

2024年世界核电产业发展回顾（上）

2024年，全球核能发展延续了近年来的复苏态势，并呈现出加速复苏的新格局。2023年12月第28届联合国气候变化大会首次就发展核能的必要性达成共识后，2024年3月首届全球核能峰会进一步明确了核能在实现气候目标中的关键作用，并明确了推动核能发展所需的具体行动。国际原子能机构和国际能源署的预测报告显示，未来全球核电装机容量将实现显著增长。美国、俄罗斯、英国等主要核电国家已宣布雄心勃勃的发展目标。与此同时，越南、哈萨克斯坦、肯尼亚等新兴核电国家也相继公布了本国核电发展计划，标志着核能发展获得越来越多国家的认可。

2024年，全球共有7台新核电机组实现首次并网，总装机容量832万千瓦；9台新机组正式启动建设，总装机容量977万千瓦；4台机组永久关闭，总装机容量238万千瓦。截至2024年12月31日，全球共有31个核电国家，总计拥有440台在运核电机组，总装机容量约3.99亿千瓦。与2023年12月31日（437台，3.93亿千瓦）相比，在运机组和总装机容量均有小幅增加。

1 未来核电发展预测

国际原子能机构和国际能源署分别于9月和

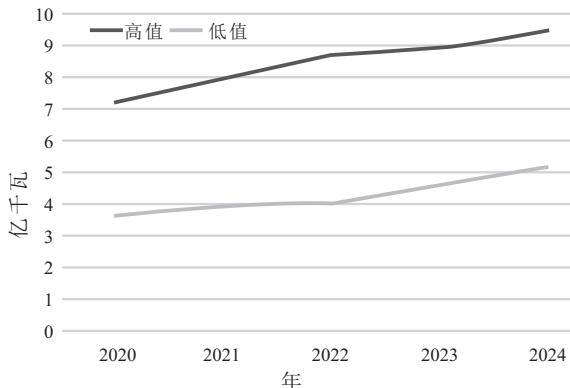


图1 国际原子能机构2050年
全球核电装机容量预测值

10月公布对全球未来能源市场的最新预测结果，并对核电未来发展持乐观态度。

1.1 国际原子能机构

国际原子能机构2024年版年度报告《直至2050年能源、电力和核电发展预测》，对全球核电未来发展作出低值和高值两种情景的预测，并连续第四年上调了未来核电发展预测值。对于2050年全球核电装机容量，2024年版报告的低值和高值预测结果分别为5.14亿千瓦和9.5亿千瓦，相对于2020年版报告预测值（3.6亿千瓦和7.2亿千瓦）分别增加43%和32%。

表1 国际原子能机构电力装机容量预测值（亿千瓦）

	2023年	2030年		2040年		2050年	
		低值	高值	低值	高值	低值	高值
总电力装机容量	89.92	100.42		137.47		203.29	
核电装机容量	3.72	4.14	4.61	4.91	6.94	5.14	9.50
核电份额	4.1%	4.1%	4.6%	3.6%	5.0%	2.5%	4.7%

表2 国际原子能机构发电量预测值（万亿千瓦时）

	2023年	2030年		2040年		2050年	
		低值	高值	低值	高值	低值	高值
总发电量	28.379	32.932		43.215		59.929	
核发电量	2.598	3.084	3.443	3.812	5.39	4.157	7.666
核电份额	9.2%	9.4%	10.5%	8.8%	12.5%	6.9%	12.8%

1.2 国际能源署

国际能源署10月发布年度报告《2024年全球能源展望》，介绍了直至2050年的三种全球能源发展情景：“现行政策”基于当前实施的能源政策和措施，“已宣布承诺”考虑了各国政府已公开承诺的能源和气候目标，“2050年净零排放情景”着眼于实现将全球平均温升限制在1.5°C以内需采取的行动。

