

国际热核聚变实验堆(ITER)计划*

赵君煜[†]

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 聚变能目前是认识到的可以最终解决人类能源和环境问题的最重要的途径之一. 经过许多科学工作者半个多世纪的努力, 磁约束聚变研究取得了重大的进展. 集成当今国际受控磁约束核聚变研究的主要科学和技术成果, 合作建立与未来实用聚变堆规模相比拟的受控热核聚变实验堆 ITER(international thermonuclear experimental reactor) 成为国际上大家的共识. 文章就 ITER 及相关的情况进行一些介绍.

关键词 ITER, 核聚变, 等离子体, tokamak

The international thermonuclear experimental reactor program

ZHAO Jun-Yu[†]

(Institute of Plasma Physics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China)

Abstract Confined fusion is one of the most important ways for finally solving mankind's demand for energy without polluting the environment. Magnetic confined fusion research has achieved great progress as result of the efforts devoted to fusion research over a half century. It is now recognized that a fusion device to produce thermal energy at the level of an electricity-producing power station must be constructed through international collaboration. The design of the International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER) is based on data collected on the present experimental Tokamaks and physical models for different plasma processes. This paper reviews the ITER program.

Key words ITER , nuclear fusion , plasma , tokamak

1 磁约束聚变介绍

聚变是一种战略能源, 是 21 世纪的换代能源. 对中国和亚洲等能源需求巨大的发展中国家和地区有特别重要的意义. 核能是能源家族的新成员, 它包括裂变能和聚变能两种主要形式. 裂变能是重金属元素的质子通过裂变而释放的巨大能量, 目前已经实现商用化. 因为裂变需要的铀等重金属元素在地球上含量稀少, 而且, 常规裂变反应堆会产生放射性较强的核废料, 这些因素限制了裂变能的发展. 另一种核能形式是目前尚未实现商用化的聚变能.

氘氚聚变反应可以释放出大量能量, 其燃料氘和锂在地球上几乎可以说是无穷尽的. 聚变反应堆不产生硫、氮氧化物等环境污染物质, 不释放温室气体, 氘氚反应的产物没有放射性, 中子对堆结构

材料的活化也只产生少量较容易处理的短寿命放射性物质. 考虑到聚变堆的固有安全性, 聚变能可以看成是不污染环境、不产生放射性核废料、具有接近无限资源的比较理想的能源^[1]. 因此, 聚变能是目前认识到的可以最终解决人类能源和环境问题的最重要的途径之一.

可控热核聚变能的研究分惯性约束和磁约束两种途径. 惯性约束是利用超高强度的激光在极短的时间内辐照靶板来产生聚变. 磁约束是利用强磁场可以很好地约束带电粒子这个特性, 构造一个特殊的磁容器, 建成聚变反应堆, 在其中将聚变材料加热

* 国家自然科学基金(批准号: 19889504)资助项目

2003-06-02 收到初稿, 2003-08-12 修回

[†] E-mail: zhaoj@ipp.ac.cn

至数亿摄氏度高温,实现聚变反应.20世纪下半叶,聚变能的研究取得了重大的进展,磁约束研究领先于其他途径.科学家研究出一种类似于面包圈形状的环形器,这种面包圈形状的装置被称作“托卡马克”.在这类装置上做出的物理实验取得了一个又一个令人鼓舞的进展.等离子体温度已达4.4亿度;脉冲聚变输出功率超过16MW; Q 值(表示输出功率与输入功率之比)已超过 $1.25^{[2-6]}$.所有这些成就都表明,在这类装置上产生聚变能的可行性已被证实.但这些结果都是在数秒时间内以脉冲形式产生的,与实际反应堆的连续运行仍有较大的距离,其主要原因在于磁容器的产生是脉冲形式的.

可控热核聚变能研究的一次重大突破,就是将超导技术成功地应用于产生托卡马克强磁场的线圈上,使得这类磁容器磁约束位形的连续稳态运行成为现实.

