

我国超导托卡马克的现状与发展^{*}

李建刚

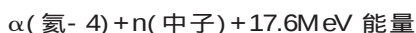
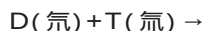
(中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 一个经济实用的商用堆必须是高效、紧凑和稳态运行的。未来商用堆必须是全超导,才能实现稳态运行。我国超导托卡马克研究始于1991年,在将原苏联T7超导托卡马克改成HT-7后并在其上做了许多有意义的工作。1997年开始全超导托卡马克EAST计划,2006年建成并投入运行。未来将在长脉冲条件下进行高参数等离子体物理实验,为未来稳态、先进聚变实验反应堆奠定良好的工程技术和物理基础。

关键词 磁约束聚变,超导,托卡马克

1 引言

热核聚变能是轻核聚变所释放的能量。地球上最容易实现的聚变反应是氘氚反应:



其中,中子携带14.1MeV能量, α 粒子带3.5MeV能量。在1吨海水中氘约含40克、锂约0.15克,中子照射锂-6可造氘。这样,浩瀚的大海可为人类提供聚变能源至少几十亿年。同时氘氚反应过程不产生放射性,即使14.1MeV中子辐照到物质上所产生的放射性也是短寿命的。特殊设计的氘氚反应堆还可以使裂变堆中产生的长寿命高放射性物质得到“嬗变”,或者使铀238或钍232增殖为钍239或铀233,从而使储量丰富的上述裂变材料得到充分利用。可以说,聚变能是无污染、无放射性核废料、资源无限的理想能源,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。

磁约束聚变是利用强磁场这一“磁容

器”来约束高温等离子体,并进而将其加热至上亿度,从而维持连续的热核反应,并将其巨大的能量转化为电能。

受控核聚变研究在经济

等方面有着巨大潜力,因此各核大国每年投入研究经费都达数亿美元。20世纪50年代初期,前苏联科学家提出托卡马克的概念。托卡马克(TOKAMAK)在俄语中是由“环形”、“真空”、“磁”、“线圈”几个词组合而成,依靠等离子体电流和环形线圈产生的强磁场,将极高温等离子体状态的聚变物质约束在环形容容器里,以此来实现聚变反应。1954年,第一个托卡马克装置在原苏联库尔恰托夫原子能研究所建成。70年代初,在苏联T3托卡马克上获得超过1000万度的等离子体,国际上很快形成了较大规模,以托卡马



李建刚研究员

^{*} 收稿日期:2007年9月1日

克为主流的磁约束研究方向。

2 国内外托卡马克研究现状

在众多途径中,托卡马克获得了巨大成功。上世纪 90 年代,欧盟的 JET、美国的 TFTR 和日本的 JT-60 这 3 个大型托卡马克装置在磁约束核聚变研究中获得许多重要成果:等离子体温度达 4.4 亿度,这一温度不仅大大超过氘氚反应点火的要求,而且已接近了氘氚-3 聚变反应堆点火温度,脉冲聚变输出功率超过 16 兆瓦,聚变输出功率与外部输入功率之比 Q 等效值超过 1.25。所有这些成就都表明:托卡马克是最有可能首先实现聚变能商业化的途径。但这些结果仅仅持续数秒钟,尚不能用于未来电站。未来电站要求数亿度的等离子体必须稳态运行。上述装置都是常规托卡马克,其磁场只能定短脉冲的方式,无法连续运行。

可控热核聚变能研究的一项重大突破,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。原苏联于上世纪 70 年代末建造的 T-7 装置是世界上第一个超导托卡马克装置,在库尔恰托夫原子能研究所运行了 5 年左右,虽然该装置仅开了 12 个小窗口,无法开展真正意义上的等离子体物理实验,但却将超导技术用于纵场磁体并调试成功,最大纵场励磁电流达 4 800A(对应等离子体中心磁场 2.5T)。其重大意义在于在工程上验证了纵场磁体能够在这类磁容器上实现连续稳态运行。

