

# Effects on $k_{\text{eff}}$ and Neutron Flux of MA Transmutation in Fast Reactor

Jin Cai, Bin Liu, Haoyang Yu, Wenxin Zhang

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing  
Email: [caijin@ncepu.edu.cn](mailto:caijin@ncepu.edu.cn)

Received: Dec. 19<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jan. 6<sup>th</sup>, 2017; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

The radiation hazard of minor actinides (MA nuclides) in spent fuel cannot eliminate until tens of thousands of years' decay. Partitioning and Transmutation technology (P&T) is a method to eliminate MA nuclides' radioactive hazard. By loading into the operating nuclear reactor, MA nuclides separated from the spent fuel are transmuted to short-lived nuclides or stable nuclides. Fast reactor is efficient and mature neutron source for transmuting MA nuclides. We build a simulation model of fast reactor by MCNP code to study the effects on effective multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ ) caused by the addition of MA nuclides and to compare different loading amounts and different nuclides include  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$  and the mixture of MA nuclides above (MA mixture). Results show that the addition of  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$  and MA mixture can cause a decrease of  $k_{\text{eff}}$ , while the addition of  $^{244}\text{Cm}$  and  $^{245}\text{Cm}$  boost the  $k_{\text{eff}}$  instead, and the effects on effective multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ ) of the reactor core enhance with the raising of MA loading amount, which threatens the safety of the reactor, thus, we consider the minimum amount as the best loading amount. Simulation results of neutron flux show that the minimum loading amount of MA barely affects the neutron flux, which is a advantage to transmute MA nuclides in fast reactor.

## Keywords

MA Nuclides, Transmutation, Fast Reactor,  $k_{\text{eff}}$

## MA核素的嬗变对快堆 $k_{\text{eff}}$ 和中子通量的影响

蔡进, 刘滨, 于浩洋, 张文鑫

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

---

Email: caijin@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2016年12月19日; 录用日期: 2017年1月6日; 发布日期: 2017年1月12日

---

## 摘要

乏燃料中大量的次锕系元素(MA核素)要经过上万年的衰变才能消除其放射性危害。分离和嬗变技术(P&T)将乏燃料中的MA核素分离出来,再将MA核素放入反应堆中嬗变为短寿命核素或稳定核素,从而达到消除其放射性危害的目的。快堆是效率较高且技术较成熟的MA嬗变装置。为研究和比较 $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ 和混合MA核素的添加和上述核素装载量的不同对堆芯有效增殖因子( $k_{\text{eff}}$ )的影响,采用MCNP程序搭建快堆模型进行模拟计算。计算结果显示,将 $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ 或混合MA核素以嬗变棒的形式替换燃料棒加入堆芯时,堆芯 $k_{\text{eff}}$ 均下降,而将 $^{244}\text{Cm}$ 和 $^{245}\text{Cm}$ 嬗变棒加入堆芯时, $k_{\text{eff}}$ 反而上升,且装载量越大, $k_{\text{eff}}$ 变化越多,这将威胁到反应堆的安全性,因此我们认为方案一为最佳装载量。中子通量密度的计算结果显示,MA核素的添加几乎对堆芯的中子通量没有影响,这是使用快堆嬗变MA核素的一个优点。

## 关键词

MA核素, 嬗变, 快堆,  $k_{\text{eff}}$

---

## 1. 引言

能否安全合理的处置乏燃料是限制核电发展的一个重要因素,而长寿命高放射性废物的处置是乏燃料后处理所面临的主要困难[1]。长寿命高放射性废物中的长寿命裂变产物(Long-lived Fission Products, 简称 LLFP)和次锕系核素(Minor Actinides, 简称 MA, 主要包括:  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{243}\text{Am}$ 、 $^{244}\text{Cm}$  和  $^{245}\text{Cm}$ )主导着乏燃料的长期放射性[2] [3], LLFP 和 MA 核素要经过上万年的衰变,其放射性水平才能达到天然铀对环境的放射性水平。一般的乏燃料后处理方法如“一次性通过”直接将乏燃料包装后长期埋存或后处理核燃料循环(RFC)将长寿命高放核素从乏燃料中分离出来,经玻璃固化后在将其埋存。这两种方法都直接将长寿命高放核素埋藏在环境中,对埋藏地存在长期的潜在放射性危害。采用分离和嬗变(P&T)方法能有效处置长寿命高放核素[4] [5]。P&T 将乏燃料中的钚、铀等可循环利用的核素以及长寿命高放核素分离出来,再将长寿命高放核素放入运行中的反应堆中嬗变,如此循环,直到他们嬗变为短寿命核素或稳定核素。热堆、快堆和超临界堆都可用于嬗变 MA 核素[6]。快堆具备高中子通量和高中子能量等特性,能够有效地嬗变 MA 核素[7] [8],研究 MA 核素在快堆中的嬗变特性具有重要意义。本文采用嬗变棒的形式,将 MA 核素制成嬗变棒放入快堆中进行嬗变,研究不同 MA 核素和不同装载量对堆芯  $k_{\text{eff}}$  的影响,并以此为依据选择出最佳添加方式,并计算最佳方式下,MA 核素的添加对堆芯中子通量密度的影响。

## 2. 快堆嬗变 MA 核素

如表 1 所示,MA 核素在热堆中的裂变截面和俘获截面都比在快堆中的大,但 MA 核素只有发生裂变反应时才能转换成短寿命的核素,这样才能有效地消除其放射性危害。MA 核素在快堆的俘获裂变比要比在热堆中小得多,即 MA 核素在快堆中与中子发生反应时,裂变反应所占的份额比在热堆中更高,这说明快堆能更有效地将 MA 核素嬗变为短寿命核素或稳定核素。已有研究表明,一座快堆可嬗变 4~10

**Table 1.** Cross section and capture-to-fission ratio of main nuclides in thermal reactor and fast reactor [9] [13]  
**表 1.** 堆芯主要核素在热堆和快堆中的核反应截面和俘获裂变比[9] [13]

