

受控热核聚变研究及其在我国 HT-7 超导托卡马克上的最新进展*

李建刚 杨 愚[†]

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘 要 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.国际热核聚变实验堆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能成为彻底解决能源问题的发端.中国科学院等离子体物理研究所最近在受控热核聚变科研上取得了长足进展,朝着稳态高温等离子体的方向又跨出了坚实的一步.其 HT-7 超导托卡马克高温等离子体的持续时间达到 63.95s,成为目前世界上能开展分钟级高温等离子体放电的仅有的两个超导托卡马克装置之一.文章主要介绍了中国科学院等离子体物理研究所最新的聚变实验研究进展.

关键词 受控热核聚变,超导托卡马克,等离子体

Controlled thermonuclear fusion and the latest progress on China's HT-7 superconducting tokamak

LI Jian-Gang YANG Yu[†]

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

Abstract After 50 years of research on controlled thermonuclear fusion, a new stage will be reached in 2003, when a site for the International Thermonuclear Experimental Reactor project will be chosen to start the construction. Scientists hope that this project could herald a new era in which the energy problem will be solved completely. The great progress made on the HT-7 superconducting tokamak in China has provided positive and powerful support for fusion research. The HT-7 is one of the only two superconducting tokamaks in the world that can carry out minute-scale high temperature plasma research, and has achieved a duration of 63.95s for the hot plasma discharge. This is a major step towards real steady-state operation of the tokamak configuration. We present an overview of the latest progress on the tokamak experiments in the Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences.

Key words controlled thermonuclear fusion, superconducting tokamak, plasma

1 经济可持续发展急需新的能源

文明的维持与发展是建立在能源供应充足的基础之上的.生活水平越高,经济发展越快,消耗的能源就越多.在人造卫星拍摄的地球夜间发光物的地图上,可清楚地看到:经济发达的地区灯火通明,比如东京湾附近、珠江三角洲光点密密地联成一片,而经济水平落后的地区也许人口密度并不低,但在地图上却常常只可见寥寥的几点微光^[1].

当前人类利用的能源主要是煤、石油、天然气这

样的化石类燃料.它们形成的周期长,在地球上贮藏量有限.它们还带来了严重的环境问题.燃烧化石类燃料所造成的 CO₂ 排放被认为是全球变暖的主要原因,要对日渐频繁的自然灾害如水灾、干旱负责.人类对供量充足、环境污染少的新能源的需要日益迫切.

快速发展中的中国必须有充足的能量供给.从 1953 年到 1989 年,中国的经济水平提高了 10 倍,

* 国家自然科学基金(批准号:10105009)资助项目

2003-05-07 收到初稿,2003-07-23 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: yangyu@ipp.ac.cn

而能耗增长了 18 倍。^[1] 要想达到发达国家的水平,对能源的需求可想而知。中国近年来 8% 的年经济增长率伴随着的一个现实是对石油的大量进口,另一个现实是目前中国的 CO₂ 排放量仅次于美国。能源问题是中国经济发展中潜在的大问题。

2 聚变能是理想的新能源

科研工作者们一直在寻找解决问题的办法。然而目前的研究表明:可再生能源,如风能、太阳能,虽对环境的破坏小,但能提供的能量密度低,难以完全替代化石类能源,更谈不上满足未来进一步的能源要求。^[2]

水电站的建设和运行受自然环境影响很大,同时对生态环境的影响也是很大的。中国经济时报网络版 2003 年 6 月 12 日报道:来自国家电网公司的统计显示,今年以来,部分电网出现了用电紧张和高峰时段拉闸限电局面。缺电范围较去年有所扩大,拉闸限电省份从 2002 年的 11 个扩大到今年的 16 个。同时,由于水库来水情况不好,致使今年全国各电网水电厂来水总体呈现出北枯南丰的局面,造成部分电网,特别是水电比重较大的东北、西北和川渝电网水电供应量锐减,使电网的供需矛盾更加突出。^[3]

核裂变可以提供巨大的能量,并在许多国家投入应用。但核废料的处理,装置的安全运行,以及可能的军事应用等问题一直让人难以释怀^[2]。毕竟,前苏联切尔诺贝利(Chernobyl)核电站的反应堆发生严重泄露事故,北朝鲜威胁美国要将现有轻水反应堆转为核武器原料生产用等等事件,在人们心中留下了浓重的阴影。因此大量应用裂变电的国家,如日本、俄罗斯,甚至裂变电比例高达 70% 的法国都在积极寻求其他途径。

