

日本近期核能发展研究分析

刘乙竹

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 日本核能发展起步早, 积累了丰富的技术经验。日本十分重视核能的发展, 在福岛核事故后并未放弃发展核能, 出于能源安全和减少二氧化碳排放等方面的需求, 日本经济产业省设定了 2030 年核电占全国总发电量 20%~22% 的电力结构目标。目前, 商用核电站的重启工作徐徐展开, 迄今已有 9 座商用核反应堆获得重启。福岛第一核电站的退役工作也基于福岛退役中长期路线图稳步进行。在今后发展堆型的选择中, 日本聚焦快堆和高温气冷堆等先进堆型, 也在根据国际的发展形势制定灵活的发展战略。此外, 在核技术应用中, 日本核医学领域发展迅速, 经济规模不断扩大。通过对福岛核事故后日本核能发展多角度多方位的调研分析, 可以充分了解后福岛时代日本核能发展态势, 为我国核电事业发展以及今后的战略规划提供参考。

关键词: 日本; 核电; 快堆; 研究堆; 高温气冷堆; 辐射应用

中图分类号: G31 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2020.06.010

2011 年 3 月 11 日, 日本发生里氏 9.0 级大地震, 继而引发海啸, 导致福岛第一核电站电源丧失, 1~3 号机组发生氢气爆炸。福岛核事故成为日本乃至世界核能产业发展的转折点, 影响了今后能源战略走向。日本政府在福岛核事故后并未放弃发展核能, 而是致力于提高核能的安全性, 聚焦快堆、高温气冷堆等先进堆型, 并在核技术应用特别是医学领域取得一定进展。

1 福岛退役相关工作

1.1 福岛第一核电站退役进展

如今距离福岛核事故已过去 9 年, 退役工作取得一定进展。

福岛第一核电站的退役需要做好以下几点工作: 保持厂房的稳定性; 减少辐射剂量和污染; 从乏燃料池中取出燃料; 清除熔化的燃料碎片; 拆除设施以及放射性废物的处理处置。

2019 年 12 月, 日本政府第五次修订福岛退役

中长期路线图^[1]。路线图将退役工作分成三个阶段。第一阶段从 2011 年 12 月截至开始从乏燃料池中取出第一个机组的燃料, 这一阶段的主要目标是达成低温停止状态, 并且抑制放射性物质的释放; 第二阶段截至取出第一个机组的燃料碎片(退役开始 10 年以内, 约 2021 年), 这一阶段的主要目标是研究制定燃料碎片的取出方法; 第三阶段截至退役工程结束(退役开始 30~40 年, 约 2041—2051 年)。路线图主要工程及时间节点如表 1 所示。

目前处于福岛退役工作的第二阶段。1 至 4 号机组全都处于低温停止状态。事故发生时没有运转的 4 号机组乏燃料池中的 1 535 根燃料棒已于 2014 年底全部取出。发生堆芯熔化的 1 至 3 号机组乏燃料池中还贮存着一千多根燃料棒, 其中, 取出 3 号机组乏燃料池中燃料棒的计划经多次推迟, 已于 2019 年 4 月启动。另外, 日本原子能损害赔偿和反应堆退役等支援机构公布的 2019 年版“反

