



·蒙特卡罗方法及其应用·

国和一号 (CAP1400) 首循环堆芯启动物理 试验高保真模拟分析*

彭良辉¹, 杨波¹, 汤春桃¹, 费敬然¹, 毕光文¹, 杨伟焱¹,
沈芷睿², 肖维², 申靖文³, 刘鹏³, 张旻婉⁴

(1. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233; 2. 上海交通大学核科学与工程学院, 上海 200240;
3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 4. 西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049)

摘 要: 为了避免启动物理试验参数预测值不准确, 影响电厂调试启动, 可利用数值反应堆对启动物理试验参数进行精准预测。使用 CAP1400 数值反应堆系统中的蒙特卡罗粒子输运程序 JMCT、确定论高保真模拟程序 NECP-X 及先进中子学程序 SCAP-N, 对 CAP1400 反应堆首循环堆芯进行建模, 开展启动物理试验高保真模拟。数值结果表明, 以 JMCT 程序为参考, NECP-X 程序与 SCAP-N 程序对于灰棒组价值的绝对计算偏差在 $\pm 8 \times 10^{-5}$ 以内, 对于黑棒组价值的相对计算偏差在 $\pm 3\%$ 以内, 对于黑棒总价值的相对计算偏差在 $\pm 1\%$ 以内, 对于组件相对功率分布的相对计算偏差在 $\pm 2.5\%$ 以内, 各程序计算结果符合得很好, 可有效支撑反应堆的调试启动过程。

关键词: 数值反应堆; JMCT; NECP-X; SCAP-N; 启动物理试验

中图分类号: TL329⁺.2

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210372

Zero power physics test high fidelity simulation for first core of Guo He One (CAP1400) reactor

Peng Lianghai¹, Yang Bo¹, Tang Chuntao¹, Fei Jingran¹, Bi Guangwen¹, Yang Weiyang¹,
Shen Zhirui², Xiao Wei², Shen Jingwen³, Liu Peng³, Zhang Mingwan⁴

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Company Limited, Shanghai 200233, China;

2. School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

4. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To avoid inaccurate predicted values of zero power physics test (ZPPT) parameters, which will affect the commissioning and startup of the nuclear power plant, the numerical reactor can be used to accurately predict the ZPPT parameters. Based on the codes of the CAP1400 numerical reactor system, including the Monte Carlo code JMCT, the deterministic high-fidelity code NECP-X and advanced neutronics code SCAP-N, the CAP1400 first core was modeled to realize high-fidelity simulation of the ZPPT parameters. Numerical results show that the calculation results of the three high-fidelity simulation codes are in good agreement. Taking JMCT as a reference, the absolute deviations of NECP-X and SCAP-N for the gray control bank worth are within $\pm 8 \times 10^{-5}$, the relative deviations for the black control bank worth are within $\pm 3\%$, the relative deviations for the total worth of all the black control banks are within $\pm 1\%$, and the relative deviations for the assemble relative power are within $\pm 2.5\%$. The ZPPT parameters of the CAP1400 first core are accurately predicted, which can effectively support the commissioning and startup of the CAP1400 reactor.

Key words: numerical reactor; JMCT; NECP-X; SCAP-N; zero power physics test

随着计算机技术和现代数值仿真技术的发展, 以多物理场、多尺度耦合及高性能计算为特点的数值反应堆技术得到了迅速发展^[1], 代表项目包括美国的 CASL 项目^[2]与 NEAMS 项目^[3]、欧洲的 NURESIM 系列项目^[4]等。数值

* 收稿日期: 2021-08-27; 修订日期: 2021-10-09

基金项目: 大型先进压水堆及高温气冷堆核电站重大专项资助项目(2019ZX06002017)

联系方式: 彭良辉, penglianghai@snerdi.com.cn.

