

# 长寿期小型棒控压水堆控制棒方案研究

吴智强<sup>1,2</sup> 谢金森<sup>1,2</sup> 娄磊<sup>3</sup> 陈鹏宇<sup>1,2</sup> 刘涛<sup>1,2</sup> 邓年彪<sup>1,2</sup> 于涛<sup>1,2</sup>

1(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

2(南华大学 先进核能设计与安全教育部重点实验室 衡阳 421001)

3(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室 成都 610213)

**摘要** 小型棒控压水堆舍弃了可溶硼,并高度依赖控制棒与可燃毒物棒控制堆芯的反应性。为研究控制棒对堆芯关键性能的影响,本文以核动力破冰船用KLT-40模型为对象,以轴向功率偏移、堆芯寿期、燃料利用率与径向功率峰因子为指标,开展长寿期小型棒控压水堆控制棒布置与动作策略设计分析。首先,基于OpenMC程序开发带棒燃耗程序;其次,比较堆芯带控制棒与无控制棒运行时的堆芯寿期等指标;最后,分析不同动作策略对轴向功率偏移等指标的影响。结果表明:控制棒将堆芯寿期从590 EFPDs(等效满功率天,Effective full power days)延长至650~698 EFPDs;低价值棒组优先动作策略使轴向功率偏移程度由-0.69与+0.80分别下降至-0.29与+0.52。因此,要准确计算长寿期压水堆寿期必须采用带控制棒燃耗计算策略,并且通过合理的动作策略能够有效减小控制棒带来的轴向功率偏移。

**关键词** 长寿期压水堆, 控制棒方案, 控制棒动作策略, 堆芯寿期, 功率分布

**中图分类号** TL371

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030604

## Control rod strategy for long-term small rod-controlled pressurized water reactors

WU Zhiqiang<sup>1,2</sup> XIE Jinsen<sup>1,2</sup> LOU Lei<sup>3</sup> CHEN Pengyu<sup>1,2</sup> LIU Tao<sup>1,2</sup>

DENG Nianbiao<sup>1,2</sup> YU Tao<sup>1,2</sup>

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

2(Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy Design and Safety, Ministry of Education, University of South China, Hengyang 421001, China)

3(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract** [Background] Small rod-controlled pressurized water reactors have foregone the use of soluble boron and heavily rely on control rods and burnable poison rods for reactor control. [Purpose] This study aims to explore the influence of control rods on the key performance metrics of a long-term small rod-controlled pressurized water reactor. [Methods] First, a KLT-40 reactor used for nuclear icebreakers was taken as research object, and a critical rod position-search burnup code was developed based on OpenMC. Then, the core lifetime and other indicators such as the axial power offset, fuel utilization, and radial power peak factor, were compared between with and without the designed control rods for the design and analysis of the control rod layout of KLT-40 reactor. Finally, the influence of different move-in/out strategies on axial power offset was analyzed. [Results] The core lifetime can be extended from

国防科技工业核动力技术创新中心项目(No.HDLCXZX-021-ZH-004-2)、2023年湖南省研究生科研创新项目(No.CX20230963)资助

第一作者: 吴智强, 男, 1999年出生, 2017年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究领域为长寿期小型棒控压水堆控制棒设计

通信作者: 谢金森, E-mail: [jinsen\\_xie@usc.edu.cn](mailto:jinsen_xie@usc.edu.cn)

收稿日期: 2023-10-12, 修回日期: 2023-12-04

Supported by Project of National Defense Science, Technology and Industry Nuclear Power Technology Innovation Center (No.HDLCXZX-021-ZH-004-2), 2023 Hunan Graduate Research Innovation Program (No.CX20230963)

First author: WU Zhiqiang, male, born in 1999, graduated from University of South China in 2017, master student, focusing on the control rod design in long-term small rod-controlled pressurized water reactor

Corresponding author: XIE Jinsen, E-mail: [jinsen\\_xie@usc.edu.cn](mailto:jinsen_xie@usc.edu.cn)

Received date: 2023-10-12, revised date: 2023-12-04

590 effective full power days (EFPDs) to 650~698 EFPDs with the designed control rods. Adopting a strategy of prioritizing the movement of low-value rod groups effectively reduces the axial power offset, with values of  $-0.69$  and  $+0.8$  decreasing to  $-0.29$  and  $+0.52$ , respectively. [Conclusions] The control rod burnup calculation strategy adopted to accurately calculate the core lifetime of small rod-controlled pressurized water reactors can effectively reduce the axial power offset by using a reasonable move-in/out strategy.

**Key words** Long-term PWR, Control rod design, Control rod move-in/out strategies, Core lifetime, Power distribution

小型棒控压水堆是一种较为理想的船用动力源,基于体积、重量以及系统复杂度的考虑,舍弃了庞大的化学容积与控制系统,以无可溶硼条件运行(Soluble-boron free operation),依靠可燃毒物与控制棒实现反应性控制与补偿,例如KLT-40<sup>[1]</sup>、KLT40-S<sup>[2]</sup>、RITM-200<sup>[3]</sup>。商用压水堆主要依靠硼酸补偿燃料消耗导致的反应性变化以实现长期运行,特别是在基荷运行状态下,控制棒动作很少,故功率分布与堆芯寿命可通过控制棒全提模式的燃料计算进行预测。而船用小型棒控压水堆因其燃料布置更紧凑、控制棒价值更高以及控制棒动作更频繁的特点,在进行堆芯寿命预测时,需采用带棒燃料计算策略;此外,可溶硼的缺失避免了硼水引入所带来的潜在事故,慢化剂的温度系数会更负,有利于提高反应堆安全性。然而,过大的慢化剂温度系数容易导致反应性反馈过大,堆芯从热态满功率冷却至冷态零功率时,堆芯可能重启临界。Merwe等<sup>[4]</sup>的研究表明,控制棒能够快速控制该种瞬态变化;Lee等<sup>[5]</sup>设计了寿期内满足紧急停堆与燃料补偿的小型无硼压水堆SMART;Choe等<sup>[6]</sup>针对选用环状Zr-<sup>167</sup>Er材料作为可燃毒物,慢化剂温度系数更负的小型无硼压水堆,设计了可补偿高反应性温度系数的HfB<sub>2</sub>控制棒。相较于常见的小型无硼压水堆设计,船用小型棒控压水堆长期需要控制棒作为额外但主要的燃料反应性补偿手段,控制棒在寿期内需要不断移动,由于控制棒的局部强吸收效应,以及其对燃料过程中易裂变核素的空间分布的影响,寿期内功率分布受控制棒布置和动作策略影响很大,合理的控制棒布置与动作策略是降低功率分布不均匀性的关键<sup>[7]</sup>;Mart<sup>[8]</sup>、Jaerim<sup>[9]</sup>等以4.95wt%燃料的小型无硼压水堆为对象,通过控制棒动作策略设计,实现了满足整个寿期内轴向功率偏移小于 $\pm 0.4$ 的设计要求。但目前有关小型无硼压水堆的控制棒设计大多针对商用压水堆组件,并且有关控制棒对堆芯关键性能影响的研究较少;而在船用棒控压水堆中,燃料富集度会更高,且组件通常采用更为紧凑的正三角形式布置,具有功率密度更大、控制棒价值更高以及控制棒动作更加频繁的特点,导致反应性控制更加复杂。因此,本