| 核素                | 热堆                     |                        |          | 快堆                     |                        |          |
|-------------------|------------------------|------------------------|----------|------------------------|------------------------|----------|
|                   | $\sigma_f/\text{barn}$ | $\sigma_c/\text{barn}$ | $\alpha$ | $\sigma_f/\text{barn}$ | $\sigma_c/\text{barn}$ | $\alpha$ |
| $^{235}\text{U}$  | 21.9                   | 6.19                   | 0.283    | 2                      | 0.564                  | 0.282    |
| $^{238}\text{U}$  | 0.119                  | 0.866                  | 7.277    | 0.044                  | 0.299                  | 6.795    |
| $^{238}\text{Pu}$ | 2.07                   | 15.1                   | 7.295    | 1.03                   | 0.663                  | 0.644    |
| $^{239}\text{Pu}$ | 45.8                   | 25.2                   | 0.55     | 1.85                   | 0.514                  | 0.278    |
| $^{240}\text{Pu}$ | 0.65                   | 41.8                   | 64.31    | 0.372                  | 0.405                  | 1.089    |
| $^{241}\text{Pu}$ | 52.4                   | 17.4                   | 0.332    | 2.63                   | 0.59                   | 0.224    |
| $^{242}\text{Pu}$ | 0.492                  | 19.0                   | 38.62    | 0.263                  | 0.572                  | 2.175    |
| $^{237}\text{Np}$ | 0.52                   | 33                     | 63.46    | 0.32                   | 1.7                    | 5.313    |
| $^{241}\text{Am}$ | 1.1                    | 110                    | 100      | 0.27                   | 2.0                    | 7.407    |
| $^{243}\text{Am}$ | 0.44                   | 49                     | 111.4    | 0.21                   | 1.8                    | 8.571    |
| $^{244}\text{Cm}$ | 1.0                    | 16                     | 16       | 0.42                   | 0.6                    | 1.429    |
| $^{245}\text{Cm}$ | 116                    | 17                     | 0.147    | 5.1                    | 0.9                    | 0.176    |

座等功率规模的热堆产生的 MA 核素[10]。

如图 1 所示，主要 MA 核素的裂变截面都比  $^{238}\text{U}$  大，MA 核素在高能区的裂变截面随着中子能量的增大而迅速增加。所以向快堆中添加 MA 核素后，低能区的中子数目将会减少，高能区中子数目增加，快堆的中子能谱将会硬化[11]。

如图 1 所示，主要 MA 核素的裂变截面都比  $^{238}\text{U}$  大，MA 核素在高能区的裂变截面随着中子能量的增大而迅速增加。所以向快堆中添加 MA 核素后，低能区的中子数目将会减少，高能区中子数目增加，快堆的中子能谱将会硬化[11]。

### 3. 快堆嬗变堆芯设计

本文利用 MCNP 程序建立快堆嬗变模型来研究 MA 核素加入快堆后  $k_{\text{eff}}$  和中子通量密度分布的变化。

快堆堆芯由燃料组件、再生区组件、控制棒、屏蔽组件和作为冷却剂的液态钠组成，采用交替排列燃料组件和再生区组件的非均匀结构[12]，其堆芯结构如图 2 所示。这种结构能产生更高的增殖比并减小钠空洞系数，但要求有较高的易裂变燃料总投量，堆芯燃料只包含一种富集度。采用标准三角形栅格，将燃料棒排列成燃料组件。燃料组件和再生区组件布置如图 3 所示。燃料采用混合  $\text{UO}_2\text{-PO}_2$  燃料，MOX 燃料的成分含量如表 2 所示。在燃料芯块上下方装有天然  $\text{UO}_2$  组成的再生区芯块进行增殖，燃料棒结构如图 4 所示。

## 4. 快堆嬗变 MA 核素

### 4.1. MA 核素嬗变方案

为研究 MA 核素的添加对快堆堆芯的影响，我们将 MA 核素嬗变材料制成嬗变棒，其尺寸结构与燃料棒一致，将嬗变棒插入燃料组件，在结构上替代一些燃料棒。这种结构使 MA 核素嬗变材料与核燃料完全隔离，有助于 MA 核素嬗变材料从反应堆堆芯卸载后的再加工[6]。

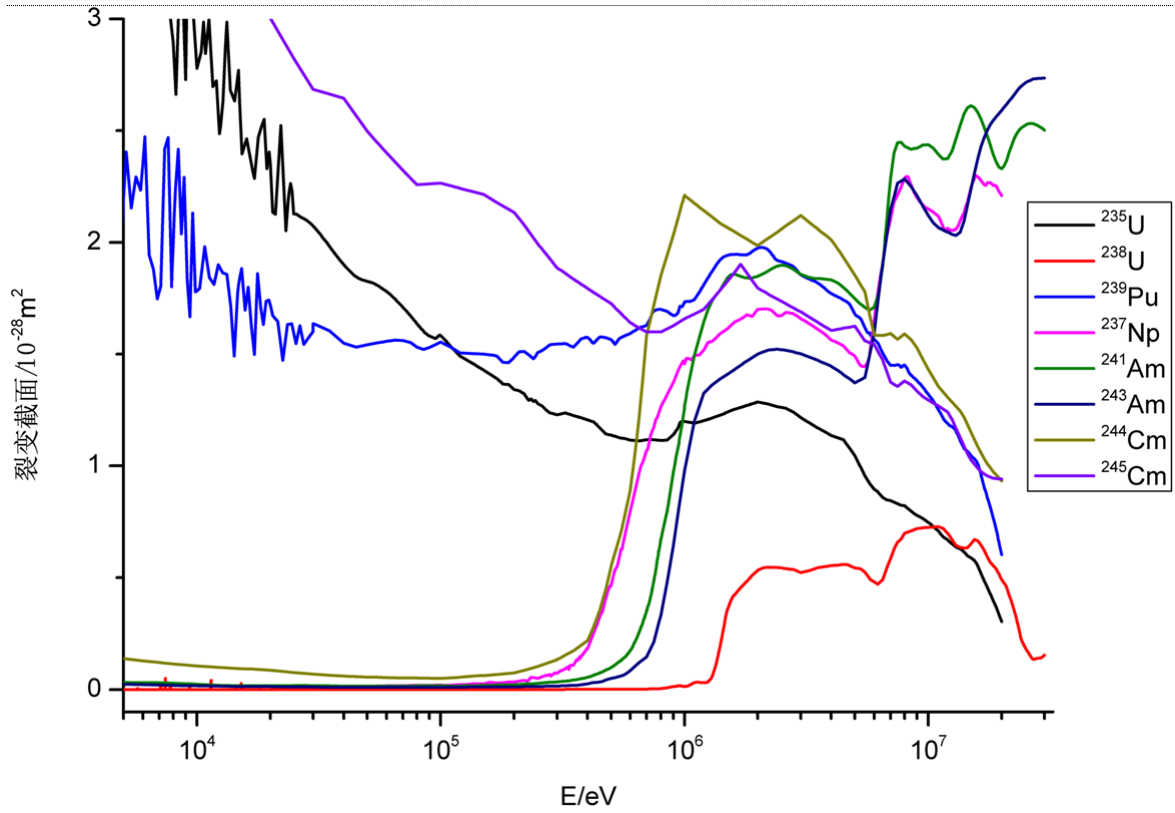


Figure 1. Fission cross section of fuel nuclides and MA nuclides  
图 1. 燃料和 MA 核素的裂变截面

