

我国基于快堆的可持续核能系统发展思考

杨勇, 王静, 徐铄

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 核能是优化我国能源结构, 降低二氧化碳排放的重要能源形式之一。近期我国的核能仍然将以压水堆为主, 但压水堆的长期发展将带来铀资源缺乏和放射性废物处置的问题。研究表明基于快堆的闭式燃料循环可通过多次的循环有效增殖核燃料, 同时具备嬗变 6 座以上同等规模压水堆产生的锕系核素 (MA) 的能力。根据我国快堆“实验堆-示范堆-商用堆”三阶段发展战略, 同时结合我国核电起步较晚的国情, 建议在 2050 年之前主要实施快堆增殖核燃料, 在 2050 年之后实施 MA 嬗变的技术路线。

关键词: 快中子增殖堆; 可持续核能系统; 增殖与嬗变

中图分类号: TL249 **文献标识码:** A

A Preliminary Study of a Sustainable Energy System Based on Fast Reactor in China

Yang Yong, Wang Jing, Xu Mi

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

Abstract: Nuclear energy is one of the important energy that can optimize the energy structure and reduce carbon emissions. For the near term, the development of nuclear energy in China will still be dominated by pressured water reactors (PWRs), but long-term utilization of PWRs will result in the problems of uranium resources shortage and radioactive waste disposal. According to studies, the closed fuel cycle based on the fast reactor can effectively breed the nuclear fuel through multiple cycles, and meanwhile burn Minor Actinides (MA) produced in over six PWRs with the same capacity. According to the three-stage strategy of “experimental reactor-demonstration reactor-commercial reactor” of the fast reactor in China, as well as the situation that nuclear power development started late in China, a road map is suggested for the development of the fast reactor in China, in which the main mission for the fast reactor is to breed nuclear fuels till 2050, and to burn MA after 2050.

Keywords: fast breeder reactor; sustainable nuclear energy system; proliferation and transmutation

一、前言

(一) 核能在我国的重要作用

核能作为世界上的主要能源之一, 在支撑全

球电力供应以及 CO₂ 减排方面起到了至关重要的作用。根据中国核能行业协会发布的我国 2016 年核电运行报告, 2016 年我国核电的装机容量仅占总装机容量的 2% 左右, 发电量占全国总发电量的

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-05-31

通讯作者: 徐铄, 中国原子能科学研究院, 总工程师, 中国工程院, 院士, 主要从事快堆研究工作; E-mail: xumi1937@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginisci.cn

3.56%，其比例远低于世界平均水平。

高效发展核能与扶持发展其他可再生能源已经成为我国的一个基本国策。核能作为一种能量密度高、洁净、低碳的能源，肩负着确保能源安全、提高环境质量的双重使命。

根据中国工程院《中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究咨询项目》研究报告，我国核能在2030年要发展到 2×10^8 kW以上的装机规模、2050年发展到 4×10^8 kW以上的装机规模，装机容量占总装机容量的16%，发电量占总发电量的24%，由此带来的CO₂排放量可减少 2.98×10^9 t/a。

（二）核能发展面临的问题

目前我国的核电全部采用以压水堆为主的热中子反应堆。可以预计，到2030年或更长一段时期，全球核能发电仍然普遍采用热中子堆技术，压水堆仍将占据主流堆型。虽然我国以压水堆作为现阶段的主要堆型，但是由于我国的铀资源不是很丰富，要达到世界核电平均比例的装机容量，铀资源的需求量是十分巨大的。如果我国压水堆发展到200 GWe的规模并保持到机组退役（60年），则我国累计需要约 2×10^6 t天然铀，我国的核电发展将消耗世界经济开采铀资源（见表1）的1/3，并积累大量的贫铀。

核能发展的另一个问题是高水平放射性废

物的安全处理与处置问题，如压水堆按照线性到2050年发展到200 GWe并保持这个装机容量，可以预计在21世纪我国的压水堆将累计产生 2×10^5 t以上的乏燃料，其中包含400 t左右的MA，即使衰变千年，根据其放射性毒性水平，风险仍然可达 10^{12} Sv的水平（见图1）[1]。

