

引用格式: 郭娟娟, 韩绍阳, 石安琪, 等. 美国小型和微型反应堆技术发展情况综述 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 44-50. GUO Juanjuan, HAN Shaoyang, SHI Anqi, et al. Overview of the development of small and micro reactor technology in the united states [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 44-50. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-085.

美国小型和微型反应堆技术发展情况综述

郭娟娟[✉], 韩绍阳, 石安琪, 勉博雅, 童朴, 何昉

(中核战略规划研究总院有限公司, 北京 100048)

摘要: [目的] 小堆、微堆 (简称“小微堆”) 具有固有安全性强、体积小、重量轻、运行数年不换料等特点, 在民用和国防领域具有不可替代的作用, 成为国际核能行业近 20 年的研究热点。美国持续推进小微堆研发部署, 技术先进性和研发进展都走在国际前列, 分析美国促进小微堆发展的主要做法, 梳理最新技术进展, 将对我国小微堆发展带来启发作用。[方法] 通过文献调研、专家咨询等方法梳理了小微堆的应用场景, 分析了美国支持小微堆发展的主要做法, 归纳了美国多种小微堆技术研发的最新进展。[结果] 小微堆的应用场景主要包括为偏远地区供电、海水淡化、供热供汽、海洋动力、空间探索等。美国通过立法为小微堆发展提供坚实法律保障, 美能源部通过 GAIN 计划等一系列措施为民用小微堆商业化提供全方位支持, 美国防部通过“贝利”计划支持微堆研发和建设。美国研发进展较快的小微堆主要包括 NuScale 小堆、eVinci 微堆、Aurora 微堆、Pele 微堆和 BANR 小堆、Xe-100 小堆等。其中, Pele 微堆的原型堆已经在 2024 年 9 月开建, 有望成为美国首座投运的四代堆。[结论] 美国小微堆的发展对我国有以下启示: 一是坚持国家主导, 通过顶层设计加速小微堆技术发展; 二是实现企业与高水平科研机构的合作, 建立先进的产学研科技创新体系; 三是积极落实用户需求, 加强国际合作。

关键词: 核能; 小堆; 微堆; 应用场景; 技术动态

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-085

文章编号: 2095-8676(2025)04-0044-07

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-085

中图分类号: TL4; TL41



论文二维码

Overview of the Development of Small and Micro Reactor Technology in the United States

GUO Juanjuan[✉], HAN Shaoyang, SHI Anqi, MIAN Boya, TONG Pu, HE Fang

(China Institute of Nuclear Industry Strategy, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] Small and micro reactors (hereinafter referred to as "SMRs") are characterized by their inherent strong safety, compact size, lightweight, and the capability to operate without refueling for several years. They play an irreplaceable role in both civil and defense sectors and have become a research hotspot in the international nuclear energy industry for nearly two decades. The United States has continuously advanced the research and deployment of SMRs, with its technological sophistication and research progress leading the international pack. The paper aims to analyze the promoting practices and development of the United States SMRs, providing the inspiration for the development of SMRs in China. [Method] Through literature research and expert consultation methods, the application scenarios of SMRs were outlined, the primary approaches adopted by the United States to support the development of SMRs were analyzed, and the the latest progress of SMR technologies in the United States were summarized. [Result] The application scenarios of SMRs mainly include power supply for remote areas, seawater desalination, heat and steam supply, marine propulsion, and space exploration. The United States mainly provides solid legal protection for the development of SMRs through legislation. The Department of Energy (DoE) provides comprehensive support for the commercialization of civil SMRs through a series of measures such as the GAIN program. The Department of Defense (DoD) supports the research and development of micro-reactors through the "Project Pele". The latest progress of various SMR technologies in the United States mainly includes NuScale, eVinci, Aurora, Pele, BANR, and Xe-100.

收稿日期: 2025-03-25 修回日期: 2025-04-12

基金项目: 中国核工业集团有限公司“青年英才”科研项目“基于 MBSE 的核燃料闭式循环经济分析模型研究”(C-JZ-YC-2022-A-GLS2-001-B)

Moreover, the prototype of the Pele reactor has commenced construction in September 2024 and is poised to become the first fourth-generation reactor to be commissioned in the United States. [Conclusion] The development of SMRs in the United States has the following implications for China: firstly, adhere to state leadership and accelerate the development of SMR technologies through top-level design; secondly, achieve cooperation between enterprises and high-level research institutions to establish an advanced industry-academia-research scientific and technological innovation system; and thirdly, actively address user needs and strengthen international cooperation.

