第 29 卷第 3 期
2017 年 3 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 29, No. 3
Mar., 2017

HPR1000 堆芯装载 50%MOX 组件的燃料管理方案*

刘国明， 郭治鹏

（中国核电工程有限公司，北京 100840）

摘 要： 针对 HPR1000 压水堆堆芯，开展了应用 MOX（混合氧化物燃料）组件的燃料管理方案初步研究。对 MOX 燃料组件进行设计，研究了 MOX 燃料成分及燃料棒在组件内的布置。在此基础上，开展了 1/4 堆芯年换料、18 个月长周期换料，并装载 50%MOX 组件这两种燃料管理方案研究。通过与 UO_2 堆芯的对比，分析了装载 50%MOX 组件堆芯的核特性。分析结果表明，两种 50%堆芯装载 MOX 组件的燃料管理方案，其堆芯主要物理参数均满足核设计准则要求。

关键词： HPR1000 堆芯； MOX 组件； 燃料管理

中图分类号： TL352 **文献标志码：** A **doi:** 10.11884/HPLPB201729.160376

压水堆卸除的乏燃料经后处理、再加工可制成铀钚混合氧化物（MOX）核燃料[1]。压水堆乏燃料中含有约 1%的钚，其中 2/3 以上是易裂变材料。以 MOX 形式进行再次循环，可较充分利用乏燃料后处理的钚元素，有效提高核资源利用率，减轻我国核电站快速发展对天然铀的需求压力，对核能可持续发展有重要的意义。为此，自 1970 年以来，全球有近 52 座核电机组获得 MOX 燃料的许可[2]，正在运行的 UO_2/MOX 轻水堆混合堆芯，大多数 MOX 燃料装载量为 30%左右。欧洲用户要求文件（EUR）明确指出，下一代非能动核电厂堆芯应具备装载高达 50%的 MOX 燃料组件的能力，例如西屋的 AP1000 堆芯已经满足该文件的要求[3]。本文研究了 MOX 燃料组件中的核燃料成分以及燃料棒在组件中的优化布置方案，给出了 1/4 堆芯年换料、18 个月长周期换料，且堆芯装载 50%MOX 组件的燃料管理方案，并分析了堆芯装载 50%的 MOX 燃料组件对堆芯物理参数的影响。

1 研究目标及分析方法

1.1 研究目标

为了证实 HPR1000 堆芯满足 EUR 关于利用 MOX 燃料的要求，首先需要在堆芯物理特性上证实 HPR1000 装载 50%MOX 燃料的可行性。在遵守与 UO_2 堆芯相同的核设计准则基础上，本文开展了两种燃料管理方案研究：50%堆芯装载 MOX 燃料组件、1/4 堆芯年换料及 18 个月长周期换料。

本文研究的 HPR1000 堆芯共装载 177 个燃料组件，堆芯活性段高度（冷态）为 365.76 cm。堆芯布置 61 束控制棒组件，用于调节堆芯的反应性，控制堆芯功率分布，并提供足够的停堆裕量。表 1 为堆芯的总体参数。

表 1 HPR1000 堆芯总体参数

Table 1 HPR1000 core parameters

parameters	value
number of assemblies	177
height of core/cm	365.76
total heat output/MWt	3050
power density/($kW \cdot L^{-1}$)	101.88
average linear power density/($W \cdot cm^{-1}$)	173.8
total flow rate (best estimate flow rate)/($m^3 \cdot h^{-1}$)	71 370
percentage of bypass flow/%	4.64
rated pressure/MPa	15.5
core average coolant temperature of full power/℃	310.0
inlet coolant temperature of full power/℃	292.2
cutput coolant temperature of full power/℃	327.8
inlet coolant temperature of zero power/℃	291.7

* **收稿日期：**2016-07-06； **修订日期：**2016-10-28
作者简介：刘国明（1982—），男，高级工程师，博士，从事反应堆物理分析工作；liugma@cnpe.cc。