二、可持续核能系统

核能不仅仅是优化我国当前能源结构，降低二氧化碳排放的重要能源之一，更要作为一个可持续的能源，发挥长期作用。有关核能的可持续性，国际上有着不同的理解。根据国际原子能机构（IAEA）的创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）的研究，所谓的先进核能系统或者革

表1 2013年确认的全球铀资源

资源分类	储量 / $\times 10^4$ t
合理假定的资源	
<130 USD/kgU	369.89
<260 USD/kgU	458.72
推断的资源	
<130 USD/kgU	220.40
<260 USD/kgU	304.80
总计	
<130 USD/kgU	590.29
<260 USD/kgU	763.52

数据来源：OECD/NEA发布的《铀资源红皮书2013》。

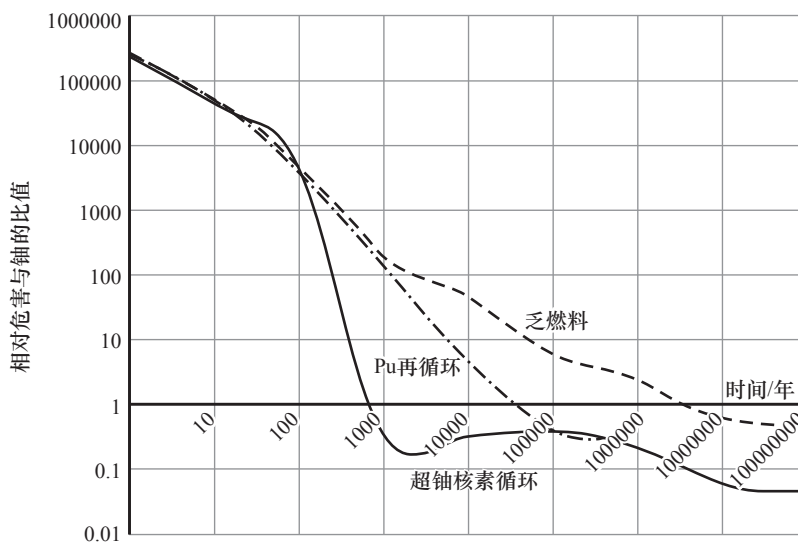


图1 压水堆乏燃料的放射性危害水平

新核能系统 (INES), 主要的目的是达到核能的广义可持续目标, 其中包括: 经济、环境、废物管理、安全、防扩散、实体保卫、基础结构等七个方面 [2]。经过十多年的研究, 从 GAINS 项目 (Global Architecture of Innovative Nuclear Energy Systems Based on Thermal and Fast Reactor Including a Closed Fuel Cycle), 到后期的核能区域合作项目, 以及目前核能发展路线图项目, 其提出的解决途径均是建立基于热堆-快堆的耦合系统。

而第四代核能论坛对于可持续性的目标, 倾向于采用狭义的解释, 即铀资源的高效利用与放射性废物的管理 [3], 而这两个目标正是快堆在核能系统中的重要作用: 增殖与嬗变。

基于热堆-快堆耦合的闭式燃料循环系统, 除了核电站之外, 还包括燃料制造、后处理等重要环节, 图 2 给出了主要环节的示意图。铀矿采冶后, 经过浓缩环节为压水堆提供低浓铀作为燃料。压水堆的乏燃料经过后处理, 提取出工业钚作为快堆的燃料, 同时将分离出的 MA 混合进入快堆燃料嬗变。快堆一方面接收来自压水堆的工业钚与 MA 作为燃料使用; 另一方面自身乏燃料经后处理后重复使用。在该环节中, 快堆燃料中的钚实现了增殖, MA 含量下降。最后在铀资源大量消耗之后, 快堆增殖的钚可以进一步为其他堆型提供燃料。

三、快堆的增殖与嬗变

在不同国家的核能系统中, 快堆的作用不尽相同, 其核心是灵活的快堆堆芯设计。根据国家的需要, 快堆可以设计成高增殖堆、低增殖堆、嬗变堆, 或者兼顾高增殖与嬗变的快堆。

美国、法国、俄罗斯、日本等作为核能发展的典型国家, 压水堆已经大规模发展并长期运行, 形成了商业后处理能力, 积累了大量的工业钚。这些工业钚足够支撑从压水堆向快堆的过渡, 同时这些国家国内的核电需求不再增长, 因此没有快堆增殖的需求, 仅要求快堆增殖比略大于 1.0, 维持核能的长期供应, 并进行嬗变。

