

大科学城里的“逐日”故事

本报记者 杨俊峰 徐靖



在“夸父”设施园区，有数座单体建筑(科研厂房)，它们都是聚变堆主机关键系统的子系统，每个科研厂房里都有多个系统正在建设和运行。

9月末的一个清晨，安徽省合肥市未来大科学城中国科学院合肥物质研究院等离子体物理研究所(下称“等离子体所”)下起了小雨。初秋的降温给这座研究所带来了丝丝凉意。而在研究所里，研究人员仍保持着热情的工作状态。在巨大的控制室内，各国科学家正认真地盯着面前3层楼高的大屏幕，屏幕上显示着全超导托卡马克装置EAST东方超环(以下简称EAST)的实施运行情况。在屏幕下方，EAST运行总负责人龚先祖正在进行一次新的实验。

龚先祖正在进行的实验，是磁约束可控核聚变的等离子体放电实验。为了解决当今世界面临的能源问题，参照太阳的核聚变反应，各国科学家从20世纪起就开始探索一种可能——利用地球上储量极其丰富的氘，在地球上建造一个“太阳”，为人类持续供应清洁能源。

在中国，这项“逐日”工作，已经持续了半个多世纪。历经4代科研工作者、40万余次实验、10余次创造世界纪录……中国在自主设计、自主建造的磁约束可控核聚变装置的研发之路上已经走了很远。近日，本报记者走进位于合肥未来大科学城里的等离子体所，实地探访这里的“夸父”科学家们“逐日”的新故事。

“让‘小太阳’悬浮在‘大冰箱’里”

在EAST控制室里，记者看到，

龚先祖正准备用鼠标启动一次等离子体放电。等离子体本身位于控制室的监视器后面，被封闭在一个装置真空室内。

每天，龚先祖和他的同事们从早到晚要进行约100次等离子体的放电实验。“每一次的放电实验都是向实现可控核聚变迈出的必要一步。”龚先祖说。

“可以解释一下可控核聚变的原理吗？”记者问。

“核聚变的基本原理是，两个较轻的核融合在一起形成一个较重的核，这一过程会爆发出强大的能量。比如，氢的同位素氘和氚融合反应过程中，就产生了核聚变。恒星产生能量的主要方式，就是核聚变。”等离子体所科普主管蔡其敏对本报记者说，“核聚变需要上亿摄氏度的高温才能实现，地球上找不到能够承受这么高温度的材料。科研人员后来发现，用强磁场可以把高温等离子体束缚在一定的空间范围内，这就是磁约束。”

EAST是一台全超导托卡马克核聚变实验装置。它的建设，是为了实现三大科学目标：电流1兆安、温度1亿摄氏度、运行维持1000秒。

托卡马克装置是一种环型聚变装置，用来约束带电的高温等离子体。“科幻电影《流浪地球》里推着地球往前走的行星发动机，就是核聚变装置。”龚先祖说，“托卡马克装置利用磁场来约束加热后的等离子体环——一种包含离子和电子的流体状物质状态，其温度比太阳核心还要高。等离子体维持的时间越长，就可以获得越多的聚变能源，这就是托卡马克的运行原理。”

“我们要维持稳定的磁场约束高温等离子体，需要给磁体通大电流产生强磁场。EAST的磁场强度要比地球的磁场强度高1万多倍，这对能源的消耗极大。”中国工程院院士、等离子体物理学家李建刚说，“为了使这一部分能量消耗减少，我们得让磁体超导。”

在EAST内部有30个超导线圈。在极低温条件下，这些超导线圈具有零电阻效应，通大电流可以产生稳定的约束磁场并且不会产生热量，使高温等离子体稳态运行成为可能。

超导对温度的要求极高，零下269摄氏度是它的标准温度。李建刚说，“聚变能就是一个‘小太阳’，我们要做的是让这个1亿摄氏度的‘小太阳’悬浮在一个零下269摄氏度的‘大冰箱’里，这件事情在我们之前全世界都没有做过。”

为建成EAST，等离子体所的科研团队花了6年多的时间，从开工到建设，发展了68项关键技术。其中有大型的超导技术、精准控制技术、加热技术、真空技术、射频技术、电源技术、低温技术等。“所有关键技术都是我们自己研发的。”李建刚说。

“2006年的9月16日EAST获得了第一次等离子体。”李建刚说，“当年我们EAST项目总经理万元照在世界原子能聚变大会上作报告，全场起立为中国的成就鼓掌。在那

一刻，作为一个中国人我觉得非常自豪。”

