

# MOX 燃料组件装入现役 M310 堆芯 对堆芯核设计的影响研究

刘晓黎<sup>1</sup>, 官宇<sup>2</sup>

(1. 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, 四川 成都 610041;  
2. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082)

**摘要:** 国际上的 MOX 燃料技术目前已较为成熟, 且已有在压水堆中运行的工程经验。本文对 MOX 燃料组件的中子学性能进行了分析, 对其在我国现役 M310 堆芯应用的可行性进行了研究, 得到了 M310 堆芯由全部使用  $\text{UO}_2$  燃料组件向使用 30% 的 MOX 燃料组件过渡的堆芯燃料管理方案, 并对使用 MOX 燃料组件的堆芯的部分中子学参数进行了初步分析。结果表明: 使用 30% 的 MOX 燃料组件的堆芯可达到与全  $\text{UO}_2$  堆芯相当的循环长度; 堆芯反应性控制能力可满足要求; 慢化剂温度系数、Doppler 温度系数、Doppler 功率系数、氙和钐的动态特性均趋向使堆芯运行更加安全和稳定。本文的研究结果可为 MOX 燃料在 M310 堆芯中应用的进一步研究提供参考。

**关键词:** MOX 燃料; M310 堆芯; 核设计

中图分类号: TL249

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)09-1629-08

doi: 10.7538/yzk.2015.49.09.1629

## Study on Effect of MOX Fuel Assembly Loaded in Current M310 Reactor Core on Nuclear Design

LIU Xiao-li<sup>1</sup>, GONG Yu<sup>2</sup>

(1. *Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China;*

2. *Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China*)

**Abstract:** The MOX fuel technology has been developed and applied in PWR all over the world. In this paper, the neutronic performance of the MOX fuel assembly was studied, and fuel management scheme of M310 reactor core from all  $\text{UO}_2$  fuel assemblies to 30% MOX fuel assemblies was given. The results show that the core loaded 30% MOX fuel assemblies can reach the same lifetime as the all  $\text{UO}_2$  core, the ability of the control system can meet the requirement of reactivity control, and the Doppler temperature and power coefficients, moderator temperature coefficient and the evolutions of Xe and Sm all benefit for the core operation to be more stable. The results of this study prove that the MOX fuel assembly can be used in the M310 reactor core.

**Key words:** MOX fuel; M310 reactor core; nuclear design

目前,我国现役压水堆核电站卸出的乏燃料均存放在乏燃料水池中。随着我国核电的发展,乏燃料的长期贮存带来的种种问题日渐突出,因此,对乏燃料再利用的研究有着非常现实的意义。而将乏燃料处理后制成 MOX 燃料并放入堆芯再循环则是非常有效的途径,不但可提高资源的利用率,同时还可帮助嬗变乏燃料中半衰期较长的核素,大幅减少乏燃料对环境的危害。

从 20 世纪 80 年代开始,国际上就开始研究 MOX 燃料在压水堆的应用问题,并逐渐在反应堆中进行使用。目前,比利时、瑞士、德国、法国和日本等多个国家已有大量的运行经验反馈。

EDF(法国电力集团)从 1987 年开始使用 MOX 燃料组件,到 2010 年,共有 22 个 900 MW 的压水堆机组拥有了使用 MOX 燃料组件的许可证。在第 3 代压水堆核电站欧洲先进压水堆 EPR 的设计中,应用 30% MOX 燃料组件的能力是作为核蒸汽供热系统(NSSS)设计的基准设计来考虑的<sup>[1]</sup>。法国在超过 20 座使用 MOX 燃料的在役核电站中对反应堆启动的物理试验和运行过程中的周期试验中,测量了临界硼浓度、等温温度系数等参数,计算值与实测值的偏差均处于反应堆设计和安全分析考虑的许可偏差范围之内。这些经验表明,采用 MOX 燃料的核电站反应堆的安全性和运行性能达到了与 UO<sub>2</sub> 燃料相同的水平<sup>[2]</sup>。