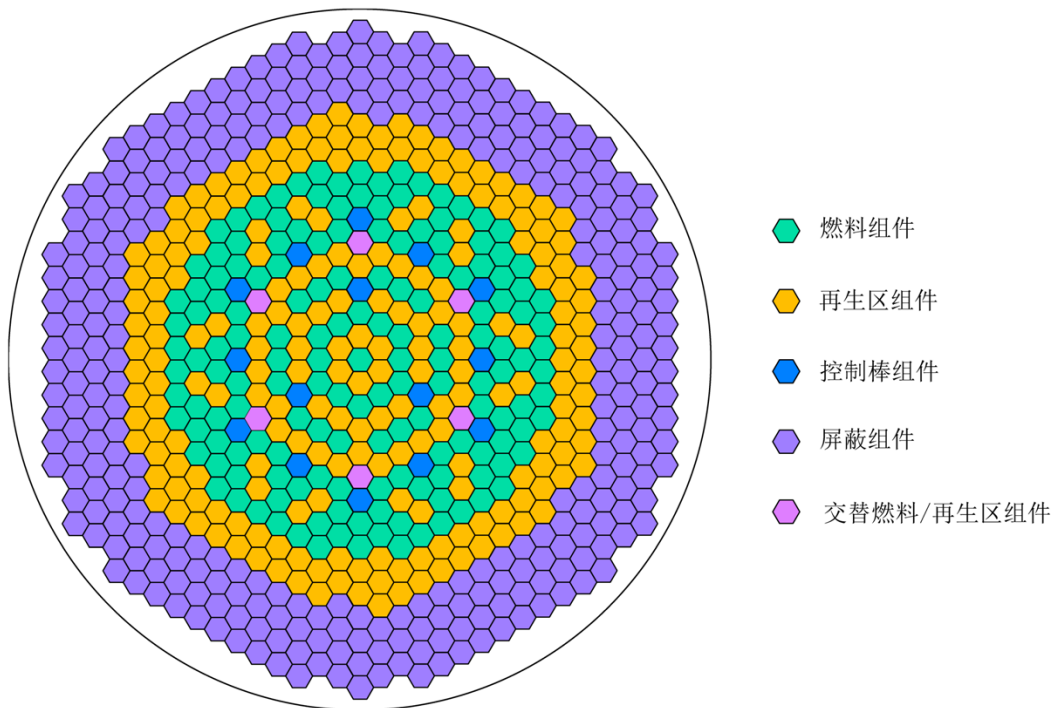


Figure 2. Configuration of the core  
图 2. 堆芯结构

为比较不同 MA 核素对堆芯影响的区别，将  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{243}\text{Am}$ 、 $^{244}\text{Cm}$ 、 $^{245}\text{Cm}$  和上述 MA 核素的混合分别制成嬗变棒加入堆芯，混合 MA 核素嬗变棒中各核素的比例按照压水堆乏燃料中 MA 核素的比例混合，如表 3 所示。嬗变棒的结构如图 5 所示。

同时，为比较不同装载量对堆芯影响的不同，设计五种添加方案：方案一至五分别将每个燃料组件中的 1、7、19、37、61 根燃料棒换为嬗变棒，如图 6 所示。

### 4.2. MA 核素装载量

堆芯中有 156 组燃料组件，6 组交替组件，模拟计算中将交替组件置为燃料组件，各材料的密度如表 4 所示，由此可计算出各种方案下 MOX 燃料和嬗变材料的装载量以及它们的质量比，见表 5。

### 4.3. MA 核素的添加对堆芯 $k_{\text{eff}}$ 的影响

使用 MCNP 模拟嬗变棒加入堆芯的情况，在使用重复结构排列组件时，如图 6 所示，在嬗变棒的位置

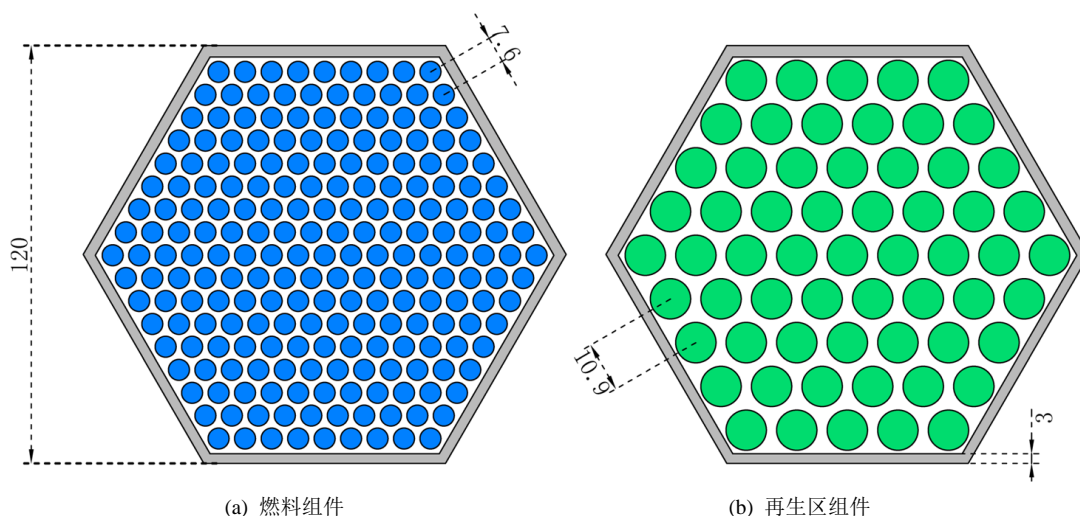


Figure 3. Radial schematics of a fuel assembly and a blanket assembly  
图 3. 燃料组件和再生区组件布置

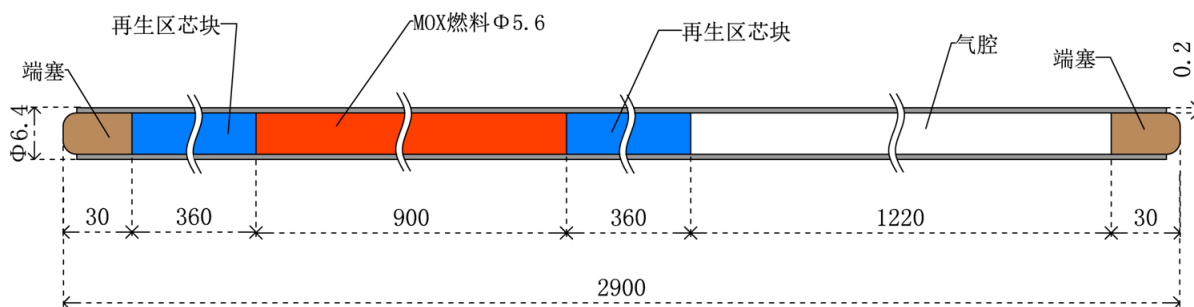


Figure 4. Axial schematics of a fuel rod  
图 4. 燃料棒结构

Table 2. Constituent of MOX fuel [1]  
表 2. MOX 燃料成分 [1]

| MOX 中的铀 $\text{UO}_2$ | MOX 中的钚 $\text{PuO}_2$ | $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ | $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}$ |
|-----------------------|------------------------|---------------------------------|---|
| 76.3%                 | 23.7%                  | 0.0072/0.9928                   | 0.04/0.544/0.228/0.118/0.07   |

