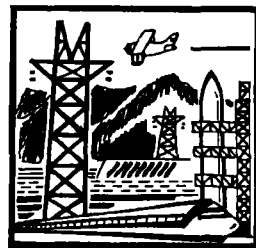


# 磁约束核聚变研究现状和前景展望

万元熙

(中国科学院等离子体所 合肥 230031)



## 一、核聚变能是可持续发展最理想的清洁能源

核聚变可释放出巨大能量。太阳上的巨大能量来源于核聚变反应。氢弹的成功爆炸表明在地球上通过氘氚聚变也可释放出巨大能量。氢的同位素氘存在于海水中，总量十分丰富。氚可从锂不断再生。锂在地球上的储量也十分丰富。如果实现可控热核氘氚聚变反应，这一聚变新能源可供人类使用至少数十亿年。由于不产生二氧化碳和二氧化硫等有害气体，反应产物是无放射性的惰性气体氦而且反应过程中也不产生寿命长的放射性废物，因此聚变能将是人类可持续发展最理想的清洁而又无限的新能源。

## 二、磁约束聚变研究在托卡马克装置上取得了突破性的进展

聚变反应需要数亿度的高温条件。在极高温度下所有物质都变成完全电离的气体——等离子体。利用强磁场可以很好约束带电粒子的特性，构造一个特殊的磁容器，在其中，将聚变燃料加热至数亿度高温，实现聚变反应，建成聚变反应堆，这就是磁约束聚变研究的最终目标。经过国际聚变界近 60 年的不懈努力，这一目标已在托卡马克类型的磁约束聚变装置上取得了突破性进展：

(1) 聚变燃料已可被加热到 2—4 亿度的高温。在日本最大的托卡马克 JT-60U 上表征聚变反应率的最重要参数，温度 × 密度 × 能量约束时间(即聚变三重积)已达到  $1.5 \times 10^{21} \text{keV} \cdot \text{M}^{-3} \cdot \text{S}$ 。这一重要参数在过去 20 年内已提高了 10000 倍，目前离聚变堆的要求仅差约 20 倍。

(2) 在美国最大的托卡马克 TFTR 和欧洲的 JET 上，峰值聚变输出功率已分别达到 10.7 兆瓦和 16.1 兆瓦。与此同时，观测到了相当可观的  $\alpha$  粒子加热效应。靠  $\alpha$  粒子加热聚变堆才能自持燃烧。

## (3) 表征聚变输

出功率(获得)和输入功率(消耗)之比的 Q 值在 TFTR 和 JET 上已接近 1。在日本的 JT-60U 上等效 Q 值已超过 1，达到 1.25。

上述突破性进展表明：建造托卡马克聚变堆的科学可行性已被证实。托卡马克领先于所有其他途径(包括惯性约束聚变)至少 20—30 年，它最有可能率先建成聚变反应堆。

## 三、在是否立即建造 ITER 上美国与其他国家发生重大分歧

20 多年前，托卡马克还未取得上述突破性的进展，但根据已建成的近百个大小不等托卡马克装置上总结出的实验定标律外推，美国、前苏联、日本和欧洲决定联合进行 ITER 研究计划。ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)是一个可自持燃烧(即“点火”)的托卡马克聚变实验堆，其聚变输出功率可达 1500 兆瓦。由于有了 ITER 计划，国际聚变研究的重点便自然集中到建造点火堆上。经过 20 多年的努力，现在不仅完成了 ITER 的物理和全部工程设计，而且还成功完成了许多关键部件的预研，再考虑到实验上取得的一系列突破性进展，国际聚变界主流看法是：成功建造并运行 ITER 的物理和工程技术基础均已具备。建成 ITER 将使国际聚变界能够深入进行燃烧等离子体及相关工程技术的研究，这一研究将为商业聚变堆奠定基础，因此意义十分重大。但是，建造 ITER 需要 100 亿美元。巨大的经费和复杂的选址问题引发了许多争论。美国与其他国家发生重大分歧，在 1998 年第 17 届国际聚变能大会上，宣布正式退出 ITER。欧洲、日本、俄罗斯立即宣布将继续进行合作并将寻找联合建造 ITER 的各种可能模式。

