

核聚变能源和超导托卡马克

——“九五”重大科学工程 EAST 通过国家验收*

万元熙

(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

摘要 核聚变能的开发研究在托卡马克类型的磁约束装置上取得了重大进展;超导、特别是全超导托卡马克因此成为建造未来先进聚变堆工程、物理前沿研究领域;中国用最少资金,最快速度在世界上率先建成 ITER 类型的全超导托卡马克,因而受到国际聚变界高度关注和赞赏。

关键词 核聚变能源,超导托卡马克, EAST

1 人类将面临严重的能源问题

能源是社会发展的基础,迄今为止,化石能源一直是人类主要的一次能源。化石燃料不仅储量有限,而且在开采、运输、燃烧的过程中将造成严重的生态破坏和环境污染。随着社会的发展,能源消耗将急速上升,根据 1998 年世界能源委员会发表的统计数据,按 1998 年世界能源消耗量计算,已探明的可用储量:石油可用约 50 年;天然气可用约 70 年;煤炭可用约 200 年;天然铀可用约 60 年;如果把全部资源纳入考虑,大约也只能用 200—300 年。因此,整个人类将面临一次能源枯竭的严重问题。此外,化石燃料还是宝贵的化工原料,仅用做燃料,将它消耗殆尽的同时,对环境造成破坏和严重污染,这不仅是自然资源极不合理的使用,而且对人类社会的可持续发展造成了严重威胁,因此,人类必须进行并尽快完成战略新能源的开发研究。

中国的能源问题将比世界上其它国家更严重并将对世界能源形势产生重大影响。中国人均能源消耗约为世界人均消耗的

1/2, 为发达国家的 1/10, 为美国的 1/13; 中国人口约为美国人口的 5—6 倍, 如果中国达到美国目前人均耗能水平, 总的能源用量将是现在用量的 13 倍, 相当于 5—6 个美国的总用量。目前 CO₂ 排放量美国第一, 中国已居第二, 这些数字说明: 中国将比任何其它国家更快面临严重能源短缺和环境污染问题。中国的能源问题既是中国的问题也是世界的问题!

2 核聚变能是人类可持续发展最理想的新能源

存在两种核反应: 核裂变和核聚变。太阳上的巨大能量来源于以氢原子核为基础的一系列聚变反应:

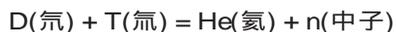


这种聚变反应所释放出来的巨大能量使太阳源源不断向宇宙空间, 包括地球辐射能量。正是太阳光的照射, 地球上万物生长、进化和通过亿万年的循环代谢在地球上沉积和储藏了一定数量的各种化石能源, 与此同时太阳还为地球提供了各种(风力、水力,

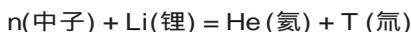
* 收稿日期: 2007 年 5 月 10 日

生物质和太阳能等) 可再生能源。

地球上也存在多种核聚变反应。其中最容易实现的是氘-氚核聚变反应:



氘(D)存在于海水中。它在天然氢中占1/6700, 由此可计算出每立方米海水中含有33克氘。自然界中没有氚, 但它可通过中子辐照聚变堆包层中的锂获得并循环再生:



锂在地球上的储藏量也很丰富。氘-氚核聚变反应的资源在地球上远比任何化石燃料丰富。一旦实现受控核聚变, 海水和锂将为人提供几乎取之不尽的新能源。此外, 氘-氚核聚变的产物是惰性气体氦, 氦的同位素氘(D)的寿命为12年, 只具有短期放射性。因此, 核聚变能既是无限的也是清洁的, 是人类可持续发展最理想的新能源!

3 核聚变能的开发在托卡马克的磁约束核聚变装置上取得重大进展

只有在极高温条件下才可能发生核聚变反应。在极高温下物质将变成完全电离的气体——高温等离子体(物质的第四态)。约束高温等离子体原则上有三种途径: 万有引力(如太阳); 惯性约束(如激光打靶); 磁约束。托卡马克是一种环形磁约束核聚变实验装置。在托卡马克类型的磁约束核聚变装置上聚变能的开发研究已经取得了重大进展: 最高温度已达到2—4亿度; 在美国的TFTR托卡马克上聚变功率超过10兆瓦; 在欧洲联合环JET上的最大聚变输出功率已超过16兆瓦; 在日本JT-60上等效Q值(聚变输出功率/输入功率)已达到1.25。这些重大进展表明: 经过全世界聚变界近60年的努力, 在托卡马克上开发核聚变能的科学可行性已经得到了证实!

