

美国核能发展的自我救赎

尽管美国核电发展在 1990 年后基本陷入停滞，但对于这个拥有全球最大核电装机量的国家而言，核能仍是清洁能源的关键来源。新的驱动因素正在涌现，有望为该行业注入生机，使其重获新生。



佐治亚州的阿尔文·W·沃格特勒发电厂现已是美国最大的核电设施（来源:佐治亚电力）

自 1920 年以来，美国核能发电已从实验物理学演变为国家电网的主要组成部分。重大的技术突破和监管变革引发了现代核能复兴。根据美国能源信息署的数据，预计到 2026 年，核电仍将保持占全国发电量 18% 的稳定份额，与 2025 年水平相当——尽管美国电力总消费量已创下历史新高。因此，核能发电仍是低碳能源结构的主要组成部分。

然而，由于高昂的建设成本、漫长的项目周期以及廉价天然气的竞争，美国核能扩张在 1990 年后陷入停滞。1979 年三哩岛事故后，更严格的监管、公众反对以及电力需求放缓导致大量项

目被取消，此后的数十年内没有新的订单。

2026年初，联邦政策转向与大规模私企投资相结合，迅速加速核能的工业化部署。为实现大幅提升美国核电能力的目标，拜登和特朗普政府均实施了多项具有里程碑意义的立法和监管改革。拜登政府的《加速部署多功能先进核能以实现清洁能源法案》（2024年ADVANCE法案）在两党支持下获得通过。该法案要求美国核监管委员会（NRC）采取多项行动，特别是在新型反应堆与新燃料的许可领域，同时保持NRC核心的安全与安保使命。该法案对NRC活动带来广泛影响，包括支持NRC员工的招聘与留任、增加NRC预算编制过程的灵活性、完善先进反应堆和聚变技术的监管框架等，并要求采取措施支持NRC对许可证申请进行高效、及时且可预测的审查。此外，根据该法规部分条款，将从2026财年起降低先进反应堆申请者的监管费用，并将实施“奖励”机制以激励和开发新技术。

早在2023年，NRC便开始着手制定一项全新的、涵盖多种技术的许可框架。与旧有法规不同，该项新方案基于业绩，允许工程技术人员通过数据来证明安全性，而非遵循那些僵化且已沿用数十年的设计规定。

美国能源部（DOE）还制定了一项快速通道试点计划，据此特定先进反应堆可跳过部分传统的NRC许可步骤进行初始测试，最早可于2026年7月4日在非联邦场址达到“临界状态”。

2025年9月，NRC向国会提交报告，回应《ADVANCE法案》中规定的事项。该法案要求NRC采取措施或制定法规，以实现“对棕地和/或退役化石燃料场地内的生产和利用设施进行

高效、及时且可预测的许可审查并支持对这些设施的监督”。新法规旨在简化在退役煤炭或化石燃料场址建设核电厂的环境审查流程，目标是利用现有的电网连接以避免数年的建设时间。

2025年5月23日，特朗普政府签署四项行政令，旨在通过加快许可、改革NRC以及增加燃料供应等措施，实现到2050年将美国核电能力翻两番至400吉瓦的目标。这些行政令侧重于加速反应堆部署，尤其是为人工智能基础设施服务，以及增强国家安全。

- 《核监管委员会改革令》（第14300号行政令）：指示NRC实现文化现代化、简化许可流程并减少官僚作风，以加快反应堆设计的审批，目标是在18个月内完成新许可证评估。
- 《能源部核反应堆测试改革令》（第14301号行政令）：制定DOE测试反应堆试点计划，以加快在DOE和国家实验室场址反应堆的审查、批准和部署。
- 《重振核工业基础令》（第14302号行政令）：重点加强国内核燃料循环，增加铀转化/浓缩产能，推动核领域人才队伍建设。
- 《为国家安全部署先进核反应堆技术令》（第14299号行政令）：指示美国国防部在国内军事基地运行反应堆，增加核技术出口，并依据《国家环境政策法》制定针对联邦场址反应堆建设的类别排除条款。

核能新驱动力

减少碳排放是现代核电技术发展的主要驱动力。核能是一种可靠的基荷低碳能源，能够提供全天候电力并替代化石燃料，从

而助力实现“净零”目标。

人工智能数据中心的能源需求是推动开发新型核技术的另一重要因素。国际能源署（IEA）预测，到 2026 年全球数据中心电力消耗将达到 620-1050 太瓦时（TWh），导致全球约 2.9-4.9 亿吨的碳排放量。为支持人工智能，美国已有 4000 多座数据中心在运行，另有近 3000 座在规划或建设中。最集中的区域位于弗吉尼亚州、德克萨斯州和加利福尼亚州。主要枢纽包括北弗吉尼亚（被称为“数据中心巷”）、达拉斯、硅谷以及俄亥俄州、亚利桑那州和俄勒冈州的新兴地区。