Key words: nuclear energy; small reactor; micro reactor; application scenarios; technical updates

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

根据国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)、经济合作与发展组织核能机构(Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, OECD/NEA)定义^[1],小堆为电功率不超过300 MW的反应堆,其中功率小于或等于10 MW的小堆被称为微堆,具有固有安全性强、体积小、重量轻、运行数年不换料等特点。小堆、微堆属于战略性、前沿性、颠覆性技术,对引领军事能源革命、增强国家科技创新和先进制造能力、提升国家战略科技竞争力具有重要作用^[2]。美国正在加速推进小微堆研发部署^[3],持续加大支持力度,争夺核能领域科技制高点,努力推动小微堆领域的国际合作,在基础科研、应用研究、资本支持、市场引领等方面处于世界领先水平。

1 小微堆应用场景

小微堆作为核能领域的新兴技术,在能源供应、工业生产、城市供暖、军事等领域具有广泛的应用前景^[4-5]。

在能源供应方面,小微堆能够为偏远地区、岛屿、海洋资源开发、替代火电产能和极地开发等提供稳定的电源。例如,海上浮动核电站可以利用小型反应堆为海洋平台、偏远海岛供电、供热、供汽,提供海水淡化服务,支持海洋开发活动。退役燃煤电厂适合建设小型反应堆,实现小堆替代火电产能作用。装载小堆的核动力破冰船相比柴油动力破冰船,续航能力强,无需在极地地区补充燃料,可充分保证科研考察时间。移动微堆还可作为应急电源,在突发事件中为关键设施持续供电^[6]。

在核能多用途利用方面^[7],小微堆也发挥着重要

作用。石化行业是能源消耗和碳排放的大户,推动小型反应堆与石化行业耦合发展,为其提供清洁的热能和电力,有助于减少碳排放。此外,小型反应堆还可用于核能制氢等新兴产业,为氢能经济的发展提供支撑^[8]。小型反应堆在城市供暖方面也展现出巨大的潜力,热电联产可以满足城市供暖需求,减少对传统燃煤锅炉的依赖,降低能源消耗和碳排放。

在军事领域,小微堆同样具有广阔的应用前景。小堆可以作为军舰和潜艇等军事装备的动力源,提供持久、稳定的电力供应,支持舰船的长时间航行和作战任务。微堆可以作为无人机、导弹等军事装备的动力推进,为其提供高效、可靠的能源支持,增强装备的作战能力和生存能力。微堆还可为军事基地提供不间断的能源电力保障,车载移动微堆可伴随部队移动,为移动作战平台的高能武器提供充足电力保障。

随着技术的不断发展,微堆还可能在未来应用于深海、太空等极端环境探索、月球基地能源建设等领域,为人类探索未知世界引领能源革新^[9-10]。

2 美国支持小微堆的主要做法

2.1 美国通过立法为小微堆发展提供坚实法律保障

立法先行是美国一贯做法。为加快促进核能技术创新,特朗普第一次执政时期,分别于2018年9月和2019年1月签署了《核能创新能力法案》和《核能创新和现代化法案》^[11],为促进小微堆技术发展提供了法律依据和制度保障;前者着重于优化核能技术创新体制机制、加强基础研究设施的建设和资源共享、提供资金支持以及推动公私合作模式的发展,后者聚焦于美国核管理委员会对先进核能技术监管框架的改进与优化,以简化审批流程。在全球气候变化和清洁能源转型背景下,美国前总统拜登签署

《加速部署多功能先进核能以促进清洁能源法案》^[12]，并于 2024 年 7 月 9 日正式生效；该法案旨在加速先进核能技术的研发、测试和商业化，特别是小堆和其他创新核能技术。这些系列法案的颁布为小微堆获得技术进步、项目审批和资金支持提供了坚实的法律保障。

