

引用格式: 安婕铷, 左嘉旭, 黄旭阳, 等. 核聚变能源技术及产业链发展趋势 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 1-10. AN Jieru, ZUO Jiaxu, HUANG Xuyang, et al. Development trends of nuclear fusion energy technology and its industrial chain [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 1-10. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-427.

核聚变能源技术及产业链发展趋势

安婕铷, 左嘉旭[✉], 黄旭阳, 宋维

(生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100000)

摘要: [目的] 聚焦核聚变能源领域, 深入研究相关技术及产业链发展趋势。本文通过对行业发展历程的回顾、现状的剖析以及对未来趋势的预测, 全面地对能源技术及产业链发展趋势进行研究。[方法] 根据多份权威行业调查报告进行数据分析, 梳理核聚变行业的发展历程及现状, 分析技术创新趋势及技术领域分布, 发现技术、政策、资金三要素之间的内在联系, 预测未来行业方向, 并借助数据分析揭示未来行业发展趋势。[结果] 研究表明: 私营企业逐渐成为核聚变行业的重要力量。投资者对核聚变能源潜力的信心不断增强。各国政府颁布政策大大推进了核聚变行业蓬勃发展。美国企业在核聚变各技术领域涉猎最广, 涉及领域占比是第二名英国的 1.7 倍, 并远高于其它国家。几乎所有的核聚变公司都将发电作为主要市场。在衍生领域中, 工业热能占整个调查中衍生市场选择的 28.6%, 成为了大部分公司的主流选择。技术、政策、资金之间存在互相促进的扶持关系。[结论] 由近几年核聚变行业的发展规律来看, 技术创新将持续推进, 资金继续扩容, 各国政策持续看好。综合影响下的核聚变能源技术商业化前景明朗。

关键词: 发展趋势; 核聚变; 能源技术; 行业调研; 产业链发展; 趋势研究

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-427

文章编号: 2095-8676(2025)04-0001-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-427

中图分类号: TL4



论文二维码

Development Trends of Nuclear Fusion Energy Technology and Its Industrial Chain

AN Jieru, ZUO Jiaxu[✉], HUANG Xuyang, SONG Wei

(Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100000, China)

Abstract: [Objective] The paper aims to focus on the field of nuclear fusion energy, conducting an in-depth study of related technologies and the development trends of industry chains. By reviewing the development history, analyzing the current situation, and predicting future trends, the paper comprehensively examines the development trends of energy technology and industry chains. [Method] Based on multiple authoritative industry surveys, data analysis was conducted to organize the development history and current status of the nuclear fusion industry, analyze the trends in technological innovation and the distribution of technology fields, discover the intrinsic connections between technology, policy, and capital, predict the future direction of the industry, and reveal the development trends of the industry through data analysis. [Result] The study indicates that private enterprises are gradually becoming an important force in the nuclear fusion industry. Investors' confidence in the potential of nuclear fusion energy is continuously strengthening. Policies issued by governments around the world have greatly promoted the vigorous development of the nuclear fusion industry. American companies have the broadest involvement in various technological fields of nuclear fusion, with a proportion of involved fields 1.7 times that of the second-ranked United Kingdom, and significantly higher than other countries. Almost all nuclear fusion companies have targeted power generation as their main market. In the derivative fields, industrial heat accounts for 28.6% of the derivative market choices in the entire survey, becoming the mainstream choice for most companies. There is a mutually reinforcing supportive relationship between technology, policy, and capital. [Conclusion] Looking at the development patterns of the nuclear fusion industry in recent years, technological innovation will continue to advance, capital will continue to expand, and policies around the world will remain optimistic.

Key words: development trends; nuclear fusion; energy technology; industry survey; industry chain development; trend analysis

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

核聚变能源因其清洁、可持续特性,在应对全球气候变化和能源转型中扮演关键角色。它不产生温室气体,燃料丰富,有望为人类提供无限能源,实现一定意义上的“能源自由”。国际能源署预测该技术的商业化将减少化石燃料依赖,降低碳排放,对推动能源转型和实现可持续发展目标具有重要意义。

自 2021 年开始,世界核聚变行业开始迅速发展^[1],无论是资金、政策还是技术都开始出现急剧的增长^[4]。为了能更加全面的了解当前及未来核聚变行业的发展全貌和趋势,有必要进行较为深入的相关研究。

目前核聚变领域研究主要集中在振动工程、磁约束、光核反应等技术领域。M.D. Anderton 等人在《针对球形托卡马克聚变反应堆中受限空间的新型高温氦包层设计》中研究了一种硅-碳化铅-锂增殖剂的设计^[5];之江实验室获得专利“面向核聚变数据标准化的数据仓库系统及数据处理系统”^[6];肖婷等人在《托卡马克等离子体物理虚拟仿真实验设计》中通过高度还原我国托卡马克大科学装置真实的实验场景等技术,实现了对托卡马克实验装置 360°全方位仿真参观展示等教学方案设计^[7];N. Bonanomi 等人在《DTT 托卡马克主等离子体场景的时间相关全半径集成建模》中对偏滤器托卡马克实验装置(DTT)托卡马克主要场景的等离子体剖面演化进行了预测^[8];J. Seo 等人在《利用物理信息的神经计算对核聚变等离子体的输运进行模拟》中通过与 FDM 的比较,研究了使用 PINNs 的托卡马克输运求解器的特点和潜力,以及它的缺点和挑战^[9];J. Horacek 等人在《COMPASS - U 液态金属偏滤器 HeatLMD 模拟杂质流出物的标定》中推导出 Li-Sn 流出物在 7 个假定的独立参数上的标度,可以转移到其他托卡马克上^[10];Hyung Gon Jin 等人在《HCCR 包层失电事故分析》中给出了 HCCR 包层 LOOP(场外电力的损失)事故的分析结果^[11];桑耀东等人在《光学法测量核聚变质子束能谱反演算法模拟研究》中获得了 D-T 中子对应的反冲质子能谱,并对多种算法分析的特性做