相比之下,核聚变有突出的优点。低原子序数的元素通过聚变反应聚合为更高序数的元素,反应中损失的质量转化为能量放出,提供能量的效率比裂变还高。在对环境的影响方面,聚变不产生 CO₂ 排放,不导致温室效应;发生事故对环境基本没有辐射影响,产生的废料辐射水平低。氘和锂(用于制造氘氚聚变反应所需的氚)这两种聚变反应需消耗的元素在地球上储量丰富。发展聚变能应是替代化石类燃料与裂变能,推动人类文明发展的理想途径。国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor)项目的英文缩写名 ITER 的拉丁文意思正是“途径”。

3 受控聚变的难点与解决方案

地球上化石类能源原本就来自聚变能,只不过聚变是发生在太阳上,能量通过阳光传到地球上。当今的挑战就是在地球上实现聚变。有新闻报道,将聚变研究工作者比喻为盗取天火的普罗米修斯,十分贴切。

具有讽刺性的是,人类在地球上发展聚变能最初的演示是在瞬间释放出毁灭性的巨大能量,用于借其威力平衡冷战时期的国际军备力量。令人欣慰的是,到上世纪末,聚变科学研究人员终于有机会可以把更多的精力投入到使聚变可控,将巨大的聚变能稳定地提供给和平建设,但这要难得多。

反应离子的密度和温度越高,保持此状态时间越长,粒子间发生聚变反应的几率就越大。聚变发生的条件可简单的说成 nT 的乘积(常称为三重积)达到一定的值。在太阳上,由于其巨大的质量,万有引力帮助其满足聚变条件。在地球上,则需另辟途径。受控聚变研究目前进展最大的途径是首先把反应粒子电离形成等离子体(等离子体是物质在气、液、固态外存在的第四种状态,在这种状态下,电子与离子同时存在,而整体电荷基本为零),再提高其温度、密度,达到聚变条件。发生聚变的粒子温度需要高达 1 亿度,没有任何材料可直接承受,所以需要依靠磁场约束等离子体位置和形状。在现有的各种磁场结构中,托卡马克实现的 nT 的乘积最佳值最高,被认为是最有可能实现受控聚变的方案。

4 我国 HT-7 超导托卡马克上受控热核聚变研究最新进展

我国磁约束聚变研究主要集中在成都核工业西南物理研究院和中国科学院等离子体物理研究所。经过长期的积累,聚变研究取得了长足的进步。工程上,成都西南物理研究院的 HL#2A 装置最近投入了运转;中国科学院等离子体物理研究所独立研制的全超导托卡马克 HT 7U 即将进入总装阶段,预计可在 2005 年投入实验。在今年 3 月末结束的 HT-7 超导托卡马克 2002—2003 冬季实验中,我国受控热核聚变研究又取得了多方面的新进展。

由于当今装置尺寸等因素的限制,所有面向未来的实验研究仅能在有限的方面模拟未来的实验条

件,科研的选题强烈地影响当前的科研结果在未来的意义.中国科学院等离子体物理研究所的研究主线是那些对未来反应堆有重大意义的课题所涉及的科学问题,长期以来,我们的实验坚持的三个实验重点是稳态运行、高参数等离子体和重要基本等离子体物理问题研究.虽然这些问题相互关联,但针对专项研究的优化实验条件无疑有利于对特定问题的深入理解.