2.2 美能源部长期为民用小微堆商业化提供全方位支持

为帮助小微堆企业使用美国国家实验室的基础设施和专家资源，美能源部于 2016 年启动“加速核创新门户(GAIN)”计划^[13-14]；自计划实施以来，已经有 30 多家公司获得 GAIN 凭证，并实现了与橡树岭国家实验室(ORNL)、阿贡国家实验室(ANL)、桑迪亚国家实验室(SNL)、爱达荷国家实验室(INL)、太平洋西北国家实验室(PNNL)等多个国家实验室的合作，有力加速了小微堆在基础研究方面的技术创新。为促进小微堆应用研究，美能源部于 2019 年 8 月建立了国家反应堆创新中心(NRIC)，以充分利用能源部国家实验室的世界级能力，为私营技术创新企业提供从试验、验证到示范的全方位支持，推动先进核能技术研发。NRIC 的建立实现了与 GAIN 计划的对接，且依托 NRIC 美能源部于 2020 年 5 月启动“先进反应堆示范计划(ARDP)”，以促进美国核能企业先进核反应堆技术研发和示范工作，加速技术商业应用进程。美能源部也持续为小微堆发展提

供资金支持，仅 2024 年就为三代堆和小微堆技术开发提供了 9 亿美元资金^[15]。

2.3 美国防领域通过“贝利”计划支持微堆研发和建设

为应对能源安全挑战、提升作战能力，美国防部于 2019 年 1 月启动“贝利”计划(Pele)，致力于开发可移动新型微堆，为偏远军事基地、前沿作战基地提供稳定的电力供应，以支持美军方完成各种任务^[16]。“贝利”计划启动后，美国防部于 2020 年 3 月向西屋电气公司、BWXT 公司及 X-energy 公司发出邀约，并于 2022 年 6 月选定 BWXT 公司制造交付可移动微堆原型堆(Pele 微堆)，且授予了 3 亿美元研发合同。2024 年 9 月，Pele 微堆已在爱达荷国家实验室开工建设，是美国建设的首座军用移动微堆，计划最早于 2026 年投运。此外，美国空军将要在阿拉斯加州内陆的艾尔森基地部署一座固定式微堆，于 2023 年 8 月选定奥克洛(Oklo)公司的 Aurora 微堆技术，并与该公司签署为期 30 年的购电协议，建成后将为偏远军事基地供电和供暖，最快将于 2027 年投运。

3 美国小微堆技术发展动态

通过强有力的政策支持，近几年美国涌现出了 30 多种小微堆概念方案及 10 多家初创公司，研发进展较快的主要有 NuScale、eVinci、Aurora、Pele 及 BANR、Xe-100、Hermes 等，主要发展情况列于表 1。

表 1 美国主要小微堆技术进展情况

Tab. 1 Development of small and micro reactor technology in the United States

反应堆名称	研发公司	堆型	功率	研发进展
Nuscale	NuScale Power	压水堆	77 MW	2023年1月获得美国核管会认证，成为美国首个获得认证的小型模块化反应堆。2023年年底，NuScale Power公司计划为犹他州联合市政电力公司(UAMPS)打造的零碳电力项目(CFPP)中止。
eVinci	西屋电气	热管堆	5 MW	2024年9月向NRIC提交了初步安全设计报告，成为首个由NRIC支持的达到这一里程碑的微堆。
Aurora	Oklo(Oklo)	液态金属冷却快堆	15 MW	2019年获得了美能源部签发的厂址使用许可，获准在爱达荷国家实验室建设并运行Aurora原型堆。2024年11月，厂址许可和环境许可工作持续往前推进。
Pele			5 MW	2024年9月，在美国爱达荷国家实验室开建，是美国建设的首个军用移动微堆。
BANR	BWXT	高温气冷堆	50 MW	2024年12月，BWXT与印度化工巨头塔塔化学北美子公司——塔塔化学纯碱合作伙伴公司(TCSAP)签署意向书，计划在美国怀俄明州绿河纯碱厂部署8台BANR小堆，用于发电和工业生产。
Xe-100	X-energy	高温气冷堆	75 MW	2025年3月，Xe-100小堆所用的TRISO燃料取得新突破，该燃料成功通过了模拟太空极端环境的严格测试。
Hermes	凯罗斯电力(Kairos Power)	熔盐堆	35 MW	2024年7月，Hermes已经在田纳西州橡树岭正式开工建设。