美国调整聚变研究政策并宣布退出 ITER

在国内并不为大多数聚变科学家支持,但得到议会和许多非聚变科学家的支持。美国聚变政策的调整有两方面的原因:第一是政治上和经济上的原因。美国四年一次的选举制度和两党分控议会和政府的局面,使得政界很难支持现在投资巨大而几十年后才能见效的长期科研项目。美国的石油、天然气和煤的储量远远大于欧洲和日本,近 200—300 年内不会有严重的能源问题。其次是科学上的考虑。美国部分科学家认为建造 ITER 的物理和工程技术基础还不足够充分,如果继续进行研究,今后可以建造比 ITER 规模小一些的聚变堆。日本、欧洲和国际聚变界中大多数科学家均认为,ITER 计划将分散的研究集中到开发聚变能这一最终目标并取得了突破性的进展。由于这些进展,磁约束聚变研究已进入重要转折关头。如果 ITER 能及时建成并取得成功,下世纪中叶建成商业聚变堆并开始实际使用聚变能将成可能。这对能源短缺国家,如亚洲的日本、南朝鲜及发展中国家如中国、印度都是极为重要的,对保护地球环境也是极为重要的。

是否立即建造 ITER 发生的分歧并不是要否发展聚变研究的分歧,它是各国近期、远期利益考虑和看法不同引发的发展战略分歧。日本和欧洲由于始终得到政府稳定的支持,聚变研究已经领先于美国。如果它们能在建造 ITER 上继续得到各自政府的大力支持并成功联合,必将在开发聚变能的研究中继续领先,为本国也为全人类的持续发展做出重大贡献。

#### 四、亚洲国家发展核聚变研究的难得机遇

磁约束聚变研究的重大进展使得亚洲许多能源短缺的国家和发展迅速、饱尝环境污染和能源短缺之苦的发展中国家对磁约束聚变研究给予了越来越大的重视和更多的支持。例如,多年来日本聚变研究的经费约为美国的二倍,现在又准备承担 ITER 的建造;几年前南朝鲜政府由总统出面拨出 3 亿美元支持建造一个大型超导托卡马克 KSTAR;印度政府也拨出近亿美元支持建造一个小型超导托卡马克 SST-1。与此同时,美国却缩减聚变研究经费,关闭一批试验装置,

宣布退出 ITER。这样一来,ITER 很可能将由亚洲国家日本牵头,联合其他国家,建在日本。由于经费缩减,美国聚变界现在十分重视与亚洲国家的交流与合作并愿意将许多技术向亚洲转移。例如,由于停拨经费,美国的超导托卡马克计划夭折,而南朝鲜的超导托卡马克 KSTAR 就得到美国国家实验室的全力支持和帮助。此外,俄罗斯由于经济原因已无力支持国内的聚变研究,因此也迫切希望扩大与发展中国家、特别是亚洲国家的合作。他们将世界上第一台超导托卡马克转移到中国并合作改建。他们派出专家帮助印度设计和建造超导托卡马克。

正因此,许多欧美聚变专家表示,现在亚洲国家获得了迅速发展聚变研究的难得机遇。在本国政府和国际聚变界的支持下,亚洲国家肯定会在聚变能的开发研究中很快进入国际先进行列。

#### 五、中国磁约束聚变现状、特色及发展战略

(1) 中国需要尽早对聚变能的开发做出长远战略性安排,这是因为:中国人口现有 13 亿,到 2050 年将增至 15—16 亿;人均能耗目前仅为世界人均能耗的二分之一,发达国家的四十分之一;主要能源是煤,而人均占有量远远低于世界水平。中国经济正以年增长 6%—8% 的高速度发展,因此,将比其他任何国家更快遇到严重的能源问题,即:一次性能源的短缺和大量使用化石燃料造成的极为严重的环境污染。在聚变能的开发研究已取得突破性进展的时候,我国应不失时机地对开发清洁而又无限的聚变新能源做出具有战略眼光的长远安排。

(2) 经过 20 多年的努力,在四川乐山、安徽合肥和北京建成了一批中、小型常规托卡马克实验装置。通过设计、建造和运行这些实验装置,形成了 1500 人的科研队伍,并在工程技术、物理实验和理论研究等诸多方面取得了广泛进展,使中国聚变研究在国际上的影响稳步增加。