作者简介: 刘乙竹(1993—), 女, 助理馆员, 主要研究方向为日本核能政策与战略。

收稿日期: 2020-05-16

表 1 福岛退役中长期路线图主要工程及时间节点

领域	内容	时期
1. 污染水对策		
污染水产量	将污染水产量抑制在约 150m ³ /日	2020 年内
	将污染水产量抑制在约 100m ³ /日以下	2025 年内
滞留水处理	厂房内滞留水处理完毕(1~3号机组反应堆厂房、工艺主厂房、高温焚烧厂房除外)	2020 年内
	将反应堆厂房滞留水降低到 2020 年底的一半左右	2022 年—2024 年左右
2. 从乏燃料池中取出燃料		
	完成 1~6 号机组燃料取出工作	2031 年内
	完成 1 号机组大型遮盖的安装工作	2023 年左右
	开始进行 1 号机组燃料取出工作	2027—2028 年左右
	开始进行 2 号机组燃料取出工作	2024—2026 年左右
3. 取出燃料碎片		
	第一座机组开始取出燃料碎片(从 2 号机组着手,逐步扩大规模)	2021 年内
4. 废物处置对策		
	关于处理处置方案及其安全性的技术预估	2021 年左右
	解除在室外临时保管瓦砾等(水处理二次废物及再利用对象除外)	2028 年左右

资料来源：福岛第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ。

应堆退役战略计划”中指出，力争 2021 年最先启动 2 号机组的燃料碎片取出工作，暂时保管于核电站厂区内，提议采用干法贮存方式。

在退役作业中，取出 1~3 号机组反应堆安全壳内的大量熔落燃料碎片是最大难关。为此日本计划对 1、2 号机组进行反应堆安全壳内部调查工作，并计划对沉积物进行取样。

福岛核电站事故发生后，由于反应堆损坏，必须通过不断注入冷却水来防止反应堆过热。这些持续注入的冷却水与流入建筑物内的地下水和雨水等混在一起，使得建筑物内不断产生新的污染水。在污染水处理对策下，虽然每天污水的产生量减少了，但是水箱的储量不断增加，根据东京电力公司网站 2020 年 4 月 23 日发布的数据，处理后的污染水储藏量已经达到了 120.1 万 m³（从水位计的测定下限值到储存罐底部的水储量），现场储罐数 1 016 个^[2]。虽然计划到 2020 年末建

设 137 万 m³ 储水箱，但适合建设的用地也已面临极限，预计将在 2022 年夏到达极限。因此，日本迫切需要尽快寻求解决方案。日本经济产业省资源能源厅下设特别小组讨论出以下 5 种方案：

(1) 地层注入；(2) 海洋排放；(3) 水蒸气排放；(4) 氢气排放；(5) 地下掩埋。并认为从技术水平和操作实际来看，比较现实的方法是海洋排放和水蒸气排放。从日本国内的实际业绩和排放设备处理的难度等来看，海洋排放更加可靠。

1.2 退役国际共同研究中心

日本原子能研究开发机构(JAEA)退役国际共同研究中心(CLADS)于 2015 年 4 月设立，旨在集结世界英才的智慧，产学研协作推进福岛退役相关研究和人才培养工作，并在福岛县富冈町建造了“国际联合研究大楼”作为工作的中心基地，于 2017 年 4 月开始运营。

退役国际共同研究中心主要设立以下 4 个部

门：退役潜在风险研究部门，主要负责燃料碎片行为分析的研究与开发、放射性微粒的行为分析、特定环境下腐蚀机理分析、氢能安全工程研发；燃料碎片表征和堆芯状况评估部门，主要负责事故进展和退化模型的研发、裂变产物化学和燃料碎片表征的研发、剂量评估与材料衡算的研发；废物管理部门，主要负责收集各种废物的物理/化学数据、固体放射性废物处理处置的研发；远程系统和传感技术部门，主要负责辐射成像和3D可视化技术的研发、各种分析技术的研发。

2 日本核电政策及现状

2.1 日本核电政策

福岛核事故后，日本政府并未放弃核电。日本重视核电发展主要出于以下两方面考虑：第一，能源安全。日本的自然能源资源非常匮乏，80%以上的能源需要进口，其中大部分原油是从中东进口的；第二，减少二氧化碳排放。减缓全球变暖是目前面临的重要问题。日本政府承诺将有效控制并降低温室气体排放量，力争2030年比2013年减排26%，到2050年削减80%。

