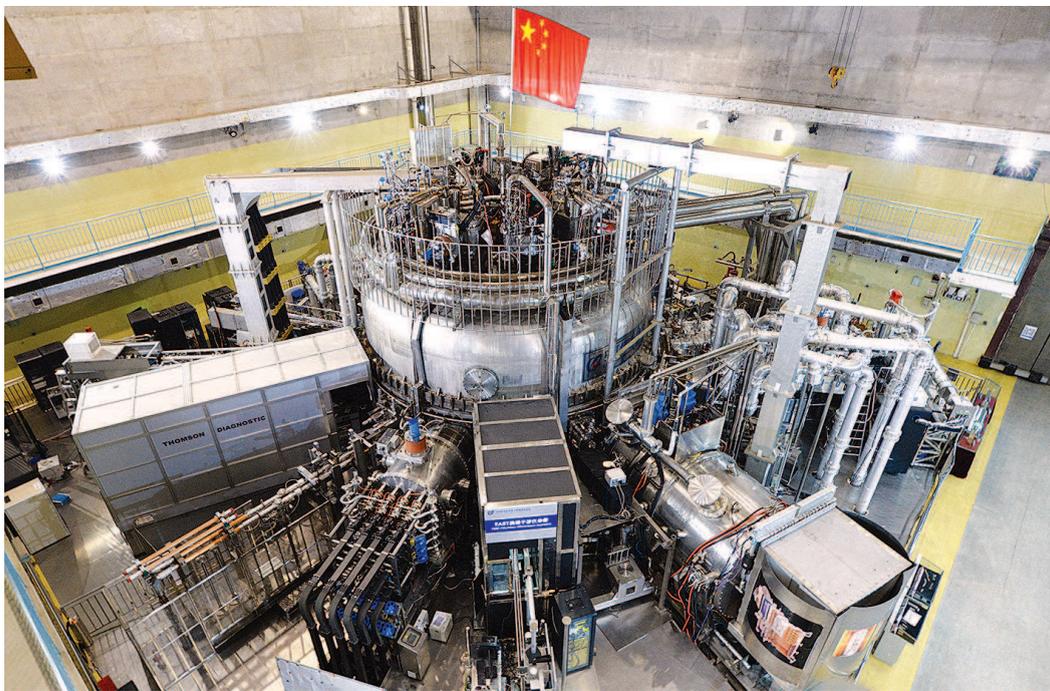


新民全球

兼具可控、清洁和无限三种特性

全球“人造太阳”屡获重大突破

文 / 艾舟



■ 中国在安徽合肥建造的“人造太阳”

本版图片 IC



■ 中国科研人员在“人造太阳”内部工作

全球能源需求不断增长,气候变化却愈演愈烈。在化石燃料主导的当下,发展与生存似乎成了鱼与熊掌不可兼得的悖论。而一旦化石燃料走向枯竭,人类又如何延续生命与文明之火?

随着能源问题愈发凸显,模拟太阳聚变而诞生,兼具可控、清洁和无限三种特性的“人造太阳”正在成为全球科学家努力的方向。2023 年,多国“人造太阳”取得了显著进展,人类朝能源自由又进了一步。

去年年末,中国组建由 25 家央企、科研院所、高校等组成的可控聚变创新联合体,标志着国内多条技术路线已经形成。

聚变发电 优点多 难度大

去年 12 月 1 日,在日本茨城县那珂市,日本量子科学技术研究开发机构那珂研究所内爆发出阵阵欢呼。当天,由日本和欧盟共同建设的大型聚变实验装置 JT-60SA 在开始运行数秒钟后,装置内就产生了超高温等离子体。JT-60SA 是目前世界上最大的超导托卡马克聚变反应堆,而等离子体是实现聚变必需的物质。

在地球上之所以能看到阳光、感到温暖,都是源自发生在太阳核心的聚变。聚变是两个轻原子核结合成一个较重的原子核并释放出巨大能量的过程,理论上可以提供近乎无限的能源。更重要的是,不同于现有以核裂变为基础的核电,聚变发电可以让人不再“谈核色变”。