为了确保 HPR1000 堆芯的安全性，堆芯核设计必须满足如下设计准则：(1)焓升因子 $F_{\Delta H}\leqslant 1.65$，并考虑 11.4%不确定性；(2)热通道因子 $F_Q\leqslant 2.40$，并考虑 18.1%不确定性；(3)堆芯在寿期初(BOL)、热态零功率(HZP)、控制棒全提(ARO)的慢化剂温度系数 $T_{mc}\leqslant 0$ pcm/℃；(4)寿期末停堆裕量≥2300 pcm；(5)组件最大卸料燃耗≤52 000 MWd/tU。同时要求 50%堆芯装载 MOX 燃料的 1/4 堆芯年换料燃料管理方案，平衡循环寿期长度≥310 EFPD(有效满功率天)；50%堆芯装载 MOX 燃料的 18 个月长周期燃料管理方案，平衡循环寿期长度≥490EFPD。

1.2　分析方法

计算采用从法马通公司引进的 SCIENCE 核设计和燃料管理计算程序包。该程序包主要由先进的组件计算程序 APOLLO2-F、堆芯模型化和分析程序 SMART、堆芯测量数据处理和功率恢复程序 SQUALE 以及人机接口的界面程序 COPILOTE 合成。本文使用了 APOLLO2-F，SMART 和 COPILOTE 程序，其中，APOLLO2-F 为二维多群输运理论的燃料组件能谱燃耗计算程序，为堆芯程序 SMART 提供组件均匀化核截面参数。SMART 是建立在三维节块展开方法与精细功率重构理论基础上的三维堆芯计算程序，用来分析各种工况下的堆芯功率分布、反应性以及燃耗分布等。在同时采用 UO_2 组件和 MOX 组件的混合堆芯中，组件的不同特性给堆芯功率分布带来挑战。SCIENCE 程序经过 MOX 燃料基准题、实际核电厂 MOX 堆芯验证表明，在计算混合堆芯时，其结果总体上合理可信[4]。

2　MOX 燃料组件

2.1　MOX 燃料成分

我国采取核燃料闭式循环，经过压水堆燃耗的 UO_2 乏燃料通过后处理，为 MOX 燃料提供钚，并与铀富集剩下的铀尾料按一定比例混合而成，铀尾料的富集度为 0.25%[5]。钚的各同位素成分对 MOX 燃料十分关键，直接决定 MOX 燃料的特性[6]。为此，本文统计我国现在运行的各核电机组的实际燃料管理方案以及乏燃料组件的卸料燃耗，考虑冷却贮存 5 年、10 年、15 年，计算钚各同位素的平均含量。表 2 给出了 MOX 燃料中钚同位素含量。可知，由于 ^{241}Pu 的衰变，易裂变 Pu 总含量随着冷却时间的增加而降低。根据现役轻水堆应用 MOX 燃料的经验，本文采用乏燃料冷却 15 年后得到的 MOX 燃料钚同位素含量。

表 2　MOX 燃料钚同位素含量

Table 2　Mass fraction of Pu in MOX fuel

cool time/years	mass fraction/%					
	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	^{241}Am
5	2.37	56.63	22.41	11.82	5.47	1.30
10	2.34	58.15	23.06	9.54	5.62	1.30
15	2.29	59.40	23.60	7.66	5.74	1.30

2.2　MOX 组件中燃料棒布置

MOX 组件的机械几何结构与 UO_2 组件一致，每个组件含 264 根燃料棒、24 根导向管和一根仪表管。影响堆芯核性能的关键是 MOX 组件中的燃料棒布置设计。由于 MOX 组件与 UO_2 组件混合装载，功率峰往往出现在 MOX 组件外围的燃料棒。因此对 MOX 组件的燃料棒分三区或者四区布置。组件的四角、外围、内部分别布置低、中、高富集度的 MOX 燃料棒。图 1 给出了本文中三区布置的 MOX 燃料组件的示意图。MOX 组件中，由于 Pu 元素对热中子的吸收截面较大，会引起堆芯中控制棒价值的下降。为了保证控制棒的价值，满足停堆裕量等要求，采取的措施有：(1)在 MOX 组件中不布置任何形式的可燃毒物；(2)控制棒组中黑棒组的中子吸收材料由原来的银铟镉(AIC)改成 B_4C，灰棒组的中子吸收材料则为不锈钢和 B_4C。

