

中国新一代核能核燃料总体发展战略研究

李冠兴¹, 周邦新², 肖岷³, 焦拥军⁴, 任忠鸣²

(1. 中国核学会, 北京 100045; 2. 上海大学, 上海 201800; 3. 中广核研究院有限公司, 广东深圳 518031;
4. 中国核动力研究设计院, 成都 610000)

摘要: 本文深入分析和研究了国内外压水堆燃料和材料技术, 快堆及其他先进堆燃料技术以及核燃料循环相关材料技术发展的现状和趋势, 提出了我国压水堆、快堆及其他先进堆核燃料与材料, 以及核燃料循环材料发展的目标、发展路线图和重点任务。压水堆是我国 21 世纪相当长时间内核能发电及能源结构转型的主力堆型。作为压水堆发展重要支撑的核燃料及材料基本实现了国产化, 但还没有实现品牌自主化。我国的快堆及快堆核燃料发展面临机遇和挑战; 核燃料循环产业面临重大历史性发展机遇和巨大挑战。最后对我国的压水堆、快堆、其他先进堆型核燃料及材料, 以及我国核燃料循环材料的发展提出了建议。

关键词: 核燃料; 核材料; 轻水堆; 压水堆; 快堆; 燃料循环

中图分类号: TB3 **文献标识码:** A

Overall Development Strategy of China's New-Generation Nuclear Fuel

Li Guanxing¹, Zhou Bangxin², Xiao Min³, Jiao Yongjun⁴, Ren Zhongming²

(1. Chinese Nuclear Society, Beijing 100045, China; 2. Shanghai University, Shanghai 201800, China; 3. China Nuclear Power Research Institute, Shenzhen 518031, Guangdong, China; 4. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610000, China)

Abstract: This study analyzed the worldwide status of and development trends in pressurized water reactor (PWR) fuel and material technology, fast reactor and other advanced reactor fuel technology, and material technology related to nuclear fuel cycles; and proposed corresponding target, roadmap, and key tasks. PWR has been the dominant reactor type for nuclear power generation and energy structure transformation in China for quite a long time. As an important foundation for the development of PWRs, nuclear fuel and materials have basically achieved localization, but still lack self-reliance in brand. China's fast reactor and fast reactor nuclear fuel development as well as its nuclear fuel cycle industry face significant development opportunities and challenges. This paper puts forward suggestions on the development of nuclear fuels and materials for PWRs, fast reactors, and nuclear fuel cycles in China.

Keywords: nuclear fuel; nuclear materials; light water reactor; pressurized water reactor; fast reactor; nuclear fuel cycle

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-01-04

通讯作者: 肖岷, 中广核研究院有限公司, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为反应堆安全、堆芯设计、核燃料及核燃料循环;

E-mail: xiaomin@cgnpc.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代核能用材发展战略研究”(2016-ZD-06)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

核裂变能的可持续发展依赖于铀资源的充分利用、核电的安全性和核废物的安全处置。发展快堆技术是解决这些挑战的有效途径。我国在做好压水堆核电技术升级和推广应用的同时,推进快堆核能系统技术开发,实现压水堆-快堆协调发展,逐步建立起核燃料闭式循环体系,既能充分利用铀资源,又能使高水平放射性废物最小化,解除核废料危害环境的后顾之忧,保障核能可持续发展。

2016 年 3 月,国家发展和改革委员会、国家能源局联合发布了《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》[1],行动计划将先进核能技术创新放在显著的位置,核燃料系统作为核反应堆的核心系统,对提升和保证核电站的经济性和安全性具有非常重要的作用。核燃料系统包括燃料组件、燃料相关组件和结构材料。

随着美国用户要求文件(URD)和欧洲用户要求文件(EUR)对第二代改进型和第三代核电厂的经济性、可靠性和安全性提出更高的要求[2,3],燃料组件也朝着提高燃耗、延长换料周期、提高安全裕度和可靠性等方向持续改进和发展。燃料组件设计技术的发展与材料技术的发展紧密相关、相互影响。先进的设计可以扬长避短、有利于充分发挥材料的特性,良好的材料性能可以解放设计思路、有利于设计目标的顺利实现。开发先进的核燃料及其相关材料是保证核电安全高效发展的最关键问题。