日本政府官方发布的文件中亦支持核电的发展。日本原子能委员会于2017年7月通过的“日本核能利用基本观点”中指出：核能在解决全球变暖问题的同时，为国民生活和经济活动供给稳定低廉的能源，可以提高国民生活质量并强化国家竞争力。另外，以现有的技术，在确保安全的前提下利用核能是十分有力的选择^[1]。日本内阁会议于2018年7月通过的“日本能源基本计划”中指出，核电是确保能源长期稳定供给的重要基荷电力。核能发电在2030财年能源供电构成中维持20%~22%的占比^[4]。

2.2 日本核电现状

截至2011年3月11日，日本运行的商用核电机组共54座，核电约占全国发电量的30%，但由于福岛核事故，日本核电受到重创，国内核电站曾一度全部停运。目前仅有9座核电机组通过新安全标准获得重启，福岛核事故后决定退役的机组达到21座^[5]。

值得注意的是，获批重启的9座反应堆全部集中在日本的西部区域，且都为压水堆（福岛第一核电站为沸水堆）。与福岛核电站同为沸水堆类型的

柏崎刈羽核电站6、7号机组和东海第二核电站虽已通过新安全标准审查，但由于福岛的阴影，得到当地居民和自治体的同意并不容易，重启工作困难重重。

日本大部分的核电站已快达到40年的寿期，如果不能延寿将面临退役。此外没有达到寿期的核电站也因新安全标准规定的高昂成本问题以及重启的不确定性而选择退役。

日本核电发电份额在2010年度为25.1%、2011年度为9.3%、2012年度为1.5%、2013年度为0.9%、2014年度由于核电站全部停运降至0，之后，随着核电站的重启，2017年度达到3.1%。日本核电设备利用率在2010年度为67.3%，2014年度降至0后，至2018年度回升至19.3%^[6]。

截至2019年1月，日本核电装机容量（3804.2万千瓦）位列世界第四位，前三位依次为美国、法国和中国^[7]。

3 日本研究堆发展现状

研究堆在核科技领域发展过程中起到了重要作用。日本迄今为止共建造了28座研究堆，但其中多数已经老化或是已完成其作用而面临退役，目前预计继续运行的研究堆共有9座。具体参数如表2所示^[8]。

日本今后继续运行的9座研究堆中，用于专门领域的研究堆共有4座：反应堆安全研究堆（NSRR）用于模拟反应性事故进行燃料安全研究；稳态临界实验装置（STACY）用于硝酸铀溶液燃料的临界安全研究；高温工学试验研究堆（HTTR）用于高温气冷堆的研发；实验快堆“常阳”（JOYO）用于快堆的研发。