国际上主要核国家的聚变界历时 10 多年,耗资近 15 亿美元启动的国际热核实验堆 ITER 项目,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,第一次在地球上建成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关键问题。这是人类受控热核聚变研究走向实用的关键一步,因此受到各国政府

及科技界的高度重视和支持。欧盟、日本、美国都明确提出在未来 35 年内建立聚变示范堆,在本世纪中叶实现聚变能的商用目标。

我国核聚变能研究始于上世纪 60 年代初,尽管经历了长时间非常困难的时期,但始终能保持稳定、逐步的发展,建成了两个在发展中国家最大的、理工结合的大型现代化专业研究所,即核工业总公司所属的西南物理研究院(SWIP)及中科院所属的合肥等离子体物理研究所(ASIPP)。为了培养专业人才,还在中国科技大学、大连理工大学、华中理工大学、清华大学等高等院校建立了核聚变及等离子体物理专业或研究室。

我国核聚变研究从起步之初,即便规模很小时,就以在我国实现受控热核聚变能为主要目标。自 70 年代开始,集中选择了托卡马克为主要研究途径,先后建成并运行了小型 CT-6(中科院物理所)、KT-5(中国科技大学)、HT-6B(ASIPP)、HL-1A(SWIP)、HT-6M(ASIPP)及较大一些的 HL-1M(SWIP)。最近 SWIP 建成的 HL-2A 经过进一步升级,有可能进入当前国际上正在运行的少数几个中型托卡马克之列。在这些装置的成功研制过程中,组建并锻炼了一批聚变工程队伍。我国科学家在这些常规托卡马克装置上开展了一系列十分有意义的研究工作。

1991 年,我国开始开展超导托卡马克发展计划(ASIPP),探索解决托卡马克稳态运行问题。1994 年底,ASIPP 成功改建了我国第一台超导托卡马克装置 HT-7 及其附属系统,并于 1995 年初投入运行。HT-7 超导托卡马克系统是 ASIPP 在广泛国际合作的基础上,争取国内各方的支持,主要依靠自己的力量,用短短 3 年多的时间改建而成的核聚变实验装置。其主要研究目标是,获得并研究长脉冲或准稳态高温等离子体并检

验和发展与其相关的工程技术,为未来稳态先进全超导托卡马克装置提供工程技术和物理基础。

该装置 1995 年投入运行,经过多方面的改进、完善,装置运行的整体性能和水平有了很大的提高。10 多年来,物理实验不断取得重大进展和突破。在中心等离子体密度大于 $2.2 \times 10^{19}/\text{m}^3$ 条件下,最高电子温度超过 5 000 万度;成功地实现了 306 秒的稳态等离子体放电,等离子体电流 60kA,中心电子密度 $0.8 \times 10^{19}/\text{m}^3$,中心电子温度约 1 0 00 万度。高温等离子体存在时间在世界各大装置中仅次于容积大于 HT-7 装置 17.5 倍的法国超导托卡马克 Tore-Supra。

HT-7 实验的成功,使 HT-7 装置成为世界上第二个全面开放的、可进行高参数稳态条件下等离子体物理研究的公共实验平台。

一个经济实用的商用堆必须是高效、紧凑和稳态运行的。全超导托卡马克可实现稳态运行,并通过在稳态运行条件下大大改善约束,为未来稳态、先进聚变反应堆奠定工程技术和物理基础。未来商用堆必须是全超导,才能实现稳态运行。上世纪末,由于其工程难度及风险极大,世界上尚无建造全超导托卡马克的先例。国家大科学工程项目“EAST(原名 HT-7U)超导托卡马克核聚变实验装置”的科学目标正是针对目前建造托卡马克核聚变堆尚存在的前沿性物理问题,进行探索性的实验研究,为未来稳态、安全、高效的先进商业聚变堆提供物理和工程技术基础。

