

# REMIX燃料在CPR1000反应堆应用的可行性研究

彭靖含, 位金锋\*

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2024年7月7日; 录用日期: 2024年8月13日; 发布日期: 2024年10月28日

## 摘要

REMIX燃料是利用乏燃料后处理中回收的未分离铀、钚混合物直接生产而成的。REMIX乏燃料可以重新回收利用, 形成闭式循环, 从而减少放射性废物的产生量。本文旨在讨论REMIX燃料组件在CPR1000型反应堆中的适用性, 计算采用SCIENCE V2程序包, 基于CPR1000型核反应堆18个月换料设计, 全堆芯使用REMIX燃料进行平衡循环燃料管理方案设计, 并将通用核数据和关键中子学参数与工程设计限值进行了对比。结果显示, REMIX堆芯燃料管理方案能够满足堆芯各项核设计参数安全限值与设计限值, 其各项关键中子学参数能被当前 $UO_2$ 堆芯的安全分析限值所包络。本文从核设计的角度初步论证了REMIX燃料在CPR1000机组中应用的可行性。

## 关键词

REMIX燃料, 燃料管理, 中子学参数

# Feasibility Study of REMIX Fuel in CPR1000 Reactor

Jinghan Peng, Jinfeng Wei\*

China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Jul. 7<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 13<sup>th</sup>, 2024; published: Oct. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

REMIX fuel is produced directly from a mixture of the unseparated uranium and plutonium recovered from spent fuel reprocessing. REMIX spent fuel can be recycled to form a closed loop, thus reducing the quantity of radioactive waste generated. The purpose of this article is to discuss the feasibility of REMIX

\*通讯作者。

fuel compositions in CPR1000 reactor. The calculations are practiced with SCIENCE V2 Package, based on an 18-month refueling design of CPR1000 nuclear reactor with a balanced-cycle full management scheme design using REMIX fuel for the entire core. The general nuclear data and key neutronic parameters are compared to the engineering design limits. The results show that the REMIX core fuel management scheme is able to meet the safety and design limits for all nuclear design parameters of the core, and its key neutronic parameters can be enveloped by the current safety analysis limits applied for UO<sub>2</sub> fuel. This paper preliminarily demonstrates the feasibility of applying REMIX fuel in CPR1000 units in terms of nuclear design.

## Keywords

REMIX Fuel, Fuel Management, Neutronic Parameters

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

铀和钚在热中子反应堆中的再循环能够提高核燃料利用率,同时也大大减少乏燃料的处理量,并降低核扩散风险。目前 MOX 燃料已经得到了广泛应用,然而,大量研究和实践表明,MOX 燃料用作轻水反应堆燃料组件时,由于钚燃料对中子能谱和堆芯中子学特性的影响,堆芯一般装载 1/3 堆芯的 MOX 燃料[1]。此外,MOX 燃料中的可裂变钚的比例会随燃料的燃耗逐渐降低,因此 MOX 燃料在国际上不进行多次循环处理。

REMIX 燃料是一种在由乏燃料后处理的未进行分离处理的铀钚混合物的基础之上,混合少量低浓缩铀而成的燃料。REMIX 含钚量相对较低,由于这一特性,对堆芯控制和中子学特性影响较小,不同于 MOX 燃料,REMIX 燃料可以实现全堆芯装载。且由于 REMIX 燃料中钚的含量较少,燃耗引起的钚的组分改变对燃料反应性的影响相对较小,因此可实现多次循环。俄罗斯已经对 REMIX 燃料的开发和应用进行了大量工作,以期实现在压水堆中对堆后铀钚循环的更好利用。俄罗斯国家原子能集团公司已在 2016 年实现 REMIX 燃料在实验堆中的试验,获得包括燃料棒在辐照后的肿胀、气体释放、裂变产物分布及其同位素组成等数据。

本文基于 CPR1000 型核反应堆和原有组件结构,设计 REMIX 组件,并进行全 REMIX 燃料平衡循环燃料管理方案设计,对通用核数据和关键中子学参数进行验证和对比,初步分析了在 CPR1000 机组上实现 REMIX 燃料循环的可行性。

## 2. REMIX 燃料

### 2.1. 技术概况

REMIX 燃料由乏燃料提取的铀钚混合物和浓缩铀(<sup>235</sup>U 富集度约为 17%)制成。在制成的新 REMIX 燃料中,钚的初始含量约为 1%,<sup>235</sup>U 的富集度约为 4%。REMIX 燃料能在反应堆中持续燃烧 4 年,平均卸料燃耗达到 50 GWd/tHM 左右。REMIX 乏燃料经过后处理可以对部分燃料进行循环利用,在现有的 VVER-1000 反应堆中对 REMIX 燃料进行全堆芯的循环使用,最多可以循环 5 次[2]。