文聚焦于研究控制棒对小型棒控压水堆堆芯关键性能的影响,为未来船用棒控压水堆堆芯设计提供一定参考。

为研究控制棒布置与动作策略对长寿命小型棒控压水堆堆芯关键性能的影响,本文参考前苏联破冰船KLT-40堆芯挪威模型<sup>[10]</sup>,在满足长寿命要求堆芯装料情况下,分析不同控制棒方案对轴向功率偏移(Axial Offset, AO)、堆芯寿命(Core Lifetime, CL)、燃料利用率(Fuel Utilization, FU)以及径向功率峰因子(Radial Peak Power Factor, R-PPF)的影响。

## 1 分析对象与计算方法

### 1.1 分析对象

KLT-40是前苏联Sevmorput号破冰船使用的核动力反应堆。1982年,苏联向挪威提供了该反应堆的部分数据<sup>[10]</sup>,挪威研究人员以此建立了用于分析KLT-40堆芯物理特性的公开模型(简称“KLT-40挪威模型”,具体参数见表1)。本文参考KLT-40挪威模型,在满足长寿命装料以及遵循核不扩散条约(the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons)的前提下,选用14wt%的铀-锆合金棒状燃料,天然钐-锆合金作为可燃毒物;设置174盒燃料组件,67盒控制棒组件,组件按正三角形式布置。1/4堆芯布置如图1所示,A组与R组控制棒用于反应性控制,S组用于紧急停堆;燃料分区如图2所示,考虑到燃料方程的求解精度与燃料分区数密切相关<sup>[11]</sup>,燃料区在径向按单盒组件中的燃料棒、可燃毒物棒与控制棒划分,分别为67、46与21个;在轴向以十等分划分,每层10 cm;堆芯放置在半径1 m、高2.4 m的1/4圆柱水反射层中,X轴与Y轴均采用全反射边界条件,中子输运采用ENDF/B-VII.0截面库,燃料链采用传统压水堆热谱链<sup>[12]</sup>。

### 1.2 计算方法

OpenMC是一款由麻省理工学院与开源社区协作开发的开源蒙特卡罗软件<sup>[13]</sup>,其在复杂堆芯精细建模计算的可行性和准确性上已得到了相关验

表1 堆芯参数  
Table 1 Core parameters

参数 Parameter	数值 Value
功率 Power	100 MWt (for 1/4 core is 25 MWt)
燃料组成/密度 Fuel component/ density	90wt% U+10wt% Zr/4.95 g·cm <sup>-3</sup>
可燃毒物组成/密度 Burnable poison component/ density	22.92wt% Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +77.08wt% Zr/6.83 g·cm <sup>-3</sup>
燃料装载量 Fuel load	805.14 kg (for 1/4 core is 201.285 kg)
燃料棒/可燃毒物/控制棒内径 Fuel rod/ Burnable rod/ control rod inner radius	0.23 cm/0.23 cm/0.26 cm
燃料棒/可燃毒物/控制棒包壳厚度 Fuel rod/ Burnable rod/ control rod cladding thickness	0.06 cm/0.06 cm/0.03 cm
燃料棒/可燃毒物/控制棒包壳材料 Fuel rod/ Burnable rod/ control rod cladding materials	Zr/Zr/06Cr18Ni10Ti
燃料棒外径/栅距 Fuel rod outer radius/ pitch	0.58 cm/0.7 cm
组件外径/组件中心距 Assembly outer radius/ pitch	6 cm/7.2 cm
组件包壳材料/厚度 Assembly cladding materials/ thickness	Zr/0.15 cm
慢化剂 Moderator	H <sub>2</sub> O
堆芯活性区高度 Core active height	1 m
堆芯半径 Core radius	0.606 m
慢化剂温度 Moderator temperature	295 °C

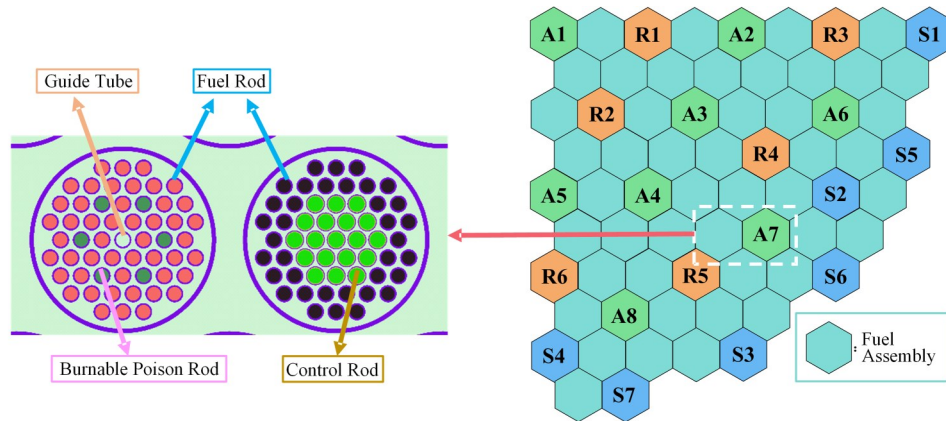


图1 堆芯布置安排  
Fig.1 Layout of core arrangement

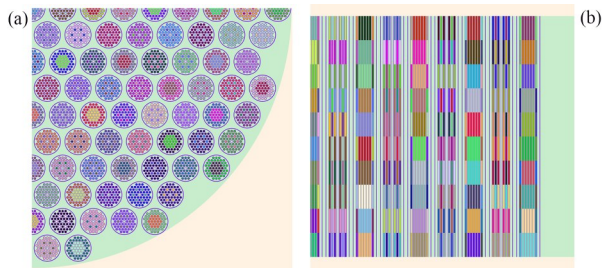


图2 径向(a)与轴向(b)燃耗分区  
Fig.2 Partitioning of radial (a) and axial (b) burnup zones

证<sup>[14-16]</sup>。OpenMC 中众多便利的接口,支持 Python 编写输入卡建模以及分布式内存(MPI)与共享内存(OpenMP)并行,适合本文重复建模复杂以及计算量大的情景。

