

# 第六章

## 核科技的未来

核科学技术的发展和应用已走过了百年的历程，取得了令人瞩目的成就。进入21世纪，国际风云不断变化，科学技术迅猛发展。从世界范围来看，无论是军用还是民用，核科学技术仍然是关系到国家和民族根本利益的战略高新技术。在全面建成小康社会的进程中，核科学技术将首先关注国家面临的紧迫挑战：资源匮乏、环境恶化……努力寻求改善人们的生活质量和促进社会的可持续发展。党和国家非常重视，专门制定了加大核电建设力度的发展规划，并决定组织实施民用非动力核技术高技术产业化专项。核能、核技术不但在国家安全、经济建设方面发挥着重要作用，而且还将越来越走近我们的生活，我国核科学技术正在迎来一个新的发展机遇。

## 1. 地球面临的能源现状

人类赖以生存的能源并非是取之不尽用之不竭的。进入21世纪后,依靠人类目前的技术,可开发的能源资源已面临严重不足的危机,当今煤、石油和天然气等矿石燃料资源日益枯竭,据世界能源会议统计,世界已探明可采煤炭储量共计15980亿吨,预计还可开采200年;探明可采石油储量共计1211亿吨,预计还可开采30~40年;探明可采天然气储量共计119万亿米<sup>3</sup>,预计还可开采60年。新能源中,太阳能虽然用之不竭,但代价太高,并且就目前的技术发展情况来看,相当长一段时间里还不可能迅速发展和广泛使用,其他新能源也是如此,它们的规模受到环境、季节、地理位置等条件的限制,如风能、潮汐能、地热能等等。核能分为裂变能和聚变能两种。目前人类已经和平利用的只有裂变能,即核电站。但裂变需要的铀等重金属元素在地球上的含量也是很有限的。



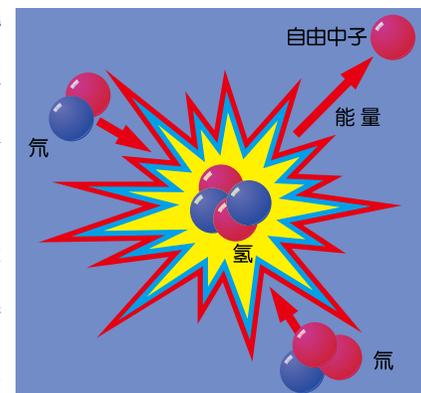
## 2. 什么是核聚变? 研究核聚变的意义

地球上的万物靠着太阳源源不断的能量维持自身的发展。在太阳的

中心,温度高达1500万摄氏度,气压达到3000多亿个大气压,在这样的高温高压条件下,氢原子核聚变成氦原子核,并释放出大量能量。正是这种核聚变反应,在太阳里已持续了约150亿年。宇宙中的太阳犹如一座巨大的核聚变“反应堆”,无时无刻地向外输送着能量。

核聚变,是由两个轻的原子核结合成一个较重的原子核的核反应过程,聚变反应会释放出巨大的能量。就单位质量而言,聚变释放的能量要比裂变释放的能量大3~4倍,因此,核聚变能源是更强大的能源。核聚变反应是在高温、高密度与高能量约束时间的等离子体中实现的。包括太阳在内的大多数星体释放的能量便是来源于高温氢等离子体中的高能氢核聚合成氦核(粒子)的核聚变反应。

人类要在地球上可控地实现核聚变反应来直接获得核聚变能的条件是很苛刻的。相比而言,在所有核聚变反应中,氢的同位素——氘和氚(D-T)的核聚变反应是较易于实现的。氢弹爆炸就是利用了D-T核聚变反应。1952年,当第一颗氢弹爆炸之后,人类制造核聚变反应成为现实,但那只是不可控制的瞬间爆炸,而受控核聚变能源研究,是要通过某种特殊的途径,把氢弹爆炸的过程在核聚变反应堆上加以控制,并源源不断地输出核聚变能。