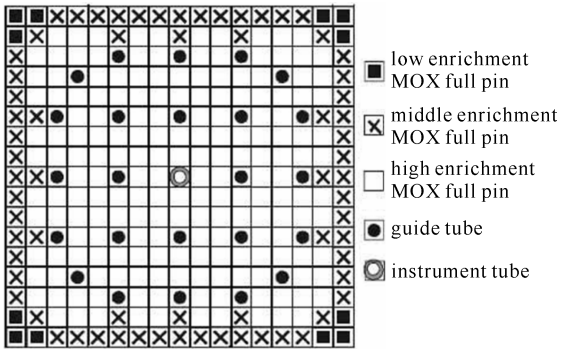

Fig. 1　Lattice design of MOX fuel assembly

图 1　MOX 组件燃料棒分区布置图

3 混合堆芯燃料管理方案设计

本文中给出的 50%堆芯装载 MOX 燃料组件的燃料管理方案，均是在原来 100%UO_2堆芯基础上，添加 50%的 MOX 新燃料组件得到。

3.1 1/4 堆芯年换料方案

采用 100%UO_2燃料组件的 1/4 堆芯年换料方案为：每次换料装载 44 盒富集度为 4.1%的 UO_2组件，换料周期为 12 个月，采用 OUT-IN 的装载方式；混合堆芯从 100%UO_2组件堆芯的平衡循环开始过渡，每次换料更换 20 盒富集度 4.1%的 UO_2组件和 24 盒平均富集度为 8.96%的 MOX 燃料组件；达到平衡循环后，MOX 和 UO_2新燃料组件均不含可燃毒物，每批 UO_2燃料组件中的 4 盒经历 5 个燃料循环，其余 16 盒经历 4 个燃料循环；每批 MOX 燃料组件的 3 盒经历 3 个燃料循环，其余 21 盒经历 4 个燃料循环。堆芯共装载 93 组 MOX 组件，略微超过 50%的比例。UO_2堆芯的平衡循环装载如图 2 所示，混合堆芯的平衡循环装载如图 3 所示。

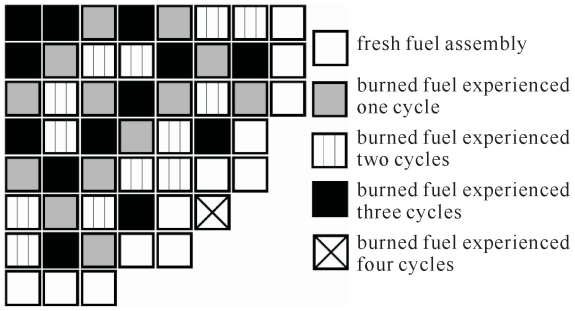

Fig. 2 1/4 core annual reloading pattern with UO_2

图 2 年换料 UO_2堆芯装载图

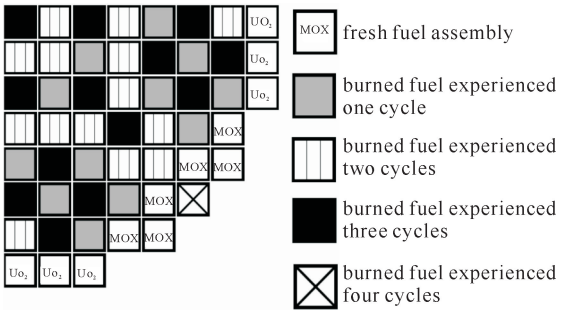

Fig. 3 1/4 core annual reloading pattern with MOX and UO_2

图 3 年换料 MOX/UO_2堆芯转载图

3.2 18 个月长周期换料方案

采用 100%UO_2燃料组件的 18 个月长周期换料方案为：每次换料装载 72 盒富集度为 4.45%的 UO_2组件，其中三种 4.45%富集度 UO_2新燃料组件分别包含 8，12，16 根含钆燃料棒，换料周期为 18 个月采用低泄漏装载方式；从 100%UO_2组件堆芯的平衡循环开始，每次换料更换 36 盒富集度 4.45%的 UO_2组件和 36 盒 MOX 燃料组件；UO_2新燃料组件包含的含钆燃料棒根数分别为 8，12，16，MOX 燃料组件 Pu 的富集度为 8.0%，8.6%及 9.0%；达到平衡循环后，每批 UO_2燃料组件中的 28 盒经历 2 个燃料循环，其余 8 盒经历 3 个燃料循环；每批 MOX 燃料组件的 11 盒经历 2 个燃料循环，其余 25 盒经历 3 个燃料循环。18 个月长周期换料平衡循环堆芯共装载 97 组 MOX 组件，超过 50%的比例。18 个月周期换料 UO_2堆芯的平衡循环装载如图 4 所示，50%堆芯装载 MOX 组件 18 个月长周期换料的混合堆芯，平衡循环装载如图 5 所示。