反应堆以高性能计算为基础,针对核反应堆内的真实物理过程,采用精确的物理模型、高保真的多物理耦合数值方法,进行精细化建模、分析、计算和模拟,为核反应堆的安全性和经济性分析提供一个全面、精细、稳定、可靠、高效的计算分析平台^[5]。从工程应用需求考虑,数值反应堆的计算精度、模拟分辨率及程序适用性均优于工业级核设计程序系统,数值反应堆在设计程序验证、设计结果校核及新型反应堆设计分析等方面均具有重要应用价值。

启动物理试验是反应堆运行调试的重要环节,启动物理试验参数预测值的准确性对于电厂调试启动至关重要。特别是对于首堆、首循环堆芯,此时并无历史实测数据进行参考,只能依靠设计程序自身的准确性。启动物理试验过程中,若设计程序预测值与电厂实测值偏差过大,将直接影响电厂正常启动、升功率等过程,进而造成较大的经济损失。为防止上述问题,可使用数值反应堆对启动物理试验进行高保真模拟分析。2014年,美国西屋公司等利用 CASL 项目研发的数值反应堆系统对 AP1000 反应堆首循环堆芯启动物理试验进行了高保真建模计算,给出了热态零功率(HZP)工况下的临界硼浓度、等温温度系数(ITC)、慢化剂温度系数(MTC)、多普勒温度系数(DTC)及控制棒组价值的高精度计算结果^[6]。2018年,三门1号 AP1000 反应堆机组商运,将电厂实测值与数值反应堆、工业级核设计程序系统计算结果进行对比分析,验证了数值反应堆系统计算结果的正确性,且计算精度高于工业级核设计程序系统。

国和一号(CAP1400)反应堆是我国自主化三代大型先进非能动压水堆,为实现其高保真计算分析,集合国内多家单位优势资源,联合研发了 CAP1400 数值反应堆系统。本文使用 CAP1400 数值反应堆系统,对 CAP1400 反应堆首循环堆芯进行建模计算,给出启动物理试验参数的高保真模拟结果,可有效支撑国和一号示范工程首堆调试启动过程。

1 CAP1400 反应堆启动物理试验高保真模拟

CAP1400 核电站是两环路非能动压水堆核电站,其堆芯设计中采用了经济灵活的堆芯燃料管理策略,具备低泄漏、高燃耗、长周期的特征;采用了先进的机械补偿运行模式,能够在堆芯大部分寿期内实现不调硼负荷跟踪。根据 CAP1400 反应堆堆芯的技术特征,自主研发了 CAP1400 数值反应堆系统,可实现堆芯多物理、多尺度高保真建模计算。

1.1 CAP1400 反应堆首循环堆芯方案

CAP1400 反应堆首循环堆芯采用了五种富集度燃料组件,分 A、B、C、D 和 E 五区布置,各区燃料组件平均富集度分别为 0.740%、1.600%、3.000%、3.776%、4.376%。堆芯装载方案如图 1(a)所示,包括燃料布置方案、整体型涂硼可燃毒物(IFBA)和通水环状可燃毒物(WABA)布置方案^[7]。较高富集度的燃料 D 和较低富集度的燃料 B 棋盘式布置在堆芯内区,最低富集度的燃料 A、较低富集度的燃料 C 以及个别燃料 B 交错装载在堆芯外围,最高富集度的燃料 E 装载在内区与外围之间的偏外区。此外,D 和 E 区燃料的燃料棒两端还设置 20.32 cm 的低富集度燃料再生区,用于抑制端部反应性,提高燃料利用率。使用 IFBA 和 WABA 可燃毒物展平堆芯功率分布和控制可溶硼