置将宇称值(即 U 卡的值)置为各种嬗变棒的宇称值, 这样一来, 便可模拟图 6 所示五种方案, 得出不同方案下的  $k_{eff}$  值。

表 6 列出了以五种方案分别向临界的快堆堆芯中添加  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{243}\text{Am}$ 、 $^{244}\text{Cm}$ 、 $^{245}\text{Cm}$  和混合

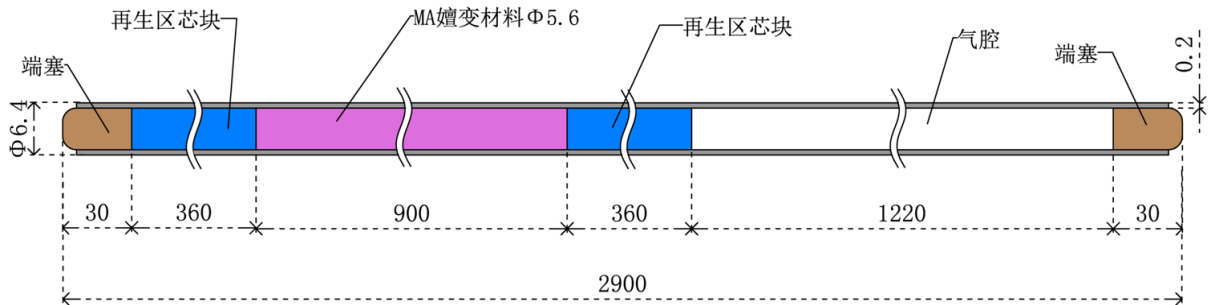


Figure 5. Axial schematics of a transmutation rod

图 5. 嬗变棒结构

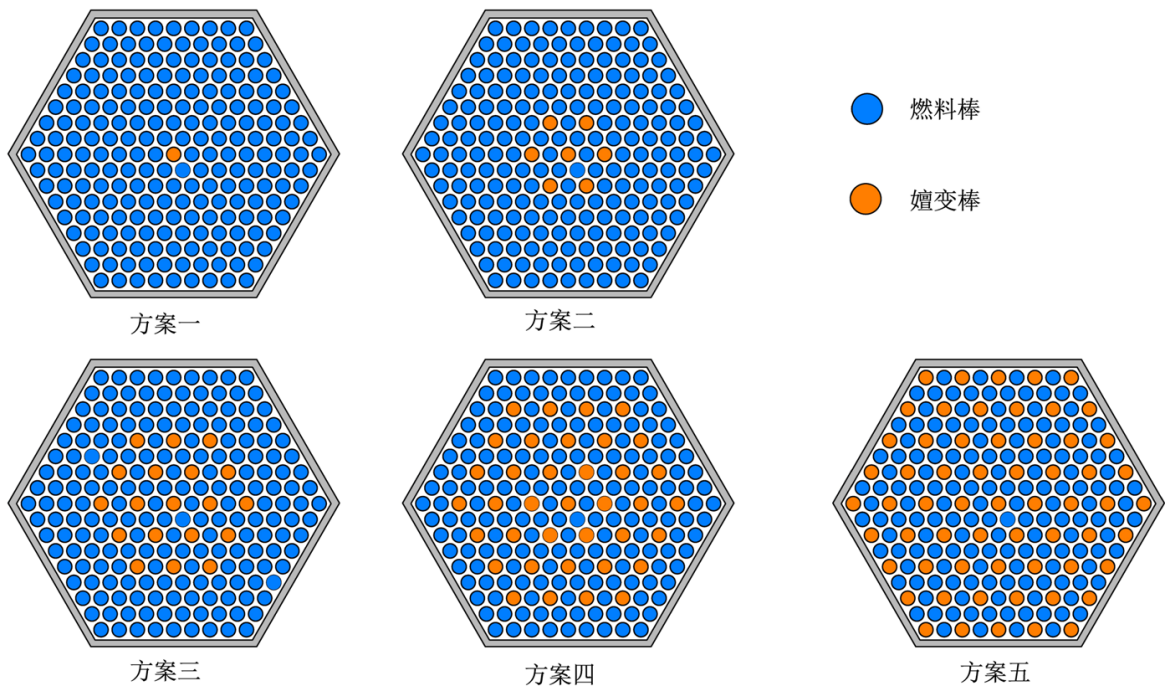


Figure 6. Five different transmutation rod distribution patterns in fuel assembly

图 6. 五种方案中嬗变棒的分布

Table 3. The ratio of each MA nuclide in the spent fuel of PWR

表 3. 压水堆乏燃料中 MA 核素的比例

| MA 核素 | $^{237}\text{Np}$ | $^{241}\text{Am}$ | $^{243}\text{Am}$ | $^{244}\text{Cm}$ | $^{245}\text{Cm}$ |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 比例/%  | 56.2              | 26.4              | 12                | 5.12              | 0.28              |

Table 4. The density of core material

表 4. 堆芯材料密度

| 材料                         | $^{237}\text{Np}$ | $^{241}\text{Am}$ | $^{243}\text{Am}$ | $^{244}\text{Cm}$ | $^{245}\text{Cm}$ | MOX    | 混合 MA |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|-------|
| 密度/ $\text{g}/\text{cm}^3$ | 20.25             | 11.7              | 13.69             | 13.51             | 13.52             | 11.075 | 15.40 |

**Table 5.** The loading amount and the ratio of loading amount of MA nuclides and MOX  
**表 5.** MA 核素和 MOX 燃料装载量(kg)和质量比(MA/MOX)

| MA 核素             |     | 方案一      | 方案二      | 方案三      | 方案四      | 方案五      |
|-------------------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| MOX 燃料装载量         |     | 8643.578 | 8403.478 | 7923.279 | 7202.981 | 6242.584 |
| <sup>237</sup> Np | 装载量 | 73.168   | 512.176  | 1390.192 | 2707.215 | 4463.247 |
|                   | 质量比 | 0.008465 | 0.060948 | 0.175457 | 0.375847 | 0.714969 |
| <sup>241</sup> Am | 装载量 | 42.275   | 295.924  | 803.222  | 1564.169 | 2578.765 |
|                   | 质量比 | 0.004891 | 0.035215 | 0.101375 | 0.217156 | 0.413093 |
| <sup>243</sup> Am | 装载量 | 49.465   | 346.256  | 939.838  | 1830.211 | 3017.375 |
|                   | 质量比 | 0.005723 | 0.041204 | 0.118618 | 0.254091 | 0.483354 |
| <sup>244</sup> Cm | 装载量 | 48.815   | 341.704  | 927.481  | 1806.147 | 2977.702 |
|                   | 质量比 | 0.005648 | 0.040662 | 0.117058 | 0.250750 | 0.476999 |
| <sup>245</sup> Cm | 装载量 | 48.851   | 341.956  | 928.167  | 1807.484 | 2979.906 |
|                   | 质量比 | 0.005652 | 0.040692 | 0.117145 | 0.250936 | 0.477352 |
| 混合 MA             | 装载量 | 55.644   | 389.507  | 1057.232 | 2058.821 | 3394.272 |
|                   | 质量比 | 0.006438 | 0.046351 | 0.133434 | 0.285829 | 0.543730 |