虽然 MOX 燃料组件在国外已有实际应用经验,但国内现役压水堆能否使用 MOX 燃料组件,及使用 MOX 燃料会给堆芯带来怎样的影响等问题仍在不断研究中,并引起了广泛的兴趣。

本文在现役的典型 M310 堆芯设计的基础上,考虑工程实际的核设计的要求,研究在全 UO<sub>2</sub> 堆芯中逐步加入 MOX 燃料组件,得到在经历数个过渡循环后,MOX 燃料组件占总燃料组件数目约 30% 的平衡循环的燃料管理设计方案及基本计算结果,并对 MOX 燃料组件加入后对堆芯的控制参数、反应性系数和动态参数等方面的影响进行分析。

## 1 计算程序及计算方法

本设计采用新版核程序包 SCIENCE V2.3.6g 进行计算。该程序包主要由 APOLLO2-F 和 SMART 程序组成。

APOLLO2-F 程序采用碰撞概率方法进行组件输运计算。SMART 是一个三维两群堆芯扩散-燃耗计算程序,采用先进节块技术,应用合理的“不连续因子”来处理具有较大截面变化或中子通量变化的问题,可对几乎所有类型的压水堆进行稳态和瞬态工况计算。

SCIENCE 程序包为法国阿海珐公司研制的成熟的核程序计算包,具有丰富的核计算工程经验。在 SCIENCE 程序验证报告中给出可支持到平均 Pu 含量最高为 11% 的验证计算<sup>[3]</sup>,验证报告中同时给出了针对多种平均 Pu 含量的 MOX 燃料组件及含 MOX 燃料组件的堆芯的计算和试验验证偏差,结果表明,虽然 MOX 堆芯的某些参数(如功率分布等)可能较全 UO<sub>2</sub> 堆芯的偏差更大,但仍满足程序的不确定性要求。此外,针对 SCIENCE 程序与基于 MCNP-ORIENGE 的蒙特卡罗临界-燃耗程序 MCBurn 在 MOX 燃料组件的计算能力比较的研究结果表明,平均 Pu 含量小于 15% 的情况下,两个程序在低燃耗时计算得到的组件  $k_{\text{eff}}$  的相对偏差小(0.24%);在燃耗小于 52 000 MW·d/tU 时,两者的相对偏差小于 1.65%。在高燃耗时两者的相对偏差较大主要是由于 MCBrun 程序所使用的燃耗计算程序 ORIENGE 缺少某些核素的燃耗链造成的<sup>[4-5]</sup>。因此,SCIENCE 程序包具有 MOX 燃料组件和含 MOX 燃料组件的堆芯的计算能力。

## 2 MOX 燃料组件的组件设计和燃料管理

### 2.1 MOX 燃料组件应用于堆芯需遵循的依据和准则

要将 MOX 燃料组件装入现役 M310 堆芯,要求 MOX 燃料组件在几何构造上应与 UO<sub>2</sub> 燃料组件完全相同,这样使用 UO<sub>2</sub> 燃料组件的堆芯无需进行任何硬件改造即可向 MOX 堆芯过渡。

同时,堆芯的基本特性也不应由于 MOX

燃料组件的使用而产生变化。装入 MOX 燃料组件的堆芯应遵循现役反应堆燃料管理和核设计的基本要求,如:平衡循环的循环长度应达到要求;堆芯的各种反应性系数和动态参数必须使堆芯具有负反馈;堆芯功率分布必须满足限值要求;反应堆的可溶硼、控制棒等的设计必须满足反应性控制的要求等。

本文在岭澳二期核电工程燃料管理设计平衡循环<sup>[4]</sup>的基础上进行 AFA3G 组件(全  $\text{UO}_2$ )堆芯向使用 MOX 燃料组件的堆芯过渡的燃料管理研究。并将该电站作为参考电站,以便对 MOX 堆芯的各种参数进行对比和评价。