了分析研究^[12]。王健声等人在《整流变压器偏磁对托卡马克电源系统谐波不稳定的分析》中研究了托卡马克电源系统低频谐波产生的机理^[13]。李佳怡等人在《基于 DNN 的托卡马克等离子体边界重建研究》中提出一种基于全连接神经网络的可见光边缘重建算法^[14]。梁展鹏等人在《CFETR 聚变发电厂的储能技术适用性分析》中分析了 CFETR 聚变发电厂储能技术规模化商业应用的适用性^[15]。但关于行业总体趋势和发展全貌的研究仍比较欠缺。

响应这一需求,本文旨在研究未来核聚变能源技术及产业链的发展趋势。

本文通过分析多份权威行业调查报告,梳理核聚变行业的发展历程及现状,分析技术创新趋势及技术领域分布,发现技术、政策、资金三要素之间的内在联系,并借助对权威调查数据的分析,研究了未来核聚变能源行业技术及产业链的发展趋势。

1 核聚变行业发展概况

1.1 行业发展历程回顾

核聚变研究始于 20 世纪中叶,最初由政府主导,投入资源进行基础研究和实验设施建设。美国、苏联等国家在 20 世纪 50—60 年代建立了多个大型核聚变研究项目。随着时间推移,研究重点从理论探索转向实验验证,各国建造了大型核聚变实验装置,如欧洲的 JET、美国的 TFTR 等,为技术发展积累了宝贵经验。近年来,核聚变能源的巨大潜力正在吸引越来越多的资金涌入私营企业,私营企业逐渐成为核聚变行业的重要力量,推动技术的快速发展和多元化^[1]。

1.2 行业发展现状分析

1) 投资增长趋势

美国公司在私营核聚变领域具有早期优势,全球该领域约 80% 的私人投资资金流向美国公司。在全球范围内,核聚变行业的投资呈现出显著的增长趋势。

2021 年,全球核聚变公司宣布的私人资金近 19 亿美元^[1],2022 年增长至 47 亿美元以上^[2],2023

年达到 62 亿美元^[3], 2024 年超过 70 亿美元^[4]。在 2022 年该行业的私人投资激增, 超过了以往所有投资总和。私人投资占总体投资比例维持在 95% 左右, 而政府投资虽然不断加大, 但是所占比例仅维持在约 5% 以下。如图 1 所示。持续增长的投资反映了投资者对核聚变能源潜力的信心不断增强, 为行业的发展提供了强大的资金支持。

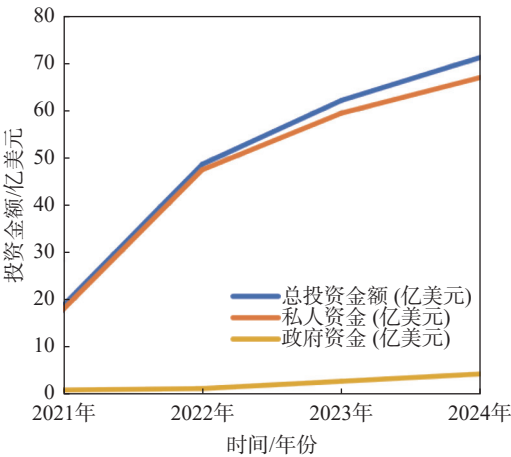


图 1 核聚变行业历年投资金额增长趋势图
Fig. 1 Annual investment growth trend chart of the fusion industry

表 1 展示了全球核聚变行业近年来政府总投资金额的情况, 由表可知近年来全球核聚变行业内政府投资金额逐年增长; 而政府资金在总资金中的占比情况, 除去 2022 年被私人投资金额倒追导致占比下降外, 其它年份均呈现占比逐年上升的趋势。在 2021 年政府扶持政策日趋明显, 由此私人资金在 2022 年发生倒追现象, 这说明了私人资金对政府扶持政策的敏感和呼应。政府资金金额同比显示, 2023 年比 2022 年同比增长 131.15%, 远高于其它两年的数据, 这种增长印证了 2021 年政府扶持政策的实施, 同时 2022 年私人资金积极回应政府扶持政策后, 也进一步刺激了次年政府扶持资金的进一步增长。这是一种相辅相成的“双向奔赴”, 是市场和政府对核聚变行业的一种美好期待和肯定。

2)企业数量变化

图 2 显示了核聚变企业数量在近四年的增长趋势。过去几年中, 致力于核聚变的私人公司数量稳步增加, 表 2 显示了 2021 年至 2024 年的核聚变行业企业数量变化情况。表 2 提到参与调查的核聚变行业活跃公司 2024 年相较于 2021 年四年同比增长

表 1 核聚变行业近年政府资金投入情况
Tab. 1 Government funding allocation to the fusion industry in recent years

年份	2021年	2022年	2023年	2024年
政府资金/亿美元	0.85	1.18	2.72	4.26
总资金/亿美元	18.72	48.60	62.11	71.22
政府资金占比/%	4.54	2.42	4.37	5.98
政府资金金额同比/%	—	38.24	131.15	56.85
政府资金占比同比/%	—	-46.75	80.87	36.79

95.65%, 2023 年相较于 2021 年三年同比增长 86.96%, 这展示了行业企业数量在前三年呈现了猛烈的增长趋势, 该趋势与图 2 显示的增长相结合, 表明行业的吸引力在逐年不断提升。