为模拟棒控堆芯运行过程中控制棒动态补偿反应性的过程,本文首先基于 OpenMC 二次开发了临界棒位搜索与堆芯燃耗功能。在此功能下,程序根据预设的控制棒分组与动作策略,利用 OpenMC 中“search\_for\_keff”函数得到对应的临界棒位后,自动更新精细燃耗模型的棒位几何开展燃耗计算以获得用于更新下一步燃耗元件(燃料棒、可燃毒物棒以及控制棒)的核子密度,不断重复“临界-燃耗-临界”过程,并记录各燃耗步的临界棒位与 Tally 计数信息,直至寿期结束。计算流程图见图3。燃耗步长选择方面,本文根据 OpenMC 用户手册所推荐的燃耗步长(小于 2 MW·d·kgU<sup>-1</sup>),以及考虑氙中毒的物理特性,初始燃耗步长设置为 2 d,后续步长设置为 12 d·step<sup>-1</sup>。

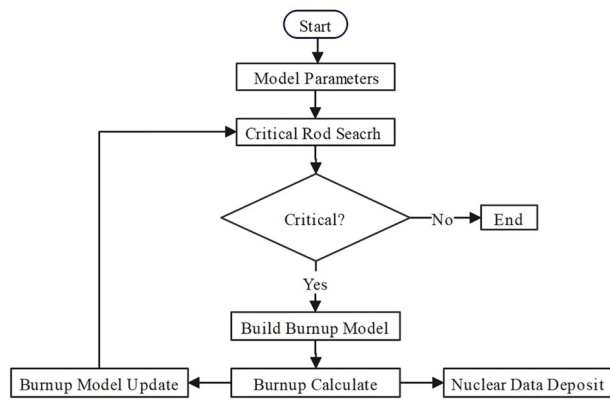


图3 临界棒位搜索-燃耗代码流程图

Fig.3 Flow chart of critical rod position-search burnup code

## 2 控制棒设计

由于KLT40-S、KLT-40挪威模型未提供控制棒具体设计方案,为实现长寿期下的燃耗反应性补偿,本文选用钛酸镨-碳化硼<sup>[17-18]</sup>、硼化铪(HfB<sub>2</sub>)<sup>[19]</sup>、氧化铈(Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>[20]</sup>等宏观热中子吸收截面较大的材料作为待选控制棒材料(宏观热中子吸收截面见表2),自主设计了几种控制棒分组与动作策略。

### 2.1 控制棒积分价值随燃耗变化

堆芯寿期内,控制棒总积分价值(简称“价值”)为:不同燃耗深度(或运行时间点)下,控制棒全提出(All-Rod-Out, ARO)和控制棒全投入(All-Rod-In, ARI)堆芯时的反应性差值,计算公式如下:

$$\Delta\rho_i = \rho_{i,ARO} - \rho_{i,ARI} = \frac{1}{k_{\text{eff},ARI}} - \frac{1}{k_{\text{eff},ARO}} \quad (1)$$

式中: $\Delta\rho_i$ 为*i*时刻下的价值; $\rho_{i,ARO}$ 、 $\rho_{i,ARI}$ 分别为*i*时刻下ARO与ARI的反应性, $k_{\text{eff},ARO}$ 、 $k_{\text{eff},ARI}$ 分别为*i*时刻下ARO与ARI的有效增殖因子。为确定安全停堆裕度,表3列出了堆芯的初始剩余反应性(后备反应性),ARO条件下的初始反应性(含可燃毒物),以及表2中5种待选控制棒在寿期初的价值,对应的最大价值棒组的初始价值见表4。图4展示了堆芯在ARO下以及5种控制棒在ARI下 $k_{\text{eff}}$ 随燃耗变化趋势;图5给出了堆芯临界状态下,所有控制棒投入运

行时的价值以及 $k_{\text{eff},ARO}$ 与 $k_{\text{eff},ARI}$ 差值( $\Delta k_{\text{eff}}$ )随燃耗变化趋势,随着燃耗加深,堆芯剩余反应性不断减小, $\Delta k_{\text{eff}}$ 呈下降趋势;价值呈上升趋势原因是,式(1)中所定义的反应性在次临界度较深的情况下计算结果会偏负,在超临界下计算结果偏小,故随着堆芯次临界度的加深,控制棒价值会相应上升。在卡棒准则下,最大价值的棒组被假设卡在最高处,结果表明:HfB<sub>2</sub>(20wo-<sup>10</sup>B)、Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>C与HfB<sub>2</sub>(80wo-<sup>10</sup>B)均能满足卡棒准则下,停堆深度大于3 $\beta$ (0.019 5)的安全准则。

### 2.2 控制棒同步动作策略

控制棒的引入影响了易裂变核素的空间分布,从而影响堆芯寿命和功率分布,不利于堆芯长时间运行。上半区与下半区燃料利用率之差(the Difference in Fuel Utilization between the Upper and Lower half, DFUUL)反映了易裂变核素的空间分布,AO和R-PPF反映了堆芯功率分布的均匀程度。定义如下:

$$FU = \left(1 - \frac{^{235}\text{U}_{\text{end}}}{^{235}\text{U}_{\text{init}}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

$$AO = \frac{P_t - P_b}{P_t + P_b} \quad (3)$$

$$R - \text{PPF} = \frac{\max_{x,y} [P(x,y)]}{\frac{1}{V} \iiint P(x,y,z) dx dy dz} \quad (4)$$

$$\text{DFUUL} = \text{FU}_{\text{up}} - \text{FU}_{\text{low}} \quad (5)$$

式中:FU<sub>up</sub>、FU<sub>low</sub>分别表示堆芯上半区与下半区的燃料利用率; $P_t$ 、 $P_b$ 分别表示堆芯的上半区与下半区功率; $P(x,y)$ 与 $P(x,y,z)$ 分别表示堆芯二维与三维功率; $V$ 表示堆芯体积; $^{235}\text{U}_{\text{init}}$ 与 $^{235}\text{U}_{\text{end}}$ 分别表示堆芯初始<sup>235</sup>U装载量与寿期终<sup>235</sup>U剩余量。在A组与R组同步动作控制反应性以及S组全提出堆芯的同步动作策略下,FU与DFUUL在CL内与ARO的对比见图6;带棒运行条件下,引入的AO与对应的临界棒位见图7;2 d、290 d与590 d时,径向热中子(0< $E$ ≤0.625 eV)通量分布图(已按总热中子通量进行归一

表2 典型控制棒材料的宏观中子吸收截面( $E=0.0253$  eV)Table 2 Typical macro neutron-absorption cross sections of control rod materials ( $E=0.0253$  eV)

