

文章编号: 0258-0926(2018)01-0157-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2018.01.0157

模块式小型压水堆 ACP100 堆芯燃料管理策略研究

汪量子, 巨海涛, 秦冬, 王连杰, 于颖锐, 李庆

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: 为将多用途模块式先进小型压水堆 (ACP100) 堆芯换料周期提升至 24 个月, 兼顾良好的燃料利用率并保证功率展平特性满足安全性的限值要求, 本文使用具备工程经验的成熟软件, 进行不同的批料数、不同富集度组合、不同径向装载模式等组合方案的燃料管理研究, 通过研究掌握了不同策略特征并形成 ACP100 堆芯燃料管理推荐策略: 选取 3 批次换料、24 盒组件/批的倒料策略, 结合部分低泄漏装载模式, 作为 ACP100 堆芯燃料管理推荐策略, 同时进一步提高燃料富集度以提升燃料经济性。

关键词: 模块式小型堆; 燃料管理; 批料数; 装载模式

中图分类号: TL371 **文献标志码:** A

Fuel Management Strategy Analysis of Small Modular Pressurized Reactor ACP100

Wang Liangzi, Ju Haitao, Qin Dong, Wang Lianjie, Yu Yingrui, Li Qing

Science and Technology on Reactor Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to achieve 24-months cycle length for Advanced Small Modular Pressurized Reactor (ACP100), and keep a balance between good fuel utilization and flat power distribution to assure reactor safety, using the well-developed software applied in engineering practice, this paper construct cases with combination of different number of assemblies per batch, enrichment types, and radial loading patterns; characteristics analysis of these cases could be referred during the confirmation of fuel management strategy of ACP100 reactor, and a recommended strategy is attained: combination of 3 batch loading and 24 assemblies per batch, along with partial low leakage loading pattern, and a higher enrichment to improve fuel economics.

Key words: Small modular reactor, Fuel management, Number of assemblies per batch, Loading pattern

0 引言

多用途模块式先进小型压水堆 (ACP100) 的核蒸汽供应系统采用一体化布置, 使反应堆及反应堆冷却剂系统大大简化, 安全性和经济性达到第三代核能系统技术水平, 可满足接近人口密集区域及内陆、沿海地区对核能热电联供、水电联供等的多样性需求, 还可用于海岛及军事基地的电热水联供。堆芯燃料管理确定燃料组件的使用、装载位置以及装卸料方式, 影响燃料利用率 (经

济性) 和堆芯安全性, 是堆芯核设计研究的重要内容。

ACP100堆芯功率密度约68kW/L, 使用57盒17×17栅格形式的国产CF3S方形燃料组件, 换料周期目标为24个月, 平均每个循环燃耗深度约16000~17000 MW·d/t(U), 组件最大卸料燃耗限值52000 MW·d/t(U), 考虑燃耗不均匀性后按照组件平均卸料燃耗约45000 MW·d/t(U)核算, 平均每个组件在堆芯辐照约2.5个燃料循

环。因此, ACP100堆芯燃料管理策略选取3批次装卸料的基本路线。

本文使用具备工程应用经验的成熟软件, 研究不同批料数(如 24/24/9、20/20/17)、不同富集度组合(如 4.45%单一富集度, 4.45%+4.95%混合富集度)、不同径向装载模式(如低泄漏、部分低泄漏)组合下的燃料管理策略, 分析不同策略的主要特征, 基于分析结果, 形成 ACP100堆芯燃料管理推荐策略。

1 燃料管理策略研究

每批次新燃料组件数目越少, 平均每个组件在堆内辐照时间越长, 组件的卸料燃耗越深; 另一方面, 燃料元件受辐照后其材料特性发生改变, 为了保证燃料元件的完整性, 用组件最大卸料燃耗限值约束每个燃料组件在堆内辐照的时间极限。燃料管理研究的一个重要任务是组件最大卸料燃耗不突破限值的前提下, 使组件平均卸料燃耗尽可能高。主要通过两个方面实现: ①减少每批次新燃料组件数目; ②降低组件燃耗不均匀系数。对应产生本节燃料管理策略研究的主要研究方向为: 不同批料数目的研究, 不同富集度组合的研究和不同径向装载模式。

