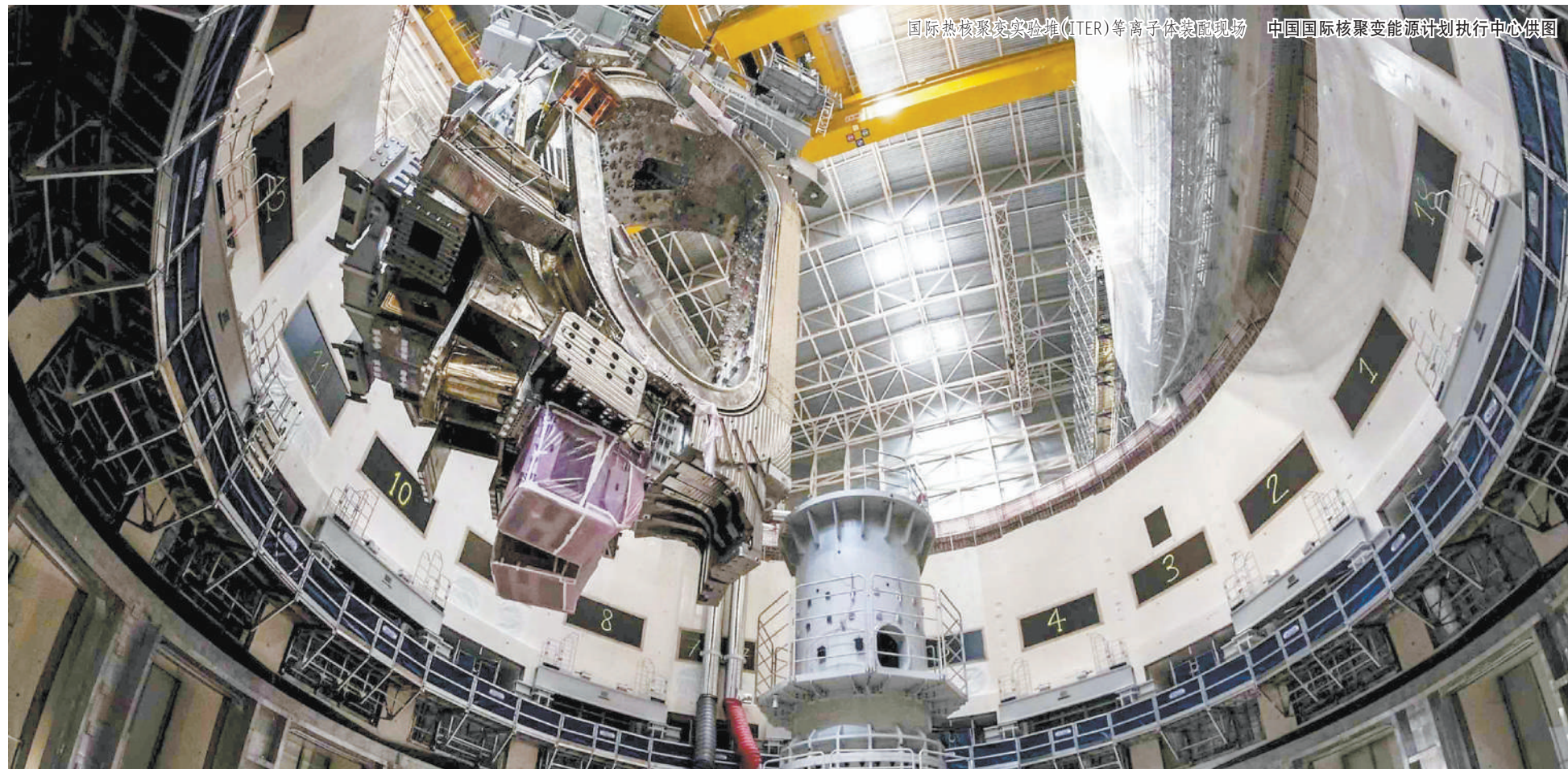


随着核聚变研究的不断深入,我国很多相关技术获得突破。在科技创新越来越需要协同作战的今天,发挥新型举国体制优势,更有耐力、能长期投入的“国家队”和更灵活、试错成本更低的民营企业发挥各自优势,密切合作,推动形成良好创新生态。