为了验证这一假设,研究人员分析了 VVER-1000 反应堆中全堆芯装载 REMIX 燃料三个循环的中子学

参数。在第一个循环中，堆芯装载燃料全部由标准燃料(天然铀)，在第二和第三个循环中全堆芯装载再生铀钚混合燃料。其中，铀燃料由两种组件构成，富集度分别为 4.4%和 4.0%。每种组件中各放置一定量的可燃毒物( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ )。钆的氧化物的质量约占燃料质量的 5%，两种组件中铀的富集度分别为 3.6%和 3.3%。每次装载 42 组新组件，包括 36 组富集度为 4.4%的新组件和 6 组富集度为 4.0%的新组件。堆芯所装载的铀平均富集度为 4.33%，平均循环燃耗约为 50 GWD/tHM。表 1 列出了典型的再生铀钚循环燃料的核素组分[3]。

**Table 1.** Compositions of REMIX fuel in VVER-1000  
**表 1.** VVER-1000 中 REMIX 燃料组分

| 核素或元素             | 铀组件乏燃料/ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ | REMIX 燃料在第一次再循环前的组分/ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ | REMIX 燃料在第一次再循环后的组分/ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ | REMIX 燃料在第二次再循环前的组分/ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ | REMIX 燃料在第二次再循环后的组分/ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ |
|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| $^{235}\text{U}$  | 9.1                                   | 41.4                                               | 12                                                 | 42.8                                               | 13                                                 |
| U                 | 987.5                                 | 990                                                | 983.5                                              | 986.8                                              | 982.1                                              |
| $^{238}\text{Pu}$ | 0.3                                   | 0.2                                                | 0.7                                                | 0.5                                                | 0.9                                                |
| $^{239}\text{Pu}$ | 6.7                                   | 5.4                                                | 8                                                  | 6.4                                                | 8.1                                                |
| $^{240}\text{Pu}$ | 3.2                                   | 2.6                                                | 4                                                  | 3.3                                                | 4.1                                                |
| $^{241}\text{Pu}$ | 1.4                                   | 1.1                                                | 2                                                  | 1.6                                                | 2.6                                                |
| $^{242}\text{Pu}$ | 0.9                                   | 0.7                                                | 1.8                                                | 1.4                                                | 2.2                                                |
| Pu                | 12.5                                  | 10                                                 | 16.5                                               | 13.2                                               | 17.9                                               |

**2.2. 技术优劣势**

与 MOX 燃料相比，REMIX 燃料由于燃料固有特点，可以实现全堆芯装载，可作为目前反应堆燃料的替代燃料。REMIX 燃料可以实现 5 次循环复用。理论上，一座寿期为 60 年的反应堆只需要 3 批装料，并对乏燃料补充低浓缩铀和转移废物。同 MOX 燃料一样，REMIX 燃料对天然铀的消耗是开环燃料循环的约 20%，REMIX 既不会造成后处理铀的积累，也不会对乏燃料中的钚进行分离，这也从源头上降低了核扩散风险。同时，相比未实现核燃料循环的燃料而言，REMIX 燃料闭式循环技术产生的废料是玻璃固化后的铀裂变产物、锕系元素以及运行产生的放射性废物，不需要进行乏燃料的贮存和处置作业，大大降低了多批乏燃料的存储和处置费用，以获得更好的经济性[4]-[11]。

相应地，由于 REMIX 燃料活度相较普通核燃料较高，在燃料制造过程中，为降低辐射安全风险，其制造设备、流程和工艺等将更为复杂，可能会引起发电成本上升[12]-[15]。

**3. 燃料管理设计和准则**

**3.1. 燃料管理设计目标**

为了研究 REMIX 燃料在 CPR1000 型核反应堆中应用的可行性，使用 REMIX 燃料进行平衡循环堆芯装载设计。设计采用全堆芯装载 REMIX 燃料。电厂负荷因子按 0.89 计，18 个月换料的循环长度为 487 EFPD，进行多次迭代达到平衡循环后，研究 REMIX 燃料堆芯燃料管理方案及对堆芯各项通用核数据和关键中子学参数的影响。