核聚变反应示意图

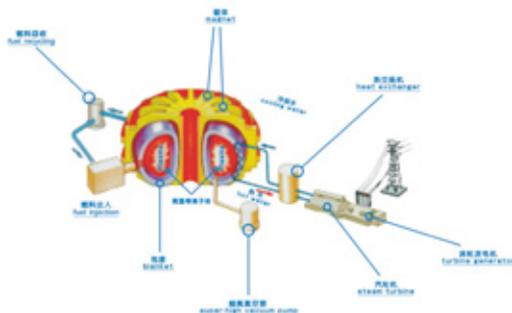
核聚变能源具有以下得天独厚的优点:1)资源丰富。核聚变燃料之一的氘广泛地分布在海水中,1升海水里提取出的氘,在完全的核聚变



氢弹爆炸

反应中可释放相当于燃烧300升汽油的能量。如果实现以D为燃料的受控核聚变，按地球的储量计算，可获取 $2 \times 10^{11} \text{TW} \cdot \text{a}$ （太瓦年）的核聚变能，若按照每年20TW速度消费，可供全人类使用100亿年；即使以D-T

为燃料，也可供人类使用3000万年。2)核聚变能是内在安全的能源。燃烧等离子体一旦形成，任何运行故障都能使等离子体迅速冷却，从而使聚变反应在短时间内自动停止，这意味着核聚变反应堆本身具有内在



未来聚变电站概念图

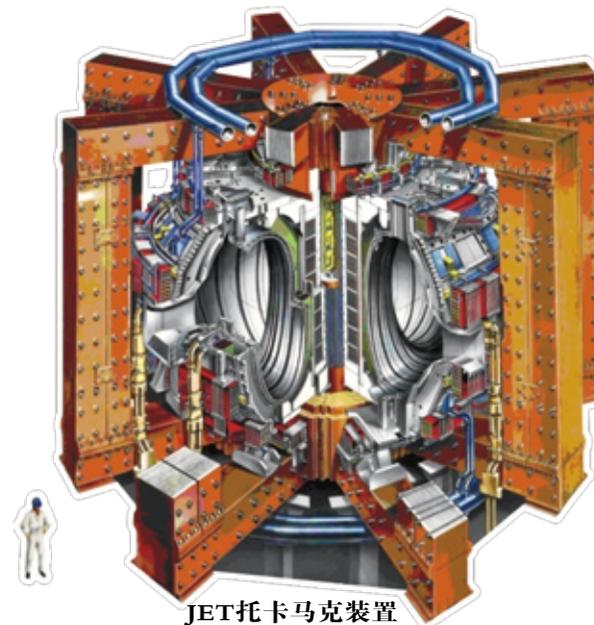
的安全性。3)核聚变能是相对清洁和环境友好的能源。核聚变电站不产生化石燃料电站所释放的温室气体，没有裂变产物。不过，以D-T为燃料的核聚变电站，T是具有放射性的，但它的半衰期非常短，而且在聚变堆中将很快再循环、燃烧。4)核聚变反应所产生的大量高能中子在军事上以及其他领域都有广泛的用途。因此，核聚变能是目前认识到的最终解决人类能源问题的最重要途径之一，研究核聚变、开发核聚变能具有极其重大的科学意义和战略意义。

在聚变堆中将很快再循环、燃烧。4)核聚变反应所产生的大量高能中子在军事上以及其他领域都有广泛的用途。因此，核聚变能是目前认识到的最终解决人类能源问题的最重要途径之一，研究核聚变、开发核聚变能具有极其重大的科学意义和战略意义。

### 3. 实现核聚变的路途有多远？人类探索核聚变能源的历程

在地球上，实现核聚变反应需要两个基本条件：一是把燃料加热

到极高温，如D-T反应所要求的燃料温度不低于1亿度，而D-D反应所要求的温度不低于5亿度。这两个温度都已经远远地超过了太阳温度，这是十分苛刻的条件。在这样高的温度下，物质全部变成一种叫作等离子体的气体。这种高温等离子体不能