3.1 NuScale 小堆

NuScale 模块化小堆(图 1^[17])由美国 NuScale Power 公司积极推进研发, 基于成熟的压水堆技术, 采用模块化设计^[18], 设备系统在工厂预制, 运输至现场实现模块化组装; 设计理念先进, 运行过程不依赖动力水泵或循环设备, 在发生事故时可以无限期关闭并自行冷却。最初设计时, 每个模块热功率为 160 MW, 电功率 50 MW, 随后电功率升级为 77 MW, 换料周期 21 个月, 设计能力因子大于 95%。

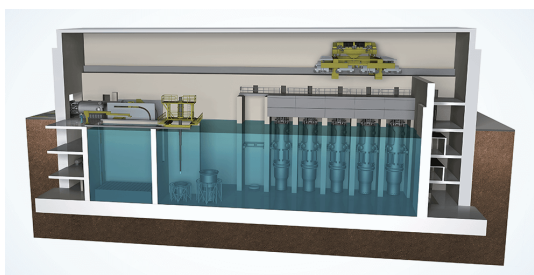


图 1 Nuscale 堆示意图^[17]

Fig. 1 Nuscale reactor schematic diagram^[17]

在美能源部的资金支持下, NuScale Power 公司积极拓展研发团队, 开展技术验证, 推动 NuScale 商业化, 并于 2023 年 1 月获得美国核管会认证, 成为美国首个获得认证的小型模块化反应堆。获得认证后, Nuscale Power 公司原本要为美市政电力公司(Utah Associated Municipal Power Systems, UAMPS)在爱达荷国家实验室的一处场地上部署 12 个模块化的 SMR, 打造零碳电力项目(CFPP), 拜登政府为此投入了超过 10 亿美元的资金。2023 年年底, 由于通货膨胀压力导致成本飙升, 犹他州的共用事业单位取消了购电合同, 因未能找到足够多的买家来承购发电量, NuScale Power 公司和犹他州联合市政电力公司(UAMPS)宣布 CFPP 项目终止。

3.2 eVinci 微堆

eVinci 微堆(图 2^[19])由美国西屋电气公司研发设计, 在美国 NRIC 支持下研发进展和商业化进程取得快速发展^[20]。eVinci 微堆是液态金属钠传热的热管式反应堆, 热功率 15 MW, 电功率 5 MW, 换料周期超过 8 年, 包括反应堆模块、发电模块和控制模块共 3 个模块。该反应堆灵活小巧, 直径小于 3 m, 在工厂制造后可装载至卡车上运送至偏远地区供电, 实现快速现场部署。西屋电气在 NRIC 倡议的大力支持下, 加快推进 eVinci 微堆研发设计, 是美国首个

完成爱达荷国家实验室测试计划工程研究的微堆, 并在 2024 年 9 月向 NRIC 提交了初步安全设计报告, 成为首个由 NRIC 支持的达到这一里程碑的微堆开发商。

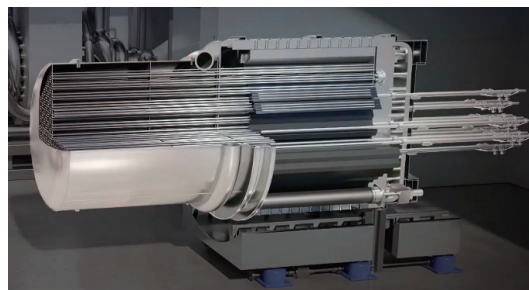


图 2 eVinci 微堆示意图^[19]

Fig. 2 eVinci reactor schematic diagram^[19]

西屋电气也积极向国外推广 eVinci 微堆, 通过国际合作加速商业化进程。2020 年西屋电气与加拿大核电运营商布鲁斯电力达成协议, 共同研究在加拿大部署 eVinci 的可行性, 并于 2023 年 7 月向加拿大核安全委员会(CNSC)提交了 eVinci 微堆预许可设计审查申请的首批文件。此外, 西屋电气公司已在 2024 年 11 月和英国 Core Power 公司签署协议, 双方将共同设计并开发一座浮动核电厂; 该电厂将采用 eVinci 微堆设计, 建成后可为岛屿、港口、沿海社区或工业企业供电、供热^[21]。