“核燃料技术发展战略研究”是中国工程院重大咨询项目“新一代核能用材发展战略研究”的一个重要专项课题[4]。“核燃料技术发展战略研究”涵盖压水堆燃料、快堆燃料以及燃料循环材料三个方向,分为三个专题:压水堆燃料技术发展战略研究、快堆及其他先进核能系统燃料技术发展战略研究、核燃料循环相关材料发展战略研究。本报告涵盖上述三个专题报告,是“核燃料技术发展战略研究”的综合报告。

二、压水堆核燃料发展国际趋势

(一) 压水堆 UO_2 -Zr 燃料持续设计改进

以美国、法国、俄罗斯等为主的核电先进国家

针对大型商用压水堆形成了以 ROBUST、AFA3G、TVS-2M 等为主的商用燃料组件品牌,设计目标燃耗已普遍提升到约 60 GWd/tU,换料周期达到 18 个月或更长,燃料可靠性要求不断提高。福岛核事故后,提升核燃料元件抵抗严重事故的能力成为新的发展方向。

燃料系统作为核反应堆的核心系统,对提升和保证核电站的经济性和安全性具有非常重要的作用,它包括燃料组件和燃料相关组件。不同类型燃料组件的设计在结构上有所差异,发展至今,逐步整合为 17×17 等典型结构。

我国目前的核电先进燃料组件技术,是以法国引进的 AFA(Advanced Fuel Assembly)系列燃料和 AP1000 燃料为主,虽然基本实现了国产化,但燃料组件所用主要材料,特别是锆合金材料仍然依赖进口。我国自主品牌的先进燃料组件还在研发之中,离规模化商用还有很长一段路要走。实现自主品牌先进燃料组件商业化应用是核电强国的重要体现。

虽然在日本福岛核事故后各国开始研究 ATF 燃料,但改进和开发以现有 UO_2 -Zr 燃料系统为基础的燃料力度并没有减弱。例如,西屋电气公司第三代核电 AP1000 燃料组件和下一代 NGF 燃料组件;法国阿海珐集团(AREVA)最新推出下一代高性能 GAIA 燃料组件;俄罗斯推出了 17×17 的 TVS-K 方形组件。

中国核燃料组件的设计虽然起步明显落后于美国、法国、俄罗斯等国,但近期发展较快。国内目前正在研发的燃料组件型号有:CF 系列燃料组件、STEP 系列燃料组件、CAP1400 燃料组件。其中,CF 系列燃料组件的研发较快,CF2 燃料组件将用于 K2/K3 首炉;CF3 燃料组件采用了自主研发的 N36 锆合金包壳材料,最大燃耗 52 GWd/tU,CF3 研制完成后将用于 K2/K3 的换料。中国核工业集团有限公司在 2016 年启动了 CF4 燃料组件的设计研究,其目标燃耗为 60 GWd/tU,燃料包壳为 N45 合金。

压水堆的发展对包壳材料的性能提出了更高的要求,需要其具有更优异的性能,包括耐腐蚀性能和抗吸氢性能、抗辐照生长和抗蠕变性能等。纵观国际上对锆合金的持续改进研究表明,锆合金的发展方向仍然是调整现用合金的成分,改进加工工艺,开发新合金。在合金成分方面,Zr-Sn-Nb 系合金是发展的主流,低含量 Sn 及适中的 Nb、Fe 是主要合

金元素。另外，以 Zr-1Nb 为基础，适当增加合金组元。在制造技术方面主要有多元少量合金化和大铸锭带来的锆合金成分均匀性问题；大变形、低温加工工艺技术等。在显微组织结构方面，需要将第二相控制在几十纳米尺度且均匀分布。

（二）前沿核燃料及材料技术发展

1. 压水堆新型 ATF 燃料

福岛核事故后，美国提出了 ATF 燃料概念 [5]。相关国家均开展研究，包括美国、欧洲国家、中国、日本、韩国等。ATF 燃料芯块包括高铀密度燃料 (U_3Si_2 , UN, UC)，金属燃料和全陶瓷微胶囊燃料 (FCM)；ATF 包壳包括 SiC/SiCf 复合包壳材料，FeCrAl（含 ODS 化 FeCrAl）包壳，钼合金包壳和 Zr 合金包壳涂层等。