国际热核聚变实验堆(ITER)等离子体装置现场 中国国际核聚变能源计划执行中心供图

## 深瞳工作室出品

采写:本报记者 操秀英  
策划:陈瑜

核聚变领域又获重要突破。

有史以来第一次,人类实现了核聚变反应的净能量增益——北京时间12月13日23时,美国能源部宣布,其下属劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的一个团队12月5日在国家点火设施(以下简称NIF)进行了历史上第一次可控核聚变实验,实现了“核聚变点火”,该反应产生的能量超过所消耗的能量,获得了“能量净增益”(Q>1)。

伦敦帝国理工学院惯性聚变研究中心联合主任杰里米·奇滕登(Jeremy Chittenden)评价称,这是一件大事,但仅“相当于烧开10壶水”的水平,为了使这项技术能够发挥发电站的作用,还需要多得多的能源。

尽管因此欢呼人类离实现可控核聚变商用又进一大步还为时尚早,但事件再次引发人们对核聚变的关注。今年10月,我国新一代“人造太阳”托卡马克装置(HL-2M)等离子体电流突破100万安培(1兆安),创造了我国可控核聚变装置运行新纪录。

与此同时,核聚变工业协会(FIA)一项统计显示,全球有超过30家公司正在致力于实现核聚变的商业化,目前这些公司已共计获得了超过50亿美元的融资。

持续的重大技术突破,日益活跃的资本活动,“人造太阳”持续升温。这一次,“人类距离实现可控核聚变永远还有30年”的段子会被改写吗?

## 终极能源不易得

核聚变被称为清洁能源的“圣杯”。它是模仿太阳的原理,使两个较轻的原子核结合成一个较重的原子核,结合期间释放出大量能量。与化石能源相比,核聚变反应不排放二氧化碳,与目前广泛应用的核能(核裂变)相比,核聚变既不会产生核废料,辐射也极小。

如果能够制造一个“人造太阳”用来发电,人类就能够彻底实现能源自由。

上世纪末,国际能源署给能源领域的2000个科学家发了一份调查问卷,其中一个问题是“人类的终极能源是什么”。最终,约20%的人写了“可再生能源”,剩下近80%的回答,都是“核聚变”。

但这条路不好走。在核聚变的道路上,人类研究出了原子弹;在核聚变的道路上,氢弹得以诞生。原子弹试爆成功9年后,人类就掌握了核裂变的能量,并用于发电。而人类自1952年第一颗氢弹试爆成功开始,就踏上了可控核聚变的研究之路,可直到70年后的今天,依然无法掌控这种巨大的能量之源。

难在“可控”二字。具体来说,科学家需要在实验室环境下创造出像太阳那样的极高温、高压的环境,才能让燃料加热到发生核聚变。如何让等离子体加热到1亿度呢?地球上最耐热的金属几千度就熔化了,用什么容器能将核聚变几万个几千度的等离子体“装住”?又如何让这些高温的等离子体发出电来呢?这些都是可控核聚变需要解决的难题。

因为太难,在科学家们的预言中,距离实现可控核聚变永远“还要30年”。

## 各国都在“种太阳”

困难从不是科学家停止探索的理由。20世纪中叶,苏联科学家研制出了一种利用磁约束来实现可控核聚变的环形容器。这种名为托卡马克的装置,为可控核聚变技术的突破打开了一扇大门。同一时期,物理学家将爱因斯坦的“受激辐射”理论变成现实,激光出现了。这一重大发明有力推动了相关技术的发展,也使可控核聚变研究有了一种新手段——惯性约束核聚变。