早在十年前,中国科学院等离子体物理研究所就将研究重点投向聚变研究的长远目标,建立了超导托卡马克装置.1994年,HT-7装置超导磁体实验的成功使我国成为继俄、日、法后第四个拥有超导托卡马克装置的国家.托卡马克装置中的等离子体形状像一个平放在地上的轮胎,需要利用线圈产生的磁场保持它的位置和形状.常规材料制成的线圈通电流后会因电阻损耗造成温升,在大电流条件下难以稳态运行,未来聚变发电装置需要保证稳定连续工作,必须采用超导线圈.HT-7的超导线圈电流可保持在4300A,产生约2T的稳定磁场,这为开展稳态运行相关的实验提供了必要条件.要保持托卡马克等离子体的存在,需要保持其定向电流,这个定向电流一般是通过变压器耦合建立的.当等离子体放电为电感性时,变压器原边电流增长,副边(即等离子体)感应的电压维持定向电流.由于原边电流不可能无限增长,放电时间也是有限的.HT-7装置的电感性放电时间约1s.要形成长时间的放电,必须利用粒子束或射频波进行驱动,使等离子体中形成并维持非电感性的电流.HT-7装置利用的是一套低混杂波系统.低杂波可以加速等离子体中的电子,形成大量的快电子,达到驱动电流的效果.在长时间放电中,大量对于短时间放电影响不大的因素变得至关重要,如控制、数据采集、补充燃料,器壁条件等,这些研究成果对未来装置的稳态运行研究有着重要的意义.在科研人员的努力下,HT-7超导装置的放电时间不断延长,装置运行初期,放电时长仅有百毫秒量级,在最新一轮的放电中,时长达到分钟水平,最长的放电达到63.95s,现仅次于法国的Tore Supra装置.中国科学院等离子体物理研究所托卡马克研究室主任万宝年研究员说:“值得注意的是,HT-7在这样的长时间放电中,等离子体的参数保持了较高的水平,中心密度大于 $0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,温度接近500万度.存在这样长时间的高温等离子体为稳态运行实验提供了理想的实验条件.”

在聚变反应发生的三重积条件中,密度提高的

空间比较有限,因为实验中常常观察到密度提高后等离子体的约束性能会变坏,此外装置普遍存在一个密度极限,它是决定于等离子体的电流和装置几何尺寸的.高参数实验专题中的一个重要的课题就是提高等离子体温度,这可以通过注入高能粒子或大功率射频波来实现.HT-7装置采用波作为加热手段,波加热的机制可分为两种:一种就像微波炉一样,不断发射与等离子体中粒子共振频率相近的波,通过粒子共振吸收达到加热目的.在另一种加热模式中,带电粒子像在海浪前侧的冲浪人不停地被海浪加速一样,被波驱动加速.在最新一轮的实验中,在中心等离子体密度大于 $2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 条件下,通过利用大功率射频波,最高电子温度超过了5000万度.^[4]

尽管世界上的托卡马克装置大小不一,仍有统一的标准反映装置运行的水平.国际聚变界普遍采用参数 $\beta_n H$ 乘积及其存在时间. $\beta_n H$ 可以反映装置对等离子体的约束效率的高低.未来的聚变堆的 $\beta_n H$ 乘积越高,在同样投资条件下,可以得到的聚变能越高.在最新一轮的实验中,HT-7高约束等离子体存在时间为220倍能量约束时间,远超过德国ASDEX-Upgrade装置于2002年刚刚获得的世界最长的80倍能量约束时间的记录,继续保持领先地位.这是目前世界各大装置在近几年内很难达到的创新实验结果,这反映HT-7超导托卡马克研究已步入世界磁约束核聚变研究的先进前列.^[4]

等离子体与器壁相互作用是聚变研究一项极其重要而复杂的研究重点.在ITER的方案中,聚变反应的基本方程式是 $D + T \rightarrow He + n + \text{能量}$,左边的原料是H的同位素,右边的产物是携带了1/5聚变能的高能氦原子(也称为 α 粒子)和携带4/5聚变能的高能中子.中子不受磁场约束,装置面对等离子体的一切材料均受其直接照射,钢铁在其照射下会被活化,即变得有放射性,所有的材料的机械、热性能均会发生变化.同时, α 粒子将用于维持反应,而一旦能量降低不能推动反应,就需要迅速从等离子体中移出.这就需要在装置内建立一块吸收和排除热量以及杂质粒子的部位,即偏滤器,无疑此处的能量负荷非常大.壁处理和材料研究一直是中国科学院等离子体物理研究所的重点,过去的实验中用不锈钢、钨、钼等材料直接接触等离子体进行材料研究.HT-7最近的实验中取得的重要成绩是和使用与山西煤炭化学研究所等单位合作的成果——镀膜石墨分不开的.而拓展的装置运行参数对等离子体与器