2 国际热核聚变实验堆(ITER)

1985年,美苏首脑提出了设计和建造国际热核聚变实验堆 ITER(international thermonuclear experimental reactor)的倡议.1987年,通过国际合作,美、苏、欧、日四方开始进行 ITER 的设计.1990年完成了 ITER 概念设计(CDA);1998年,美、俄、欧、日四方共同完成了工程设计(EDA)及部分技术预研.根据 EDA 设计,预计建设投资近100亿美元.ITER四方在1998年接受工程设计报告后开始考虑修改原设计,力求在满足主要目标的前提下,大幅度降低建设投资.由于其内部原因以及与其他三方的分歧,美国于1999年宣布退出 ITER 计划.欧、日、俄又经过三年努力,完成了 ITER-FEAT(ITER-fusion energy advanced tokamak)的设计及大部分部件与技术的研发,造价已降至约46亿美元(如图1所示,它的主要参数如表1所示).目前 ITER 计划的实施已经进入实质性谈判阶段,正式谈判成员为:欧、日、俄、加、中、美、韩七方.现在七方正正在为选址、组建机构和各种章程进行谈判.预计政府间谈判会在2004年结束,各国政府将对是否参加 ITER 作出决定,并签定承担费用、厂址等一系列法律文件.ITER 建设工期为8至10年,实验运行20年,最终用5年时间退役.它将由各方达成一致意见的独立机构来管理.

ITER 将集成当今国际受控磁约束核聚变研究的主要科学和技术成果,第一次在地球上实现能与未来实用聚变堆规模相比拟的受控热核聚变实验堆,解决通向聚变电站的许多物理和工程问题.这是



图1 国际热核聚变实验堆主机示意图

人类受控热核聚变研究走向实用过程中的必不可少的一步,因此受到各国政府及科技界的高度重视和支持.

表1 ITER 主要典型参数(括号中为另一组运行参数)

总聚变功率	500MW(70MW)
Q (聚变功率/加热功率)	>10
14MeV 中子平均壁负载	$0.57\text{MW}/\text{m}^2$ ($0.8\text{MW}/\text{m}^2$)
每次燃烧时间	>500s
等离子体大半径	6.2m
等离子体小半径	2.0m
等离子体电流	15MA(17MA)
小截面拉长比	1.7
等离子体中心磁场强度	5.3T
等离子体体积	837m^3
等离子体表面积	678m^2
加热及驱动电流总功率	73MW

3 ITER 计划的科学目标

ITER 计划第一期的主要目标是建设一个能产生 $5 \times 10^5 \text{ kW}$ 聚变功率、能量增益大于10(在其他参数不变的情况下,若运行电流为17MA,则总聚变功率为700MW)、重复脉冲大于500s氦气燃烧的托卡马克型实验聚变堆(具体参数见表1).在 ITER 中,将产生与未来商用聚变反应堆相近的氦气燃烧等离子体,供科学家和工程师们研究其性质和控制方法.在此之前,人们只能在各核聚变实验室中创造和研究没有氦气燃烧过程的高温等离子体(尽管温度可以足够高).因此所有以前得到的研究成果,都必须在燃烧等离子体阶段得到验证并进一步发展.这是实现聚变能必经的关键一步.在 ITER 上得到的所有结果都将直接为设计托卡马克型商用聚变堆提供依据.ITER 的建造是受控热核聚变研究(包括等离子体物理和等离子体技术)的新阶段,也是人类更

接近实现受控聚变能的标志. 国际聚变界主流的看法是 ITER 计划在未来 10 年内实现这一目标是有相当把握的.

根据 ITER 计划, ITER 设计还考虑了一些灵活性的安排, 可供探索进一步改进燃烧等离子体性能的可能途径, 并准备了多种控制燃烧等离子体的手段, 使得在 ITER 运行的第二阶段, 可以探索实现具有持续、稳定、高约束的高性能燃烧等离子体. 这种高性能的“先进燃烧等离子体”是建造托卡马克型商用聚变堆所必要的. 这种先进稳态运行的基本参数见表 2.

表 2

总聚变功率	356 MW
(Q 聚变功率/加热功率)	~ 5
14 MeV 中子平均壁负载	0.41 MW/m ²
每次燃烧时间	> 3000 s
等离子体大半径	6.2 m
等离子体小半径	2.0 m
等离子体电流	9 MA
等离子体中心磁场强度	5.3 T
加热及驱动电流总功率	59 MW

ITER 计划在后期还将探索实现高增益(能量增益 Q 大于 30)的燃烧等离子体.