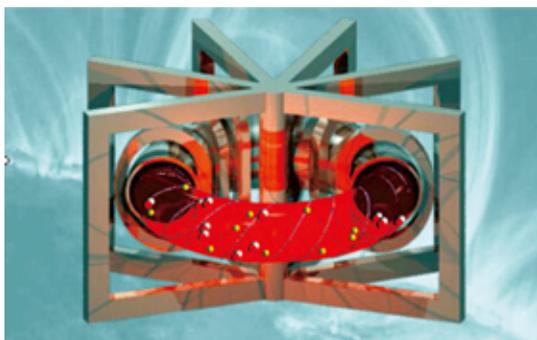
JET托卡马克装置

用容器来容纳，因此要实现聚变能的利用，首先要解决能够存放高温等离子体的容器，将等离子体约束在某种容器中，并维持足够长的时间，以便充分地发生核聚变反应，释放出足够多的能量，使聚变反应释放的能量大于产生和加热等离子体本身所需的能量及其在这过程中损失的能量。这样就能够利用聚变反应放出的能量来维持其所需的极高温，毋需再从外界施入能量，聚变反应也能自持地进行下去，此时这只“烧”聚变燃料的特殊“炉子”意味着被点着了。表征这个概念的科学术语叫“聚变点火”。可是约束等离子体的时间越长，技术上越难于实现。如何把1亿度的高温等离子体长时间约束起来，让它能够充分反应，这是聚变研究最困难的问题之一。因此，约束问题是受控核聚变研究中要解决的第二个难题，也是更为棘手的难题。

20世纪50年代初期，前苏联科学家塔姆和萨哈罗夫，提出了实现磁

约束容器的装置——托卡马克装置，又称环流器。磁约束核聚变利用磁场将高温等离子体约束在被称为真空室的容器中，可以使真空室中的高温等离子体环与器壁完全脱离。

那么，约束时间多长才能实现点火呢？约束时间跟密度有关。为了得到大量的聚变能，等离子体必须有足够的密度（如每立方厘米 $10^{14} \sim 10^{16}$ 个）才会有足够多的粒子发生反应，并有聚变



托卡马克概念图

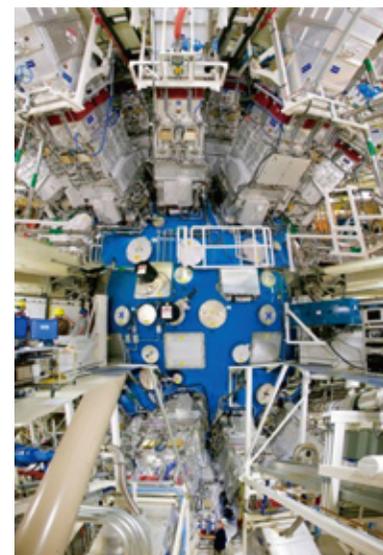
能输出。英国科学家劳逊在50年代详细研究了实现聚变点火必须满足的条件，为此，点火条件也称劳逊条件或劳逊判据或称聚变三重积。它是温度 $T$ 和约束时间 $\tau$ 跟密度 $n$ 乘积的函数。

实现点火仅是受控核聚变研究的第一步。炉子点着了必须烧得很旺才能使用。受控核聚变研究的第二个目标是使输出的能量超过输入的能量，获得净聚变能，建成核聚变发电站。

人类对核聚变能的研究和探索，经历了十分漫长的过程，受控核聚变研究在早期是保密的。经过多年的努力，科学家们意识到受控核聚变的成功并非像氢弹爆炸那样可以指日而待。只有解密，进行国际合作与交流，才能促进受控核聚变研究。不久，美、英、前苏联、日本和中国等国的科学家先后在仿星器、磁镜和箍缩等多种位形的聚变研究装置上开展活跃的研究与交流。时至今日，能实现核聚变的基本方法有两种：磁约束核聚变和惯性约束核聚变。

磁约束核聚变堆分为完全为获得聚变能量的纯聚变堆和聚变-裂变混合的增殖堆。其实现途径有托卡马克聚变堆、仿星器聚变堆、球马克聚变堆、串级磁镜聚变堆等。在上述磁约束核聚变堆途径中，最成功的是托卡马克。托卡马克有非常强的环向磁场，并由通过等离子体的电流产生极向磁场使环向磁场得到扭曲旋转以约束等离子体。在建造磁约束聚变反应堆方面，托卡马克是目前最有力的竞争者。

