

本刊专稿

2025 年全球核能科技进展

徐乐瑾, 刘齐, 胡梦岩, 翁志国, 陶文彬, 冯文卓, 谢小可, 王文轩, 吴新宇, 杨军*

摘要 2025 年, 全球核能技术正朝着多元化、小型化与智能化方向快速发展。各国在核电顶层立法、低碳资质认定、审批机制改革与国际合规互认等政策维度上都有更新。针对第 4 代反应堆、小型模块化反应堆的示范项目建设现状, 指出核聚变技术在长脉冲高参数运行、高温超导强磁场技术等方面取得的关键性突破。针对各国数字孪生、人工智能、核数据库的技术发展、程序开发与实际应用现状, 指出其在可靠性、标准化程度等方面需要改进。介绍了乏燃料及放射性废物处理研究进展, 包括脉冲萃取柱在乏燃料后处理中、高中低放射性废物处理方法等。针对核能在综合利用方面的进展, 提出核能与风电、光伏、储能耦合及在其他非电力领域的综合应用是未来的发展方向。

关键词 核能科技; 核电; 核裂变; 核聚变; 核能数字孪生; 放射性废物; 多能耦合

2025 年, 全球核能技术朝着多元化、小型化与智能化的方向发展, 总体呈现多维度突破、全产业链升级的特征。全球核电装机规模稳步增长, 亚洲与欧美地区协同并进; 核裂变反应堆技术朝着先进化、小型化方向发展, 示范项目接连落地; 核聚变技术实现关键突破, 工程化与商业化出现曙光; 核燃料循环与放射性废物处理技术不断发展, 为核能规模化发展提供有力支撑; 核能参与多能协同与综合利用, 应用前景更加广阔。

1 全球核电现状

2025 年, 全球核电产业进入加速发展期, 核能产业发展呈现全新态势。

1.1 世界各国核电发展现状

截至 2026 年 2 月 31 日, 全球在运核电机组 413 台,

总装机容量 377 GW; 在建核电机组 66 台, 总装机容量 70 GW; 长期停运核电机组 23 台^[1]。美国现有在运核电机组 94 台, 总装机容量为 96.95 GW, 重点发展以 NuScale 堆为代表的小型模块化反应堆^[2]。法国提出改进型欧洲压水堆(Evolutionary Power Reactor 2, EPR2)项目, 计划建设 6 座新的高功率反应堆, 通过“法国 2030”计划支持小型模块化反应堆和先进堆的开发, 持续开展第 4 代快堆技术研究^[3]。英国现有 9 台在运核电机组, 总装机容量 588 万 kW, 核电发电量约占其全国总发电量的 12%, 但其中 8 台机组将在 2030 年前关停。英国政府正式批准塞兹韦尔 C (Sizewell C) 核电建设项目, 计划建设 2 座 EPR 反应堆, 总装机容量 320 万 kW^[4]。日本在运核电机组 27 台, 总装机容量为 26.2 GW, 正稳步推进大间、岛根等在建机组建设^[5]。印度现有在运核电机组 23 台, 总装机容量为 7.4 GW, 在建 6 台机组, 逐步扩大核电规模以缓解能源供应压力^[6]。越南计划在 2030—2035 年间投运首批核电机组, 预计总装机容量达

华中科技大学能源与动力工程学院核工程与核技术系, 武汉 430074

收稿日期: 2026-02-27; 修回日期: 2026-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(22176067); 中央高校基本科研业务费资助项目(5003120076)

作者简介: 徐乐瑾, 教授, 研究方向为放射性废物处理技术, 电子信箱: xulejin@hust.edu.cn; 杨军(通信作者), 教授, 研究方向为反应堆热工水力与安全分析, 电子信箱: yang_jun@hust.edu.cn

引用格式: 徐乐瑾, 刘齐, 胡梦岩, 等. 2025 年全球核能科技进展[J]. 科技导报, 2026, 44(8): 22-33; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.02.00065

400 万~640 万 kW。泰国计划在 2037 年前引进 2 座 30 万 kW 的小型模块化反应堆,缓解能源需求增长与碳减排压力。此外,阿联酋、巴基斯坦、伊朗等国均有在运或在建核电项目,形成了覆盖东亚、南亚、西亚的多元化核电发展格局^[7]。

1.2 中国核电发展现状

2025 年 4 月 27 日,中国在运、在建和核准建设的核电机组共 102 台、装机容量 1.13 亿 kW;在建核电机组共 28 台,总装机容量 3365 万 kW;已商运核电机组达到 58 台,总装机容量 6096 万 kW^[8]。2025 年 1—6 月,全国核电机组累计发电量为 2300.86 亿 kW·h,占全国累计发电量的 5.08%(图 1)^[9]。

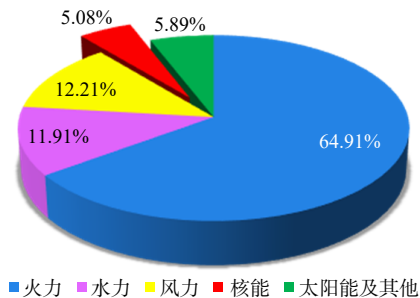


图 1 中国 2025 年 1—6 月发电量统计分布

2025 年 4 月,经国务院常务会议审议,决定核准 5 个核电项目,共 10 台机组。5 月,中国广核集团有限公司(以下简称中广核)防城港核电三期工程建设全面启动。项目新建的 5、6 号“华龙一号”核电机组单机容量 120.8 万 kW,2 台机组年发电量将达 200 亿 kW·h。11 月,中广核山东招远核电项目 1 号机组项目一期工程建设全面启动^[10]。

1.3 政策与监管

2025 年,《中华人民共和国原子能法》正式颁布,结束了中国核领域缺少顶层法律的历史,已于 2026 年 1 月 15 日起施行。2025 年 10 月,欧盟正式通过并生效了《碳边界调整机制(CBAM)简化条例》(Regulation (EU) 2025/2083 of the European Parliament and of the Council of 8 October 2025 amending Regulation (EU) 2023/956 as regards simplifying and strengthening the carbon border adjustment mechanism),正式认可核能生产的电力的低碳属性。英国政府宣布改革规划要求和监管规则的计划,包括取消规划许可有效期和设立高层协调机构等措施,以缩短

新核电项目的部署时间^[11]。国际核责任公约体系不断完善,《巴黎公约》(Paris Convention for the Protection of Industrial Property)与《维也纳公约》(Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer)的缔约国数量增至 82 个,主要核电设备供应商的认证互认范围覆盖 38 个国家,降低了核电出口的合规成本^[12]。

