

编者按

随着全球能源结构加速向清洁低碳转型,核聚变研发已从基础科学验证迈入商业化探索的关键过渡期。我国将核聚变列为“十五五”规划重点发展的未来产业,明确其作为“终极清洁能源”的战略定位,提出推动其成为新的经济增长点。近日,在法国巴黎举行的第二届核能峰会上,我国宣布加入由22个国家在第28届联合国气候变化大会上共同发起的《三核能宣言》。该宣言旨在到2050年将全球核能装机容量提升至2020年水平的三倍,以此

作为应对气候变化、保障能源安全的重要路径。这一举措既是落实统筹能源安全新战略的重大选择,也彰显了我国在核能领域积极参与全球合作的开放姿态。本期专题基于全球核聚变进展、各国政策动向及油气产业资本布局,围绕构建未来能源体系,为探寻全球能源发展新路径提供前瞻性展望。  
本版文字除署名外由 中核战略规划总院有限公司 崔增琪 刘佳宁 高彬 提供

# 点燃“人造太阳”： 通向未来能源的新纪元

## 什么是核聚变

在电影《流浪地球》中,人类依靠“行星发动机”为地球提供能量,推动地球踏上漫长旅程。虽然是科幻设定,但它背后的能源构想,指向一项现实中正在研究的前沿技术——核聚变。

核聚变,是指两个较轻的原子核在极高温度和压力下聚合形成一个较重的原子核,并伴随质量亏损释放巨大能量的核反应过程。太阳的发光发热,本质上就是氢核聚变为氦的过程。科学家试图在地球上实现可控核聚变,因此常将其比喻为“人造太阳”。

目前研究最多的是“氘+氚”组合,因为它相对更容易实现聚变反应,所以多数实验装置都优先选择这种路线。虽然过程中会产生高能中子,并涉及燃料获取等问题,但它仍是最现实可行的一种方案。

## 全球核聚变发展态势

经过几十年发展,核聚变取得了一系列技术进展。2022年,美国国家点火装置首次实现净能量增益,即聚变产生的能量超过输入能量,增益约为1.53后,美国、欧盟、英国、韩国纷纷加大投入,发布核聚变发展战略和路线图,普遍计划2040年~2050年实现核聚变商业化应用。国际原子能机构最新数据显示,全球已有逾180台核聚变装置处于运行、在建或概念设计阶段。

国际热核聚变实验堆由中国、欧盟、印度、韩国、美国等共同参与,是全球最大规模的多边核聚变大科学合作项目,总投资约280亿欧元(约合2100亿元人民币)。截至2026年初,国际热核聚变实验堆项目主体土建工程基本完成,主设备到货率接近90%,处于核心部件安装的关键阶段。2024年,完成真空室扇区维修,更新项目运行基线,预计2034年启动首次等离子体实验,2039年正式开展氘核燃烧实验。

作为全球聚变工程技术的集大成者,国际热核聚变实验堆持续推动托卡马克(一种环形磁约束聚变装置)工程技术进步。我国作为主要参与方,承担了环向场线圈、校正场线圈、磁体支撑系统等研制任务,是首个完成所有采购包制造任务的参与方。

## 中国:核聚变研发已跻身全球第一方阵

我国核聚变研发历经70多年积累,已跻身全球第一方阵,在托卡马克稳态运行、聚变工程技术等领域实现多项突破。“中国环流三号”、“东方超环”等装置实现等离子体参数持续突破,聚变堆主机关键系统综合研究设施、核聚变技术研发基地加快建设,初创企业达到十多家,累计融资逾百亿元,形成“国家队主导+市场主体协同”格局。

在顶层战略与制度层面,《中华人民共和国原子能法》2026年1月15日正式实施,首次以法律形式将受控热核聚变研发纳入保障范畴。3月,我国“十五五”规划纲要提出前瞻布局未来产业,推动核聚变成为新的经济增长点。