3.3 Aurora 微堆

Aurora 微堆由美国 Oklo 公司研发设计, 属于液态金属冷却快堆^[22], 由热管将堆芯热量输送至超临界二氧化碳能量转换系统发电, 单机最大电功率为 15 MW。Oklo 在 2019 年获得了美能源部签发的厂址使用许可, 获准在爱达荷国家实验室建设并运行 Aurora 原型堆。Oklo 计划在 2030 年前部署首座 Aurora 商用堆, 并将同厂址配套建设一座液态金属冷却快堆燃料制造设施。为实现该目标, Oklo 持续推进 Aurora 反应堆项目, 燃料制造设施的概念设计安全报告于 2024 年 9 月获得美能源部批准。此外, 美能源部和爱达荷国家实验室在 2024 年 11 月完成了一项关键合规程序, 标志着 Aurora 反应堆项目获得厂址许可和环境许可工作往前推进一步, 接下来 Oklo 公司将进行厂址特征评估^[23]。

3.4 Pele 微堆和 BANR 小堆

Pele 微堆(图 3^[24])和 BANR 小堆均由美国 BWXT 公司研发设计, 其中 Pele 微堆已经开建^[25], 是美国建

设的首个军用移动微堆。BWXT 公司是美国海军舰载反应堆、高压容器的主要供应商,也是美国国防部“贝利”计划支持的可移动式微堆开发商。该公司主要研发 2 种型号反应堆,包括电功率为 1~5 MW 的 Pele 项目可移动微堆,以及热功率为 50 MW 的 BWXT 先进堆(BANR),2 种反应堆均为采用 3 层各向同性包覆颗粒(TRISO)燃料的高温气冷堆。

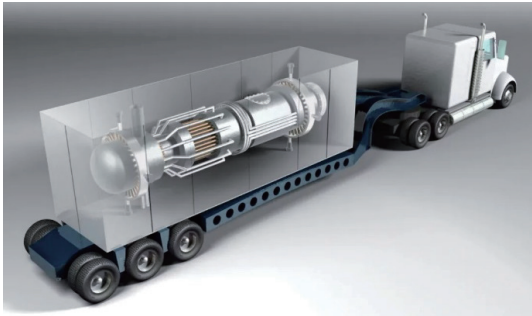


图 3 Pele 微堆组装示意图^[24]

Fig. 3 Pele reactor assembly diagram^[24]

Pele 微堆的原型堆已于 2024 年 9 月在爱达荷国家实验室开工,由 BWXT Advanced Technologies 公司制造,有望在 2026 年投运,成为美国首座投产的四代堆。

BWXT 也在积极推广 BANR 小堆,在 2024 年 12 月与印度化工巨头塔塔化学北美子公司——塔塔化学纯碱合作伙伴公司(TCSAP)签署意向书,计划在美国怀俄明州绿河纯碱厂部署 8 台 BANR 小堆,用于发电和工业生产。根据意向书,两家公司将在 2030 年代早期开始部署 BANR,并尽早确定商业条款和技术参数,以便最终签订能源采购协议。

3.5 Xe-100 小堆

Xe-100 小堆(图 4^[26])由 X-energy 公司研发设计,采用高温气冷堆技术,氦气为冷却剂,采用 TRISO 燃料石墨小球,全堆芯装载 22 万个石墨球。冷却剂出口温度在 750 °C 左右,设计压力 7 MPa。反应堆设计热功率 200 MW,电功率 75 MW,设计寿命 60 年,可实现在线换料,燃料为 160 GWd/tHM。可根据需要对电源模块进行组合,满足不同电功率需求,典型模式为 4 个电源模块组合为 300 MW 的电厂。X-energy 公司也在美能源部 ARDP 计划支持范围内,获得了高达 12 亿美元的联邦资金支持,以推动先进反应堆的开发、认证、建造及示范工作。