在所有三种情景中，核电装机容量和发电量均呈上升趋势，尤其是在“2050年净零排放”情景中：2050年核电装机容量将在2023年

水平上增加144%，核发电量将增加152%。

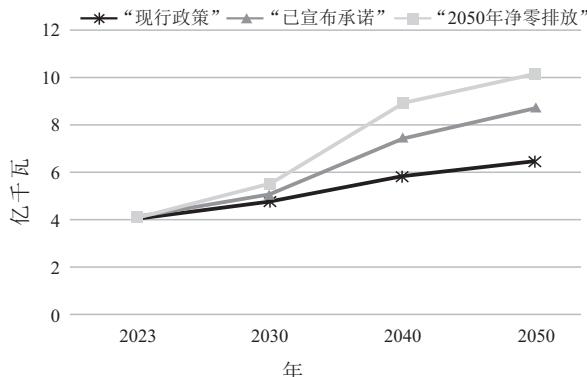


图2 国际能源署预测的
核电装机容量增长情景

表3 国际能源署核电装机容量预测值（亿千瓦）

情景	2023年		2030年		2040年		2050年	
	装机容量	份额*	装机容量	份额*	装机容量	份额*	装机容量	份额*
“现行政策”	4.16	4.4%	4.78	3%	5.86	2.3%	6.47	2.1%
“已宣布承诺”			5.08	3.0%	7.48	2.5%	8.74	2.3%
“2050年净零排放”			5.54	3.2%	8.96	2.8%	10.17	2.5%

*核电装机容量在全球电力装机容量中所占份额。

表4 国际能源署核发电量预测值（万亿千瓦时）

情景	2023年		2030年		2040年		2050年	
	发电量	份额*	发电量	份额*	发电量	份额*	发电量	份额*
“现行政策”	2.765	9.3%	3.266	8.7%	4.059	8.4%	4.46	7.6%
“已宣布承诺”			3.462	9.0%	5.156	9.4%	6.055	8.6%
“2050年净零排放”			3.887	9.8%	6.092	9.8%	6.969	8.7%

*核能发电量在全球总发电量中所占份额。

2 主要核电国家

2.1 美国

截至2024年12月31日，美国共有94台在运核电机组，总装机容量9695万千瓦。

2.1.1 政策

为推动本国核能发展并重塑全球核能竞争优势，美国政府于2024年采取了一系列战略性举措，通过立法保障、政策引导和出台具体举

措等多维度发力，系统破解核能发展瓶颈，包括颁布两部具有里程碑意义的法律，发布两份战略指导文件，以及组织召开国内核能部署峰会明确推动核能发展的具体措施。此外，美国在人工智能核能领域应用方面取得重要成果。

立法方面，7月生效的《加速部署多功能先进核能以促进清洁能源法》从巩固美国核能的全球领导地位、推动先进反应堆开发与部署、

保护现有核电厂、加强供应链建设以及提升核管会工作效率五个方面为核工业发展提供了强有力支撑。5月发布的《禁止进口俄罗斯铀法》明确规定，美国企业和机构不得从俄罗斯进口低浓铀，除非获得能源部特别豁免。这一举措不仅彰显了美国加速摆脱对俄罗斯核燃料依赖的决心，更为重塑本国核燃料供应链提供了政策保障。

战略规划方面，白宫于11月发布的《安全负责地发展美国核能：部署目标和行动框架》报告，系统勾勒了至2050年的核能发展蓝图。报告设定了三个阶段性目标：到2035年实现新增3500万千瓦的在建或投运装机规模，构建新型核能部署生态系统；到2040年形成年均部署1500万千瓦的建设能力，支撑美国及全球核能发展需求；到2050年新增2亿千瓦核电装机容量，实现核电总装机规模较现有水平增长三倍。这一规划为美国核能发展提供了清晰的路线图。

发展路径方面，能源部于9月发布了修订版《先进核能腾飞之路》报告。该报告在2024年3月发布的首版报告基础上，深入分析了美国先进核能产业的发展现状，并系统探讨了实现先进反应堆商业化应用的具体路径，为核能产业发展提供了重要指引。