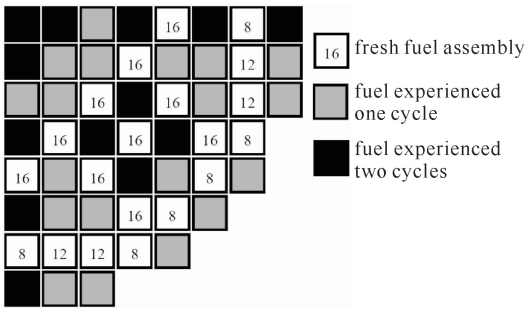

Fig. 4 18-month reloading pattern with UO_2

图 4 18 个月换料 UO_2堆芯转载图

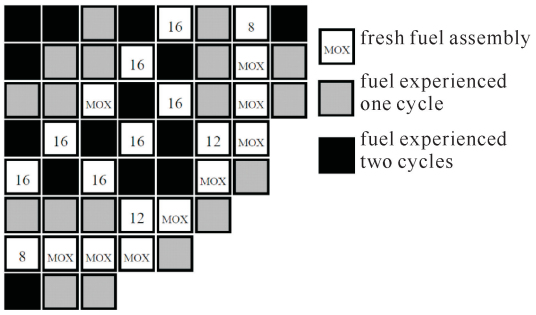

Fig. 5 18-month reloading pattern with MOX and UO_2

图 5 18 个月换料 MOX/UO_2堆芯转载图

3.3 堆芯燃料管理主要结果

(1) 1/4 堆芯年换料方案

从 100%装载 UO_2组件的第九循环开始，采用每次装入 24 个 MOX 组件及 20 个 UO_2组件的燃料管理方案，堆芯采用 OUT-IN 装载模式。经过第 9，10，11，12 过渡循环，在 13 循环达到平衡循环装载。表 4 给出了从第 9 循环到第 16 循环的堆芯相关参数。从表 4 可知，50%堆芯装载 MOX 组件的年换料燃料管理方案，$F_{\Delta H}$ 的最大值为 1.524(考虑 11.4%不确定性)，堆芯 BOL，HZP，ARO 时的 MTC 为－11.63 pcm/℃，停堆裕量最小值为 2523 pcm，组件的最大燃耗为 50 922 MWd/tU。平衡循环的循环长度为 314 EFPD。该方案的主

要参数计算结果均满足设计准则的要求。

表 4 50%堆芯装载 MOX 组件的年换料方案主要计算结果

Table 4 Main results of annual reloading pattern with MOX fuel

	cycle length /EFPD	enthalpy rise factor $^{*}F_{\Delta H}$	average burn-up of discharge fuel/(MWd/tU)	T_{mc}/ (pcm/℃)	maximum burn-up of discharge fuel/(MWd/tU)	shutdown margin/ pcm
cycle 9	284.3	1.510	46 447	−11.63	49 811	3274
cycle 10	288.5	1.524	45 513	−15.71	49 429	2805
cycle 11	306.0	1.506	45 435	−19.18	50 922	2764
cycle 12	320.7	1.454	46 473	−19.16	49 868	2609
cycle 13	313.7	1.491	46 926	−19.71	50 078	2523
cycle 14	313.7	1.488	47 243	−19.79	50 667	2656
cycle 15	314.6	1.485	47 216	−19.74	50 751	2538
cycle 16	314.4	1.485	47 202	−19.73	50 788	2536

considering 11.4% uncertainty.

