

改进 Flower 型超临界水冷快堆 初步增殖研究

彭红花¹ 于 涛¹ 谢金森¹ 李 庆² 夏榜样²

1(南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

2(中国核动力研究设计院 成都 610000)

摘要 超临界水冷快堆集快堆和轻水堆两种特性。整个堆芯冷却剂流量仅为现 BWR 的 1/8, 中子能谱硬于普通 PWR, 故有一定的核燃料增殖能力。本文建立不同 Flower 型超临界水冷快堆堆芯物理模型, 研究堆芯分区布置、冷却剂密度分层、seed 及 blanket 组件 P/D 值设计、MOX 燃料设计、燃料富集度分区布置、blanket 内部通道采用贫铀冷却等方案, 分析堆芯的空泡反应性、功率分布及增殖比。通过比较, 得到了超临界水冷快堆的优化设计方案。

关键词 超临界水冷快堆, 增殖比, 功率分布, 空泡反应性

中图分类号 TL421⁺.1

现有超临界水冷堆包括三种设计概念: 一, 有专设慢化剂水棒通道的超临界水冷热堆(SCWR)及超临界水冷混合堆(SCMR); 二, 没有专设慢化剂水棒通道的超临界水冷快堆(Supercritical Water-cooled Fast Reactor, SCWFR); 三, 超临界球床堆及超临界重水堆^[1]。其中超临界水冷快堆堆芯内冷却剂质量流量较少, 堆内中子平均能量较高, 中子有害吸收较小, 具有一定的增殖能力^[2]。

SCWFR 堆芯由驱动区(Seed 区)和增殖再生区(Blanket 区)构成^[3]。前者实现链式裂变反应并释放热量, 后者放置增殖组件, 燃料为贫铀, 其主要作用是吸收来自 Seed 区的中子, ^{238}U 俘获中子后经两次 β 衰变, 成为 ^{239}Pu , 实现核燃料增殖。本文在前期工作基础上^[4], 进一步开展堆芯增殖比研究。

1 增殖研究堆芯设计方案

1.1 栅距比与 MOX 燃料富集度

为提高堆芯增殖能力, 须维持较硬的中子能谱, 尽量压缩冷却剂和结构材料的体积^[5]。SCWFR 的冷却剂是水, 采用合适栅距比, 可减小冷却剂体积, 增大堆芯增殖比。采用 MOX 燃料的反应堆, 在保

证最大功率输出条件下, 调整 UO_2 和 PuO_2 燃料的比例(体积份额), 可使初始增殖比取得最优值^[6]。

1.2 堆芯布置方式与增加贫铀装载

借鉴 Flower 型 SCWFR 堆芯非均匀布置方式^[7]。Seed 区组件包括: 151 根 MOX 燃料棒; 18 根用于放置控制棒组件、可燃毒物组件、或中子源组件等的空导向管; 1 根中子测量管道。Blanket 区组件内采用氢化锆作为固体慢化剂, 贫铀作为燃料(^{235}U 与 ^{238}U 重量比为 0.2%)。减少 blanket 组件内冷却剂装载, 提高增殖燃料体积份额, 可使更多 ^{238}U 增殖为 ^{239}Pu ^[8]。

1.3 堆芯模型

堆芯设计参数为: Seed 区 MOX 燃料棒直径 9.7 mm, 密度 10.45 g/cm^3 , 包壳因科镍 718, 厚 0.63 mm; Blanket 区燃料棒密度 10.00 g/cm^3 , 水棒内径 4 mm, 内包壳因科镍 718 厚 0.26 mm, 外包壳 304 不锈钢(厚 0.63 mm); 两种组件间距均为 2 mm; 堆高 376 cm; 堆芯采用双流道设计^[9]; 对 Seed 及 Blanket 中冷却剂进行轴向分层^[10]。堆芯模型如图 1 所示。