**3.2. 设计准则**

设计准则参考 CPR1000 型核反应堆 18 个月换料燃料管理经验，设计准则如下：

- 1) 最大径向功率峰因子  $F_{AH} \leq 1.65$ 。最大径向功率峰是衡量燃料循环中, 堆芯径向功率分布的重要参数, 用于 DNB 事故分析中, 是重要的堆芯设计参数;
- 2) 寿期初满功率条件下, 慢化剂温度系数非正, 以保证堆芯固有安全性;
- 3) 寿期初热态零功率临界硼浓度  $\leq 2200$  ppm, 以保证慢化剂温度系数非正;
- 4) 卸料燃料棒燃耗  $\leq 62,000$  MWd/tHM, 以保证燃料棒机械性能;
- 5) 卸料组件燃耗  $\leq 57,000$  MWd/tHM, 以保证燃料组件机械性能稳定;
- 6) 停堆裕量  $\geq 2300$  pcm, 以保证堆芯在快速停堆时的停堆裕度。

### 3.3. 计算方法

堆芯计算采用法国原子能和替代能源委员会(CEA)开发的 SCIENCE V2 程序包进行模拟计算, 计算采用 JEFF 2.1 核数据库。在 SCIENCE V2 程序包中, 子程序 SMART 采用结块法, 可进行三维两群堆芯扩散-燃耗计算, 可进行压水堆稳态和瞬态工况的计算, 其所采用的两群均一化截面数据由子程序 APOLLO2-F 提供, APOLLO2-F 采用碰撞几率方法进行组件输运计算。

由于 SCIENCE V2 程序包是 CPR1000 型核反应堆的设计软件, 且已进行过超过 200 个燃料循环的换料设计的数据确认, 在铀燃料和 MOX 燃料计算中均具有良好的适用性, REMIX 燃料是一种用  $UO_2$  与  $PuO_2$  所组成的混合燃料, 其铀和钚的富集度、水铀比和最大燃耗等均不超过 SCIENCE V2 程序包的限值。因此, 本文所研究的对象均被 SCIENCE V2 验证与确认结果所包络, 该软件对本研究中的 REMIX 燃料循环是适用的。

## 4. REMIX 燃料管理方案

### 4.1. 燃料组件

参照 CPR1000 燃料组件结构, 设计了 REMIX 燃料组件, 新组件组分如表 2 所示。为了降低寿期初满功率临界硼浓度, 保证慢化剂温度系数为负, 并抑制堆内轴向功率的波动, REMIX 燃料组件分为不含可燃毒物和含有 16 根钎棒两种类型组件。组件中可燃毒物采用弥散的  $Gd_2O_3$  芯块, 钎棒中钎的质量分数取为 8%。

**Table 2.** Compositions of fresh REMIX fuel rod  
**表 2.** REMIX 新组件燃料棒组分

| $^{235}U$<br>富集度/wt% | Pu 元素质量<br>百分比/wt% | Pu 核素质量百分比/wt% |            |            |            |            |
|----------------------|--------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|
|                      |                    | $^{238}Pu$     | $^{239}Pu$ | $^{240}Pu$ | $^{241}Pu$ | $^{242}Pu$ |
| 4.18                 | 1                  | 2.4            | 53.6       | 25.6       | 11.2       | 7.2        |

### 4.2. 堆芯装载方案

堆芯采用 REMIX 全堆芯装载方案, 堆芯采取 1/4 旋转对称布置, 图 1 给出了采用 68 组 REMIX 组件的堆芯布置方案, 其中不含中子毒物棒组件共 8 组, 含 16 根钎棒组件 60 组。其中, 数字代表新组件中可燃毒物棒的数量, 相同颜色为初始富集度与可燃毒物棒数量相同的组件。

### 4.3. 堆芯计算结果

#### 4.3.1. 燃料管理主要计算结果

表 3 给出了 CPR1000 反应堆装载 REMIX 燃料的燃料管理方案计算结果, REMIX 堆芯循环长度为

487 EFPD，共有 68 组 REMIX 新组件。从表中可以看出，最大径向功率峰因子、慢化剂温度系数、寿期初临界硼浓度、组件燃耗、停堆裕量等主要堆芯参数均能满足设计准则的要求。作为对比，表 3 也提供了 CPR1000 堆芯装载传统  $\text{UO}_2$  燃料进行的堆芯数据(采用 4.45%铀富集度的 18 个月换料堆芯)。REMIX 堆芯  $F_{\Delta H}$  相对较大，但仍能被  $F_{\Delta H}$  限值所包络。REMIX 中 Pu 的含量较高，为了抑制其所带来的  $F_{\Delta H}$  变化，堆芯中加入了较多的可燃毒物，相应地，可燃毒物的使用提供了大量的负反应性，也降低了堆芯临界硼浓度，引起了慢化剂温度系数的下降，使堆芯具有更大的负反馈特性。另外，目前的 REMIX 堆芯停堆裕量较小，有较大提升空间，可通过对装载方案的改进对其进行优化。在平均卸料燃耗上，由于均采用了 68 组新组件，循环长度也相近，两者并没有明显区别。