(2) 18 个月长周期换料方案

从 100%装载 UO_2组件的 18 个月换料方案的第 9 循环开始，采用每次装入 36 个 MOX 组件及 36 个 UO_2组件的燃料管理方案，堆芯采用低泄漏装载模式。经过第 9，10，11 过渡循环，在 12 循环达到平衡循环装载。表 5 给出了从第 9 循环到第 16 循环的堆芯相关参数。从表 5 可知，50%堆芯装载 MOX 组件的 18 个月换料方案燃料管理方案 $F_{\Delta H}$ 的最大值为 1.649(考虑 11.4%不确定性)，堆芯 BOL，HZP，ARO 时的 T_{MC}为−10.18 pcm/℃，停堆裕量最小值为 2496 pcm，组件最大燃耗为 51 958 MWd/tU。平衡循环的循环长度为 491.6 EFPD。该方案的主要参数计算结果均满足设计准则的要求。

表 5 50%堆芯装载 MOX 组件的 18 个月换料方案主要计算结果

Table 5 Main result of 18-month reloading pattern with MOX fuel

	cycle length /EFPD	enthalpy rise factor $^{*}F_{\Delta H}$	average burn-up of discharge fuel /(MWd/tU)	T_{mc}/ (pcm/℃)	maximum burn-up of discharge fuel/(MWd/tU)	shutdown margin/ pcm
cycle 9	450.8	1.648	44 591	−10.18	51 402	2900
cycle 10	482.3	1.649	43 742	−10.65	51 422	2753
cycle 11	492.3	1.636	44 494	−13.10	51 958	2703
cycle 12	491.3	1.645	45 174	−12.09	51 412	2496
cycle 13	491.3	1.639	45 258	−12.04	51 265	2616
cycle 14	491.7	1.638	45 251	−12.04	51 373	2747
cycle 15	491.7	1.638	45 241	−12.04	51 293	2608
cycle 16	491.6	1.638	45 246	−12.04	51 298	2608

considering 11.4% uncertainty.

4 50%堆芯装载 MOX 组件对堆芯的影响

相比于传统 UO_2的燃料，MOX 燃料由于装载了钚元素，会带来两方面的物理性能变化[7-9]：一是由于 MOX 燃料中所含钚元素对热中子的吸收截面比 UO_2燃料大，因而装载 MOX 燃料组件的堆芯的中子能谱显著硬化；二是由于 MOX 燃料中易裂变同位素^{239}Pu 和^{241}Pu 的缓发中子份额显著低于易裂变核素^{235}U。不同比例装载 MOX 燃料对堆芯核参数的影响不一样，因此需要对 50%堆芯装载 MOX 组件的核参数进行分析。

4.1 反应性的控制

装载 50%MOX 组件堆芯的反应性控制方式与 100% UO_2堆芯一样，通过可溶硼浓度以及控制棒组的吸收体进行控制。由于 MOX 组件的加入，堆芯中子能谱硬化，使硼价值和控制棒价值都将减少，影响到堆芯的反应性控制。从过渡循环到平衡循环，堆芯中 MOX 组件不断增加时，通过分析过渡循环的硼价值和控制棒价值可得到随 MOX 组件数的变化规律，表 6 为采用 50%MOX 组件的 18 个月长周期循环相应的数据。从表 6 可知，在寿期初、热态零功率及临界硼状态下，硼微分价值在进入 50% MOX 组件堆芯平衡循环后明显减小，因此在同样的后备反应性下，MOX 堆芯的临界硼浓度明显增大；在装载 50% MOX 组件且 18 个月换料方案

中，虽然寿期初热态零功率下，硼浓度明显增加，但还在系统设计的范围内，不需通过富集硼等额外的措施进行控制可溶硼的浓度。

表 6　硼价值和控制棒价值随 MOX 组件数的变化

Table 6　Effect of MOX fuel on boron worth and control rod worth

	cycle length/ EFPD	fuel assembly type	new assembly number	total assembly number	critical boron concentration/ ppm	boron differential value/ (pcm/ppm)	G1/ pcm	G1 (G2in)/ pcm	N1 (G1G2in)/ pcm	N2 (G1G2N1in) /pcm
cycle 8	496.0	UO_2	72	177	1858	−6.60	280	595	914	1101
cycle 9	450.8	MOX\UO_2	36\36	36\141	1947	−5.48	221	482	660	1255
cycle 10	482.3	MOX\UO_2	36\36	72\105	2163	−4.84	227	483	534	1207
cycle 11	492.3	MOX\UO_2	36\36	97\80	2246	−4.27	217	501	489	1125
cycle 12	491.3	MOX\UO_2	36\36	97\80	2256	−4.30	237	515	479	1062
cycle 13	491.3	MOX\UO_2	36\36	97\80	2254	−4.30	234	517	492	1054
cycle 14	491.7	MOX\UO_2	36\36	97\80	2256	−4.31	234	516	489	1058