在核心技术突破方面,东方超环装置2025年实现电子温度1亿摄氏度、持续1066秒的高约束稳态运行,刷新世界纪录。“中国环流三号”HL-3装置2025年实现离子温度1.17亿摄氏度、电子温度1.6亿摄氏度的“双亿度”运行,聚变三乘积已达到点火阈值所需的1/3量级。此外,截至今年初,我国民营核聚变企业累计获得投资逾40亿元,先后建成洪荒70、玄龙-50、SUNIST-2等装置,在高温超导紧凑型托卡马克、球形托卡马克、场反位形等方向形成差异化创新。

## 德国:多技术路径与国际合作并进

德国将核聚变纳入国家能源转型长期战略,并将其定位为净零碳负荷电源,同步推进先进材料、超导技术、低温工程等交叉领域研发。德国政府计划5年内投入逾14亿欧元用于核聚变研发,重点支持国际热核聚变实验堆项目、仿星器聚变装置工程化探索与基础研究。

在技术方面,德国以参与国际热核聚变实验堆和本国W7-X装置为主。此外,德国私营企业高斯聚变公司与仿星器能源公司分别规划Gauss GIGA、Stellaris仿星器示范项目,设计聚变功率最高达到5000兆瓦,计划2030年~2040年建成。此外,德国核聚变开发企业Marvel Fusion推进Light House激光惯性约束项目,计划2035年完成示范验证。

## 英国:核聚变商业化探索的先行者

英国是全球核聚变商业化探索的先行者,出台首个核聚变专属国家战略,提出2040年前实现核聚变商用。3月,英国发布新版《2026聚变战略》,宣布追加25亿英镑(约合225亿元人民币)投资支持球形托卡马克能源生产项目(STEP),与高温超导技术结合,并启动核聚变专用的1.4兆瓦级AI超级计算机Sunrise。

在监管层面,英国采用环境健康与放射性废物管理的独立监管模式。在技术方面,英国将球形托卡马克作为主要发展方向,STEP项目的目标是2040年前建成首座实现净电力输出的球形托卡马克示范电站,设计净电功率为100兆瓦。

## 欧盟:磁约束聚变研发的发源地

欧盟是全球磁约束聚变研发的发源地,依托欧洲联合环(JET)、W7-X仿星器等装置,形成托卡马克为主、仿星器并行的技术布局。

在政策层面,欧盟2025年发布新版《欧盟聚变战略》,延续《2050能源技术路线图》《聚变发展路线图》顶层规划,明确2050年前建成商用核聚变电站的总体目标,分3个阶段推进:完成

## 美国:核聚变研发综合实力领先

美国是全球核聚变研发综合实力领先的国家,国家实验室主导基础研究,民营企业聚焦工程化与商业化。

在政策层面,美国能源部2024年发布了《聚变能源战略2024》,将未来十年定义为“聚变商业化验证的关键时期”,通过“FIRE”国家聚变计划布局全领域研发。2025年发布《聚变科学与技术路线图》,确立“建设一创一增长”战略,力争2030年中期实现聚变并网。

在监管层面,美国核管会(NRC)采用“加速器+副产物”框架管理聚变装置,与裂变堆监管体系完全分离,大幅降低了审批门槛。

在技术突破方面,美国国家点火装置先后9次实现聚变点火,2025年4月以2.08兆焦耳激光输入实现8.6兆焦耳聚变能量输出,能量增益因子Q达到4.13,刷新惯性约束聚变世界纪录。联邦聚变系统公司(CFS)2021年攻克0.7特斯拉(T)高温超导磁体技术,正在建设全球首台高温超导托卡马克装置SPARC,同时布局ARC示范电站,计划21世纪30年代初实现商业供电。

在资本布局方面,美国私营核聚变企业累计吸引约60亿美元投资,占全球核聚变融资总额的40%以上。

## 全球油气资本竞速核聚变

●本报记者 潘欣

当核聚变从实验室的理论探索走向工程化验证的关键阶段,一场围绕“终极能源”主导权的产业布局竞赛已在全球悄然开启。传统油气公司正成为这场能源赛道竞速中最活跃的产业资本力量之一。