“EAST 超导托卡马克核聚变实验装置”包括一个具有非圆小截面的大型超导托卡马克 EAST 实验装置和低温系统、真空系统、电源系统、控制与数据采集系统、波加热系统、波驱动电流系统、诊断系统以

及公共基础设施等重要子系统。EAST 超导托卡马克实验装置是本项重大科学工程的核心。EAST 装置主机的主要特点是: EAST 装置的极向场和纵场采用了超导磁体,以提供稳态的等离子体约束,成形和平衡所需的稳定磁场;为实现大的拉长比和三角形变及开展各种高约束模式的实验研究的要求, EAST 装置设计有独特的非圆截面真空室和超导纵场磁体;在 EAST 装置真空室内设置有主动冷却的偏滤器、限制器、被动补偿板、快速反馈线圈等内部部件,可深入开展在极长脉冲及稳态条件下的先进运行模式的研究。

EAST 超导托卡马克装置(图 1)于 2006 年初成功进行了工程调试,并于 2006 年成功开展了两次物理实验,获得了拉长截面偏滤器等离子体。2007 年 3 月 1 日,国家发展和改革委员会组织了“EAST 超导托卡马克核聚变装置”的国家验收,验收专家认为:“按照国家发展和改革委员会批准的建设方案,该项目全面优质地完成了工程建设任务,达到工程建设的要求,实现了预定的



图 1 EAST 超导托卡马克装置

各项指标”。“该装置具有完整的自主知识产权,目前处于国际同类装置领先水平”。

目前国际上正在以及近期即将运行的主要托卡马克装置(见表 1)。

表 1 世界上主要的托卡马克聚变实验装置及辅助功率一览表

序号	装置名称	研究机构	大半径 (m)	小半径 (m)	磁场强度 (T)	电流 (MA)	小截面形状	持续时间 (S)	辅助功率 (MW)	种类
1	JET 欧洲联合实验环	英国, JET 研究所	2.96	1.25	3.5	5.0	D 型	20	40	常规
2	Tore-Supra 超导托卡马克	法国原子能委员会, 伽达拉歇中心聚变部	2.25	0.8	4.5	1.7	圆型	360	23-27	部分超导
3	ASDEX-U 托卡马克	德国马克斯-普朗克等离子体物理所	1.6	0.5	4	2.0	D 型	5-10	25	常规
4	JT-60U 托卡马克	日本原子能研究所聚变部	3.0	0.95	4.5	2.7	圆型	10	44	常规
5	DIII-D 托卡马克	美国通用原子公司聚变部	1.67	0.67	2.2	3.0	D 型	5-10	25	常规
6	HT-7 超导托卡马克	中科院等离子体物理所	1.22	0.3	2.5	0.3	圆型	300	2	部分超导
7	EAST 超导托卡马克	中科院等离子体物理所	1.75	0.4	3.5	1.0	D 型	1 000	4	全超导
8	HL-2A	中国西南物理研究院	1.64	0.45	2.8	0.45	D 型	5	6	常规
9	KSTAR 超导托卡马克	韩国国家聚变研究中心	1.8	0.4	3.5	2.0	D 型	<300	16	在建, 全超导
10	SST-1 超导托卡马克	印度等离子体物理所	1.1	0.2	3.0	0.2	D 型	1 000	4.5	在建, 部分超导

3 未来十年国内外发展趋势

经过数 10 年国际磁约束聚变界的共同努力, 托卡马克作为受控磁约束核聚变反应堆的可行性已得到初步验证, 下一步必须解决的关键问题和托卡马克聚变反应堆工程可行性与商用可行性密切相关, 它涉及到稳态先进托卡马克运行模式以及燃烧等离子体物理这两大科学问题。因此, 未来 10 年托卡马克的研究重点是稳态、高约束等离子体的行为与特征。为实现这一目标, 只能使用全超导托卡马克这一新一代的研究平台。这也是 ITER 建设的主要原因之一。