2017 年 4 月西屋电气公司在全球率先正式宣布推出 ATF 燃料的品牌 EnCore™，将采用 U_3Si_2 /UN 芯体和 SiC 复合包壳 [6,7]。

法国也确定了其 ATF 燃料的技术路线，短期包括锆合金涂层和 UO_2 芯块改进，长期包括 Lightbridge (LTBR) 公司的金属燃料和 SiCf 复合包壳 [8]。

2. 压水堆金属燃料

金属燃料具有良好的导热特性，是未来有潜力的压水堆核燃料选项之一 [9]。

U-Mo 燃料具有良好的导热性、铀密度高以及更高的安全性，从 20 世纪 90 年代中期起，美国、法国、俄罗斯等国家相继开展了 U-Mo 合金燃料的研究 [10,11]。近年来 LTBR 公司深入研究与开发 U-Zr 合金一体化金属燃料，这种设计与传统 UO_2 燃料相比，燃料棒中心温度可降低近 900 °C，从而使得燃料的安全裕度大幅度提高，这就是金属燃料可以大幅度提升堆芯功率的原因，也为核电厂提升功率奠定了基础 [9]。

法马通公司已经与美国 LTBR 公司成立合资公司，推进压水堆金属燃料的商业化。若压水堆 (PWR) 率先采用金属燃料，PWR 燃料技术将发生巨大改变。LTBR 公司的压水堆金属燃料将早于 ATF 出现。

除了 ATF 燃料和金属燃料以外，高熵合金、材料基因工程、核燃料的多尺度分析和试验技术也是国际核燃料及材料前沿领域和发展趋势 [12]。

（三）我国压水堆核燃料及材料的发展目标和路线图

持续开展 UO_2 燃料的改进研究和新型锆合金包壳研究，实现更先进的自主品牌燃料组件及包壳的国产化和商业应用。

积极开展 ATF 燃料研究，逐步明确 ATF 燃料的技术路线，并具备工程应用能力。5 年内自主品牌先进燃料组件和材料小批量入堆，10 年内大批量入堆。5 年左右 ATF 等先进燃料突破关键技术，10 年左右 ATF 等先进燃料具备入堆条件。

三、快堆及其他先进堆燃料技术发展国际趋势

国际上已经使用的快堆燃料形式有陶瓷燃料和金属燃料两大类。氧化物陶瓷燃料技术最为成熟，是目前快堆的主流燃料，特别是混合氧化物燃料 (MOX)。

国际上正在研发快堆金属燃料、氮化物和碳化物燃料。这类燃料比氧化物燃料有更高的增殖比 [13]。

金属燃料具有高热导率、燃料温度低、安全裕度高的特点。通过材料技术改进可以抑制辐照肿胀。快堆金属燃料是公认的未来主要快堆燃料种类之一 [14~16]。

金属燃料的制造工艺更加简化，金属燃料与干法后处理（分离出的金属为 U 和 Pu）能够更好地直接配合生产新燃料，构成一体化燃料循环系统。

金属燃料研发主要集中在 U-Zr 合金和 U-Pu-Zr 合金。金属燃料通常由 U-10Zr 的二元合金或 U-Pu-10Zr 的三元合金组成。在氧化物燃料及金属燃料中加入 MAs 成为嬗变燃料。

混合的铀-铀氮化物燃料和碳化物燃料是正在开发的新型燃料形式。UPuN 和 UPuC 的铀-铀密度比氧化物燃料高 (UN 中的 U 装量比 UO_2 高 35%)，能获得较高的增殖比、较短的增殖时间、较好的热导性能（热导性能比 UO_2 高出约 10 倍）并且与钠冷却剂和不锈钢包壳均具有优良的相容性 [17,18]。