我国这样的发展中国家, 核能的规模仍然相对较小, 积累的乏燃料较少, 不存在急迫的分离嬗变需求。因此, 近期快堆的重要作用仍然是核燃料的增殖, 快速提高我国核电的装机容量, 高增殖快堆及其快速的干法后处理是我国特定核能发展环境下的最优技术选择。

(一) 增殖

快堆的增殖能力受多个因素影响, 一是快堆的增殖比, 功率规模越大的快堆, 其增殖比也就越大; 同等功率规模的快堆, 堆芯结构越是紧凑, 增殖效果越好 (使用较少的燃料, 实现同样的增殖)。二是快堆乏燃料的后处理时间延迟, 即卸出的乏燃料

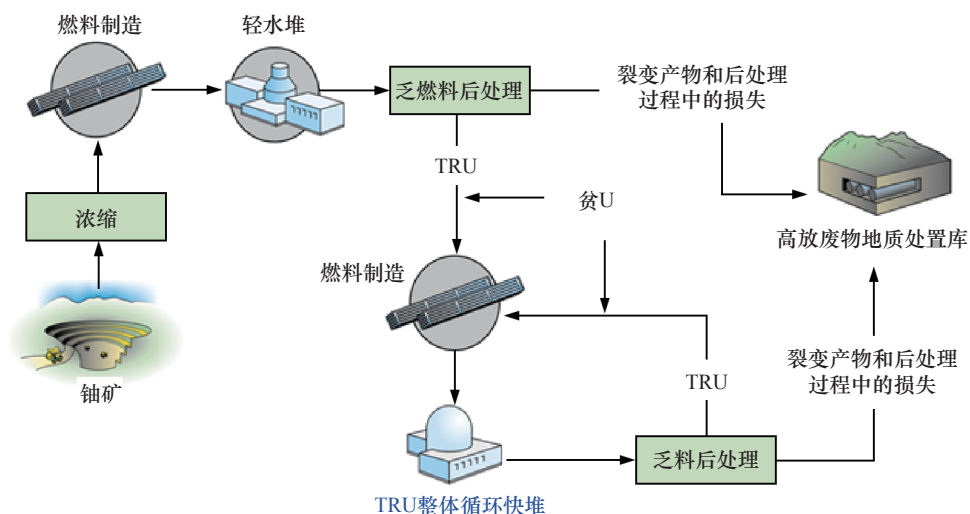


图 2 先进核能系统示意图

注: TRU: 超铀核素。

中包含了大量的裂变材料，这些材料须通过几年的冷却经提取后重新制备成燃料，才能再次使用，这些放在乏燃料水池冷却的燃料，对于反应堆来说是没有使用但被占用的资源。国家高技术研究发展计划“先进核燃料循环技术模式研究”的课题研究报告(2009AA050701)表明，对于整个核能系统而言，如要短期内提高核能的规模，缩短后处理的时间延迟比单纯提高增殖有效得多。因此，快堆的乏燃料与后处理是密不可分的，但与目前广泛应用的压水堆不同(其回收的钚无法在压水堆中多次循环，一般认为2~3次循环后品质将恶化到无法使用)，快堆中的钚是可以无限次循环下去的，快堆所增殖的

核燃料是一种优质的易裂变钚。

对于一个增殖比为1.2的CFR1000商用快堆的堆芯(见图3)[4]，计算结果(见表2)表明，快堆堆芯中钚的同位素经过多次循环后趋于一个平衡值，并且与初始堆芯的差别不大，堆芯中的MA(乏燃料中过多的MA给燃料循环带来了巨大的技术挑战)也不会像压水堆那样随着循环次数的增多显著增长，这就意味着快堆是可以进行无限次燃料循环的。理论上，不管每次循环快堆的燃料利用了多少，乏燃料中的有用成分终将在不断的循环中裂变，铀资源可以全部利用；但现实问题是燃料循环的各个环节不可能达到100%的

