

“人造太阳”EAST： 向人类能源终极梦想迈进



我们要在没有任何经验可借鉴的情况下，造出一个需要同时承载大电流、强磁场、超高温、超低温、高真空、高绝缘等复杂环境的装置，这对工艺设计和材料提出了极高的要求。

宋云涛
中科院等离子体物理研究所所长



合肥超导托卡马克核聚变实验装置 中科院合肥物质科学研究院供图

◎本报记者 吴长锋

有“人造太阳”之称的全超导托卡马克核聚变实验装置5月28日取得新突破，成功实现可重复的1.2亿摄氏度101秒和1.6亿摄氏度20秒等离子体运行，创造托卡马克实验装置运行新的世界纪录。

地球万物生长所依赖的光和热，源于太阳核聚变反应后释放的能量。而支撑这种聚变反应的燃料氘，在地球上的储量极其丰富，足够人类利用上百亿年。

如果利用氘制造一个“人造太阳”来发电，人类就能够彻底实现能源自由。曾经童谣里唱的“种太阳”，正被人类一点点变成现实。

用羽绒服、牛仔裤换 来托卡马克

制造“人造太阳”面临一个突出的现实问题：用什么容器来承载核聚变？要在地球上利用核聚变能量，在人工控制条件下等离子体的离子温度需达到1亿摄氏度以上。而目前地球上最耐高温的金属钨的熔化温度是3000多摄氏度。这意味着，找不到盛装如此高温等离子体的容器。

从20世纪50年代开始，我国与国际基本同步，开始了在可控核聚变领域的研究，并于1965年在四川乐山建成了我国核聚变研究基地——西南物理研究所（今中核集团核工业西南物理研究院）。当时，国际上不同的技术路线此消彼长，最终苏联科学家提出的托卡马克方案异军突起，国际核聚变界的重点研究方向随之转向了托卡马克。

20世纪70年代，国家拟在合肥建造一个当时世界先进水平的大型热核反应实验装置。选择合肥的一个重要原因，是中科院电工所已于20世纪60年代在合肥建成一个储能达到 2×10^6 焦耳的大型储能电感装置（又称为“八号电感”）。此电感装置能为热核聚变装置的强大脉冲电源提供重要支持。当时策划中的托卡马克实验装置就被命名为“八号装置”，向国家申请立项的大科学工程项目就被称为“八号工程”。

20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。当时，经济情况非常困难，我国科研人员只能依靠自己的力量，对T-7及其低温系统进行了根本性改造。

通过科研人员的不懈努力，先后建成常规磁体托卡马克HT-6B、HT-6M等实验装置。1994年，我国第一个圆截面超导托卡马克核聚变实验装置“合肥超环”（HT-7）研制成功，使我国成为继俄、法、日之后第四个拥有超导托卡马克装置的国家，也是我国建成并投入运行的首个超导托卡马克装置。

1997年11月17日，中国科学院在合肥召开HT-7超导托卡马克装置鉴定会，鉴定委员会对建设HT-7装置的决策和工程设计研制及两年多的运行实验情况给予高度评价。

HT-7超导托卡马克装置与我国年轻的聚变人一起走过了17个春秋，这期间完成了第10万次放电。

2013年5月，HT-7正式被中国科学院和原环保部批准退役，成为我国首个获批退役的大科学工程装置。HT-7是一个传奇，一段历史，也是中国磁约束聚变研究走向世界前沿的见证。

边设计、边研发，“人 造太阳”在中国点亮

1998年7月，国家“九五”重大科学工程“HT-7U超导托卡马克核聚变实验装置”（即“全超导托卡马克核聚变实验装置”，以下简称EAST）正式立项。2000年10月，EAST正式开工建设。

“EAST最大的创新点，是把全超导和非圆截面结合起来，产生稳态和以先进模式运行的等离子体，使研究人员能在稳态条件下对约束改善、破裂控制、粒子输运、能量平衡、功能材料和杂质控制等实现聚变堆稳态运行所必须面对的重大物理问题进行深入研究。”在当时的EAST大科学工程团队的领军人物万元熙院士看来，物理上的先进性，必将带来工程上的巨大挑战。

在20世纪90年代末，中国聚变工程技术和超导工业十分薄弱，没有研制大型超导磁体、大型低温系统的经历，国际上尚没有任何一个国家研制和建造过全超导托卡马克装置。

万元熙院士带领团队发扬“没有条件创造条件也要上”的精神，在简陋的实验室里成功制造出关键部件和设备，整个项目自研率达90%以上。

“我们要在没有任何经验可借鉴的情况下，造出一个需要同时承载大电流、强磁场、超高温、超低温、高真空、高绝缘等复杂环境的装置，这对工艺设计和材料提出了极高的要求，比如芯部的等离子体温度高达一亿摄氏