属于临界实验装置的研究堆，共有3座。临界实验装置以反应堆物理实验为主要目的，因为不需要冷却系统，系统简单，非常适合学生及核能从业人士等的进修培训。

中子束利用型研究堆有JRR-3和KUR，应用于中子散射、中子成像、硼中子俘获治疗（BNCT）等中子实验技术创新产业。

由于辐照利用型研究堆JMTR已确定退役，而JRR-3和KUR虽然具有垂直实验孔，但仅限于进行少数简单的辐照试验，并不能替代辐照用研究堆，

表 2 日本继续运行的研究堆

研究堆	管理者	类型	输出功率	中子束 (n/cm ² /s)	冷却/减速	束孔道	利用目的	运行年数
UTR-KINKI	近畿大学	教育训练用小型炉	1W	热 1.0×10^7 快 1.0×10^6	/轻水	无	培训、中子射线照相、放化分析	56
JRR-3	日本原子能研究开发机构	池式	20MW	热 2.7×10^{14} 快 1.4×10^{14}	轻水/轻水	有	中子散射实验、硅掺杂、放射性同位素(RI)制造、中子射线照相、年代测定、材料辐照试验	27
TOSHIBA-NCA	东芝	临界实验装置	0.2kW	热 1.0×10^9 快 3.0×10^9	轻水/轻水	无	燃料、材料的辐照试验(基础实验)	54
KUR	京都大学	回路式	5MW	热 6.0×10^{13} 快 6.5×10^{13}	轻水/轻水	有	中子射线照相、中子散射实验、放化分析、硼中子俘获治疗(BNCT)、培训、材料辐照试验	53
高温工学试验研究堆	日本原子能研究开发机构	高温气冷堆	30MW	热 7.5×10^{13} 快 2.0×10^{13}	氦气	无	高温气冷堆研发	19
稳态临界实验装置	日本原子能研究开发机构	均质堆	0.2kW	—	—	—	氮化铀熔融燃料临界安全研究	22
KUCA	京都大学	临界实验装置	0.1kW	热 1.0×10^9 快 1.0×10^9	轻水、空气/聚乙烯、空气	无	反应堆物理、培训	43
反应堆安全研究堆	日本原子能研究开发机构	模拟反应性引发事故脉冲堆	300kW	热 1.9×10^{12} 快 4.0×10^{15}	轻水/轻水	无	燃料、材料安全研究	42
常阳	日本原子能研究开发机构	钠冷快堆	140MW	快 4.0×10^{15}	钠	无	快堆开发、培训	40

资料来源：研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方。

因此，在 JMTR 退役后日本面临辐照用研究堆缺失的问题。

4 日本重点研发堆型

4.1 快堆

快中子增殖反应堆（简称“快堆”）可以提高铀资源利用率，使放射性废物最小化，是第四代先进核能系统（GIF）的优选堆型。日本快堆技术起步早，到目前为止已经自主建造、运行了实验快堆“常阳”和原型快堆“文殊”，积累了丰富的技术经验。福岛核事故后，日本将重点放在提高快堆安全性等方面，虽然决定退役“文殊堆”，但依旧坚持核燃料循环政策，支持快堆发展。

4.1.1 实验快堆“常阳”

实验快堆“常阳”位于日本茨城县大洗町，于1977年首次达到临界，是利用日本本国技术自行设计、建造的。它不仅作为实验快堆，在钠冷却快堆基本性能的确认和运行维护经验的积累、新技术的验证等方面发挥了作用，而且作为快中子辐照堆，实施了各种辐照试验，对以原型快堆“文殊”为主的后续堆的开发做出了贡献。

日本原子能研究开发机构已向日本原子能管制委员会（NRA）提交了重启实验快堆“常阳”的新安全标准适应性审查申请。以2021年完成重启工作为目标。在今后，“常阳”堆可以通过燃料、材料的辐照试验推进高燃耗燃料及材料，高性能燃

料, 含有 MA 燃料、ODS 钢等长寿命材料的研发, 强化快堆基础技术, 进一步提高安全性与经济性^[9]。

4.1.2 原型快堆“文殊”

原型快堆“文殊”位于日本福井县敦贺市, 功率为 28 万 kW, 自 20 世纪 80 年代建造至宣布退役已耗资 10 410 亿日元(其中建设费 5 886 亿日元, 运转、维护费 4 524 亿日元)。但由于发生钠泄露事故以及换料装置 (IVTM) 掉落事故, 自 1994 年首次达到临界开始仅运营了 250 天。日本政府在 2016 年底正式宣布其退役。

“文殊”堆退役主要有以下两方面原因: 第一, 经费问题。日本政府投入了高昂的经费却没有得到相应回报, 若要重启“文殊”堆, 需要应对新安全标准继续投入巨额资金升级改造。第二, 公众信任。

“文殊”堆管理不力, 发生事故企图瞒报, 福岛核事故后日本民众“恐核”心理严重, 因此重启很难获得国民支持。

“文殊”堆的退役也从另一方面展现了日本打算重整旗鼓的决心。文部科学省对“文殊”堆退役所需费用进行了估算, 按照退役时间 30 年计算, 退役所需总额至少约为 3 750 亿日元^[10]。

