

# 4月12日,EAST成功实现稳态高约束模式等离子体运行403秒,创造新的世界纪录

## “人造太阳”背后,终极能源梦想有多难?

4月12日21时,有中国“人造太阳”之称的全超导托卡马克核聚变实验装置(EAST,中文名“东方超环”)创造新的世界纪录,成功实现稳态高约束模式等离子体运行403秒。

为什么403秒会成为一个里程碑?“人造太阳”所要实现的可控核聚变,对人类社会意味着什么?我们距离这一终极能源梦想还有多远?作为EAST牵头人、国际热核聚变实验堆(ITER)理事会理事,中国工程院院士、合肥国家科学中心能源研究院李建刚教授已在这一领域深耕四十多年。他毕生的梦想,就是要在有生之年,看到有一盏灯被核聚变点亮。让我们一起跟随他的讲述,走近一群“种太阳”的人。

人类已经走过了半个多世纪的征程。在实现可控核聚变的方案中,磁约束被认为是最适合解决能源问题的途径。利用磁约束实现可控核聚变的装置叫做“托卡马克”,因为酷似太阳燃烧的机制,也因为被寄托了未来能源的美好愿景,人们更愿意将托卡马克称为“人造太阳”。

■ 李建刚

在电影《流浪地球2》中,有一种帮助地球远航的行星发动机,它所用的能量就来自可控核聚变。现实中,虽然像电影中那样的重核元素可控核聚变还难以实现,但是对于氢的可控核聚变研究,



安徽合肥核聚变实验装置园区效果图

### 可控核聚变彰显人类命运与共

可控核聚变技术不仅是人类先进技术的摇篮,更重要的意义在于,它能真正体现人类命运与共。推动托卡马克的发展,需要全世界科学家和工程师的共同努力。

上世纪80年代开始,世界上所有研究磁约束聚变的等离子体物理学家始终联合在一起,合作和交流从来没有中断。现在,每年都有成百上千人次的美国科学家到中国来开会、交流。2022年,美国的托卡马克装置分配两周时间给中国科学家做实验,中国的设备也有三周给他们做实验。之所以如此,是因为实现核聚变是人类共同的梦想。如果未来能源问题被解决,可控核聚变实现了,世界就会变得更加和平。

眼下,碳中和已成为关系人类未来发展的重要课题。聚变能源是没有二氧化碳排放的。如果人类能够很快实现核聚变,尽快开启聚变工程示范和商业应用进程,那么到本世纪末将可建设1000个聚变电站,减排二氧化碳85亿吨。

聚变电站实现商用化后,电力会非常便宜。因为一个聚变电站一年仅用150公斤重水,而重水的成本仅为每吨1500万元。一个千万人口的大城市,只需10个这样的电站就够了,用电成本真的可以变成白菜价。

人类之所以成为人类,就是因为我们的内心深处都有一份善良美好的愿望,都乐于助人。技术本身不会加大贫富差距,随着技术和文明的发展,我们将更有能力去帮助欠发达的国家和地区。

### 东方超环上的“超级”环境

#### 超级热的核心温度

东方超环的核心温度很高,因为只有达到1亿℃以上,才具备实现核聚变反应的条件。而太阳的核心温度才1500万℃,也就是说,东方超环的核心温度比太阳还要高数倍。在如此高的温度下,所有物质都会以物质的第四种状态(即等离子体)存在。这些超高温的等离子体会像脱缰的野马一样四处逃窜,足以烧蚀任何固态物质。所以,必须要制造出一种可以控制这些等离子体的“超级容器”来限制它们的运动。

#### 超级强的控制磁场

等离子体是一种内部带电的特殊气体。科学家们利用其带电特性,用一种强磁场来实现对这种极高温气体的控制。在东方超环上,这种磁场的强度可以达到地球磁场的10万倍。强磁场的磁感线像一条条无形的“锁链”,将高速运动的等离子体牢牢“拴”住,从而实现对超高温等离子体的约束,避免这些超高温的等离子体将装置烧毁。

#### 超级大的通电电流

约束等离子体的超强磁场如何产生?要靠超大的电流。东方超环上产生的电流最大可达家庭用电的1万多倍。对于这么大的电流,承载的导线要做到很粗才不会烧断,但量同时也会在导线上白白损耗掉。为了解决这一问题,东方超环采用了超导导线。超导具有在低温状态下电阻消失的特性。因为没有了电阻,所以无论多大的电流通过,都不会产生发热现象。这样一来,东方超环所使用的导线就能变得很细了。