度，线圈中的温度却要求达到零下269摄氏度，项目难度可见一斑。”中科院等离子体物理研究所（以下简称等离子所）所长宋云涛告诉记者，为了达到聚变实验装置所要求的条件，EAST团队的科学工作者自主创新，自主设计，研发了大部分具有我国自主知识产权的关键技术，创造性地完成了EAST装置主机的总体工程设计。

研制EAST过程中，许多关键技术取得突破并达到国际先进水平，同时也填补了多项国内空白：大型超导磁体关键制造技术的研发，成功地生产出EAST所需的全部超导磁体；创造性地设计、建成了国内最大的大型超导磁体测试实验系统；创新性地设计、建造了我国最大的低温系统，制冷能力超过2kW/4.5K……

“EAST装置建设，瞄准世界前沿，高标准、严要求地完成了国家大科学工程建设任务。同时，严格质量管理，创新性地建立和运行EAST质量管理体系。”宋云涛说。

到2005年底，EAST完成了主机总装以及各分系统的研制和安装工作。2006年3月，成功进行了首次工程调试。2006年9月26日，EAST首轮物理实验成功获得高温等离子体。

历经8年艰苦奋斗和自主创新，世界上新一代全超导托卡马克核聚变实验装置在中国率先建成并正式投入运行，为未来清洁能源的利用和发展提供实验研究平台。2006年1月，EAST实现电子温度超过5000万摄氏度，两年后又实现电子温度1亿摄氏度等离子体运行，而太阳核心的温度也不过1500万摄氏度。EAST性能逐步提升。2006年，首次等离子体放电成功，时长仅仅3秒；2017年7月，实现了稳定的101.2秒稳态长脉冲高约束等离子体运行，创造了新的世界纪录。

2007年3月1日，国家发改委组织专家对EAST进行竣工验收。专家们认为，中国科研人员在国际上尚无全超导托卡马克的情况下，边建设、边研发，解决了大型超导磁体、大规模低温制冷等一系列关键技术问题，自主设计、加工制造了关键部件，形成了一系列新技术成果。时任国家发改委副主任张晓强在验收会上指出：EAST大科学工程全面、优质地完成建设任务，是我国科技界的一件大事，是中华民族值得骄傲的成就。

从“科学岛”到“世界 聚变舞台的中心”

在安徽省合肥市西郊，有一座面积不到3平方公里、三面环水的半岛。这里就是中

国核聚变最重要的研究基地——等离子所所在地。EAST也栖身于此。

走进EAST大厅，看到的是一片紧张有序的场景，本年度的等离子体物理实验即将开启，剑指新的世界纪录。

在对受控核聚变探索过程中，越来越多国家的科研人员认识到，“人造太阳”科学装置规模大、建设周期长、投资成本高，任何一个国家“关起门来搞建设”都无法解决所有难题，必须“聚四海之气，借八方之力”。

1985年，美苏首脑为此提出了国际热核聚变实验堆（ITER）计划。但在2001年之前，这个“俱乐部”一直将我拒之门外，其中主要原因是我国的科研水平还不高。但随着EAST研制工作推进，这个局面逐渐改变。

2001年，由于美国退出，ITER成员国出于分摊经费的考虑，希望扩大参与国的范围。我国借此再次申请加入，2003年，正式以“平等伙伴”身份加入了ITER计划谈判——加入这个高“入门会费”的俱乐部，每个成员国至少要承诺10%的投入，约合人民币100亿元。

“加入ITER计划前，国际主流聚变会议上，几乎没有我们的声音。如今，越来越多我国学者受邀在大会作主题报告、口头报告，甚至担任会议主席。”宋云涛说，加入ITER计划后，我国逐渐走向世界聚变舞台的中心。

国际聚变能大会，是核聚变领域的奥林匹克。像宋云涛这样的我国学者，曾经是无缘进场的。而今，等离子体所已连续10年被大会特邀作主题报告；这一领域的国际顶级杂志，连续多年都以封面故事形式介绍等离子体所年度研究工作。越来越多双眼睛在关注这颗来自“岛”上的“太阳”。位于法国的ITER总部也正期待着中国“小太阳”带来更多光和热，把“人造太阳”从梦想变为现实。