### 国内:央企领航,三大石油公司跨界发展

2024年起,中国石油通过旗下昆仑资本先后投资两家聚变企业:依托中科院等离子体所的聚变新能(安徽),出资29亿元持股20%;源自中核集团西南物理研究院的中国聚变能源有限公司,投资30.06亿元获得20%股份,并成为其第二大股东。随着今年两会将未来能源纳入国家重点培育新兴产业范畴,“十五五”规划将可控核聚变列为前沿科技攻关重大工程,中国石油的前瞻布局获得了政策层面的有力支持。目前,中国石油已深度参与聚变新能BEST实验装置建设,不仅为未来聚变业务积累了宝贵经验,也显示出其在能源转型中押注“终极能源”的战略决心。

4月15日,中国海油与中核集团签署战略合作协议,双方将在新能源开发、核电项目合作、科技创新等领域深度协同。此次合作的直接动因是中国海油在深远海开采中面临的核心供电难题:以“深海一号”为代表

的气田水深超1500米,离岸距离约150公里,传统岸电方案随距离拉长使得成本急剧攀升,海上风电又无法提供稳定基荷。中核集团旗下大功率12.5万千瓦的“玲珑一号”(ACP100)小型模块化反应堆成为破解这一难题的关键方案,其全被动安全系统、24个月换料周期及模块化设计,完美匹配深远海平台的供电需求。这既是突破更深水域油气开采瓶颈的必要举措,也蕴含着深远的战略考量:若合作成功,双方将共同打造“核能基荷+风电增量”的能源解决方案,有望成为全球深海能源开发的行业标准。

中国石化积极构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系。目前,公司暂未直接投资核能及聚变相关企业,而是立足自身产业优势,聚焦核能与现有业务的协同创新,持续深化核能领域高性能材料的产学研合作。上海石化自主研发生产的核能用高密度聚乙烯双层管道材料,性能达到行业领先水平,为核电站“血管系统”提供可靠保障。润滑油公司旗下长城L-TSA/LF长寿命涡轮机油,凭借出色的润滑性能与成熟的核电应用经验,成功配套石岛湾核电厂汽轮机润滑系统,以优质产品助力我国核电事业高质量发展。

### 国际:从股权投资到购电协议,模式持续创新

放眼全球,国际油气公司的布

局启动更早、模式更多元,正从单纯的财务投资向深度产业协同加速演进。

意大利埃尼公司与美国联邦聚变系统公司(CFS)2025年9月签署一项价值超过10亿美元的购电协议。根据该协议,埃尼公司将采购联邦聚变系统在弗吉尼亚州建设的400兆瓦ARC聚变发电厂所产电力。埃尼公司首席执行官表示,这份购电协议“标志着核聚变成为全面工业机遇的转折点”。

值得关注的是,这是联邦聚变系统在3个月内签署的第二个重大购电协议,此前谷歌母公司Alphabet也曾签署协议购买该电厂200兆瓦电力。对埃尼公司而言,该交易是落实2050年净零排放战略的关键一步,旨在提前锁定未来清洁电力供应。

美国雪佛龙则选择以风险投资的形式布局核聚变领域,旗下风险投资部门去年参与聚变初创公司TAE Technologies的融资,通过资本注入深度绑定前沿技术研发。

中石油也在积极行动。阿布扎比国家石油公司(ADNOC)与阿联酋核能公司2024年11月签署战略合作协议,旨在评估部署小型模块化反应堆(SMR)等先进技术,并研究将巴拉卡核电站的余热用于阿布扎比国油的油气业务。根据该协议,阿联酋核能公司将利用在核能领域的技术专长,为阿布扎比国油确定适合的核反应堆技术,并进行全面

的技术和经济评估。目前,巴拉卡核电站4台机组已全部投入商业运营,年发电量达40太瓦时,可满足阿联酋25%的电力需求。此次合作标志着中石油与油气公司正式启动“油气+核能”的协同布局。

### 核聚变油气投资趋势

从全球范围看,油气资本在核聚变领域的投资模式日益多元化。从中国石油的直接股权投资,到埃尼公司的购电协议,再到雪佛龙的风险投资布局,油气企业正通过多样化路径锁定未来能源赛道。其战略动机也在不断深化,人工智能产业的算力需求爆发、深远海开发的供电瓶颈、全球碳减排的刚性压力,共同推动稳定清洁的聚变电力成为下一代基础设施的制高点。

