



我国可控核聚变民营企业发挥技术路线多、速度快且活、成本相对低等优势,努力点燃属于自己的“小太阳”,成为与“国家队”并行互补的科技创新力量
三四年间已有数家创业公司从事多条技术路线的研发,在一些方面后发先至
目前各方研发仍处在前期甚至初期阶段,离真正商用还有较大距离

可控核聚变民营力量潜能渐放

文 | 《瞭望》新闻周刊记者 马晓澄 卢有伊

中国科学院合肥物质科学研究院等离子体所的全超导托卡马克装置“东方超环”(EAST),今年1月实现1亿℃高约束模等离子体运行1066秒;中核集团西南物理研究院的可控核聚变大科学装置“中国环流三号”,今年3月实现原子核温度1.17亿℃、电子温度1.6亿℃……

与此同时,我国创立于2021年的两家民营企业也在可控核聚变技术研发方面表现不俗:星环聚能公司SUNIST-2装置的环向磁场指标2023年就在球形托卡马克领域达到世界领先水平;能量奇点公司2024年建成全球首台全高温超导托卡马克装置“洪荒70”,今年又刷新了由美国公司保持的通流实验磁场强度世界纪录。

科学界眼中的“终极能源”、公众想象中的“人造太阳”——可控核聚变技术,致力于在地球上实现如同太阳核心的能量反应,在超高温超高压等极限条件下将核聚变过程稳定、持续控制在一个装置中,用来安全发电。这一过程中释放的能量,是目前人类已知最清洁持久的能量形式之一。

几十年来,该领域研究一直依靠国家力量长线投入,通过庞大的科学装置和顶级实验室推进。如国际热核聚变实验堆(ITER)启动建设近40年,现由欧美中俄韩日印等共同实施,预计在2050年前后实现商业化应用。而随着新材料突破、新技术出现,一批商业公司也加入这一未来产业。

今年3月,中核集团聚变领域首席科学家段旭如表示,不排除随着高温超导、人工智能、先进材料等技术的突破,聚变商业落地时间提前。

我国可控核聚变民营企业发展迅速,发挥技术路线多、速度快且活、成本相对低等优势,努力点燃属于自己的“小太阳”,成为与“国家队”并行互补的科技创新力量。随着技术资金等瓶颈不断破解,这支创新力量有望在“终极能源”开发中发挥出更大作用。

民营力量入局

核聚变是将两个轻原子核“压缩融合”成更重原子核的过程。与人们熟知的“不可控”核聚变——氢弹爆炸不同,可控核聚变关键在于将聚变过程中释放的巨大能量稳定控制、安全利用。

受访专家介绍,可控核聚变研发的技术路线主要有两种。

一是惯性约束聚变。用强大的激光或粒子束瞬间加热燃料,使其产生聚变,就像点燃“火药包”,代表装置是美国的“国家点火装置”(NIF)。

二是磁约束聚变。相比惯性约束聚变“像打火石一样瞬间点火”,它更像用强大的磁场“关住火球”,让等离子体在一个稳定空间中持续“燃烧”,因此被认为更有希望率先实现稳定发电。

目前,磁约束聚变是全球主流研发路线,中、美、英、法、日、韩等多个国家积极推进,托卡马克、仿星器、球形托卡马克、场反位形(FRC)等多种磁约束方案竞相探索。其中,最广泛采用的托卡马克(Tokamak)装置,在全球已有100多台建成并运行。它的外形像一个巨大的“甜甜圈”,通过环形磁场将上亿摄氏度的等离子体牢牢约束、持续“燃烧”。

“过去30多年,主要使用铌系低温超导材料来建造托卡马克磁体,工程量和成本巨大,比如国际热核聚变实验堆(ITER)磁体装置有10层楼高,2.3万吨重,建设成本预计超250亿欧元,因此主要由国家力量投入。”能量奇点联合创始人叶雨明今年初在接受记者采访时介绍,近年来,被称为第二代高温超导材料的稀土钡铜氧化物(REBCO)逐步实现工业化量产,它依靠高临界电流密度等优点为托卡马克装置提供更强的约束磁场。

“新材料的突破使得商业公司入局成为可能。”叶雨明说,比如能量奇点的“洪荒70”装置建造成本约1.3亿元;拟建的下一代“洪荒170”装置主体直径7米、高7米,均为ITER装置的1/4;其反应输出能量可做到和ITER一样,达到输入能量的10倍及以上。这些进展已适合商业公司发挥优势,探索推进。

在目前的可控核聚变研发格局中,“国家队”立足大范围大规模用电保障,聚焦发电功率更高的百兆瓦级大型装置研发;民营力量抓住新材料新技术带来的可能性,以风险投资、创业公司的市场化方式,探索用小型化装置、较低试错成本实现聚变发电。