3)各国政策支持与监管

近年各国政府在支持政策方面, 颁布政策的频率和态势呈现积极的趋势, 大大推进了核聚变行业蓬勃发展, 加速了推动技术突破以及商业化进程。

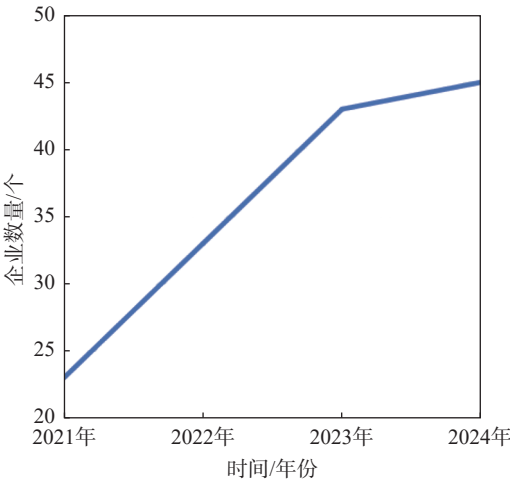


图 2 核聚变企业数量增长趋势图
Fig. 2 Trend chart of growth in the number of nuclear fusion enterprises

表 2 核聚变行业企业近年数量增长情况
Tab. 2 Growth in the number of nuclear fusion industry enterprises in recent years

年份	参与调查的行业企业数量	去年同比	较2021年同比	复合年增长率/%
2021年	23	—	—	—
2022年	33	43.48	43.48	—
2023年	43	30.30	86.96	—
2024年	45	4.65	95.65	18.27

美国^[16-19]政府借助能源部等机构制定了多项规划,自 2019 年起,每年皆有重大举措推出。2019 年启动 INFUSE 计划,并开展相关项目资助以及后续规划;2020 年国会提供资金,推动更多计划付诸实施;2021 年拜登政府大力推进能源技术计划,为核聚变开发提供支持;2022 年提供资金支持实验研究,并宣布十年愿景;2023 年创建监管框架,同时资助惯性约束聚变研究;2024 年发布战略、提供资助机遇、建立公私合作关系并提出法案。

欧盟^[20]积极筹划投资事宜,某相关欧盟透明登记在册的政策咨询公司建议采取多元共进的策略,德国巴伐利亚州也将提供资金,用以支持核聚变反应堆的建设。日本^[21-23]在 2023 年推出《核聚变能创新战略》,2024 年众多企业准备投资初创公司,以推动核聚变反应堆稳定运行与建设。中国^[24-26]在 2021 年,在政策层面持续要求推进可控核聚变技术研究;2023 年,可控核聚变创新联合体宣告成立;2024 年,国务院国资委党委于 10 月 23 日发布署名文章,提出超前布局、梯次培育核聚变等未来产业;能量奇点能源科技(上海)有限公司宣布,由该公司设计、研发和建造的洪荒 70 装置成功实现等离子体放电。

在全球范围来看,政府与企业合作方面,公私合作伙伴关系项目已经广泛铺开。通用聚变与英国原子能机构携手合作,共同推进磁化目标聚变能源商业化;京都融合工程与加拿大核实验室等机构合作开发相关技术。

这些合作有效整合了资源,有力推动了核聚变技术研发与商业化进程。全球核聚变行业在各国政策支持与合作的助力下,正稳步迈向崭新的发展阶段^[16-19,21-23,27]。

同时各国在监管政策方面,对于聚变核与辐射安全监管的政策发展均予以较高程度的重视,尤其是在核安全和相关许可制度方面,以确保核聚变能源行业的安全发展。

美国能源部(DOE)基于聚变特殊性,专门针对磁约束聚变装置的安全于 1992 年发布了两部标准文件《磁聚变设施要求》和《磁聚变设施导则》。2023 年 1 月,美国核管会(NRC)发布《聚变能系统的许可和监管》建议聚变能系统目前阶段按照核材料持有许可证方式管理,并在同年 3 月发布《关于聚变能现状和机遇的技术评估报告》,提出相关政策措施^[28]。

欧盟则早在 90 年代就开始了核聚变电站的安全与安全评估项目,并在 2014 年启动了 WPSAE 项目,专注于设计和许可研究及安全分析^[29]。日本通过“后方鳄鱼计划”制定核聚变发展战略,并于 2023 年成立“核聚变产业委员会”,以推动企业参与研发实验的核聚变反应堆^[28]。

近年来,中国核聚变监管政策的发展历程体现了从早期基础建设到近期政策细化的逐步完善过程。2014 年,《中国的核安全》白皮书发布,声明我国核安全政策法规体系的健全和可靠^[30]。2024 年,生态环境部发布《聚变装置分级分类监管要求(征求意见稿)》,进一步明确、细化了核聚变装置的辐射安全分级分类方法和监管要求,推动监管政策向更专业化的方向发展^[31]。同一时期,中国政府将核聚变技术纳入国家战略和规划,《2030 年前碳达峰行动方案》将其列为“强化应用基础研究”范畴^[25],为核聚变技术研发和应用提供方向指导,进而为监管政策的实施提供了有力保障。

这些监管政策的制定和实施,近年来呈现快速完善和健全的趋势,为核聚变技术的商业化提供了法律框架和安全规范,降低了投资风险,增强了行业对于私人资本的吸引力。

政府的资金支持和政策倾斜为核聚变技术研发提供了动力,推动了关键技术突破,加速了技术的研究开发进程。监管政策的透明度和预测性对国际合作、企业投资、技术研发等方面产生积极的推动作用^[28]。

2 核聚变技术发展趋势

到 2023 年 7 月^[4],国内外最广泛的核聚变途径是磁约束有 21 家公司,其次是惯性约束有 9 家公司,还有 5 家公司同时进行磁约束和惯性约束技术。对于磁约束聚变,最广泛的途径是托卡马克有 6 家公司,其次是仿星器技术有 6 家公司。从 2022 年到 2023 年,新增了 6 家公司选择磁约束技术途径,也有 2 家公司放弃了磁约束方式,也有公司选择新的技术方法。

