

全球核聚变产业加速崛起：从实验室到商业化的关键跨越

叶勇健

美国核聚变产业协会（FIA）的报告《2025 年全球核聚变产业报告》指出，核聚变，这一曾被视为“遥远梦想”的能源技术正式进入产业化冲刺阶段。过去五年，全球核聚变领域从 23 家企业、19 亿美元投资，飙升至 53 家企业、97 亿美元总融资的规模，仅 2024 年就新增 26 亿美元投资。这份连续五年的追踪报告清晰地展示：核聚变已从科学实验转向工程实践，从政府主导的科研项目演变为全球资本追捧的新兴产业。当三分之二的行业参与者预测首座聚变电厂将在 2031-2040 年间并网发电，人类距离“清洁无限能源”的愿景从未如此之近。

一、资本浪潮：从小众探索到主流赛道

全球核聚变产业的资金增长曲线堪称惊艳。报告数据显示，行业总投资在五年内实现近五倍增长，即便在全球科技投资整体遇冷的周期中仍逆势上扬。这种增长不仅体现为数字的攀升，更反映在投资者结构的多元化——从早期的深度科技 VC，扩展到工业巨头、主权基金和能源企业等更广泛的资本阵营。雪佛龙、西门子能源等传统工业企业的入局，意味着核聚变已被视为能源转型的核心选项而非遥远概念。

投资地理分布呈现多极化趋势。美国企业依然领跑融资规模，Helion Energy、TAE Technologies 等头部公司接连完成大额融资，其中 Helion 与微软签订的 2028 年供电协议成为行业里程碑。欧洲则通过 ITER 项目保持技术影响力，英国牛津周边已形成全球领先的核聚变产业集群。亚洲市场加速追赶，日本推出《核聚变能创新战略》，韩国聚变能研究所（KFE）持续突破，而中国市场呈现“国家队+民企”的独特投资格局——中国聚变能源有限公司获得 114.92 亿元增资，民营诺瓦聚变完成 5 亿元天使轮融资，创下国内单笔纪录。

资本注入正推动产业阶段跃迁。报告指出，全球核聚变企业已从原型研发阶段，普遍进入工程化和制造挑战攻坚期。53 家企业支撑起近 1.8 万人的直接就业，带动 9300 个供应链岗位，若计入规划中的试验工厂人力需求，就业规模将突破 1.8 万。这种就业增长不仅体现在数量上，更反映在专业多样性上——从等

离子体物理学家到制造业工程师，从材料科学家到能源市场专家，核聚变正形成完整的人才生态系统。

二、技术突围：多元路径的全球竞合

核聚变商业化的核心战场在于技术路线的竞争与突破。与其他高科技产业不同，核聚变领域呈现出多元技术路径并行发展的格局，报告称之为“创新驱动的健康市场生态”。托卡马克装置仍是主流选择，全球多数头部企业和国家项目采用这一路线，其中最具代表性的当属国际热核聚变实验堆（ITER）项目。



ITER 作为全球最大的核聚变工程，承载着技术协同创新的重任。中国在这一国际大科学工程中扮演关键角色，不仅承担 10% 的经费份额，更成为真空室模块组装的唯一承包方。中核工程牵头的中法联合体成功完成重达 1250 吨的杜瓦底座安装，中心偏差仅 2.7 毫米，被 ITER 组织誉为“黄金里程碑”。这种国际合作不仅加速技术进步，更培育了中国在超导磁体、真空技术等关键领域的产业能力，西部超导、上海超导等企业已实现相关材料国产化替代。

与此同时，替代技术路线展现出强劲活力。美国 Helion Energy 采用场反位形（FRC）与磁压缩技术，计划 2028 年前向微软输送 50 兆瓦电力。中国民营企业

业诺瓦聚变选择相同技术路线，试图通过模块化设计降低成本，精准对接 AI 数据中心的能源需求。英国 First Light Fusion 专注惯性约束路径，利用高功率激光实现聚变点火。这种技术多样性降低了产业整体风险，正如报告所言：“尽管并非所有概念都能成为市场领导者，但这正是技术革命的演进方式。”

技术突破的节奏正在加快。2025 年初，中国“人造太阳”EAST 装置创造 1 亿度等离子体持续运行 1066 秒的世界纪录，展示了磁约束技术的潜力。美国 Commonwealth Fusion Systems 则验证了高温超导磁体在聚变环境中的可靠性，为紧凑型装置奠定基础。材料科学取得进展，耐中子辐照材料的寿命从数百小时提升至数千小时，接近实用化要求。这些突破使行业信心倍增——35 家企业预计 2030-2035 年间建成商用试验工厂，28 家计划同期实现电网并网。