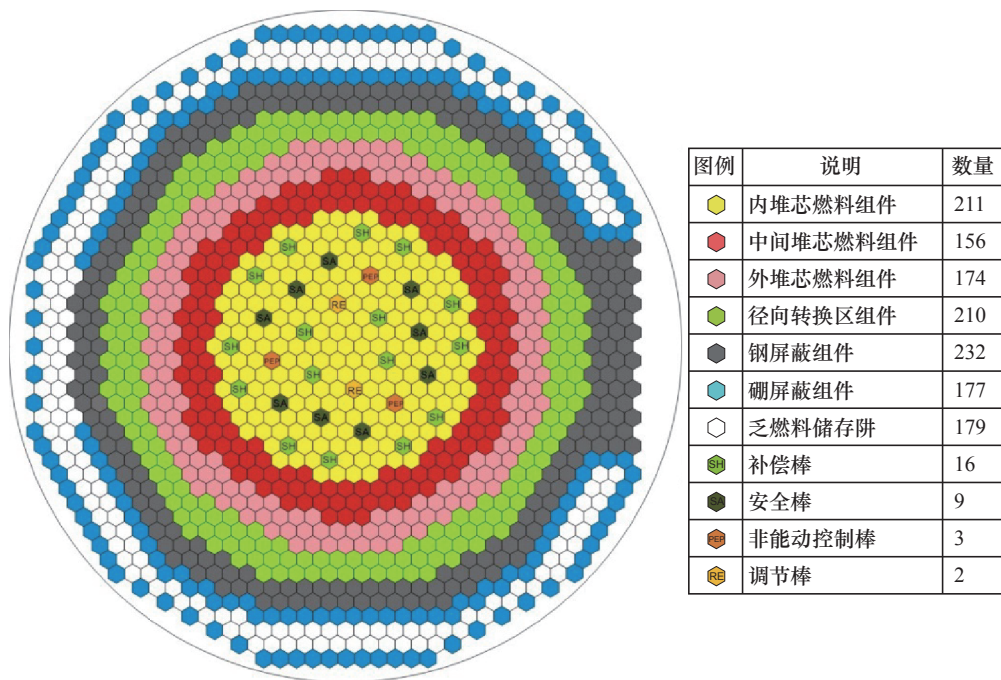


图3 CFR1000堆芯布置图

表2 快堆多次循环后钚的同位素变化情况

循环次数	Pu 的同位素组成					MA
	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	
1	4.06	62.54	21.93	7.03	4.44	1.50
2	5.70	64.05	21.95	4.19	4.11	1.49
3	6.57	64.72	22.05	3.02	3.64	1.49
4	6.99	64.84	22.08	2.68	3.40	1.48
5	7.20	64.99	22.18	2.53	3.10	1.48
10	7.34	65.43	22.48	2.47	2.28	1.47
15	7.36	65.57	22.56	2.48	2.03	1.47
20	7.37	65.63	22.55	2.48	1.96	1.47
23	7.38	65.65	22.55	2.48	1.94	1.47

利用率，由于各环节损耗的存在，现实情况下快堆铀资源的利用率为 60% 以上，随着技术的进步，利用率也将随之提高。

（二）嬗变

国际上普遍认为，中等规模的快堆是用作专门嬗变的理想堆型。目前我国的示范快堆正在设计，除了燃料增殖的示范作用之外，专门的嬗变堆芯也是其重要的应用之一。按照国际普遍的观点，堆芯中过多的 MA 将影响快堆的多普勒、钠空泡等反应性反馈，而添加量在 5% 以下通常是对堆芯没有安全影响的。为了对快堆堆芯嬗变能力进行研究，将 Np、Am 这两个嬗变的主要对象分别添加到快堆燃料中，表 3 给出了堆芯核素的变化量。没有添加 MA 的快堆堆芯，每 GW·a 将额外产生约 10 kg 的 MA；而以 5% 的比例添加 MA 的嬗变快堆，每 GW·a 可以嬗变掉约 200 kg 的 MA，其嬗变能力是一座压水堆 MA 产量的 6 倍。

此外，表 3 的结果也表明加入 5% MA 的堆芯与单纯铀钚堆芯相比，其有效缓发中子份额、多普勒反应性系数、钠空泡反应性等负反馈无明显变小。

四、我国快堆的发展战略

我国是核电后发展国家，核电起步比西方晚约 20 年，从我国核能发展的国情出发，在 2050 年之前主要实施快堆增殖核燃料，在 2050 年之后考虑实施 MA 的嬗变，即采用“先增殖、后嬗变”的技术路线。因此，高增殖的金属燃料快堆与能够快速处理快堆乏燃料的干法后处理技术应是我国快堆技术的发展目标。