2.1 技术创新趋势

根据调查^[1-4],核聚变技术的发展正朝着多样化和创新的方向发展,主要技术路径包括磁约束核聚变和惯性约束核聚变,以及一些新兴技术方法。

表 3 展示了近年来核聚变行业部分企业在核聚变技术方面的创新情况。由表 3 可见,当前世界技术创新领域主要聚集在如何有效地实现核聚变上。

表 3 近年核聚变行业部分企业核聚变技术创新领域			
Tab. 3 Innovative fields of nuclear fusion technology in some enterprises in the nuclear fusion industry in recent years			
序号	企业名称	国家	技术创新领域
1	联邦聚变系统	美国	磁约束(托卡马克)
2	CT聚变	美国	磁约束(球形磁体)
3	新奥集团聚变技术研究中心	中国	磁约束(球形托卡马克)
4	首次光聚变	英国	惯性约束(冲击驱动的惯性约束)
5	通用聚变	加拿大	磁惯性(磁化靶标聚变/磁化目标融合)
6	HB11能源控股	澳大利亚	惯性约束(直接激光驱动pB11/非热激光聚变)
7	赫利城空间公司	美国	磁惯性
8	赫利昂能源	美国	磁惯性(场反位构型,脉冲非点火)
9	霍恩技术公司	美国	混合磁和静电约束(纺锤形尖峰,超导屏蔽网格IEC)
10	LPP聚变公司	美国	磁约束(稠密等离子体聚焦)
11	磁惯性聚变技术公司	美国	磁惯性(Z箍缩)

在超导磁体技术方面^[1-4],联邦聚变系统开发出适用于高磁场聚变方法的新型高温超导(HTS)电缆,其 HTS 磁体能够达到超过 20 特斯拉的持续磁场,为紧凑型聚变装置的发展提供了关键技术支持。在等离子体加热与控制技术方面,新奥集团聚变技术研究中心通过电子回旋共振加热(ECRH)技术,实现了较高的等离子体电流驱动,推动了球形托卡马克技术的发展。此外,在诊断技术、燃料循环技术等方面也取得了重要突破,如开发出高精度的等离子体诊断设备,改进燃料循环系统,提高燃料利用率等。

这些创新成果的取得,不断提高了核聚变装置的性能,推动了行业技术水平的整体提升。

2.2 安全分析技术趋势

核聚变装置技术不断发展的同时,其安全分析技术方法也得到了广泛关注和发展。

美国在核聚变安全分析技术方面,主要依托于其强大的科研实力和丰富的核工业经验。美国的核聚变研究机构,如劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)和麻省理工学院(MIT),在概率安全分析(PSA)和可靠性、可用性、可维护性、可检查性(RAMI)分析等方面均取得了重要进展。欧盟则通过国际合作项目,如国际热核聚变实验堆(ITER),来推动核聚变安全分析技术的发展^[32]。在法国核安全监管机构的要求下,ITER 完成了聚变实验堆的安全

分析。欧盟核聚变研究机构在系统可靠性分析和风险评估方面积累了丰富的经验,并在实际的聚变装置中进行了广泛应用^[33]。日本在核聚变安全分析技术方面,注重对氚等放射性物质的管理与控制,其研究机构开发了多种氚管理技术,并在聚变装置的安全分析中进行了验证和应用^[34]。

中国在核聚变安全分析技术的研究上投入了大量资源,形成了较完整的安全分析技术体系。中国科研机构,如中国科学院核能安全技术研究所,开发了多种先进安全分析工具和方法,包括基于概率安全分析(PSA)和 RAMI 的综合安全评估方法等,能够全面评估聚变装置的安全风险^[35]。此外,中国还建立了多个实验平台,为聚变装置安全分析提供了重要的实验数据支持^[36]。

总体来看,各国在核聚变装置安全分析技术方面均取得了一定的进展,但仍面临着许多挑战。未来,随着核聚变技术的不断发展,安全分析技术也必须不断完善和创新,以满足不同类型聚变能源设施的安全分析需要。

2.3 核聚变公司技术领域分布

全球来看^[1-4],其中美国、英国、日本、中国等国家的核聚变公司企业数量较多,且发展较为活跃。这些地区通常具有较强的科研实力、完善产业配套和有利的政策环境,为核聚变企业的成长提供了良

好的土壤。核聚变公司的成立时间跨度从 20 世纪 90 年代到近年来,反映了行业的不断发展和新企业的持续涌入。这些企业涉及的业务领域广泛,包括电力生产、空间推进、医疗和工业热能等,展现了核聚变技术的多元化应用潜力。

图 3 是 2024 年各国企业核聚变技术在不同领域应用情况。参与调查的企业中,美国企业涉及领域占调查总领域的 85.7%。其中,各领域美国企业占比均为 40% 以上,被美国企业独占的领域达到了调查领域总数的 42.9%。其余国家中,英国企业涉及领域占 50%,德国企业涉及领域占 28.6%。美国企业在核聚变各技术领域涉猎最广,涉及领域占比是第二名英国的 1.7 倍,并远高于其它国家,这进一步说明了美国资本对于核聚变行业的看好。