三、生态构建：政策、合作与产业链协同

核聚变产业化的加速，离不开政策支持与生态系统的成熟。报告特别强调公私合作伙伴关系的扩展，认为这是降低技术风险、加速商业化的关键机制。美国通过《通胀削减法案》提供税收优惠，英国政府支持牛津形成聚变产业集群，德国在 Biblis 前核设施旧址规划聚变基地，中国则将核聚变纳入“未来产业十大工程”，2030 年前计划投入超 3000 亿元。

政策工具呈现多样化特点。除直接资金支持外，各国纷纷优化监管框架——美国核管理委员会发布聚变设施监管指南，欧盟建立分级分类审批体系，中国生

态环境部出台《聚变装置分级分类监管要求》，为商业化落地扫清规范障碍。地方政府积极打造“聚变 hubs”，美国太平洋西北区、加州，中国的上海、合肥、成都等地形成产业集聚，通过基础设施共享、人才政策优惠等吸引企业落户。

产业链协同成为竞争核心。报告指出，核聚变供应链正从分散走向整合，上游超导材料、特种钢材，中游磁体系统、真空室，下游电力设备等环节逐渐形成专业化分工。中国企业通过参与 ITER 项目积累了关键制造能力，中核建承担核心部件制造，联创超导提供高温超导磁体系统，这些经验正转化为产业竞争力。更值得关注的是技术外溢效应——聚变研发衍生的超导技术、高精度控制技术已应用于风电、磁悬浮列车等领域，形成创新乘数效应。

国际合作与竞争并存。一方面，ITER 项目聚集 35 个国家的科研力量，中国环流三号装置向 17 家国际机构开放联合实验；另一方面，技术路线竞争日趋激烈，各国都在争夺标准制定权和产业主导权。这种“和而不同”的格局推动整体进步，使核聚变从“零和博弈”变为“正和游戏”。

四、挑战与展望：跨越商业化鸿沟

尽管前景光明，核聚变产业仍面临严峻挑战。报告最引人注目的数据是：实现所有受访企业的商业化需 770 亿美元资金，是当前总投资的 8 倍。这一资金缺口反映了产业的资本密集特性——每家企业平均需 7 亿美元才能将首座试验工厂并网，而技术路线差异导致实际需求从数千万到数十亿美元不等。

技术瓶颈依然突出。能量增益（Q 值）的稳定突破仍是核心难题，现有装置多在短时间内实现 $Q>1$ ，离持续稳定运行的商业化要求还有差距。氚自持系统尚未完全验证，燃料循环供给存在不确定性。耐中子辐照材料的寿命和成本问题，可能成为商业化的隐性障碍。工程化挑战同样严峻，从超大部件制造到精密控制，从散热系统到电网适配，每个环节都需突破现有工业极限。

市场生态尚未成熟。与光伏、风电等成熟清洁能源相比，核聚变缺乏明确的商业模式和电价机制。报告指出，首批购电协议的签订具有标志性意义——Helion 与微软、CFS 与谷歌的合作，不仅提供收入来源，更验证了市场需求。但如何平衡研发投入与电价竞争力，如何设计风险分担机制，仍需政策与市场共同

探索。

展望未来十年，行业呈现谨慎乐观。报告显示，35 家企业将试验工厂目标锁定 2030-2035 年，28 家计划同期实现电网并网，这与中国“2045 年示范堆、2050 年商用堆”的规划形成呼应。随着资本持续涌入、技术不断突破、政策精准支持，核聚变有望在 2030 年代末实现初步商业化。中国在这一进程中将扮演重要角色——既通过 ITER 等项目贡献全球智慧，也依托本土产业生态探索特色路径，其“双轨制”创新模式可能为其他国家提供借鉴。

从 1950 年代的理论探索到今天的产业化冲刺，核聚变走过了漫长而曲折的道路。《全球核聚变产业报告》记录的不仅是数字增长，更是人类应对能源危机的集体努力。当技术可行性逐渐清晰，当资本信心持续增强，当全球协作不断深化，核聚变正从“永远的 20 年后”变为“即将到来的未来”。这场跨越世代的能源革命，终将在全球智慧的共同浇灌下，结出清洁、无限的能源果实。

资本注入正推动产业阶段跃迁。报告指出，全球核聚变企业已从原型研发阶段，普遍进入工程化和制造挑战攻坚期。53 家企业支撑起近 1.8 万人的直接就业，带动 9300 个供应链岗位，若计入规划中的试验工厂人力需求，就业规模将突破 1.8 万。这种就业增长不仅体现在数量上，更反映在专业多样性上——从等离子体物理学家到制造业工程师，从材料科学家到能源市场专家，核聚变正形成完整的人才生态系统。

（来源：公众号 中电核能院）