材料 Material	宏观热中子吸收截面 Macro thermal neutron-absorption cross section / cm <sup>-1</sup>
钛酸镨 Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	35.25
硼化铪(20%富集度 <sup>10</sup> B) HfB <sub>2</sub> (20wo <sup>10</sup> B)	54.91
氧化铈 Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	116.54
碳化硼 B <sub>4</sub> C	202.67
硼化铪(80%富集度 <sup>10</sup> B) HfB <sub>2</sub> (80wo <sup>10</sup> B)	210.05

表3 反应性与控制棒初始值  
Table 3 Reactivity and initial value of the control rod

参数 Parameter	反应性或值 Reactivity or value / 10 <sup>-5</sup>
初始剩余反应性 Initial excess reactivity	33 146
初始反应性 (ARO) Initial reactivity (ARO)	15 810
钛酸铈价值 Value of the Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	17 037
硼化铪(20% 富集度 <sup>10</sup> B)价值 Value of the HfB <sub>2</sub> (20wo- <sup>10</sup> B)	19 796
氧化铈价值 Value of the Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 463
碳化硼价值 Value of the B <sub>4</sub> C	22 945
硼化铪(80% 富集度 <sup>10</sup> B)价值 Value of the HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	23 277

表4 最大价值棒组的初始积分价值  
Table 4 Initial integral value of maximum value groups

材料 Material	最大价值棒组 Maximum value group / 10 <sup>-5</sup>
钛酸铈 Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	R2/1 887
硼化铪(20% 富集度 <sup>10</sup> B) HfB <sub>2</sub> (20wo <sup>10</sup> B)	R2/2 063
氧化铈 Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R2/2 132
碳化硼 B <sub>4</sub> C	R2/2 323
硼化铪(80% 富集度 <sup>10</sup> B) HfB <sub>2</sub> (80wo <sup>10</sup> B)	R2/2 328

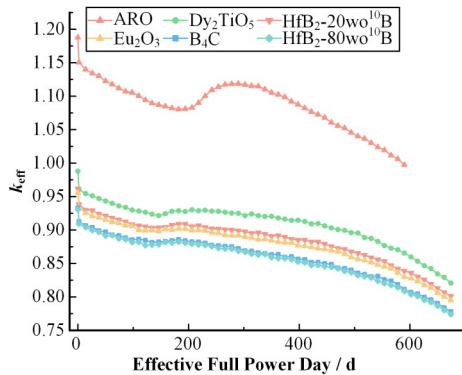


图4 k<sub>eff</sub>随燃耗变化  
Fig.4 Variation of k<sub>eff</sub> with burnup

化处理)见图8-10;290 d与590 d时,ARO与带棒运行模式的径向FU分布见图11与图12。结果表明,HfB<sub>2</sub>(80wo-<sup>10</sup>B)与B<sub>4</sub>C材料因热中子吸收截面相差不大,得到的结果几乎一致,故不再赘述B<sub>4</sub>C材料的分析;在带控制棒进行燃耗计算的模式下,堆芯寿期由ARO燃耗模式的590 EFPDs延长到698 EFPDs,即控制棒的引入可以延长堆芯寿期,<sup>235</sup>U利用率也相应得到提高,但会增加轴向功率的不均匀性。由图8-12可知,ARO模式下,中子通量在寿期初期与中期集中在低泄漏的内区,内区燃料反应速率显著

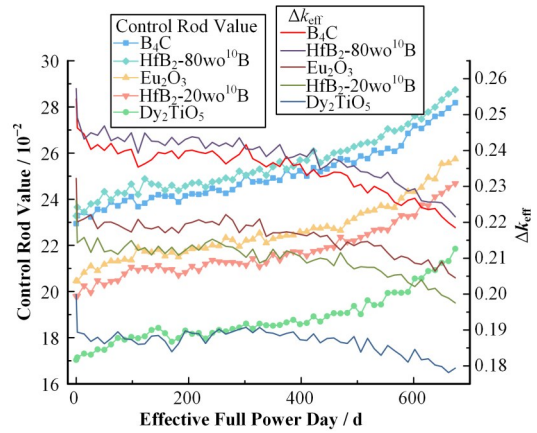


图5 控制棒价值随燃耗变化  
Fig.5 Variation of control rod value with burnup

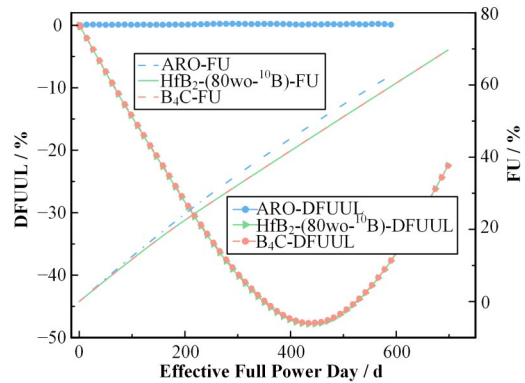


图6 燃料利用率随燃耗变化  
Fig.6 Variation of FU with burnup

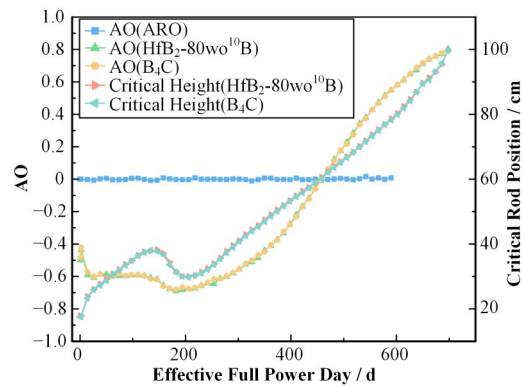


图7 轴向功率偏移与临界棒位随燃耗变化  
Fig.7 Variations of AO and the critical rod position of control rods with burnup

大于外区。随着堆芯达到寿期末,内区燃料的燃耗深度过高,且高泄漏的外区燃料不足以提供足够的中子以维持堆芯的临界状态;在带棒运行模式下,控制棒在寿期前中期处于低位,内区中子被大量吸收,使中子通量分布处于相对平缓的状态,减小了内区裂变速率以及增大了外区裂变速率,有利于增加寿期末内区燃料的剩余量,使堆芯产生足以维持堆芯临界状态的中子,进而提高堆芯寿期;但控制棒的引