过去 5 年, 世界各主要装置实验都是围绕未来 ITER 运行的物理基础展开一系列研究, 各大装置相互配合、补充, 并相互充分验证 ITER 所需物理基础和数据库。今后 5 年, 各主要装置以及各国政府对经费的支持都将以此为重心, 以期为 10 年后 ITER 的

顺利运行打下良好的基础。

上述 10 个装置中, 韩国 KSTAR、印度 SST-1 尚未建成, 除 EAST 外, 其余装置由于各种原因几乎均不能再运行 10 年。HT-7、JT-60U 将会在 3—4 年后关闭。HL-2A 有进一步升级计划, 几年后将被改造为与德国 Asdex-U 类似的装置。由于已进行了 20 年的实验运行, 基本完成其科学目标, Tore-Supra、DIII-D、JET 等装置也许只能再运行 5 年。

EAST 装置能实现高参数稳态运行, 可开展先进聚变反应堆的前沿性、探索性研究, 为聚变能的前期应用提供重要的工程和物理基础。EAST 装置不仅规模大, 其具有的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构等特点, 将有利于探索稳态近堆芯等离子体的科学和技术问题。ITER 装置的建设需要 10 年, 其间具有稳态运行能力的装置极少。这

10 年是 EAST 的黄金期,在这期间,不仅可以开展稳态等离子体研究,提升我国在磁约束聚变领域的研究水平和能力,建立起一支能与国际水平接轨的研发队伍,为全面参与 ITER 的科学实验奠定基础,同时通过广泛的国际合作,也可以使它成为未来 10 年世界上为数极少的能为 ITER 提供前期稳态高参数等离子体研究的实验平台,逐步使等离子体所成为我国聚变研究基地和国际聚变合作研究中心。

4 国际热核聚变实验堆(ITER)

1985 年,作为结束冷战的标志性行动之一,前苏联领导人戈尔巴乔夫和美国总统里根在日内瓦峰会上倡议,由美、苏、欧、日共同启动“国际热核聚变实验堆(ITER)”计划。ITER 计划的目标是要建造一个可自持燃烧(即“点火”)的托卡马克核聚变实验堆,以便对未来聚变示范堆及商用聚变堆的物理和工程问题做深入探索。

最初,该计划仅有美、俄、欧、日四方参加。由于当时的科学和技术条件还不成熟,四方科技人员于 1996 年提出的 ITER 初步设计很不合理,要求建设投资上百亿美元。1998 年,美国出于政治原因,以加强基础研究为名,宣布退出 ITER 计划。欧、日、俄三方则继续坚持合作,并基于上世纪 90 年代核聚变研究及其它高新技术的新发展,大幅度地修改了实验堆的设计。2001 年,欧、日、俄联合工作组完成了 ITER 装置新的工程设计(EDA)及主要部件的研制,预计建造费用为 50 亿美元,建造期 8—10 年,运行期 20 年。其后,三方分别组织了独立的审查,都认为设计合理,基本上可以接受。

2002 年,欧、日、俄三方以 EDA 为基础开始协商 ITER 计划

的国际协议及相应国际组织的建立,并表示欢迎中国与美国参加 ITER 计划。中国于 2003 年 1 月初正式宣布参加协商,其后美国在 1 月末由布什总统宣布重新参加 ITER 计划,韩国在 2005 年被接受参加 ITER 计划协商。以上六方于 2005 年 6 月签订协议,一致同意把 ITER 建在法国核技术研究中心(Cadarache),从而结束了激烈的“选址大战”。印度于 2006 年加入 ITER 协商。最终,七个成员国政府于 2006 年 11 月签了建设 ITER 的国际协定。

作为聚变能实验堆(图 2),ITER 要把上亿度的高温氦氖等离子体约束在体积达 837 立方米的“磁笼”中,产生 50 万千瓦的聚变功率,持续时间达 500 秒。这将是人类第一次在地球上获得持续的、有大量核聚变反应的高温等离子体,并产生接近电站规模的受控聚变能。