2 核裂变技术

核裂变技术正朝着先进化、小型化的方向发展,总体呈现出现有技术的改善与先进技术探索并行的趋势。

2.1 第 4 代反应堆研发进展

第 4 代核反应堆是在国际“第四代核能系统论坛”(Generation IV International Forum, GIF)框架下提出的先进核能系统概念,强调固有安全和被动安全设计,在资源可持续性、事故容忍性及多用途供能方面较传统堆型具有显著优势^[13],正迈向工程验证与示范应用阶段。主要包括钠冷快堆(sodium-cooled fast reactor, SFR)、铅冷快堆(lead-cooled fast reactor, LFR)、熔盐堆(molten salt reactor, MSR)、高温气冷堆(high-temperature reactor, HTGR)、气冷快堆(gas-cooled fast reactor, GFR)和超临界水冷堆(supercritical water-cooled reactor, SCWR)6 种技术路线^[14]。部分代表性项目如中国球床模块式高温气冷堆(High Temperature gas-cooled Reactor Pebble-bed Module, HTR-PM)、中国 2 MWth 液态燃料钍基熔盐实验堆(2 MWt Liquid-fueled Thorium Molten Salt Experimental Reactor, TMSR-LF1)、俄罗斯铅冷自然安全快堆(300 MWe 示范机组)(Fast Natural-Safety Reactor with Lead Coolant (300 MWe Demonstration Unit), BREST-OD-300)、印度原型快中子增殖反应堆(Prototype Fast Breeder Reactor, PFBR)、美国赫尔墨斯低功率示范反应堆(Hermes Low-Power Demonstration Reactor, Hermes)、先进铅冷快堆欧洲示范堆(Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator, ALFRED)见表 1。

在关键技术层面,面向超高温、高中子通量等极端工况,高温耐蚀材料、防护涂层及其失效机理成为研究热点。多物理场耦合模拟与系统级不确定性分析方法正加速引入堆芯设计与安全分析中,计算流体

表 1 主要第 4 代反应堆示范项目进展

序号	反应堆名称	国家/地区	技术路线	热/电功率	状态	意义/进展
1	HTR-PM	中国	HTGR	2×250 MW _{th}	在运	全球首个商运的第4代核电机组, 为核能制氢提供750℃高温热源
2	TMSR-LF1	中国	MSR	2 MW _{th}	在运	全球首个运行的钍基熔盐实验堆, 旨在验证液态燃料熔盐堆的物理特性与钍铀增殖循环技术
3	BREST-OD-300	俄罗斯	LFR	300 MW _e	在建	GIF铅冷快堆路线核心工程示范, 其设计追求更高的固有安全性。
4	PFBR	印度	SFR	500 MW _e	在建	印度3阶段核能战略的核心堆型, 实现钷资源利用和增殖的关键步骤
5	Hermes	美国	氟盐冷却高温度(FHR)	35 MW _{th}	在建	美国首个获美国核监管委员会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)建设许可的Gen-IV示范堆, 是熔盐冷却堆技术的重要验证平台
6	ALFRED	欧洲	LFR	~300 MW _{th}	工程推进中	欧洲LFR技术示范项目, 致力于验证LFR的安全性与技术可行性

动力学(computational fluid dynamics, CFD)技术正朝着与系统程序、物理程序多尺度耦合及数据驱动智能加速的方向发展^[15]。

俄罗斯在 LFR、大型 SFR 及多功能快中子研究堆方面同步推进。印度 PFBR 项目的持续推进则是其实现闭式燃料循环与能源自主战略的关键步骤。美国则围绕模块化小堆、熔盐堆-储能耦合系统及先进示范与研究反应堆开展工程示范与许可推进工作。

2.2 小型模块化反应堆研发进展

2025 年 2 月, 经济合作与发展组织核能署(Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency, OECD-NEA)发布的报告显示, 全球处于开发阶段的小型模块化反应堆研发(small modular reactor, SMR)设计已增加至 127 种^[16], 其中 51 种已进入监管预许可或正式许可审查阶段。这些设计可分为 3 类: 基于轻水堆的 SMR, 约占 50%, 代表堆型包括美国的 NuScale VOYGR 及俄罗斯的 RITM-200; 基于第 4 代核能系统的 SMR, 同样占比约 50%, 如中国的钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR); 微型反应堆(电功率低于 10 MW 的超小型设计)占比较小, 如美国的 Aurora, 主要用于偏远地区离网供电或特殊用途^[17]。此外, SMR 还包括船用堆和空间堆。

韩国三星重工公司与韩国原子能研究院合作开发的浮动式 SMR 平台, 搭载 2 台 SMART100 反应堆, 配备海水淡化装置, 于 2025 年 12 月 19 日获得美国船级社颁发的原则性认可证书(approval in principle, AIP)。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于 2025 年 7 月正式确立在 2030 年前于月球表面部署 1 座 100 kW 级核反应堆的目标^[18]。俄罗斯与中国已签署建设月球核电站的合作备忘录, 计划在 2033—2036 年为国际月球科研站(International Lunar Research Station, ILRS)提供能源支持^[19]。法国法马通公司(Framatome)与意大利国家新技术、能源与可持续发展署(National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, ENEA)于 2025 年 9 月签署协议, 共同研发用于月球定居点的核裂变反应堆^[20]。

中国已研发出 12 种小型堆技术, 代表堆型包括中国核工业集团有限公司(中核集团)研发的 ACP100 与“燕龙”(DHR-400)泳池式低温供热堆; 中广核集团与清华大学联合开发的 NHR200-II 低温供热堆^[21]。在浮动式核电站方面, 中广核集团与中核集团已分别开发 ACPR50S、ACP100S、ACP25S 等海洋浮动堆型号。

3 核聚变技术

2025 年, 全球核聚变研究呈现国家重大项目与民营企业技术创新并驾齐驱格局, 资本市场对核聚变技术研究热度持续增加, 关键技术突破与工程建设并进。

3.1 核聚变技术的发展

2025 年, 磁约束聚变(magnetic confinement fusion, MCF)与惯性约束聚变(inertial confinement

fusion, ICF) 2 条技术路线均迎来关键节点。法国国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER), 其托卡马克主机安装进入最后集成阶段。但受全球供应链延迟及核心部件技术难题影响, 该节点预计推迟至 2030 年, 氘-氚运行推迟至 2039 年^[22]。

