

“人造太阳”离圆梦又近一步

——揭秘中国可控核聚变

□ 韩维正 刘乐艺

万物生长靠太阳。今天支撑人类社会运转的几乎一切能源，从煤、石油、天然气，到风能、生物能，其本质都是太阳能，而太阳上的能量来自内部的核聚变反应。

就像儿歌中所唱的，“我有一个美丽的愿望，长大以后能播种太阳”。长久以来，人类一直希望通过可控核聚变反应，来创造出“人造太阳”，从而获得源源不绝的能源，大幅改善人们的生活。

就在前不久，中国核工业集团宣布，新一代可控核聚变研究装置“中国环流器二号M”，预计于2020年投入运行。中核集团核工业西南物理研究院院长段旭如表示，该实验装置的建成将为人类真正掌握可控核聚变提供重要技术支撑。我们距离“人造太阳”的梦想，又近了一步。

用之不竭的清洁能源

众所周知，石油是工业的血液。但以石油为代表的化石能源，有两个绕不开的问题：一是不可再生，二是污染。即便页岩气、可燃冰等新型能源被不断开发，但归根结底都有消耗殆尽的一天。而目前的核裂变能也存在反应原料（铀等）有限、核废料放射性污染的问题。

有没有一种能源，既无穷无尽，又清洁环保？还真有一个，就是可控核聚变。

从“进口”上说，可控核聚变所需的反应原料（氘原子和氚原子），在地球上非常丰富。氘在海水中储量极大，1公升海水里提取出的氘，在完全

的聚变反应中可释放相当于燃烧300公升汽油的能量；而氚可通过中子与锂反应生成，在地壳和海水里，锂都是大量存在的。

从“出口”上说，可控核聚变的产物为氦和中子，不排放有害气体，也几乎没有放射性污染，具有环境友好的优点。

“核聚变能一旦实现和平利用，地球上的能源将取之不尽用之不竭，因能源短缺带来的社会问题可得到彻底解决，人们的生活水平也将因此而得到极大提高。”段旭如说，像海水淡化、星际飞船这类工程，过去因耗能太大而令人们犹豫不决，而未来在可控核聚变能的支持下，都将能够更快发展。

不仅零污染、用不完，可控核聚变还有另一个重要特点：固有安全性。许多人一想到用核能发电，就会想到切尔诺贝利核事故或者福岛核事故，从而有了“恐核”心理，谈核色变。事实上，核聚变反应需要氘氚燃料达到上亿摄氏度的高温和足够高的密度等苛刻条件，任何一点细微条件的缺失，都会导致温度密度的下降，致使聚变反应停止。

然而，世界上仍然有许多环保机构公开指责核聚变所存在的安全隐患，包括产生核废料以及核泄漏的风险。对此，段旭如解释：“由于燃烧的氘氚等离子体被磁场约束在真空容器内，其密度比空气低数个量级，聚变堆氘氚燃料含量也较低，因此不会引起爆炸，也不会导致泄漏事故。”

理想很美好，但实现起来并不容易。一个最明显的问题，就是用什么容器来承载核聚变。

据段旭如介绍，在地球上利用核

聚变能，要求在人工控制条件下等离子体的离子温度达到1亿摄氏度以上。“1亿摄氏度是什么概念？太阳的核心温度大概在1500万至2000万摄氏度；而地球上最耐高温的金属钨在3000多摄氏度就会熔化。1亿摄氏度，已经超过太阳核心温度的5至6倍了。”中核集团核工业西南物理研究院特聘研究员钟武律解释说，“在地球上，没有任何材料可以把1亿摄氏度高温的等离子体给直接包裹起来。”

不过这个问题还是难不倒人类科学家，他们“无招胜有招”，想出了用强磁场来约束高温核聚变燃料的办法。但具体用什么装置来实现，还要继续探索。从20世纪50年代开始，英、美、苏等国科学家前赴后继，快箍缩、磁镜、仿星器等不同的技术路线此消彼长。竞争延续到了1960年，最终由苏联科学家提出的托卡马克方案异军突起，效果惊人，国际聚变界的研究方向随之转向了托卡马克。

攻坚克难的核聚变人

当世界的可控核聚变研究如火如荼时，中国“人造太阳”的建设也没有掉队。早在1955年，钱三强和刚留美归来的李正武等科学家便提议开展中国的“可控热核反应”研究，这与国际社会关注核聚变几乎同步。

1965年，根据国家“三线”建设统一规划，在四川省乐山市郊区，建立了当时中国最大的核聚变研究基地——西南物理研究所，这也是中核集团核工业西南物理研究院（以下简称“核西物院”）的前身。

而中国核聚变研究史上的重要里程碑，当属1984年中国环流器一号

(HL-1)的建成。这是中国核聚变领域的第一座大科学装置，它为中国自主设计、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80年代，作家莫然曾造访位于108级石梯之高的荒山上的研究所。据她回忆，刚搬迁至乐山时，所里条件简陋，可谓一贫如洗。研究者缺乏住所，甚至只能睡在帐篷里。但中国可控核聚变研究的“摇篮”恰恰是诞生在这样艰苦的环境中，这离不开研究者开荒拓土、筚路蓝缕之功。正如莫然所说：“尽管研究所的房间就像山洞一样，但我们的科学家具有舍己的奉献精神，就在那样的环境中，他们制造出了‘中国环流器一号’，光设计图纸就有3层楼那样高。”