(3) 通过国际合作和国家的大力支持,我国成功地开始了超导托卡马克的研究计划。这一研究计划包括已经建成、现正在进行实验的

HT-7中型超导托卡马克和已被批准立项的九五重大科学工程 HT-7U大型非圆截面超导托卡马克。HT-7的建成使中国继俄、法、日之后成为世界上第四个拥有超导托卡马克的国家。HT-7U的批准立项使中国成为世界唯一具有两个超导托卡马克的国家。由于在托卡马克上开发聚变能的科学可行性已经得到证实,国际聚变界下一步的目标将是建立聚变反应堆。未来商用聚变堆一定是稳态运行,而只有超导托卡马克才有可能实现稳态运行。因此,中国超导托卡马克研究计划引起全世界极大关注,它大大提高了中国聚变研究在国际上的地位并正在促进广泛的国际合作。中国的超导托卡马克计划若进展顺利,将为2010年左右开始设计、建造聚变-裂变混合堆和为2050年前后开始规划、设计和建造商用聚变堆打下基础。

(4) 中国磁约束聚变的另一个特色是率先在国际上开展了聚变-裂变混合堆的研究。这一研究开始时受到西方国家的强烈反对,现在已得到国际聚变界越来越大的支持和关注。利用远低于纯聚变堆参数的聚变堆芯做中子源,在包层中增殖裂变燃料或者转化处理裂变堆产生的长寿命放射性废物,构成清洁裂变核能体系,这是聚变-裂变混合堆的突出优点。混合堆

是裂变堆到纯聚变堆的一个合理的中间过渡堆,它既可为纯聚变堆提供经验和进一步的工程物理基础,又可为扩大裂变能资源,减少裂变废物的污染做出重要贡献,因此是发展核能战略中极为合理而又十分重要的一步。

(5) 建议中国发展聚变核能的战略:

- 在已建成的超导托卡马克 HT-7上进行长脉冲及改善约束的实验研究,为稳态先进托卡马克的研究作工程技术和物理准备;
- 在将要建成的 HT-7U 超导托卡马克上进行稳态和先进运行模式的实验研究,为设计和建造聚变-裂变混合堆奠定基础;
- 在2010年前后,设计和建造聚变-裂变混合堆,为建立我国洁净核能系统做出贡献;
- 在2050年前后设计和建造聚变工程实验堆,为21世纪中期在中国开始实际使用聚变能做出重要贡献。

中国磁约束聚变的发展战略应当在国家支持和广泛国际合作的基础上进行。随着我国综合国力的提高,相信国家对聚变研究的支持强度肯定会不断增加,在此基础上,中国开发聚变能的研究一定会进入世界先进行列并为人类社会的可持续发展做出重大贡献。

## 科苑快讯

### 美设想在极地轨道 建太阳能发电站

据《科技日报》报道:美国国家航空航天局日前宣布,美国科学家设想在极地轨道上建设太阳能发电站。科学家经反复论证认为,该项技术在理论上是可行的,若付诸实施,将能解决全球的用电问题。依据这一设想,科学家认为太阳能将是21世纪最佳能源。美国科学家设想在离地面1.2万米的轨道上,建设由两排圆盘式太阳能板构成的极地太阳能发电站,每个圆盘的直径达几千米。该发电站将与地球同步在太空中运行,对于地球来说它基本上是静止的。发电站将终年阳光普照,只有当它的轨道面与太阳的黄道面相切时,

才会处于地球的锥形阴影下,这种情况一年只会发生2次,每次只持续数分钟。设想中的极地太阳能发电站可产生1千兆至1万兆瓦的电能。为了不对环境和人体造成伤害,这些电能将转化成频率为5.8千兆赫的微波,再通过地面接收站直径为1000米的天线传至地面,成为人类可使用的安全电能。在我们生活的地球周围,每平方米的空间就能产生1358瓦的太阳能。然而只有30%的太阳能得以应用,即被人造地球卫星利用,它们通过和平号空间站和未来的国际空间站的太阳能板和光电池将太阳光转变成电能,供卫星上的仪器用。如何将宇宙中大部分的太阳能转变成人类所需要的电能,则是各国科学家多年研究的课题。(卞吉、秦宝编)