聚变发电所需的条件极为严苛——超过 1 亿摄氏度的温度,以及聚变燃料的持续供应。如果条件无法满足,聚变反应几秒内就能停止,因此几乎不可能出现失控的链式反应。也就是说,当聚变反应失控时会自行停止,而不会像核裂变反应堆那样失控爆炸。

此外,相较于核裂变反应堆,聚变不仅不会产生放射性高、半衰期长的核废物,而且放射性物质的数量和种类也有所减少,也不大可能发生类似福岛核电站的堆芯熔毁事故。受放射性污染的物件都是半衰期很短的低放射性核废物,只要采取基本预防措施就可以安全处理。

聚变发电的优点非常多,但实现难度非常大:首先,“点燃反应”所需的 1 亿摄氏度已超过太阳核心温度的 6 倍,找到在 1 亿摄氏度下也不会熔化的特殊材料并不容易;其次,聚变反应开始后,需要难以想象的巨额能量维持聚变;最后,也是最关键的一步,需要一个复杂的装置来容纳整个聚变反应。

1985 年以来,为验证聚变能利用的科学和工程可行性,中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯、美国七方开启了名为“国际热聚变实验堆计划(ITER)”的项目。ITER 历经近 20 年的工程设计和谈判,直到 2007 年整合了七个参与方的经济

与技术资源,开启了装置建造。到目前为止,ITER 是人类和平利用聚变能源之路最为可靠和可行的路线,也是规模最大、影响最深远的国际大科学工程之一。

由日本和欧盟共同建设的 JT-60SA 装置正是 ITER 的先行项目,其成果将反映到 ITER 中,并将应用于未来聚变原型堆的建设中。

ITER 项目 土建接近完成

JT-60SA 并非去年“人造太阳”领域唯一取得的重大突破。

去年 11 月 3 日,ITER 的磁体支撑系统在中国广州完成交付,标志着 ITER 磁体支撑系统研制任务圆满收官,按时兑现国际承诺,为 ITER 项目第一次等离子体放电的重大工程节点奠定了基础。

ITER 的磁体支撑系统总重 1600 多吨,是 ITER 最核心的结构安全部件之一,由中国承担全部研制任务。它是整个 ITER 系统中最先进入厂房整体安装的基础性部件,能否按期交付关系到整个 ITER 装置的工程进度和后期实验装置的稳定性。

ITER 的托卡马克装置位于法国马赛的小镇圣保罗-莱迪朗斯,总重 2.3 万吨,相当于 3 个半埃菲尔铁塔,包含近百万个组件,涉及重大技术挑战,且没有成熟经验可资借鉴。它是全球在建最大、最复杂的“人造太阳”,建成后聚变实验功率可达 50 万千瓦,将成为地球上首座能够与未来商用聚变堆规模相比拟的热聚变实验堆。

托卡马克装置类似于恒星,被设计应用于实现质量较小的原子聚合形成质量较大的原子,这一过程中会有质量的损失。根据爱因斯坦质能方程,聚变过程所产生的微量质量变化可转化成巨大的能量。例如,“燃烧”一克聚变燃料,即氘的同位素氘和氚,与燃烧 8 吨石油所产生的能量相当。

ITER 托卡马克装置的土建工程已完成 85%,首次等离子体放电所需的大部分系统及部件研制已完成 80%,目前正在安装结构的关键部件。去年 11 月,多国记者实地探访这一科研奇迹,新华社记者用生动的笔触记录了该装置的模样:

“场地中央,一座高 60 米、长 120 米、宽 80 米的钢筋混凝土建筑

颇具压迫感。走进大门,穿过走廊,记者瞬间犹如闯入科幻电影的情景中:一间灯光如昼的组装大厅里,摆放着多个体型庞大、造型奇特的金属部件,墙壁上爬满了曲折的通风管道。ITER 的心脏——托卡马克装置及其运行所需系统的预组装工作正在这里紧锣密鼓地展开……”

ITER 的托卡马克装置是一种利用磁约束来实现可控聚变的环形容器,外形酷似甜甜圈,中央是一个环形真空,外面环绕着线圈。在满足超高温、超低温、超大电流、超强磁场、超高真空等极端环境条件下,托卡马克装置内部可产生巨大的螺旋形磁场,被加热到上亿摄氏度并受到磁场约束的氘和氚的等离子体融合在一起,可产生类似太阳核心的聚变能。

