

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0038-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0038

铅铋冷却氮化物燃料小型模块化反应堆 堆芯中子学特性分析

袁显宝^{1,2}, 曹良志¹

1. 西安交通大学核科学与技术学院, 西安, 710049; 2. 三峡大学机械与动力学院, 湖北宜昌, 443002

摘要: 在充分分析国际上各种小型模块化反应堆优缺点基础上, 设计出铅铋冷却氮化物燃料小型模块化反应堆 (SMPBN), 并对该堆型的中子学特性进行了详细分析。通过分析认为 SMPBN 具有以下突出优势: 以乏燃料钚作为反应堆的驱动燃料, 钍作为增殖燃料, 可以解决由于铀资源缺乏对核电发展的制约; 氮化钚和氮化钍作燃料, 可以提高反应堆的安全性和燃料的转换比; 液态铅铋作冷却剂和反射层, 不仅提高反应堆完全自然循环的能力, 而且可以提高中子的经济性; 整个寿命期内反应性的波动很小并且几个重要反应性系数都为负值, 从而保证反应堆具有固有安全性。

关键词: SMPBN; 铅铋冷却剂; 氮化物燃料; 反应性系数

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

Analysis of Neutronics Characteristics of Small Modular Pb-Bi Cooled Reactor Core with Nitride Fuel

Yuan Xianbao^{1,2}, Cao Liangzhi¹

1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China;

2. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002, China

Abstract: Based on the extensive investigation of small modular reactors in the world, a small modular Pb-Bi cooled reactor with nitride nuclear fuel (SMPBN) which is designed to meet the requirements for nuclear energy improvement is presented, and the neutronics characteristics of its core is analyzed in detail. The analysis concludes the following features: the bottleneck problem of the limited uranium resources in the nuclear power development can be fixed by using the spent-plutonium as the driven fuel and thorium as the fertile fuel; the using of PuN and ThN as the fuels can improve the safety of the reactors and increase the breeding ratio; the liquid lead-bismuth selected as the coolant and reflector not only improves the ability of the natural circulation, but also enhances the reactor safety and improves the economy of neutron; the burn-up swing is almost zero in the whole lifetime due to the perfect inner breeding ability, and all of the important reactivity coefficients are negative to assure SMPBN inherent passive safety.

Key words: SMPBN, Lead bismuth coolant, Nitride fuel, Reactivity coefficient

0 引言

核能被认为是解决当前世界范围内能源危机、环境污染和经济持续发展等问题最有效途径。虽然有些国家和地区对核能仍持谨慎的态度, 但是发展核能已经是一个不可逆转的趋势。然而核

安全、核燃料利用率、核能经济性、核废料处理和核扩散问题成为核能持续发展的制约因素。为了有效解决这几个方面的问题, 小型模块化反应堆再次成为世界瞩目的焦点^[1-3]。

本文在充分调研国际上小型模块化反应堆设

收稿日期: 2014-08-26; 修回日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(91126005); 863计划(2013AA051402); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1280); 中国博士后科学基金(2013M532051); 陕西省博士后科学基金(第一批)

作者简介: 袁显宝(1974—), 男, 博士, 副教授, 现从事核反应堆物理教学与研究工作

设计理念的基础上提出以铅铋为冷却剂氮化物燃料的小型模块化反应堆(SMPBN)。该堆以液态铅铋作为冷却剂,氮化钷作为驱动燃料,氮化钷作为增殖燃料,满足20 a满功率(热功率300 MW)运行,寿期内不需要倒料和换料。寿期内反应性的波动几乎为零,最大的有效增殖因子(k_{eff})大约是1.014。20 a满功率运行后的最大卸料燃耗是229.62 GW·d/t,平均卸料燃耗低于200 GW·d/t。堆芯最大峰功率因子出现在堆芯寿期末,大约是1.36,对应最大线功率密度是8.2 kW/m,堆芯平均转换比大约是0.97。反应堆在寿期内所有重要反应性系数都为负值,表明SMPBN具有固有安全性。在本文的第二部分介绍SMPBN设计的基本思想,包括燃料棒和组件的设计、堆芯燃料布置和控制组件的布置;对反应堆寿期内的物理分析将在第3部分进行;最后给出结论。