作为受控核聚变的另一种方式——惯性约束核聚变，在1960年激光问世后不久，就有科学家提出用激光器作为惯性约束核聚变驱动源的建议。20世纪70年代初，劳伦斯·利弗莫尔实验室的科学家提出了激光惯性约束核聚变的具体方案，并开展了大量的研究工作。目前世界上有三大激光装置，一是美国的劳伦斯·利弗莫尔国家实验室百万焦耳级的国家点火装置（NIF），二是法国波尔多



美国NIF激光聚变装置

附近的激光兆焦耳装置（LMJ），三是中国的“神光-III”。它们都将用于惯性约束核聚变在实验室条件下的可行性研究，包括大量靶物理研究、驱动器研究、制靶技术研究和各种点火方式研究等，可望在不久的将来实现点火演示。

20世纪80年代，托卡马克实验研究取得了重大进展。1982年，在德国ASDEX装置上发现了高约束放电模式，该结果对于建设商用反应堆具有重大的意义。1984年，JET装置公布的实验结果显示，其等离子体

电流达到3.7 MA，并能够维持数秒。1986年，普林斯顿的TFTR用16兆瓦大功率氦中性束注入氦靶等离子体，当时被称作“超级炮”（super shot），中心离子温度达到 $2 \times 10^8$  K（为太阳中心温度的10倍），产生了10千瓦的聚变功率。

从20世纪90年代开始，在JET（欧洲）、TFTR（美国）、JT-60（日本）等世界三大托卡马克实验装置上开始获取D-T聚变能的尝试。1991年11月，在欧洲的JET上首次成功地进行了D-T放电实验，1997年，JET用25兆瓦辅助加热功率演示产生聚变功率16.1兆瓦（即聚变能21.7兆焦）的世界最高纪录。1993年10月，美国的TFTR装置也实现了D-T聚变反应。1997年12月，在日本JT-60上成功地进行了D-D反应实验，折算到D-T反应，Q值可以达到1.00，即等离子体中核聚变反应所产生的能量刚好等于注入到等离子体中的能量。后来，Q值又超过了1.25，即有净能量输出。此后，日本的JT-60U装置（JT-60的升级装置）也取得了



JET托卡马克

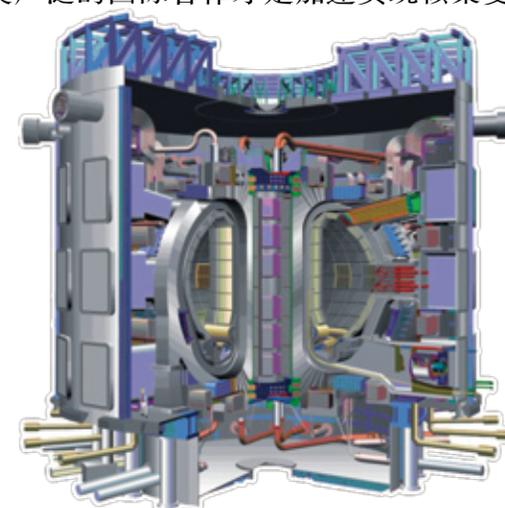
受控核聚变研究的最好成绩，获得了聚变反应堆级的等离子体参数：峰值离子温度约45 keV（约 $4.5 \times 10^8$  K），电子温度10 keV（约 $1 \times 10^8$  K），等离子体密度约 $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ；等效能量增益因子大于1.3。除三大托卡马克外，美国的DIII-D和德国的ASDEX-U等装置，同样为提高先进托卡马克的研究水平做出了突出贡献。

以JET、TFTR、JT-60等托卡马克装置为代表的磁约束聚变研究取

得的突破性进展宣告了以托卡马克为代表的磁约束核聚变研究的堆芯等离子体科学可行性在实验上已经得到了证实，已经奠定有可能考虑建造聚变能实验堆，创造研究大规模核聚变的条件。

#### 4. ITER计划将核聚变能源研究带入新阶段

由于核聚变研究是一项耗资巨大、研究周期相当长的大科学项目，人们开始认识到只有开展广泛的国际合作才是加速实现核聚变能利用的可行之路。ITER（国际热核聚变实验堆）计划是美国、日本、欧盟、中国、俄罗斯、韩国和印度等7方合作，目前世界上最大型的国际大科学合作计划。其目的是建设一个为验证全尺寸可控核聚变技术可行性的国际托卡马克实验堆。2006年11月21日，中国、



