

先进核能发展情景研究

杨勇, 周培德, 叶国安, 杨红义, 胡贇, 宋英韵

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 核能是安全、经济、高效的清洁低碳能源。核能大规模、可持续发展面临着铀资源供应及放射性废物处理处置两大挑战。为最大化利用天然铀资源, 减少长寿命废物总量, 实现核裂变能长期可持续发展, 快堆及其先进闭式核燃料循环是首选技术路线。本文基于目前我国核电发展格局及未来发展展望, 绘制了压水堆和快堆匹配发展的先进核能发展情景图。

关键词: 双碳目标; 燃料循环; 一体化快堆; 核能发展情景

中图分类号: TL249

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)S1-0027-07

doi: 10.7538/yzk.2025.youxian.0070

Advanced Nuclear Energy Development Scenario Study

YANG Yong, ZHOU Peide, YE Guoan, YANG Hongyi, HU Yun, SONG Yingyun

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Nuclear energy is a safe, economical and efficient clean low-carbon energy resource. Its safety and large-scale development of nuclear energy are of great significance for optimizing the energy structure and promoting green and low-carbon development. They are also an essential requirement for ensuring national energy security and a strong support for China to achieve the goal of carbon peak and carbon neutralization. The large-scale and sustainable development of nuclear energy faces two major challenges: the supply of uranium resources and the treatment and disposal of radioactive waste. In order to maximize the utilization of natural uranium resources, reduce the total amount of long-lived waste and achieve the long-term sustainable development of nuclear fission energy, fast reactor and its advanced closed nuclear fuel cycle are the preferred technical route. Based on the current development pattern and future development prospect of nuclear power in China, an advanced nuclear energy development scenario featuring the coordinated development of pressurized water reactors and fast reactors was mapped out in this paper.

Key words: dual-carbon target; fuel cycle; integrated fast reactor; nuclear energy development scenario

核能的安全和规模化发展对于优化能源结构、促进绿色低碳发展具有重要意义, 是保障国家能源安全的现实需要, 同时也是我国实现“碳达峰、碳中和”目标^[1]的强力支撑。核能以其高

效、清洁、低碳的特点, 成为全球能源转型中的重要力量。核能发电不产生温室气体排放, 是实现节能减排、应对气候变化的有效途径^[2]。在全球范围内, 核能作为基荷能源, 以其稳定可靠的电力

输出,为经济社会发展提供了坚实的能源保障,同时也是我国低碳绿色能源的重要组成部分^[3]。

核能发展情景能够提供一全面视角来评估核能在未来能源体系中扮演的角色。一方面,核能发展情景对于核能发展技术路线的选择十分重要,明确核能发展方向,在未来核燃料循环策略的走向、反应堆堆型选择、相应核电技术优化升级以及核废料处理策略方面具有重要作用;另一方面,核能发展情景可辅助于核能相关政策的制定,可以帮助评估核能安全监管,鼓励核能技术创新等不同政策选择的长期影响。这不仅影响核能产业的发展,也关系到国家能源安全。本文主要介绍世界核能大国及国际组织在核能发展情景方面开展的相关工作以及各国提出的核能发展情景,同时以核燃料物料平衡为基础,分析展望我国2060年核能发展情景。

1 核能发展情景的内涵及分析工具软件

核能发展情景是一个国家、地区或者全球针对一定边界和一定时间尺度范围内,核能系统中各环节的发展匹配关系,通常以核燃料的物料供应流为边界条件,重点研究各堆型和总装机容量的发展情景。

世界各核能大国以及IAEA、OECD-NEA等国际组织均对核燃料循环情景分析进行了大量研究,研究内容涵盖了闭式核燃料循环、先进核燃料循环以及核燃料循环经济性分析等内容,并形成了核燃料循环情景分析的多种计算代码和计算工具。

MESSAGE^[4]是原始针对整个能源电力系统的一个分析评价预测软件,国际原子能机构(IAEA)针对该软件进行了针对性地开发,用于核能系统的情景分析与评价工作。在IAEA的系统里面,另外还有KIND和NEXT两个辅助软件,分别用于核能系统关键指标评价和经济性评价。