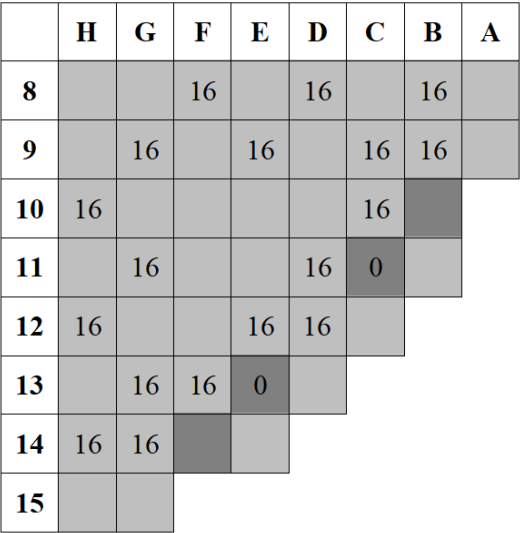


Figure 1. Reactor core loading pattern  
图 1. 堆芯装载方案

Table 3. Calculation results of fuel management  
表 3. 燃料管理计算结果

| 核素                                                     | 限值   | REMIX 燃料 | $\text{UO}_2$ 燃料 |
|--------------------------------------------------------|------|----------|------------------|
| 循环长度/EFPD                                              | -    | 487      | 488              |
| 新组件数目/组                                                | -    | 68       | 68               |
| 最大径向功率峰因子                                              | 1.65 | 1.63     | 1.61             |
| 慢化剂温度系数(寿期初，零功率)/ $\text{pcm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ | 0    | -11.25   | -3.00            |
| 硼浓度(寿期初，零功率)/ppm                                       | 2200 | 1823     | 2147             |
| 最大组件(非中心)卸料燃耗/ $\text{GWd}\cdot\text{tHM}^{-1}$        | 57   | 51.8     | 50.3             |
| 最大燃料棒(非中心)卸料燃耗/ $\text{GWd}\cdot\text{tHM}^{-1}$       | 62   | 60.8     | 56.0             |
| 停堆裕量(寿期末)/pcm                                          | 2300 | 2301     | 3471             |
| 组件平均卸料燃耗/ $\text{MWd}\cdot\text{tHM}^{-1}$             | -    | 42.2     | 44.0             |

4.3.2. 通用核数据和关键中子学参数计算结果

表 4 给出了 REMIX 装载方案的通用核数据和关键中子学参数及其限值。从中可以看出，慢化剂密

度系数、多普勒功率系数计算最值均与限值存在一定距离; 中子动力学参数、硼微分价值也保有较大裕量。相比采用 4.45wt% 铀富集度的 18 个月换料堆芯, REMIX 堆芯慢化剂密度系数更大, 这也是由于使用了更多的可燃毒物棒而降低了临界硼浓度间接导致的。同时, 燃料成分的变化对引起有效缓发中子份额减小, 瞬发中子寿命变短。堆芯能谱也发生变化, 多普勒温度系数绝对值增大, 硼微分价值变小。整体而言, 应用 REMIX 燃料后, 堆芯中子学特性并未因燃料成分的改变而迫近甚至超越限值, 各项系数均保有较大裕量。这对堆芯的安全运行和事故分析都是至关重要的。

**Table 4.** General nuclear data and key neutronic parameters

**表 4.** 通用核数据和关键中子学参数

| 参数                                               |          | 限值     | 计算结果   | UO <sub>2</sub> 燃料计算结果 |
|--------------------------------------------------|----------|--------|--------|------------------------|
| 慢化剂密度系数<br>/pcm·g <sup>-1</sup> ·cm <sup>3</sup> | 最小值      | 0      | 0.0398 | -0.004                 |
|                                                  | 最大值      | 0.580  | 0.4954 | 0.522                  |
| 多普勒温度系数/pcm·°C <sup>-1</sup>                     | 最小绝对值    | -1.80  | -2.35  | -2.02                  |
|                                                  | 最大绝对值    | -4.65  | -4.24  | -4.09                  |
| 有效缓发中子份额                                         | 寿期初, 最大值 | 0.0075 | 0.0058 | 0.0065                 |
|                                                  | 寿期末, 最小值 | 0.0044 | 0.0048 | 0.0048                 |
| 瞬发中子寿命/μs                                        |          | 31.0   | 16.68  | 19.70                  |
| 最大硼微分价值/pcm·ppm <sup>-1</sup>                    |          | -19.0  | -11.19 | -12.48                 |