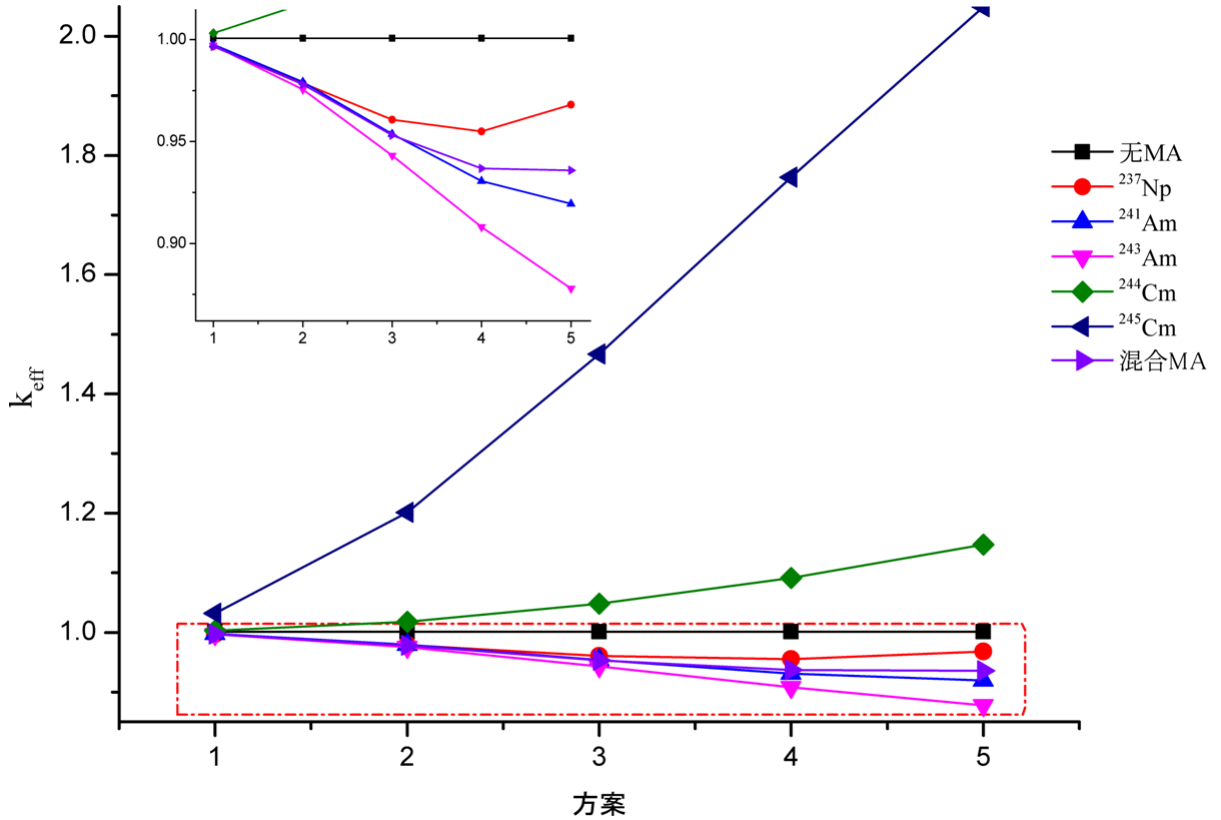
**Table 6.**  $k_{\text{eff}}$  after adding different MA nuclides to the fast reactor  
**表 6.** 加入不同 MA 核素嬗变棒后快堆的  $k_{\text{eff}}$

| 核素                | 方案一     | 方案二     | 方案三     | 方案四     | 方案五     |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 无 MA              |         |         | 1.00072 |         |         |
| <sup>237</sup> Np | 0.99672 | 0.97865 | 0.96070 | 0.95495 | 0.96813 |
| <sup>241</sup> Am | 0.99764 | 0.97923 | 0.95371 | 0.93062 | 0.91947 |
| <sup>243</sup> Am | 0.99719 | 0.97557 | 0.94310 | 0.90804 | 0.87783 |
| <sup>244</sup> Cm | 1.00321 | 1.01762 | 1.04803 | 1.09117 | 1.14743 |
| <sup>245</sup> Cm | 1.03223 | 1.20151 | 1.46666 | 1.76353 | 2.04961 |
| 混合 MA             | 0.99665 | 0.97804 | 0.95309 | 0.93682 | 0.93588 |

MA 核素嬗变棒后  $k_{\text{eff}}$  的变化, 计算结果的标准偏差均保持在 0.0003 左右。从表中可以看出, 不同的 MA 核素对  $k_{\text{eff}}$  的影响不同。加入 <sup>237</sup>Np、<sup>241</sup>Am、<sup>243</sup>Am 和混合 MA 核素嬗变棒将使  $k_{\text{eff}}$  有不同程度的降低, 而加入 <sup>244</sup>Cm 和 <sup>245</sup>Cm 嬗变棒将使  $k_{\text{eff}}$  升高。

图 7 显示了不同 MA 核素对  $k_{\text{eff}}$  的影响程度的差异以及随着 MA 核素装载量的增加,  $k_{\text{eff}}$  的变化趋势。在降低  $k_{\text{eff}}$  方面, 随着装载量的增加, <sup>243</sup>Am 引起  $k_{\text{eff}}$  降低的能力最大, <sup>241</sup>Am 次之, 再其次是混合 MA, <sup>237</sup>Np 使  $k_{\text{eff}}$  轻微地降低。随着 <sup>241</sup>Am、<sup>243</sup>Am 和混合 MA 的装载量的增加,  $k_{\text{eff}}$  呈单调降低趋势, 即 <sup>241</sup>Am、<sup>243</sup>Am 和混合 MA 的装载量越大, 堆芯  $k_{\text{eff}}$  降低得越多。而随着 <sup>237</sup>Np 的装载量的增加,  $k_{\text{eff}}$  先降低, 随后又开始上升。这说明存在一个临界值, 当装载量超过该临界值时, <sup>237</sup>Np 装载量的增加将不会继续降低堆芯  $k_{\text{eff}}$ 。在升高  $k_{\text{eff}}$  方面, 随着装载量的增加, <sup>245</sup>Cm 使  $k_{\text{eff}}$  剧烈的升高, 相比而言, <sup>244</sup>Cm 只使  $k_{\text{eff}}$  轻微地增加。