在 ITER 上开展的研究工作将揭示这种带有氦氖核聚变反应的高温等离子体的特性,探索它的约束、加热和能量损失机制,等离子体边界的行为以及最佳的控制条件,从而为今后建设商用的核聚变反应堆奠定坚实的科学基础。对 ITER 装置工程整体及各部件在 50 万千瓦聚变功率长时间持续过程中产生的变化及可能出现问题的研究,不

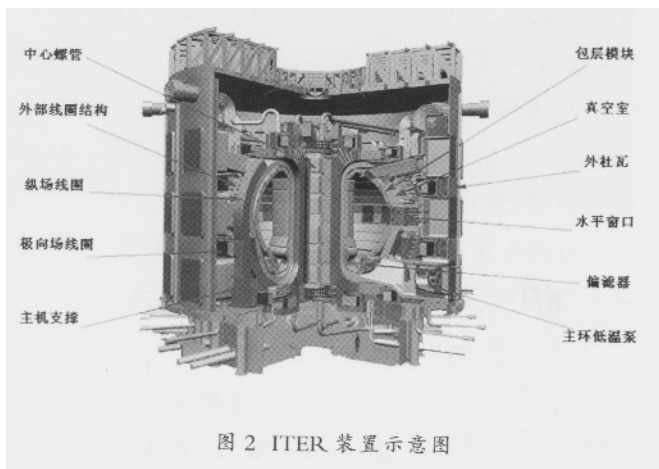


图 2 ITER 装置示意图

仅将验证受控热核聚变的工程可行性,而且还将对今后如何设计和建造聚变反应堆提供必不可少的信息。

ITER 的建设、运行和实验研究是人类发展聚变能非常必要的一步,有可能将直接决定真正聚变示范电站(DEMO)的设计和建造,并进而促进商用聚变电站的更快实现。

ITER 装置不仅反映了国际聚变能研究的最新成果,而且综合了当今世界各领域的一些顶尖技术,如:大型超导磁体技术,中能高流强加速器技术,连续、大功率毫米波技术,复杂的远程控制技术等。

尽管就总体规模和水平来说,我国核聚变能的研究与美、欧、日等发达国家还有不小的差距,但是我们有自己的特点,同时也在技术和人才等方面为参加 ITER 计划做了相当的准备。这使得我们有能力完成约定的 ITER 部件制造任务,为 ITER 计划做出相应的贡献,并有可能在合作过程中全面掌握聚变实验堆的技术,达到我国参加 ITER 计划的目的。中国政府已于 2006 年 11 月在法国正式签署了 ITER 合作协议,成为正式成员国。今后 10 年将按协议承担义务,完成 ITER 10%部件的建造。

为此,未来 10 年,我国应充分吸收国内外聚变堆设计的经验,通过参加 ITER 掌握实验堆的关键技术,在我国近 20 年聚变堆设计的基础上,自主设计中国聚变堆,并对其中最为关键的技术进行预研和发展,使我国在 2020 年前后形成具有自主研发设计制造聚变示范堆的能力,跨入世界核聚变能研究开发的先进行列。

5 未来十五年我国超导托卡马克研究的发展方向

未来 15 年,是国际磁约束聚变发展的重要时期。随着 ITER 计划实施,托卡马克

研究进入快车道。我国应抓住这一重大机遇,瞄准国际核聚变能研发前沿水平,参加 ITER 装置的建设、运行和实验,配合国内相应的技术研发,积极开展国际合作,与自主研发并重,消化、吸收,全面掌握 ITER 的设计及各方面的重要技术和科学成果。

将国内的研究目标与国际前沿接轨,通过人员派出和引进,开展联合科学研究,将国内的研究基地建成中国特色的、能为国际聚变数据库提供有价值数据、全面开放的研究基地。

结合 ITER 科学和技术研究计划,在 ITER 建设期(2006—2016 年),把 EAST 建成国际化的聚变研究中心和做为 ITER 的前期试验基地,全面发挥 EAST 的潜力,开展相应的关键科学问题研究和关键技术发展。将 EAST 建成具有重要科学和技术基础的、不可替代的、全方位开放的国内外合作研究的重要平台,全面提升我国在聚变能研究领域的国际地位,使我国在稳态先进磁约束核聚变研究方面进入世界前列。