4.1.3 日本今后快堆发展战略

日本政府将“推进核燃料循环”作为基本方针, 支持推进快堆的研发工作。核燃料循环由于可以做到高放废物减容、减毒, 使资源得到有效利用, 因此被寄予厚望, 而发展快堆能够更好地实现这一目标。即使近期形势发生了种种变化, 日本发展快堆的决心并未改变。

基于日本原子能相关内阁会议于 2016 年 9 月 21 日通过的“推进今后快堆开发的方法”, 日本于 2016 年 10 月 7 日设立了“快堆开发委员会”, 会议议长为经济产业省大臣世耕弘成, 成员为文部科学省大臣松野博一、日本原子能研究开发机构理事长儿玉敏雄、电气事业联合会会长胜野哲、三菱重工业股份有限公司董事长宫永俊一等快堆开发相关责任人。快堆开发委员会作为日本快堆开发的指挥部, 于 2016 年 12 月 22 日制定出新的“快堆开发方针”^[11], 该方针简要总结了日本快堆开发的历史经验以及近年来核能形势的变化, 提出了今后日本快堆开发工作的目标, 指出日本快堆开发应不断获取世界最高水平的技术经验, 研发高安全性与经

济性并存的快堆, 努力实现其将来的商业化, 并为制定快堆国际标准发挥积极的领导性作用。

2018 年 12 月, 日本原子能相关内阁会议发布了日本快堆战略路线图^[12], 希望在本世纪下半叶实现快堆的商业运行。未来的工作将按照 (1) 促进竞争, 尝试各种想法 (今后 5 年左右); (2) 缩小范围, 锁定技术重点 (2024 年以后); (3) 对今后的开发课题及工程进行探讨这三个步骤推进研发。另外报告中也强调了未来快堆研发活动中民间资本驱动创新以及保持战略灵活性的重要性。

4.2 高温气冷堆

高温气冷堆采用包覆颗粒燃料, 用氦气作冷却剂, 用石墨作慢化剂和结构材料, 冷却剂出口温度可达 750~950℃。它产生的高温不仅可提高发电效率, 还能为氢气还原炼铁、石油或天然气裂解、煤的气化、氢燃料生产和海水淡化提供新途径^[13]。

日本高温工学试验研究堆建设在日本原子能研究开发机构 (JAEA) 大洗研究所内, 是世界上唯一的冷却剂出口温度能达到 950℃ 的高温气冷堆。日本高温工学试验研究堆自 2014 年开始停堆, 等待新安全标准审核。日本高温工学试验研究堆相关参数见表 3^[14]。

表 3 日本高温工学试验研究堆相关参数

反应堆功率	30MW
反应堆出口温度	950℃ (最高)
1 次冷却剂	氦气
1 次冷却剂压力	4.0MPa
功率密度	2.5W/cc
燃料浓缩度	6% (平均)
首次临界; 达到 950℃ 的时间	1998 年; 2004 年
安全性示范试验中连续 50 天 950℃ 运转	2010 年

资料来源: 高温ガス炉システムの開発・導入計画と JAEA の役割。

日本高温气冷堆开发有如下优势: 通过对高温工学试验研究堆的设计、制造、建设和运行积累了丰富的技术经验; 有着堆芯安全设计、抗震技术、运行管理技术、应对新安全标准审查方面的经验;

掌握燃气轮机、制氢技术等最先进的技术；与波兰等国家进行国家合作，进行技术示范。日本对高温气冷堆有着较高的期待，希望依托先进的高温气冷堆技术经验尽早实现商用化。

5 日本辐射应用概况

辐射可以应用于工业、农业、医疗等多个领域。日本亦十分重视辐射应用的发展。2017年8月29日，日本内阁府发布了《辐射应用经济规模调

查（2015年度）》报告^[15]。

据调查结果显示，工业、农业和医疗等辐射应用领域经济规模约为43 678亿日元，比上次调查（2005年度）增加了约2 561亿日元；但2015年度辐射应用领域整体约为46 985亿日元，相比2005年度的88 500亿日元几乎减半，这主要是受到福岛核事故后停运的日本各地核电站迟迟无法重启的影响。日本2005和2015年度的辐射应用调查结果对比如图1所示。