将燃料棒替换成 MA 核素嬗变棒之后, MA 核素以及它们的俘获产物和裂变产物对反应堆内中子平



**Figure 7.** The variation of  $k_{eff}$  of fast reactor along with the loading amount  
**图 7.** 快堆堆芯  $k_{eff}$  随 MA 核素装载量的变化

衡的影响将改变堆芯的  $k_{eff}$ 。快堆没有慢化过程，堆芯内中子的平衡主要取决于裂变、快中子增殖、辐射俘获和泄漏过程，裂变反应产生中子，辐射俘获和泄漏时中子减少。由  $k_{eff}$  的定义：

$$k_{eff} = \frac{\text{系统内中子的产生率}}{\text{系统内中子的总消失率}}$$

在同一堆芯中，快中子增殖系数和不泄漏概率不变，故不同核素对堆芯  $k_{eff}$  的影响取决于所加核素以及它们的裂变产物和俘获产物的裂变和俘获过程，即在同一堆芯中， $k_{eff}$  的值与俘获裂变比呈负相关。

堆芯引入 MA 核素嬗变材料后，部分燃料棒被嬗变棒替换，裂变材料减少。MA 核素在快中子能区不仅能发生裂变反应，还能发生俘获反应。若 MA 核素发生俘获反应则消耗中子，使中子通量降低，反应性减小。若发生裂变反应，则放出裂变中子，补偿因裂变减少而引起的中子通量的降低和反应性的减小。表 2 列出了堆芯主要核素在快堆的裂变截面和俘获裂变比数值。MOX 燃料中易裂变核素如 <sup>235</sup>U 和 <sup>239</sup>Pu 的裂变截面都较大，裂变性能较好。根据表 3 所列 MOX 燃料的成分含量和表 2 所列混合 MA 中核素比例可算出 MOX 燃料和混合 MA 的计算裂变截面和俘获裂变比，列在表 7 中。从表 7 可以看出 <sup>237</sup>Np、<sup>241</sup>Am、<sup>243</sup>Am 和混合 MA 的裂变截面均小于 MOX 燃料，俘获裂变比大于 MOX 燃料，故将这些 MA 核素嬗变棒代替部分燃料棒加入快堆堆芯后， $k_{eff}$  下降。<sup>245</sup>Cm 的裂变截面大于 <sup>239</sup>Pu 和 <sup>235</sup>U 的裂变截面，俘获裂变比也比 <sup>239</sup>Pu 和 <sup>235</sup>U 小，它在反应堆中的裂变性能比易裂变燃料还要好，故将 <sup>245</sup>Cm 嬗变棒加入堆芯后， $k_{eff}$  剧烈上升。虽然 <sup>244</sup>Cm 的有效裂变中子数小于 MOX 燃料，但它裂变截面比 MOX 燃料要高，且其俘获产物 <sup>245</sup>Cm 的裂变性能很好，所以将 <sup>244</sup>Cm 嬗变棒加入反应堆后， $k_{eff}$  也将上升。并且，裂变截面的大小由高到低分别为 <sup>245</sup>Cm、<sup>244</sup>Cm、<sup>237</sup>Np、混合 MA、<sup>241</sup>Am、<sup>243</sup>Am，与俘获裂变比大小由低至高



的顺序一致，也这与  $k_{\text{eff}}$  变化量一致。

已有研究表明，以嬗变棒的形式向压水堆中添加 1% 的混合 MA 核素， $k_{\text{eff}}$  降低至 0.98634 [6]。从表 5 和表 6 可以看出，同样的向快堆中添加 2.39% 混合 MA 核素嬗变棒， $k_{\text{eff}}$  只降到 0.99789，这说明 MA 核素的添加对快堆堆芯性能的影响比热堆小，利用快堆嬗变 MA 核素能取得较理想的结果。

通过修改 MCNP 程序材料卡中 MOX 燃料中各核素的比例调整 MOX 燃料中  $\text{PuO}_2$  的含量，使反应堆重新达到临界，即在加入 MA 核素嬗变棒的情况下使  $k_{\text{eff}}$  重新回到 1。结果如表 8 所示。

由于  $^{239}\text{Pu}$  的缓发中子份额小于  $^{235}\text{U}$ ，如果燃料中  $^{239}\text{Pu}$  的含量太高会明显降低堆芯的缓发中子份额，导致反应堆的控制困难，故 MOX 燃料中  $\text{PuO}_2$  的含量不能超过 40%。由表 8 可知，无论使哪种方式下的反应堆重回临界都不用使 MOX 燃料中  $\text{PuO}_2$  的含量超过 40%。但即使使  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{235}\text{U}$  的含量为零，也不能使方案三、四、五的堆芯重回临界。

#### 4.4. MA 核素的添加对堆芯中子通量密度的影响

堆芯加入 MA 核素会影响堆芯物理性能，且装载量越大，对堆芯的扰动越大。综合对堆芯的影响和 MA 核素分离技术的难度，我们认为方案一下的混合 MA 是最佳添加方式。接下来讨论在最佳添加方式下，MA 核素的添加对堆芯能谱和径向中子通量密度的影响。

MCNP 程序计算中子通量时模拟的是一个中子引起的相对的情况，要得到真实的计数，必须结合堆芯功率对计算结果归一化。堆芯平均每次裂变释放的可利用能量为 198 MeV，归一化因子即单位时间内系统每释放 1 J 所需要的裂变反应次数：

$$\frac{1 \text{ J/s}}{1 \text{ W}} \times \frac{1 \text{ MeV}}{1.602 \times 10^{-13} \text{ J}} \times \frac{1 \text{ fission}}{198 \text{ MeV}} = 3.152625 \times 10^{10} \text{ fission/W} \cdot \text{s}$$

该系统热功率水平为 970 MeV，每次裂变产生的平均中子数为 2.5942，若  $k_{\text{eff}} = 1$ ，则每提供 2.5942 个源中子就会发生一次裂变。则该系统的归一化因子为：

$$3.152625 \times 10^{10} \times 970 \times 10^6 \times 2.5942 = 7.9332 \times 10^{19} \text{ neutron/s}$$

**Table 7.** The fission cross section and capture-to-fission ratio of main nuclides of transmutation fast reactor core

**表 7.** 快堆嬗变堆芯主要核素的裂变截面和俘获裂变比

| MA 核素                  | $^{237}\text{Np}$ | $^{241}\text{Am}$ | $^{243}\text{Am}$ | $^{244}\text{Cm}$ | $^{245}\text{Cm}$ | 混合 MA | MOX   |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|
| $\sigma_f/\text{barn}$ | 0.32              | 0.27              | 0.21              | 0.42              | 5.1               | 0.31  | 0.39  |
| $\alpha$               | 5.313             | 7.407             | 8.571             | 1.429             | 0.176             | 5.551 | 0.896 |