2025 年 3 月, Xe-100 小堆所用的 TRISO 燃料取

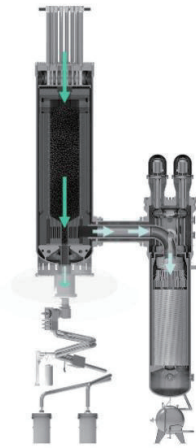


图 4 Xe-100 小堆示意图^[26]

Fig. 4 Xe-100 SMR schematic diagram^[26]

得新突破,该燃料成功通过了模拟太空极端环境的严格测试,为其在核热推进领域的应用奠定了坚实基础。X-energy 也在持续推进 Xe-100 小堆的商业化,2024 年 4 月,与加拿大阿尔伯塔省企业签署协议,将合作评估建设 Xe-100 的可行性,且 Xe-100 获得了英国政府 334 万英镑资助,将和英国卡文迪什核能公司共同推进 Xe-100 小堆在英国的部署^[27]。

3.6 Hermes 小堆

Hermes 小堆是由美国凯罗斯电力公司(Kairos Power)研发的氟盐冷却高温堆,属于第四代反应堆中的熔盐堆^[28]。Hermes 是氟化盐冷却高温反应堆 KP-HFR 的非发电实验装置,主要用于示范核能经济产热的能力,单堆热功率 35 MW,采用 TRISO 燃料,氟盐冷却剂是一种化学性质稳定的低压熔融氟化盐混合物,沸点为 1430 °C。在美国能源部、橡树岭国家实验室、爱达荷国家实验室、美国电力研究院等机构的大力支持下,Hermes 研发取得重大进展。2023 年 12 月,Hermes 获得核安全管理局(NRC)批准建造许可,成为美国 50 多年来首个获准建造的非水冷第四代反应堆。2024 年 7 月,Hermes 已经在田纳西州橡树岭正式开工建设,总投资约 3 亿美元。该反应堆采用模块化建造技术,堆芯在新墨西哥州阿尔伯克基的工厂制造后运输到橡树岭安装。该反应堆计划于 2027 年投入运行。

4 结论

本文详细分析了美国政府为支持小微堆发展而发布的一系列法律和配套支持计划,并重点介绍了

目前发展较快的反应堆设计方案。从美国小微堆的支持政策和技术发展历程中,可以得出以下3点启示:

1) 坚持国家主导,通过顶层设计加速小微堆技术发展。美国自2018年先后发布《核能创新能力法案》《核能创新和现代化法案》《加速部署多功能先进核能以促进清洁能源法案》等法案,提出加速先进核能技术发展的目标,并通过简化小微堆项目审批流程、优化技术创新体制机制等措施,为加速小微堆技术研发、项目建设和实现商业化,提供了坚实的法律和制度保障。在顶层法律支持下,美能源部、国防部分别牵头发起GAIN计划、NRIC倡议、ARDP计划和“贝利”计划等,各计划各有侧重、互为补充、相互衔接,为小微堆企业提供基础科研、应用研究、项目示范和资金保障等全方位支持。目前我国小微堆发展亟待国家主导,制定发展规划、法规标准等顶层设计文件。建议我国政府有关部门联合相关涉核企业,国家主导、制定出台有利于小微堆等先进核能技术发展的顶层发展规划、法规标准体系,统筹企业、高校、社会资本等各方资源,共同推动小微堆发展。

2) 实现企业与高水平科研机构的合作,建立先进的产学研科技创新体系。自2016年实施GAIN计划以来,美能源部持续推动小微堆企业主体与国家实验室在基础研发方面的合作,帮助企业主体获得先进基础实验设施和高水平专家等资源。随后,能源部又先后发起NRIC、ARDP等计划,有效促进了企业主体与国家实验室在应用研究和项目示范方面的合作。建议我国涉核企业主体联合高校、科研院所等机构,建立先进的产学研用科技创新体系,利用科研机构先进的科研平台及专家力量,高效协同开展技术创新,避免多头推进、重复投入,推动技术从基础研发向试验验证、示范应用跨越发展。

3) 积极落实用户需求,加强国际合作。明确的用户需求是推进小微堆项目示范和实现商业化的重要驱动。军用领域,BWXT公司积极争取到了美国国防部“贝利”计划的支持,促使Pele微堆成为美国建设的首个军用移动微堆。民用领域,小微堆企业积极开展国际合作,西屋电气与加拿大、英国签署用户协议,BWXT与在美印度公司签署协议,共同探索在国内外部署小微堆的可能性。通过开展国际合作,小微堆研发企业有效拓展了用户需求,为加速实现