入同时会增大DFUUL,尤其是在简单的同步动作策略下,控制棒集中在某一半区,使中子通量分布集中

在无棒区,上下半区燃料反应速率差异增大,进而增大AO。

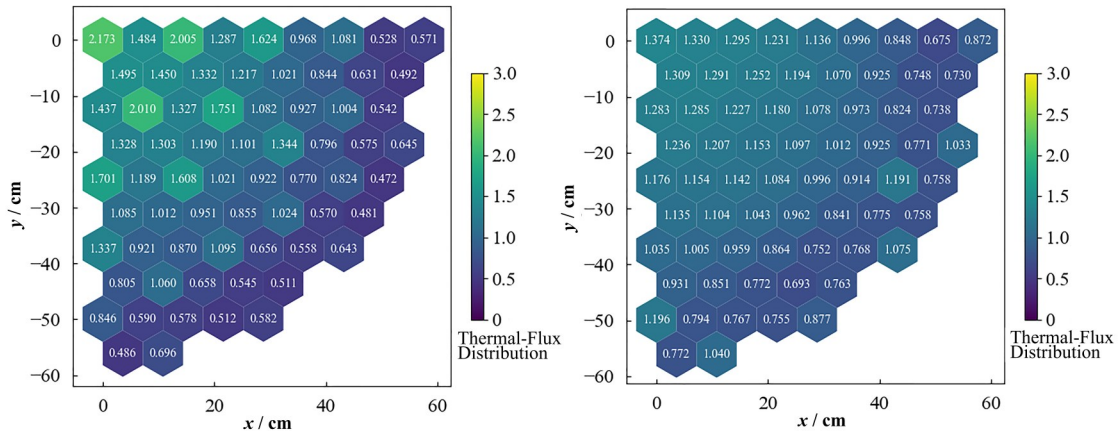


图8 ARO模式(a)与带棒运行模式(b)下热中子通量分布对比(2 d)

Fig.8 Comparison of thermal-flux distribution between ARO (a) mode and control rod operation (b) mode at 2 d

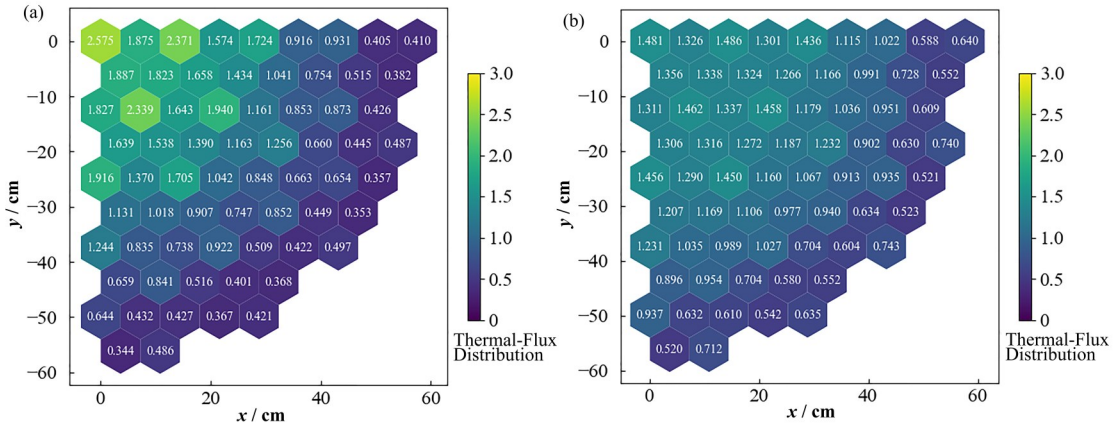


图9 ARO模式(a)与带棒运行模式(b)下热中子通量分布对比(290 d)

Fig.9 Comparison of thermal-flux distribution between ARO mode (a) and control rod operation mode (b) at 290 d

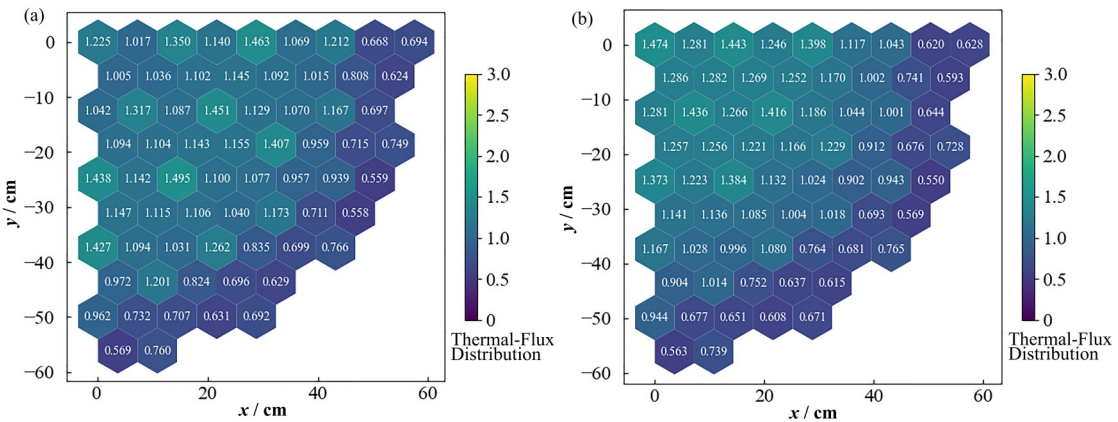


图10 ARO模式(a)与带棒运行模式(b)下热中子通量分布对比(590 d)

Fig.10 Comparison of thermal-flux distribution between ARO mode (a) and control rod operation mode (b) at 590 d

### 2.3 控制棒分组与优先动作策略

为减小控制棒带来的AO,本文开展了控制棒动作策略优化研究。将A组、R组以及S组设置为独立的控制棒组,每次仅移动A组或R组控制反应性,S

组全程拔出堆芯(简称“优先动作策略”)。A组与R组的动作策略与材料,以及对应的初始价值见表5,A组与R组整体价值大于两个单组价值之和的原因是图1的控制棒组布置利用了控制棒之间的干涉效

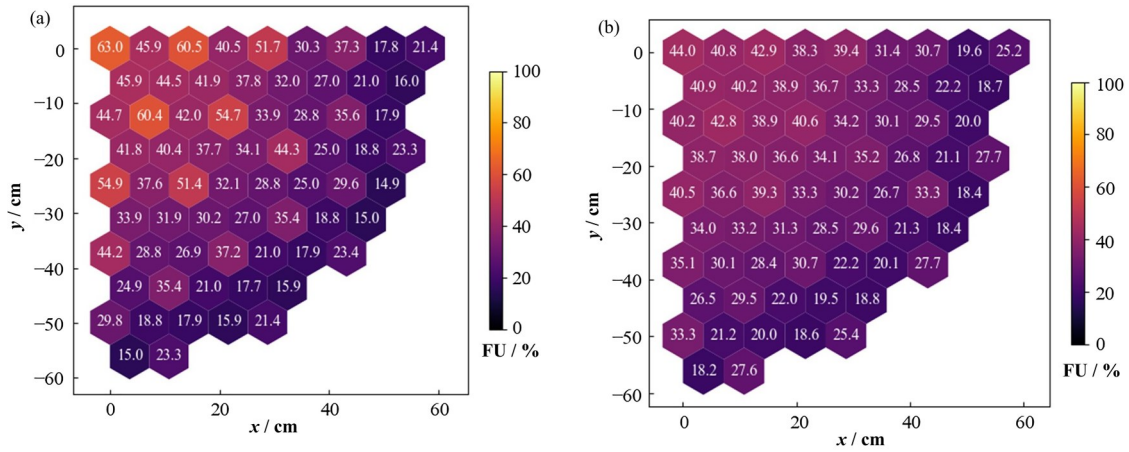


图 11 ARO 模式(a)与带棒运行模式(b)下燃料利用率分布对比(290 d)  
 Fig.11 Comparison of FU distribution between ARO mode (a) and control rod operation mode (b) at 290 d