1 堆芯设计

1.1 燃料棒和组件设计

SMPBN 燃料棒采用圆柱状结构,燃料棒外径0.83 cm,不锈钢 T91 包壳的厚度 0.75 mm,燃料主要成份是 PuN 和 ThN,其中 Pu 是压水堆中经过 33 GW·d/t 燃耗冷却 15 a 后乏燃料中的钷,钷是 100%的 ^{232}Th 。燃料有效密度是 75%TD(有效密度),燃料等效直径 0.59 cm。由于反应堆要满功率运行 20 a,因此在燃料棒中要有足够的空间容纳裂变气体,在燃料棒的上方留有 2.05 m 的空间,燃料棒总长 4 m,其中活性区高度 1.95 m。组件采用六边形的结构,包含 127 根燃料棒,组件对边距 11.2 cm,组件包壳厚度 0.1 cm。

1.2 堆芯布置

堆芯采用四区布料,从中心向外依次为 12%、13%、14%和 15%富集度的燃料,富集度是按照燃料棒中 PuN 所占的体积比定义。最内两圈布置的是 12%富集度的燃料,并且在燃料棒中的中间部分设置了 100%ThN 的增殖区,主要是为了提高燃料的转换比、展平功率分布和降低堆芯的空泡系数。堆芯活性区外是一个组件厚度的铅铋反射层,最外两圈是不锈钢屏蔽层。反应堆控制系统分为两组,一组用于在正常运行情况下的功率和反应性调节以及停堆(RCS),另一组仅用于停堆(RSS)。

2 物理分析

本部分将利用 SRAC 组件计算程序和 COREBN 堆芯计算程序,对 SMPBN 的物理学特性进行详细的分析。分析的主要内容包括:SMPBN 在整个寿期内的反应性随着燃耗的变化、反应性系数、燃料的转换比、卸料燃耗、功率峰因子和控制棒的停堆余量。

2.1 k_{eff} 及反应性系数

图1给出了反应堆寿期内 k_{eff} 随燃耗的变化。由于开始易裂变核素钷的消耗使得 k_{eff} 在开始急剧下降,然后随着燃耗的加深钷增殖的积累, k_{eff} 逐渐上升,大约在运行5 a的时候 k_{eff} 达到最大值1.014,随后由于 ^{232}Th 的消耗,增殖能力变弱, k_{eff} 开始下降直到寿期末。寿期内 k_{eff} 变化非常小,表明反应堆易于控制。

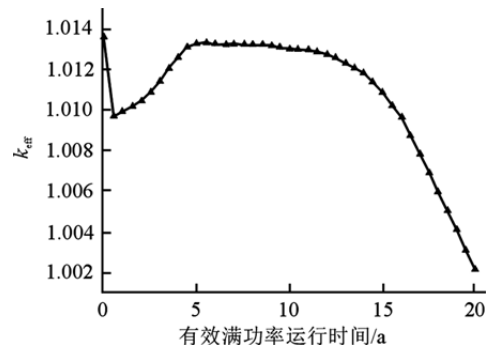


图1 反应性随燃耗的变化

Fig. 1 Reactivity Variation with Effective Full Power Year

表1中给出SMPBN的主要反应性参数,通过计算结果可以看出,反应堆的主要反应性系数都为负值。尤其空泡系数非常小,主要是因为SMPBN的设计采用池式机构,冷却剂同时充当了反射层,在冷却剂全部丧失的情况下,中子泄漏变得相当严重,从而导致反应堆达到很深层次临界状态。

表1 反应性系数
Table 1 Reactivity Coefficients

反应性系数	数值
燃料温度系数/ 10^{-5}K^{-1}	-0.536
冷却剂温度系数/ 10^{-5}K^{-1}	-0.21
冷却剂密度系数/ 10^{-5}	-30.607
空泡系数/ 10^{-5}	-4673.57
燃料棒轴向伸长系数/ 10^{-5}	-81.0
组件径向膨胀系数/ 10^{-5}	-1.7