在 MOX 堆芯中，仍然采用银铟镉（AIC）吸收体的控制棒，其价值总体上减小。但需要注意的是，控制棒价值与堆芯中子能谱相关外，与控制棒所在位置也相关，因此 G1 和 N2 棒的价值虽然降低，但幅度不大。

经过计算分析，在采用 50%MOX 组件的堆芯中，继续采用 AIC 吸收体的控制棒组，已不能确保停堆裕量大于 2300 pcm，需要将控制棒中的吸收体 AIC 更换成 B_4C 控制棒，通过修改设计，停堆裕量均能满足设计准则的要求。

4.2　堆芯轴向功率分布

堆芯的径向功率分布很大程度上取决于堆芯换料后的燃料组件装载方案，燃料组件的类型对径向功率分布的影响较小，但对堆芯轴向功率分布则会产生较大的影响[10]。轴向功率变化采用堆芯轴向功率偏移（AO）来表述，δ_{AO}＝(堆芯上部相对功率－堆芯下部相对功率)/(堆芯上部相对功率＋堆芯下部相对功率)。由于 MOX 燃料组件的中子能谱较硬，相比于 UO_2 燃料组件，对堆芯轴向变化的慢化剂密度更为敏感。堆芯底部的慢化剂密度明显高于堆芯顶部，相比于 UO_2 燃料组件，MOX 燃料组件的轴向功率更偏向堆芯底部。图 6 给出了 18 个月换料方案 UO_2 堆芯与采用 50%MOX 组件堆芯平衡循环的 AO 变化。由图可知，堆芯燃耗从 0 到 11 000 MWd/tU，相比于 UO_2 堆芯，MOX 堆芯的 AO 更小，说明轴向功率更偏向堆芯底部。在堆芯运行时，为了将 AO 控制在合适的范围，堆芯调节棒需要采用合适的插入步数，保证堆芯安全稳定运行。

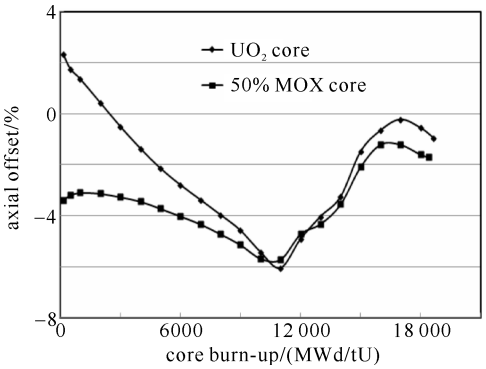

Fig. 6　Axial power distribution for UO_2 core and 50% & MOX core

图 6　堆芯轴向功率比较

4.3　堆芯反应性系数

由于 MOX 组件的能谱硬化效应，对堆芯的反应性系数具有显著影响。本文通过和 UO_2 堆芯进行比较，分析了慢化剂温度系数（MTC）、多普勒温度系数（DTC）以及功率系数（PC）在 50% MOX 堆芯中，因装载 MOX 燃料组件导致的变化。为了保证堆芯的安全，必须保证 MTC，DTC 和 PC 非正，即保证堆芯具有负反馈效应。

MTC 是指堆芯慢化剂变化单位温度引起的堆芯反应性变化。由于慢化剂温度增加（降低）导致的堆芯反应性变化包括：慢化剂密度减小（增加）使堆芯慢化效应变差（好），堆芯反应性减小（增加）；慢化剂温度的增加（降低），导致中子能谱变硬（软），使堆芯反应性减小（增加）。慢化剂密度的减小（增加），同时导致硼浓度的减小（增加），使堆芯反应性增加（减小）。相比于 UO_2 堆芯，MOX 堆芯具有更加硬化的中子能谱和更小的硼微分价值，因此 MOX 组件的采用将使 MTC 更负。