忧思科学家联盟的一份报告指出：“如果没有更强有力的清洁能源政策，用于为数据中心供电的额外化石燃料发电，将导致到 2035 年美国发电厂二氧化碳年排放量增加 19%-29%，即 2.29 亿-3.42 亿吨。”那么核能的环境效益又如何呢？2026 年，核能对数据中心的环境影响正日益通过其相较于天然气所提供的“碳减排量”来衡量。核能可作为其主要替代选择，持续输送不间断电力。

DOE 已将核能列为美国最大的清洁电力来源。其每年发电近 775 TWh，生产了全国近一半的无排放电力。每年 4.71 亿吨的碳减排量，相当于停驶 1 亿辆汽车。

塑造行业的技术和项目

美国是世界上最大的核电生产国。2024 年其国内核发电量占全国总量的 19%。美国目前在 28 个州有 54 座商运核电厂，共有 94 台核反应堆。伊利诺伊州有 11 台核电机组，为各州之最。

尽管困难重重，由多家公用事业公司组成的联合体成功完成

了美国最新核反应堆的投运。历经 15 年，排除了在设计、监管和财务等方面的障碍后，位于佐治亚州的阿尔文·W·沃格特勒核电厂的沃格特勒 4 号机组于 2024 年 4 月开始商业运行。

两台新反应堆场址的建设始于 2009 年。该项目最初预计耗资 140 亿美元，沃格特勒 3 号和 4 号机组计划分别于 2016 年和 2017 年开始商运。然而，项目遭遇严重的施工延误和成本超支。佐治亚电力公司估计该项目总成本已超过 300 亿美元。沃格特勒 3 号和 4 号机组是美国首批也是唯一部署的 AP1000 第三代+反应堆。

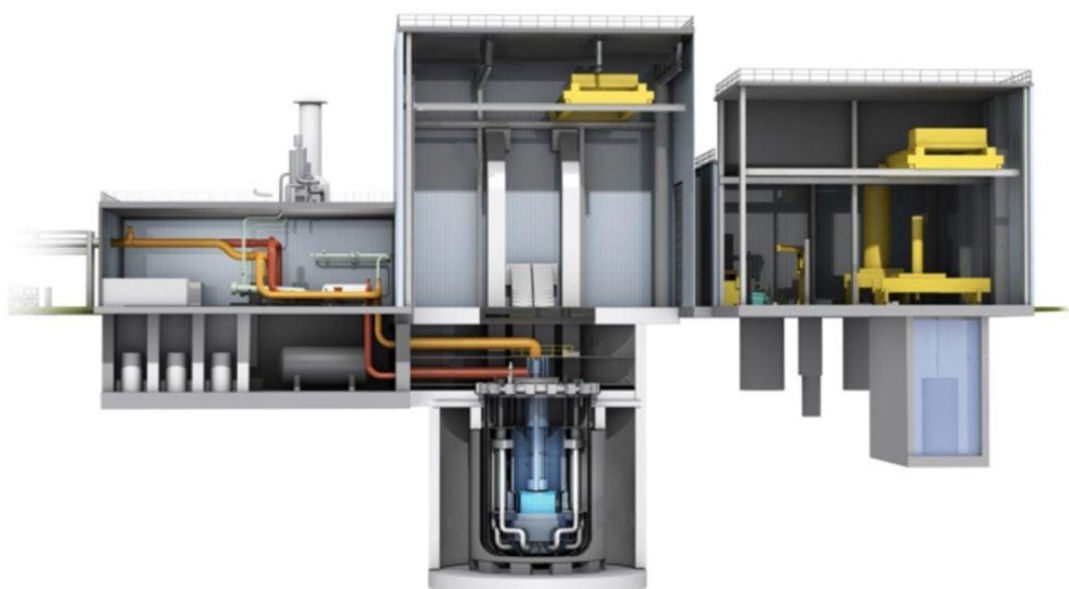
阿尔文·W·沃格特勒现已成为美国最大的核电厂，共有 4 台机组。纽约州的 R.E.吉纳核电厂则是最小的核设施，仅有 1 台机组。最小的单机反应堆是明尼苏达州普雷里岛核电厂的两台机组。

最新进展情况

比尔·盖茨的泰拉能源公司（TerraPower）计划在怀俄明州凯默勒镇这个“煤炭之乡”的中心地带发展核电。该公司正在推进一个历时 15 年的项目，设计并建造一座名为 **Natrium** 的新一代钠冷快堆核电厂，并有望最早于 2030 年投入商运。该电厂装机容量为 345 兆瓦，配备泰拉能源公司的熔盐储能系统，可提供吉瓦级的内置储能。公司表示，该电厂能够完美支持高可再生能源并网的电网，尤其是在电力输出波动较大的情况下。

作为价值 40 亿美元的项目——其中 20 亿美元将由 DOE 的先进反应堆示范计划（ARDP）提供——**Natrium** 将具备在短时间内提升至 500 兆瓦的能力。该反应堆将使用高丰度低浓缩铀（HALEU）燃料。