第一作者: 彭红花, 女, 1985 年生, 现为南华大学硕士研究生, 核技术及应用专业

通讯作者: 于 涛, E-mail: yutao29@sina.com

收稿日期: 2011-09-10, 修回日期: 2011-11-25

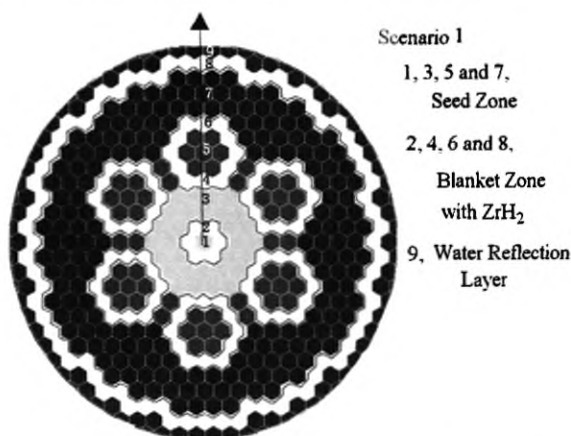


图 1 改进“Flower”型 SCWFR 堆芯分区布置方案 1
(seed 组件, 271; blanket 组件, 150)

Fig. 1 Scenario 1 for the improved flower type SCWFR core.
(seed components, 271; blanket components, 150).

2 堆芯初步增殖特性敏感性研究

2.1 堆芯增殖比的计算方法

铀-钚燃料循环反应堆中,一定时间内形成的易裂变核素数与同期消耗的易裂变核素数之比小于 1 的称为转换比(CR),大于 1 的一般称为增殖比(BR)。

堆芯采用非均匀布置,故计算堆芯增殖比时需要对堆芯的 Seed 及 Blanket 区的不同核素按不同反应类型的中子反应数进行统计,Seed 区用(^{239}Pu

+ ^{241}Pu)的生成率/(^{235}U + ^{239}Pu + ^{241}Pu)的消失率,Blanket 区采用 ^{239}Pu 的生成率/ ^{235}U 的消失率,统计以后根据体积权重相加得到堆芯增殖比^[11]。

2.2 栅距比对堆芯增殖比的敏感性研究

分别改变 Blanket 区燃料棒直径与水棒直径之比(简称水棒栅距比, P/D 值)和 Seed 区燃料棒栅距与燃料棒直径之比(简称燃料棒栅距比, P/D 值),得到不同栅距比下堆芯参数敏感性结果。

2.2.1 Blanket 中 P/D 值敏感性分析

Seed 区栅距比保持为 1.08, Blanket 组件中水棒栅距比为 $P/D=2.5-3.0$,得到堆芯有效增殖系数,完全空泡时堆芯反应性变化值(简称 VC 值),及增殖区超热中子(10 eV-10 keV)相对份额。如图 2 所示,随着 Blanket 中 P/D 值增加(即 Blanket 组件内水体积份额减少),增殖区的平均超热中子份额及 K_{eff} 值呈增加趋势;空泡反应性值则随 P/D 值增大而减少,从而有利于堆芯的固有安全性。然而,Blanket 水棒 P/D 值不可设计得太大,否则水棒尺寸过小,则要求冷却剂流速须很高,这对堆内其他参数将造成不良影响。本次设计采用 Blanket 区水棒 $P/D=2.8$ 。

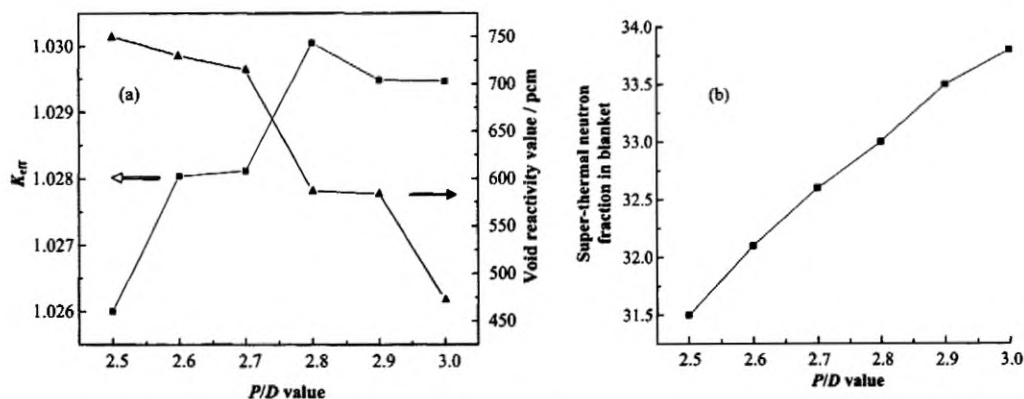


图 2 Blanket 组件内 P/D 值对 K_{eff} 及空泡反应性(a)和堆芯超热中子份额(b)影响

Fig. 2 K_{eff} and void reactivity efficient(a) and super-thermal neutron fraction (b) as function of P/D value of blanket assembly.