正是在上述基础上, 建造一个托卡马克类型的国际热核聚变实验堆(ITER)的主要

工程物理基础已经具备。包括中国在内的7个国家已经签署协议, 将在未来10—15年内耗资约50亿美元完成ITER的建造。

4 超导托卡马克是实现托卡马克稳态运行的必要条件

需要特别指出的是: 托卡马克取得的上述重大进展是在脉冲运行条件下获得的, 只能维持几秒钟, 因为常规托卡马克只能脉冲运行。未来托卡马克聚变堆必须稳态运行, 因此必须研制超导托卡马克。先进的全超导托卡马克不仅可以稳态运行, 而且高效、安全, 是聚变堆所必须。世界上已经建成四个超导托卡马克: T-7, T-15, Traim-I, 和 Tore-Supra。但它们都只有纵场磁体是超导磁体, 因此不是全超导托卡马克。T-7是由前苏联建造的世界第一个超导托卡马克, 但它只是一个工程实验装置。后来在等离子体所经过改造后才成为重要的HT-7超导托卡马克实验装置。

因此, 迄今为止, 世界上还没有一个全超导托卡马克, 而未来国际热核聚变实验堆(ITER)以及之后的工程示范堆(DEMO)和聚变能电站(Power plant)都要求稳态运行。即将建造的ITER(图2), 它是一个大型全超导托卡马克。为了将它的建造和运行风险降到最小, 在ITER之前应当有规模小一些, 但同样是全超导托卡马克的先行实验装置, 以便为这样一个大型全超导托卡马克聚变堆提供重要工程、物理基础。

5 中国的全超导托卡马克核聚变实验装置(EAST)

在上述背景下, 等离子体所在中科院和相关部门的支持下, 从上世纪90年代初就开始了超导托卡马克的研究。EAST项目于1998年批准立项, 2000年10月开工建设。

5.1 EAST的科学目标

建成一个具有非圆截面的全超导托卡

马克并以其为核心建成一个核聚变实验系统;在其上实现近堆芯高参数,稳态或长脉冲运行;在上述条件下进行与未来聚变堆相关的工程和物理问题的探索性实验研究,为未来稳态、安全、高效先进聚变堆的物理和工程技术基础做出重要贡献,从而使我国在开发清洁而又无限的核聚变能的研究领域进入国际前沿并做出重大贡献。

5.2 EAST 的物理特点

(1) 全超导。目前世界上正在运行的所有超导托卡马克均只有纵场磁体是超导磁体,而 EAST 是国际上第一个建成并成功进行放电实验的全超导托卡马克(不仅纵场而且极向场磁体也是超导磁体);

(2) 非圆小截面:可以实现大拉长和各种偏滤器位形的先进运行模式;

(3) 真空室内所有部件不仅可以根据实验的进展定期更换,而且这些部件可主动冷却或加热,满足稳态运行和实验要求。

5.3 EAST 实验系统的组成

它包括:超导托卡马克装置主机;低温系统;高功率电源系统(纵场、极向场和快速反馈控制电源);真空抽充气系统;高功率低杂波驱动电流系统;高功率离子回旋共振加热系统;诊断测量系统;总控和数据采集系统以及公用辅助设施及基础配套(实验厅、110kV 变电站、水冷、超导实验室、低温车间和环保安全)等 9 个重要子系统。

5.4 自主创新,自力更生,成功建设 EAST

在资金有限和我国超导工业基础薄弱的条件下,通过与国内工业部门的合作及广泛的国际交流,项目组的全体工程技术人员自主设计,研发、加工了超导托卡马克几乎所有最关键的部件,完成了大量超导磁性测试试验,在此基础上高质量完成总装并成功地进行了工程调试及物理实验。工程调试及物理实验结果表明:整个 EAST 装置及

其实验系统稳定、可靠,所有工程参数均达到或超过设计指标。EAST 工程已经全面、优质完成。

5.5 EAST 工程调试一次成功并进行两轮重要物理实验

经过 5 年多的建设, EAST 系统于 2006 年初建成并成功进行了首轮工程调试。2006 年 7—10 月,在第二次工程调试中不仅所有工程参数均达到或超过设计值而且还成功获得了首次高温等离子体放电。在 2006 年 12 月—2007 年 2 月第 2 次物理实验运行中又在世界上首次在全超导托卡马克上实现了具有拉长和各种偏滤器位形的高温等离子体放电。

EAST 实验系统工程调试及物理运行的成功表明:(1) EAST 全超导托卡马克装置主机的所有磁体可进入并保持良好的超导状态。(2) EAST 抽气系统确保了装置的极限外真空达到 1.9×10^{-5} Pa,分子泵机组对氮有效抽速达到 $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。内抽气系统极限真空达到 1.7×10^{-5} Pa,分子泵机组对氮有效抽速达到 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 。优于设计指标。(3) EAST 低温制冷系统的氦制冷总能力大于 2 400 W,各项技术指标均达到或超过设计指标,完全满足了 EAST 装置磁体通电实验需要。(4) EAST 纵场电源及极向场电源系统达到了设计要求,性能稳定、安全、可靠,支持并满足了 EAST 各种实验运行的需要。(5) 高功率电流驱动、高功率波加热系统完成电源、发射机的建设并已投入 EAST 的初期实验研究,系统能力达到设计目标并充分满足 EAST 第一阶段实验需要。(6) EAST 诊断项目运转正常,稳定可靠,提供了用于装置运行和等离子体控制所要求的基本信息,也为在 EAST 初始运行参数范围内测量各种物理参数,满足描述和研究 EAST 等离子体基本特性和行为的要求。(7) EAST 总控和数据采集系统确保全超导托卡马克的有效安