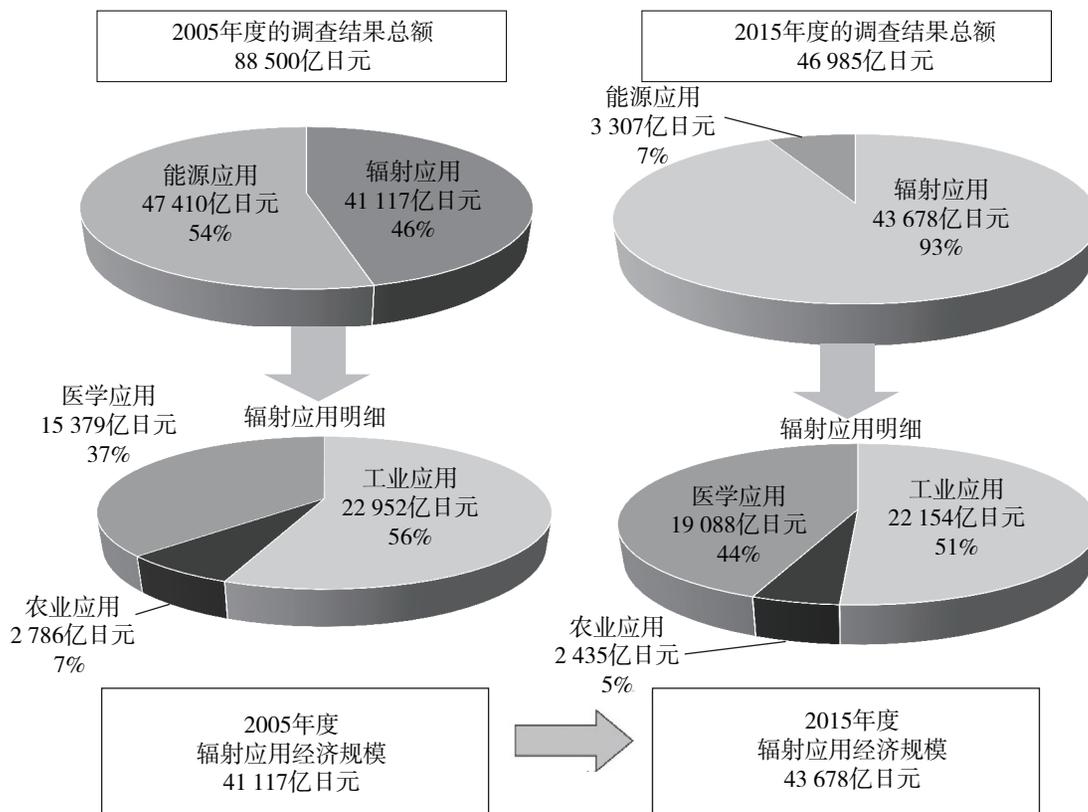


图1 日本2005和2015年度的辐射应用调查结果对比

日本在工业应用领域产值略有减少，这主要是由工业应用中占比最大的半导体加工方面的减少所致，但在工业应用中，医疗器械中的灭菌和诊断治疗设备制造有所增加。农业应用领域与之前呈持平状态，主要由于在农业应用中占比最大的水稻突变育种的横向波动。医学应用领域呈大幅增加态势，主要由于医科中的放射应用呈现大幅增加的态势。另外，CT、PET的癌症诊断和粒子束治疗方面也略有增加。能源应用大幅减少，主要由于能源应用中占比最大的是核能发电，福岛核事故日本核电站

停运造成了很大影响。

6 对我国核能发展的启示

(1) 汲取福岛核电站教训，提高核能安全性。我国应完善核电站纵深防御体系，进一步增加安全裕量，防止严重事故的发生。另外还要加强对新型核电、核燃料技术方面的投入，包括研发新型耐事故燃料(ATF)，从技术方面提升抵抗严重事故的能力。核安全的监督管理审查工作亦不容松懈，要建立健全核安全法律和监管体系，并且提高应急响应能力。