COSI^[5]是法国原子能委员会开发的核燃料循环情景分析软件,用于分析和评估新型燃料、钚或次锕系元素管理策略、新型反应堆等对燃料循环(浓缩、燃料制造、反应堆、加工、临时存储、废料储存和循环成本)的影响,旨在研究引入各类型核反应堆和使用相关核材料的各种短期、中期和长期情景。

VISION^[6]是美国开发的燃料循环模拟程序,主要用于核燃料循环情景分析研究,研究核燃料循环系统中的相关研究核设施发生变化,对整个核燃料循环系统在数量和质量上的影响,其中包括铀资源需求量、燃料种类及混合方式、运行时间及全局影响、核废物处理及最终地质处置方式等。此外,该软件可对整个核燃料循环进行经济性评估。

DESAR^[7](DESAR-1、DESAR-2)软件是IAEA为INPRO编制的程序,具体由俄罗斯负责开发,用于建立核能系统模型,给出投资、铀需求量、乏燃料的同位素质量和放射性等信息,为下一步对核能系统进行经济、环境和防核扩散等方面评价分析提供数据。该程序的目的是分析不同国家、区域或世界范围内当今和未来的核能系统。但近年来使用率较低,逐步被MESSAGE取代。

NFCSS^[8]是IAEA开发的一款情景模拟计算工具,可用来计算包含不同反应堆类型在最长周期为200a的不同情景选择下的年度燃料循环需求,该软件具备钍燃料循环以及计算乏燃料衰变热和放射毒性的功能,同时验证了计算快堆燃料循环的能力等。

主要的核能情景分析软件列于表1。除此之外,还有日本的FAMILY、西班牙的EVOLCODE、美国的DANESS、韩国的FUTURE、美国CAFCA等相关软件应用到核能发展情景分析工作中。

国内方面,2005年,清华大学刘学刚等^[9]分别对2020年前和2035年前我国核燃料循环情景进行了研究分析,得到了压水堆中引入MOX燃料对核燃料循环过程产生的影响的计算结果。2008年,李冠兴^[10]采用WNA提供的材料平衡典型数据,计算得出了我国到2020年、2030年、2050年时年度天然铀需求量、年度乏燃料产生量等,同时指出我国核燃料循环产业在如何保障我国核电的可持续发展方面将会起到至关重要的作用。2011年,中国原子能科学研究院^[11]在“863”计划的支持下联合国内高校完成了我国多种反应堆物料流数据库和初步的核能发展情景模拟。2013年,华北电力大学马续波等^[12]根据我国核电发展现状和中长期发展规划及中长期(2030年、2050年)发展战略研究,开展了压水堆核燃料循环

表 1 主要核能情景分析软件

Table 1 Main nuclear energy scenario analysis softwares

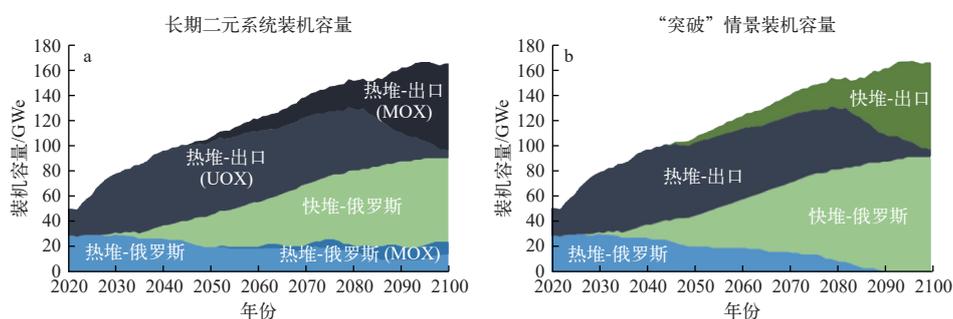
软件名称	国家/组织	用途
MESSAGE ^[4]	IAEA	用于核能系统的情景分析与评价工作
COSI ^[5]	法国	分析和评估新型燃料、铀或次铀系元素管理策略、新型反应堆等对燃料循环的影响
VISION ^[6]	美国	用于核燃料循环情景分析研究, 对整个核燃料循环进行经济性评估
DESAE ^[7]	IAEA、俄罗斯	建立核能系统模型, 给出投资、铀需求量、乏燃料的同位素质量、放射性等信息, 为下一步对核能系统进行经济、环境、防核扩散等方面评价分析提供数据
NFCSS ^[8]	IAEA	包含不同反应堆类型在不同情景选择下的年度燃料循环需求

