

可控核聚变 终极能源解决方案值得期待

本报记者
张炯强

在探索宇宙奥秘与解决能源危机的双重驱动下,自上世纪五六十年代起,人类开始将目光投向了核聚变——这一被誉为“人造太阳”的终极能源解决方案。核聚变,作为自然界中恒星发光发热的基本原理,其能量释放巨大且几乎无放射性废物产生。如果拥有了它,人类长期面临的能源危机、碳排放等一系列问题将迎刃而解。

挑战

近日,复旦大学举办了一场名为“聚核之光:启终极能源,筑未来之光”的论坛,探讨“人造太阳”何时到来。复旦大学现代物理研究所/核科学与技术系教授许敏在演讲中指出,毫无疑问,核聚变带来的是清洁、高效、可持续的理想能源。聚变能源的核心目标是突破“聚变三乘积”这一关键指标。全球科学家历经数十年攻关,当前国内BEST建设,环流器三号升级改造等项目如火如荼,国外国际热核实验堆(ITER)、美国国家点火装置(NIF)频传捷报,但仍面临三大核心挑战:燃烧等离子体稳态运行控制、耐高能中子辐照和高热负荷材料、氚循环及氚自持。

许敏介绍,实现核聚变取决于三个要素——密度:足够多的反应粒子;离子温度:足够的能量;能量约束时间:足够的能量保存。

核聚变燃料主要包括氘和氚,这些燃料在核聚变反应中释放出巨大的能量,具有几乎无限的供应潜力。氘(D):氘是氢的同位素,存在于自然界中,主要来源于海水。每升海水中含有约0.03—0.035克氘,储量丰富。氚(T):氚是另一种氢的同位素,地球上不存在,通常通过锂与中子反应人工合成。

许敏指出,以氘—氚(D-T)聚变为生的聚变路线已经逼近点火条件,首先,

等离子体的控制和约束是核聚变技术的核心难题。需要通过引力、惯性或磁场实现非接触式约束,以保持高达1亿摄氏度的高温等离子体燃料。

其次是耐高能中子辐射、高热负荷材料。在核聚变反应中,反应堆内部的材料需要承受极高的温度和强大的辐射。常用的材料如钨和钼在长时间运行中会出现疲劳、腐蚀和脆化等问题。因此,开发能够在极端条件下长期稳定工作的新型材料是核聚变技术发展的关键之一。

最后的难题是氚的实时产生和在线回收。自然界中没有氚,未来的D-T聚变反应堆必须在聚变堆中实时地利用锂和中子的相互作用来实时地产生氚,并将这些产生的氚分离、提纯回收并实时用于聚变堆的在线聚变反应。

机遇

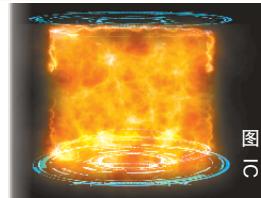
当今世界,核聚变已成为大国科技竞争的热点。值得一提的是,除了政府决策,近年来,商业资本大量涌人聚变能开发领域。截至2025年,全球已成立数十家私营或公私合营聚变企业,投资额超过100亿美元,上下游供应链企业达数百家。

许敏指出,在世界各国协同努力下,一些新技术的推出,有望使得聚变技术尽早破局。高温超导磁体与人工智能助力聚变迎来重要发展机遇。随着磁场强

度的提高,聚变功率呈四次方增长,不仅能显著提升聚变功率,还可适度缩减装置造价与规模;人工智能则能为等离子体位形预测和控制、聚变相关材料体系研究提供解决方案。此外,国际合作是聚变发展的关键支撑,ITER聚集30多个国家力量,中国参与其中实现了技术、人才与话语权的全面提升。他呼吁,聚变产业需产业链协同发展,政府、科研机构、社会资本携手推进,通过技术跨界转化反哺研发,降低度电成本。