2.2.2 Seed 中 P/D 值敏感性分析

堆芯高度、燃料棒尺寸保持不变,Blanket 中水棒 $P/D=2.8$,Seed 中 $P/D=1.08-1.25$ (将影响堆芯直径尺寸),得到不同 P/D 值下堆芯有效增殖系数、VC 值、及增殖比(图 3)。

由图 3,堆芯 K_{eff} 值及 VC 值随 Seed 燃料棒 P/D 增大而减少。增殖比也先随之减少,但在 $P/D=1.16$ 后,增殖比增大,这是因为 Seed 燃料棒 P/D 超

过 1.16 后,堆芯直径增大而使堆芯高径比(高度/直径)减小,则中子径向泄露使贫铀内增殖比增加,且这部分的增量会超过因 P/D 值增大而致的 MOX 燃料增殖比减少,使堆芯增殖比增加。增殖堆的堆芯高径比极为重要。 $P/D=1.16$ 时,堆芯具有较好 VC,增殖比 0.995。

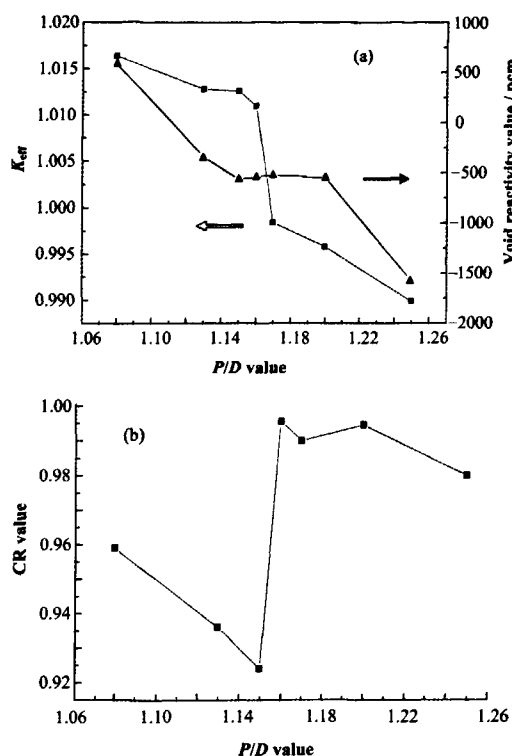


图 3 (a) Seed 组件内 P/D 值对堆芯 K_{eff} 及空泡反应性影响, (b) Seed 组件内 P/D 值对堆芯增殖比影响
Fig. 3 K_{eff} and void reactivity efficient (a) and CR value (b) as function of P/D value of seed assembly.

2.3 MOX 燃料成分设计对堆芯增殖比敏感性研究

MOX 燃料内 ^{239}Pu 占 Pu 同位素的质量百分比为 50.05%，其余 Pu 同位素含量参见文献^[12]。MOX 成分的合理设计，能使堆芯具有较好的负空泡反应性及增殖比。改变 MOX 燃料内 ^{235}U 及 ^{239}Pu 的富

集度,得到不同 MOX 设计方案的堆芯参数敏感性,数据如图 4 所示。可见在一定条件下,提高 MOX 燃料中 ^{239}Pu 质量百分数可提高堆芯增殖比,但会导致堆芯正空泡反应性问题;增加 ^{235}U 质量百分数更利于堆芯负反应性,而对堆芯增殖有一定影响。

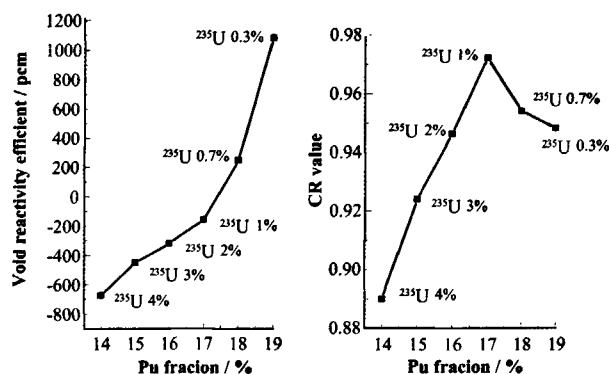


图 4 MOX 燃料内不同 ^{235}U 与 ^{239}Pu 富集度下对堆芯参数敏感性分析
Fig. 4 Core parameters vs ^{235}U and ^{239}Pu fractions in MOX fuel.