2025 年, 中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)正式转入关键部件预研与制造阶段(图 2), 旨在 2035 年左右建成并实现聚变输出功率 200~500 MW、能量增益 $Q=1\sim5$, 并稳定运行数百秒^[23]。安徽合肥的聚变堆主机关键系统综合研究设施(Comprehensive Research Facility for Fusion Technology, CRAFT)完成了超导磁体、包层等核心分系统的最终验收, 可支撑 CFETR 在核心技术上的研究。



图 2 中国聚变工程试验堆(CFETR)效果
(图片来源: 中国科学院等离子体物理研究所)

美国联邦聚变系统公司(Commonwealth Fusion Systems, Inc., CFS)主导开发的 SPARC(Soonest/Smallest Private-Funded Affordable Robust Compact)装置利用高温超导(high-temperature superconductivity, HTS)技术大幅缩小装置体积, 2025 年内已完成半数环向场磁体线圈搭建。同年 9 月, 美国能源部独立验证了 HTS 磁体的性能, 确认了技术路线的稳健性^[24]。SPARC 计划于 2026 年实现首次等离子体运行, 旨在验证 $Q>2$ 的净能量增益^[25]。2025 年 4 月, 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)的国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)团队利用 2.08 MJ 的紫外激光能量, 成功驱动靶丸产生高达 8.6 MJ 的聚变能量, 能量增益因子突破 4^[26], 远超此前的 1.5~1.7 水平。

3.2 关键技术的突破

2025 年, 中国磁约束聚变装置群在“长脉冲”与

“高性能”2 个关键维度实现互补式突破。全球首个全超导非圆截面托卡马克——东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST), 于 2025 年 1 月成功实现 1 亿 $^{\circ}\text{C}$ 等离子体稳态高约束模式运行 1066 s^[27]。

核工业西南物理研究院的“中国环流三号”(HL-3)于 2025 年 3 月实现离子温度 1.17 亿 $^{\circ}\text{C}$ 、电子温度 1.6 亿 $^{\circ}\text{C}$ 的“双亿度”放电^[28]。HL-2M 装置则实现了在 1.5 亿 $^{\circ}\text{C}$ 条件下约束放电 60 s。美国麻省理工学院和 CFS 公司合作的 SPARC 装置, 已完成其核心 D 形高温超导磁体的测试, 在 20 K 温度下产生了创纪录的 20 T 持续磁场, 验证了其紧凑型强磁场设计的可行性^[25]。

合肥的紧凑型聚变能实验装置(Burning Plasma Experimental Superconducting Tokamak, BEST)聚焦“燃烧等离子体”难题, 旨在让聚变反应自身产生的能量维持反应持续。2025 年 5 月, BEST 总装工作正式启动, 计划于 2027 年底建成。2025 年 11 月, BEST 研究计划面向全球发布, 来自 10 余个国家的科学家共同签署《合肥聚变宣言》, 倡议开放共享与合作共赢。

3.3 政策与监管

随着聚变技术向商业化迈进, 各国政府达成共识: 聚变能与裂变能在物理原理与风险特性上存在本质区别, 不能简单套用传统核电监管框架。

2025 年 6 月, 美国政府发布《聚变科学与技术路线图》(Fusion Science and Technology Roadmap), 提出了在 21 世纪 30 年代实现商业化发电。日本政府于 2025 年 6 月发布新版《聚变能创新战略》(Fusion Energy Innovation Strategy), 锁定 21 世纪 30 年代实现商业化, 同月与英国签署聚变能合作备忘录。2025 年 2 月, 俄罗斯批准了对《原子能利用法》(Federal Law on the Use of Nuclear Energy)的修订, 明确了对聚变设施进行分类监管的标准和权限, 为聚变技术的发展提供了法律保障^[29]。2025 年, 英国持续完善比例化监管框架, 旨在为计划于 21 世纪 30 年代建成的 STEP 聚变示范电站扫清制度障碍。在欧盟核聚变专家组(fusion expert group, FEG)推动下, “欧盟核聚变战略”意见稿于 2025 年上半年开始讨论并在年内发布, 旨在建立涵盖供应链发展、统一监管和融资框架的整体方案。

中国在“十五五”规划的编制中,可控核聚变被明确列为前沿引领技术^[13]。《中华人民共和国原子能法》将可控核聚变明确写入国家法律,并设立区别于核裂变的独立监管章节,确立了分级、分类管理的根本原则。2025年4月2日发布的《关于聚变装置辐射安全管理有关事项的通知》,详细规定了聚变装置的分类标准、许可证申请制度及审批流程^[30]。

4 数字化与智能化

数字化与智能化被视作核电产业技术突破的关键,各国都在积极探索人工智能(artificial intelligence, AI)、大数据、数字孪生等技术的应用与发展,以提升核电的安全水平、运行效率和经济竞争力。

4.1 数字孪生技术

数字孪生技术已广泛进入核能领域。美国阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)开发了基于图神经网络的数字孪生技术,这类方法提升了复杂核能系统内部变量间关系的识别能力,能用于核反应堆的状态预测与实时性能分析^[31]。

广西防城港核电项目“基于AI技术构建数字孪生核电平台”以华龙机组三维模型为基础构建数字孪生体,解决了数据孤岛问题。以上实践表明,数字孪生技术正从实验室研究阶段向核工业运营阶段过渡,且已经在提升核设施运行安全、降低维护成本、支持决策优化等方面展现实效。

Yu等^[32]提出基于数字孪生的全生命周期安全管理与动态风险评估框架,通过多维模型协同和AI策略优化,实现核电站从设计—运行—退役各阶段的风险可视化和控制。美国公司西屋电气与Google结合WNEXUS 3D数字孪生平台与AI工具,共同推进核反应堆建设与运营项目的性能预测与进度优化^[33]。

尽管应用迅速推进,核能数字孪生的发展仍存在显著挑战。

1) 模型与实际系统的同步性不足,单一模型难以同时满足高精度预测与计算性能要求。

2) 数据质量与异构整合难,核能系统数据源复杂,影响数据融合的稳定性。

3) 标准化与安全合规不足,数字孪生牵涉模型一致性验证与监管合规性问题,缺乏统一的行业标准。

未来的发展主要聚焦于以下几点:(1) 强化机理模型与AI模型的混合建模框架,提升实时性与物理一致性;(2) 推进跨平台数据标准与数据清洗方法,解决数据异构带来的模型训练偏差;(3) 建立数字孪生安全审查与验证体系,确保在核安全监测与控制场景下的鲁棒性与可信度。