借助我国首个偏滤器型位的核聚变实验装置（HL-2A）和EAST这两个大科学装置，我国与全球120多个聚变研究机构建立了合作。每年平均有500人次国际专家访问我国，开展与我国相关聚变研究机构的合作研究。

回顾过去，人类认识核聚变的路已经走了很久。有人问：“在我们的有生之年，能不能看到一个真正的‘人造太阳’？”

中国科学院院士李建刚坦言，要将成果真正投入商用，变成每家每户可以用的电，可能至少还需要几十年，但他坚信：“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。”

李建刚： 希望看到聚变反应堆在中国发电

亲历者说

◎本报记者 吴长锋

我国受控核聚变研究始于20世纪60年代。一代又一代的科学家们数十年如一日，从青年、中年到暮年，坚守人类的能源梦想，并为之奋斗不息。

安徽省合肥市西郊有一座三面环水的半岛，被当地人称作“科学岛”。中国科学院合肥物质科学研究院便坐落于此。中国工程院院士李建刚自诩为“老岛民”。

上大学时，李建刚读到了一本关于聚变的小册子，对这个事关人类未来能源问题的聚变领域产生了浓厚的兴趣，从此踏上了这条研究核聚变的“不归路”。大学一毕业，李建刚就来到了“科学岛”，这一待就是36年，把一生最美好的时光全部留在了“科学岛”。

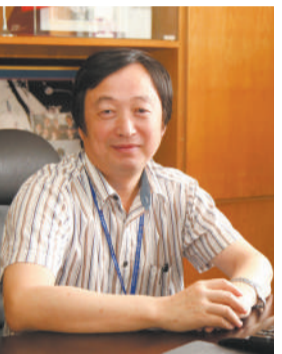
20世纪90年代，我们用生活物资换来了苏联退役的设施，从零起步开展超导工程研究，开始追赶；20世纪90年代初，建成我国首个、世界第4个超导装置——“合肥超环”，实现并跑；如今，EAST实现超越和领跑。从开展四代托卡马克装置研究并创造若干世界纪录，到参加国际热核聚变实验堆（ITER）计划并为ITER作出重大贡献，再到开展中国聚变工程实验堆工程设计与规划建设世界首个聚变示范电站……从老院士到新人所的研究人员，从物理学家到能工巧匠，在合肥的“科学岛”，三代聚变人坚守着能源梦想。

李建刚总是说：“能把人类的梦想、科学家的兴趣和国家的需要完美地结合在一起，对自己来说是件极其幸运的事。”

“像核聚变这样的大科学工程，需要全世界科学家历经几代的艰辛合作研究才能走向成功。”李建刚希望越来越多的年轻人能够理解核聚变，将聚变研究作为人生事业的选择。他叮嘱青年人：“核聚变是好几代人的梦想，青年人要珍惜国际交流合作的机会，勤于学习，肯于钻研，早日成长起来，扛起核聚变发展传承的重任。”

“我一辈子，做了近20万次物理实验，有近4万次失败了。这是一个非常漫长的过程，但是我们会一直走下去。”李建刚说，中国聚变研究取得的进展，背后是三代科研工作者的无悔青春和人生的积累。三代聚变人将他们最美的青春奉献，才使我国聚变研究实现了从跟跑到并跑再到领跑的跨越。

“我最大的梦想就是在有生之年，让世界第一个聚变反应堆率先在中国发电，一盏盏灯泡被核聚变能点亮，而且点亮的第一盏灯泡一定要在中国。”李建刚说。



受访者供图

大事记

- 1998年7月 通过国家发展计划委员会立项
- 2000年10月 正式开工建设
- 2006年2月 首次工程调试成功
- 2006年9月26日 成功获得首次高温等离子体放电
- 2007年1月23日 成功获得首次大拉长偏滤器型位放电
- 2007年3月1日 通过国家竣工验收
- 2009年 成功获得稳定重复的60秒非圆截面双零偏滤器型位等离子体放电
- 2010年 成功实现了大于60多倍能量约束时间高约束模式（H模）等离子体放电，100秒1500万摄氏度偏滤器长脉冲等离子体放电
- 2012年 成功获得超过400秒的2000万摄氏度高参数偏滤器等离子体；获得稳定重复超过30秒的高约束等离子体放电
- 2016年1月28日 成功实现电子温度超过5000万摄氏度、持续时间达102秒的超高温长脉冲等离子体放电
- 2017年7月 实现了稳定的101.2秒稳态长脉冲高约束等离子体运行，创造了新的世界纪录
- 2021年5月28日 实现可重复的1.2亿摄氏度101秒和1.6亿摄氏度20秒等离子体运行