#### 超级冷的超导线圈

为了使超导导线持续稳定地处在超导状态,东方超环上的导线需要浸在-269℃的液氮中。也就是说,在东方超环上,不仅存在1亿℃的超高温,还存在-269℃的超低温,而这两个极限温度之间的距离只有一米多远。这么高的温差对装置材料的损伤很大。为了消除极大温度差异对部件材料的影响,东方超环的各个部件都处于真空状态,以减少部件之间的热传导。

#### 超级净的真空环境

真空是一种非常稀薄的气体,由于里面的粒子密度很低,热传导很慢,所以真空有着比较优良的隔热性能。在我们日常生活中,用来盛放开水的暖水瓶应用的也是真空隔热的原理。只不过,暖水瓶的瓶身真空度比较低,而东方超环的真空度则高得多。在东方超环的核心,真空度维持在大气压的一千亿分之一左右,而且其内部的真空环境是非常洁净的。

(资料来源:中科院等离子体研究所官网)

### 未来的终极能源为何是它? 零排放、可无限利用、永远安全

人类的发展史一直伴随着能源的消耗,但我们对能源消耗的速度并不是恒定的。过去一两百年,世界人口急剧增加,人类的能源消费急剧增长。现在,地球上70多亿人口主要还是依赖石油、煤等化石能源。

未来,人类需要继续发展,能源消耗还将更大,地球现有的化石能源将会很快消耗殆尽。这个时间窗口,只有100年到300年的时间。当化石能源耗尽之后,我们要去哪里寻找稳定的能量来源?

爱因斯坦的质能方程E=mc<sup>2</sup>告诉我们,哪怕只有一点点质量,只要引发原子核级别的反应,瞬间就能释放出巨大能量。因为尽管质量只有一克,但乘以光速的平方,能量就非常巨大。这就是太阳可以稳定燃烧几十亿年的原理,也是浩瀚宇宙中大部分恒星发光发热的原因。

说起核反应能,分为核聚变与核裂变。目前,世界上有400多座核电站都使用核裂变产生的能量发电。这些核电站所用的原料是铀,仅需一克就能产生相当于1.8吨石油燃烧产生的能量;如果用钚-钚的话,一克所产生的能量相当于8吨石油。

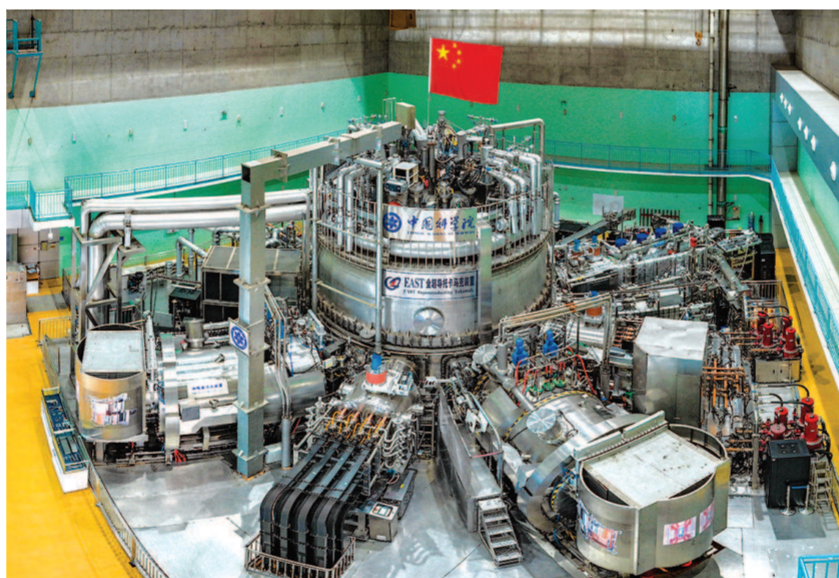
目前,全世界的裂变核电站为人类提供了大于10%的电力,但它有两个重大缺陷:其一,地球上的铀、钍、钚,储量都不多,即使全部利用,千百年左右就会用完;其二,核裂变时产生的各种射线会对人体产生伤害,放射性物质会对周围环境造成放

射性污染,比如美国三哩岛事故、日本福冈事故,以及切尔诺贝利核电站事故。尽管这些事故概率非常低,约100万年才会发生一次,但阴影总是存在,所以裂变变电站都建在远离人群的地方。

核聚变则具有固有安全性,即永远都是安全的。根据核聚变的原理,首先是要把氢的同位素氘和氚加热到上亿度,这要保持住非常难,但要停下来很容易。而它的产物只有氦气和中子——氦气本来就是干净的,而中子我们用水就可以将其吸收,其能量会让水变成蒸气,用来发电。所以,核聚变设施不释放二氧化碳,也没有长寿命放射性元素,可以建在城市中心。