全连锁和故障保护,实现了各种实验条件下的灵活控制。(8)EAST 水冷及供电系统完成建设,其运行能力远大于原设计要求。

5.6 EAST 在国内外受到高度评价

与国外同类装置相比,项目使用资金最少,建设速度最快并在建成后的极短时间内就取得了重大实验进展,因而受到国际聚变界的高度评价。2006年10月,EAST 国际顾问委员会在对现场考察后认为,“这一杰出成就是全世界聚变能开发的重要里程碑”。委员会“对 EAST 的高质量建设留下了深刻印象。在如此短暂的时间内完成设计、预研、建设和试运行,成就了世界聚变工程的一个非凡业绩。它极明确地预示着中国对 ITER 的贡献”。委员会认为:“EAST 是世界上唯一运行的、拥有与 ITER 类似的全超导磁体的托卡马克,尽管经费极少,但它的快速建成、迅速发展和首次运行是一个了不起的成就,展示了中国科学院团队在物理和工程方面的能力”。

6 结束语

成功设计和建造 EAST 的经验不仅构

成了中国参加 ITER 的重要基础,更为重要的是:未来商业聚变堆肯定不会是国际合作项目,它必须由各个国家自主建造,否则就得向别的国家购买;EAST 的成功建造和运行将为中国磁约束核聚变研究的下一步计划奠定坚实的物理、工程技术和人才队伍基础,因此意义重大。

EAST 不仅将为 ITER 也将为我国核聚变能的开发研究发挥承前启后的重要作用。建议的中国开发核聚变能的战略规划是:(1) 全力以赴在未来 10 年全面完成 EAST 既定科学目标;(2) 积极参加 ITER,广泛了解、学习、参与在 ITER 上实现稳态燃烧等离子体的工程技术发展和物理研究;(3) 尽早开始中国聚变实验堆的概念和工程设计并逐步开始关键工程技术问题的预研;在 2010 年左右提出并争取批准建立实验堆的计划,在 2020—2030 年期间建成聚变实验堆,与国际聚变界共同努力,为人类在 2050 年前后能够开始使用具有商业意义的核聚变能源而努力奋斗!

(相关图片请见封四)

Energy Source of Nuclear Fusion and Superconduction Tokamak

Wan Yuanxi

(Hefei Institute of Physical Science,CAS, 230031 Hefei)

Abstract: Research and development of Tokamak-type magnetic confinement device has obtained major progress; Superconduction Tokamak, especially full superconduction Tokamak, thus has become the research area for constructing the future advanced thermonuclear reactor project, and physics frontiers; China has taken the lead in building up ITER-type full superconduction Tokamak with least capital and peak speed in the world, thus being highly concerned and appreciated by the international nuclear fusion circles.

Keywords Energy source of nuclear fusion, superconduction Tokamak, EAST

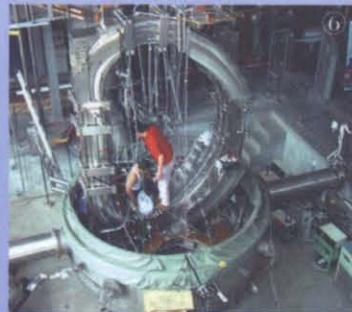
万元熙 男,合肥物质科学研究院等离子体物理研究所研究员,博士生导师,国家“九五”重大科学工程项目“大型非圆截面超导托卡马克装置”项目总经理。1967年北京大学毕业。领导和直接参与多个托卡马克的建设和实验。多次在各种国际会议上做邀请报告和总结;在国际上首倡和组织了 IAEA TCM SSO 系列国际会议;多次担任重要国际会议组委会和国际顾问委员会成员。

“九五”重大科学工程项目 EAST通过国家验收



- ① 全超导托卡马克EAST主机
- ② 全国人大常委会委员长吴邦国（左一）视察EAST装置
- ③ EAST实验大厅外貌
- ④ EAST国际顾问委员会在总控室观看EAST放电实验
- ⑤ 大极向场超导线圈绕制现场
- ⑥ 大型超导纵场线圈测试实验
- ⑦ 极向场超导磁体
- ⑧ 中心螺管原型磁体绕制中
- ⑨ 绕制完成的CICC导体
- ⑩ 真空压力浸渍车间

（相关内容请见本期243页）



ISSN 1000-3045

9 771000 304009 05 >