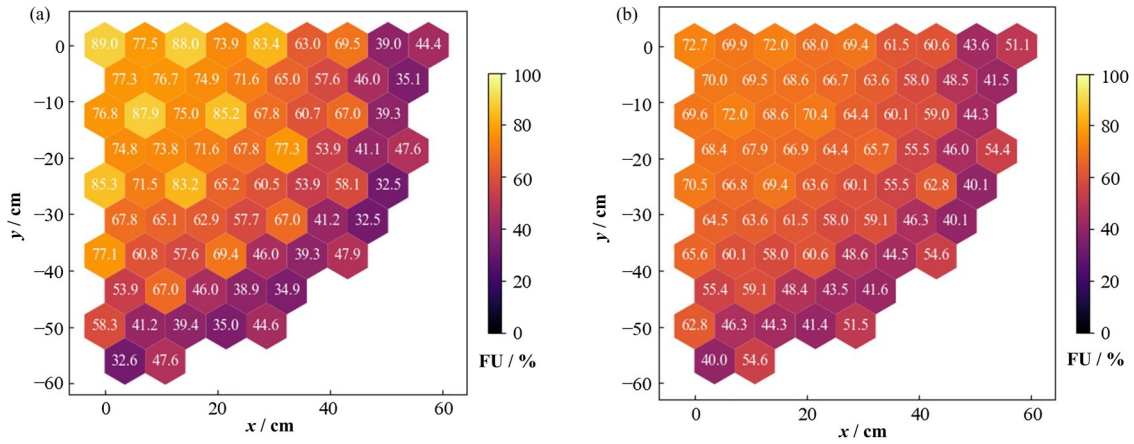


图 12 ARO 模式(a)与带棒运行模式(b)下燃料利用率分布对比(590 d)  
 Fig.12 Comparison of FU distribution between ARO mode (a) and control rod operation mode (b) at 590 d

应,提高了整体价值。图 13 与图 14 分别展示了 case1~case8 寿期内的临界棒位与 FU 随燃耗变化趋势,图 15 与图 16 分别展示了对应的 AO 与 R-PPF。

R 组优先策略的寿期均达到 650 d,A 组优先策略中 case1 达到了 650 d, case3、case5、case7 达到了 662 d。

表 5 动作策略与材料选型  
 Table 5 Move-in/out strategy and material selection

用例 Case	动作策略 Move-in/out strategy		控制棒材料 Control rod material		控制棒价值 Control rod value / 10 <sup>-5</sup>		
	A 组优先移动 Group A prioritized move	R 组优先移动 Group R prioritized move	A 组 Group A	R 组 Group R	A 组 Group A	R 组 Group R	A 组+R 组 Group A +R
1	√	×	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	9 727	7 545	19 835
2	×	√	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	9 727	7 545	19 835
3	√	×	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9 727	6 714	18 957
4	×	√	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9 727	6 714	18 957
5	√	×	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	HfB <sub>2</sub> (20wo- <sup>10</sup> B)	9 727	6 543	18 581
6	×	√	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	HfB <sub>2</sub> (20wo- <sup>10</sup> B)	9 727	6 543	18 581
7	√	×	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	9 727	5 884	17 771
8	×	√	HfB <sub>2</sub> (80wo- <sup>10</sup> B)	Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	9 727	5 884	17 771

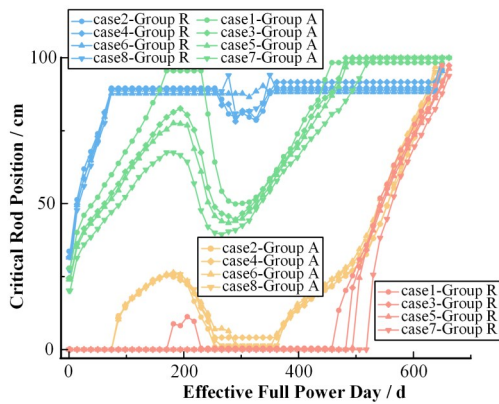


图 13 不同策略下控制棒临界棒位随燃耗变化  
Fig.13 Variation of the critical rod position of control rods with burnup under different strategies

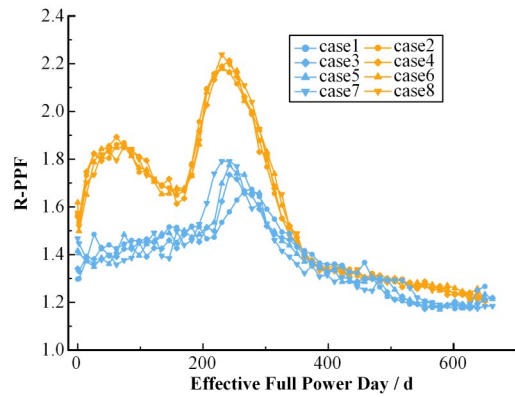


图 16 不同策略下径向功率峰因子随燃耗变化  
Fig.16 Variation of R-PPF with burnup under different strategies

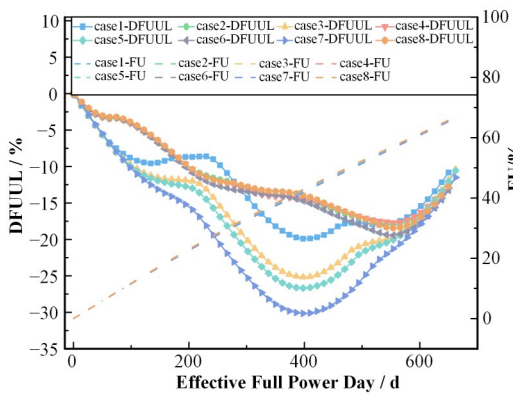


图 14 不同策略下燃料利用率及其轴向不均匀性(DFUUL)随燃耗变化  
Fig.14 Variations of FU and its axial inhomogeneity (DFUUL) with burnup under different strategies