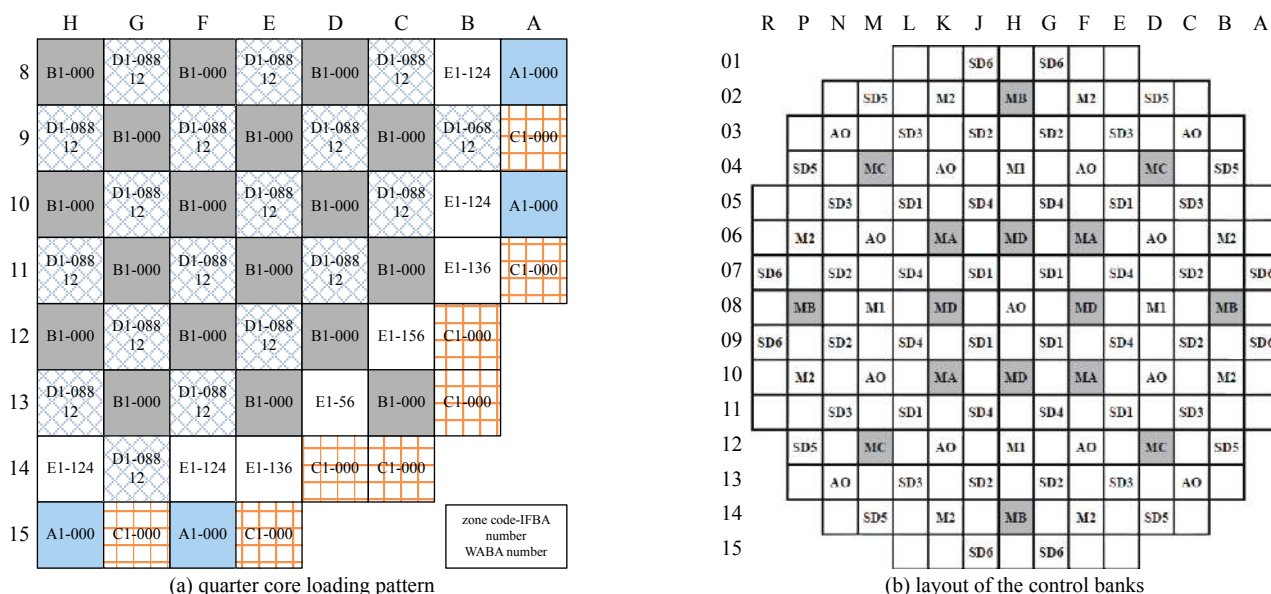


Fig. 1 The loading pattern of the CAP1400 first core

图 1 CAP1400 首循环堆芯装载方案

浓度水平。堆芯控制棒布置方案如图 1(b)所示,其中 MA 至 MD 为钨吸收体控制棒组(灰棒组),其余均为银-铟-镉(AIC)吸收体控制棒组(黑棒组)^[7]。CAP1400 反应堆采用机械补偿运行模式进行反应性和轴向功率分布控制,在整个运行功率范围内,利用 MA 至 MD 控制棒组维持设定的冷却剂平均温度,同时利用 AO 控制棒组控制轴向功率分布。

1.2 CAP1400 数值反应堆系统

根据 CAP1400 反应堆堆芯的技术特征,集合国内多家单位优势资源,联合研发了 CAP1400 数值反应堆系统,包括蒙特卡罗粒子输运程序 JMCT^[8-9]、确定论高保真模拟程序 NECP-X^[10-11]、先进中子学程序 SCAP-N^[12]、数值燃料棒程序 YUAN^[13]、先进子通道程序 SACOS^[14] 及相应的堆芯多物理、多尺度耦合模拟平台。本文主要使用 JMCT 程序、NECP-X 程序及 SCAP-N 程序对 CAP1400 反应堆首循环堆芯进行计算分析。

JMCT 是北京应用物理与计算数学研究所研发的高分辨率蒙特卡罗粒子输运程序,该程序能够模拟中子、光子、电子及其耦合输运问题,其主要技术特点如下:在支撑框架 JCOGIN^[9] 上开发,引入了区域分解和多层并行,满足反应堆全堆芯非均匀精细建模及计算需求;嵌入点燃耗模块,实现了输运-燃耗内耦合;可求解固定源问题和本征值问题;可采用连续能量或多能群截面模式;增加了丰富的减方差技巧,能够适用于多种复杂源问题的模拟;具备可视化输入输出功能。

NECP-X 是西安交通大学研发的确定论高保真模拟程序,可进行全堆芯真实几何下的中子输运、材料燃耗计算,其主要技术特点如下:针对全堆芯真实几何进行建模;采用压水堆优化的多群常数库;采用中子流和伪核素子群方法进行“全局-局部”耦合共振计算;采用径向二维特征线方法(MOC)、轴向一维离散纵标方法(S_N)进行全堆芯 2D/1D 耦合输运计算;采用切比雪夫有理近似(CRAM)方法进行燃耗计算。

SCAP-N 是上海核工程研究设计院有限公司自主研发的先进中子学程序,具备堆芯高精度核-热-燃耗耦合计算功能。该程序兼顾了计算精度与计算效率,主要技术特点如下:采用 69 群 WIMS-D 格式多群常数库;采用强化中子流方法(ENCM)和空间相关丹克夫方法(SDDM)进行共振计算;采用特征线方法(MOC)进行二维堆芯非均匀输运计算,并获取栅元等效均匀化截面^[15];采用 SP₃ 方法进行三维全堆芯 pin-by-pin 输运计算^[16];与子通道程序进行核-热耦合计算;采用矩阵指数的有理逼近(QRAM)方法进行燃耗计算;采用 MPI 与 OPENMP 混合并行方式进行大规模并行计算。