情景模式的初步研究。2017年, 华北电力大学刘志宾等^[13]对2050年前我国核燃料循环模式进行仿真研究。2023年, 胡赟等^[14]研究了快堆多次复用铀和超铀元素的先进核燃料循环体系对我国核能可持续发展的意义。

2 核能发展情景主要研究成果

俄罗斯始终坚持发展快堆, 2011年开始的突破计划以快堆为核心, 俄罗斯本身不缺乏能源, 核

能是其体现大国地位和大国实力的重要体现形式, 并且其一半以上的核能属于出口型。突破计划的目标是保持俄罗斯在2050年前快堆领域的领先地位。其国内发展情景^[15]是从2030年开始大规模发展快堆, 压水堆自然退役(图1a)或者依靠快堆的增殖保持有限数量的MOX燃料压水堆(图1b); 出于防扩散等因素的考虑仅出口热堆(图1a), 或者2050年左右开发出增殖比为1.0(不产生富余铀)的出口专用型快堆(图1b)。

图 1 俄罗斯核能发展情景图^[15]Fig. 1 Nuclear energy development scenario in Russia^[15]

法国是核电比例最高的国家, 核电在国家能源战略中起到了举足轻重的作用。法国一直坚持闭式燃料循环路线, 是后处理和快堆技术都相对成熟的国家, 计划在2040年实现第四代核能系统的应用。法国燃料循环发展情景图^[16]如图2所示。

美国为了防核扩散, 长时间采取“一次通过”的循环方式。美国为了确保其未来能源安全, 已制定了扩大核能发展的计划。2005年美国提出了先进燃料循环(AFCI)计划^[17]。其重要目标是: 减少核废物的环境负担; 改进燃料循环的防扩散能力; 提高核燃料资源的利用率。AFCI计划分为两个阶段: 2050年之前, 过渡阶段, 针对美

国积累了大量乏燃料的现状, 开发新型后处理和嬗变快堆技术, 消耗从热堆乏燃料中分离出的铀和次铀系核素, 分离出的铀暂时存放; 2050年之后, 可持续阶段, 利用后处理分离出的铀或贫化铀进行燃料增殖, 以确保核能的可持续发展。上述发展战略可以概括为先焚烧、后增殖。这符合美国目前已经积累了大量乏燃料的现状。美国AFCI计划提出的燃料循环发展情景图如图3^[17]所示。

在INPRO项目的第2阶段, 为寻求将创新核能系统(NESs)最优地引入国家能源系统的方法, IAEA组织多个成员国开展了“基于热堆和快堆闭式燃料循环的创新核能系统全球架构”(GAINS)

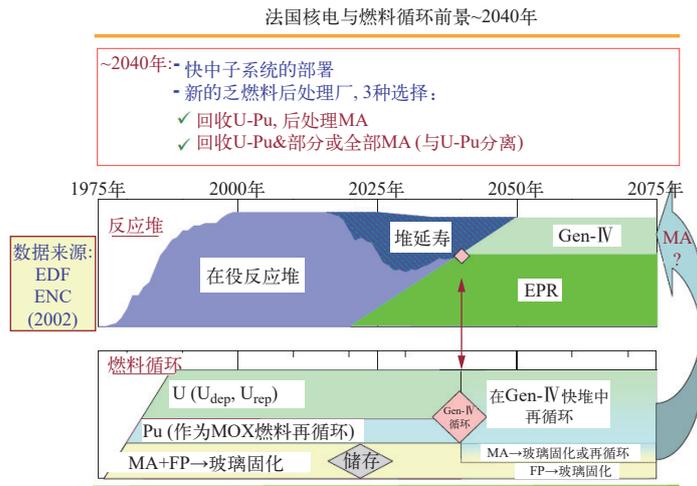


图2 法国核能发展情景图^[16]