国际热核实验堆装置

欧盟、美国、日本、俄罗斯、韩国、印度在法国巴黎正式签署了《国际热核聚变实验堆ITER联合实施协定》，ITER（国际热核聚变实验反应堆）是规划建设中的一个为验证全尺寸可控核聚变技术的可行性而设计的国际托卡马克实验堆。此项目预期将持续30年：10年用于建设，20年用于运行，总花费大约128亿美元。

ITER建成后第一阶段的目标是实现400~500 MW的聚变功率，并能够使核聚变反应持续500秒，这是ITER最关键的目标。第二阶段的目标

是拉长核聚变持续时间，实现更长脉冲或接近成为准稳态或稳态运行。

ITER的物理目标和技术目标表明：ITER的建造是可控热核聚变发展史上具有里程碑意义的重大事件，如果它成功，将使人类第一次获得可控时间很长、相当于准稳态的高功率高增益燃烧等离子体，去研究聚变能开发的一系列重大的关键的科学和工程技术问题；ITER不是磁约束的商用聚变电站的原型，但是，它是迈向磁约束商用聚变电站必经的重要阶段之一。

受控核聚变研究从科学研究到能源应用大致可分为四个阶段，即：科学可行性验证、工程可行性验证、示范反应堆和商用反应堆。以JET、TFTR、JT-60等托卡马克装置为代表的磁约束聚变研究取得的突破性进展宣告了以托卡马克为代表的磁约束核聚变研究的堆芯等离子体科学可行性在实验上已经得到了证实，而ITER计划开始实施，标志着托卡马克磁约束聚变能研究由基础性研究进入了以验证工程可行性为主要目标的实验堆研究阶段。

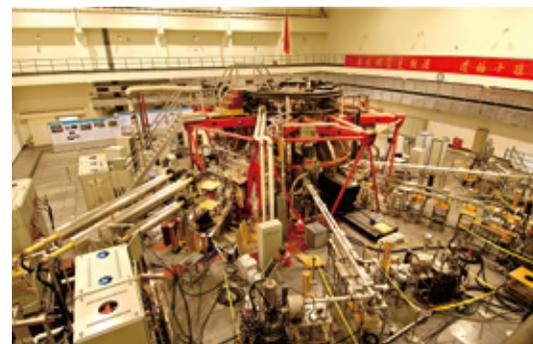
ITER计划是目前全球规模最大、影响最深远的国际科研项目之一。ITER计划的实施结果将决定人类能否迅速地、大规模地使用聚变能，从而可能影响人类从根本上解决能源问题的进程。

核聚变能源的研发对每个大国都是必要的，但又是一个长期、大规模、高投入而且又是高风险的过程。参加ITER计划，全面介入ITER的建设和实验，可以掌握ITER的知识和技术，培养一批聚变工程和科研人才，为我国自主地开展核聚变示范电站的研发奠定基础。