1.3 CAP1400 反应堆高保真建模计算

使用 CAP1400 数值反应堆系统中的蒙特卡罗粒子输运程序 JMCT、确定论高保真模拟程序 NECP-X 及先进中子学程序 SCAP-N,对国和一号(CAP1400)反应堆首循环堆芯启动物理试验进行高保真建模计算。相较于工业级核设计程序系统,数值反应堆系统计算过程中采用了更加精细的建模数据和建模方案。在 CAP1400 首循环堆芯高保真建模中,径向几何建模时,精确考虑了围板、水反射层、吊兰、压力容器等复杂结构;轴向几何建模时,精确考虑了低富集度燃料再生区、格架、导向管缓冲段、长短 WABA、弹簧气腔、端塞、管座及支撑板等结构。蒙特卡罗粒子输运程序 JMCT 的建模结果如图 2 所示。

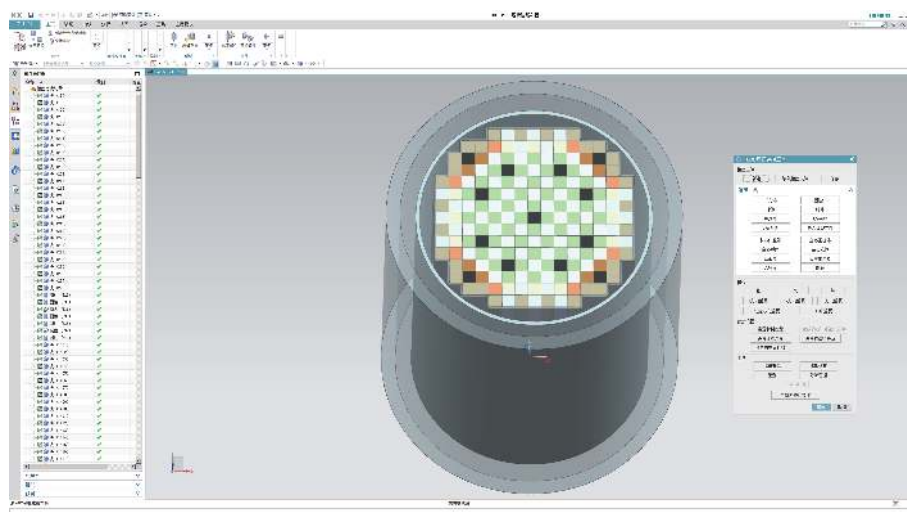


Fig. 2 The JMCT modeling result of the CAP1400 first core

图 2 CAP1400 首循环堆芯 JMCT 程序建模结果

2 数值结果

使用 CAP1400 数值反应堆系统中的 JMCT 程序、NECP-X 程序和 SCAP-N 程序对 CAP1400 反应堆首循环堆芯启动物理试验进行建模计算, 给出了启动物理试验参数的高保真模拟结果。JMCT 程序计算过程中采用的粒子数为 200 万, 共计算了 1500 代, 舍弃了前 600 代。表 1 给出了启动物理试验中的临界硼浓度、控制棒组价值计算结果。以 JMCT 程序计算结果为参考解, 对于热态零功率(HZP)控制棒全提(ARO)工况下的临界硼浓度, NECP-X 程序的绝对偏差为 -23.6×10^{-6} , SCAP-N 程序的绝对偏差为 -4.9×10^{-6} ; 对于 HZP/ARO 临界硼浓度工况下的灰棒组(MA 至 MD)价值, NECP-X 程序的最大绝对偏差为 -5.2×10^{-5} , SCAP-N 程序的最大绝对偏差为 -7.6×10^{-5} ; 对于 HZP/ARO 临界硼浓度工况下的黑棒组(M1、M2、AO、SD1 至 SD6)价值, NECP-X 程序的最大相对偏差为 2.68%, SCAP-N 程序的最大相对偏差为 -2.79%; 对于 HZP/ARO 临界硼浓度工况下的黑棒总价值, NECP-X 程序的相对偏差为 -0.08%, SCAP-N 程序的相对偏差为 -0.72%。