Fig. 2 Nuclear energy development scenario in France^[16]

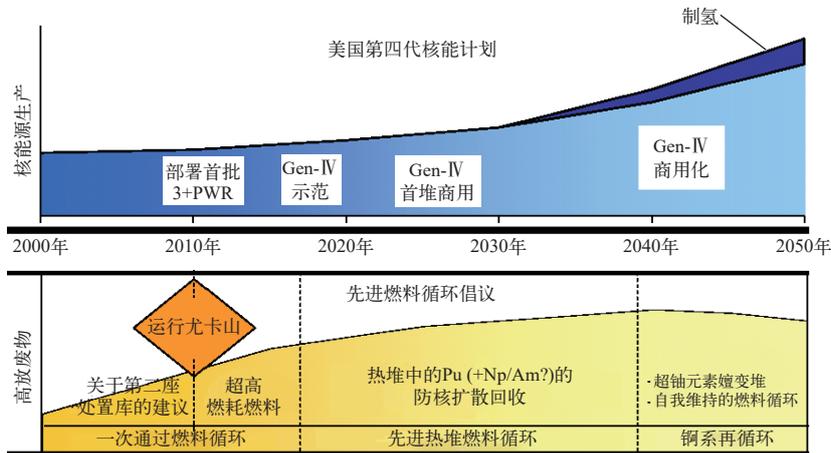


图3 美国的AFCI计划^[17]

Fig. 3 AFCI plan in USA^[17]

项目^[18]。项目参与者运用多种分析软件,对核能未来100年的发展进行了预测和展望。图4示出了相应研究分析结果。

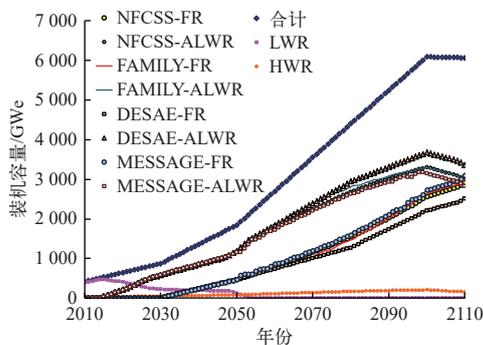


图4 GAINS项目的全球核能发展高情景研究^[18]

Fig. 4 Global nuclear energy development high-scenario study of gain project^[18]

3 2060年我国压水堆与快堆匹配发展格局

在核电发展过程中,无论是采用仅发展压水堆还是采用压水堆 MOX 循环模式,核电的发展规模始终受到天然铀资源总量的限制^[19]。目前我国核电装机中基本为热堆,我国也积累了大量的热堆设计、运行维护经验,配套了大量的相关设施,在一定时期内,压水堆依然是核电的主力堆型。因此我国核电建设宜采用热堆、快堆接续并存、配合发展的二元核电闭式循环发展体系。该体系下由于快堆的增殖,核电发展一方面可以突破天然铀资源的限制,实现核电的大规模发展,实现铀资源高效利用。另一方面可以减少长寿命、高毒性锕系元素总量,降低放射性废物毒性,实现核废物安全处理处置^[20]。