本文研究的 MOX 燃料组件中 Pu 同位素含量考虑为典型 M310 堆芯乏燃料中的含量。

## 2.2 MOX 燃料组件设计

MOX 燃料组件中含有大量的钚同位素,钚同位素与铀不同的中子性质造成了 MOX 燃料组件与  $\text{UO}_2$  燃料组件的中子学差异。

MOX 燃料中易裂变 Pu 同位素的热中子吸收截面较<sup>235</sup>U 的高,其裂变截面和俘获截面也都大 1 倍左右。<sup>240</sup>Pu 和<sup>242</sup>Pu 的吸收截面在近热区有强的共振峰。因此,MOX 燃料的中子能谱偏硬,即在同一功率水平下,其热中子通量较铀燃料的要小。这使得 MOX 燃料组件具有较大的转换比。

图 1 示出了平均 Pu 含量为 8.6% 的 MOX 燃料组件与目前 M310 堆芯中使用富集度为 3.2% 的 AFA3G 组件的  $k_{\text{inf}}$  随燃耗的变化。由图 1 可看出,MOX 燃料组件的初始  $k_{\text{inf}}$  较 AFA3G 组件的小,随燃耗变化平稳。

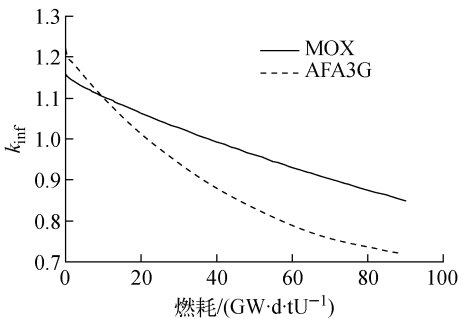


图 1 MOX 燃料组件与 AFA3G 燃料组件的  $k_{\text{inf}}$  随燃耗的变化

Fig. 1 Variation of  $k_{\text{inf}}$  with burnup for MOX and AFA3G fuel assemblies

由于 MOX 燃料能谱较硬,在与  $\text{UO}_2$  燃料组件交错布置时,MOX 燃料组件内部的中子慢化不如外围充分,组件外围燃料棒功率更大,使得 MOX 燃料与 AFA3G 燃料交界处有较大的热通量梯度。这就要求 MOX 燃料组件内的燃料棒必须按富集度分区布置,不能像现役 M310 电站中使用的  $\text{UO}_2$  燃料组件一样,在整个组件内使用相同富集度的燃料棒,而必须在组件范围内对燃料棒进行分区布置。

图 2 示出了本研究确定的 MOX 燃料组件的分区设计。组件内各区燃料棒的数目、分布及 Pu 含量的选择应使组件放入堆芯后,既不会在堆内引起较大的功率畸变,又具有满足燃料管理要求的足够的反应性。

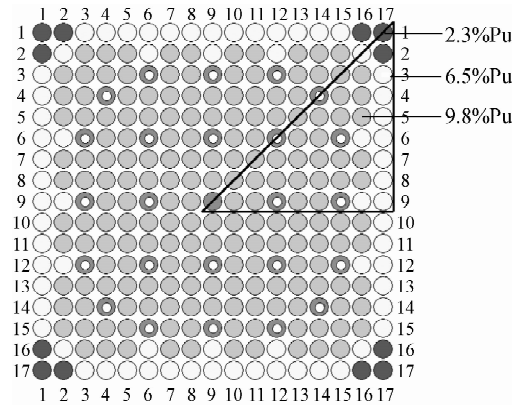


图 2 MOX 燃料组件的分区布置

Fig. 2 MOX fuel assembly radial design

研究表明,分区布置并未改变组件的平均 Pu 含量,因此不影响燃料组件的  $k_{\text{inf}}$ ,但对组件内燃料棒的最大功率优化效果非常明显。

## 2.3 M310 堆芯从全 $\text{UO}_2$ 组件过渡到部分 MOX 组件的燃料管理

MOX 燃料组件放入堆芯后,需充分考虑不同类型组件之间的相互作用和影响。MOX 燃料组件的中子能谱较硬,中子自由程较长,在堆芯中对周围的  $\text{UO}_2$  燃料组件提供更多的中子,造成周围组件功率升高。此外,MOX 燃料组件如果装载在堆芯外围,对压力容器的辐照将会非常大。本文研究的参考堆芯是一个 out-in 装载的高泄漏堆芯,因此在装入 MOX 燃料组件的同时,还需考虑降低堆芯径向泄漏,改变高泄漏的装载方式,将 MOX 燃料组件放置在