表 1 CAP1400 反应堆首循环堆芯启动物理试验参数计算结果
Table 1 The ZPPT simulation results of the CAP1400 first core

item	result of JMCT	error of NECP-X ⁽¹⁾	error of SCAP-N ⁽¹⁾
critical boron concentration/ 10^{-6}	1224.3	-23.6×10^{-6}	-4.9×10^{-6}
control bank worth of MA/ 10^{-5}	205.6	-5.2×10^{-5}	-7.6×10^{-5}
control bank worth of MB/ 10^{-5}	172.8	4.0×10^{-5}	2.8×10^{-5}
control bank worth of MC/ 10^{-5}	210.9	0.4×10^{-5}	-2.0×10^{-5}
control bank worth of MD/ 10^{-5}	187.5	-4.8×10^{-5}	-6.9×10^{-5}
control bank worth of M1/ 10^{-5}	498.1	-0.24%	-0.88%
control bank worth of M2/ 10^{-5}	740.7	0.68%	0.07%
control bank worth of AO/ 10^{-5}	1619.9	-0.14%	-1.21%
control bank worth of SD1/ 10^{-5}	785.6	-0.87%	-1.35%
control bank worth of SD2/ 10^{-5}	939.2	-0.05%	-0.31%
control bank worth of SD3/ 10^{-5}	891.2	0.39%	-0.19%
control bank worth of SD4/ 10^{-5}	788.5	-2.50%	-2.79%
control bank worth of SD5/ 10^{-5}	463.6	2.14%	1.16%
control bank worth of SD6/ 10^{-5}	249.8	2.68%	1.98%
total worth of black control banks/ 10^{-5}	6976.6	-0.08%	-0.72%

Note: critical boron concentration and control bank worth of MA~MD use absolute deviations, while the others use relative deviations.

图 3 给出了热态零功率(HZP)、控制棒全提(ARO)工况下的四分之一堆芯组件相对功率分布计算结果。以 JMCT 程序计算结果为参考解, NECP-X 程序组件功率分布计算结果相对偏差的最正值为 1.60%, 最负值为 -1.75%; SCAP-N 组件功率分布计算结果相对偏差的最正值为 0.70%, 最负值为 -0.60%。

如图 4 所示, 以 JMCT 程序为参考, 对 14 种插棒工况(ARO 和各组棒单独插入堆芯)下组件相对功率分布的计算偏差进行统计。其中, NECP-X 程序计算结果相对偏差的最正值为 2.24%, 最负值为 -2.47%, 平均值为 -0.06%, 标准偏差为 1.02%; SCAP-N 程序计算结果相对偏差的最正值为 1.32%, 最负值为 -1.00%, 平均值为 -0.02%, 标准偏差为 0.44%。图 5 给出了热态零功率(HZP)控制棒全提(ARO)工况下 SCAP-N 程序的全堆芯精细棒功率分布计算结果。

由以上计算结果可见, 在 CAP1400 反应堆首循环堆芯启

	H	G	F	E	D	C	B	A
8	0.912	1.237	0.921	1.262	0.950	1.294	1.247	0.256
	-1.75%	-0.11%	-1.63%	-0.02%	-1.43%	0.38%	1.13%	-0.08%
	-0.30%	0.23%	-0.22%	0.14%	-0.32%	0.28%	0.54%	0.29%
9	1.237	0.916	1.249	0.934	1.286	0.968	1.136	0.647
	-0.11%	-1.66%	-0.06%	-1.65%	0.15%	-1.12%	0.70%	1.36%
	0.23%	-0.24%	0.20%	-0.42%	0.12%	-0.22%	0.44%	0.70%
10	0.921	1.249	0.928	1.269	0.953	1.297	1.240	0.249
	-1.63%	-0.06%	-1.54%	0.03%	-1.36%	0.46%	1.14%	-0.16%
	-0.22%	0.20%	-0.24%	0.06%	-0.41%	0.16%	0.31%	0.01%
11	1.262	0.934	1.269	0.945	1.291	0.964	1.198	0.534
	-0.02%	-1.65%	0.03%	-1.42%	0.43%	-0.93%	1.60%	0.77%
	0.14%	-0.42%	0.06%	-0.44%	0.10%	-0.42%	0.23%	-0.60%
12	0.950	1.286	0.953	1.291	0.951	1.332	0.975	
	-1.43%	0.15%	-1.36%	0.43%	-0.95%	1.47%	1.12%	
	-0.32%	0.12%	-0.41%	0.10%	-0.39%	-0.03%	-0.08%	
13	1.294	0.968	1.297	0.964	1.332	0.774	0.649	
	0.38%	-1.12%	0.46%	-0.93%	1.47%	-0.02%	1.47%	
	0.28%	-0.22%	0.16%	-0.42%	-0.03%	-0.55%	-0.41%	
14	1.247	1.136	1.240	1.198	0.975	0.649		
	1.13%	0.70%	1.14%	1.60%	1.12%	1.47%		
	0.54%	0.44%	0.31%	0.23%	-0.08%	-0.41%		
15	0.256	0.647	0.249	0.534				
	-0.08%	1.36%	-0.16%	0.77%				
	0.29%	0.70%	0.01%	-0.60%				