具体举措方面，美国政府于5月在白宫召开了国内核能部署峰会，针对核电项目拖期、超概风险高以及先进反应堆首堆建设推进乏力等关键问题，宣布并随后组织实施了三项专门举措。一是成立核电项目管理和交付工作组：已于5月成立，汇集核电和大型项目建设领域的顶尖专家，帮助识别降低成本和避免进度拖延的机会。二是国防部推动军事基地先进反应堆建设：陆军和海军已分别发布建议征集书，向业

界征集在军事基地建设微堆的创新方案。三是发布先进反应堆降低成本评估工具：爱达荷国家实验室已推出专门工具，帮助项目开发商和利益相关方评估新项目的成本驱动因素，从而降低先进反应堆建设成本。

人工智能技术应用方面，美国取得多项进展。一是西屋公司宣布推出Hive生成式人工智能系统，能显著提升反应堆全生命周期效率，涵盖设计、取证、制造、建设、运营等阶段，有望大幅提升成本效益并加强时间进度管控。二是核管会开始评估微软Azure OpenAI人工智能模型的潜在应用，目标是借助生成式人工智能技术，高效处理和管理核管会积累的海量数据资源。三是蓝浪人工智能实验室三种机器学习工具已在两座核电厂完成约三年测试，结果令人兴奋：在这些工具帮助下，每台核电机组每年可减少超过100万美元运营费用。四是太平洋天然气和电力公司11月宣布，即将在代阿布洛峡谷核电厂部署原子峡谷公司开发的Neutron Enterprise人工智能系统。这将是生成式人工智能系统首次在美国核电厂实现商业部署。

2.1.2 国内核电发展

2.1.2.1 大型轻水堆

2024年，美国在大型轻水堆机组建设、延寿、关停后重启等方面均取得显著进展。

在新机组建设方面，沃格特勒核电厂4号机组（111.7万千瓦压水堆）3月首次并网发电，4月投入商运，成为美在新世纪启动建设并投运的第二台核电机组。沃格特勒是美2000年之后启动并持续实施的唯一商业核电建设项目，旨在建设两台西屋公司AP1000机组，即3号和4号机组。厂址准备工作于2009年启动，当时预计两台机组将分别于2016年和2017年投运，总造价估计值为140亿美元。项目已严重拖期超概，

总造价超过300亿美元。

在运机组延寿方面，核管会批准7台机组延寿：科曼奇峰核电厂2座120万千瓦压水堆获准首次延寿，可将运行寿期从40年延长至60年；北安娜核电厂2座94万千瓦压水堆获准二次延寿，可将运行寿期从60年延长至80年；蒙蒂塞洛核电厂1座62.8万千瓦沸水堆获准二次延寿；土耳其角核电厂2座80万千瓦压水堆的二次许可获准恢复。截至2024年底，美大部分在运机组均已获准延寿至60年，其中9台机组获准进一步延寿至80年；核管会正在对13台机组的二次延寿申请进行评审。此外，能源部宣布在民用核能信贷计划下与太平洋燃气电力公司签署总额11亿美元的贷款合同，用于支持代阿布洛峡谷核电厂持续运行。该核电厂拥有2座110万千瓦压水堆，现有运行许可证分别于2024年11月和2025年8月到期。该公司曾于2009年提交延寿申请，后于2018年撤回，原因是当时的市场环境恶劣。随着市场环境持续回暖，该公司2022年10月致函核管会，要求恢复对延寿申请的审批。核管会2024年3月批准这两台机组在许可证到期后继续运行，前提是2024年底前重新提交延寿申请。该公司2024年11月再次提交延寿申请，确保两台机组可以继续运行。

关停机组重启方面，2台机组重启工作取得进展。能源部批准为霍尔台克国际公司提供15.2亿美元贷款担保，支持2022年5月关停的帕利塞兹核电厂（80.5万千瓦压水堆）重启。预计帕利塞兹将于2025年成为美国首台在关停后重启的核电机组。在与微软公司签署20年供电协议后，联合能源公司宣布计划重启2019年关停的三里岛核电厂1号机组（81.9万千瓦压水堆）。