目前,磁约束核聚变与惯性约束核聚变被认为是实现可控核聚变的两种重要方式。磁约束核聚变这一路线的主攻方向是以国际热核聚变实验堆(ITER)和欧洲联合环状反应堆(JET)为代表的托卡马克装置。NIF则是基于惯性约束核聚变原理的代表装置之一。

从全世界范围看,磁约束是实现可控核聚变更主流的方案。“种太阳”,托卡马克装置被寄予厚望。

上世纪90年代,美欧日先后建成3个大的托卡马克装置,均实现在三五秒钟的时间内维持核聚变反应,且可重复。这意味着,科学上的可行性在实验中得到了验证。

整体而言,不论是经济投入还是科学难度,磁约束核聚变研究都是一项难度太高的项目,需要国际合作。1985年,美苏牵头启动国际热核聚变实验堆(ITER)计划,这是目前世界上最大的核聚变计划。由于牵涉国家利益较多,直到2006年,ITER反应堆正式启动建设,目的是由中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯、美国等七个成员方在法国共同建造一个托卡马克型聚变实验堆,探索和平利用聚变发电的科学和工程技术可行性。

ITER最终目标是以50兆瓦的输入功率,从反应堆持续获得500兆瓦的巨功率——相当于一个中型燃煤电厂的规模。

中国可控核聚变的研究与世界几乎同步。上世纪50年代,中国开启核聚变研究。1965年,我国在四川乐山建成核聚变研究基地——西南物理研究所(今中核集团核工业西南物理研究院)。

1984年,中国环流器一号(HL-1)的建成,被认为是我国核聚变研究史上的重要里程碑。这是中国核聚变历史上的第一座大型科学装置,为我国自主设计、建造、运行“人造太阳”培养了大批人才,积累了丰富经验。

上世纪90年代,我国用羽绒服、牛仔裤、瓷器等生活物资,换了苏联价值1800万卢布的T-7的半超导托卡马克装置。1994年,更名为“HT-7”的大科学装置成功研制,中国成为继俄、法、日之后第四个拥有超导托卡马克装置的国家。

如今,中国已有多座成功运行的国产托卡马克装置。其中,中国自主设计的东方超环EAST,是世界首个全超导托卡马克装置,坐落于中国科学院合肥等离子体物理研究所。

2021年12月,EAST实现1056秒的长脉冲高参数等离子体运行,这是目前世界上托卡马克装置高温等离子体运行的最长时间。

中国国际核聚变能源计划执行中心主任罗德隆在接受科技日报记者采访时表示,总体而言,目前包括ITER在内,聚变能正处在开发阶段。要想真正实现聚变能的商业应用,需要克服高温(超过上亿度)等离子体约束、承受高温及强辐射聚变材料和聚变燃料(氦)循环增殖三大难题。

## 资本闻风而动

“国家队”快马加鞭的同时,资本和私营企业也迅速跟进,他们希望能更快造出可用、成本适中的设备。四年前,可控核聚变这一投资方向就已出现在中科院创新合伙人米磊的投资方向PPT中。

“没想到这么快就等到了投资机会。”米磊坦言。2022年2月,星环聚能创始人陈锐和清华大学工程物理系副教授、星环聚能技术发明人谭熠到米磊办公室与他聊了两个小时。“我们一直在探讨技术,聊完后,就决定投了。”米磊说。

机会源于过去几年核聚变领域的技术突破。米磊认为,科学理论已经证明可控核聚变的可行性,近些年高温超导技术的突破,让可控核聚变的建设成本大幅压缩,给了创业企业机会。

能量奇点能源科技(上海)有限公司的官网称:过去十年,随着高温超导应用技术、先进等离子体物理、人工智能和高性能计算等多领域的技术突破,人类已首次基本具备了实现聚变能源商业化的科学条件。