Fig. 3 Assemble relative power of the CAP1400 first core at HZP/ARO condition

图 3 CAP1400 首循环堆芯热态零功率控制全提工况组件相对功率分布

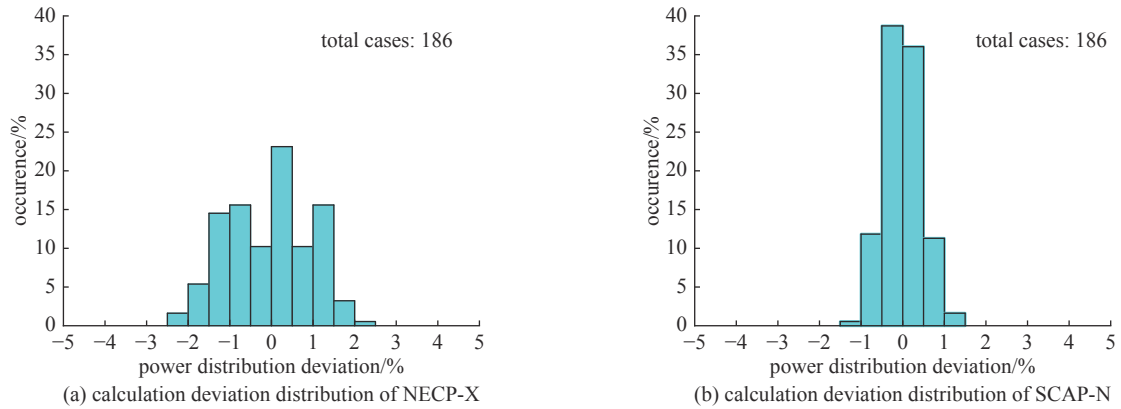


Fig. 4 Distribution of the assemble relative power calculation deviations

图4 组件相对功率分布计算偏差统计

动物理试验高保真模拟分析中,以JMCT程序为参考,NECP-X程序与SCAP-N程序对于灰棒组价值的绝对计算偏差在 $\pm 8 \times 10^{-5}$ 以内,对于黑棒组价值的相对计算偏差在 $\pm 3\%$ 以内,对于黑棒总价值的相对计算偏差在 $\pm 1\%$ 以内,对于组件相对功率分布的相对计算偏差在 $\pm 2.5\%$ 以内,各程序计算结果符合得很好。

3 结论

本文使用CAP1400数值反应堆系统中的蒙特卡罗粒子输运程序JMCT、确定论中子学高保真模拟程序NECP-X及先进中子学程序SCAP-N,对CAP1400反应堆首循环堆芯启动物理试验进行了建模计算。数值结果表明, JMCT程序、NECP-X程序和SCAP-N程序对于CAP1400反应堆首循环堆芯启动物理试验参数的计算结果符合得很好,验证了建模结果的正确性。本文给出了CAP1400反应堆首循环堆芯启动物理试验参数的高保真模拟结果,可有效支撑国和一号示范工程反应堆首循环堆芯调试启动过程。

参考文献:

- [1] 邓力, 史敦福, 李刚. 数值反应堆多物理耦合关键技术[J]. 计算物理, 2016, 33(6): 631-638. (Deng Li, Shi Dunfu, Li Gang. Key technologies of coupling for multiphysics in numerical reactor[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2016, 33(6): 631-638)
- [2] Turinsky P J, Kothe D B. Modeling and simulation challenges pursued by the Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors(CASL)[J]. Journal of Computational Physics, 2016, 313: 367-376.
- [3] Leandro A M, Heidt F, Hu R, et al. Thermal hydraulic model of the molten salt reactor experiment with the NEAMS system analysis module[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 126: 59-67.
- [4] Chanaron B. Overview of the NURES SAFE European project[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 321: 1-7.
- [5] 曹良志, 邹晓阳, 刘宙宇, 等. 高保真数值核反应堆不确定度量化方法研究进展[J]. 核动力工程, 2021, 42(2): 1-15. (Cao Liangzhi, Zou Xiaoyang, Liu Zhouyu, et al. Research progresses of uncertainty quantification methods for high fidelity numerical nuclear reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(2): 1-15)
- [6] Fausto F. Zero power physics test simulations for the AP1000 PWR[R]. CASL-U-2014-0012-001, 2014.
- [7] 郑明光, 严锦泉. 大型先进非能动压水堆CAP1400[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018. (Zheng Mingguang, Yan Jinqun. Large power advanced passive PWR CAP1400 [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2018.)
- [8] 邓力, 李瑞, 丁谦学, 等. 基于JMCT秦山核电厂一期反应堆屏蔽计算与分析[J]. 核动力工程, 2021, 42(2): 173-179. (Deng Li, Li Rui, Ding Qianxue, et al. Qinshan-I reactor shielding simulation and sensitivity analysis based on JMCT Monte Carlo code[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(2): 173-179)
- [9] 张宝印, 李刚, 邓力, 等. 组合几何Monte Carlo粒子输运支撑软件框架JCOGIN的研发[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(S2): 448-452. (Zhang Baoyin, Li Gang, Deng Li, et al. Research and development of JCOGIN for Monte Carlo particle transport code[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(S2): 448-452)
- [10] Chen Jun, Liu Zhouyu, Zhao Chen, et al. A new high-fidelity neutronics code NECP-X[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 116: 417-428.

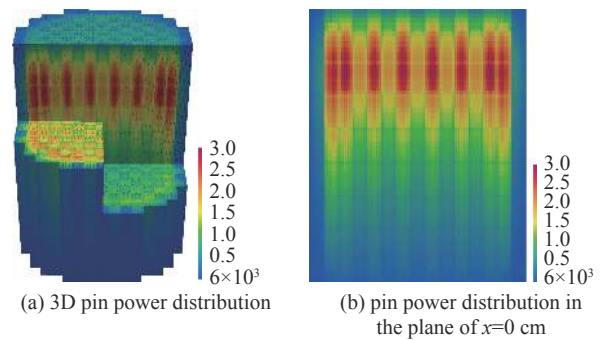


Fig. 5 Pin-by-pin relative power of the CAP1400 first core at HZP/ARO condition

图5 CAP1400首循环堆芯热态零功率控制全提工况栅元相对功率分布

- [11] 张旻婉, 刘宙宇, 温兴坚, 等. 用NECP-X程序计算与分析VERA9th基准题[J]. 现代应用物理, 2021, 12(1): 86-91. (Zhang Minwan, Liu Zhouyu, Wen Xingjian, et al. Simulation and analysis of VERA benchmark problem 9th based on NECP-X code[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(1): 86-91)
- [12] 彭良辉, 汤春桃, 杨伟焱. 反应堆堆芯先进中子学模拟软件SCAP-N研发[J]. 核动力工程, 2021, 42(2): 213-218. (Peng Lianghai, Tang Chuntao, Yang Weiyuan. Development of advanced neutronics code SCAP-N for reactor core high fidelity simulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(2): 213-218)
- [13] 费敬然, 司胜义, 陈其昌. 燃料棒多物理数值模型研究与程序开发[J]. 核动力工程, 2016, 37(2): 7-12. (Fei Jingran, Si Shengyi, Chen Qichang, et al. Research on fuel rod multi-physics numerical modeling and program development[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(2): 7-12)
- [14] Gui Minyang, Tian Wenxi, Wu Di, et al. Development of a two-fluid based thermal-hydraulic subchannel analysis code with high-resolution numerical method[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, 134: 103671.
- [15] 彭良辉, 陈笑松, 陈耀东, 等. 基于非均匀射线追踪的栅元模块化特征线方法研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(4): 666-671. (Peng Lianghai, Chen Xiaosong, Chen Yaodong, et al. Study on method of characteristics based on cell modular nonuniform ray tracing[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(4): 666-671)
- [16] 彭良辉, 汤春桃, 毕光文, 等. 用于pin-by-pin输运计算的SP₃解析基函数展开节块方法研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(7): 1241-1247. (Peng Lianghai, Tang Chuntao, Bi Guangwen, et al. Study on SP₃ analytic function expansion nodal method for pin-by-pin transport calculation[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(7): 1241-1247)