2023年4月12日晚9点左右，EAST在第122254次实验中成功实现了403秒稳态长脉冲高约束模式等离子体运行，创造了托卡马克装置高约束模式运行新的世界纪录。

“这样的纪录意味着，可控核聚变正一步步迈向商业化应用。”中国科学院合肥物质科学研究院副院长、等离子体所所长宋云涛说，“我们已经看到了可控核聚变实现的曙光。”

为下一代“人造太阳”研制“发动机”

中国的“人造太阳”究竟什么时候能走出实验室？

简单地说，要满足两个条件。一是稳定运行的时间足够长，这样才能持续释放聚变能量。二是产出的能量大于消耗的能量，这样才有经济价值。等离子体所副所长陆坤告诉本报记者，从稳定运行时长来看，目前还有很大提升空间。

陆坤说：“大家追求的肯定是一整天或者是很多天的连续运行，但科学是正一步步往前走的。接下来我们要冲击1000秒，或者是更长的时间。”

提升核聚变装置稳定运行时长的难点在哪？对于中国采取的磁约束路线来说，主要在于材料。陆坤说，尽管EAST装置本身并不直接接触高温等离子体，但仍然容易被逃逸的粒子

损伤。

陆坤表示：“参数高了，这些高能粒子肯定会逃逸。一些逃逸的高能粒子可能会打到一些部件上，如果时间长了，部件会有损伤。基于材料的不断发展，还有我们运行控制能力的增强，包括从结构上看是否还有更优化的地方，能够让其承受更高的热负荷，在这几个方面要一起努力。”

而从产出能量大于消耗能量的角度看，托卡马克装置内发生聚变反应要有功率巨大的辅助加热系统，这就需要消耗能量。而聚变开始后，会产生能量，这两者的比值叫作Q值，也就是聚变增益。Q值大于1，代表产出能量大于消耗能量，也就是净产出。不过，目前全球托卡马克装置的Q值很少达到1。

陆坤说：“只要Q值大于1就可以尝试着去发电了。我们最终追求的目标是Q值大于30，这样会有经济性，大家才能用得起。我们要探索的就是在时间尺度上能够去稳定地维持高参数的等离子体，为后续新的装置提供核心的技术支撑。”

要造出真正有实用价值的“人造太阳”，还得跨越从实验装置到实验堆、工程堆、示范堆、商业电站的多个阶段，需要研制一代代科技含量更高的“人造太阳”。

为下一代“人造太阳”研制“发动机”，“夸父”的使命艰巨。

“夸父”的学名为“聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)”，是国家“十三五”重大科技基础设施，

2018年12月获批开工建设。

走进聚变堆园区11号科研厂房，记者看到了那片巨大的中空“扇瓣”，就是CRAFT部分部件的雏形。

“它是‘夸父’的核心部件1/8真空室及总体安装实验平台。”蔡其敏告诉记者，8个“扇瓣”将组成一个“大橘子”，成为未来“人造太阳”的重要组成部分，相当于一个锅炉，能够为上亿摄氏度的等离子体运行提供高质量的真空环境。

在“夸父”设施园区，有14座单体建筑(科研厂房)，它们都是聚变堆主机关键系统的子系统，每个科研厂房里都有多个系统正在建设和运行，有的还在加紧研制过程中。在这些装置上，将开展一系列关键技术预研，为未来中国建造真正能够实现核聚变发电的“聚变堆”提供核心技术基础和研发平台。

在宽阔的厂房里，来自170余家国内外合作单位的1000多名建设者正奋力攻关一系列科研与工程技术难题，力争实现这些目标——国际上时间最长的百秒量级强流离子束引出，运行温度最高、研究功能最完备的锂铅实验平台，规模最大的Nb3Sn线圈热处理系统……

宋云涛说，基于几代人的持续学习、研究、创造，EAST的国产化率超95%，关键设备、材料实现自主研发，而“夸父”的国产化率将提升到100%。

目前，“夸父”主体工程已完成116项关键里程碑当中的70余项，项目从子系统的实验室研发测试阶段进入关键部件的研制和现场集成及调试阶段。总体进度已超70%，预计“夸父”将在2025年底建成。

2024年8月28日，科学杂志《自然》(Nature)期刊发表了题为《聚焦中国如何在核聚变的赛道上领先世界》(“Inside China's race to lead the world in nuclear fusion”)的新闻特写报道，深入探讨了等离子体物理研究所和中国在核聚变领域的发展成就和未来的发展规划前景以及在全球范围内的合作竞争态势。文章详细介绍了EAST、CRAFT、ITER及中国在磁约束聚变科学研究和工程技术研发方面的进展，以及国家层面的支持和发展。