壁作用研究提供了更理想的实验条件。

此外,最新一轮的 HT-7 实验还开展了针对未来聚变反应堆提高效率 and 降低成本的研究。建立聚变堆的投资很大部分用于建造线圈,如果能在输出能量不变的情况下降低对线圈的要求,将显著提高聚变的经济性。在本轮实验中,实现了等离子体电流完全由低杂波驱动的状态维持长达 28s,这意味着简化用于驱动电流的线圈已成为可能。装置能提供的聚变能与等离子体压强(带电粒子的密度与温度的乘积)平方成正比,所以提高等离子体压强可以提高聚变堆效率。托卡马克等离子体的压强一般靠芯部较高,因此优化压强分布可以提高装置性能。^[2]显然对聚变装置来说,当装置尺寸和压强峰值一样时,在更饱满的压强分布下可提供更多的能量。在 HT-7 最近利用射频波的实验中,观察到了电子温度梯度模^[4],在这种模式中,电子的温度分布比常规分布要陡,可以得到更饱满的压强分布。这种模式可以改善等离子体的约束,提高反应效率。

在这一轮 HT-7 的实验中,对一些重要的基本等离子体物理问题的研究也取得了一些原创性的成果。带状流(zonal flow)被认为是可能对等离子体的反常输运负责的输运结构,在本次实验边界湍流

研究中,第一次找到了其存在的直接实验证据,这些实验结果有可能对我们深入理解等离子体约束和输运这一物理难题产生重要的影响^[4]。对本轮实验数据的深入处理和分析正在进行之中。

我国的聚变科研工作者正在努力拓展前沿课题研究,积极加入国际合作,希望使我国逐渐成为聚变研究强国。聚变研究的最终目的不是为在未来某个夜晚,当卫星回望曾经光点稀疏的中国西部地区时可以看到一片灯火通明,而是要确保中国在为提高人民生活水平高速发展经济的过程中,不陷于能源无以为继的困境,也不以环境为代价。

参 考 文 献

- [1] Population & Resources, Produced by National Geographic Maps for National Geographic Magazine, Washington, D. C., October, 1998
- [2] Fell N. Nuclear Engineering International, 2000, (2):31
- [3] 选自中国经济时报网站: <http://www.cet.com.cn/20030612/YAOWEN/200306125.htm>
- [4] 中国科学院等离子体物理研究所工作简报, 2003 年 8 号 [Newsletter of ASIPP, 2003, 8]

· 物理新闻与动态 ·

2003 年诺贝尔生理/医学奖

(The 2003 Nobel prize in physiology/medicine)

2003 年的诺贝尔生理/医学奖被授予 Illinois 州立大学 Urbana-Champaign 分校的 Paul C. Lauterbur 和 Nottingham 大学的 Peter Mansfield 两位教授,主要表彰他们将核磁共振成像(简称为 MRI)应用在医学方面的成就。在医学领域中, MRI 是一项依据原子和分子内原子核的磁性质所产生的图像技术。利用人体内有三分之二的成分是水分子的这一事实, MRI 就能拍摄到人体内水分子中氢原子的图像。

早在 1970 年,当时还在纽约州立大学 Stony Brook 分校工作的 Paul C. Lauterbur 教授,藉助于在成像物体周围引进一个外磁场梯度来实现对物体进行二维图像的拍摄,随后不久, Peter Mansfield 教授就编写出了专用的成像程序,他利用一种新的数学模型来处理在 MRI 技术中由氢原子发射出的电磁波数据。

实际上,这项研究工作可以追溯到 1930 年,当时哥伦比亚大学的物理学家 I. I. Rabi 就曾利用调节分子的核自旋行为获得了有关氯化锂分子的大量信息。他的出色工作使他获得了 1944 年的诺贝尔奖。接着哈佛大学的 E. M. Purcell 和斯坦福大学的 F. Bloch 两位教授完成了氢分子的核磁共振测定,这项工作获得了 1952 年的诺贝尔奖。除此之外,在核磁共振的应用方面还在化学研究上获得了两次诺贝尔奖,一次在 1991 年,一次在 2002 年。

最原始的核磁共振的物理原理已经成功地在技术上发展了许多的分支,它们在科学的各个领域内发挥着作用。最近又发展了一种称之为功能性的核磁共振成像技术(简称为 fMRI),它可以在脑部的特殊区域内,通过对氧原子能级的测量来确定脑部的活度。

(云中客 摘自 Nobel website, 7 October 2003)