堆芯靠内的位置。

参考堆芯为年换料堆芯,共装载 157 个燃料组件。平衡循环时每次换料装入 52 个富集度为 3.2% 的 AFA3G 燃料组件。在参考堆芯平衡循环的基础上逐步装入 MOX 组件。每次换料装入堆芯 44 个新燃料组件,其中 12 个为 MOX 燃料组件,其余为 AFA3G 燃料组件。经历 4 个过渡循环后达到平衡循环。平衡循环堆芯共装载 48 个 MOX 燃料组件,约占总组件数目的 30%。图 3 示出了平衡循环的堆芯装载方案。

表 1 列出了燃料管理计算的主要结果。由表 1 可见,含 MOX 燃料组件的堆芯的循环长度和其他基本参数与参考堆芯的相当。但寿期初临界硼浓度、慢化剂温度系数的绝对值和最大核焓升因子  $F_{\Delta H}$  均明显增大。对于前两个参数,将在后文详细讨论。而对于最大核焓升因子  $F_{\Delta H}$ ,本文在进行燃料管理研究时,采用了较参考电站略高的功率分布限值,即:核焓升因子  $F_{\Delta H} \leq 1.65$  及热点因子  $F_Q \leq 2.45$ ,而参考电站的限值分别为 1.55 和 2.25。MOX 堆芯要到

达参考电站的功率分布限值是非常困难的,这一方面是由于 MOX 燃料组件会引起功率分布畸变,另一方面则是为了降低压力容器辐照水平而将全部新的 MOX 燃料组件和部分新的 AFA3G 燃料组件放置在堆芯内区造成的。事实上,虽然本文使用的核焓升因子和热点因子较参考电站的大,但其数值与国内在役的低泄漏燃料装载方式的 M310 电站一致。这些电站多年的运行经验表明,上述核焓升因子和热点因子是可以保证电厂安全的。

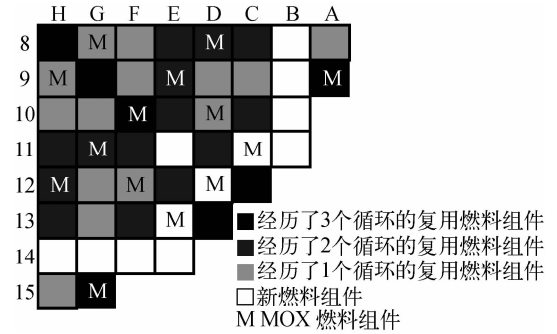


图 3 平衡循环堆芯装载示意图

Fig. 3 Reloading pattern of equilibrium cycle

表 1 MOX 堆芯燃料管理计算主要结果

Table 1 Basal results of fuel management

参数		不同循环下的数值					
		过渡前循环 <sup>1)</sup>	第 1 过渡循环	第 2 过渡循环	第 3 过渡循环	第 4 过渡循环	平衡循环
组件数	AFA3G	157	145	133	121	109	109
	MOX	0	12	24	36	48	48
新组件数	AFA3G	52	32	32	32	32	32
	MOX	0	12	12	12	12	12
寿期末组件最大	AFA3G	39 700	41 592	41 971	44 472	43 709	41 080
燃耗, MW · d/tHM	MOX	—	11 712	25 059	38 187	50 426	50 882
循环长度, EFPD		273	275	259	268	281	277
寿期初临界硼浓度, ppm		1 481	1 559	1 482	1 537	1 617	1 610
最大 $F_{\Delta H}$		1.345	1.435	1.449	1.463	1.470	1.454
慢化剂温度系数, pcm · °C <sup>-1</sup>		-0.632	-0.458	-6.563	-8.112	-7.738	-8.047