4.2 核能 AI

AI可通过挖掘传感数据,为核设施提供状态识别、预测与自适应控制,正深刻变革核电设计、运维、事故分析与决策等关键环节。中广核集团推出的智能工控系统,通过AI算法对设备进行预测性维护,实现了超50%的设备故障提前预警,并使修复时间缩短1/2,提高设备运行效率 and 安全性^[34]。

AI研究成果正被纳入行业标准与监管考量,如NRC强调AI系统需在严格安全框架下开发^[35]。

《中国核能发展报告(2025)》^[36]指出,AI与核能呈双向赋能发展态势:核电行业推动AI在设计、运维、智能决策等多个环节的广泛应用;同时,核能为AI数据中心等高耗能行业提供安全稳定的能源基础。全球核能行业组织和国际机构在会议与论坛上积极分享AI应用成果,推动国际合作项目与标准化,并探索AI在核安全和风险管控中的伦理与监管边界^[37]。Meta、Microsoft等科技巨头与核电公司达成合作协议,AI赋能核电运行初创公司Nuclearn完成1050万美元的A轮融资。2025年12月,英国提赛德(Teeside)地区宣布规划部署12台SMR,作为AI数据中心集群的长期低碳能源。

尽管应用迅速推进,AI的进一步发展仍存在如下挑战。

1) AI通常被视为“黑箱”模型,可解释性不足,其输出结果难以获得监管机构和操作员的信任。

2) 核电站的数据来源复杂,不同厂商、不同设备间的数据标准也不统一,难以实现融合与标准化。

3) 如何确保AI决策的安全性、可靠性并符合核能行业严格的安全标准,成为亟待解决的问题。

未来发展趋势包括3个方面:(1) 通过联合仿真和数据分析加强对核能系统的动态风险评估与优化方案自动生成;(2) 通过将AI的决策过程与安全标准紧密结合,确保AI决策能透明、可靠地解释,提高决策的可信度;(3) 核能数据标准与跨机构协同,通过建

立统一的数据标准和平台,实现不同核能设施和机构之间的数据共享与模型复用。

4.3 核能数据库建设

核能数据库的建设,通过构建统一的数据整合共享平台,将分散的试验数据与研发成果系统化收集整理,转化为可追溯、标准化的数据资产与证据体系,从而避免重复试验和低效研发,提升核能科技活动的开展效率与结果可信度。

国际上已经建立了部分数据库,例如 OECD-NEA 维护的热工水力实验数据库 TIETHYS,收录了全球超过 250 个实验台架的详细信息及数据^[38];欧盟委员会联合研究中心伊斯普拉机构(European Commission's Joint Research Centre, JRC, Ispra Establishment)建设的数据库 STRESA 持续更新严重事故研究数据;国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)建设的数据库 SANIS 汇集了国际上 80 多个试验设施信息,包括数据参考文献和链接、严重事故学习工具集合等。

美国国家核数据中心(National Nuclear Data Center, NNDC)负责维护的评价核结构数据库,收录了经系统评价的核结构与衰变数据,由国际核结构与衰变数据评价网络持续更新^[39]。

IAEA 在 2025 年底发布了众多核数据库以及数据库相关的工具的更新版本,包括 TEFAL 和 LIBRARIES 等。此外,IAEA 正在优化核数据工具与资源访问,在 GitHub 平台维护 41 个核数据软件与数据库仓库,同时持续迭代同位素浏览器、Live Chart 等经典工具。

世界核能协会(World Nuclear Association, WNA)于 2025 年 9 月更新了反应堆数据库,该数据库使用了 IAEA 电力反应堆信息系统的数据,并补充了 WNA 的额外数据,涵盖全球核反应堆的信息^[40]。

中国核数据中心发布核物理主题数据库——CENDL-3.2,主要包括原子核的结构数据和原子核相互作用的核反应数据,还包含了一些国内外的最新测量和评价的数据。2025 年 4 月,西安交通大学吴宏春团队自主研发核数据处理软件 NECP-Atlas,补充了中国 CENDL-3.2 评价核数据库缺失的轻水热散射数据,制作完成了堆芯物理分析所需的多群核数据库^[41]。

5 乏燃料及放射性废物处理

核能是高效、经济的清洁低碳能源。但当前核裂变能的大规模可持续发展仍受限于铀资源供应和放射性废物处置 2 方面。

5.1 乏燃料后处理技术

乏燃料后处理方法分为开式循环和闭式循环 2 种。前者将乏燃料视为高放射性废物,直接进行深层地质处置;后者是通过化学分离提取乏燃料中的可裂变材料,例如铀(U)、钚(Pu)进行回收,重新用于反应堆,以提升资源利用率,是国际核能技术发展的战略方向。根据不同介质特性,闭式循环可分为湿法和干法后处理。

湿法后处理指普雷克斯流程(plutonium uranium redox extraction, PUREX),常用脉冲萃取柱实现 U、Pu 等核素的萃取与反萃取,按柱内结构分为筛板柱(pulsed sieve-plate column, PSPC)、填料柱(pulsed packed column, PPC)和折流板柱(pulsed disc and doughnut column, PDDC)。Yu 等^[42]搭建了工业级玻璃脉冲萃取柱,探究脉冲强度与流速对分散相滞留时间与平均停留时间(mean residence time, MRT)分布的影响。结果表明在低脉冲强度下,分散相滞留量沿柱高基本稳定,在高脉冲强度下 PSPC 内滞留量显著上升;此外,不论水相还是有机相作为分散相, PDDC 的 MRT 都随脉冲强度增大而减小, PSPC 则相反(图 3)。

柱内结构材料通常选用低湿润强度以增强液滴的扩散效果,但多数萃取塔的湍流扩散效果足够强,柱内结构润湿强度较低反而不利于传质的增强。Liu 等^[43]提出一种由亲水的氧化铝陶瓷板和亲脂的特氟龙板叠加而成的复合润湿特性筛板,能实现液滴扩散过程强化与交替断裂-聚合流体动力学结构的协同效应,相对单一材料的筛板,在有机相连续和水相连续时,该结构的 Sauter 平均直径最大分别可减小 55.63% 与 43.42%,且分散相存留分数更高,轴向扩散更弱。

快堆乏燃料比放射性及释热率更高,更适合采用干法后处理技术进行处理,主要包括熔盐电解、高温冶金、氟化挥发 3 类工艺。Cai 等^[44]提出两段式金属热还原法:先在熔盐中用 Mg、Ni 将 UO_2^{2+} 还原为 UO_2 ,再以镁铝合金净化多次 UO_2 提取循环后富集的