2.1.2.2 小堆

2024年，美国在推进模块化小堆商业化领

域取得显著进展，主要体现在技术创新应用、许可证审批、建设项目推进、监管框架优化、资助小型轻水堆商业化等方面。

创新应用方面，小堆技术在数据中心供电和远洋船舶动力领域的应用获得相关方高度重视和大力推动。微软、谷歌、亚马逊等高科技企业采用签署购电协议和直接投资方式，积极推进小堆为数据中心供电。同时，美国船级社与韩国船舶和海洋工程研究所达成战略合作，联合推进商业小堆动力船舶和浮动小堆发电平台研究。值得关注的是，美国船级社已发布全球首份核能海上平台综合性规则——《船舶和近海应用核动力系统要求》，为核能在海事领域的应用提供了重要的技术标准和规范指引。

许可证审批方面，核管会实现了三个“首次”：一是首次批准建设用于发电的四代堆。卡伊洛斯电力公司获得在田纳西州橡树岭建设用于发电的两座赫尔墨斯反应堆的许可。作为氟化盐冷却高温堆（KP-FHR）低功率示范版本，赫尔墨斯热功率为3.5万千瓦，使用三元结构各向同性（TRISO）燃料，并以锂铍氟化物作为冷却剂。该公司计划在橡树岭建设三座此类反应堆，其中首堆已于2024年12月获得许可证，主要用于供热；后续两座将用于发电（此次获准建设）。二是首次批准建设液体燃料先进反应堆。阿比林基督教大学获准在得克萨斯州阿比林市校区内建设熔盐研究堆（MSRR）。这是美时隔30多年再次批准建设大学研究堆，将为核能发展提供重要的基础研究和人才培养平台。三是首次受理非水冷商业反应堆建设许可证申请。泰拉能源公司已向核管会提交Natrium示范电厂建设申请。该电厂拥有两个功能模块，包括一个34.5万千瓦钠冷快堆模块和一个熔盐储能模块。借助储能系统，Natrium电厂

可实现灵活调峰，最高能以50万千瓦功率持续运行5.5小时。全面建成后，该厂将作为一座功能完备的商业核电厂运营。

建设项目推进方面，三个先进反应堆项目启动厂址准备工作，即将进入工程建设阶段。一是国防部“贝利”计划下的首座军用移动微堆厂房已在爱达荷国家实验室正式启动建设，预计2025年竣工，为2026年开展反应堆安装和试运行奠定基础。“贝利”首堆使用BWX技术公司高温气冷堆技术，采用高丰度低浓铀TRISO燃料，电功率为1000至5000千瓦。二是泰拉能源公司已在怀俄明州凯默勒启动Natrium示范电厂正式启动厂址准备工作。该示范电厂毗邻一座将于2025年永久关闭的燃煤电厂，并获得能源部“先进反应堆示范计划”资助。三是卡伊洛斯电力公司已在橡树岭东田纳西科技园启动用于示范供热的赫尔墨斯首堆厂址准备工作。

监管框架优化方面，核管会于10月发布《基于风险指引的、技术包容性先进反应堆监管框架》拟议规则和《新反应堆通用环境影响声明》草案，面向公众征求意见：前者将作为《联邦法规》第53部分于2027年底前正式颁布，成为首份专门为先进反应堆制定的综合监管框架；后者采用技术中立框架，通过设定电厂和厂址参数，简化了符合条件项目的环评流程，仅需补充评审特定情况，从而降低反应堆建设项目环评工作量，减轻申请者负担，并提升监管效率与透明度。

小堆轻水堆示范资助方面，能源部启动总投资9亿美元的先进小型轻水堆示范计划：清洁能源示范办公室提供8亿美元，主要面向企业联合体，拟支持最多两个示范项目；核能办公室提供1亿美元，重点解决小堆部署取证、供应链和场址等关键问题，促进项目落地。

2.1.2.3 核燃料循环

2024年，美国核燃料循环在两方面取得重要进展：一是加强本国供应链建设，摆脱对俄罗斯的依赖；二是推进耐事故燃料研发，提升在运核电机组的经济性和安全性。但是，美国在乏燃料管理设施建设方面遇到挫折。