ITER 计划的完全实现将为商用聚变堆的建造奠定科学基础.

4 ITER 计划的技术基础、工程技术发展目标

ITER 计划的另一重要目标是通过创造和维持氦氖燃烧等离子体, 检验和实现各种聚变技术(在以往, 这些技术大都是分别发展的)的集成, 并进一步研究和发展能直接用于商用聚变堆的各种技术. 从这个意义上讲, ITER 是聚变技术发展的新阶段.

在过去十余年中, 与建设 ITER 有关的技术研发项目(R&D)已经基本完成, 其中包括正式列入 R&D 的项目[包括中心螺管模型线圈(CSMC, 图 2)、纵场模型线圈(TFMC, 图 3)、真空室原型段、包层原型模块、偏滤器箱体、包层模块遥控操纵系统、偏滤器遥控操纵系统]以及构成 ITER 的外围系统的研发项目(包括等离子体控制技术、氦处理技术、加热与电流驱动系统、加料与抽气系统、电源系统、诊断系统等). 为研发这些技术和系统, 欧、日、

俄、美四方各相关领域的专家已经努力十余年, 耗资超过了十亿美元. 目前建造 ITER 的技术已经基本具备. 国际上的有关人士(科学、工程、甚至有关国家政界)都认为, ITER 的现有工程设计有相当坚实的技术基础, 是完全有可能实现的. ITER 计划在技术上的另一重要任务是检验各个部件在聚变环境下的性能(包括辐照损伤、高热负荷、大电动力的冲击等), 实现受损部件的就地更换, 以及发展实时、就地的大规模制氦技术. 上述工作是设计与建造商用聚变堆之前所必须完成的, 并只能在 ITER 上开展.

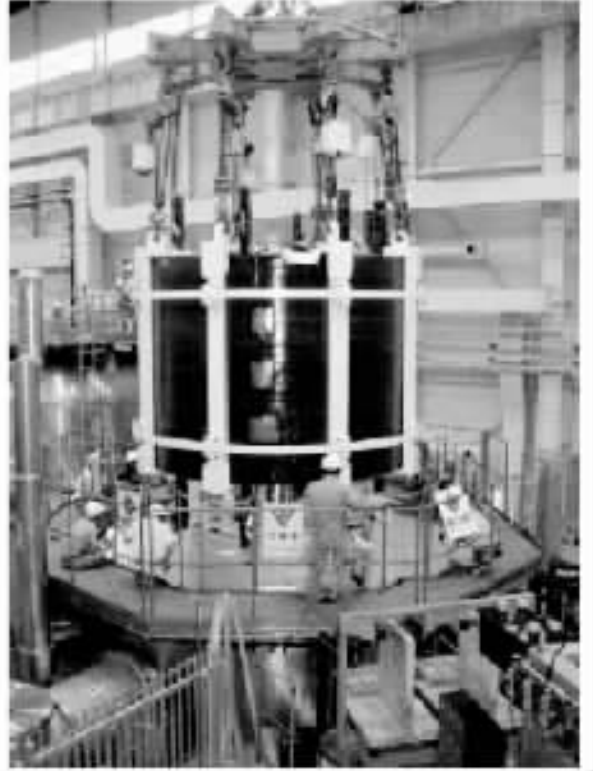


图 2 中心螺管模型线圈(CSMC)

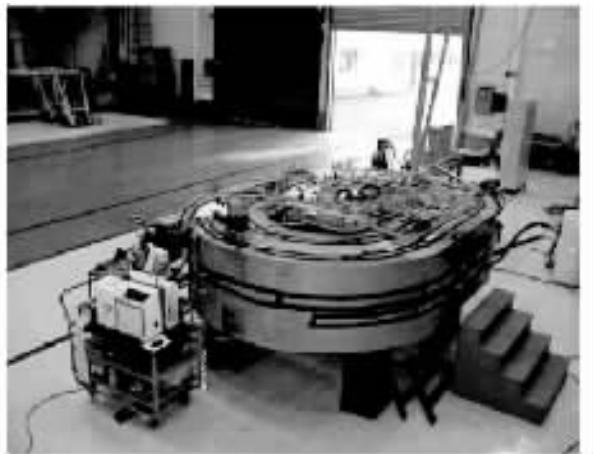


图 3 纵场模型线圈(TFMC)