3 堆芯增殖特性优化研究

在合适的 Seed 组件与 Blanket 组件布置方式下, 增加堆内 Blanket 组件个数及增加堆芯增殖层高度, 可以增加贫铀内 ^{238}U 俘获中子份额, 从而产生更多 ^{239}Pu ; Blanket 区燃料棒尺寸保持不变, 减少水棒尺寸及包壳厚度等, 可减少中子的有害吸收, 在一定程度上增加堆芯的增殖比。

为展平堆芯功率分布, 对堆芯 Seed 区内 MOX 燃料分区分层设计, 布置方案如表 1 所示。

表 1 Seed 组件 MOX 燃料中 Pu+²³⁵U 的质量百分数(括号内为 Pu 质量百分数)
Table 1 Mass percentage of Pu+²³⁵U in MOX fuel of seed components (the Pu mass percentage is in blankets)

布置 1 Design 1

堆芯上部: 贫铀层(左, 堆芯中心处, 右, 堆芯外围处) The core top: depleted uranium (left, in the core center; right, in the core margin)						
21.8%(18.8%)	Blanket	20.8%(17.8%)	Blanket	19.8%(14.8%)	Blanket	19.8%(14.8%)
21.23%(18.23%)	Depleted	20.23%(17.23%)	Depleted	19.5%(14.5%)	Depleted	19.5%(14.5%)
20.23%(17.23%)	uranium	19.23%(16.23%)	uranium	19.23%(14.23%)	uranium	19.23%(14.5%)
20.8%(17.8%)		19.8%(16.8%)		19.23%(14.23%)		19.23%(14.23%)
堆芯下部贫铀层 The core bottom: depleted uranium						

布置 2 Design 2

堆芯上部: 贫铀层(左, 堆芯中心处, 右, 堆芯外围处)						
The core top: depleted uranium (left, in the core center; right, in the core margin)						
21.8%(18.8%)	Blanket Depleted uranium	21.8%(18.8%)	Blanket Depleted uranium	19.8%(14.8%)	Blanket Depleted uranium	19.8%(14.8%)
21.23%(18.23%)		21.23%(18.23%)		19.5%(14.5%)		19.5%(14.5%)
20.23%(17.23%)		20.23%(17.23%)		19.23%(14.23%)		19.23%(14.23%)
20.8%(17.8%)		20.8%(17.8%)		19.23%(14.23%)		19.23%(14.23%)
堆芯下部贫铀层: The core bottom: depleted uranium						

采用上面所述的堆芯布置方式，计算堆芯增殖比结果如表 2 所示：

表 2 不同堆芯布置方案下参数计算结果
Table 2 Core parameters varied with different core layouts.

提高增殖比的方案 The layouts of improving breeding ratio	增殖组件 Blanket assemblies	驱动组件 Seed assemblies	正常工况 K_{eff} Normal	完全空泡 Voided / ppm	增殖比 Breeding ratio
方案 1. 图 1 堆芯, Scenario 1 (Fig. 1)	150	271	1.0343	128	0.8991
方案 2. 图 5(a)堆芯 Scenario 2 (Fig. 5a)	228	271	1.0349	666	0.9183
方案 3. 图 5(b)堆芯 Scenario 3 (Fig.5b),	222	277	1.0012	817	0.9980
(1) 增殖燃料棒内水棒直径减 0.1 cm, 包壳厚度减少 0.019 cm Reducing the water diameter by 0.1 cm and the cladding by 0.019 cm			1.0090	-314	1.0315
(2) 在(1)基础上, 堆芯高度增 20 cm, 上下部增加 10 cm 贫铀增殖层 Based on (1), placing 10-cm layers of depleted uranium at the core top and bottom			1.0093	-709	1.0372
(3) 在(1)基础上, 堆芯驱动区 MOX 布置 1(表 1) Based on (1), using the MOX Design 1 in Table 1			1.0116	-699	1.0285
(4) 在(1)基础上, 堆芯驱动区 MOX 布置 2(表 1) Based on (1), using the MOX Design 2 in Table 1			1.0143	-585	1.0302