国际上多个国家开展了碳化物、碳化物燃料的研发和应用。美国、法国、俄罗斯、印度等国都曾开展过多种碳化物和碳化物燃料的研发 [19,20]。俄

罗斯快堆（除 MOX 以外）燃料选择混合氮化物燃料（MNUP）作为未来的快堆燃料选项之一 [19,20]。印度的试验快堆 FBTR 采用碳化物（Pu, U）C 燃料 [21]。

由于种种原因，欧洲国家、美国和日本等的快堆及其核燃料的研发步伐被迫放慢 [22,23]。俄罗斯的快堆及燃料循环研究计划有所推迟，但仍然是独树一帜。俄罗斯 BN-600、BN-800 快堆设计采用 MOX 燃料。目前俄罗斯快堆使用的 MOX 燃料数量还很有限，未来 MOX 燃料在快堆中的比例将逐步增加。

为了推动下一代核能技术和实现闭式燃料循环，俄罗斯近期推出了“突破计划”项目，其主要内容是开发钠冷快堆、铅冷快堆、MOX 燃料、MNUP 燃料和一体化燃料循环系统。MNUP 燃料是俄罗斯闭式燃料循环“突破计划”的一部分，MNUP 燃料（型号 ETVS）已经完成部分辐照考验。MNUP 燃料将用于 BREST-OD-300（铅冷快堆）和 BN-1200（钠冷快堆）。

以往俄罗斯主要开发快堆 MOX。近期俄罗斯改变了策略，采用“双管齐下”的策略，计划在 VVER1000 中使用类似于 MOX 燃料的铀-钚混合 REMIX 燃料（采用回收的铀-钚混合物加浓缩铀）。与法国 MOX 一次通过不同，REMIX 燃料可以多次循环（经多次后处理），是对 MOX 的创新 [24]。俄罗斯近期还提出了一台快堆加两台轻水堆的双堆型核燃料循环新构想，可形成优势互补，提高效率 [25]。

我国的 CFR600 快堆将采用 MOX 燃料，而我国行波堆将直接采用金属燃料。中国熔盐堆首先采用固态燃料堆，将开发改进的 TRISO 流床燃料。

当前快堆燃料包壳材料普遍采用改进型的奥氏体不锈钢，铁素体-马氏体不锈钢和镍基合金。有关国家正在研发更先进的 ODS 不锈钢。

就熔盐堆而言，新型耐高温/抗熔盐腐蚀合金、双金属复合材料、C/C 和 SiC/SiC 等陶瓷基复合材料、高致密超细颗粒核级石墨等已成为热点研究领域。

四、我国快堆核燃料发展目标

MOX 燃料：2025 年形成 MOX 燃料组件的生产能力，完成首炉示范快堆 MOX 燃料组件生产并

装料。示范快堆 MOX 燃料组件的最高燃耗达到 100 GWd/tHM。

金属燃料：掌握 U-Zr 合金的制造技术和工艺。2030 年前完成 U-Zr 合金金属燃料组件的辐照考验，燃耗达到 150 GWd/tHM。

快堆及其他先进堆燃料：开展氮化物、碳化物、U-Pu-Zr、U-Pu-Am-Zr 合金等先进燃料的研发，突破制造工艺及关键技术。

新型包壳和结构材料：突破快堆结构材料制造关键技术，实现在示范快堆中的应用。掌握先进铁素体钢制造工艺，为行波堆提供合格材料。部署 ODS 钢等的研发工作，突破制造关键技术，为先进堆提供更高性能的燃料组件结构材料。

熔盐堆燃料：到 2022 年形成中试规模燃料生产能力；到 2025 年实现规模化（十吨级）生产；到 2030 年实现工业化（百吨级）应用。

五、核燃料循环材料发展国际趋势

我国的核燃料循环产业基本齐全，但与发达国家相比（如法国）水平比较落后，包括设备、工艺和材料。就材料而言，核燃料循环的重点环节在铀浓缩、乏燃料后处理、放射性废物处置等。