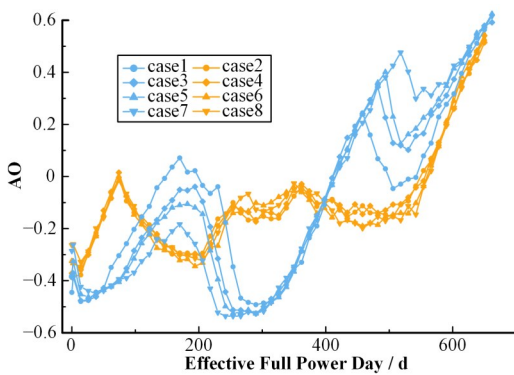


图 15 不同策略下轴向功率偏移随燃耗变化  
Fig.15 Variations of AO with burnup under different strategies

结果表明,采用优先动作策略能够有效减小控制棒带来的易裂变核素分布的不均匀性与AO,但会增加R-PPF。寿期初期,全插入堆芯的控制棒不会对堆芯的轴向功率造成影响,有利于减小AO;寿期中期,DFUUL的绝对值由47.81%下降至13.68%~30.17%;AO的极值在寿期内,由-0.69与+0.80分别下降至-0.49与+0.56,其中R组优先策略整体优于A组优先,AO的极值分别下降至-0.29与+0.52,原因

是R组价值小于A组价值,寿期初,R组需要以较大速率上提以补偿反应性损失,使功率分布以较大速率向上偏移,弥补了寿期初功率过于集中在底部的劣势,但R组在较短时间内(约100 d)处于高位,开始由A组上提以补偿反应性损失,中子通量开始集中于堆芯底部的无棒区,导致功率分布向下偏移;在100~200 d内劣于A组优先策略的原因是:A组优先策略中,R组处于全插入状态,不会对轴向功率造成影响;并且,A组的高价值特性使其以较小的速率上提,在可燃毒物正向补偿反应性速率小于燃耗带来的反应性损失速率之前,轴向功率分布呈较为平缓的向上移动趋势。而R组优先策略中,R组的低价值特性使其以较快速率提至高位,需要A组上提以补偿反应性损失,导致轴向功率向下偏移程度增大,抵消了一部分功率的向上偏移,从而使AO保持在一个较负的水平上;当可燃毒物正向补偿反应性开始占优时,控制棒需要下插以抵消过剩的反应性,在抵消正反应性的阶段内,R组优先策略的R组处于高位,大部分依靠A组下插以补偿反应性释放,使A组插入堆芯的长度与R组拔出堆芯的长度之差逐渐缩小,轴向功率逐渐趋向均匀;当可燃毒物正向补偿反应性处于劣势时,R组优先策略中的R组保持在高位,A组由于其高价值的特性,能以较小速率上提,在230~500 d时间内,A组插入堆芯总体长度接近R组拔出堆芯总体长度,较好地改善了轴向功率的偏移程度,其中case2在230~590 d内AO小于±0.2;R组优先策略的劣势之处在于,寿期初期与中期,R-PPF会大于A组优先,原因是中子通量会较快集中在棒位高的R组区域,造成局部燃料消耗速率过快,出现较大的局部热点,总体小于2.3。

为研究控制棒组价值对功率分布的影响,将A组设置为A1-A2-A3-A4-A5-A6-A8,R组设置为R1-R2-R3-R4-R5-R6-A7,控制棒材料均采用HfB<sub>2</sub>



(80wo-10B), 价值分别为  $8.688 \times 10^{-2}$  与  $8.402 \times 10^{-2}$ 。图 17、18 给出了控制棒组价值相当方案下, 临界棒位, AO 和 R-PPF 随燃耗变化曲线。当可燃毒物正向补偿反应性开始占优时, A 组抵消正反应性带来的动作过大, 从而导致寿期中期出现了较大的功率偏移。以上研究结果表明, 采用具有一定价值之差的控制棒组设计, 且低价值棒组优先移动的策略, 有利于减小控制棒带来的 AO。

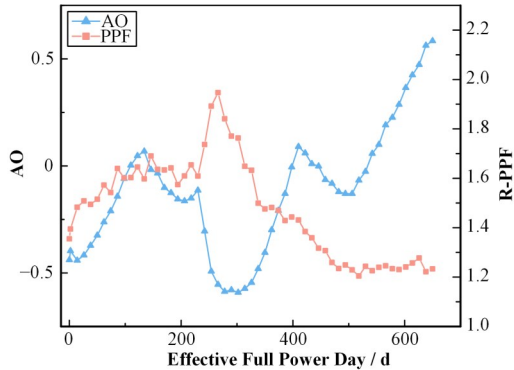


图 17 控制棒价值相当方案下 AO 与 R-PPF 随燃耗变化  
Fig.17 Variations of AO and R-PPF with burnup under the value-equivalent scheme

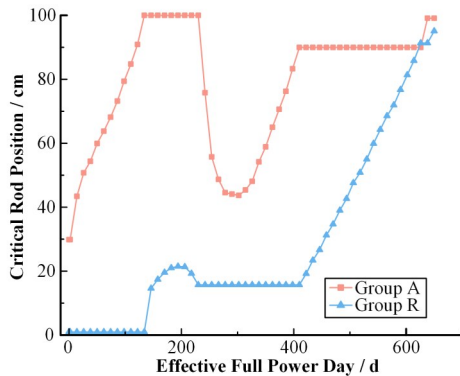


图 18 控制棒价值相当方案下控制棒临界棒位随燃耗变化  
Fig.18 Variations of the critical rod position of control rods with burnup under the value-equivalent scheme

### 3 结语

本文基于 KLT-40 挪威模型研究了不同控制棒方案在堆芯寿期内对反应性控制与功率分布的影响, 比较了带棒运行与无棒运行下的 FU、AO 与 CL。针对带棒运行下, 同步动作策略造成的 AO 较大的结果开展控制棒分组与动作策略研究, 将控制反应性的控制棒分为两组, 设计高价值棒组与低价值棒组优先移动, 以及价值相当情况下, 单组优先移动的动作策略。结论如下:

1) 控制棒的引入能够减小低泄漏区燃料的利用率, 增大高泄漏区燃料的利用率, 有利于提高寿期末的内区燃料剩余量, 使堆芯产生足以维持临界状

态的中子, 进而提高堆芯寿期, 由 590 EFPDs 延长至 650~698 EFPDs; 但采用简单的同步动作策略会造成 DFUUL 偏大, 增大轴向功率分布的不均匀性, 不利于堆芯长期运行。

2) 设计具有一定价值之差的控制棒组并采用低价值棒组优先动作策略能够有效减小控制棒带来的 AO 与 DFUUL, 但会增大 R-PPF; 寿期中期, DFUUL 的绝对值由 47.81% 下降至 13.68%~30.17%; AO 的极值在寿期内, 由 -0.69 与 +0.80 分别下降至 -0.49 与 +0.56; 其中低价值棒组优先策略整体优于高价值棒组优先, 控制棒组均选用 HfB<sub>2</sub> (80wo-10B) 材料效果最优, 寿期达到 650 EFPDs, AO 的极值分别下降至 -0.29 与 +0.52, R-PPF 在寿期内小于 2.3。