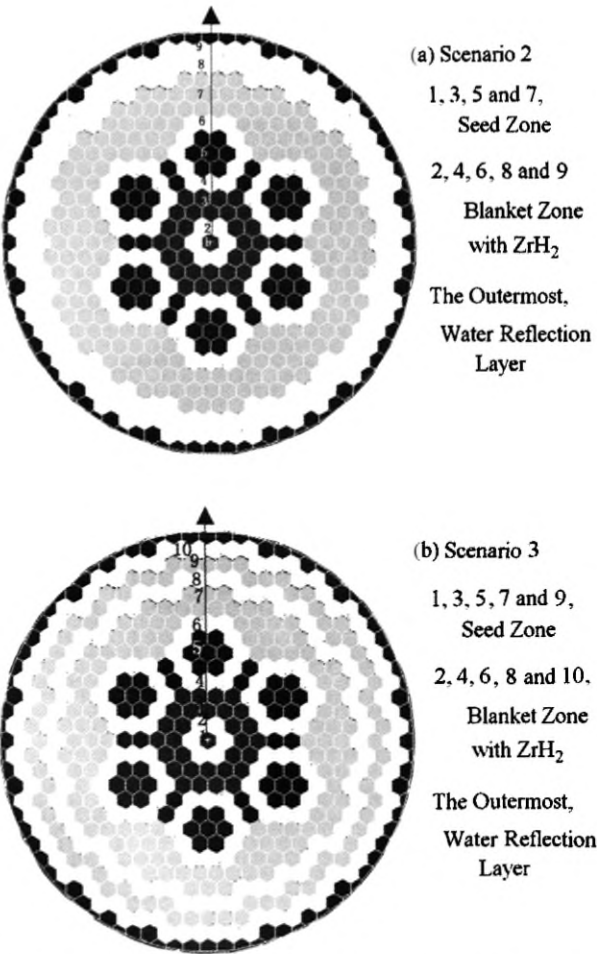


图 5 改进 Flower 型-SCWFR 堆芯布置方案 2 和方案 3
Fig. 5 Scenarios 2 and 3 for the improved Flower-SCWFR core.

4 堆芯功率计算

4.1 不同堆芯方案下轴向功率分布比较

对图 1、图 5(b)的堆芯布置，采用不同 MOX 燃料富集度布置方案下，计算轴向功率。如图 6 所示，堆芯轴向功率变化较均匀；图 6 也表明，Seed 燃料组件的下部 MOX 浓度可适度提高。

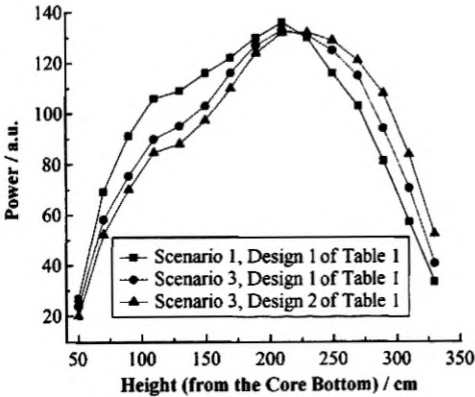


图 6 堆芯轴向功率分布
Fig. 6 Axial power distributions.

4.2 堆芯径向功率分布比较

对堆芯布置图 1、图 5(b)两种堆型，进行径向功率计算，得到结果如图 7。由图 7 可见：对于图 1 堆型（计算得到堆芯外围中子通量密度偏高^[5]），因此设计时采用了如表 1 之布置 1 所示的 MOX 燃料

浓度高-中-低的低泄露模式进行布置,极大的展平了堆芯 Seed 组件径向功率分布;而对于图 5(b)所示堆型,为展平径向功率分布,设计堆芯时,应采用 MOX 燃料浓度低-中-高的高泄露模式。

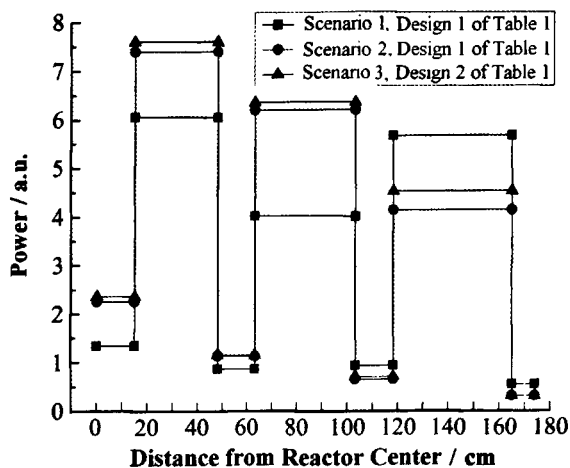


图7 堆芯径向功率分布
Fig. 7 Radial power distributions.

