

* 大科学工程 *

开发聚变能 造福全人类

——HT-7 和 HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置

万元熙*

(等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 核聚变能是最理想的清洁新能源。等离子体研究所已建成的中国第一个、世界第四个超导托卡马克 HT-7 核聚变实验装置,其上实验研究取得了重大进展,并正着手建设国家“九五”重大科学工程 HT-7U 大型超导托卡马克装置。在实际使用纯聚变能之前,建造托卡马克型的稳态聚变-裂变混合堆,是发展我国洁净核能系统的重要一步。等离子体研究所将为聚变能的开发及其前期利用做出贡献。

关键词 核聚变,超导托卡马克,聚变-裂变混合堆

1 核聚变能是最理想的清洁新能源

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性能源。化石燃料储量有限,随着社会的发展,能源消耗将急速上升,预期 200 多年后,整个人类将面临一次性能源枯竭的危机。此外,化石燃料是宝贵的化工原料,如仅用做燃料,资源的利用极不合理,还对环境造成严重污染。

核聚变可释放出巨大能量,太阳的巨大能量就是来源于核聚变反应。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,储量十分丰富;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,这一新能源至少可供人类使用数十亿年。聚变过程不产生二氧化碳和二氧化硫等有害气体,也不产生长寿命的放射性废物,反应产物是无放射性的惰性气体氦,因此,聚变能将是人类实现可持续发展最理想的清洁而又取之不尽的新能源。

2 磁约束聚变研究在托卡马克装置上取得了突破

聚变反应需要数亿度的高温条件,在极高温下所有物质都变成完全电离的气体——等离子体。利用强磁场可以约束带电粒子的特性,构造一个特殊的磁容器,在容器中将可聚变燃料加热至数亿度高温,将实现聚变反应。磁约束聚变研究的最终目标,就是建成聚变反应堆。经

* 等离子体物理研究所所长,研究员

收稿日期:1999年9月29日

过国际聚变界近 60 年的不懈努力,磁约束聚变已在托卡马克类型的装置上取得了突破性进展:

(1)聚变燃料已可被加热到 2 亿—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 \times 密度 \times 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 年内提高了 1 万倍,目前离聚变堆的要求只差 20 倍左右。

(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 α 粒子加热效应。靠 α 粒子加热,聚变堆才能自持燃烧。

(3)表征聚变输出功率(获得)和装置的输入功率(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它途径(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。

3 超导托卡马克已成为磁约束聚变研究的前沿领域

上述突破性进展都是在普通托卡马克脉冲放电条件下获得的,由于脉冲运行和约束效率低,装置十分庞大,在普通托卡马克的基础上不可能建成高效、安全和经济的托卡马克商用聚变堆。超导托卡马克可以实现稳态运行,特别是具有非圆小截面的超导托卡马克,不仅可以实现稳态运行,还可在稳态运行条件下进行改善约束的研究。因此,建造超导托卡马克并在其上进行稳态先进托卡马克商用聚变堆物理和技术基础的研究,已成为当今磁约束聚变研究前沿领域。

4 我国超导托卡马克 HT-7 的实验研究取得重大进展

从 60 年代开始,世界上已建成了近百个普通托卡马克。但直到 1980 年,俄罗斯库尔恰托夫研究所才建成世界上第一个超导托卡马克 T-7;随后,法国的 Tore-supra、日本的 Triam、俄罗斯的 T-15 三个超导托卡马克相继建成。除 T-15 由于经费等原因一直没能正常运行外, Tore-supra 和 Triam 不仅成功运行,而且在物理实验研究方面也不断取得重大进展。这说明超导技术可以用到以稳态运行为目标的大型托卡马克装置上。

1990 年,俄罗斯库尔恰托夫研究所表示,愿意将已完成工程试验任务的 T-7 超导托卡马克赠送我所。我所决定接受 T-7 装置,并计划把它改建成适合做物理实验的超导托卡马克 HT-7。这一决定得到了科学院的批准。等离子体所的科技人员,连续奋战了近四年,仅用 1 500 万元事业经费,就完成了该装置的全部搬迁和改建。随后几年,又克服重重困难,不仅使 HT-7 能稳定地运行,而且物理实验研究取得了重大进展:

(1)建成国内最大的低温液氦系统,实现了大型超导托卡马克装置连续数月稳定运行的最佳纪录;

(2)通过一系列改进和调试,特别是等离子体控制技术的改进,实现了长达 5.7 秒国内最长的长脉冲放电;

(3)实现了托卡马克等离子体电流完全由低混杂波驱动并稳定维持时间长达 3 秒的国内最好纪录;

(4)在国际上首创用离子回旋波进行托卡马克第一壁的高效清洗、高效硼化和硅化,获得很好结果,引起国际同行的高度重视;

(5)进行了各种长脉冲条件下改善约束的实验研究,取得了很大进展;

(6)建立了 30 多种诊断测量设备,为未来深入进行物理实验研究奠定了良好的基础。

5 HT-7U 超导托卡马克的建造将使我国磁约束聚变研究进入世界先进行列

HT-7 超导托卡马克的建成及成功运行,使我国成为世界上继法、日、俄之后第四个拥有超导托卡马克的国家,从而为我国聚变研究进入世界先进水平奠定了极好的基础。在 HT-7 成功运行和物理实验取得重大进展的基础上,经过反复论证,建造下一个更为先进的大型超导托卡马克 HT-7U 的计划经中央科技领导小组批准,已在 1997 年列入国家“九五”重大科学工程项目。HT-7U 是一个具有非圆小截面的大型超导托卡马克。如能在 2004 年前后建成,将使中国磁约束聚变研究进入国际前列。HT-7U 的科学目标是:

(1)实现稳态运行;

(2)在稳态运行条件下获得近聚变堆要求的高温等离子体;

(3)在稳态和高参数条件下进行改善和提高托卡马克约束性能的实验研究;

(4)在上述条件下对托卡马克的热流(加热和排热)、粒子流(加料和排灰)进行有效的控制并使之达到稳态。

HT-7U 建成后,中国将成为少数几个拥有这类先进装置的国家,将可为聚变能的开发研究,特别是为稳态先进商用托卡马克聚变堆的基础研究做出重大贡献。因此,中国的超导托卡马克研究计划受到国际聚变界极大的关注和重视。围绕着这一计划的实现,等离子体所的国际交流与合作正在迅速扩大,内容也越加广泛和深入,包括美国在内的许多国家的聚变科学家已经加入到 HT-7 的合作研究和 HT-7U 的合作设计研究中来。等离子体所被第三世界科学院指定为对发展中国家年轻科学家开放的优秀研究所。

6 聚变能的前期应用——建造托卡马克型的聚变-裂变混合堆

在欧洲的 JET 和美国的 TFTR 普通托卡马克上已可实现 10—16 兆瓦的短时脉冲聚变功率输出,其聚变中子通量达到 10^{18} /秒。显然,即便这些托卡马克的约束性能不提高,只要实现稳态运行,以这些托卡马克为堆芯中子源建造的聚变-裂变混合堆,就可以处理 5—10 个裂变堆产生的长效裂变废物。稍加扩大,这样的混合堆每年可增殖约 100 公斤的裂变燃料钚。中国是一个人口最多、发展最快的发展中国家,面临着化石燃料短缺和因大量使用化石燃料造成环境污染等严重问题,因此,在纯聚变能源开发使用之前,必须发展裂变核能。作为纯聚变堆的前期应用,建造聚变-裂变混合堆,大量处理裂变废物和增殖裂变燃料,从而构成燃料充足、相对清洁的裂变核能系统,将是中国能源发展重要、合理而又现实的战略决策。等离子体所将在大型科学工程 HT-7 不断取得实验研究进展和成功建成 HT-7U 大型超导托卡马克的基础上,在 2010 年前后向国家提出建造稳态聚变-裂变混合堆的建议,为聚变能的开发研究及其前期应用,为中国的可持续发展做出应有的贡献。