当然,由于商用聚变反应堆的规模以及其他因素,在 ITER 上完全实现对商用聚变堆某些技术(如材料抗聚变中子辐照能力等)的检验,仍然会有困难,因而还必须另外做一些独立的安排。

受控热核聚变研究在发展了 50 年后,在 2003 年进入了一个新的阶段,ITER 项目将最后选址开工。科学工作者们希望这个在新世纪初开始的项目将成为彻底解决能源问题的发端。

参 考 文 献

[1] Hold J P. Ann. Rev. Energy Environ. ,1991 ,16 235
 [2] JET Team(presented by Keilhacker M). Plasma Phys. Control. Fusion ,1997 ,39 :B1
 [3] Start D F H *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 ,80 #4681
 [4] Strachan J D *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1994 ,72 3526
 [5] JET Team(presented by Gibson A). Phys. Plasmas ,1998 ,5 : 1839
 [6] Hawryluk R J. Rev. Mod. Phys. ,1998 ,70 537
 [7] ITER FEAT Outline Design Report——ITER EDA Documentation Series No. 18. IAEA ,Vienna 2001



· 物理新闻和动态 ·

一种简单易行的农用反光膜技术

农用反光膜技术是一种直接利用太阳光的简单易行的办法。两年前,河北省阜平县西刘庄大队的农民在河北省科协派来的老专家汤长廉、刘文重、张秋利等人的指导下推广了果树修剪、疏花疏果、浇水施肥、病虫害防治、套袋等整套技术。在此基础上,又推广了一项地表铺覆反光膜技术。他们的实践证明,反光膜技术是改良果树品质的有效方法^[1]。这种方法是在果树近旁铺覆一层塑料反光膜,它能反射太阳光,使树上的苹果的外观均匀受色,提高了苹果质量(又红又大)与口感,可明显地提高苹果的卖价。农民高兴地称之为“点石成金”术。

太阳把无限的光子流无偿地撒向普天之下的偏僻的农村,我们为何不巧妙地利用它呢?

三年前,法国有过利用“光毯”促进葡萄增产的新闻报道^[2]。该条新闻指出,法国研究人员新研制出一种“光毯”新

产品,把它铺在葡萄园中,可促进葡萄的生长。这种用合成纤维制成的布上面缀有轻质的铝片,可以把阳光反射到葡萄藤下部见不到阳光的部位,可促进植物的光合作用。葡萄在光毯的反光作用下,味道和色泽都有明显的提高,且果粒个头增大,成熟期缩短。但目前这种光毯技术还无法在西红柿、瓜类植物、梨等果类的种植上使用,因为它不能与植物的叶子和果实直接接触,否则会把植物灼伤。

与法国的“光毯”相比,西刘庄的反光膜方法有一定的创新性,实际上比法国的“光毯”简单、更实用、更省钱、更便于推广。

参 考 文 献

[1] 张更行. 科学时报 2003 年 8 月 28 日 4 版
 [2] 光毯“技术有助葡萄增产. <http://www.aweb.com.cn/2001/4/4/20014495623.htm>

(南开大学物理学院光子学中心 张光寅)



光 学 元 件 库 — 欧 普 特 科 技

北京欧普特公司参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、实验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。

光学透镜:平凸,双凸,平凹,双凹,消色差胶合透镜等。直径 1~150mm;焦距 1~1000mm;材料包括光学玻璃,紫外石英玻璃,有色光学玻璃,红外材料。

光学棱镜:1~50mm 各种规格直角棱镜,及其它常用棱镜。

光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝,镀银,镀金,及介质反射镜。直径 5~200mm。

光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶。直径 5~200mm。

各种有色玻璃滤光片:规格 5~200mm(紫外,可见,红外)。

紫外石英光纤:进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。

单位:北京欧普特科技有限公司
 地址:北京市海淀区知春路 49 号
 希格玛大厦 B 座 #306 室
 电话:010-88096218 / 88096217
 传真:010-88096216
 邮编:100080
 网址:www.goldway.com.cn
 电子邮件:optics@goldway.com.cn
 sms@goldway.com.cn
 联系人:栗曼珊女士
 石冀阳小姐