经过计算，18 个月长周期换料的 UO_2 平衡循环堆芯 BOL，HZP，ARO 时的 MTC 为－3.23 pcm/℃，相比于表 5 的计算结果，采用 50% MOX 组件的堆芯具有更负的 MTC。更负的 MTC 使堆芯具有更大的负反馈，

堆芯在正常工况下具备更好的稳定运行能力，但在类似主蒸汽管道断裂事故中，由于堆芯冷却将引入更大的反应性，是否导致堆芯安全性降低需要进行额外分析。

DTC 是指燃料温度变化单位温度引起的堆芯反应性变化。燃料温度增加，多普勒效应导致共振吸收增加，使堆芯反应性减小。MOX 组件的使用，使得多普勒效应更加明显，即 DTC 更负。表 7 给出了 UO_2 堆芯与采用 50% MOX 组件堆芯平衡循环 DTC 的值。从表 7 可知，MOX 堆芯的 DTC 更负，且 MOX 堆芯的 DTC 值仍在华龙一号堆芯的 DTC 包络值之内。

表 7 多普勒温度系数

Table 7 Doppler temperature coefficient (pcm/℃)

type of core	most negative value/(pcm/℃)	most positive value/(pcm/℃)
UO_2 core	−4.02	−2.10
50% UO_2 core	−4.12	−2.27
envelope value	−4.27	−1.83

功率系数 PC 是指堆芯功率变化 1%时的堆芯反应性变化，功率系数是慢化剂温度效应和多普勒温度效应的综合反映。根据前面的分析，相比于 UO_2 堆芯，装载 50%MOX 组件的堆芯应具有更负的功率系数。图 7 给出了 UO_2 堆芯与采用 50% MOX 组件堆芯 18 个月平衡循环功率系数的结果，验证了上述的结论。

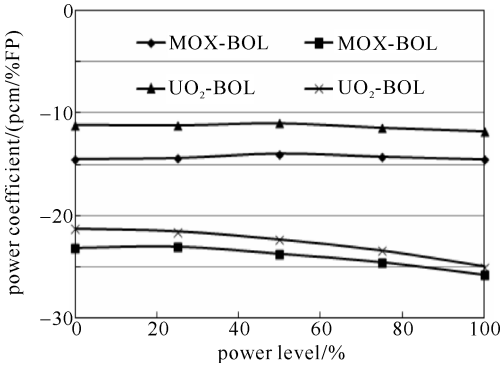

Fig. 7 Variation of power coefficient with power level

图 7 功率系数随功率水平的变化

4.4 动力学参数

易裂变与可裂变核素，其对应的缓发中子份额都是不同的。表 8 给出了 18 个月长周期换料的 UO_2 与 50% MOX 平衡循环堆芯在寿期典型燃耗点的缓发中子份额和瞬发中子寿命。由于 Pu 同位素的缓发中子份额明显小于 U 同位素的份额，因此在装载 50%MOX 堆芯中，缓发中子份额明显下降，幅度为 12%～22%，同时瞬发中子寿命也减小，幅度达到 35%左右。由于缓发中子份额减少，在引入相同反应性时，堆芯倍增周期也会明显缩短，降低了堆芯安全性，对弹棒等事故需要重点关注，在启动物理试验时需要重新标定反应性仪，在向堆芯引入反应性时，需要时刻注意堆芯的倍增周期。但 MOX 堆芯具有更负的功率反馈系数，对由于缓发中子份额减小导致的堆芯安全性下降具有一定的补偿。表 9 给出了堆芯功率在事故情况下从零功率激增到满功率时，堆芯的反应性反馈，从表中可知，50%MOX 组件堆芯因功率增加引入的负反应性均比 UO_2 堆芯大。

表 8 动力学参数

Table 8 Kinetic parameters

type of core	burn up of core	effective delayed neutron fraction of hot zero power core	effective delayed neutron fraction of hot full power core	prompt neutron lifetime of hot zero power core/μs	prompt neutron lifetime of hot full power core/μs
UO_2 core	BOL	0.006 143	0.006 155	15.02	15.24
	EOL	0.005 221	0.00 5162	17.74	18.76
50% MOX core	BOL	0.004 778	0.004 881	9.35	9.73
	EOL	0.004 519	0.004 540	11.63	12.51