文章对中国的核聚变技术发展表示赞叹：“中国在核聚变研究方面的优势在于其在开发建造反应堆所需的材料、部件和诊断系统方面的速度和专注度。中国对建设核聚变技术队伍的高度重视也使该国在人才方面具有优势。”文章援引麻省理工学院核科学家丹尼斯·怀特(Dennis Whyte)的话称：“在可控核聚变领域，中国已经从几十年前的无名小卒成长为拥有世界一流能力的人。”

“自从远古以来，我们的祖先就有‘夸父逐日’的梦想。今天，我们把聚变研究变成工程实践的第一步。”李建刚说，“我相信中国聚变人一定会与世界各地的同行一起，让可控核聚变最终成为现实。”

(本版图片均为等离子体所供图)



1994年12月，由T-7改造成的超导托卡马克装置HT-7首次获得等离子体，成为中国第一台超导托卡马克。



图为世界上首台全超导托卡马克装置EAST东方超环，EAST的国产化率超95%，关键设备、材料实现自主研发。



2006年10月16日，国家重大科学工程EAST项目总经理万元照在第21届世界聚变能大会上作首个邀请报告，题为《EAST项目进展概况及未来规划》。

可控核聚变是未来人类能源的主力

徐国盛

在人类社会发展的漫长历程中，能源始终是推动文明进步的关键因素。从最初的薪柴燃烧到煤炭的大规模利用，从石油的崛起再到核能的初步应用，每一次能源领域的重大变革都深刻地改变了人类的生活方式和结构。然而，随着人类对能源需求的不断增长以及对环境保护的日益重视，传统能源的局限性也日益凸显。在这样的背景下，可控核聚变作为一种极具潜力的未来能源形式，逐渐走入了人们的视野，并成了科学界和工程界的研究热点。

我们为什么需要可控核聚变？因为它是人类解决能源问题的“钥匙”之一。由于可控核聚变可以非常稳定地提供大规模的能源，所以它将会是未来人类能源的主力。

首先，可控核聚变的原料在地球上储藏丰富。托卡马克装置是实现磁约束可控核聚变的方式之一，通过磁场约束(简称“磁约束”

辅助加热制造氘、氚(氢的同位素)形成的等离子体，实现聚变的环境和超高温。核聚变使用氘、氚作为燃料。氘在自然界中广泛存在，每1升海水中含30毫克氘，而30毫克氘聚变产生的能量相当于300升汽油燃烧。

其次，与现有能源相比，核聚变的突出优势是对环境非常友好。与化石燃料相比，核聚变不产生二氧化碳等温室气体。这对于我们实现碳达峰碳中和，有非常大的帮助。

此外，与现有核裂变相比，可控核聚变的生成物没有污染，安全清洁。

第三，从安全性上，核聚变也不会像核裂变那样产生失控的连锁反应，热核反应堆如果在事故状态能增加时，等离子体与真空室壁的相互作用强度会增大，由此进入等离子体的杂质随之增加。这样就会导致等离子体破裂以致停止聚变反应，所以聚变堆熔毁的风险很低。

最后，可控核聚变发电站产生的电量非常巨大。核聚变产生的能量密度非常高，核聚变能量释放率远超传统化学能源的燃烧，可达百万倍之差，如产生聚变的另一种原料氘由中子和锂6反应释放能量就比锂电池高百万倍。这意味着相对较小的燃料量可以产生巨大的能量。1克氘燃料聚变所获得的能量相当于燃烧8吨石油。基于这种能量密度所产生的电能不但巨量而且便宜。

从人类发展来看，现在人类对电能的消耗增长速度非常快。而人工智能等新技术的发展对电力的需求增长速度也远远超过预期。就目前新能源的发展情况来看，可控核聚变能源是最有希望的、最安全的、并且正在走向现实的清洁能源之一。在不久的将来，随着“夸父”的建成和投入使用，以及后续的氘氘聚变实验的突破，中国的可控核聚变聚变堆将最终从实验室走向应用。

未来，核聚变将在人类的能源系统中占据非常大的比重，来自核聚变的清洁、持久且便宜的电能会走进千家万户。我相信，在中国和全世界科学家的通力合作、共同努力下，这一天已经离我们不远了。

(作者为中国科学院合肥物质研究院等离子体物理研究所副所长，本报记者杨俊峰采访整理)