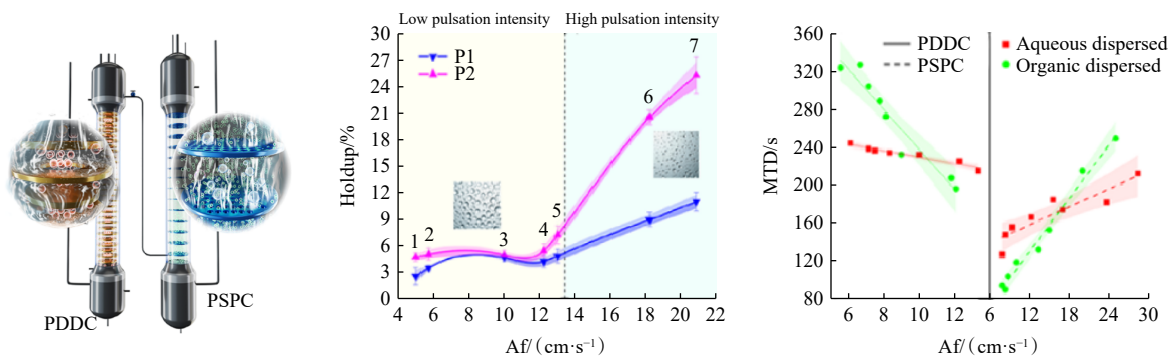


图3 PDDC与PSPC流型、持液率、MRT对比

杂质。该法提取速率显著优于恒电位电解, 4 h内 La^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Nd^{3+} 和 Ni^{2+} 提取效率均超 99%, Sm^{3+} 达 82.9%。

2025年9月4日, 美国 Curio Solutions 公司研发的 NuCycle 干法乏燃料循环工艺完成实验室示范: 在西北太平洋国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)实现 100 g 级高纯度 UF_6 制备; 在爱达荷国家实验室(Idaho National Laboratory, INL)获得全铜系元素熔盐电解数据; 在橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)测得该工艺核燃料回收率超 99.75%; 并计划在桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories, SNL)基于上述数据构建完整的核保障与安全模型^[45]。

5.2 放射性废物处理技术

放射性废物可划分为高水平放射性废物、中水平放射性废物、低水平放射性废物、极低水平放射性废物、豁免废物 5 种。

玻璃固化是高放废液处理中唯一工程化应用的技术。中国自主研发的两步法冷坩埚玻璃固化^[46], 先将高放废液经回转煅烧炉处理为氧化物颗粒, 再进入冷坩埚与玻璃料熔融固化。该过程易出现莱顿弗罗斯特效应(Leidenfrost effect), 导致煅烧物性能不达标, 因此需先对煅烧炉进行启动处理。贺诚等^[47]对比了 3 种启动介质在不同转速下的效果: 低温启动时, 启动效果为水>稀释的模拟高放废液>模拟高放废液; 高温启动时, 启动效果为模拟高放废液和蔗糖的混合溶液~稀释的模拟高放废液>水(图 4)。

对于中低放射性液态有机废物, 通常采用水泥固化法进行处理, 但该方法浸出率高、耐久性与耐热性不足。地质聚合物是一类无机铝硅酸盐材料, 有优异的机械强度, 以及耐酸、耐热性, 适合用于固定放射性

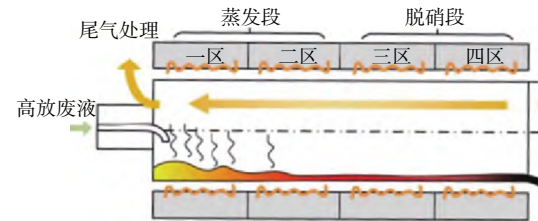


图4 回转煅烧炉示意

废物。Sears 等^[48]以高炉炉渣为基质, 在密封与曝气养护下, 加入表面活性剂及 Nevastane、Mugul 2 种废油制备固化体, 研究其直接固化此类废物的可行性。结果显示, 固化体油类浸出量低、固化效果好, 但废油与表面活性剂浓度升高会降低抗压强度、提高孔隙率, 需优化浓度以平衡包容能力与力学性能。Kim 等^[49]探究了磷酸盐地质聚合物(phosphate-based geopolymer, P-GP)作为固化放射性废离子交换树脂凝胶材料的可行性。结果表明, 当液固比为 0.7 时, P-GP 可实现质量分数 40% 的废树脂包容量, 其 7 d 抗压强度满足 3.45 MPa 标准, Co、Cs 等核素的浸出指数高于 6.0。

废树脂除了水泥固化外, 也常采用焚烧和热解进行处理。但传统热处理易产生腐蚀性气体并存在放射性核素泄漏风险, 而熔盐氧化法(molten salt oxidation, MSO)因能吸附酸性气体、拦截放射性离子成为潜在替代方案。Liu 等^[50]采用添加 KOH 的 Na_2CO_3 - K_2CO_3 体系对含 ^{65}Zn 及有机硫的阳离子交换树脂进行处理, 探究了 KOH 对 S 和 Zn^{2+} 固定的增强效果、 Zn^{2+} 的催化作用及有害气体的控制情况。结果表明, Zn^{2+} 可催化 S—C 键断裂, KOH 的加入能有效减少有害气体逸出, 促进硫化物和亚硫酸盐的硫化反应, 800℃时 SO_4^{2-} 含量达 26.51%, Zn 和 S 的保留率分别高达 99.56% 和 87.39%, 且温度高于 700℃时 Zn^{2+} 与 K^+ 、

SO_4^{2-} 结合形成稳定的 $\text{K}_2\text{Zn}_2(\text{SO}_4)_3$ 。

5.3 核废料管理标准

中国于 2025 年 8 月 29 日实施了《核科学技术术语第 8 部分:放射性废物管理》,涵盖了处理与固化过程、退役策略等全链条内容^[51]。2025 年 9 月 1 日实施的《核技术利用放射性废物库运行管理技术规范》,从废物接收准则、入库操作要求等方面进行了规定,与《选址、设计与建造技术规范》(HJ1258—2022)前后衔接,构建了废物库“从建设到运行”的全生命周期技术标准体系^[52]。

2025 年,IAEA 发布了《核或辐射应急产生大量废物的管理》(Management of Large Quantities of Radioactive Waste Arising from a Nuclear or Radiological Emergency),为各国应对重大事故后产生的大量放射性废物,提供一套从应急响应到长期恢复的实用指导^[53]。同年 3 月,IAEA 启动了首届“法规起草学校(School of Drafting Regulations on Radioactive Waste and Decommissioning Safety)”,帮助 12 个成员国完善关于放射性废物管理和核设施退役的国家法规;同年 12 月,IAEA 在维也纳组织召开“国际原子能机构一般安全要求(GSR)第 4 部分(Rev.1)文件修订会议(Revision meeting for IAEA General Safety Requirements(GSR) Part 4(Rev.1))”,制定各类核设施的安全评估一般性要求。