2026年1月9日，TerraPower和Meta公司宣布签署协议，将在美国开发8座Natrium反应堆及储能系统电厂。这被公认为Meta在先进核技术领域的最大投资，该公司预期将获得高达2.8吉瓦的无碳基荷能源以及最高可达4吉瓦的峰值电力。根据商业协议，Meta将提供资金支持Natrium反应堆电厂的部署，首批机组最早将于2032年交付。



TerraPower在怀俄明州的Natrium钠冷快堆项目已动工（来源：美国核学会ANS）

虽然TerraPower的技术开发意义重大，但美国能源部已选定田纳西河谷管理局（TVA）和Holtec政府服务公司，各获得高达4亿美元的成本分摊资金，用于先进小型模块化反应堆（SMR）的早期部署。

TVA将在其克林奇河场址建造通用电气Vernova-日立BWRX-300反应堆。联邦资金还将协助TVA与印第安纳密歇根电力公司以及Element1公司合作部署其他SMR的计划。Holtec公司将在密歇根州的帕利塞兹电厂建造其SMR-300机组，目标

是在 2030 年代初投运。

与此同时，旨在替代柴油发电机的 1 兆瓦便携式微型反应堆也在开发中。辐射核能公司宣布计划于 2026 年夏季在爱达荷国家实验室的 DOME 设施测试名为 Kaleidos 的 1 兆瓦便携式气冷核微型反应堆。这种拖车大小的装置面向军事基地和远程关键应用，首批客户部署计划于 2028 年开始。

除美国外，截至 2025 年年中，全球已确定有超过 127 种小型模块化反应堆设计处于不同开发阶段，超过 30 个国家正在积极探索其部署。虽然许多设计仍处于概念阶段，但有七种设计已在中国和俄罗斯等国家运行或在建。

未来？艰难的权衡之道

美国核能的未来正处于关键时刻，要在无碳基荷电力的迫切需求与显著的经济和物流阻力间取得平衡。尽管对 SMR 和先进下一代技术的兴趣复苏，为更快速、更安全和更灵活的部署开辟了途径，但该行业若要成功，还必须克服高昂资本成本、供应链瓶颈以及监管层面的重重挑战。

为实现雄心勃勃的净零碳排放目标，为目前已运行及规划中的数千座 AI 数据中心提供电力，并确保电网可靠性，需要公共及私营部门的持续投入，以推动实现核工业基础现代化并赢得公众信任。最终，核能有望继续作为美国能源组合的基石之一，但其长期可行性则取决于新的创新设计能否成功且按预算推出。

附：美国核能发展里程碑（自 1942 年以来）

- 芝加哥一号堆（1942 年）：在恩里科·费米的领导下，芝加哥大学的科学家们实现了首次自持、可控的核链式反应，证明了核能的基本原理。
- 《原子能法》（1946 年）：该项联邦立法建立了原子能委员会（AEC），将原子能的控制权从军方转移到民间，为和平利用核能奠定了基础。
- 实验性增殖反应堆一号（1951 年）：位于爱达荷州的 EBR-I 成为首座从核裂变中产生可用电力的反应堆，从最初为 4 只灯泡供电到最终为其整座建筑供电。
- “原子用于和平”计划（1953 年）：德怀特·D·艾森豪威尔总统的提议将核研究重新定向于民用发电，推动了商用反应堆设计发展。
- 希平港核电厂（1957 年）：该电厂在宾夕法尼亚州投运，是美国首座专门用于和平时期的电力生产的全规模核电厂。
- 《能源重组法》（1974 年）：该项联邦法规取消了原子能委员会并创建了核监管委员会（NRC），将核安全监管与核能推广职能分离。
- 三哩岛事故（1979 年）：该座位于宾夕法尼亚州的核电厂部分熔毁成为美国商业核历史上最严重的事故，导致了应急响应和安全法规的全面变革。
- 《能源政策法》（2005 年）：该项联邦法规提供了重大的联邦激励措施，包括生产税收抵免和贷款担保，旨在推动美国的“核能复兴”。

- 沃格特勒 3 号和 4 号机组（2023-2024 年）：位于佐治亚州两台机组的建成标志着美国 30 多年来首次从零开始建造新反应堆，代表了第三代+ AP1000 技术的首次部署。最初预算为 140 亿美元，电厂最终成本约达 368 亿美元，耗时 15 年建成。这些成本通过更高的电费转嫁给了佐治亚州的电力用户。
- 重启退役反应堆（2025-2026 年）：作为 2025 至 2026 年美国核工业历史性转变的一部分，主要科技公司和公用事业公司宣布了重新开放退役核电厂的计划，如三哩岛 1 号机组（已更名为克兰清洁能源中心）和密歇根州的帕利塞兹电厂，以满足数据中心巨大的能源需求。

对外交流合作部张鸥 供稿

摘自国际核工程官网

文章内容不代表本公众号观点