为助力我国在2060年实现“碳中和”,建议

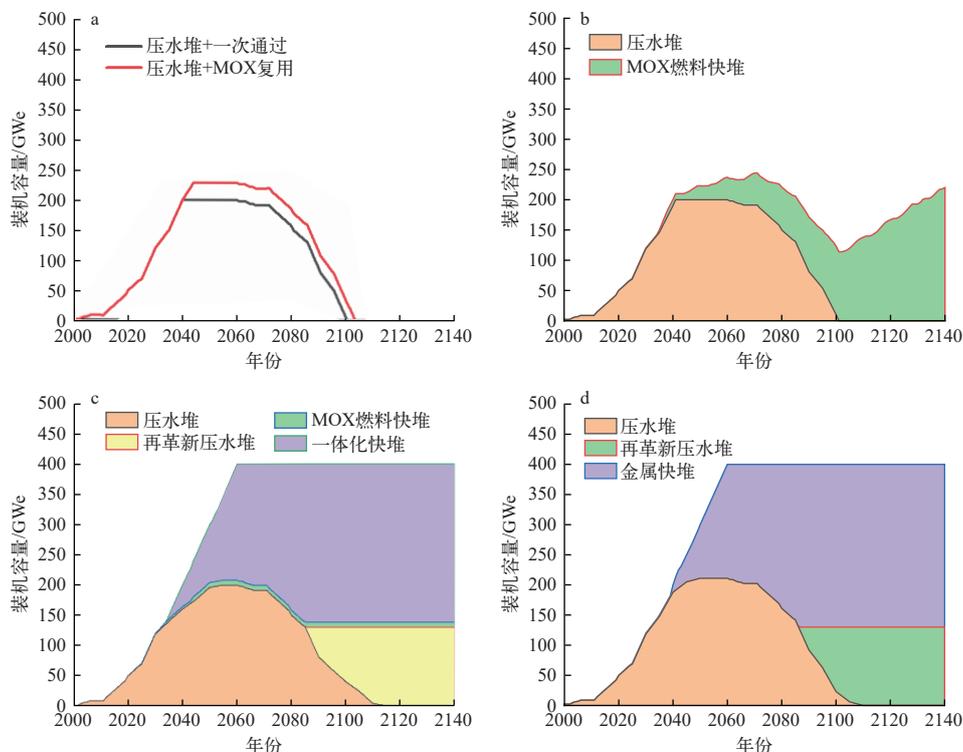
我国应选择适合国情的核能发展路线,以核电发展到 400 GWe 的核能装机容量为目标(国家发改委能源研究所^[21]、中国工程院^[22]等多家机构预测),假定我国核能发展中可获取的天然铀资源总量为 200 万吨,针对 4 种可行路线的核能发展情景进行了分析模拟,得到装机曲线如图 5 所示。4 种路线分别为:路线 1,仅发展压水堆或压水堆 MOX 循环;路线 2,压水堆和 MOX 燃料快堆(水法后处理);路线 3,压水堆-MOX 燃料快堆-金属燃料快堆(干法后处理);路线 4,压水堆-金属燃料快堆(干法后处理)。

当采用路线 1,即仅发展压水堆情况下,200 t 天然铀约可支持 200 GWe 的装机。即使采用压水堆 MOX 循环,对铀资源的利用率提升作用有限,核电装机发展规模约为 228 GWe。当采用路线 2 时,压水堆达到寿期后,由于受限于天然铀总量,压水堆开始退役。随着压水堆退役,即使 MOX 快堆仍在建设过程中,但核电装机的总量仍会逐渐减低。压水堆完全退役后,随着 MOX 快堆的建设,核能总装机出现缓慢上升。虽然 MOX 燃

料可以实现增殖,但增殖速度较慢,对于俄罗斯或法国等实现压水堆到快堆的切换是满足要求的,但不满足我国 2060 年快堆装机容量快速增长的要求。

金属燃料快堆+干法后处理的发展情景,比较符合我国核电仍在高速增长国情。相比于路线 3,一方面路线 4 核电装机容量发展节奏与路线 3 相差不多,另一方面,路线 4 仅发展金属快堆,在目前金属燃料及干法后处理成熟度较低的情况下,关键技术预期时间内研发成功存在风险,可能导致快堆与后处理大厂及压水堆发展匹配衔接失调,影响我国核能发展体系的整体部署。因此,路线 3 是更适宜且现实可行的核电发展路线。

金属燃料+干法后处理的商用仍需要一定的时期,而快堆快速增长的基础是获得足够的工业钚,从这个角度,后处理大厂的建成时间和能力是限制快堆发展的关键前提条件,因此需要尽快建成后处理大厂并积累工业钚。从物料流的角度,每座后处理大厂匹配 3 或 4 座商用 MOX 快堆,在一体化快堆批量应用之前,实现压水堆工业钚向



a——仅发展压水堆或压水堆 MOX 循环; b——发展压水堆及 MOX 快堆(水法);
c——发展压水堆、MOX 快堆及金属快堆(干法); d——发展压水堆及金属快堆(干法)