与此同时,核聚变技术的商业化进程明显加速,从联邦聚变系统公司连签两份购电协议,到我国BEST实验装置开工建设,“玲龙一号”并网发电,核聚变及相关小型堆技术正加速从实验室走向工程验证阶段。

核聚变技术凭借巨大的潜力和深远的战略意义,正吸引越来越多的国际大型能源企业加速布局。他们的战略投入与产业协同不仅为核聚变技术的研发和商业化进程提供了动力,更将推动全球能源格局向清洁、高效、可持续的方向加速演进。

## 多路线并行探索 核聚变商业化进程加速

全球不同技术路线的竞争本质上是各国研发主体在技术成熟度、工程可行性、商业化经济性之间的权衡选择。国家队与大型科研机构多选择发展相对成熟的托卡马克路线,稳步推进工程化验证。民营企业更偏向紧凑型、低成本路线,以快速实现技术里程碑、缩短商业化周期。德国在仿星器等特色路线上保持长期投入,已形成技术储备。美国则凭借强大的基础科研能力与资本实力,实现全路线并行布局,在惯性约束与高温超导托卡马克两大方向均居全球领先地位。

从现有装置布局各国计划看,托卡马克路线仍是未来全球核聚变工程化的主流路线,高温超导技术突破将成为实现商业化经济性的关键。仿星器、惯性约束、球形托卡马克等路线具备差异化发展潜力,有望成为重要补充。多路线并行探索、相互借鉴、协同发展,将是全球核聚变发展的趋势。

此外,私营资本大规模涌入是近十年全球核聚变领域最显著的变化。全球主要国家形成了差异化的“公私合作”模式,其背后是各国科技

体制、资本市场、产业基础的深刻差异,并决定了核聚变商业化探索的进程与效果。

当前核聚变处于基础科研向工程化应用转变的关键阶段。核聚变的多种技术路线并存,说明技术发展仍存在不确定性,商业化时间难以确定。然而,随着国际合作项目稳步推进、各国政府高度重视、商业资本大量涌入,以及人工智能、量子计算等前沿科技发展,核聚变商业化进程正在加速。

高温超导技术将成为重要突破方向。随着高温超导材料性能提升

与大型磁体工程技术的成熟,全高温超导托卡马克将成为全球研发焦点,紧凑型、低成本装置将加速技术迭代,大幅缩短商业化进程。

人工智能等交叉技术将深度赋能核聚变研发,成为技术突破的核心驱动力。人工智能将全面应用于等离子体实时控制、聚变堆设计优化、实验数据处理等全流程,实现智能、高效运行。量子计算、先进材料、精密制造、低温工程等交叉领域的技术突破,将持续推动核聚变工程技术进步,为聚变堆商业化提供坚实支撑。

### 链接

## 多国加码核聚变 共探未来能源新路径

本报讯 据油价网近期报道,法国、韩国等国家相继刷新了等离子体约束时长纪录,扫清了核聚变发展的技术障碍。此外,美国、德国、加拿大的民营企业也纷纷发力,目标是未来几十年实现核聚变商业化。核聚变有望提供巨量低碳能源,且不会产生长寿命高放射性核废料。

美国已在弗吉尼亚州选址建设全球首个并网商用核聚变电站(ARC

示范电站),目标是2030年前后将核聚变电力并入电网。

法国WEST反应堆和韩国KSTAR装置研究人员已将等离子体约束时间提升至新水平,为国际热核聚变实验堆(ITER)项目提供了支撑。国际热核聚变实验堆位于法国南部,重2.3万吨。

德国正制订资金支持计划,作为其核聚变行动计划的一部分,并将为

初创企业提供支持,出台监管框架。德国科研、技术与航天部部长多罗特娅·贝尔表示:“核聚变行动计划将为德国建设全球第一座核聚变电站铺平道路。”

加拿大近期宣布,将在安大略省成立新的核聚变能源中心。项目资金来源包括:加拿大联邦政府及加拿大原子能有限公司出资3300万加元(约合1.7亿元人民币);安大略省政

(庞晓华)

燕燕 AI制图