注:1) 过渡前循环为参考堆芯平衡循环

### 3 MOX 燃料组件对反应性控制的影响

MOX 堆芯的反应性控制方式与典型的 M310 型机组相同,均可通过以下两种方式实现:对于较缓慢的反应性变化,通过可溶硼浓度

的变化实现;对于快速的反应性变化,反应性控制是由堆内吸收体棒和可溶硼一起控制的,但主要由吸收体棒控制。

无论是可溶硼还是控制棒中的吸收材料,

均以吸收热中子为主,其价值与反应堆能谱有关。因此,在不考虑其他因素的情况下,MOX 燃料组件的加入会使硼微分价值和控制棒微分价值减小。

表 1 中,随着 MOX 燃料组件的加入,寿期初临界硼浓度逐渐升高的趋势正是由于硼微分价值的降低引起的。

过高的可溶硼浓度将给系统设计带来压力。如果日后需进一步增加堆芯中 MOX 燃料组件的数目或进行更长循环的燃料管理设计,则堆芯硼浓度可能进一步增加,超过系统设计的范围。此时,可采用在组件中添加可燃毒物、使用含富集<sup>10</sup>B 的硼酸等方式来控制可溶硼浓度。上述两种方法,特别是前者,在国内外均具有广泛的工程应用经验。

表 2 列出了含 MOX 燃料组件的堆芯和参考电站第 1 循环在寿期初、零功率时的控制棒积分价值比较。

MOX 燃料组件的加入会造成控制棒吸收减小、价值降低。但控制棒的价值还与其所在位置有关。因此,如果在堆芯装载设计的过程中关注控制棒所在位置的组件,还可减小能谱硬化对控制棒价值的影响。

表 2 控制棒积分价值

Table 2 Integral worth of control rod

棒组编号	积分价值	
	MOX 堆芯平衡循环	参考堆芯第 1 循环
G1	255	379
G2(G1 插入)	567	875
N1(G1、G2 插入)	1 013	953
N2(G1、G2、N1 插入)	902	1 622

停堆裕量是堆芯反应性控制能力的重要度量。当发生主蒸汽管道断裂事故或硼稀释事故时,堆芯中将引入正的反应性。为防止反应堆在停堆后重返临界,反应堆需具有足够的停堆裕量。

在紧急停堆时,控制棒组全部插入堆芯,出于保守考虑,假设反应性最大的一束控制棒被卡在堆芯顶部。此时要求堆芯必须处于次临界状态,且具有一定的次临界度。

停堆裕量可由控制棒组插入后引入的负反应性减去从热态满功率(HFP)到热态零功率(HZP)时各反馈效应引入堆芯的正反应性得到。表 3 列出了 MOX 堆芯的停堆裕量计算结果。计算得到的所有循环的停堆裕量均大于事故分析所要求的限值 2 000 pcm。

表 3 各循环的停堆裕量

Table 3 Shutdown margin for circulation

参数	反应性引入/pcm					
	过渡前循环 <sup>1)</sup>	第 1 过渡循环	第 2 过渡循环	第 3 过渡循环	第 4 过渡循环	平衡循环
HZP 时棒束控制组件价值						
61 束控制棒组件价值	9 871	10 203	9 947	9 549	9 256	9 239
卡最大价值棒反应性	2 050	1 970	1 734	1 406	1 230	1 261
净价值	7 821	8 233	8 213	8 143	8 026	7 978
10%裕量	782	823	821	814	803	798
R 棒和灰棒束插棒价值	790	790	790	790	790	790
灰棒束磨损	500	500	500	500	500	500
控制棒组件停堆负反应性 $\rho_1$	6 149	6 620	6 602	6 539	6 433	6 390
正反应性引入						
Doppler 效应	1 002	1 045	1 048	1 051	1 055	1 058
慢化剂温度亏损	1 391	1 441	1 478	1 502	1 509	1 515
空泡效应	50	50	50	50	50	50
通量再分布效应	950	950	950	950	950	950
总的正反应性引入 $\rho_2$	3 393	3 486	3 526	3 553	3 564	3 573
停堆裕量( $\rho_1 - \rho_2$ )	2 756	3 134	3 076	2 986	2 869	2 817

