正常运行计划冷却工况下，反应堆处于热态停堆时，一回路冷却剂温度以 30 ℃/h 的冷却速率下降到 150 ℃，冷却方式为汽轮机旁排，冷却所需时间大约 5.5 h。那么，JNA 接入一回路开始导出堆芯余热的时间大约为停堆后 5.5 h。

田湾核电站 3、4 号机组 TVS-2M 堆芯 JNA 投入时刻的释热源包括：

（1）根据表 1 插值可得，田湾核电站 3、4 号机组 TVS-2M 堆芯停堆 5.5 h 后堆芯余热 28.9 MW。

（2）2 台主泵工作释放的热量为 11.04 MW，按照计划冷却运行序列，在 JNA 接入到一回路时反应堆一回路 2 台主泵已停运，运行的主泵数目不大于 2 台。

（3）以 30 ℃/h 冷却速率冷却反应堆装置，从管壁金属和冷却剂中导热 38.3 MW。

因此，JNA 投入时刻热负荷为 78.24 MW。为了保证以 30 ℃/h 冷却速率冷却反应堆装置，必须投入 JNA 3 个系列。每个系列的热负荷为 26.08 MW，小于 JNA 换热器在接入时刻的换热功率设计值（37.6 MW）。如将反应堆装置的冷却速率降低，以较低的速率进行冷却，则投入 JNA 2 个

系列可实现冷却。

在停堆 36 h 后,一回路压力、温度基本稳定, JNA 导出的热量主要为堆芯衰变余热。由表 1 可见,停堆后 36 h 堆芯衰变余热为 17.6 MW,由 JNA 2 个系列投入冷却,每个系列的热负荷为 8.8 MW,小于 JNA 换热器在长期冷却阶段的换热功率设计值 (15.3 MW)。

2.2 预期运行事件

在预期运行事件下,反应堆的结构和裂变产物屏障未被破坏,反应堆装置可通过停堆来消除预期运行事件的影响。在停堆过程中,反应堆装置可能处于加速冷却,若操作程序要求以 60 /h 的速率将反应堆装置从热态停堆加速冷却至 150 ,所需时间大约 2.7 h,那么 JNA 投入时刻为停堆后 2.7 h。在 JNA 投入时刻,假设辅助给水系统等冷却系统停止运行,那么 JNA 的热源包括了堆芯衰变余热、反应堆主泵热量和反应堆装置以一定速率冷却所需排出的热量,具体为:

(1) 根据表 1 插值可得,田湾核电站 3、4 号机组 TVS-2M 堆芯停堆 2.7 h 后堆芯余热 34.5 MW。

(2) 预期运行事件中, JNA 投入时刻,4 台主泵可能已全部断电停运,保守计算,假设主泵按照计划冷却的序列运行,那么 JNA 投入时刻,2 台主泵运行,2 台主泵工作释放的热量 11.04 MW。

(3) 以 30 /h 冷却速率冷却反应堆装置,从金属和冷却剂中导热 38.3 MW。

因此, JNA 投入时刻热负荷为 83.84 MW。为了保证以 30 /h 冷却速率冷却反应堆装置,必须投入 JNA 3 个系列,每个系列的热负荷为 27.95 MW,小于 JMN10(20,30,40) 换热器(AC001) 在 JNA 投入时刻的设计值 (37.6 MW)。

2.3 设计基准事故工况

在设计基准事故工况下,高压安注系统 (JND)、中压安注系统 (JNG2)、低压安注系统 (JNG1)、应急给水系统 (LAR)、应急注硼系统 (JDH)、核岛设备冷却水系统 (KAA) 等安全系统相继投入,参与停堆后堆芯应急冷却,一回路压力、温度加速下降。按照操作规程,当一回路温度低于 150 和一回路压力低于 2 MPa 时,4 个系列 JNA10(20,30,40) 的泵和换热器

全部投入运行,按计划冷却工况堆芯衰变余热排出回路导出堆芯余热。若是发生失水事故,进入到 JNA 换热器的循环冷却水不仅有 JNA 管线提供的一回路冷却剂,还有通过 JNG1 管线从安全壳地坑抽取的硼酸溶液。

由于田湾核电站安全系统遵循事故发生后 30 min 不干预原则,安全系统在设计上可以保证投入后 30 min 内在不要求操作员干预的情况下系统可实现设定的安全功能;而根据事故操作规程, JNA 是在事故发生后各种安全系统相继投入以后使一回路压力、温度在 2 MPa 和 150 以下时由操作员手动投入或切换。因此, JNA 的投入时刻是在停堆 30 min 以后。按照各种设计基准事故的响应序列,在 JNA 投入时刻,4 台反应堆主泵已停运,需由 JNA 导出的热量不包括主泵运行产生的热量。那么,在设计基准事故下, JNA 导出的热源包括:

(1) JNA 投入时刻的堆芯衰变余热,应小于 3、4 号机组 TVS-2M 堆芯停堆后 30 min 的堆芯衰变余热 (57.8 MW)。

(2) 保守计算,假设 JNA 以 60 /h 的冷却速率对反应堆装置进行加速冷却,从管壁金属和冷却剂中导出热量 76.6 MW。

事故工况下 JNA 投入时刻的热负荷小于 134.4 MW。事故时, JNA 的 4 个系列均投入运行,1 个系列的热负荷小于 33.6 MW,小于 JNA 换热器在事故工况下的换热功率设计值 (37.5 MW)。

综上, JNA 现有设计可以满足正常工况、预期运行事件和事故工况下导出堆芯衰变余热的能力要求。

3 FAK 功能论证

FAK 用于存放从堆芯卸出的乏燃料组件,导出乏燃料水池的衰变余热。乏燃料水池存放乏燃料组件的情况主要分为 3 类:计划换料无全堆芯卸料、计划换料加全堆芯卸料、紧急卸料。

由于乏燃料组件在水池最长存放 10 a,考虑极限情况,第 11 次计划换料刚结束(停堆后 30 d) 反应堆处于功率运行时,要求紧急取出堆芯的全部燃料组件并存放至乏燃料水池;则存放的乏燃料组件数目为 $49 \times 11 + 163 = 702$,小于 FAK 乏燃

料水池的容量 (706)。

根据 3、4 号机组装载 TVS-2M 组件的换料操作规程, 机组运行 11 a 后燃料水池的热负荷可达到最大。结合表 2 可得:

(1) 计划换料且无全堆芯卸料时, 乏燃料水池的热负荷最大值为 5.31 MW, 对应第 11 次计划换料停堆后 3 d 的乏燃料水池总释热量。

(2) 计划换料且全堆芯卸料时, 乏燃料水池的热负荷最大值为 15.15 MW, 对应第 11 次计划换料时发生全堆芯卸料停堆后 3 d 的乏燃料水池总释热量, 等于第 11 次计划换料前乏燃料水池总释热量与停堆后 3 d 163 个乏燃料组件释热量之和, 即 15.15 MW。

(3) 紧急卸料时, 乏燃料水池的热负荷最大值为 16.78 MW, 对应第 11 次计划换料结束 (停堆后 30 d) 反应堆处于功率运行时发生紧急情况要求把全堆芯燃料卸装到乏燃料水池中, 乏燃料水池总释热量, 等于第 11 次计划换料停堆后 30 d 的乏燃料水池总释热量与停堆后 3 d 163 个乏燃料组件释热量之和, 即 16.78 MW。

(4) 功率运行期间, 乏燃料水池的热负荷最大值为 2.70 MW, 对应第 11 次换料停堆后 30 d 的乏燃料水池总释热量。

在计划换料且无全堆芯卸料工况和机组带功率运行工况下, FAK 投入一个系列 FAK10 或 FAK40 冷却乏燃料水池。根据设计, FAK10/40 AC001 的换热器功率设计值不小于 8.5 MW, 而计划换料且无全堆芯卸料工况下和机组带功率运行工况的乏燃料水池热负荷均小于 8.5 MW。

在计划换料工况且全堆芯卸料工况和全堆芯紧急卸料工况下, FAK 投入 2 个系列 FAK10 和 FAK40 冷却乏燃料水池。根据设计, 2 个系列可

导出的乏燃料水池余热设计值不小于 17 MW, 或投入一个系列 FAK10(40) 和一个系列 JNA20(30) 冷却乏燃料水池, 根据设计, 一个系列 FAK10(40) 和一个系列 JNA20(30) 可导出的乏燃料水池余热设计值不小于 21.5 MW, JNA 的 1 个系列在堆芯全部卸载的情况下, 协助 FAK 导出乏燃料水池约为 13 MW 的热量。

4 结 论

(1) 在燃料组件变更后, 田湾核电厂 3、4 号机组 JNA 现有设计可以满足正常工况、预期运行事件和事故工况下导出堆芯衰变余热的能力要求。在正常运行工况和预期运行事件下, JNA 的最大负荷分别为 78.24 MW 和 83.84 MW, 采用 JNA 3 个系列进行冷却, 每个系列的热负荷小于设计值 37.6 MW。在事故工况下, JNA 的热负荷小于 134.4 MW, 投入 JNA 全部的 4 个系列进行冷却, 每个系列的热负荷 33.6 MW 小于设计值 (37.5 MW)。

(2) 燃料组件变更后, FAK 乏燃料水池容量满足乏燃料组件存放的要求, FAK 现有设计满足导出乏燃料水池衰变余热的能力要求。乏燃料水池热负荷为: 计划换料且无全堆芯卸料工况下, 不大于 5.3 MW; 机组带功率运行工况下, 不大于 2.7 MW; 计划换料工况且全堆芯卸料工况下, 不大于 15.2 MW; 全堆芯紧急卸料工况下, 不大于 16.8 MW。上述热负荷均小于设计值。

参考文献:

[1] 朱继洲, 单建强, 张斌. 压水堆核电厂的运行[M]. 北京: 原子能出版社, 2008.

(责任编辑: 张明军)