在铀浓缩领域的先进材料包括：超高强铝合金材料、纤维增强镁合金等金属基复合材料、碳纤维复合材料。水法后处理的关键设备材料包括：溶解器材料、剪切机材料、屏蔽材料。

干法后处理的相关材料包括：耐高温熔盐腐蚀的结构材料（Ti35 等）、耐高温和耐氯腐蚀合金材料、耐高温坩埚材料、耐高温及耐腐蚀的电极材料。重点研究方向包括 Inconel625 镍基高温合金钢，钽碳合金坩埚，钇稳定氧化锆（YSZ）涂层金属或石墨坩埚，TiB₂ 涂层石墨电极等。

钍基熔盐堆后处理材料研究包括：氟化挥发反应器合金材料 GH3535、高致密性核级石墨材料。

放射性废物处理材料研发的焦点主要是：冷坩埚耐高温材料研发；玻璃固化基材研发，包括玻璃基材、玻璃陶瓷、陶瓷材料。

六、我国核燃料及材料发展建议

世界范围内新一轮先进核燃料竞争已经开始。

我国应积极部署 ATF 燃料、氮化物等先进燃料和 ODS 钢等先进燃料组件结构材料的研究与开发,提升我国核燃料和材料的自主创新和产业发展能力,创建我国先进核能系统的燃料和材料自主品牌,为先进核能系统的发展提供更高性能的燃料和材料,使我国先进核能系统燃料和材料尽快达到国际先进水平,引领国际先进核能系统燃料和材料发展。

(一) 压水堆核燃料及材料

压水堆核电站是我国 21 世纪相当长时间内核能发电及能源结构转型的主力堆型。建议国家进一步加大对自主品牌先进燃料组件和包壳材料开发及应用的支持力度,为持续支撑我国核电安全高效发展和核电“走出去”奠定坚实基础。国家在推进压水堆核电站建设的同时,及早布局我国核燃料制造产能的提升,以满足我国核电持续发展及“走出去”的需要。

我国应尽早统一规划核燃料试验技术设施,以建立系统、完善的燃料试验体系(包括事故工况试验),打造出技术先进、设施齐全的世界一流核燃料研发体系,以满足核燃料发展所需的软硬件条件。

积极部署 ATF 等先进燃料研发工作,积极开展高熵合金、材料基因工程、核燃料多尺度研究,大力提升我国革命性核燃料和材料技术创新及产业发展能力,早日实现我国自主品牌先进核燃料和材料的应用,引领国际先进核燃料和材料发展。

(二) 快堆及其他先进堆燃料与材料

针对国家启动的示范快堆等重大工程需求,建议国家大力支持 MOX 燃料、金属燃料、氮化物燃料、熔盐堆燃料等先进核燃料的研发,以及 ODS 钢等先进燃料组件结构材料的研究与开发,攻克核燃料和材料的关键技术、制造技术,满足重大工程的燃料和材料需求,使我国到 2030 年在快堆燃料设计、制造和材料技术领域走在世界的前列。

因快堆及乏燃料后处理技术难度大且投资巨大,为了减低投资风险和提高经济性,建议国家借鉴法国和俄罗斯的经验,在闭式燃料循环启动的初级阶段采用压水堆与快堆相结合的燃料循环过渡模式,并部署可行的顶层设计及情景设计。