核聚变的另一个优势是资源无限。一升海水可以提取0.03克氘,释放的能量高于340升汽油燃烧产生的能量,全世界海水里有40万吨氘——可供人类使用100亿年,比太阳和地球的寿命都长。而且,核聚变电站对资源的消耗非常低,功率密度又很高。一个聚变电站一年只需要用150公斤的重水和150公斤的锂,而一个100万千瓦的煤电站一年要烧200万吨煤,一个裂变电站一年需要30吨铀。

所以,国际能源署在上个世纪组织3000名科学家讨论了3年,最终得出结论,人类未来的终极能源将由核聚变和可再生能源构成——核聚变将为我们提供绿色的、没有任何排放的、安全的、可以无限利用的能源。



大会上公布托卡马克的原理后,我国就在四川乐山建立了国内最大的磁约束聚变基地——中国核工业西南物理研究院。项目最早由李正武院士提出,潘垣院士作为当时的总工程师负责实施。

这个中国最早的磁约束聚变基地就在距离乐山大佛2.6千米的地方,如今的博物馆里存放了很多老一辈科学家当时做出来的实验装置。在安徽合肥科学岛上,从1973年开始,中国科学院也同时开展了托卡马克的研究。1989年,苏联已着手开发第二代托卡马克,有意把第一代装置T-7送给其他国家。时任中科院等离子体物理研究所所长的中科院院士霍裕平,做了一个对我国核聚变发展非常重要的决定,将已停机的T-7引入国内进行改造。

我们用两年多的时间将它拆解、改造,建成了中国第一个超导托卡马克HT-7。在这个新装置上,我们实现了优于其他国家的实验成绩。最重要的是,培养了一批包括我在内的科学家。

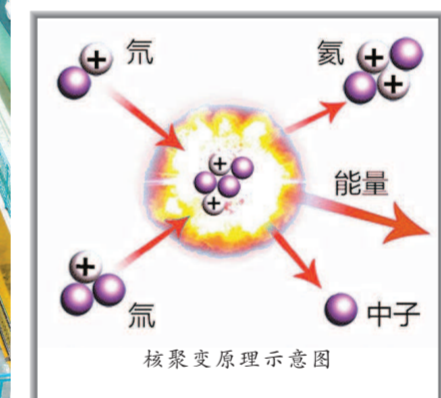
后来,我国的磁约束做到了60秒、1000万℃,这个成果入选了2003年度中国十大科技进展新闻。但要真正实现核聚变,除了需要点火达到上亿摄氏度的高温,还需要长时间维持。去年美国实现的激光点火是惯性约束,能量要先转换成激光。对磁约束而言,大量的能量消耗在磁笼子的产生。怎样不让磁笼子消耗能量呢?那就要靠超导。所以,必须建造新一代全超导托卡马克核

聚变实验装置——东方超环(EAST)。一旦说起超导,所有的问题变得既简单又复杂。说它简单,因为消耗功率大幅减少,意味着以后聚变发电,只需一点点能量就可以点火。说它难,主要有三个问题:首先,超导需要4K(-269℃)的低温,而实现聚变的温度是上亿摄氏度的高温,怎么把这两个温度放在一起?第二,高能粒子束很容易把周边材料打坏,需要抗高温、抗高辐射的材料。第三,托卡马克对于误差有着极端的要求,哪怕0.1毫秒、0.1毫米的误差都会导致失败,所以需要先进的控制系统。而且这三者都要保持长时间连续运行。

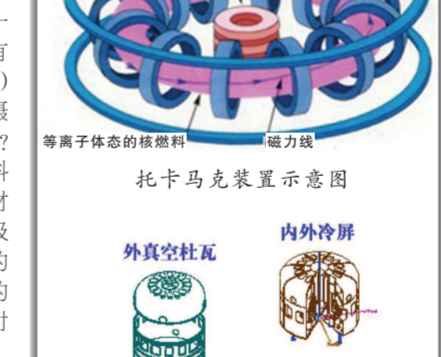
所以,实际上,实现全超导托卡马克核聚变比登天还难。我们需要产生一个上亿摄氏度高温的“甜甜圈”,还要把它放在一个-269℃的低温容器中,再把它磁悬浮起来,这就是超导托卡马克,也就是所谓的“人造太阳”。

这的确挑战了人类科学和技术的极限。2000年10月,EAST项目正式开工。2006年9月26日,EAST成功获得等离子体,达到了500万℃,持续时间大约不到一秒。但这还远远不够。去年,EAST创造新的世界纪录,成功实现可重复的1.2亿℃、100秒等离子体运行,随后又实现了1056秒、7000万℃。这个温度比太阳中心还高6倍,可见光已经几乎没有。在长时间维持方面,中国已走到世界前列,多次创造高约束等离子体稳态运行世界纪录。