ITER 组织副总干事、原科技部中国国际聚变能源计划执行中心主任罗德隆表示,未来在探索聚变能商用化的可行性方面,除非出现颠覆性技术,否则“ITER 仍是最可靠、可行的路线”。

中国力量 从“跟跑”到“领跑”

各国在 ITER 框架下密切合作的同时,也不约而同地基于本国力量攀登“人造太阳”的技术高峰。

去年 7 月 30 日,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的“国家点火装置”(NIF)进行了一项新的实验。NIF 科学家团队使用激光脉冲向点火目标发射高达 2.05 兆焦耳的激光能量,成功产生 3.88 兆焦耳的聚变能量,这是迄今为止人类通过聚变获得能量的最高纪录。

NIF 于 1997 年开始建造,计划总花费 40 亿美元,技术难度极高。整套 NIF 的运作必须启动 6 万具各种类型的高科技装置,长达 1 公里的厂房设备最终要让 192 门激光在

1 纳秒内同时发射,并击中铅笔头大小的燃料球,误差不能超过 30 皮秒。要达到这样的准确度,NIF 的激光装置必须保证零震动和零热胀冷缩,许多 10 吨重设备的安装误差必须小于 100 微米误差范围。

就技术角度而言,NIF 利用激光脉冲给核燃料加热加压实现聚变的方式属于惯性约束,不同于更为主流的、以托卡马克装置为代表的磁约束。中国在安徽合肥建造“人造太阳”,即全超导托卡马克聚变实验装置(EAST)采用的就是磁约束路线。

去年 12 月初,全世界聚变领域的 20 余位权威专家聚集在合肥,对 EAST 大科学团队近年来的创新工作进行细致梳理。与会的欧盟聚变委员会主席多恩表示,相对于欧美国家,尽管中国的聚变研究起步较晚,但效率和进展令人惊叹。

从 EAST 诞生之日起,聚变领域的纪录就一次次被刷新:2016 年,实现 5000 万摄氏度 102 秒等离子体运行;2021 年,实现 1.2 亿摄氏度 101 秒等离子体运行。

去年 4 月,EAST 实现稳态高约束模式等离子体运行 403 秒,创造了新的世界纪录。《科技日报》报道指出,这次试验完全验证了 EAST 全超导托卡马克装置高参数长脉冲稳态运行的能力,进一步验证了未来聚变实验堆高约束模式稳态运行的可行性,对探索未来聚变堆前沿物理问题,提升聚变能源经济性、可行性,加快实现聚变能应用具有重要意义。

罗德隆回忆说,中国刚加入 ITER 时以学为主,如今已从“跟跑”实现与他国“并跑”,甚至在部分领域“领跑”。通过全面参与 ITER 建设,中国用 10% 的贡献撬动了该计划 100% 的知识产权,除消化、吸收、掌握 ITER 的设计技术和加工制造技术之外,也为中国培养并储备了一批聚变工程建设人才。

中国聚变研究的进步,也反哺着 ITER 的推进。去年 12 月 14 日,中国核工业西南物理研究院与 ITER 总部签署协议,宣布新一代人造太阳“中国环流三号”面向全球开放,邀请全世界科学家来中国集智攻关,共同逐梦。

“中国环流三号”是目前中国设计参数最高、规模最大的聚变大科学装置,也被称为中国的新一代“人造太阳”。去年 8 月,“中国环流三号”成功实现 100 万安培等离子体电流下的高约束运行模式,标志着中国磁约束聚变装置运行水平迈入国际前列。

自 1985 年以来,包括中国科学家在内的全球科研力量,已经让可控聚变离人类越来越近了。彼时冷战尚未结束,以 ITER 为代表的国际合作却让人看到化能源纷争为和平共赢的希望。如今,气候变化的挑战愈发严峻,对清洁能源的需求空前强烈。或许,重温七方缔结 ITER 的初心,也能给当下带来别样的启示。