注:1) 过渡前循环为参考堆芯平衡循环

由表3可看出,加入MOX燃料组件后,所有控制棒总价值虽有降低的趋势,但最大价值控制棒的价值减小,使得考虑卡棒准则后的控制棒全插反应性并未降低。在该计算中,MOX堆芯的控制棒插入效应和灰棒束磨损带来的反应性损失取与参考堆芯一致的数值,该数值对MOX堆芯是更加保守的。

正反应性引入主要包括从HFP至HZP时由于功率降低而引起的慢化剂温度效应、Doppler效应、通量再分布效应及空泡效应等。与参考堆芯相比,MOX堆芯的Doppler效应变化不大,慢化剂温度亏损略有增加,使得总的正反应性引入增大。

根据表3结果,MOX燃料组件加入堆芯后,对堆芯停堆裕量的影响有限,即MOX燃料组件的加入虽然使反应性控制的分量有所改变,但影响是有限且可控的。

## 4 MOX燃料组件对反应性系数和动力学参数的影响

为保证反应堆安全,堆芯的反应性系数应为负,以使堆芯具有负反馈的特性,并在工况变化时具有自稳性。

本文主要考虑了慢化剂温度系数、Doppler温度系数、Doppler功率系数等反应性系数及与堆芯稳定性相关的动态参数。

### 4.1 慢化剂温度系数

由表1可见,随着MOX燃料的加入,慢化剂温度系数具有偏负的趋势。

慢化剂温度系数定义为慢化剂平均温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 引起的堆芯反应性变化。慢化剂温度升高带来两方面的效应:慢化剂温度升高导致慢化剂密度减小,慢化能力减弱,从而导致负的慢化剂温度系数;如果慢化剂密度一定,其温度增加会导致中子能谱变硬,造成 $^{238}\text{U}$ 和 $^{240}\text{Pu}$ 等同位素共振吸收增大,同时硬化的中子能谱还会使 $^{235}\text{U}$ 和 $^{239}\text{Pu}$ 的热中子裂变份额减小,这种效应使负温度系数变得更负。此外,可溶硼的加入也会对慢化剂温度系数产生影响,这是由于当慢化剂平均温度上升时,堆芯可溶硼密度随水密度的下降而减小,这将会在慢化剂温度系数中引入一个正的分量。

对于含MOX燃料组件的堆芯,其慢化剂

温度系数与全 $\text{UO}_2$ 堆芯的相比,由于堆芯内钷含量增加造成能谱硬化,使 $^{238}\text{U}$ 和 $^{240}\text{Pu}$ 等同位素共振吸收增大,这将使慢化剂温度系数趋负。虽然MOX堆芯的慢化剂中硼含量增加,但硼微分价值减小,增加的硼含量对慢化剂温度系数的影响不明显。

### 4.2 Doppler温度系数和功率系数

Doppler功率系数定义为功率每变化额定功率的1%时由于Doppler效应引起的反应性变化。Doppler效应是由于燃料温度变化而引起的 $^{238}\text{U}$ 和 $^{240}\text{Pu}$ 共振吸收变化引起的反应性变化,其他同位素如 $^{236}\text{U}$ 、 $^{237}\text{Np}$ 等共振吸收的变化对Doppler效应也有贡献,但作用较小。

Doppler系数与堆芯内燃料组件富集度和装载方式关系密切。一般情况下,堆芯能谱较硬、新燃料较多时,Doppler系数较大。

表4、5分别列出了MOX堆芯的Doppler温度系数和Doppler功率系数,其中MOX堆芯的数据考虑了从过渡循环到平衡循环的包络值,参考堆芯数据考虑了从首循环到平衡循环的包络值。从表4、5可看出,MOX燃料组件的加入会使Doppler温度系数偏负。但Doppler功率系数并未超出参考电站的包络值,这主要是由于参考堆芯的数值中包含了第1循环,此时堆芯全为新燃料,具有较大的Doppler效应。