从此，中国磁约束聚变一步步从无到有，从小到大，从弱到强。1995年中国第一个超导托卡马克装置HT-7在合肥建成；2002年中国建成第一个具有偏滤器位形的托卡马克装置中国环流器二号A(HL-2A)；2006年，世界上第一个全超导托卡马克装置东方超环(EAST)首次等离子体放电成功……

而预计2020年投入运行的“中国环流器二号M”装置将成为中国规模最大、参数最高的磁约束可控核聚变实验研究装置，其等离子体体积为中国现有装置的2倍以上，离子温度将达到1亿摄氏度以上，可将电流从中国现有装置的1兆安培提高到3兆安培。

作为一个历经多年研制的实验项目，中国环流器二号M精细的部件工艺很多都是前无古人的创造。就像在装置设备“真空室”中，许多细小的误

差是现有检测仪器所无法感知的，很多时候甚至需要自主开发新的检验设备，因为连尘埃般大小的缺陷都会影响最终的实验结果。

为了保障中心柱这个高约2层楼、重约80吨的装置在移动过程中不受磕碰，且安装精度不超过0.1毫米偏差，二号M装置线圈团队在1个月内做了十几种方案，短短2分钟的路程，研究团队最终耗费了近9个小时才成功完成搬运。“移动中，大家像呵护宝贝一样。”项目线圈组负责人刘晓龙说，“还不错，我们成功了。”

“既然把任务交给我们这个团队了，我们就有义务把事情做好，给中核集团、给核工业乃至国家一个交代。”中国环流器二号M装置项目经理刘永的话掷地有声。

走向国际的中国团队

可控核聚变研究非常困难，难到什么程度？钟武律给我们做了一个比较：“世界上第一颗原子弹爆炸以后，不到10年核裂变就实现了和平利用，建成了核电站。科学家们想，氢弹成功以后，应该也用不了多长时间就能够实现核聚变的和平利用，实现可控核聚变。但后来的研究发现，并没有那么简单，它需要全世界的科学家一起来努力完成。”

于是就有了2006年国际热核聚变实验堆(ITER)计划的签署。由中国、美国、欧盟、俄罗斯、日本、韩国和印度七方参与，计划在法国南部普罗旺斯地区共同建造一个世界上最大的托卡马克装置。ITER是目前全球影响最深远且最大的国际合作项目之一，也是中国以平等身份参加的最大

国际科技合作项目。其中，中国承担了大概9%的采购包研发任务。

“我国这些年磁约束聚变研究进展得益于参加ITER计划。”段旭如说，比如中国环流器二号M在设计建造过程中，通过与国际上现有托卡马克装置的学习交流，吸取了许多设计建造与运行托卡马克的成功经验。

钟武律还举了核西物院研发ITER第一壁采购包半原型部件的例子。“这是中国团队承担的一份高难度任务。当时世界上满足ITER第一壁特殊材料要求的只有美国。我院的科研团队联合国内有关单位通过10多年的努力，不仅在特殊材料的制备上，而且在焊接工艺等多项技术上取得了突破，2016年成功研制的ITER超热负荷第一壁半原型部件在国际上率先通过认证，也让中国在这个技术上达到世界先进水平。”钟武律说，“目前中国承担的ITER采购包，不管是在研发进度还是在完成质量方面，都处于七方的前列。在国际聚变舞台上，中国有了更大的话语权。”

对中国可控核聚变实力的认可，还在不断升级。2019年9月30日，ITER主机安装一号合同在北京签约，由中核集团牵头的中法联合体中标该工程。这个工程安装的是ITER装置最重要的核心设备，其重要性相当于核电站的反应堆、人体里的肝脏。这是有史以来中国企业在欧洲市场中标的最大核能工程项目合同。

ITER组织总干事比戈说：“我们很高兴找到了高素质的积极的合作伙伴来完成这项工作。我们期待着与世界知名的行业专家合作，按时、按规格安装世界上最具挑战性、最有前途和最重要的科学设备之一。”

“通过国际竞标拿到了ITER项目最核心部分的安装工程，证明我们的团队在世界上是领先的。”中核集团董事长朱永胜豪情满怀地总结道，“这也标志着我国在核能事业、在核能工程的建设安装方面，达到了世界先进水平。”



脚下循环流动的热动力

你可曾想到温泉之下蕴藏的深层秘密，那正是地热的功劳。中国石化的工程师们在勘探石油的过程中，早已发现了地热这一可再生资源的巨大能量，并用它帮助河北雄县这个知名的温泉村实现了零排放家庭供暖，建成华北地区首座绿色“无烟城”。现在，中国石化拥有的循环地热科技，正在造福更多省区，温暖中国大地。

未来我们还将做到更多……

中国石化，与你一起用绿色改变生活。