全超导托卡马克核聚变实验装置(EAST)。



核聚变原理示意图



托卡马克装置示意图



EAST主要部件示意图 (本版图片均中国科学院合肥物质科学研究院提供)

### 可控核聚变为什么这么难? 无处不在挑战人类科技极限

既然核聚变这么有优势,为什么不早点把它研发出来?原因在于,要实现可控核聚变,必须跨越非常高的门槛,条件非常苛刻。

1958年,英国牛津大学一位刚毕业的博士劳逊,用了两年时间给出了“劳逊判据”:核聚变实现点火,必须要满足“粒子密度n、温度T、约束时间τ,三者乘积大于10<sup>21</sup>”。即温度要达到上亿摄氏度、约束时间至少要大于一秒,还要有足够的粒子。当时,人类能达到的最好成绩是10<sup>11</sup>,理想和现实的巨大差距让劳逊博士知难而退,但全世界其它科学家仍在孜孜不倦地追求着,一直朝着这个目标努力了65年。

去年,美国科学家激光点火成功,这成为人类科学史上一个重大事件。他们在相当于三个足球场这么大的空间里,用192路激光,在不到10纳秒的时间内,打到只有胡椒粒大小的靶丸上,实现了可控核聚变点火。美国能源部表示,这是他们在70年科学历程中“最伟大的突破之一”。

实现可控核聚变的另一大难题是约束聚变粒子。我们最常见的聚变体是太

阳,因为它的质量特别大,靠万有引力就可以把所有的带电离子约束住,约束时间远远大于一秒,所以它在1500万℃就可以发生聚变。

还有什么约束办法吗?因为聚变需要上亿度高温,不能用任何容器盛装,所以人类想到用强磁场把带电粒子悬浮起来,即磁约束。

我们知道,当温度足够高时,电子会脱离原子核,这就是等离子体。如果加上强磁场,所有带电粒子都会围绕磁力线运动——有了磁场,粒子就被约束住了,磁场越强,约束力就越强。于是,苏联科学家由此发明了托卡马克——它就像一个“容器”,里面的磁场强度相当于地球磁场的一万倍,能让粒子在其中悬浮、旋转。

其实,科幻电影《钢铁侠》里就出现过托卡马克,那是一个磁笼子,这种马达只需一千克气体就能在宇宙里飞行许多年。此外,《流浪地球》中提到的一万个重核聚变发动机推着地球去另一个星球,用的也是托卡马克装置。

现实中,我国很早就开始着手研制托卡马克。1958年,苏联在一次国际

### “人造太阳”何时“亮灯”? 人类有望10年内实现核聚变

未来用核聚变来发电,1000秒还远远不够,必须想运行多久就能运行多久,所以还有很多难题有待解决。

目前还有几个比较困难的问题。比如等离子体的加热。平时,加热食物最快的方法是用微波炉。一般家用微波炉只有500瓦,而EAST有全世界最大的“微波炉”,微波驱动总功率高达30兆瓦,这几乎是人类现有技术的极限。只有多个极限技术共同作用,才有可能实现聚变点火并维持下去。经过几代人奋斗,现在EAST所用的技术基本已实现

谈判。2006年5月,中国正式加入ITER。

加入ITER,可以以10%的贡献获取100%知识产权,实现弯道超越,还可带动国内聚变产业的发展。通过深度参与ITER,国内一大批企业迅速发展,初步建立起了未来中国聚变工业的基础。例如,产生超导磁体所需的超导线圈,参加ITER前我们仅能进行36公斤的小批量生产,现在我们可以年产150吨,广泛应用于核磁共振。

如今,核聚变在国际上已经成为一个竞争白热化的领域。人类对能源的需求从没有像现在这么紧迫。站在现在回望过去,前60年还是以基础研究为主,现在应该到了一个转折点,即从基础研

究到工程研究到商业化,这个进程要加快。我国在磁约束核聚变的科技发展上走到了世界前列,要尽快建设实验堆(BEST)、工程示范堆(CFETR)、商用堆。

我最大的梦想就是在我的有生之年,能看到聚变点亮一盏灯。曾经,我觉得这些事还很遥远,但是现在我发现有可能。因为新的时代、新的机遇,给我们提供了一个非常好的展现的舞台。我相信,我们有望用不到10年的时间实现聚变,在我有生之年一定能看到有一盏灯被聚变点亮。当然,仅仅点亮一盏灯还不够,我们还要做100万千瓦的中国聚变工程示范堆,让清洁能源的聚变能,点亮人类未来的希望。

(本文由林梅根据李建刚院士在“墨子沙龙”上的演讲整理,发表时有删节)



4月12日21时,EAST实验现场。