6 核能的综合利用

核电的发展不应限于单纯的“发电”,更应走多能协同与综合利用的道路。

6.1 核能与风、光、储的耦合

基于核电与储能存在调峰、调频的互补特性,田涛等^[54]提出一种能提升新能源承载力的核储协同的调度模型,该模型基于构建的输配协同调度框架(图 5),在提升新能源消纳水平和改善频率调节能力方面具有显著优势。

2022 年 11 月 9 日,中核集团“核蓄一体化”抽蓄项目开工。核电站频繁调峰时,反应堆频繁改变功率会引起燃料棒中心温度升高、包壳交变应力增大等问题,不利于核电机组的安全性和稳定性。为此吴青阳等^[55]提出了在不改变反应堆输出功率的情况下,将电

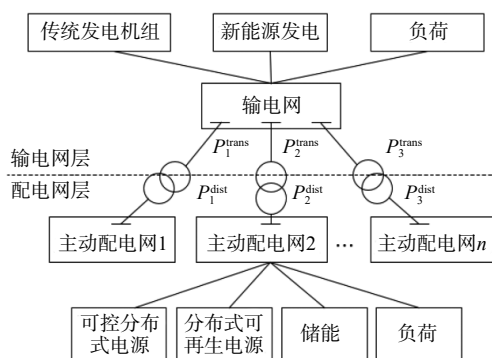


图 5 输配协同调度框架

力调峰的额外功率用于海水淡化的技术路线,在实现水电联产的同时优化功率控制策略,提升核电机组的运行灵活性。

梁朝家等^[56]提出一种核能与光热耦合发电系统,一方面该系统能利用光热,提升核电系统蒸汽发生器出口的蒸汽压力与温度,提高汽轮机的发电效率与发电量;另一方面,该系统在光照不足时可依靠核能维持正常稳定运行,减少储热装置的投资。Bartali 等^[57]探讨了将 SMR 与聚光太阳能(concentrated solar power, CSP)技术相结合,构建耦合系统的潜力,研究表明 SMR-CSP 混合系统不仅能提高能源效率和经济性,还能显著减少核燃料消耗、核废料产生及对土地的占用。

基于中国核电分布在沿海的现状,梁朝家等^[56]提出,可在核电站周边海域,构建光伏、风电、储能、核电“四位一体”的新型电力供应系统。此系统中核电机组承担基础负荷,风电、光伏与储能按照气候条件和电网调度进行灵活调整。类似地,梁继越等^[58]基于某 3 MW 的用电场景,通过建立风电、光伏、核电、储能的装置仿真模型,开展耦合小型核电源的微电网稳定性仿真分析,分析结果显示,在 $\pm 30\%$ 的负荷波动和核电因故障而退出供电的极端情况下,电压最大波动幅度为 10%,频率最大波动幅度为 0.51 Hz。

6.2 核能的其他应用

石油化工行业需要用汽进行工艺加热、分离提纯等关键操作,核能供汽具有环保、经济的优势,是工业用汽减排的可行方案。田湾核电站“和气一号”技术团队研发了 7 层管道保温设计,实现每千米温度损耗小于 1°C ,远超传统管道 $3\sim 5^\circ\text{C}$ 的损耗标准,截至 2025 年 6 月 1 日,已累计供应清洁工业蒸汽 300 万 t ^[59]。中核集团海南核电核能供汽项目^[60]于 2025 年 11 月正

式进入调试阶段。该项目依托海南核电 1、2 号机组,通过“核电机组—换热站—园区企业”3 级能源传输体系,最大供汽能力达每小时 50 t,预计减少约 30% 的蒸汽使用费。

在区域供热方面,中国开发的“燕龙泳池堆”专为城市供暖设计,单座反应堆可满足 2000 万 m² 建筑的供热需求,替代约 32 万 t 燃煤的年消耗量。

在海洋与海岛开发方面,中国在南海岛礁部署 SMR 的研究已进入工程论证阶段,旨在解决驻岛军民的用电、用水需求。美国公司 Oklo 与美国能源部合作,设计了可用于极地考察站的微型 1.5 MW 反应堆。

由于“碳达峰”目标期限已近在眼前,“煤改核”(coal-to-nuclear, C2N)概念应运而生。该技术旨在利用退役火电厂已有的电网与水资源条件,部署紧凑型反应堆。相较于新建核电厂,这一路径或能缩短建造周期。中国自主研发的高温气冷堆与 TMSR 反应堆,可产生比常规反应堆更高温度的蒸汽,能够高效驱动燃煤机组的汽轮机系统。

7 结论

本文概述了核能在 2025 年的综合进展,包括核电发展、裂变与聚变技术、数字化发展、放射性废物处理、核能综合利用等方面。未来核能将朝着小型化、先进化、智能化、可持续化、耦合化的方向发展,为人类社会的可持续发展奠定基础^[61]。全球核电正式进入规模化发展阶段,将逐步成为核心基础能源,IAEA 预计 2050 年装机容量将达 992 GW。核裂变技术在优化 3 代机型的基础上,加快向 4 代堆和 SMR 演进的步伐;核聚变的研究重点从单一的物理实验向反应堆工程化验证转移,但还需完成从科学验证到工程示范的跨越,聚变堆与氚增殖、耐辐照材料的集成应用将是研究的重点,最终形成裂变-聚变协同应用的格局。核能数字化成为提升安全与效率的核心,是核电产业技术突破的关键,数字孪生、AI 技术将与核能深度融合,嵌入核电站的全生命周期,从设计优化、运维辅助到退役拆解,更加深远地影响核能发展。闭式循环的应用离不开乏燃料处理技术的发展,放射性废物处理技术的发展,开始趋向于开发针对复杂废物的模块化、混合技术方案,以更好应对实际废物处理

的难题,为核能的大规模、可持续发展提供支撑。核能的综合利用道路也将不断拓宽,实现从“供电”向多能耦合的“枢纽”转变,充分发挥核能清洁、高密度的优势。

参考文献 (References)

