

本刊记者/李娜

可控核聚变研究获进展 “人造太阳”何日“辉耀”四方?

在过去的几十年中,可控核聚变被认为能给人类带来无穷无尽的清洁能源,虽然在该领域投资无数,但科学家取得的进展仍然非常有限。然而,科学家依旧认为,持续巨额投资必将带来巨大回报,因此相关试验仍在紧张进行中。最近,中国科学院等离子体物理研究所终于取得进展,该所的超导托卡马克实验装置(简称 EAST)报告等离子约束时间取得了重大进步:等离子脉冲持续了超过 30s,是此前记录的 10~20 倍。可控核聚变装置又被称为“人造太阳”,纵然有此进展,但要使“人造太阳”发挥威力,仍然有很长的路要走。

备受关注的核聚变能

当今世界环境变化带来的威胁使得清洁可替代能源比以往任何时候都更必要和迫切。继化石能源枯竭之后,核能被认为极有可能成为未来能源产业支柱。

核能的商业利用包括核裂变能与核聚变能 2 种。核裂变,又称核分裂,是指由重的原子主要指铀或钚,分裂成较轻的原子的一种核反应形式。核聚变则是指由质量小的原子,主要是指氘或氚,在一定条件下,发生原子核互相聚合作用,生成新的质量更重的原子核,并伴随着巨大的能量释放的一种核反应形式。

目前裂变核能在世界各国能源结构中已经占有重要地位,并且在能源结构体系中所占比例已经远远超出人们的预料。但不得不提的是,自然界中裂变燃料有限,且裂变废料多数为高放废物。同时,大规模发展裂变核电存在着潜在的放射性污染以及裂变反应堆超临界事故等安全问题。因此,裂变核能并不能一劳永逸地解决未来世界的能源需求问题,而聚变能作为一种有潜力的清洁、安全、持久新型能源,则备受关注。

与核裂变相比,核聚变具有燃料丰富、放射性危害小、具有固有安全性等突出优势。核聚变堆的主要燃料是氘气,每升水中约含有 30mg 氘,通过聚变反应产生的能量相当于 300L 汽油的热能。

此外,氘氚核聚变主要产物为惰性气体

氦,不产生温室效应气体以及其他污染物,完全不生成放射性物质,不会对大气和环境造成污染。也基本不会造成人员外照射损伤,即使发生泄露事故,也不会造成长时间的放射性污染与严重的放射性灾害。

相比裂变堆,聚变堆不存在因反应性控制问题可能出现的功率激增,发生超临界事故导致堆芯溶化。聚变堆运行时,其堆芯等离子体要求满足严格的控制条件,以维持聚变反应的持续稳定进行,一旦磁场、高真空环境等控制条件被破坏,就会发生等离子体破裂,聚变反应就会瞬间自行停止。

另外聚变堆停堆时,总余热功率水平约为运行时的千分之几,比裂变堆低一个量级,因此不需要专门的余热排出系统,具有固有的安全性特点。

虽然核聚变具有如此显著优势,但也有似难以逾越的技术障碍。关键在于反应条件苛刻,实现等离子体稳定约束难度极大,要求具备足够高的点火温度、足够高的等离子体密度和足够长的能量约束时间。但迄今为止尚没有一座反应堆能够产生净能量增益(即产出能量大于输入能量)。由于聚变反应堆高、精、尖的技术特点以及庞大的经费需求,由中国、美国、欧盟、俄罗斯、日本、韩国和印度等国参与开展核聚变研究的最大国际合作项目——设计建造世界上第一个燃烧氘氚等离子体的装置国际热核聚变实验反应堆(简称 ITER)应运而生。ITER 项目被认为是实现聚变发电的关键装置,最大的技术挑战是如何从未来的聚变反应堆中排除核反应后的废气。

EAST 进展可做先行探索者

位于合肥市的超导托卡马克实验室的研究人员在其持有的等离子体封闭时间和密度方面取得了重大进展,这一步对于聚变反应维持合适的条件以及减少热等离子体对反应器壁的损害十分必要。

核聚变需要克服带正电的原子核之间的电斥力,直到强核力本身产生。这需要非常高的温度,以保证原子核快速移动

至相互碰撞而不是相互排斥。最终,核聚变问题被归结为等离子体约束:即在足够高的温度下维持有限空间的原子核。恒星有天然的等离子体约束系统以重力形式呈现,它们巨大的质量确保了其核心具有高压和高温,但是对地球上的科学家来说这显然不切实际。

磁约束是一种可能的解决方法,EAST 使用超导磁体增加力量,能有效控制质子,即使其在大型强子对撞机上循环也是如此。当等离子体被磁场约束并加热到超过某个极限温度时,会转换成一种高约束模式,或 H-模式。在这种模式下,等离子体自身会产生一个边界,在一定程度上阻止粒子逃逸,其节流阀在热材料中会湍流。等离子体被约束时间将加倍。当前研究实现一个持续的 H-模式脉冲能达到 30s,超出其他反应器 10~20 倍。30s 听起来不算多,但必须意识到等离子体温度超过 1 亿℃,是太阳核心温度的 5 倍多,这是非常重要的进展,随之而来的还有热量耗散的改善问题。

美国 Arstechnica 网站指出,EAST 可以被当做探索者,对于更大的国际热核实验反应堆 ITER 来说,EAST 的进展是一项重大成就,也是必要而渐进的步骤。正如近年发布的欧盟聚变示范电站设计与开发路线图列出的令人生畏的技术攻关清单所示,最大的技术挑战是如何从未来的聚变反应堆中排除核反应后的废气。其他技术挑战还包括,如何设法扩大等离子体与托卡马克装置偏滤器的接触面积以减少热载,或允许等离子体在接触偏滤器前辐射出更多热量;如何利用何种材料制造反应堆内等离子体容器的结构、表面覆层和面向等离子体部件。聚变堆中等离子体发射的高能中子、电磁辐射对上述材料具有强烈作用,因而需要开发出能够在数 10 年内承受中子不间断轰击的材料,但现有中子源的强度都不能满足这种测试的需求。

(本文参考了中国科学技术大学倪木一博士的“聚变堆燃料资源循环与氦资源可持续性研究”的论文,本刊实习生石萌萌对本文亦有贡献。)