商业化提供了基础。目前我国小微堆发展处于企业主体自主研发、立足国内阶段,与国外用户对接较少。建议我国涉核企业主体能够积极与国内、国外相关方对接,落实用户需求,扩大国际朋友圈,通过小微堆技术合作、项目推广等方式,加速推动核电“走出去”步伐。

参考文献:

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Small and medium sized reactors: status and prospects [R]. Vienna: IAEA, 2021.
- [2] 陈仁宗,王冠. 先进小型反应堆技术现状及未来发展趋势研究[J]. 科技视界, 2018(3): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2457.2018.03.005.
CHEN R Z, WANG G. Current status and development tendency of advanced small reactors [J]. Science & technology vision, 2018(3): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2457.2018.03.005.
- [3] 刘冬,梁田,宋辉,等. 美国先进核能技术发展动态分析与启示[J]. 科技导报, 2022, 40(23): 106-114.
LIU D, LIANG T, SONG H, et al. Analysis of American advanced nuclear energy development and its enlightenment [J]. Science & technology review, 2022, 40(23): 106-114.
- [4] 刘云. 小型反应堆产品在国际市场的探析[J]. 产业创新研究, 2021(15): 62-63, 66.
LIU Y. Analysis of small reactor products in the international market [J]. Industrial innovation, 2021(15): 62-63, 66.
- [5] 刘冲,黄勇. 先进小型核反应堆发展前景及其所面临的问题[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2018, 19(4): 10-14. DOI: 10.13967/j.cnki.nhxb.2018.0069.
LIU C, HUANG Y. The development prospect and problems of advanced small nuclear reactor [J]. Journal of University of South China (social science edition), 2018, 19(4): 10-14. DOI: 10.13967/j.cnki.nhxb.2018.0069.
- [6] 李琳. 全球小型模块化反应堆进展情况研究[J]. 核安全, 2024, 23(4): 64-68. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2024.04.007.
LI L. Progress status research for global small module reactor [J]. Nuclear safety, 2024, 23(4): 64-68. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2024.04.007.
- [7] 白宇. 核能多元利用再添新路径[N]. 中国电力报, 2024-06-24(002).
BAI Y. Diversified utilization of nuclear energy adds new paths [N]. China Electric Power News, 2024-06-24(002).
- [8] 田铮,张萌,蔡一鸣,等. 推进我国核能制氢产业化发展的思考与建议[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第八卷). 西安:中国核学会, 2023: 226-232. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.103871.
TIAN Z, ZHANG M, CAI Y M, et al. Thoughts and Suggestions on Promoting the Industrialization of Nuclear Hydrogen Production in China [C]//Chinese Nuclear Society (CNS). Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol. 8).