完成 ITER 建设中我国承制的超导导体、电源、屏蔽包层等部件的设计、认证以及制造技术的研发,完成全部部件的制造,掌握 ITER 关键技术。大幅度提高我国聚变工艺方面的水平,使重大的设备达到较高的国产化率并在国内形成有一定规模的聚变工业。

加强理论、计算机数值模拟和基本等离子体物理问题的研究,在一些小装置上开展多途径的探索。在国内相应的大学、研究所建立有一定规模的等离子体物理和聚变工程的人才培养基地群,大力推进人才培养。

与此同时,发展关键技术,如 Nb_3Sn 超导磁体、低活化第一壁材料、混合堆包层关键技术、氦工艺、远程控制、高功率稳态中性注入和微波加热技术、先进诊断技术。独立

开展多功能聚变堆的设计、研发,为在“十二五”末开始设计、建造实验堆奠定坚实基础。

通过 10—15 年的努力,建立并完善国家核聚变能研究发展战略体系,使我国核聚变能开发技术水平进入世界先进行列,使得我国在 2020 年前后有能力设计与研制聚变能示范堆,有能力自主开发 ITER 技术在能源领域的应用。

主要参考文献

- 1 The ITER Team. Nuclear fusion, 1999, 39:2 136.
- 2 Y X Wan. Nuclear Fusion, 2000, 40:1 324.
- 3 万元熙.“核聚变研究的现状和前景”.中国科学院科学发展报告.北京:科学出版社,1999.
- 4 Y X Wan. EAST team. Plasma science and technology, 2006, 8(3).
- 5 P D Weng et al. The engineering design of the HT-7U Tokamak. Fusion engineering and design, 2001, 58-59: 827-831.
- 6 Baonian Wan, Yanping Zhao, Jiangang Li et al. Control of profiles and transport by ion Bernstein waves in the Hefei Tokamak-7. Physics of plasmas, 2003, 10:3 703-3 711.
- 7 Baonian Wan, Jiangang Li. Integration of LHCD and IBW heating for high-performance discharges under steady-state operation in the HT-7 tokamak. Nuclear fusion, 2003, 43:1 279-1 287.
- 8 G S Xu, B N Wan, M Song et al. Direct measurement of poloidal long wavelength ExB Flows in the HT-7 Tokamak. Phys. Rev. Lett., 2003, 91(12): 125 001.
- 9 吴宜灿,汪卫华,刘松林等.核科学与工程, 2005, 25(1): 76-85.
- 10 陈红丽,吴宜灿,柏云清.核科学与工程, 2005, 25(4): 374-378.

Present Status and Development of Superconducting Tokamak Research in China

Li Jiangang

(Institute of Plasma Physics, CAS, 230031 Hefei)

An economical and practical commercial reactor must be high efficient, compact and steady-state in operation. Future commercial reactor must be fully superconducting device which can be operated steadily. Superconducting Tokamak research in China started in 1991 by the modification of a formal Russian Tokamak T-7 to HT-7. Significant progresses have been obtained over the past 10 years. EAST project, a fully superconducting Tokamak, started in 1997 and finished its construction and was put into operation in 2006. In the future, high parameter plasma physical experiments will be conducted under the condition of long impulse, so as to establish a solid engineering and physical basis for future steady-state and advanced fusion experimental reactor.

Keywords Magnetic-confined fusion, superconducting, Tokamak

李建刚 中科院等离子体物理研究所所长,研究员,博士生导师,国家“九五”重大科学工程‘EAST 超导托卡马克聚变装置’副总经理,‘等离子体与壁相互作用’国际专业委员会主席。中国-ITER 专家委员会副组长。