供应链建设方面，美国已实施一系列重要举措。一是能源部已通过公开遴选程序，批准多家企业未来参与总额达34亿美元的核燃料循环产品供应竞标，目标是激励相关企业加快低浓铀和高丰度低浓铀产能建设。二是美唯一商业铀浓缩厂尤尼斯获准生产铀-235丰度达10%的浓缩铀。预计尤尼斯将于2025年开始高丰度低浓铀生产。三是尤尼斯已开始产能提升，目标是将产能从目前4600 tSWU/a提升至5300 tSWU/a，预计首批新级联将于2025年投运。四是全球激光铀浓缩公司计划在肯塔基州帕杜卡建设一座商业激光铀浓缩厂，已于2024年11月购置建设用地，计划于2025年提交建设许可证申请，力争在2030年前建成该厂。同时，该公司位于北卡罗来纳州威尔明顿的激光铀浓缩示范设施已获准装填六氟化铀。五是欧安诺公司已决定将橡树岭作为新建铀浓缩厂的首选厂址。

耐事故燃料研发方面，美国已取得多项重要进展。一是西屋公司获准将Encore耐事故燃料燃耗提升至超过现有燃耗限值（62 GWe/MTU）的水平。这是核管会首次给予此类批准，为将压水堆换料周期从目前的18个月延长至24个月奠定了坚实基础。二是西屋公司已完成供商业应用的首批铀-235丰度为8%的ADOPT耐事故燃料芯块的制造。预计首批含有此类芯块的先导组件将于2025年春季装入沃格特勒核电厂2号机组堆芯。该机组将成为美首座使用丰度超过

5%燃料的核电反应堆。三是沃格特勒核电厂2号机组完成法马通公司四个耐事故燃料先导组件第三个为期18个月的运行周期测试，标志着全球首批全尺寸耐事故燃料棒在商业压水堆中完成长达四年半的全寿期辐照测试。四是通用原子能公司在碳化硅耐事故燃料包壳技术研发方面取得两项重要进展：成功制造首批长达12英尺（3.66米）的全尺寸碳化硅复合物管，以及碳化硅包壳已在爱达荷国家实验室先进实验堆（ATR）成功完成长达120日的辐照测试。

乏燃料管理设施建设方面，美国第五巡回上诉法院3月作出裁决，撤销核管会为霍尔台克国际公司在新墨西哥州建设乏燃料中间贮存设施颁发的许可证，原因是根据联邦法律，核管会无权为私营放射性废物中间贮存设施发放许可证。该法院于2023年8月以同样理由裁决撤销中间贮存伙伴公司得克萨斯州类似项目的建设许可证，并于2024年3月驳回核管会的重审请求。

2.1.3 国际市场

2024年，美国政府在助力本国核工业企业开拓全球市场取得两项重要进展。一是能源部在波兰和加纳成功启动全球首批两个区域清洁能源培训中心，标志着美国国际核能市场开拓进入新阶段。这两个中心作为区域培训枢纽，将重点服务于考虑新建或扩建核反应堆的国家，旨在帮助相关国家加速推进民用核能项目的实施。二是美国务院宣布通过“凤凰计划”资助斯洛文尼亚推进小堆建设。“凤凰计划”由美国2022年11月在第27届联合国气候变化大会宣布启动，旨在帮助伙伴国家将现有煤电厂转型为小堆核电厂。美国于2023年9月宣布首批获得资助的国家，包括捷克、波兰和斯洛伐克。

2.1.3.1 大堆市场

西屋公司在乌克兰、波兰和保加利亚的

AP1000建设项目均取得显著进展，并与韩国现代工程建设公司签署合作开拓国际市场的战略合作协议。

乌克兰国家核电公司4月在赫梅利尼茨基举行5号机组建设项目启动仪式，并完成这台AP1000机组排水渠第一罐混凝土浇筑。该公司8月宣布已获得在切尔卡瑟州奇希林建设4台AP1000机组所需土地。2022年6月，该公司和西屋公司签署在乌建设9台AP1000机组的协议。赫梅利尼茨基将建设首批2台。