- Xi'an: CNS, 2023: 226-232. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2023.103871](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2023.103871).
- [9] 王洁.核能或将在未来能源格局中扮演重要角色 [N]. 中国信息化周报, 2024-10-28 (004).
WANG J. Nuclear energy may play an important role in the future energy landscape [N]. China Information Weekly, 2024-10-28 (004).
- [10] 戴定.美国公布微堆许可策略白皮书草案 [J]. 国外核新闻, 2021, (11): 30-31.
DAI D. The United States releases draft white paper on micro reactor licensing strategy [J]. Foreign nuclear news, 2021, (11): 30-31.
- [11] 张焰, 伍浩松. 美通过三份核能相关法案 [J]. 国外核新闻, 2018(3): 6.
ZHANG Y, WU H S. Three nuclear related bills passed by the United States [J]. Foreign nuclear news, 2018(3): 6.
- [12] 伍浩松. 美总统拜登签署《加速先进核能法案》 [J]. 国外核新闻, 2024(9): 23-25.
WU H S. US President Biden signs the Accelerated Advanced Nuclear Energy Act [J]. Foreign nuclear news, 2024(9): 23-25.
- [13] KIM Y I, WOO T H. The role of small modular reactors (SMRs) in achieving Net-Zero emissions by an approach to climate actions [J]. *Nuclear engineering and technology*, 2025, 57 (11): 103774. DOI: [10.1016/j.net.2025.103774](https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103774).
- [14] RAMANA M V, AHMAD A. Wishful thinking and real problems: small modular reactors, planning constraints, and nuclear power in Jordan [J]. *Energy policy*, 2016, 57(11): 236-245. DOI: [10.1016/j.enpol.2016.03.012](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.012).
- [15] 中国能源研究会核能专业委员会. 美国能源部划拨 9 亿美元支持下一代反应堆开发 [EB/OL]. (2024-10-22) [2025-04-12]. <https://www.cers-nepc.org.cn/articles/202410/20241022092750.html>.
China Energy Research Society Nuclear Energy Professional Committee. The United States Department of Energy allocates \$900 million to support the development of next-generation reactors [EB/OL]. (2024-10-22) [2025-04-12]. <https://www.cers-nepc.org.cn/articles/202410/20241022092750.html>.
- [16] Nuclear Engineering International. Automatic welding tested at Dukovany [EB/OL]. (2024-09-26) [2025-04-12]. <https://www.neimagazine.com/news/>.
- [17] Nuscale. 77 MWe SMR Design approved [EB/OL]. (2025-05-29) [2025-06-30]. <https://www.nuscalepower.com>.
- [18] NuScale Power. NuScale small modular reactor (SMR) overview [R]. Portland, OR: NuScale, 2025.
- [19] Westinghouse. The world's most advanced SMR [EB/OL]. (2023-05-04) [2025-06-30]. <https://westinghousenuclear.com>.
- [20] Westinghouse Electric Company. eVinci™ microreactor [R]. Pittsburgh, PA: Westinghouse, 2024.
- [21] 王兴春, 伍浩松. 西屋完成微堆 eVinci 初步安全设计报告 [J]. 国外核新闻, 2024(10): 10.
WANG X C, WU H S. Westinghouse completes preliminary safety design report for micro reactor eVinci [J]. Foreign nuclear news, 2024(10): 10.
- [22] Oklo, Inc. Aurora microreactor: a liquid metal-cooled fast reactor for clean energy [R]. Menlo Park, CA: Oklo, 2024.
- [23] 王兴春, 伍浩松. 美小堆开发商奥克洛在首堆建设和市场开拓等领域取得重要进展 [J]. 国外核新闻, 2024(12): 5.
WANG X C, WU H S. Oklo, the developer of the US small reactor, has made significant progress in the fields of first reactor construction and market development [J]. Foreign nuclear news, 2024(12): 5.
- [24] 国家核安全局. 美国 X-energy 公司将开发第二个微堆设计 [EB/OL]. (2023-09-20) [2025-06-30]. <https://x-energy.com/reactors/xs-100>.
National Nuclear Safety Administration. The American company X-energy will develop a second microreactor design [EB/OL]. (2023-09-20) [2025-06-30]. <https://x-energy.com/reactors/xs-100>.
- [25] 伍浩松, 杨鹏. 美启动首座军用移动微堆建设 [J]. 国外核新闻, 2024(10): 9.
WU H S, YANG P. The United States launches the construction of its first military mobile micro reactor [J]. Foreign nuclear news, 2024(10): 9.
- [26] X-energy. Xe-100: the most advanced small modular reactor [R]. Gaithersburg, MD: X-energy, 2025.
- [27] 伍浩松, 张焰. 美小型高温堆 Xe-100 商业化取得两项进展 [J]. 国外核新闻, 2024(5): 11.
WU H S, ZHANG Y. Two advances have been made in the commercialization of the Xe-100 small high-temperature reactor in the United States [J]. Foreign nuclear news, 2024(5): 11.
- [28] World Nuclear News. Work begins on first US Gen IV reactor [R/OL]. (2024-07-30) [2025-04-12]. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Work-begins-on-first-US-Gen-IV-reactor>.

作者简介:



郭娟娟

郭娟娟 (第一作者, 通信作者)
1992-, 女, 高级工程师, 主要从事核能与核燃料循环战略规划研究、经济运行研究 (e-mail) guojj12@163.com。

(编辑 叶筠英)