- [1] 国外核安全观察哨| 第12期[EB/OL]. (2025-03-13) [2026-01-17]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqshmhsh/gwhaqgcs/202503/t20250313_1103961.html.
- [2] Zohuri B. Nuclear energy research and development roadmap [M]//Small Modular Reactors as Renewable Energy Sources. Cham: Springer International Publishing, 2018: 95-116.
- [3] Ludovic D. EPR2, back end of the future, cycle closure. The nuclear policy council speeds up[EB/OL]. (2025-03-19) [2026-01-17]. <https://sfeninenglish.org/epr2-fuel-cycle-nuclear-energy-france>.
- [4] 英国, 中国核能行业协会. 英国新核电项目的机遇与不可忽视的风险[EB/OL]. (2025-11-06) [2026-01-17]. <https://www.china-nea.cn/site/content/50391.html>.
- [5] 央视新闻. 日本最大核电站将重启[EB/OL]. (2025-12-22) [2026-01-17]. <https://news.cctv.com/2026/01/21/ARTIR2Jkl dvPP43IKdcdsDDu260121.shtml>.
- [6] 国家原子能机构. 印度计划2047年前建成1亿千瓦核电装机容量[EB/OL]. (2025-02-01) [2026-01-17]. <https://www.caea.gov.cn/n6760338/n6760343/c10649656/content.html>.
- [7] 全国党媒信息公共平台. 全球核能发电量持续增长[EB/OL]. (2025-08-06) [2026-01-17]. <https://www.peopleapp.com/rmharticle/30049895473>.
- [8] 《中国核能发展报告2025》蓝皮书4月27日发布 我国核电总体规模首次跃居世界第一[EB/OL]. (2025-04-28) [2026-01-17]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzz/202504/t20250430_1118672.html.
- [9] 国家核安全局. 全国核电运行情况(2025年1—6月)[EB/OL]. (2025-08-08) [2026-01-17]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzz/202508/t20250808_1125164.html.
- [10] 王丰, 邵琨. 我国首个配置冷却塔的“华龙一号”核电机组全面启动建设[EB/OL]. (2025-11-19) [2026-01-17]. <http://kpzg.people.com.cn/BIG5/n1/2025/1119/c404214-40606807.html>.
- [11] 英国宣布加速核能部署的改革方案[EB/OL]. (2025-02-11) [2026-01-17]. <https://www.china-nea.cn/site/content/48506.html>.

- [12] International Atomic Energy Agency. Status of international conventions on nuclear liability[R/OL]. Vienna: IAEA, 2024. [2026-03-23]. <https://www.iaea.org/topics/nuclear-liability-conventions>.
- [13] 房勇汉, 刘达, 李林蔚, 等. 第四代核能系统发展现状分析与对策建议[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(23): 19-20.
- [14] Generation Iv International Forum. GIF annual report 2024 [R]. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2025.
- [15] 陈广亮, 陶文铨, 蔡德昌, 等. 四代堆热工水力CFD应用的综合分析[J]. 核技术, 2025, 48(7): 29-52.
- [16] OECD/NEA. The NEA small modular reactor dashboard: Volume II[R/OL]. Paris: OECD Publishing, [2026-01-11]. <https://doi.org/10.1787/e586e483-en>.
- [17] 核与辐射安全中心. 全球小型模块化反应堆设计突破127种 [EB/OL]. (2025-07-30) [2026-03-23]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/gjzx/202507/t20250730_1124567.html.
- [18] American Nuclear Society. Industry Update—December 2025 [EB/OL]. (2025-12-01)[2026-03-23]. <https://www.ans.org/news/2025-12-01/article-7562/industry-updatedecember-2025/>.
- [19] 赵守智, 解家春, 吕征, 等. 空间堆技术发展分析与展望[J]. 原子能科学技术, 2025, 59(9): 2084-2111.
- [20] 杨漾. 法意联手研发月球核反应堆, 新一轮太空能源竞赛升级[EB/OL]. (2025-10-08) [2026-03-23]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_31736981.
- [21] 科技日报. 我国发布《中国小型模块堆通用用户要求文件》[EB/OL]. (2025-04-09). https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-04/09/content_321992.html.
- [22] ITER organization. Revised construction strategy for ITER project[EB/OL]. [2026-03-23]. <https://www.iter.org/scientists/iter-technical-reports>.
- [23] 中国聚变工程实验堆(CFETR)工程设计团队. CFETR工程设计总结报告[R]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2024.
- [24] U. S. Department of Energy. Validation report on high-temperature superconducting magnet technology of commonwealth fusion systems[R]. Washington D. C.: U. S. Department of Energy, 2025.
- [25] Commonwealth Fusion Systems, Massachusetts Institute Of Technology. SPARC high-temperature superconducting magnet test report[R]. Cambridge: Commonwealth Fusion Systems & Massachusetts Institute of Technology, 2025.
- [26] Lawrence Livermore National Laboratory. National ignition facility fusion energy gain experiment report (April 2025) [R]. Livermore: LLNL, 2025.
- [27] 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所. 全超导托卡马克EAST装置实现亿度千秒高约束模等离子体运行[EB/OL]. (2025-01-24) [2026-02-25]. https://www.ipp.cas.cn/bm/dlztzd/xwdt/202503/t20250326_508133.html.
- [28] 核工业西南物理研究院. 中国环流三号突破“双亿度”!中国聚变挺进燃烧实验[EB/OL]. (2025-02-25) [2026-03-23]. <https://mp.weixin.qq.com/s/7DhiD1WaCJejevI5YDqCug>.
- [29] Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service Of Russia. Revised Federal Law on the Use of Atomic Energy (Fusion Facilities Regulation)[S/OL]. Moscow: Rostekhnadzor, 2025[2026-03-23]. <http://en.gosnadzor.ru/>.
- [30] 生态环境部办公厅. 关于聚变装置辐射安全管理有关事项的通知: 环办辐射函〔2025〕128号[EB/OL]. (2025-04-02) [2026-03-23]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202504/t20250407_1106558.html.
- [31] Argonne National Laboratory. Digital Twin Enhance Nuclear Reactor Safety and Efficiency in 2025[EB/OL]. (2025-05-31) [2026-03-23]. <https://www.anl.gov/article/digital-twin-enhance-nuclear-reactor-safety-and-efficiency-in-2025>.
- [32] Yu H C. A digital twin-based system for full-lifecycle safety management and dynamic risk assessment in nuclear power plants[J]. Discover Artificial Intelligence, 2025, 5(1): 356.
- [33] Dalton D. Westinghouse and Google join forces on AI to speed up nuclear construction[EB/OL]. (2025-11-24) [2026-03-23]. <https://www.nucnet.org/news/westinghouse-and-google-join-forces-on-ai-to-speed-up-nuclear-construction-11-1-2025>.
- [34] IAEA. The use of Artificial Intelligence in the nuclear sector[EB/OL]. (2024-09-17)[2026-03-23]. <https://www.iaea.org/topics/artificial-intelligence>.
- [35] 国家核安全局. 国外核安全观察哨| 第26期 [EB/OL]. (2025-12-31) [2026-03-23]. <https://nnsa.mee.gov.cn/>.
- [36] 中国核能行业协会, 中核战略规划研究总院有限公司, 中智科学技术评价研究中心. 中国核能发展报告(2025)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2025.
- [37] Shifotoka M. IAEA hosts first international symposium on AI and nuclear energy[EB/OL]. (2025-12-03)[2026-03-