“磁约束核聚变是一个庞大的涉核工程,涵盖的技术领域太多,包括电、磁、真空、微波、材料等众多学科,随着聚变研究的不断深入,我国有很多相关技术获得突破,其中最明显的是超导技术。”罗德隆说。

这些突破让中小型核聚变装置建设成为可能。罗德隆举例说,英国托卡马克能源公司利用高温超导强磁场技术研发的小型聚变装置只有几米宽,可实现批量生产;美国联邦聚变系统公司(CFS)采用3D打印技术制造小型紧凑的聚变反应堆,用于航天器的能源供应;微软、亚马逊、谷歌等互联网公司则将超算技术应用于理论模拟和实验结果分析,加速聚变研究等。

资本闻风而动。2019年,名为“能源生产球形托卡马克”(STEP)的项目在英国启动,最初5年投入2.22亿英镑用于设计开发。负责监督这项工作的英国原子能管理局表示,STEP最早可能在2032年开始建设,2040年开始运营。

同年,加拿大公司General Fusion获得了一笔高达1亿美元的投资。据称,这只是总计1.92亿美元的大额交易

的一部分,实际数字可能更高。

2021年,美国清洁能源公司Helion Energy宣布完成5亿美元的E轮融资,另外还有17亿美元的承诺与特定的里程碑挂钩。

也就是在这一年,核聚变领域收到迄今为止最大的一笔私人投资。CFS从包括老虎环球管理和比尔·盖茨在内的投资者那里获得近20亿美元融资。投资方希望将核聚变商业化,并在2030年初将其并入电网。

《华尔街日报》援引业内人士的话称:“一波又一波的资金涌入到核聚变领域当中,这正是核聚变工业扩张的信号。”

在国内,2016年,河北新奥集团股份有限公司开始探索核聚变技术,并于2019年实现球形托卡马克聚变实验装置——新奥“玄龙-50”第一次等离子体放电,正式启动物理实验。

今年上半年,星环聚能、能量奇点这两家成立不足1年的商业可控核聚变企业被投资机构争抢,相继完成数亿元首轮融资,投资方囊括了顺为资本、中科创新等十余家国内资本。下半年,核心成员脱胎于上海交通大学高温超导团队的星耀科技完成5000万元种子轮融资,本轮融资由中科创新领投,合力投资、泓昇基金等跟投。

## “spaceX时代”已到来?

“实现可控核聚变是中学时代就萌发的梦想。”谭熠说,从事了20年聚变研发,非常清楚可控核聚变面临的大量困难,但随着认识的深入,也意识到这些困难并非无法克服。

星环聚能的技术来自运行了20年的清华大学球形托卡马克探索装置SUNIST。目前,星环聚能已完成与清华大学合作的球形托卡马克主机装配,即将开始各项调试。“在获得监管部门相关的许可文件之后,将争取尽快开始运行。”谭熠说,有紧迫感,竞争压力明显。

今年3月份,能量奇点就在其公众号中宣布,与我国可控核聚变领域的主力军中国核工业西南物理研究院签署了协议,双方计划共同研发全球首台基于全高温超导磁体的托卡马克,以实现长时稳态运行的科学和工程目标。

在米磊看来,当下的可控核聚变,很像几年前的商业航天领域。“一个新的方向,肯定有很大风险,但必须有人去尝试。”米磊举例,美国航空航天局(NASA)没有做可回收火箭,但太空探索技术公司(spaceX)做成功了,持续引领着太空领域的商业化。

确实如米磊所说,埃隆·马斯克创办的spaceX,用比NASA少得多的经费和快得多的速度开发出了可重复使用的运载火箭,极大地降低了太空运输的成本,开创了载人航天的私营时代。

这不是他一个人的观点。加拿大核聚变公司GF的首席执行官莫里(Mowry)甚至认为,“聚变行业的spaceX时刻”已经到来。

从投资人角度看,米磊说,一旦实现商业化,可控核聚变的边际收益将足够高,即使失败,对国家和团队来说也会有很多收获,“培养了人才,积累了专利、技术和经验。”