表4 Doppler温度系数

Table 4 Doppler temperature coefficient

堆芯	Doppler温度系数包络值/(pcm· $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	
	最大值	最小值
MOX燃料堆芯	-4.122	-2.146
参考堆芯	-4.050	-1.902

表5 Doppler功率系数

Table 5 Doppler power coefficient

堆芯	Doppler功率系数包络值/(pcm·%FP $^{-1}$ )			
	HZP	HZP	HFP	HFP
	最大值	最小值	最大值	最小值
MOX燃料堆芯	-13.22	-8.17	-10.68	-6.74
参考堆芯	-14.18	-7.77	-11.17	-6.18

为更直观地体现 MOX 燃料对 Doppler 系数的影响,比较了 MOX 堆芯平衡循环与典型的全铀堆芯(岭澳核电站 2 号机组第 7 循环)分别在寿期初(BOL)和寿期末(EOL)时的功率系数,结果示于图 4。可看出,MOX 堆芯的 Doppler 功率系数有较明显的增大。本文选择岭澳核电站 2 号机组第 7 循环来进行比较,主要是由于该循环装载的新燃料组件数目与 MOX 堆芯一致,且低泄漏的堆芯布置方式也与 MOX 堆芯接近。

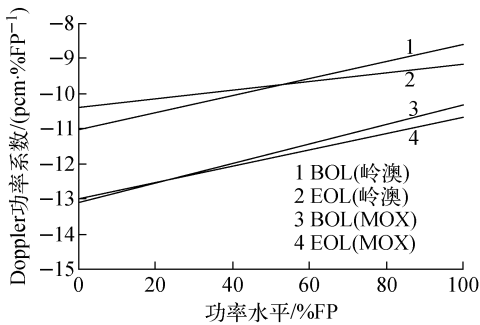


图 4 Doppler 功率系数随功率水平的变化

Fig. 4 Variation of Doppler power coefficient with power level

### 4.3 缓发中子有效份额和瞬发中子寿命

由先驱核产生的缓发中子能量较裂变直接产生的瞬发中子低,因此缓发中子具有较小的泄漏概率,也即具有较高价值。然而缓发中子不能产生快裂变,因而其相应价值又较低。

对于所考虑的可裂变同位素,每个先驱核的缓发中子份额一般来说是不同的,表 6 列出了缓发中子有效份额和瞬发中子寿命的计算结果,可见,MOX 燃料堆芯的缓发中子有效份额和瞬发中子寿命均较参考电站的数值小。

表 6 缓发中子有效份额和瞬发中子寿命

Table 6 Delayed neutron effective fraction and prompt neutron lifetime

堆芯	缓发中子有效份额		瞬发中子寿命
	最大值	最小值	最大值/s
MOX 燃料堆芯	0.005 80	0.004 35	22.20
参考堆芯	0.007 33	0.004 81	28.02

在反应堆运行中,若缓发中子份额减小,则

必须在反应性仪标定及确定与倍增时间有关的参数时加以考虑。此外,缓发中子份额减小会在功率瞬变的过程中增加堆芯的变化速率,该效应会降低堆芯的安全性。但考虑到 MOX 燃料组件加入后会使得堆芯具有更大的负反馈,可对缓发中子份额减小的效应进行一定补偿。

### 4.4 氙和钐的动态特性

当反应堆功率运行后停堆,氙的浓度以特定的方式变化(氙峰形式)。在给定功率水平情况下,48 h 后可达到氙平衡。

图 5 示出了 MOX 堆芯和参考堆芯从低功率提升到满功率时,氙反应性随燃耗的变化。由于氙的吸收截面随中子能量的增加而显著下降,而 MOX 堆芯能谱较硬,因此氙的效应相对较弱,无论是稳态堆芯中 Xe 引入的总反应性还是功率变化时 Xe 的变化均小于参考堆芯的。