5 结论

通过对堆芯进行分区布置,冷却剂密度分层,Blanket 区及 seed 区 P/D 值调整,seed 区 MOX 燃料合理设计及分区布置,Blanket 组件内部通道采用贫铀冷却等方式,对不同堆芯布置方案下堆芯增殖比进行了研究。最终采用图 5(b)的堆芯布置方式,堆芯具有 1430 pcm 的后备反应性, -585pcm 负空泡反应性,堆芯增殖比为 1.0302。在展平径向功率方面,建议堆芯 Seed 区 MOX 燃料采用低-中-高的高泄露方式。实际应用中,应结合热工水力耦合计算,得到更精准的堆芯参数设计方案。

参考文献

- 李满昌,王明利.超临界水冷堆开发现状与前景展望[J].核动力工程,2006,27(2):40-43
LI Manchang,WANG Mingli. Development status and application prospect of supercritical-pressure light water cooled Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(2): 40-43
- Ishiwatari Yuki, Oka Yoshiaki, *et al.* Breeding ratio analysis of a fast reactor cooled by supercritical light water[J], 2001, 38(9): 703-710
- CAO Liangzhi, Oka Yoshiaki, Yuki ISHIWATARI, *et al.* Fuel, core design and subchannel analysis of a super fast reactor, J Nucl Sci Technol[J]. 2008, 45(2):138-148
- 彭红花,于涛,谢金森,等.改进 flower 型超临界水冷快堆负空泡反应性初步分析设计[J].南华学报,2011,25(4):13-18
PENG Honghua, YU Tao, Xie Jinsen, *et al.* The negative void reactivity effect preliminary design for the improved flower type SCWFR core[J]. University of South China, 2011, 25(4):13-18
- 谢光善,张汝娴.快中子堆燃料元件[M].北京:化学工业出版社,2007
XIE Guangshan, ZHANG ruxian. Fuel element to be used in fast reactor[M]. Beijing. Chemical Industry Press, 2007
- 赵福宇.快中子反应堆增殖特性最优化分析[J].核动力工程,1992,13(2):24-28
ZHAO Fuyu. Optimization of breeding property in a fast reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 1992, 13(2):24-28
- Magnus Mori. Core design analysis of the supercritical water fast reactor [C].FZKA7160, Karlsruhe, Germany, 2005
- Magnus Mori, Werner Maschek, Andrei Rineiski. Heterogeneous cores for improved safety performance A case study: The Supercritical water fast reactor[J].Nuclear Engineering and Design 2006, 236:1573-1579
- Mukohara Tami, Koshizuka Sei-Ichi, Oka Yoshiaki, *et al.* Core design of a high-temperature fast reactor cooled by supercritical light water[J]. Annals of Nuclear Energy, 1999, 26:1423-1436
- Philip MacDonald, Buongiorno Jacopo, Cliff Davis, *et al.* Feasibility study of supercritical light water cooled fast reactors for actinide burning and electric power production[R]. INEEL/EXT-02-00925
- Briesmeistr J F. MCNP-A general Monte Carlo n-particle transport code, Version 4c[M]. New Mexico:Los Alamos National Laboratory, 2000
- 孙灿辉,周涛,李臻洋.超临界水冷堆 MOX 燃料特性分析[J].原子能科学技术,2010,44(9):347-351
SUN Canhui, ZHOU Tao, LI Zhenyang. Characteristics analysis of MOX fuel in supercritical water cooled reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(9): 347-351

Breeding ratio analysis for the improved Flower-SCWFR core

PENG Honghua¹ YU Tao¹ XIE Jinsen¹ LI Qing² XIA Bangyang²

1(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, 421001, China)

2(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610000, China)

Abstract Supercritical Water-cooled Fast Reactor (SCWFR) presents features of combining fast and light water reactor characteristics in one design. The coolant mass flow rate is just as 1/8 as in the BWR, and the neutron energy is harder than in PWR, so it would has the breeding ability. In this paper, using different models of improved Flower-SCWFR core, the void reactivity effect, power distribution, and breeding ratio are analyzed by core zoning scheme, axial coolant densities zoning, seed and blanket assembly with suitable P/D value, MOX fuel with different design and enrichment zoning, and solid uranium matrix cooled by internal clad channels in blanket assembly. Finally, an optimized modal of the improved SCWFR cores-“Flower type” is obtained.

Key words SCWFR, Breeding ratio, Power distribution, Void reactivity

CLC TL421⁺.1