(2) 推进科学宣传, 恢复公众信任。福岛核事故引发核能信任危机, 日本含氚废水排放问题也成为各国关注焦点。尤其是作为日本邻国的中国和韩国, 更为担忧其放射性会对周边海域产生不良影响。我们应引导公众科学正确地认识福岛事故污水排放的性质和影响, 消除不必要的焦虑。另外针对其含氚水中检测出的碘-129等核素浓度超标问题也应进一步追踪调研。另一方面, 氚也是核电厂、后处理厂等设施排放量最大的放射性核素之一, 应支持开展核素氚相关研究, 包括生物影响和处理技术等, 使得核设施流出物中的氚得到更为有效的处理。

(3) 重点支持核电发展。福岛核事故后, 日本政府并未放弃发展核电, 强调了核电在保障能源稳定供给以及抑制全球变暖方面的重要性, 力争2030财年核电在能源供电构成比中达到20%~22%的占比。我国能源需求巨大, 核电作为清洁能源, 可有效促进节能减排, 在大力推进能源结构转型的背景下, 核电发展前景广阔。中国核能行业协会参与编制的《中国核能发展报告2019》显示, 2018年中国商运核电机组累计发电量为2865.11亿千瓦时, 约占全国累计发电量的4.22%。目前中国核电占比仍处于较低水平。因此, 我国要继续研究制定推动核电高质量发展的中长期计划, 加速重启核电建设, 强化自主创新能力, 研发兼顾安全性和经济性的核电技术, 提升核电的综合竞争力。

(4) 强化研究堆的作用。要进一步重视研究堆在核科技领域发展过程中起的重要作用。可以进一步强化研究堆在放射性同位素生产、培训教育等方面的利用; 扩大研究堆的应用范围, 实现一堆多用; 向公众开放, 使公众从小培养对核工业的兴趣, 增强理解; 推进利用研究堆进行国际合作等。

(5) 关注先进堆型的发展。我国与日本一样重视快堆和高温气冷堆的发展。在快堆方面, 中国实施“热堆—快堆—聚变堆”三步走战略, 中国实验快堆于2010年首次临界, 2011年并网发电, 2014年首次满功率运行。中国示范快堆工程也于2017年底开工建设, 计划于2023年建成投产。我们在快堆研发过程中, 要吸取日本“文殊”堆失败的教训, 保障设备设计的合理性, 并制定明确计划并且保障资金的合理利用。另外还要完善后处理体系, 使之与快堆匹配发展。在高温气冷堆方面, 日

本重视核能制氢技术的研发, 为建设“氢能社会”提供良好的基础。中国也应实施配套政策, 加快核能制氢领域布局, 增加科研投入, 进一步提升安全性与经济性。

(6) 推动核技术应用产业发展。据相关数据显示, 日本和欧洲核技术应用年产值占其国民经济总产值的比例为2%~3%, 而目前我国占比约为0.4%。近年来, 我国核技术应用发展速度迅猛, 年均增长率超过20%。2015年, 产值达到了3000亿元, 业内专家估计我国核技术应用产值有望在2030年突破万亿规模。日本近期尤其重视核医学产业发展, 在粒子束治疗方面, 日本共有23座粒子线癌症治疗设施, 其中包括5座重离子线治疗设施、17座质子治疗设施、1座兼备重离子和质子治疗的设施。核医学对人类健康有着重要贡献, 目前我国核医疗水平与发达国家差距较大, 但从另一方面说明还有很大的发展潜力, 要进一步提升核医学诊断和治疗技术的研发, 包括进行小型化质子、重离子治疗装置的研制等, 降低投入成本与维护费用, 用先进的核医学技术助力健康中国。■

参考文献:

- [1] 経済産業省. 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ [EB/OL]. (2019-12-27) [2020-03-09]. <https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20191227.pdf>.
- [2] 東京電力. 処理水ポータルサイト [EB/OL]. (2020-04-23) [2020-04-26]. <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/>.
- [3] 原子力委員会. 原子力利用に関する基本的考え方 [EB/OL]. (2017-07-20) [2020-03-10]. <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/kettei170720.pdf>.
- [4] 経済産業省. エネルギー基本計画 [EB/OL]. (2018-07-03) [2020-03-19]. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf.
- [5] Nippon. 日本の原子力発電所マップ [EB/OL]. (2020-03-06) [2020-03-19]. <https://www.nippon.com/ja/features/h00238/>.
- [6] 経済産業省. 「平成30年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書2019)第2部 エネルギー動向 [EB/OL]. (2019-06-07) [2020-02-05]. <https://>

- www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/whitepaper2019pdf_2_1.pdf.
- [7] 日本原子力産業協会. 世界の原子力発電開発の動向(2019年版)を刊行 [EB/OL]. (2019-04-17) [2020-02-05]. https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2019/04/doukou2019-press_release.pdf.
- [8] 日本学術会議. 研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方 [EB/OL]. (2018-08-16) [2020-02-05]. <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t265.pdf>.
- [9] 日本原子力研究開発機構. 高速実験炉(「常陽」)原子炉施設の新規制基準適合性に係る申請の概要について [EB/OL]. (2017-03-30) [2020-02-05]. <https://www.jaea.go.jp/02/press2016/p17033001/s01.pdf>.
- [10] 文部科学省. 「もんじゅ」を廃止措置に移行する場合の工程及びコスト試算 [EB/OL]. (2016-12-21) [2020-02-15]. https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/pdf/004_s01_00.pdf.
- [11] 内閣官房. 高速炉開発の方針(案) [EB/OL]. (2016-12-21) [2020-02-15]. http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kakuryo_kaigi/dai6/siryou1.pdf.
- [12] 内閣官房. 戦略ロードマップ [EB/OL]. (2018-12-21) [2020-03-09]. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kakuryo_kaigi/pdf/h301220_siryou.pdf.
- [13] 《国防科技名词大典》核能卷編委会. 国防科技名词大典: 核能 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 150.
- [14] 日本原子力研究開発機構, 國富一彦. 高温ガス炉システムの開発・導入計画と JAEA の役割 [EB/OL]. (2018-11-13) [2020-03-21]. <https://www.jaea.go.jp/jaea-houkoku13/shiryu/3.pdf>.
- [15] 内閣府. 放射線利用の経済規模調査(平成27年度) [EB/OL]. (2017-8-29) [2020-03-21]. <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2017/siryu29/siryu1-1.pdf>.

Research and Analysis on the Recent Development of Nuclear Energy in Japan

LIU Yi-zhu

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract: The development of nuclear energy in Japan started early and has accumulated a wealth of technical experience. Japan attaches great importance to the development of nuclear energy and did not abandon nuclear energy after the Fukushima nuclear accident. For energy security and reduction of carbon dioxide emissions, Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) has set a target to ensure nuclear power accounting for 20%-22% of the country's energy mix in 2030. At present, commercial nuclear power plants are gradually restarting, with nine having completed restarted. Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPP has also been carried out steadily on the basis of the medium- and long-term decommissioning roadmap and removal of the fuel rods is currently under way. In its future development of reactors, Japan has decided to focus on fast reactors and high temperature gas cooled reactors while adjusting its strategy according to the changing international conditions. Among applications of nuclear technology in Japan, nuclear medicine has more rapid development and expanding scale. Through multi-scope investigation of Japan's nuclear development and trend after the Fukushima nuclear accident, this paper is expected to provide reference for development and future strategy planning of nuclear power in China.

Key words: Japan; nuclear power; fast reactor; research reactor; high temperature gas cooled reactor; radiation application