波兰气候与环境部4月批准波兰核电厂公司启动该国首座核电厂的地质勘查。这座核电厂将建设3台AP1000机组，位于波美拉尼亚省卢比亚托沃-科帕利诺。地质勘查工作于5月启动，由美国柏克德公司负责，勘查结果将为核电厂工程设计及厂址报告提供重要参考。

保加利亚科兹洛杜伊核电厂新建项目公司、西屋公司和韩国现代工程建设公司11月签署科兹洛杜伊2台AP1000机组建设项目工程服务合同。根据这份为期12个月的合同，项目团队将立即开展厂址规划、许可申请、审批程序以及运维方案制定等工作。首台机组计划于2035年投入商业运行。

此外，西屋公司与韩国现代工程建设公司已正式签署战略合作协议，双方将共同推进AP1000在瑞典和芬兰的市场推广。根据协议分工，西屋公司将主导反应堆设计与研发工作，而现代工程建设公司则负责工程实施与建设管理。这一合作将有助于充分发挥西屋公司技术优势与现代工程建设公司工程实力，有效弥补西屋公司核电工程建设能力不足。

2.1.3.2 小堆市场

在小堆领域，多家小堆开发商在欧洲和非洲市场开拓取得进展。

在欧洲市场，纽斯凯尔电力公司7.7万千瓦VOYGR压水堆、通用电气-日立核能公司30万千瓦小型沸水堆BWRX-300和Last能源公司2万千瓦压水堆，成功入选欧盟小堆产业联盟支持的首批小堆技术。罗马尼亚RoPower核能公司计划建设6座VOYGR反应堆，首堆计划于2029年投运。近20家欧盟企业已表示对BWRX-300的强烈兴趣。Last能源公司已与英国、波兰和罗马尼亚等国客户签署建设约80台机组的协议。此外，西屋公司已与英国社区核电公司签署协议，将合作在英格兰地区建设4座30万千瓦小型压水堆AP300，首堆将于本世纪30年代初投运。该电厂有望成为英国以私营筹资方式建设的首座小堆核电厂。

在非洲市场，NANO核能公司分别与卢旺达原子能委员会和多哥政府签署协议，将在两国建设微堆。NANO核能公司正在研发两种微堆：宙斯微堆采用全固体堆芯，通过热传导方式传递热量；奥丁微堆则采用铀-235丰度为20%的二氧化铀燃料，配备低压冷却剂设计。此外，Regnum技术集团与加纳核电公司签署协议，将合作在加纳建设纽斯凯尔电力公司VOYGR压水堆。

2.2 俄罗斯

截至2024年12月31日，俄罗斯共有36台在运核电机组，总装机容量2680千瓦；6台在建机组，总装机容量410万千瓦。

2024年，俄罗斯在核能发展领域取得显著进展，尤其是在推进闭式燃料循环方面。政府发布了发展规划草案，旨在推动核电建设，提升核电份额。此外，俄启动一台机组建设，关停一台在运机组，推出三种升级版浮动式核电厂设计，成功获得首份小堆出口订单，在新型燃料测试和生产方面取得重要进展，并宣布将建设一座乏燃料后处理厂。

发展规划方面，俄政府8月公布《2042年前电力设施总体规划草案》，面向各方征求意见。根据该草案，俄到2042年将建成37台核电机组，总装机容量2800万千瓦。2042年，俄核电装机规模将增至4584.1万千瓦，占全国总电力装机容量的15.9%（目前为11.9%）。

核电建设方面，列宁格勒二期核电厂3号机组3月完成第一罐混凝土浇筑，标志着这台VVER-1200机组正式启动建设。

在运机组关停方面，库尔斯克核电厂2号机组1月永久关闭。这是一台RBMK-1000机组，1979年投运。

浮动核电厂方面，俄罗斯国家原子能集团3月在索契市举办的2024年俄罗斯国际核工业展览会上，面向国内外市场推出三种升级型浮动核电厂设计，包括PEP-100、PEP-106和PEP-180。面向国内市场推出10.6万千瓦PEP-106和18万千瓦PEP-180，设计寿期均为40年；面向国外市场推出10万千瓦PEP-100，设计寿期60年。俄计划在国内建设4座升级型浮动核电厂，为附近港口和矿业项目供电，首座PEP-106船体由中国惠生重工建造，计划2027年投运。此外，俄原集团宣布，此次核工展期间获得约15个浮动核电厂订单，并与TSS集团签署成立合资公司的协议，开拓升级型浮动核电厂海外市场。同时，该公司还计划在俄滨海边疆区建立浮动核电厂维护和升级中心。