我国快堆发展按照“实验堆、示范堆和商业

堆”三阶段进行。在实验快堆设计、建造和运行经验的基础上，目前已进入了第二阶段——设计、建造中国 60 万千瓦示范快堆。第三阶段是规划发展百万千瓦级大型高增殖快堆。预计到 2023 年，CFR600 建成运行，之后根据我国的需求情况适度推广。同时，60 万千瓦规模的快堆比较适合设计成专用嬗变快堆，届时将根据我国核能发展中 MA 的累积情况，适时进行堆芯转换，开展压水堆 MA 的集中嬗变工作。我国快堆工程技术发展的第三步是电功率达到 1 000~1 200 MWe 的大型高增殖示范快堆（CDFBR），要求经济性可接受。同时开始应用现场燃料循环的合金燃料，避免厂外燃料运输，加强集中的实体防卫，防止核扩散。预计我国 CDFBR 于 2035 年运行，之后进行产业化推广。

五、快堆对我国核能的贡献

根据中国工程院《我国核能发展的再研究》的估计，到 2030 年我国核电装机容量将达到 2×10^8 kW·h，到 2050 年将达到 $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8$ kW·h。而根据我国的铀资源约为 2×10^6 t 的预期，压水堆发展到 200 GWe 是比较合适的，其不足部分需要由快堆及其增殖的核燃料来支撑，情景分析见图 4。

在此情景下，天然铀的年消耗量随着压水堆装机容量的增长而增长，到 2050 年左右将达到 35 000 t/a 的消耗峰值，2070 年后随着压水堆的规模退役而逐渐降低。经过一个世纪的发展，我国累计消耗天然铀 2.1×10^6 t，并将产生 1.85×10^6 t 的贫铀尾料，这些贫铀为快堆的增殖提供了充足的原料。

快堆从 2032 年开始规模发展，在初期采用钚铀氧化物混合燃料（MOX），暂不添加 MA，依靠压水堆乏燃料中的工业钚和自身的增殖，到 2050 年

表 3 60 万千瓦快堆每 GW·a 的堆芯核素的变化量

核素	MOX 燃料	添加 5% 的 Np	添加 5% 的 Am	kg
²³⁷ Np	3.20	-201*		
²⁴¹ Am	-8.88*	—	-182*	
²⁴³ Am	9.00	—	-25.6*	
²⁴² Cm	5.58	—		
²⁴⁴ Cm	1.19	—		
²⁴⁵ Cm	0.0792	—		
²⁴⁶ Cm	0.00242	—		

注：* 负号表示减少的核素的量。

具备发展到约 130 GWe 的能力。系统中 MA 的产生与嬗变分析见图 5。到 2050 年左右，经后处理提取出来的 MA 接近 100 t，此时的快堆必须过渡到