**作者贡献声明** 吴智强负责酝酿和设计实验, 实施研究, 分析/解释数据, 以及起草文章; 谢金森负责酝酿和设计实验, 获取研究经费, 对文章的知识性内容作批评性审阅, 指导与支持性贡献; 姜磊负责采集数据以及对文章的知识性内容作批评性审阅; 陈鹏宇负责采集数据以及对文章的知识性内容作批评性审阅; 刘涛负责采集数据以及对文章的知识性内容作批评性审阅; 邓年彪负责采集数据以及对文章的知识性内容作批评性审阅; 于涛负责统计分析, 获取研究经费, 对文章的知识性内容作批评性审阅以及支持性贡献。

### 参考文献

- 1 Bukharin O. Russia's nuclear icebreaker fleet[J]. *Science & Global Security*, 2006, **14**(1): 25 - 31.
- 2 JSC "Afrikantov OKB Mechanical Engineering" (OKBM). KLT40-S[R]. International Atomic Energy Agency, 2013.
- 3 Petrunin V V, Fadeev Y P, Pakhomov A N, *et al.* Conceptual design of small NPP with RITM-200 reactor [J]. *Atomic Energy*, 2019, **125**(6): 365 - 369. DOI: 10.1007/s10512-019-00495-4.
- 4 Lezani van der Merwe, Chang Joo Hah. Reactivity balance for a soluble boron-free small modular reactor[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2018, **50**(5): 648 - 653. DOI: 10.1016/j.net.2018.01.019.
- 5 Lee Chungchan, Hwang Dae-Hyun, Zee Sung-Quun, *et al.* Nuclear and thermal hydraulic design characteristics of the SMART core[C]//Tokyo University GENES4/ ANP2003: International Conference on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants. Japan: Atomic Energy Society of Japan, 3-7, Shimbashi 2-chome, Minato-ku, Tokyo N. 2003: 15-19.

- 6 Choe J, Zheng Y Q, Lee D, *et al.* Boron-free small modular pressurized water reactor design with new burnable absorber[J]. International Journal of Energy Research, 2016, **40**(15): 2128 - 2135. DOI: [10.1002/er.3590](https://doi.org/10.1002/er.3590).
- 7 Carelli D, Ingersoll D T. Handbook of small modular nuclear reactors[M]. 2nd Ed. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2021.
- 8 Mart J, Klein A, Soldatov A. Feasibility study of a soluble boron - free small modular integral pressurized water reactor[J]. Nuclear Technology, 2014, **188**(1): 8 - 19. DOI: [10.13182/nt13-135](https://doi.org/10.13182/nt13-135).
- 9 Jang J, Choe J, Choi S, *et al.* Conceptual design of long-cycle boron-free small modular pressurized water reactor with control rod operation[J]. International Journal of Energy Research, 2020, **44**(8): 6463 - 6482. DOI: [10.1002/er.5381](https://doi.org/10.1002/er.5381).
- 10 Diakov A C, Dmitriev A M, Kang J, *et al.* Feasibility of converting Russian icebreaker reactors from HEU to LEU fuel[J]. Science & Global Security, 2006, **14**(1): 33 - 48. DOI: [10.1080/08929880600620575](https://doi.org/10.1080/08929880600620575).
- 11 李雷鸣, 江书益, 陈珍平, 等. 核反应堆结构材料网格精细活化分析研究[J]. 核技术, 2022, **45**(8): 080601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.080601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.080601).  
LI Leiming, JIANG Shuyi, CHEN Zhenping, *et al.* Mesh-based activation analysis for structural materials in nuclear reactor[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(8): 080601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.080601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.080601).
- 12 Kim K S. Specification for the VERA depletion Benchmark suite[R]. United States. 2015.
- 13 Romano P K, Horelik N E, Herman B R, *et al.* OpenMC: a state-of-the-art Monte Carlo code for research and development[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, **82**: 90 - 97. DOI: [10.1016/j.anucene.2014.07.048](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.048).
- 14 沈芷睿, 孙启政, 何东豪, 等. 基于BEAVRS基准题高保真建模的OpenMC程序和NECP-X程序的对比验证[J]. 核技术, 2022, **45**(1): 010602. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010602](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010602).  
SHEN Zhirui, SUN Qizheng, HE Donghao, *et al.* Comparison and verification of NECP-X and OpenMC using high-fidelity BEAVRS benchmark models[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(1): 010602. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010602](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010602).
- 15 苏适, 谢芹, 陈珍平, 等. 基于OpenMC执行码的编译检测及临界基准验证[J]. 核技术, 2017, **40**(10): 100501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100501).  
SU Shi, XIE Qin, CHEN Zhenping, *et al.* Compiling validity and critical benchmark verification based on OpenMC execution code[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(10): 100501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100501).
- 16 洪爽, 杨永伟, 张璐, 等. 基于OpenMC的多群截面库制作及有效性验证[J]. 核技术, 2017, **40**(4): 040502. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040502](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040502).  
HONG Shuang, YANG Yongwei, ZHANG Lu, *et al.* Fabrication and validation of multigroup cross section library based on the OpenMC code[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(4): 040502. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040502](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040502).
- 17 Risovany V D, Varlashova E E, Suslov D N. Dysprosium titanate as an absorber material for control rods[J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, **281**(1): 84 - 89. DOI: [10.1016/S0022-3115\(00\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00129-X).
- 18 于世和, 严睿, 冀锐敏, 等. PB-FHR的控制棒布局设计及物理效应[J]. 核技术, 2018, **41**(1): 010605. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010605](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010605).  
YU Shihe, YAN Rui, JI Ruimin, *et al.* Layout design and physical effect analysis of control rod in PB-FHR[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(1): 010605. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010605](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010605).
- 19 Kennard M W, Harbottle J E. LWR control assembly designs: a historical perspective[C]//IAEA: Technical Committee Meeting on Control Assembly Materials for Water Reactors: Experience, Performance and Perspectives. America: IAEA, 2000: 7 - 31.
- 20 刘勇, 李满仓, 于颖锐, 等. 耐事故燃料控制棒备选材料的燃耗分析[J]. 现代应用物理, 2021, **12**(1): 81 - 85. DOI: [10.12061/j.issn.2095-6223.2021.010211](https://doi.org/10.12061/j.issn.2095-6223.2021.010211).  
LIU Yong, LI Mancang, YU Yingrui, *et al.* Burnup analysis of candidate materials for accident tolerant fuel control rod[J]. Modern Applied Physics, 2021, **12**(1): 81 - 85. DOI: [10.12061/j.issn.2095-6223.2021.010211](https://doi.org/10.12061/j.issn.2095-6223.2021.010211).