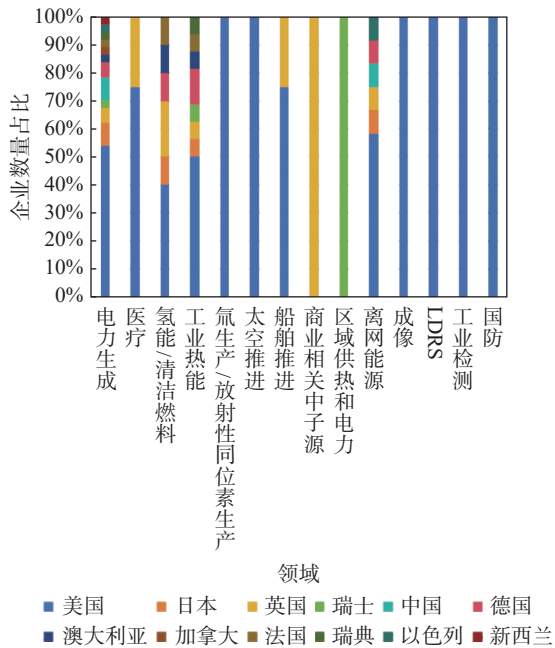


图 3 2024 年各国企业核聚变技术在不同领域应用情况

Fig. 3 Application of nuclear fusion technology in different fields by enterprises in various countries in 2024

图 4 是 2024 年核聚变技术领域及市场的分布情况,图中集中展现了调查对象中,各公司主要市场和衍生市场的方向选择。在调查中发现各公司可以同时选择多个领域作为市场方向。由图可见,几乎所有的核聚变公司都将发电作为了主要市场。由此可以预见,未来核聚变电厂将向电网提供大量清洁电力。同时,图 4 也展示了由主要市场为基础,给各公司带来的衍生市场方向,这些市场包含了太空推

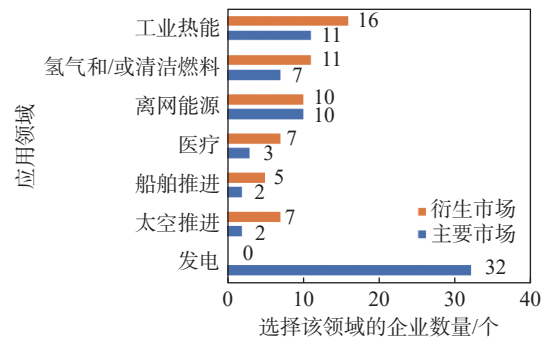


图 4 2024 年核聚变技术领域及市场的分布情况

Fig. 4 Distribution of nuclear fusion technology field and market in 2024

进、医疗、工业热能等领域。

在衍生领域中,工业热能占整个调查中衍生市场选择的 28.6%,成为了大部分公司的主流选择;其次是清洁燃料和离网能源(分别占 19.6% 和 17.9%)。这也进一步预测了未来几年核聚变领域的重点发展和布局方向。

3 技术、政策、资金之间的内在联系

3.1 政策支持对资金流向的引导作用

近年来,技术发达的各国政府都出台了针对聚变装置的积极政策和技术方面的进步,成为吸引投资进入核聚变行业的重要因素^[16-26]。

随着美国通过维持聚变能源创新网络计划、制定政府与社会资本合作方法及拟定监管方式,同时借助能源高级研究计划局的相关计划推进聚变能源发展,为行业营造了良好的政策环境^[16-19]。同时,英国政府承诺投入资金用于球形托卡马克设计^[27],中国宣布投资重振国内聚变研发计划^[24]。这些国家层面的资金投入承诺向市场传递了积极信号,吸引了更多社会资本关注并投入到核聚变领域。根据调查数据,2021 年至 2024 年间,全球范围内,私人资金在核聚变行业投资中占比约 95% 且数额逐年攀升^[1-4]。这使得全球范围内核聚变行业的私人投资信心增强,行业私人资金的投资数据亦随之变得积极。

图 5 是核聚变企业近年融资趋势图,结合该图及近年全球相关支持政策的颁布不难看出,在各国政府出台相关鼓励扶持政策后,核聚变行业私人投资从 2021 年至 2022 年出现骤涨,2022 年至 2024 年也呈现出明显的上涨趋势。这一现象表明政府资金投入及政策鼓励对核聚变行业的私人投资具有积极

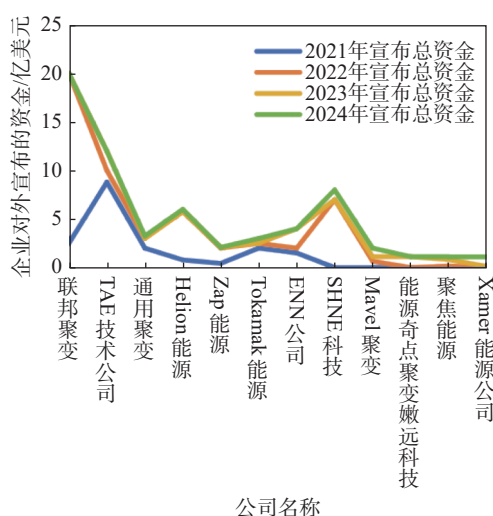


图5 核聚变企业近年融资趋势图

Fig. 5 Financing trends of nuclear fusion enterprises in recent years

的引导作用,吸引了更多私人资本进入核聚变领域。

3.2 资金投入为技术研发提供物质保障

持续增长的投资为核聚变技术研发提供了坚实的物质基础。以联邦聚变系统为例^[1-2],其在2021—2022年获得大量私人资金(2021年2.5亿美元,2022年20亿美元),利用这些资金设计、建造并展示适用于高磁场聚变方法的新型高温超导(HTS)电缆,与麻省理工学院合作建造并测试接近全尺寸、大口径的HTS磁体,推动了超导磁体技术的发展,有助于实现紧凑型聚变装置。

众多企业如CT聚变、新奥集团聚变技术研究中心^[1-4]等也在资金支持下在各自的技术创新领域取得进展,如等离子体电流提升、电子回旋共振加热技术改进等,这些成果表明资金投入对技术研发起到了关键的推动作用。