## 5. 中国的核聚变能源研究进展和目标

中国磁约束聚变研究起步于20世纪50年代末，经过了多种途径的探

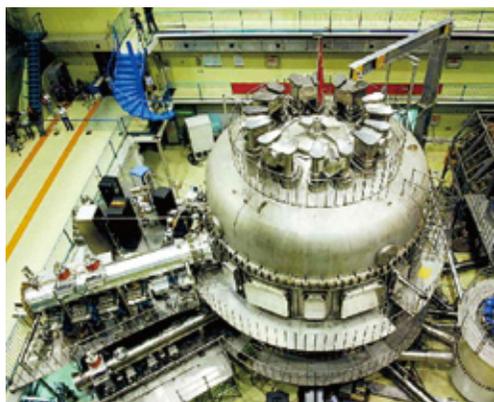
索阶段，从20世纪七八十年代起，磁约束聚变的研究基本集中在托卡马克上。中科院等离子体物理研究所在20世纪70年代至80年代相继建成并运行CT-6、HT-6B及HT-6M等小型托卡马克。1984年，核工业西南物理研究院成功研制并运行中等规模的托卡马克装置HL-1。HL-1装置的建成是标志我国核聚变研究由原理性研究阶段迈入规模实验研究阶段的一个重要里程碑。1995年我国成功建造了达到国际同类型同规模装置先进水平的“中国环流器新一号(HL-1M)装置”。2002年，“中国环流器二号A(HL-2A)装置”建成并成功进入实验运行。实现了我国核聚变研究由原理探索到大规模装置实验的两次跨越发展，为我国核聚变能源开发事业做出了重要贡献。HL-2A装置是我国第一个具有偏滤器位形的大型托卡马克装置。2003年，HL-2A装置上成功地实现了偏滤器等离子体放电，这也是我国第一次实现的偏滤器位形托卡马克运行。偏滤器位形是现代高性能托卡马克中的一个重要特征，偏滤器也是聚变堆的一个重要部件。它的部分研究成果能够支持国际热核实验堆(ITER)所需要的数据库，增强了中国磁约束核聚变研究参与国际合作研究的能力，加快了与国际研究接轨的步伐，它标志着中国磁约束核聚变研究提高到一个新水平。在HL-2A装置等离子体实验上取得了重大进展，首先实现了先进的等离子体偏滤器位形放电，其次获得了等离子体电子温度达到5500万度和离子温度接近3000万度的结果，并且实现了具有边缘局域



中国环流器二号A装置

模的高约束(H模)放电。目前,核工业西南物理研究院正在对HL-2A装置实施改造与升级成HL-2M。HL-2M装置将进一步发挥装置灵活、等离子体可近性好的特点,大幅度提高等离子体参数,充分发展等离子体辅助加热系统,提升装置实验水平,为开展ITER相关的堆芯等离子体物理实验研究,以及面向聚变堆工程技术的实验研究创造更有利条件。

EAST(东方超环)是由中国自行设计研制的世界首个全超导托卡马克装置,主要用于对建造稳态先进的托卡马克核聚变堆的前沿性物理问题开展探索性实验研究。2006年3月由中国科学院等离子体研究所完成建造,并于2006年9月获得初始等离子体。EAST目标是产生1 MA的等离子体电流;持续放电时间达到1 000秒,在高功率加热下等离子体温度超过一亿度,为最终实现核聚变点火做好准备。目前EAST已获得了稳定可重复的1MA等离子体放电,实现了EAST的第一个科学目标,这也是目前国际超导装置上所达到的最高参数。EAST装置将有利于探索等离子体稳态先进运行模式,其工程建设和物理研究可为ITER项目的建设提供直接经验,并为未来聚变实验堆提供重要的工程和物理实验基础。



全超导托卡马克装置 EAST

中国的磁约束聚变研究进入21世纪以来取得了巨大进步,不仅建造了大型的先进的聚变装置(HL-2A装置和EAST装置),而且在这些装置上取得了具有国际先进水平的创新性实验成果。包括超声分子束注入(SMBI)/团簇注入(CJI)缓解边缘局域

模(ELM)、高能粒子物理、L-H转换、湍流和输运等一些高水平的研究工作引起国内外同行高度重视。

## 6. 核聚变能源研究带动尖端技术进步

目前,核聚变能的开发尚处于研发阶段,人类实现受控核聚变能的应用仍有漫长而艰巨的道路要走,核聚变技术的研究开发意义不仅仅在于实现核聚变能源的商业应用。在过去漫长的核聚变研究开发进程中,尽管道路艰难而曲折,但对核聚变领域本身的研究过程中开发出的尖端技术同时又产生出众多对产业有贡献的革新技术,并带动了各个尖端科技领域的进步。涉及的领域包括超导研究、高真空、生命科学、遥控密封、环境科学(地球模拟、电力储藏、环境气体精密测定、磁气分离系统、氢能源利用、微波电力输送)、密封、等离子体计量和控制、信息通信(超高速数据处理、遥控控制系统、大型液晶显示屏幕等)、RF加热技术、NBI加热技术、纳米材料(等离子束高速精细加工、高磁界中的材料开发、高周波环境下陶瓷烧制、超高真空环境、高性能材料的制造)等等学科。

ITER计划的实施和核聚变研究开发的深入进行,必将带动人类高新科技技术领域的更大发展,同时各个领域对人类作出积极的贡献。