U-Pu-MA 循环模式，实施先进燃料循环。到 2055 年核电总规模发展到 400 GWe 后，此后快堆增殖的钚将出现大量剩余，可以为其他堆型提供燃料。

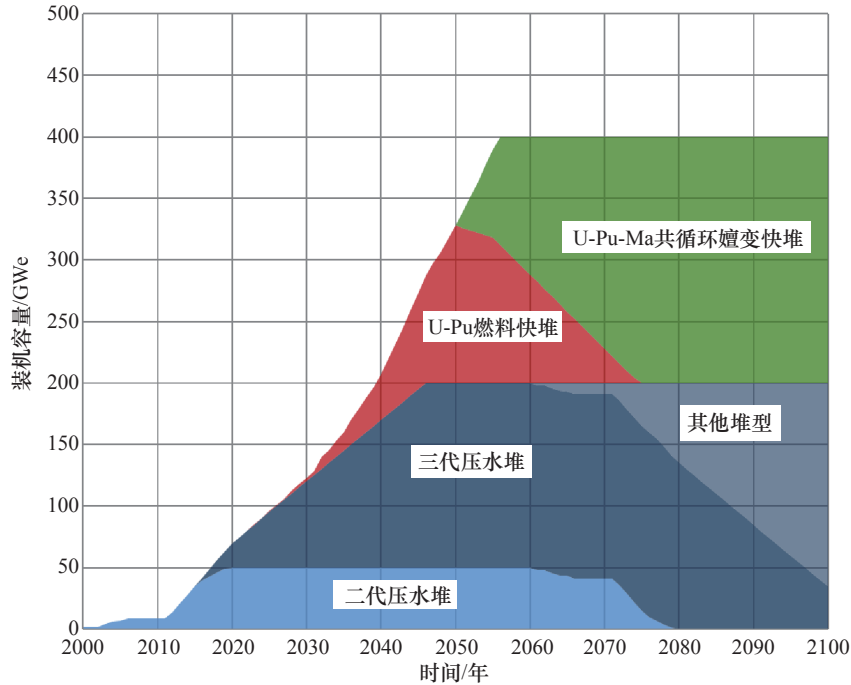
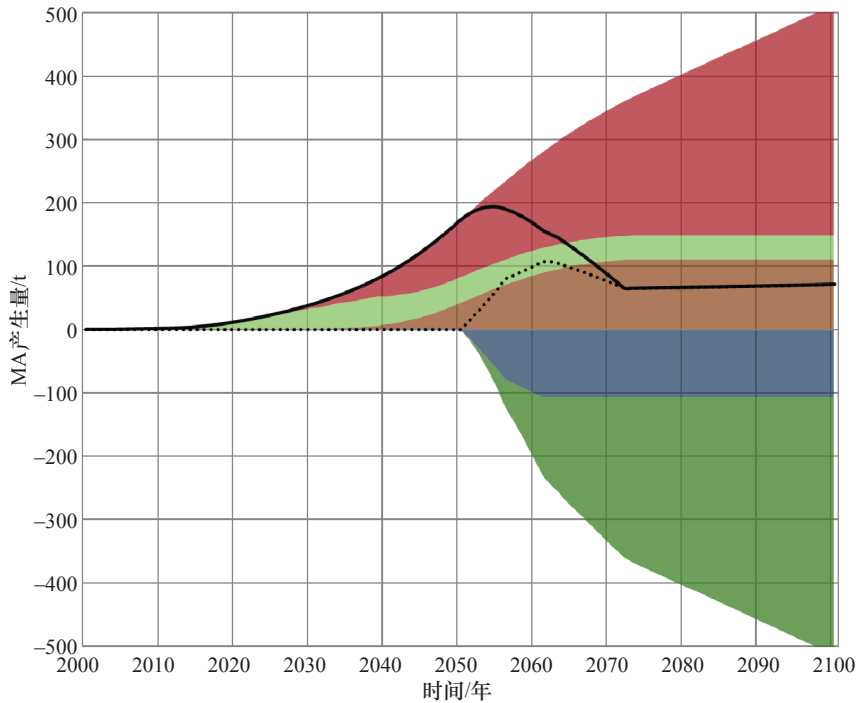


图 4 我国核能发展预测图



■ 压水堆后处理产生 MA 累积量； ■ 压水堆乏燃料中的 MA； ■ 增殖快堆产生的 MA 累积量；
 ■ 嬗变快堆中 MA 的嬗变量； ■ 嬗变快堆初装的 MA 转移量； — MA 总量； ···· 嬗变快堆堆芯中的 MA 残留量

图 5 预测情景中 MA 的产生与嬗变

参考文献

- [1] 周培德, 胡赞, 杨勇, 等. 快堆嬗变技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 2015.
Zhou P D, Hu Y, Yang Y, et al. Fast reactor transmutation technology [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2015.
- [2] IAEA. Framework for assessing dynamic nuclear energy systems for sustainability final report of the INPRO collaborative project gains [R]. Vienna: IAEA, 2013.
- [3] Hahn D. GIF, terms of reference for the sustainability assessment task force [R]. ISPra: The 18th Generation IV International Forum (GIF) SFR System Steering Committee (SSC) meeting, 2015.
- [4] 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(硕士学位论文), 2014.
Wang J. The study of the uranium resource utilization and the radioactive toxicity of high-level radioactive waste of the advanced nuclear energy system [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy (Master's thesis), 2014.