图 5 不同路线下装机情景对比

Fig. 5 Comparison of installed capacity scenarios under four different pathways

快堆核能系统的一次匹配和燃料的转移,一体化快堆可直接使用高钚含量的快堆 MOX 燃料(从压水堆乏燃料的 1%, 浓缩到 20% 并初步增殖), 经

适合少量批次操作的干法后处理后, 作为初装料, 这一过程的物料流如图 6 所示, 发展情景各关键节点数据列于表 2。

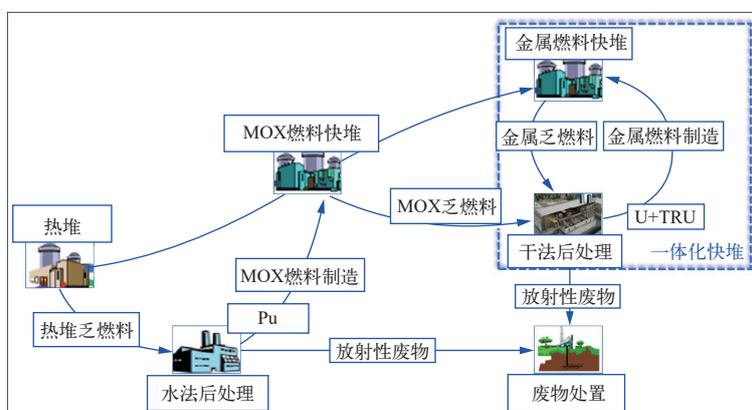


图 6 我国核燃料循环物料流

Fig. 6 Nuclear fuel flux of nuclear fuel cycle in China

表 2 我国快堆发展情景预测

Table 2 Predictions for development scenarios of fast reactors in China

参数	不同年份的数值						
	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2060
热堆规模, GWe	68.8	118.8	145.2	183.2	200.0	200.0	197.2
快堆规模, GWe	1.2	1.2	4.8	7.2	40.8	91.2	201.6
总装机规模, GWe	70.0	120.0	150.0	190.4	240.8	291.2	400.0
天然铀累积消耗量, 万 tU	14.4	26.3	36.5	51.8	68.9	85.4	118.2
水法后处理大厂数量			1	1	2	2	2
水法后处理能力, tHM/a	400	400	1400	1400	2400	2400	2000
MOX 燃料制造能力, tHM/a		60	60	60	120	120	120

注: 1) 后续仍有在运压水堆持续消耗天然铀直至退役

2) 2032 年、2042 年各建成 1 座后处理大厂

4 结语

核能作为低碳绿色的能源, 不仅在全球能源转型中发挥着关键作用, 同时也是我国能源转型和“碳达峰、碳中和”目标实现的重要支撑。核能发展情景的预测和规划对于制定能源政策、投资决策和长期能源战略具有重要意义。世界上主要核能强国及相关国际组织均在核能发展情景方面开展了大量的工作, 同时提出了各自的核能发展情景。本文以核燃料物料平衡为基础, 分析展望了我国 2060 年核能发展情景。我国核电能够在 2060 年实现压水堆和快堆各占 1/2 的发展格局, 构建形成压水堆、快堆二元核电体系, 为实现

我国能源转型和应对气候变化发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 中央财经委员会第九次会议. 把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[N]. 人民日报, 2021-03-16(01).
- [2] 周培德, 薛小刚, 叶国安, 等. 裂变核能大规模可持续发展情景及几个关键问题[J]. 中国核电, 2023, 16(4): 468-477.
ZHOU Peide, XUE Xiaogang, YE Guoan, et al. Scenarios of large-scale sustainable development of fission nuclear energy and several key issues[J]. China Nuclear Power, 2023, 16(4): 468-477(in Chinese).
- [3] 张东辉, 乔鹏瑞, 杨勇, 等. 中国快堆及先进核燃料循环