2.2 卸料燃耗和功率峰因子

反应堆堆芯各组件经过 20 a 满功率运行后的卸料燃耗从堆芯向外逐渐降低, 虽然最外层具有最高富集度燃料, 但由于堆芯外围中子泄漏厉害导致堆芯外围中子注量率较小, 卸料燃耗低。卸料燃耗最大值出现在富集度为 13% 的燃料组件, 并不是出现在中子注量率最大的中心区域, 这是由于在堆芯中心区域的燃料棒中加入了 30 cm 的增殖区域, 该区域的燃料仅含有氮化钍, 没有氮化铀。整个堆芯的最大卸料燃耗达到 229.62 GW·d/t。

由于在 SMPBN 的燃料棒中留有足够容纳裂变气体的空间, 寿期内燃料棒内的压强不会很大, 燃料棒包壳在寿期内不会出现破裂。反应堆堆芯各组件寿期末的功率峰因子达到最大值 1.36。寿期初和寿期中各组对应功率峰因子值均小于 1.25, 但反应堆整个寿期内线功率最大值在 8.2 kW/m, 并且最大值是随着燃耗的加深不断从外向内移动, 表明 SMPBN 在寿期内不会出现局部燃耗过深带来的安全问题。

2.3 停堆余量

表 2 给出了反应堆所需控制棒的反应性和控制棒价值的比较。需要最小的控制系统价值主要考虑了反应堆从满功率运行到零功率状态 (冷却剂处于正常运行时入口温度状态, 也称为热备状态) 和从热备状态到换料状态时温度变化引入的正反应性, 反应堆出现最大控制组件卡棒和弹棒的情况下导致控制组件系统反应性的减少, 反应堆本身具有的剩余反应性以及 10% 的误差。通过计算结果比较发现, 在反应堆出现最严重事故的情况下, 控制系统有足够的停堆余量使反应堆安全停堆, 停堆余量大约是 893.93×10^{-5} 。

3 结论

(1) SMPBN 在寿期内反应性的波动很小, 并且几个重要反应性系数都为负值。同时, SMPBN 采用池式结构和自然循环, 从而保证反应堆容易控制并具有固有安全性。

表 2 需要的反应性和控制系统的反应性 10^{-5}

Table 2 Required Reactivity Worth and Information of Control Assemblies 10^{-5}

参数		RCS	RSS
需要的反应性价值	温度效应		
	满功率到热备状态	761.04	761.04
	热备状态到换料	286.9	—
	控制棒驱动系统误操作	413.74	604
	燃料剩余反应性	1359	—
控制组件系统	误差 10%	280.86	—
	最大需要的反应性价值 M	3101.54	1359
	控制组件数量	2114	1812
	控制系统反应性价值	4259.41	2114
停堆余量	卡棒事故	413.74	604
	可利用剩余反应性价值 A	3844.46	1510
	$A-M$	742.92	151

(2) SMPBN 采用四区布料方式和堆内增殖焚烧, 使得反应堆寿期内功率峰因子很小且随着燃耗的加深逐步从堆芯外围向芯内移动, 最大值出现在寿期末。反应堆在寿期内的最大线功率密度仅为 8.2 kW/m, 因此, 反应堆功率分布很均匀, 不会出现局部位位置烧毁问题。

(3) 堆芯平均卸料燃耗在 200 GW·d/t, 最大值 229.62 GW·d/t。在燃料棒设计的时候充分考虑到裂变气体导致棒内压力改变。因此, 经过 20 a 满功率运行后燃料棒仍会保证完整, 不会出现破裂。最后, 反应堆控制系统可以提供足够的停堆余量, 保证反应堆在任何工况下都能够安全停堆。

参考文献:

- [1] Zrodnikov A, Toshinsky G, Komlev O, et al., Innovative nuclear technology based on modular multi-purpose lead-bismuth cooled fast reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50: 170-178.
- [2] Cunningham N, Small modular reactors-a possible path forward for nuclear power[R]. American security project, October 2012.
- [3] IAEA. Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends[R]. IAEA-TECDOC-1451, May 2005.

(责任编辑: 杨洁蕾)