图6揭示了核聚变行业中部分企业融资金额与技术成果近年的发展情况和相互之间的关系。图中数据来自近四年的核聚变行业协会年终报告,为了能够发现技术成果的趋势变化,选取了专利数量和总资金较高的三个公司做分析。由图6中是数据可以发现,各公司随着总资金的逐年增加,专利数量也在逐年上涨。这直接反应了资金投入的金额数对企业技术成果的积极关系。

3.3 技术进步促使政策进一步扶持

结合近年来的各国政策变化,随着核聚变技术不断取得创新成果^[1-4],如企业在超导磁体技术、等

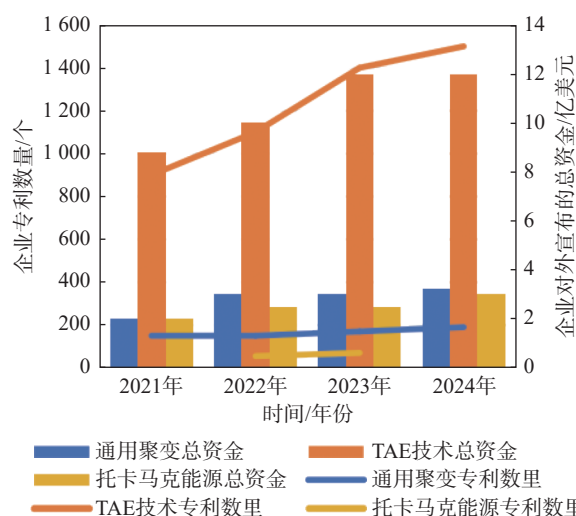


图6 核聚变部分企业融资金额与技术成果趋势关系图

Fig. 6 Relationship between financing amount and technological achievement trends of some nuclear fusion enterprises

离子体加热与控制技术、诊断技术、燃料循环技术等方面的突破^[1-4],各国政府更加重视核聚变行业的发展,进而出台更多支持政策^[16-26,27]。技术的进步让政府和资本看到了核聚变能源实现商业化的潜力,为了在全球聚变能源领域占据优势地位或实现能源转型等目标,政府会加大政策扶持力度,包括提供更多的资金资助、制定更有利的产业政策等,从而形成技术与政策之间的良性互动。

4 行业发展未来趋势

由近几年核聚变行业的发展规律来看,核聚变技术的未来发展前景备受政府和市场的期待,随着资金及政策的注入,结合其它成熟行业的技术发展规律,核聚变技术有望在未来几十年甚至几年内在多个领域取得突破。

1) 技术创新持续推进

随着行业财力人力的进一步聚集,核聚变行业有望在基础关键技术层面取得进一步的突破。新型高温超导材料的应用将使磁约束装置产生更强磁场,先进加热技术将提升等离子体温度,智能化控制技术将提高装置运行稳定性和效率。这些技术突破将逐步解决当前面临的等离子体稳定性、能量增益等关键问题,使核聚变装置性能和产量不断提升。

同时在多元的市场需求下,多元化的技术发展格局将会持续发展。

2) 资金继续扩容

随着技术创新和市场认可的双重激励,投资者对核聚变行业的信心将进一步增强。行业投资规模有望继续扩大,同时多元化融资渠道将更加完善。

一方面,私人投资可能会持续增加,风险投资机构可能会降低对核聚变技术的风险认知,加大投资力度。另一方面,政府资金投入也有望增长,各国政府为了在清洁能源领域占据领先地位或实现减排目标,将持续支持核聚变技术研发与商业化。

企业将继续探索多元化融资渠道。除了吸引风险投资和寻求政府资助外,企业间的战略合作和并购可能会更加频繁,通过资源整合加速技术研发和商业化进程。同时,随着核聚变行业发展逐渐成熟,银行等传统融资渠道对核聚变企业的支持可能会增加,如放宽贷款条件等。

3) 各国政策持续看好

各国对于行业政策的方向取决于国家利益和市场需求,而核聚变能源因其能源本质性的优势对全球能源格局有着重要意义。

由核聚变行业过去几年的重点研发行业来看,未来该行业将极有可能为极大程度的碳减排和能源自有提供发展基础,也可以为国家的航海航天提供更高的技术发展平台,同时将有进一步发生行业下沉,利益民生的衣食住行领域。因此,在过去几年,核聚变行业已经为各国的支持政策提供了足够的已实现正向回馈及可预期的正向回馈。

可以预见,未来各国对核聚变行业的支持力度会以加深技术研发和推进商业化进程加速为方向进一步加大,以尽快实现核聚变能源的广泛应用。

4) 综合影响下的商业化前景

依据近几年全球各国核聚变行业在技术、资金和政策的协同影响和发展历程来看,核聚变能源商业化进程正在稳步推进。由此,各个组织看到了未来聚变商业化的希望,制定并发布了核聚变能源商业化的明确路线和阶段。然而,虽然聚变行业的政策、资金都呈现出积极趋势,但是核聚变关键技术难题、安全性及评价、商用成本等问题仍亟待解决,核聚变确切的商业化时间表仍未确定,以上问题均需要进一步的技术突破。但总体而言,随着全球对清洁能源需求的不断增长以及技术、资金、政策的持续推动,核聚变能源商业化的前景依然十分广阔,有

望为全球能源转型和可持续发展提供重要支撑。

参考文献:

- [1] Fusion Industry Association. The global fusion industry in 2021 [R/OL]. (2021) [2024-11-11]. <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/08/FIA-report-2021-FINAL.pdf>.
- [2] Fusion Industry Association. The global fusion industry in 2022 [R/OL]. (2022) [2024-11-11]. <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/08/FIA-2022-FINAL.pdf>.
- [3] Fusion Industry Association. The global fusion industry in 2023 [R/OL]. (2023) [2024-11-11]. <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/07/FIA%E2%80%93932023-FINAL-1.pdf>.
- [4] Fusion Industry Association. The global fusion industry in 2024 [R/OL]. (2024) [2024-11-11]. <https://www.fusionindustryassociation.org/fusion-industry-reports/>.
- [5] ANDERTON M D, BAUS C, DAVIS T P, et al. Novel high temperature tritium blanket designs for confined spaces in spherical Tokamak fusion reactors [J]. *Fusion engineering and design*, 2025, 210: 114732. DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2024.114732.
- [6] 周子豪, 魏一雄, 高超霖, 等. 面向核聚变数据标准化的数据仓库系统及数据处理系统: 117743476B [P]. 2024-11-26. ZHOU Z H, WEI Y X, GAO C L, et al. Data warehouse architecture and data processing system for nuclear fusion data standardization: 117743476B [P]. 2024-11-26.
- [7] 肖婷, 郑远, 仇志勇, 等. 托卡马克等离子体物理虚拟仿真实验设计 [J]. *实验技术与管理*, 2025, 42(1): 152-160. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2025.01.019. XIAO T, ZHENG Y, QIU Z Y, et al. Design of a virtual simulation experiment for Tokamak plasma physics [J]. *Experimental technology and management*, 2025, 42(1): 152-160. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2025.01.019.
- [8] BONANOMI N, LUDA T, MANTICA P, et al. Time-dependent full-radius integrated modeling of the DTT Tokamak main plasma scenarios [J]. *Nuclear fusion*, 2025, 65(1): 016005. DOI: 10.1088/1741-4326/AD8EDB.
- [9] SEO J, KIM I H, NAM H. Leveraging physics-informed neural computing for transport simulations of nuclear fusion plasmas [J]. *Nuclear engineering and technology*, 2024, 56(12): 5396-5404. DOI: 10.1016/J.NET.2024.07.048.
- [10] HORACEK J, LUKES S, JAULMES F, et al. Scaling of HeatLM-D-simulated impurity outflux from COMPASS-U liquid metal divertor [J]. *Nuclear fusion*, 2025, 65(1): 016014. DOI: 10.1088/1741-4326/AD8D67.
- [11] JIN H G, KIM S K, MOON S, et al. Loss of power accident analysis for the HCCR blanket [J]. *Nuclear engineering and technology*, 2024, 56(12): 4947-4950. DOI: 10.1016/J.NET.2024.07.002.

- [12] 桑耀东, 张清民, 郭昊轩, 等. 光学法测量核聚变质子束能谱反演算法模拟研究 [J]. *核电子学与探测技术*, 2025, 45(1): 16-24. DOI: 10.20173/j.cnki.ned.20241112.005.
SANG Y D, ZHANG Q M, GUO H X, et al. Simulation study on unfolding algorithm for measuring proton beam energy spectrum of nuclear fusion using optical imaging method [J]. *Nuclear electronics & detection technology*, 2025, 45(1): 16-24. DOI: 10.20173/j.cnki.ned.20241112.005.
- [13] 王健声, 茆华风, 茆智伟, 等. 整流变压器偏磁对托卡马克电源系统谐波不稳定的分析 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 70-76. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.009.
WANG J S, MAO H F, MAO Z W, et al. Analysis of harmonic instability of Tokamak power system caused by rectifier transformer bias [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 70-76. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.009.
- [14] 李佳怡, 古顺平, 古梦君, 等. 基于 DNN 的托卡马克等离子体边界重建研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 77-81. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.010.
LI J Y, GU S P, GU M J, et al. Boundary reconstruction of Tokamak plasma based on deep neural networks [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 77-81. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.010.
- [15] 梁展鹏, 向魁, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂的储能技术适用性分析 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 53-62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007.
LIANG Z P, XIANG K, LI H, et al. Applicability analysis of energy storage techniques for CFETR fusion power plant [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 53-62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007.
- [16] U. S. Department of Energy. Department of energy announces \$4.6 million to fund public-private partnerships for fusion research [EB/OL]. (2024-08-08) [2024-11-11]. <https://www.energy.gov/science/articles/department-energy-announces-46-million-fund-public-private-partnerships-fusion>.
- [17] Dick Durbin United States Senator Illinois. The department of energy quantum leadership act would authorize more than \$2.5 billion for quantum research conducted at DOE [EB/OL]. (2024-08-01) [2024-11-11]. <https://www.durbin.senate.gov/newsroom/press-releases/durbin-daines-introduce-bipartisan-legislation-to-fund-the-future-of-quantum-research-at-doe>.
- [18] U. S. Department of Energy. DOE announces new decadal fusion energy strategy [EB/OL]. (2024-07-06) [2024-11-11]. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-new-decadal-fusion-energy-strategy>.
- [19] 中国科学院科技战略咨询研究院. 美国能源部投入 4 亿美元支持清洁能源、节能及碳管理 [EB/OL]. (2023-10-13) [2024-11-11]. http://www.casid.cas.cn/zkcg/ydkb/kjykb/2023/kjykb2307/202310/t20231013_6902045.html.
Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences. The US Department of Energy invests \$400 million to support clean energy, energy conservation, and carbon management [EB/OL]. (2023-10-13) [2024-11-11]. http://www.casid.cas.cn/zkcg/ydkb/kjykb/2023/kjykb2307/202310/t20231013_6902045.html.
- [20] Nuclear Engineering International. Joining forces for fusion [R/OL]. (2024-06-11) [2024-11-11]. <https://www.neimagazine.com/analysis/joining-forces-for-fusion/?cf-view>.
- [21] Japan Cabinet Office. Fusion energy innovation strategy [R/OL]. (2023-04-14) [2024-11-11]. https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf.
- [22] Nuclear Engineering International. Japan adopts national strategy on nuclear fusion [R/OL]. (2023-04-21) [2024-11-11]. <https://www.neimagazine.com/news/japan-adopts-national-strategy-on-nuclear-fusion-10779676/>.
- [23] Fusion Industry Association. Japan announcements accelerate fusion commercialization efforts [EB/OL]. (2024) [2024-11-11]. <https://www.fusionindustryassociation.org/japan-announcements-accelerate-fusion-commercialization-efforts/>.
- [24] 中共中央, 中华人民共和国国务院. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-24) [2024-11-11]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2021-10/24/c_1127990704.htm.
CPC Central Committee, State Council of the People's Republic of China. Opinions on fully, accurately, and comprehensively implementing the new development concept and doing a good job in carbon peak and carbon neutrality [EB/OL]. (2021-10-24) [2024-11-11]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2021-10/24/c_1127990704.htm.
- [25] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-24) [2024-11-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
State Council of the People's Republic of China. Action plan for peaking carbon emissions before 2030 [EB/OL]. (2021-10-24) [2024-11-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [26] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知 [EB/OL]. (2022-01-29) [2024-11-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. 14th five year plan for modern energy system [EB/OL]. (2022-01-29) [2024-11-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [27] UK Atomic Energy Authority. STEP: spherical Tokamak for energy production [EB/OL]. (2020) [2024-11-11]. <https://race.ukaea.uk/programmes/step/>.
- [28] 温一村. 全球可控核聚变发展态势研究 [J]. *竞争情报*, 2024, 20(4): 60-65. DOI: 10.19442/j.cnki.ci.2024.04.009.
WEN Y C. Research on the development trends of global controlled nuclear fusion [J]. *Competitive intelligence*, 2024,