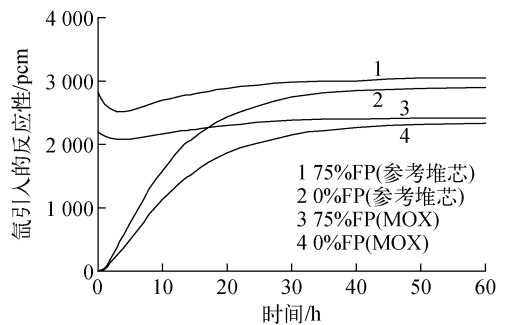


图 5 从不同功率水平提升到满功率时氙引入的反应性变化

Fig. 5 Xe induced reactivity evolution after power evolution from various power levels to HFP

图 6 为钐作为中子毒物时从满功率降到不同功率时引入的反应性随时间的变化。从图 6 可知,MOX 堆芯的平衡钐引入的反应性较参考堆芯更大,但在工况改变时钐引入的反应性变化较小。

综合来看,MOX 堆芯中氙和钐在功率快速变化后引入的反应性较全  $\text{UO}_2$  堆芯的小,这对堆芯的稳定运行更有利。

## 5 结论

1) MOX 燃料组件与  $\text{UO}_2$  组件相比,Pu 同位素的增加使能谱更硬,造成组件边界燃料

棒的热通量梯度增大,因此燃料组件内部必须采用分区设计。采用分区设计的燃料组件,有效降低了边界热通量和组件内的功率不均匀性,可在不改变堆芯结构的情况下,替代  $\text{UO}_2$  燃料组件装入 M310 堆芯。

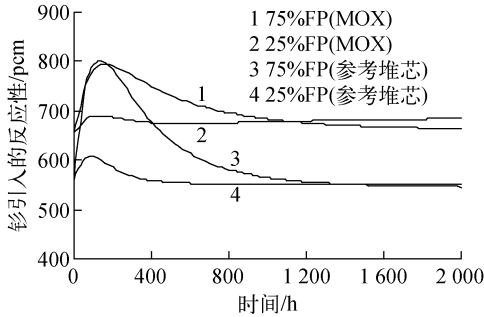


图6 从满功率降到不同功率时  
钐引入的反应性变化

Fig. 6 Sm induced reactivity evolution  
after power evolution from HFP  
to various power levels

2) 现役 M310 堆芯可在每次换料时加入部分 MOX,经过数个过渡循环后,由全部使用  $\text{UO}_2$  燃料组件的堆芯过渡为使用 30% MOX 燃料组件的 MOX 堆芯平衡循环。

3) 使用 30% 的 MOX 燃料组件的堆芯可达到与 AFA3G 堆芯相当的循环长度;堆芯反应性控制能力可满足要求;慢化剂温度系数、Doppler 温度系数、Doppler 功率系数、氙和钐

的动态特性均趋向使堆芯运行更加安全和稳定。

与此同时,MOX 燃料组件的加入也带来堆芯硼浓度增大、缓发中子有效份额减小和瞬发中子寿命减小等问题。由于堆内 MOX 燃料组件数目有限,在本文的研究范围内,上述参数的变化不会对 MOX 燃料的应用可行性产生颠覆性影响。今后随着 MOX 燃料进一步向工程应用发展,上述问题还有进一步研究解决的空间。

#### 参考文献:

- [1] PROVOST J L. MOX used in PWRs EDF operation experience [C] // Sino-French International Workshop: Advanced Nuclear Fuel Cycle. Beijing: [s. n.], 2009.
- [2] 章宗耀,王连杰. MOX 燃料在轻水堆核电站中的应用[J]. 中国核电,2008,1(4):354-357.  
ZHANG Zongyao, WANG Lianjie. The application of MOX fuel in light water nuclear power plant[J]. Chinese Nuclear Power, 2008, 1(4): 354-357(in Chinese).
- [3] FRANTOME ANP. Science V2 nuclear code package qualification report[R]. French: FRANTOME ANP, 2004.
- [4] 余纲林. MCNP 和 ORIGEN2 耦合系统(MCBurn)的研究[D]. 北京:清华大学,2002.
- [5] 李天涯. MOX 燃料在压水堆中应用的关键核特性研究[D]. 成都:中国核动力研究设计院,2012.