1.1 批料数研究

基于堆芯总体参数, 堆芯宜采取 3 批次装卸料策略, 但每批次装入的新燃料组件数目有多种可能的组合。考虑装载的对称性需求、后备反应性保障等因素, 进行两大类批料数组合方案的研究:

(1) 方案①: 20/20/17、21/20/16、20/21/16。这一类组合方案的策略相近, 差别仅在于中心燃料组件的来源, 接近于理论上的 3 批次换料, 平均每个组件在堆内辐照约 2.7~2.8 个循环。

(2) 方案②: 24/24/9。该组合方案可使堆芯具有更高的后备反应性, 平均每个组件在堆内辐照约 2.4 个循环, 提升批卸料燃耗难度较大。

以 24 个月换料周期、95%的实际负荷因子核算, 每个燃料循环平均燃耗深度~17000 MWd/tU, 方案①中 2.7~2.8 个循环的平均辐照时间, 对应组件平均卸料燃耗为 46000~48000 MW·d/t(U), 考虑到卸料燃耗限值为 52000 MW·d/t(U), 要求堆内组件的燃耗不均匀系数达到优化程度较高

的大堆水平(如 M310), 与大堆相比, 小堆尺寸小、径向通量分布梯度大, 实现起来非常困难。方案②的 2.4 个循环平均辐照时间, 对应组件平均卸料燃耗约 4 000 MW·d/t(U), 可行性高但批卸料燃耗相对较低。

为了满足对称性需求, 批料数以 4 盒为单位变化, 对应的批卸料燃耗深度差异约 7000 MW·d/t(U), 在提高平均卸料燃耗和保障功率展平特性 2 个方面, 难以实现完美兼顾。

1.2 混合富集度研究

商用压水堆的研究经验表明, 混合富集度燃料管理策略能够精确灵活地控制循环长度, 能够精确控制组件平均卸料燃耗, 提高核电厂经济性^[1]。对 ACP100 堆芯, 研究混合富集度策略有助于精准实现换料周期目标, 且有利于减少只入堆 2 个循环组件的剩余反应性浪费, 提高²³⁵U 的利用率。因此, 基于典型富集度进行以下富集度方案研究: ①4.45%单一富集度; ②1.80%+4.95%混合富集度; ③4.45%+4.95%混合富集度; ④3.10%+4.45%+4.95%混合富集度。

1.3 径向装载模式研究

堆芯径向装载模式根据不同反应性大小的组件在堆内布置位置而划分, 压水堆传统装料形式为外-内分区交替换料, 形成高泄漏堆芯, 具有良好的径向展平特性; 随后发展出低泄漏换料方案, 与传统模式相比可延长堆芯寿期, 减轻堆外结构材料的辐照, 换料方案相对复杂^[2]。

ACP100 堆芯包含的组件数目较少, 燃料富集度较高, 每循环装载 20 或 24 盒新燃料组件, 新旧燃料组件间的反应性梯度较大, 径向展平难度大。为了在径向展平和燃料利用率间取得较好的平衡, 本文研究了不同径向装载模式下的堆芯特性: ①低泄漏装载; ②部分低泄漏装载, 4 盒新燃料组件布置于堆芯边缘; ③部分低泄漏装载, 12 盒新燃料组件布置于堆芯边缘。

1.4 燃料管理研究方案

组合 1.1~1.3 节所述的几方面研究方向, 构造 4 个燃料管理方案进行计算分析, 其主要描述见表 1。方案①~方案④涵盖了本文几个研究方向的不同组合, 每个方案的特征包括:

- (1) 方案①批料数多, 最大燃料富集度最低。
- (2) 方案②批料数少, 采用完全低泄漏布置。
- (3) 方案③批料数少, 堆芯平均燃料富集度

适中，搭配使用 3 种燃料富集度，奇偶循环的装料方案不同，装料方案最复杂。

(4) 方案④批料数多、堆芯平均燃料富集最高。

2 研究结果

使用具有工程应用经验的成熟软件，对燃料管理方案①~方案④进行名义状态的建模计算，主要的计算结果见表 2。

(1) 燃料循环寿期初实际的堆芯富集度、径向装载模式是影响循环长度的重要因素；约 3.4% 的堆芯富集度，可达循环长度约 660 EFPD(EFPD 表示有效满功率天数)。

(2) 径向装载模式对堆芯核焔升因子影响明显，堆芯外缘新组件越多，最大核焔升因子越小。

(3) 平均卸料燃耗计算结果与 1.1 节的分析预期相符。

(4) 方案②除中心组件的所有组件均使用 4.95%燃料富集度，且采用低泄漏径向装载形式，即使不考虑功率展平难度，使用批料数约 20 盒的倒料策略，进一步延长寿期的潜力较小；方案③每个循环装入的新组件仅 4 盒为 4.45%富集度，其余均为 4.95%富集度，同样印证这一特性。

(5) 方案④采用混合富集度装载，每循环装入 12 盒 4.45%和 12 盒 4.95%富集度燃料组件，最大卸料燃耗距离限值要求还存在一定裕量，外

缘组件数目较多使得径向功率展平难度下降，有望通过进一步提升堆芯平均富集度以延长循环长度并增大卸料燃耗。

(6) 方案④与方案①采用相同的批料数策略，均使用部分低泄漏装载形式，批卸料燃耗增大同时最大卸料燃耗减小，径向装载优化对方案性能的提升做出主要贡献。

综上所述，对 57 盒燃料组件的 ACP100 堆芯，从燃料组件经济性角度考虑，最宜采用批料数约 20 盒组件的策略，但方案②和方案③的研究结果表明，5%的富集度上限和最大卸料燃耗限值约束了堆芯后备反应性的增大潜力，预期采用 20 批料数策略的堆芯循环长度难以继续提升；另一方面，低泄漏装载带来的径向功率峰，使得堆芯安全裕量降低，低泄漏装载模式的功率展平难度极大。若采用批料数 24 盒组件策略，由方案④可见，堆芯平均富集度还可进一步增加，最大组件卸料燃耗也存在裕量，因此堆芯循环长度和批卸料燃耗都存在提升空间。同时，需结合堆芯事故分析结论，确定最适宜的径向装载模式，以获得经济性和安全性间较好的平衡。

3 推荐策略

基于前 2 节的研究，考虑堆芯安全裕量需求，推荐选取 24 盒组件/批的倒料策略结合部分低泄漏装载模式，作为 ACP100 堆芯燃料管理推荐策

表 1 燃料管理研究方案描述

Table 1 Description of Fuel Management Programs

参数	方案①	方案②	方案③	方案④
批料数	24/24/9	21/20/16	20/21/16(奇) ^① 21/20/16(偶)	24/24/9
燃料富集度/%	4.45	4.95, 1.8	4.95, 4.45, 3.1	4.95, 4.45
堆芯平均富集度 ^② /%	3.428	3.364(奇)/3.397(偶)	3.365(奇)/3.386(偶)	3.565
径向装载模式	部分低泄漏 (12) ^③	低泄漏	部分低泄漏 (4)	部分低泄漏 (12)

注：①奇偶循环装载方案不同；②指的是燃料循环寿期初，堆芯实际的平均富集度；③“()”中的数字表示在堆芯外缘的新燃料组件数目

表 2 燃料管理计算结果

Table 2 Computation Results of Fuel Management

参数	方案①	方案②	方案③	方案④
循环长度/EFPD	659	664	664	688
平均卸料燃耗/ $MW \cdot d \cdot t^{-1}$ (U)	39458	44959	43303	40995
组件最大卸料燃耗/ $MW \cdot d \cdot t^{-1}$ (U)	49121	50157	50011	48273
最大核焔升因子	1.40	1.63	1.51	1.44
最大热点因子	1.96	2.06	1.92	1.99