表 9 零功率到满功率的反应性反馈

Table 9 Reactivity feedback of core from zero power to full power

type of core	burn up of core	Doppler defect from full power to zero power/pcm	coolent temperature defect from full power to zero power/pcm
UO_2 core	BOL	857	501
	EOL	899	1496
50% MOX core	BOL	930	664
	EOL	971	1592

5 结 论

本文对 HPR1000 堆芯应用 MOX 燃料的燃料管理方案开展了初步研究。首先对燃料组件的成分及布置开展了研究。采用优化布置的燃料组件，分别开展 1/4 堆芯年换料、18 个月长周期换料的装载 50% MOX 燃料的堆芯方案设计。通过与 UO_2 堆芯的对比，进一步分析了装载 50% MOX 组件堆芯的核特性参数。分析结果表明，两种 50%堆芯装载 MOX 组件的燃料管理方案，其堆芯主要物理参数均满足核设计准则要求。通过研究，从堆芯物理角度表明 HPR1000 堆芯具备装载 50% MOX 燃料的优良性能。

参考文献：

[1] 伍浩松. MOX 燃料[J]. 核燃料循环，2007，**1**(1)：25-27.（Wu Haosong. MOX fuel. *Nuclear Fuel Recycle*，2007，**1**(1)：25-27）

[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. *Chinese Nuclear Power*，2008，**1**(4)：354-357）

[3] Roubert J. AP1000 core design with 50% MOX loading[J]. *Annals of Nuclear Energy*，2009，**36**(3)：324-330.

[4] RauckS，Barbier B. SCIENCE nuclear code package qualification report[R]. NFPSE/DC 89，2004.

[5] Status and advances in MOX fuel technology[R]. Technical Reports Series No. 415，2003.

[6] 刘晓黎，宫宇. MOX 燃料组件装入现役 M310 堆芯对堆芯核设计的影响研究[J]. 原子能科学技术，2015，**49**(9)：1629-1636.（Liu Xiaoli，Gong Yu. Study on effect of MOX fuel assembly loaded in current M310 reactor core on nuclear design. *Atomic Energy Science and Technology*，2015，**49**(9)：1629-1636）

[7] Thilagam L，Sunny C S，Jagannathan V，et al. A VVER-100 LEU and MOX assembly computational benchmark analysis using the lattice burnup code EXCEL[J]. *Annals of Nuclear Energy*，2009，**36**(10)：505-519.

[8] 何晓军. 水堆 MOX 燃料性能分析与程序开发[D]. 北京：中国原子能科学研究院，2006.（He Xiaojun. MOX fuel behavior analysis in light water reactor and code development. Beijing：China Institute of Atomic Energy，2006）

[9] 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.（Li Tianya. Research of key nuclear reactor character parameter of PWR loaded with MOX fuel. Chengdu：Nuclear Power Institute of China，2012）

[10] 郭治鹏. MOX 燃料在压水堆中的应用研究[D]. 北京：中国核电工程有限公司，2015.（Guo Zhipeng. Research of MOX fuel used in PWR. Beijing：China Nuclear Power Engineering Co.，Ltd.，2015）

Fuel loading pattern with 50% MOX fuel in HPR1000 core

Liu Guoming， Guo Zhipeng

（*China Nuclear Power Engineering Co Ltd*，*Beijing* 100840，*China*）

Abstract： Fuel loading pattern optimization with MOX（mixed oxide of plutonium and uranium）fuel is an important aspect for GIII LWR. For the HPR1000 core，an optimized MOX fuel is designed. Based on which，two loading patterns with 50% MOX fuel are designed. One is 1/4 core annually reloading pattern，and the other is 18-month reloading pattern. The core neutronic parameters are investigated by comparing with the 100% UO_2 core. The MOX fuel has impacts on the nuclear characteristic parameters，but the 50% MOX core still satisfies the nuclear and safety criteria similar to that considered in 100% UO_2 core. The results of this study prove that the GIII LWR HPR1000 has excellent capability while loading with 50% MOX fuel.

Key words： HPR1000 core； MOX fuel； fuel loading pattern

PACS： 28.20.-v； 28.41.Bm； 28.41.Vx