论坛圆桌环节,几位嘉宾围绕聚变发展拐点判断、燃料路线选择、AI赋能以及国际合作等展开深度对话,多维度解析行业发展态势。

正如本次论坛主题所言,“聚变之光”不仅象征着技术理想的照进现实,更代表着中国在全球能源变革中迈向前沿的决心与信心。从国家大科学工程到初创企业探索,从高校基础研究到资本耐心陪伴,中国正逐步构建起具有自主知识产权与产业主导权的聚变创新生态。未来十年,将是聚变技术从“点火”走向“发电”的关键窗口期。在这场关乎人类能源命运的赛跑中,中国不仅要“参与”,更要“引领”。正如多位嘉宾所言:“聚变不是一国之事,而是全人类之愿。”在这条充满挑战与希望的道路上,中国聚变,正稳步前行。“人造太阳”带来的“第一度电”近期值得期待。



图〇

专家观点

华中科技大学教授、东昇聚变CTO武松涛:氘氚聚变因实现条件简单成为国际主流,但存在材料辐照损伤、氚资源稀缺等问题。

上海交通大学教授、翌曦科创始人金之俊:聚变对高温超导磁体要求严苛,需承受20多个特斯拉强磁场与数万安培大电流,产生的洛伦兹力接近材料极限。国内理论研究不逊于美国,但工程迭代稍慢,核心短板是缺乏完善的测试平台,呼吁在上海建设第三方测试平台。在AI与超导磁体的结合上,他提到团队已引入AI专家优化磁体设计,通过AI技术提升设计效率与精准度。

深势科技创始人兼首席科学家张林峰:聚变领域交叉需求极强,AI能在方程式求解、材料辐照损伤模拟、系统控制等方面提供全方位助力。谈及国际化与数据开源,他认为开放是实现领跑的必要条件,AI领域的经验表明,数据共享与协同创新能加速技术突破,中国聚变领域应积极推广数据开源,形成创新合力。

复旦科创投资总监陈孝林:可控核聚变正处于技术研发向工程化验证、产业培育的关键窗口期,发展呈阶梯式加速。资本需扮演“耐心资本”与“生态资本”角色,长期陪伴企业,对接资源、推动跨领域融合。高校是国际合作重要纽带,应发挥学术交流与人才引进的灵活优势。

6000吨“人造太阳”合肥启航

全球首个紧凑型聚变能实验装置BEST冲刺2030发电演示目标

可控核聚变行业资深观察员,合肥太阿聚变科技有限公司 刘芳 翁竑

科学使命

架起“实验”到“商用”的桥梁

BEST的核心使命是实现三大目标,构成从物理探索到工程验证的完整闭环:在等离子体物理领域,探索高性能氘氚(D-T)方案,实现科学盈亏平衡($Q \geq 1$),研究全钨环境下的约束问题,开发接近燃烧等离子体条件的先进运行模式($Q \approx 5$);在聚变技术与工程领域,验证高场超导磁体、高热负荷钨偏滤器等关键技术,演示集成式氚燃料循环,为中国聚变工程示范堆(CFEDR)提供直接技术支持;在聚变核安全领域,测试氚泄漏、除氚系统和约束屏障性能,为聚变堆安全许可积累数据。

作为“中试平台”,BEST将重点攻克三大挑战性问题:材料与等离子体一壁相互作用(PWI)物理,验证全钨壁在长脉冲、高能量通量下的使用寿命与性能稳定性;实验包层模块(TBM)的性能验证,为商业化聚变堆的能量提取与氚增殖提供关键数据;氚泄漏等离子体的能量与粒子排出,优化偏滤器系统的设计,确保能量高效排出且不损伤装置。这些研究成果将直接服务于聚变新能提出的“三步走”战略:以BEST为基础,推进聚变工程示范堆(CFEDR)建设,最终实现首个商业聚变堆的落地,目标在20年内让聚变能实现全球商业应用。

BEST作为全球首个紧凑型聚变能实验装置,不仅是技术集成的“集大成者”,更是中国聚变人多年深耕的“心血结晶”。2027年建成、2030年实现发电演示,聚变能从“实验室奇观”变成“可触摸的未来能源”已不是遥远梦想。