**Table 8.** Mass fraction of  $\text{PuO}_2$  in MOX fuel when reactor core returning to criticality

**表 8.** 堆芯重回临界时 MOX 燃料中  $\text{PuO}_2$  的含量(%)

| MA 核素  | 方案一           | 方案二           | 方案三           | 方案四           | 方案五           |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 无 MA   |               |               | 23.7          |               |               |
| Np-237 | 23.8(0.99894) | 24.7(0.99956) | 25.8(0.99928) | 26.6(1.00112) | 26.2(0.99937) |
| Am-241 | 23.8(0.99979) | 24.7(1.00061) | 26.1(1.00044) | 27.7(0.99985) | 29.3(0.99986) |
| Am-243 | 23.8(0.99879) | 24.8(0.99950) | 26.6(0.99983) | 29(0.99934)   | 32.1(1.00067) |
| Cm-244 | 23.5(0.99888) | 22.9(1.00064) | 21.3(0.99955) | 18.7(1.00084) | 14.2(1.00017) |
| Cm-245 | 22.2(1.00030) | 12.9(1.00091) | /             | /             | /             |
| 混合 MA  | 23.8(0.99912) | 24.7(0.99948) | 26.1(1.00058) | 27.5(1.00039) | 28.3(0.99771) |

即 MCNP 程序对该系统进行计数是使用的归一化源强常数[2]。

对 MCNP 计算结果处理过后的堆芯能谱如图 8 所示。加入 MA 核素前后堆芯径向中子通量密度的分布情况如图 9 所示。蓝框部分放大如图。

由图 8 可知，堆芯加入 MA 核素后，由于 MA 核素在低能区俘获截面很大，所以低能区中子减少明显，而其他能区基本没有变化。由图 9 可看出，堆芯径向中子通量在燃料和再生区交替排列的区域分布比较平缓，加入 MA 核素后变化较小。说明此方案对快堆堆芯中子通量的影响较小。

综上所述，采用方案一将 MA 核素混合嬗变棒加入堆芯嬗变对堆芯  $k_{eff}$ 、中子通量密度分布等物理性能产生的影响较小，可以取得理想的嬗变效果。

### 5. 结论

本文比较了五种不同 MA 核素以及它们的混合物以嬗变棒形式加入堆芯时，在不同装载量下对堆芯  $k_{eff}$  的影响。计算结果显示， $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{243}\text{Am}$  和混合 MA 将使  $k_{eff}$  降低。随着装载量的增加， $^{243}\text{Am}$  引起  $k_{eff}$  降低的幅度最大， $^{241}\text{Am}$  次之，再其次是混合 MA， $^{237}\text{Np}$  使  $k_{eff}$  轻微地降低。随着  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{243}\text{Am}$  和混合 MA 的装载量的增加， $k_{eff}$  呈单调降低趋势，而随着  $^{237}\text{Np}$  的装载量的增加， $k_{eff}$  先降低，随后又开始上升。通过增加 MOX 燃料中  $\text{PuO}_2$  的含量，均可使堆芯重返临界。 $^{244}\text{Cm}$  和  $^{245}\text{Cm}$  的添加将使  $k_{eff}$  升高，且随着装载量的增加， $^{245}\text{Cm}$  使  $k_{eff}$  剧烈的升高，相比而言， $^{244}\text{Cm}$  只使  $k_{eff}$  轻微地增加。降低 MOX 燃料中  $\text{PuO}_2$  的含量可使  $^{244}\text{Cm}$  的五种方案和  $^{245}\text{Cm}$  的方案一和方案二的堆芯重返临界，但即使使  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{235}\text{U}$