## 5. 结论

本文采用 SCIENCE V2 软件包开展了 REMIX 燃料在 CPR1000 型反应堆中的装载方案设计, 计算了堆芯中子学特性和各项主要安全参数, 对 REMIX 燃料在 CPR1000 型核反应堆中的应用进行了探讨。计算结果表明, CPR1000 堆芯具备全堆芯的 REMIX 燃料装载能力, 燃料管理各项安全参数均能满足安全限值要求, 并且在各项通用核数据和关键中子学参数中留有较大的裕量。根据计算初步数据可以看出, REMIX 燃料在 CPR1000 型核电厂中是适用的。此外, 对功率能力、特定事故分析影响的分析, 在 REMIX 燃料应用可行性的探究中仍然非常重要, 将在后续进行更深一步的探讨。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Postovarova, D.V., Kovalev, N.V., Onegin, M.S. and Bibichev, B.A. (2016) Radiation Characteristics of REMIX Fuel during Multiple Recycling in VVER-1000 Reactors. *Nuclear Energy and Technology*, **2**, 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.05.009>
- [3] Pavlovichev, A.M., et al. (2006) Neutron-Physical Characteristics of a VVER Core with 100% Load of Reprocessed Uranium and Plutonium Fuel. *Atomic Energy*, **101**, 863-868.
- [4] 李小生, 靳忠敏. MOX 燃料对压水堆堆芯性能影响研究[J]. 原子能科学技术, 2013(22): 583-587.
- [5] Gagarinskii, A.Y., Ignat'ev, V.V., Ponomarev-Stepnoi, N.N., Subbotin, S.A. and Tsibul'skii, V.F. (2005) Role of Nuclear Power in World Energy Production in the 21st Century. *Atomic Energy*, **99**, 759-769. <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0014-7>
- [6] 张宗耀, 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.
- [7] Fedorov, Yu.S., et al. (2005) Use of Regenerated Uranium and Plutonium in WWR Reactors. *Proceedings of the International Conference Global*, Tsukuba, 9-13 October 2005, Paper 124.

- [8] Ponomarev-Stepnoi, N.N. (2004) The Atomic-Hydrogen Power Production. *Atomic Energy*, **96**, 411-425. <https://doi.org/10.1023/b:aten.0000041203.24874.65>
- [9] IAEA (2003) Energy, Electricity, and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS1-29\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS1-29_web.pdf)
- [10] NEA OECD (2002) Multiple Pu Recycling in Advanced PWRs. OECD NEA, 162 p.
- [11] Alekseev, P.N., Bobrov, E.A., Chibinyayev, A.V., Teplov, P.S. and Dudnikov, A.A. (2015) Multiple Recycle of REMIX Fuel at VVER-1000 Operation in Closed Fuel Cycle. *Physics of Atomic Nuclei*, **78**, 1264-1273. <https://doi.org/10.1134/s1063778815110034>
- [12] Matveenko, A.V., Kharitonov, V.V., Pavlov, Y.G. and Uliyanin, Y.A. (2021) Competitiveness Assessment of Regenerated Uranium-Plutonium Remix Fuel in Thermal Reactors. *Atomic Energy*, **130**, 57-62. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00774-z>
- [13] Apalkov, G.A., Baranov, O.G., Karpenko, A.A., Lysikov, A.V., Samokhvalov, A.N. and Yaropolov, Y.L. (2023) R&D Results for Designing Technology and Manufacturing of Pelletized Remix Fuel at FSUE Mining and Chemical Complex for VVER-1000 Reactor Plants. *Radiochemistry*, **65**, 265-275. <https://doi.org/10.1134/s1066362223030013>
- [14] Kovalev, N.V., Zilberman, B.Y., Goletsky, N.D. and Sinyukhin, A.B. (2020) A New Approach to the Recycling of Spent Nuclear Fuel in Thermal Reactors within the REMIX Concept. *Nuclear Energy and Technology*, **6**, 93-98. <https://doi.org/10.3897/nucet.6.54624>
- [15] Dekusar, V.M., Kagramanian, V.S., Kalashnikov, A.G., Kalashnikov, A.G., Korobitsyn, K.V.E. and Puzakov, A.Y. (2013) The Comparison Analyses of VVER Remix-Fuel Characteristics When Multiple Recycling Were Made. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika*, **2013**, 109-117. <https://doi.org/10.26583/npe.2013.4.14>