(三) 核燃料循环及材料

2016 年 12 月,国务院乏燃料后处理工作会议已经为我国的核燃料循环和乏燃料后处理的产业化作出战略性部署。我国构建先进核燃料循环工业化体系的大幕已经拉开,规划及建设大型商用后处理厂和 MOX 燃料厂等设施需兼顾技术的先进性、成熟性和经济性。燃料循环有关重要环节的材料开发是实现核燃料循环工业体系的必要保证,建议国家作出统筹规划,有计划、系统性的大力支持有关材料的创新开发,保证先进核燃料循环工业化体系的顺利建设。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,国家能源局.能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)[R].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,国家能源局,2016.
National Development and Reform Commission of the PRC, National Energy Administration. Energy technology revolution innovation action plan (2016—2030) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission of the PRC, National Energy Administration, 2016.
- [2] Electric Power Research Institute. Advanced nuclear technology: Advanced light water reactors utility requirements document small modular reactors inclusion summary (revision 13) [R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2014.
- [3] European Organisation. European utility requirements for LWR nuclear power plants – Vol. 1, 2, 4, revision E [R]. Barcelona: European Organisation, 2017.
- [4] 中国工程院.核燃料技术发展战略研究[R].北京:中国工程院,2018.
Chinese Academy of Engineering. Research on development strategy of nuclear fuel technology [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2018.
- [5] Bragg-Sitton S. U.S.DOE development of accident tolerant fuels. OECD/NEA expert group on ATF for LWRs [R]. Washington DC: Department of Energy, 2016.
- [6] Westinghouse Electric Co. Westinghouse accident tolerant fuel program [R]. Paris: Westinghouse Electric Co., 2017.
- [7] Ferroni P, Lahoda E. GAIN workshop on fuel safety [R]. Idaho: Idaho National Laboratory, Westinghouse Corporation, 2017.
- [8] Strumpell J H. Areva ATF programs, GAIN workshop on fuel safety [R]. Idaho: Idaho National Laboratory, 2017.
- [9] Malone J. Development needs for advanced LWR fuels [R]. Idaho: Idaho National Laboratory, 2017.
- [10] Bennett W D, Doherty A L, Henager C H, et al. Status report for the Uranium molybdenum fuel concept [R]. Washington DC: Pacific Northwest National Laboratory, 2016.
- [11] Golosov O A, Lyutikova M S, Semerikov V B, et al. Burnup and thermal annealing effect on structural change and structural parameters of Uranium-Molybdenum dispersion fuel [J]. Atomic Energy, 2016, 121(4): 269–275.

- [12] Robert A L, Brandon R L, Adam B T. Report on neams workbench support for Moose applications, Oak Ridge, Tennessee [R]. Tennessee Prefecture: Oak Ridge National Laboratory, 2016.
- [13] Carmack J. Fuel Development for advanced reactors [R]. Washington DC: Department of Energy, 2016.
- [14] Tanju Sofu. Sodium-cooled fast reactor (SFR) fuels: MOX-metal safety issues [R]. Mexico City: IAEA Education & Training Seminar on Fast Reactor Science and Technology, 2015.
- [15] Tanju Sofu. Inherent safety characteristics of metal-alloy fast reactor fuel [R]. Vienna: Fourth Joint IAEA-GIF Technical Meeting/Workshop on Safety of Sodium-cooled Fast Reactors, 2014.
- [16] Vatulin A V, Suprun V B, Kulakov G V. Development of fuel for research reactors [J]. Atomic Energy, 2016, 119(5): 304–310.
- [17] Yu M G. Oxide–metal core is possible transition to the metal fuel core for fast reactors of the BN-type [J]. International Journal of Energy and Power Engineering, 2013, 2(3): 113–120.
- [18] Stewart R, Palmer T. Fuel design space for sodium fast reactors [R]. Orlando: ANS Winter Meeting & Expo, 2018.
- [19] Ivanov V, Skupov M, Shadrin A. Closed nuclear fuel cycle with fast reactors and dense fuel [R]. Mosco: Rosatom, 2012.
- [20] Grachev A F, Zabudko L M, Zvir E A. Development of innovative fast reactor nitride fuel in Russian Federation [R]. Yekaterinburg: State-of-Art (IAEA) International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), 2017.
- [21] Kumar A. Development, fabrication and characterization of fuels for indian fast reactor programme [R]. Paris: International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13), 2013.
- [22] Vasile A. The astrid project-advanced sodium technological reactor for industrial demonstration [R]. Russia: 48th Meeting of IAEA Technical Working Group on Fast Reactors, 2015.
- [23] Organisation for Economic Co-operation and Development, The Nuclear Energy Agency. 2017 Generation IV international Forum annual report [R]. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, The Nuclear Energy Agency, 2017.
- [24] Postovarova D V, Kovalev N V, Onegin M S, et al. Radiation characteristics of Remix fuel during multiple recycling in VVER-1000 reactors [J]. Nuclear Energy and Technology, 2016, 2: 119–125.
- [25] Zalinskaya L. Making the new nuclear fuel cycle [R]. London: Wolrd Nuclear Association Symposium, 2017.