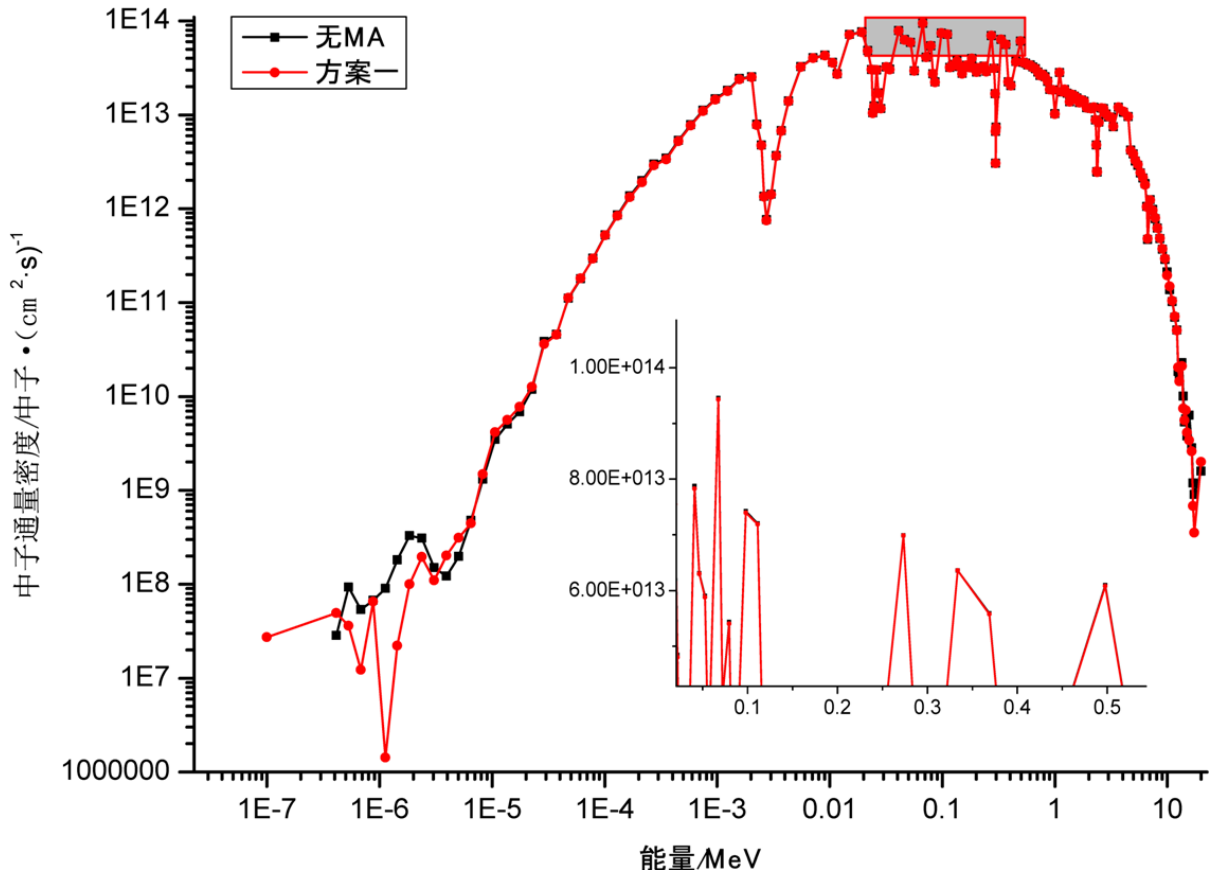


Figure 8. The neutron flux of reactor core with and without MA nuclides

图 8. 堆芯加入 MA 核素前后的中子通量

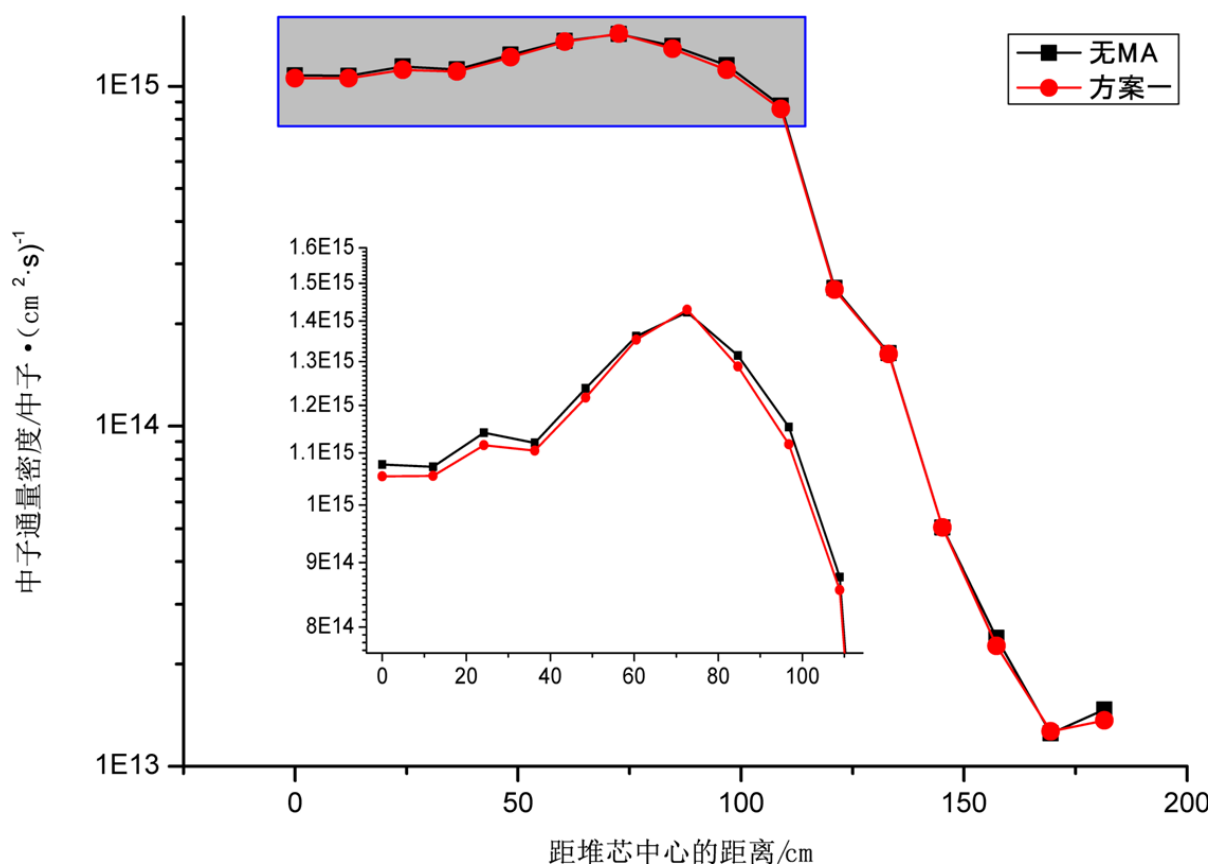


Figure 9. The radial distribution of neutron flux of reactor core with and without MA nuclides

图9. 堆芯加入 MA 核素前后的径向中子通量

的含量为零,也不能使<sup>245</sup>Cm的方案三、四、五的堆芯重回临界。综合 MA 核素对堆芯的影响和 MA 核素分离技术的难度,我们认为方案一下的混合 MA 是最佳添加方式。在该添加方式下, MA 核素的添加对堆芯能谱和径向中子通量密度的影响都很小,且该方式下 MA 核素的装载量可达 55.644 kg,嬗变效果可观。

### 参考文献 (References)

- [1] 周培德. MOX 燃料模块快堆嬗变研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2000.
- [2] Artisyuk, V., Saito, M. and Stankovsky, A. (2005) Challenge of Transmutation of Long-Lived Nuclides. *Progress in Nuclear Energy*, **47**, 327-338.
- [3] Tucek, K. (2004) Neutronic and Burnup Studies of Accelerator Driven Systems Dedicated to Nuclear Waste Transmutation. PhD Thesis, Department of Physics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [4] Steinberg, M. (1964) Neutron Burning of Long-Lived Fission Products For Waste Disposal. BNL, New York.
- [5] 罗璋琳. 核废料核素价值研究(续前) [J]. 原子能科学技术, 2004, 38(4): 334-338.
- [6] Liu, B., Wang, K., Tu, J., Liu, F., Huang, L.M. and Hu, W.C. (2014) Transmutation of Minor Actinides in the Pressurized Water Reactors. *Annals of Nuclear Energy*, **64**, 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.09.042>
- [7] Iwasaki, T. and Hirakawa, N. (1994) Neutron Economy of Transmutation of TRU in Thermal and Fast Neutron Fields. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **31**, 1255-1264. <https://doi.org/10.1080/18811248.1994.9735288>
- [8] Wakabayashi, T. (2002) Transmutation Characteristics of MA and LLFP in a Fast Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, **40**, 457-463. [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(02\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(02)00038-0)
- [9] Liu, B., Hu, W., Wang, K., Huang, L.M., Ouyang, X., Tu, J. and Zhu, Y. (2013) Transmutation of MA in the High

Flux Thermal Reactor. *Journal of Nuclear Materials*, **437**, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.348>

- [10] 徐銖. 中国实验快堆[M]. 北京: 高技术通讯, 1995.
- [11] 胡赞, 王侃, 徐銖. 钠冷氧化物燃料快堆嬗变 MA 研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(1): 18-22.
- [12] 苏著亭, 叶长源, 闫凤文. 钠冷快增殖堆[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [13] Berthou, V., Degueldre, C. and Magill, J. (2003) Transmutation Characteristics in Thermal and Fast Neutron Spectra: Application to Americium. *Journal of Nuclear Materials*, **320**, 156-162. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(03\)00183-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(03)00183-1)

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)