“在这方面,美国公司起步最早。麻省理工学院衍生企业联邦聚变系统公司(CFS)的托卡马克项目SPARC预计今年建成;开放人工智能研究中心(OpenAI)投资的氦核公司(Helion Energy)发展磁惯性约束路线。”叶雨明介绍,我国可控核聚变商业公司起步晚于美国,但近些年发展迅速,三四年间已有数家创业公司从

事多条技术路线的研发,在一些方面后发先至。比如能量奇点自主研发的“经天磁体”在首轮通流实验中产生21.7特斯拉的磁场,已反超对标公司CFS。

灵活优势初显

受访业内人士表示,可控核聚变民营企业具有自身优势,可以成为“国家队”的一种补充。

——技术路线多。我国民营企业在探索聚变新兴技术路线上已初具成效,比如星环聚能在球形托卡马克的多个领域实现了突破,包括实现国际首个重复重联技术方案的稳定运行。

“我们选择的是结构更简单的‘场反位形’(FRC)技术路线,它不需要建巨大而复杂的环形磁场线圈,可能降低工程实现的难度和成本。”瀚海聚能(成都)科技有限公司董事长项江说。

据了解,目前我国正在推进研发的各技术路线中,磁约束路线的低温超导托卡马克、全超导托卡马克等技术主要由国家级机构实施攻关;高温超导托卡马克、场反位形等技术正由民营企业推进研发,形成多元并进、优势互补的格局。

——速度快且活。项江认为,国家级机构擅长基础研究和科学探索,民营企业在技术研发应用方面更注重商业化可行性和工程化进程,可以在资金和技术上做出更灵活的调整,尽可能缩短从实验室到市场的周期。“我们的目标是2030~2035年实现规模发电,为更大规模的可控核聚变发电探路。”项江说。

叶雨明表示,商业公司在速度和效率方面有一定优势,比如能量奇点在两年时间内完成了“洪荒70”从设计建设到点亮等离子体的全过程,创造了世界范围内超导托卡马克装置研发建造的最快纪录。

——投入更经济。有受访对象表示,商业公司对资金可持续更为敏感,有动力探索更经济高效的研发模式。

瀚海聚能走了一条“沿途下蛋”的路子。公司副总经理刘鹤介绍,在实现发电之前,团队先利用聚变过程中产生的中子开发癌症治疗、中子成像和核废料处理等技术,提前实现部分商业收益。

值得注意的是,国家级机构近两年也通过公司化方式推动可控核聚变研发后续装置建设。比如聚变新能(安徽)有限公司于2023年5月成

立,是中国科学院等离子体所磁约束核聚变领域的唯一成果转化平台,公司股东包含部分社会资本。2023年12月,中核集团宣布中国聚变能源有限公司(筹)正式揭牌。商业公司的灵活特性、补充作用,正为“国家队”所看重。

更大潜能待放

新技术、新力量的加入为可控核聚变发电前景带来了更大想象空间,但受访人士表示,目前各方研发仍处在前期甚至初期阶段,离真正商用还有较大距离,至少有三大技术瓶颈待破解,需要各展所长、合力攻关。

一是长时间稳定运行的技术挑战。过去几年里,我国“东方超环”(EAST)的长脉冲高约束模等离子体运行时间不断延长,先后实现了60秒、100秒、403秒、1066秒的重大突破。但要达到商业化核聚变电站的要求,需要数小时乃至数天的连续稳定运行,等离子体约束效率和系统整体稳定性都须进一步提升。

二是能量增益与系统效率的提升。实现“净能量增益”,即输出能量大于输入能量(能量增益倍数 $Q>1$),需要优化等离子体加热、燃料注入与回收等多个系统的协同效率。经过多年研发,直到2022年12月 $Q>1$ 才由美国“国家点火装置”(NIF)首次实现。跨过这一门槛后,还需继续攻克 $Q>10$ 、 $Q>30$ 、 $Q>100$ 等多重难关。

三是提升材料与零部件的可靠性。可控核聚变装置对材料的要求极高,需要考虑高温、强辐射、强磁场和高能粒子轰击等极端环境下的各种表现。材料研发、性能提升以及规模化制造仍是重要瓶颈。“就像在炼丹,得先造出一个能抗高温、抗冲击的炼丹炉。”项江说,这需要整个产业链共同攻关。

技术瓶颈的突破离不开资金投入保障。业内人士介绍,过去5年中我国市场化资金对核聚变领域的投入仅30多亿元。此外,公众普遍对核聚变缺乏科学认识,对辐射风险和环境污染的担忧影响了社会支持力度。

受访人士建议,加快构建适合聚变技术的监管体系,出台资金扶持、土地使用等支持政策,大力提升公众对聚变清洁安全特性的认知。同时,推动“国家队”与商业公司在科研平台、人才培养等方面深度协作,顺势而为强化我国可控核聚变研发新格局。

来源:新华社