- 体系发展战略思考[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(10): 1816-1820.
- ZHANG Donghui, QIAO Pengrui, YANG Yong, et al. Strategic thinking on development of China fast reactor and advanced nuclear fuel cycle system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(10): 1816-1820(in Chinese).
- [4] IAEA. Modelling nuclear energy systems with MESSAGE: A user's guide[M]. Vienna: IAEA, 2016.
- [5] FREYNET D, COQUELET-PASCAL C, ESCHBACH R, et al. Multiobjective optimization for nuclear fleet evolution scenarios using COSI[J]. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, 2016, 2: 9.
- [6] 王静. 先进核能系统铀资源利用率及高放废物放射性毒性研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2014.
- [7] TSIBULSKIY V, SUBBOTIN S, KHOROSHEV M, et al. DESAE (dynamic energy system- atomic energy): Integrated computer model for performing global analysis in INPRO assessment studies[C]// International Conference on Nuclear Engineering. USA: ASMEDC, 2006.
- [8] WU H. Compare spent fuel computed with nuclear fuel cycle simulation system (NFCSS) with real world data[C]//The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) 2019. Japan: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [9] 刘学刚, 徐景明, 朱永 (贝睿). 2020 年前我国核燃料循环情景初步研究[J]. *核科学与工程*, 2005, 25(2): 124-130.
- LIU Xuegang, XU Jingming, ZHU Yongjun. Preliminary study on nuclear fuel cycle scenarios of China before 2020[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2005, 25(2): 124-130(in Chinese).
- [10] 李冠兴. 我国核燃料循环产业面临的挑战和机遇[J]. *铀矿地质*, 2008, 24(5): 257-267.
- LI Guanxing. Coming challenge and opportunity to the nuclear fuel cycle industry of China[J]. *Uranium Geology*, 2008, 24(5): 257-267(in Chinese).
- [11] 胡赞, 杨勇. 我国核能发展情景初步模拟[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2011.
- [12] 马续波, 陈义学, 王龙泽, 等. 压水堆核燃料循环情景模式初步研究[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(5): 811-815.
- MA Xubo, CHEN Yixue, WANG Longze, et al. Preliminary study on PWR nuclear fuel cycle scenarios[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(5): 811-815(in Chinese).
- [13] 刘志宾, 马进, 王兵树, 等. 基于三代压水堆的中国核燃料循环模式仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(3): 683-689, 697.
- LIU Zhibin, MA Jin, WANG Bingshu, et al. Simulation study of nuclear fuel cycle mode based on third generation PWR in China[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(3): 683-689, 697(in Chinese).
- [14] 胡赞, 杨勇, 宋英韵, 等. 快堆闭式燃料循环对提高铀资源利用率的分析研究[J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(1): 133-139.
- HU Yun, YANG Yong, SONG Yingyun, et al. Analysis on improving utilization of uranium resource based on fast reactor with closed fuel cycle[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(1): 133-139(in Chinese).
- [15] CARRÉ F. The nuclear fuel cycle: Key to generation IV nuclear energy systems' sustainability and transition from LWRs[C]//ANS Annual Meeting. (2024-12-20). http://web.mit.edu/nse/pdf/news/2007/07_ansannualmtg/ANS_07.2007.20.
- [16] KASHIRSKY A. Fast reactor deployment strategies and their impact on the nuclear industrial complex in Russia[C]//Potential of Innovative Nuclear Installations to Support Multi-recycling of Fuel in a Nuclear Energy System. Vienna: IAEA, 2021.
- [17] 尹忠红. 美国先进燃料循环 (AFCI) 计划概述[J]. *核科技信息*, 2006(1): 6-15.
- [18] IAEA. Framework for assessing dynamic nuclear energy systems for sustainability: Final report of the INPRO collaborative project GAINS[M]. Vienna: IAEA, 2013.
- [19] 宋英韵, 胡赞. 核燃料闭式循环技术路线研究[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2024.
- [20] 霍兴凯, 胡赞, 徐李, 等. 一体化快堆的内增殖性能研究[J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(6): 1111-1119.
- HUO Xingkai, HU Yun, XU Li, et al. Study of internal breeding of integral fast reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(6): 1111-1119(in Chinese).
- [21] 中国核电发展中心, 国网能源研究院有限公司. 我国核电发展规划研究[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2019.
- [22] 中国核能行业协会. 中国核能发展报告 2022[R]. 北京: 中国核能行业协会, 2022.