米磊还从更高层面看待创业企业的加入。“在科技创新越来越需要协同作战的今天,正如中央所强调的,我们需要发挥新型举国体制优势,让更有耐力、能长期投入的‘国家队’和更灵活、试错成本更低的民营企业发挥各自优势,密切合作,形成良好创新生态。”

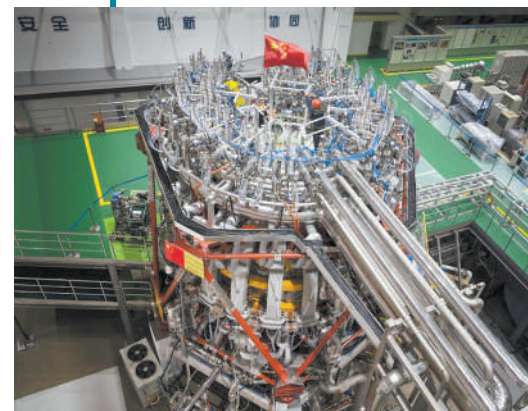
“由民营企业主导的紧凑型项目较为灵活,可快速适应不断涌现的新技术和新发现。”罗德隆说,通过技术融合创新,发展不同的可控核聚变方法和设计理念,更新迭代速度快,商业化成本低,对实现核聚变领域核心技术突破和加快核聚变商业化应用进程具有重要的推动作用。

华中科技大学电气与电子工程学院聚变与等离子体研究所教授张明也表示,民营资本目前主要以投资核聚变新路线为主。目前新的核聚变路线虽然也面临很多问题,但若能在新路线的探索过程中发现新的物理机制,与现有路线有机结合,亦可为核聚变能研发提供新的思路。

谭熠表示,引进民间资本,还有很重要的一点,希望建立一个核聚变人才的蓄水池。

粗略估计,我国每年毕业的磁约束核聚变方向博士生大约100名。

谭熠坦言,自己所在实验室每年培养的学生里,很多转行公务员、其他技术领域甚至金融。“如果没有对口且较为体面的就业机会,大家转行是可以理解的。但正如中国工程院院士李建刚特别担心的,如果有一天国家决定建设



1984年,中国环流器一号(HL-1)的建成,被认为是我国核聚变研究史上的重要里程碑。图为新一代“人造太阳”(HL-2M)装置。

中核集团核工业西南物理研究院供图



全超导托卡马克(EAST)是我国自行设计研制的世界上第一个全超导非圆截面托卡马克核聚变实验装置,又称“东方超环”或“人造小太阳”。图为全超导托卡马克(EAST)全景。

视觉中国供图



国际热核聚变实验堆(ITER)是目前世界上最大的核聚变计划。图为ITER施工现场。

中国国际核聚变能源计划执行中心供图

中国的聚变商业堆,人都叫不齐怎么办?”

“随着民间资本加入,核聚变方向变得更加有吸引力,也能够让有梦想的人在实现梦想的道路上走得更远一些。”谭熠表示,希望大家在做这种有风险的事情时,能够获得体面的报酬,少一点后顾之忧,大胆地往前走。

“目前我国在核聚变理论、实验和工程领域仍然存在较大的人才缺口。”罗德隆也表示,民营资本的加入,可以充分发挥工程能力优势,助力构建一个科学合理、布局全面的磁约束核聚变科学与工程研究和技术研发的人才培养体系。

无论如何,人类追逐“终极能源”的脚步越来越快。苏联物理学家、托卡马克之父列夫·阿齐莫维奇(Lev Artsimovich)说过一句至理名言:“当整个社会都需要的时候,聚变就会实现。”

这一天,或许不再遥远。李建刚则坚信:“在我的有生之年,一定有一盏灯能被聚变之能点亮。这一盏灯,一定要,也只能在中国。”

# 「人造太阳」照亮地球还要多久?