- 23]. <https://www.iaea.org/news/iaea-hosts-first-international-symposium-on-ai-and-nuclear-energy>.
- [38] Rohatgi U, Dyrda J, Soppera N. The international experimental thermal hydraulic systems database (TIETHYS): A new NEA validation tool[C]//International Conference on Nuclear Engineering American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51463: V004T15A022. 2018.
- [39] Brookhaven National Laboratory. ENSDF database (evaluated nuclear structure data file)[EB/OL]. (2026-02-01) [2026-03-23]. <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
- [40] World Nuclear Association. Overview of the World Nuclear Association Reactor Database[EB/OL]. (2025-09-25) [2026-03-23]. <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/reactor-database.aspx>.
- [41] Wu H C, Feng H, Zu T J, et al. Autonomous research on reactor core physical analysis technology and its application in commercial pressurized water reactors[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2025, 55(1): 66-76.
- [42] Yu X C, Yu T, Lu Z H, et al. Experimental investigation of hydrodynamic characteristics in industrial pulsed liquid-liquid extraction column[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, 64(47): 22746-22758.
- [43] Liu W Q, Chen H, Qian Y B, et al. Experimental and simulation investigation on the droplet size distribution in a pulsed extraction column with dual wettability internals[J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 316: 121934.
- [44] Cai Y X, Li M, Wei H D, et al. Two-step metallothermic reduction process for efficient recovery of UO_2^{2+} and purification of molten salt in spent fuel reprocessing[J]. *Separation and Purification Technology*, 2026, 384: 136362.
- [45] 伍浩松, 张焰. 美企完成NuCycle后处理工艺实验室规模示范[J]. *国外核新闻*, 2025(10): 25.
- [46] 刘丽君, 张生栋. 放射性废物冷坩埚玻璃固化技术发展分析[J]. *原子能科学技术*, 2015, 49(4): 589-596.
- [47] 贺诚, 张华, 张克乾, 等. 高放废液回转煅烧炉的启动方法[J]. *核化学与放射化学*, 2025, 47(2): 142-149.
- [48] Sears A, Galek V, Pražák P, et al. Direct immobilisation of radioactive liquid organic waste in a geopolymer matrix[J]. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, 2025, 11: 60.
- [49] Kim B, Shin Y, Park S, et al. Assessment of structural stability and leaching characteristics of phosphate-based geopolymer waste form containing radioactive spent ion exchange resins[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2025, 607: 155671.
- [50] Liu X, Yan Y D, Xue Y, et al. The oxidation of waste resins catalyzed by zinc and the efficient immobilization of sulfur in KOH assisted $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$ melt[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 363: 132110.
- [51] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 核科学技术术语 第8部分: 放射性废物管理: GB/T 4960.8—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [52] 生态环境部. 核技术利用放射性废物库运行管理技术规范: HJ 1417-2025[S]. 北京: 生态环境部, 2025.
- [53] IAEA. Management of large amounts of waste generated in a nuclear or radiological emergency[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2025. (IAEA-TECDOC-1826).
- [54] 田涛, 黄明, 常森伟, 等. 调峰-调频约束下核-储协调的新能源承载力提升调度方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(4): 171-181.
- [55] 吴青阳, 李根, 刘明, 等. 核能水电联产系统的变负荷动态特性与灵活运行控制策略优化研究[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(4): 582-591.
- [56] 梁朝家, 刘军. 基于核能和可再生能源耦合的清洁能源供能形式[J]. *中国科技信息*, 2025(16): 138-140.
- [57] Bartali R, De Bona E, Bolognese M, et al. Hybrid small modular nuclear reactor with concentrated solar power: Towards 4+reactors?[J]. *Solar*, 2025, 5(1): 12.
- [58] 梁继越, 张婷. 新能源微电网耦合小型核电源方案设计及稳定性研究[J]. *科技创新与应用*, 2025, 15(8): 141-145.
- [59] 中国核工业集团. 《人民日报》: “和气一号”核能供汽项目累计供汽突破300万吨[EB/OL]. (2025-06-04) [2026-03-23]. <http://cpc.people.com.cn/n1/2025/0604/c64387-40493524.html>.
- [60] 崔霞, 杨潇. 海南核电实现新突破!我国核能综合利用迈入工业供汽新阶段[EB/OL]. (2025-11-21) [2026-03-23]. <http://news.yunnan.cn/system/2025/11/21/033737924.shtml>.
- [61] 杨军, 孙培杰, 彭翠婷, 等. 世界核能科技发展前沿进展[J]. *科技导报*, 2024, 42(23): 7-30.

Global nuclear energy science and technology advances in 2025: A review

XU Lejin, LIU Qi, HU Mengyan, WENG Zhiguo, TAO Wenbin, FENG Wenzhuo, XIE Xiaoke, WANG Wenxuan, WU Xinyu, YANG Jun*

Department of Nuclear Engineering and Technology, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract In 2025, global nuclear energy technology is moving rapidly toward diversification, miniaturization, and intelligentization. The current status of nuclear power development and updated nuclear power policies in various countries are introduced. The construction and research progress of Generation IV reactors and small modular reactors are summarized. The construction progress and key breakthroughs of nuclear fusion technology are pointed out. The development status of digital twins, artificial intelligence and nuclear databases is reviewed, their respective shortcomings are analyzed, and future improvement directions are pointed out. The application and optimization of pulsed extraction columns in spent fuel reprocessing and the application of radioactive waste treatment methods are introduced. Moreover, the coupling of nuclear energy with wind, solar, thermal power and energy storage, and its comprehensive applications in other non-electric fields, are the future development direction.

Keywords nuclear energy technology; nuclear power; nuclear fission; nuclear fusion; digital twin for nuclear energy; radioactive waste; multi-energy coupling ●



(责任编辑 王志敏)