- 20(4): 60-65. DOI: [10.19442/j.cnki.ci.2024.04.009](https://doi.org/10.19442/j.cnki.ci.2024.04.009).
- [29] 王海霞, 陈志斌, 李亚洲, 等. 国内外聚变核安全监管与许可初步分析研究 [J]. *核科学与工程*, 2016, 36(4): 497-503. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2016.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2016.04.010).
- WANG H X, CHEN Z B, LI Y Z, et al. Preliminary study of the status of fusion safety regulation and licensing [J]. *Nuclear science and engineering*, 2016, 36(4): 497-503. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2016.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2016.04.010).
- [30] 中华人民共和国中央人民政府. 中国的核安全 [EB/OL]. (2019-09-03) [2025-01-08]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/03/content_5426832.htm.
- The Central People's Government of the People's Republic of China. China's nuclear safety [EB/OL]. (2019-09-03) [2025-01-08]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/03/content_5426832.htm.
- [31] 中华人民共和国生态环境部. 关于公开征求《聚变装置分级分类监管要求(征求意见稿)》意见的函 [EB/OL]. (2024-09-13) [2025-01-08]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202409/t20240913_1085862.html.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Letter on soliciting opinions on the "classification and supervision requirements for fusion devices (draft for comments)" [EB/OL]. (2024-09-13) [2025-01-08]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202409/t20240913_1085862.html.
- [32] 田林琳. 美国商业核聚变发展现状和特点分析 [J]. *全球科技经济瞭望*, 2024, 39(9): 47-52.
- TIAN L L. Current status and characteristics of commercial nuclear fusion development in the United States [J]. *Global science, technology and economy outlook*, 2024, 39(9): 47-52.
- [33] ALZBUTAS R, VORONOV R. Reliability and safety analysis for systems of fusion device [J]. *Fusion engineering and design*, 2015, 94: 31-41. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2015.03.001](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.03.001).
- [34] 中国核网. 日本核聚变发电技术现状 [EB/OL]. (2015-01-30) [2025-01-08]. <http://www.nuclear.net.cn/portal.php?mod=view&aid=5688>.
- China Nuclear Net. Current status of nuclear fusion power generation technology in Japan [EB/OL]. (2015-01-30) [2025-01-08]. <http://www.nuclear.net.cn/portal.php?mod=view&aid=5688>.
- [35] SUN M, YU J, LI T S, et al. An integrated safety assessment method based on PSA and RAMI for fusion reactors [J]. *Nuclear materials and energy*, 2023, 34: 101391. DOI: [10.1016/J.NME.2023.101391](https://doi.org/10.1016/J.NME.2023.101391).
- [36] 吴宜灿, 王永峰, 刘超, 等. 强流氘氚聚变中子源 HINEG 设计 [C]//中国化学会, 中国工程物理研究院表面物理与化学重点实验室. 第二届中国氚科学与技术学术交流会议论文集. 成都: 中国化学会, 中国工程物理研究院表面物理与化学重点实验室, 2017: 181.
- WU Y C, WANG Y F, LIU C, et al. Design of high current deuterium tritium fusion neutron source HINEG [C]//Chinese Chemical Society, China Academy of Engineering Physics Key Laboratory of Surface Physics and Chemistry. Proceedings of the 2nd China Tritium Science and Technology Academic Exchange Conference. Chengdu: Chinese Chemical Society, China Academy of Engineering Physics Key Laboratory of Surface Physics and Chemistry, 2017: 181.

作者简介:



安婕铷

安婕铷(第一作者)

1988-, 女, 工程师, 核能与核技术工程领域硕士, 主要从事核电厂安全审评及核电厂安审报告设计基准事故校核计算分析工作(e-mail)anjieru@foxmail.com。

左嘉旭(通信作者)

1980-, 男, 正高级工程师, 中国科学院上海应用物理研究所粒子物理与原子核物理博士, 主要从事核与辐射安全分析技术研究(e-mail)zuojiayu@chinansc.cn。

(编辑 叶筠英)