核电出口方面，俄罗斯原子能建设出口公司与乌兹别克斯坦核电厂建设总局5月签署合同，拟在乌兹别克斯坦吉扎克地区建设6座5.5万千瓦小型压水堆RITM-200N。这是俄有史以来第一份小堆出口合同。

先进燃料测试与生产方面，俄罗斯取得五
(转下页)

美国热管堆研发进展及未来发展

热管堆是一种利用热管将堆芯产生的热量高效传导至二回路系统或热电转换装置的核反应堆。美国在上世纪60年代率先提出这一概念，旨在满足空间探索对高可靠性、无人值守能源的需求。得益于其独特的优势，热管堆研究在美国得到了持续关注和发展。本文将对美国热管堆的研究现状、进展及存在问题进行梳理和分析。

1 概述

热管堆由固态堆芯、热管和热电转换装置等主要部分组成。与传统的带冷却剂回路的反应堆不同，热管堆采用热管作为导热元件，以非能动方式导出堆芯热量，无需泵驱动，也不依赖流体系统，因此被归类为固态反应堆。热管堆通常运行温度较高（超过

（接上页）

项进展。一是再生混合物（REMIX）先导燃料组件已在巴拉科沃核电厂1号机组开始接受第三个也是最后一个为期18个月的运行周期辐照，预计将于2026年从堆芯卸载。REMIX燃料是俄罗斯为轻水堆开发的新型核燃料，由回收铀钚混合物（即通过乏燃料后处理获得的铀钚混合物）和浓缩铀（铀-235丰度最高为17%）制成。二是核反应堆研究所已利用研究堆，启动对新型VVER燃料的四年期辐照测试。该新型燃料具有两大创新：铀-235丰度为约5%，高于传统燃料3%~4.95%；二是使用铒作为中子吸收剂，取代了传统的钆。三是位于谢韦尔斯克的致密铀钚氮化物燃料（MNUP）生产设施已成功启动试运行。该设施将成为俄“突破”计划下

600摄氏度），且运行压力为常压。

热管堆具有以下突出特点：一是无冷却剂回路，采用多热管（数十至数百根）独立分散式传热，单根热管破损对系统运行影响极小，固有安全性高；二是采用非能动自主传输热，无需泵阀等能动部件，设备失效概率大幅降低，高静音、高可靠；三是系统构成简单，运行操控极为简便，易实现无人化。

受热管堆运行原理和高运行温度的影响，热管堆面临一定的技术瓶颈和固有限制。例如，热管堆堆芯功率密度与热管传热性能密切相关，但由于耐高温燃料材料和热管传热能力的限制，其功率密度相对较低。在大功率应用场景下，堆芯尺寸较大，因此热管堆更适用于小功率应用场景。此外，固态反应堆的堆芯结构紧凑，对堆芯元件的研

首座建成投运的设施。四是完成TRISO燃料第一阶段极限测试。结果表明，TRISO防护涂层能够有效包封裂变气体，即使在比反应堆正常运行温度高约500℃的条件下接受长时间辐照，仍能保持稳定。五是切佩茨克机械厂建成一条带铬涂层的锆合金耐事故燃料包壳中试生产线，并生产出首批产品。

核燃料循环后段，俄原集团9月宣布计划建设一座年处理能力至少为400吨重金属的乏燃料后处理厂。该厂概念设计已经完成，将于2025年选定厂址，2025—2026年完成投资论证并选定设计方案，将于2037—2038年投运。

（未完待续）

（中核战略规划研究总院 伍浩松 王兴春）