

聚变能和受控核聚变研究简史

江海燕

储德林

(合肥工业大学理学院 安徽 230009) (解放军炮兵学院基础部物理教研室 合肥 230031)

一、聚变能——未来人类的理想能源

能源、信息和材料作为社会进步的三大支柱,是现代社会赖以生存和发展的基本条件。我国人口众多,能源需求旺盛,随着国民经济的发展,能源问题日益紧迫。至本世纪中叶,要使我国成为中等发达国家,则需要建立约每年 38~45 亿吨标准煤、电力装机容量 15 亿千瓦或者更大些的能源体系。在我国能源构成中,化石燃料所占份额极大,水力资源有限,其他如太阳能、风能、潮汐能、生物能等,只起到重要补充作用。众所周知,化石燃料所造成的环境污染,化工原料的浪费以及运输能力的消耗等都不容忽视;太阳能、生物能虽然符合环保标准,但限于目前技术水平,尚不能提供大规模商业用电;其他能源受到天气状况、地理位置等条件制约,均无法彻底解决能源问题。

科学家早就认识到,要解决人类的能源问题,必须依靠大规模发展核能。目前核能主要有两种形式:裂变能和聚变能。同样,裂变能也存在资源匮乏以及环境污染等问题,其发展也只能是核能利用的中间阶段。聚变能燃料取自海水中蕴藏量极高的氢同位素氘(每立方米海水中含有 30 克氘),1 克氘完全燃烧可产生相当于 8 吨煤的能量。因此聚变能源是取之不尽、用之不竭的符合国际环保标准的清洁能源,是人类解决未来能源问题的根本途径之一。

核聚变的理论依据是,两个轻核在一定条件下聚合生成一个较重核,同时伴有质量亏损,根据爱因斯坦的质能方程,聚变过程将会释放出巨大的能量。反应条件是将一定密度的等离子体加热到足够高的温度,并且保持足够长的时间,使聚变反应得以进行。由于核聚变等离子体温度极高(达上亿度),任何实物容器都无法承受如此高的温度,因此必须采用特殊的方法将高温等离子体约束住。像太阳及其他恒星是靠巨大的引力约束住 1000 万~1500 万摄氏度的等离子体来维持聚变反应,而地球上根本没有这么大的引力,只有通过把低密度的等离子体加热到更高的温度(1 亿度以上),来引起聚变反应。通过人工方法约束等离子体主要有两种途径,即惯性约束和磁约束。

惯性约束是利用高功率密度的激光束或其他粒子束将内含氘氚燃料的微丸在极短的时间内压缩聚

爆达到极高的密度,同时将氘氚离子加热到热核聚变反应温度,并在向心聚爆形成的等离子体飞散以前(即利用等离子体向内运动的惯性)产生足够的聚变反应,获得能量增益。磁约束是在一定的真空容器中,将氘氚燃料用特殊的加热方法加热到聚变反应温度(即 1 亿度以上)以点燃氘氚反应,利用特殊设计的“磁笼子”将这种高温等离子体稳定地约束在该真空容器内,使聚变反应能够稳定进行。围绕这种“磁笼子”的设计和建造,人类已经走过了半个多世纪艰苦的历程。

二、受控核聚变研究历程

上世纪 30 年代,在英国剑桥的卡文迪什实验室进行了人类历史上第一次核聚变实验,结果可想而知,著名的物理学家卢瑟福于 1933 年宣布:从原子中寻找能源无异于痴心妄想!然而随着第二次世界大战的结束和曼哈顿计划(原子弹爆炸)的成功实施,人们对原子物理和核聚变的兴趣与日俱增。1952 年 11 月 1 日在西太平洋埃尼威托克岛秘密爆炸了一颗氢弹,爆炸中释放的巨大能量宣告人类终于成功地实现了核聚变。欣喜之余,科学家们设想能否将爆炸中瞬间释放的巨大能量缓慢地释放出来,以用于和平利用核能的目的呢?事实上,科学家们一直在为受控核聚变努力着。1951 年阿根廷的科学家们声称实现了受控核聚变,尽管后来证明这个结论是错误的,但也为其他科学家提供了有益的经验。

这个时候,世界上许多国家都在秘密开展受控核聚变的相关研究。美国的物理学家斯必泽在普林斯顿大学等离子体物理实验室建造了磁约束装置仿星器;物理学家詹姆士·塔克在洛斯阿拉莫斯国家实验室建造了磁场箍缩装置;爱德华·泰勒在劳伦斯利弗莫尔实验室把氢弹研究扩展到惯性约束研究。在英国,聚变研究的大量工作是在大学里开展的,其中最主要的有位于哈维尔皇家学院的汤姆逊研究组和位于牛津大学的桑尼曼研究组,汤姆逊还发明了一项聚变堆专利。1952 年物理学家库辛和沃尔建造了小型等离子体环形箍缩装置,后来又建造了规模较大的实验装置 ZETA, ZETA 是一种稳定的环形箍缩装置,于 1954 年开始使用,到 1958 年停止。ZETA

为以后建造大型聚变实验装置提供了经验。在前苏联,聚变研究也在有条不紊地开展,但都在高度保密状态下进行。直到1956年冷战结束,前苏联领导人赫鲁晓夫访问英国,才促成了聚变研究逐步开展国际合作。与赫鲁晓夫随行的库尔恰托夫院士作了一场报告“探索基于气体放电产生热核反应的可能性”,介绍了苏联的聚变研究情况;英国科学家也报告了ZETA装置的实验进展。由于聚变反应的实现条件非常苛刻,不是一个国家的力量就能实现的,基于这样一个认识,终于在1958年日内瓦召开的国际原子能大会上通过了开展国际合作与交流的决定。

此后几年,聚变研究进展非常缓慢。几乎在10年后,即1968年,在苏联的新西伯利亚召开的第三次国际等离子体物理和受控热核聚变会议上,苏联物理学家塔姆和萨哈罗夫报告在托卡马克装置T-3上获得了非常好的等离子体参数。消息传来,聚变界深受鼓舞,但同时也有人表示怀疑。这里还有一段广为流传的佳话。1969年,在征得塔姆等人同意后,英国卡拉姆实验室主任亲自携带最先进的激光散射设备重新测量了T-3上的电子温度,结果发现测得的温度比塔姆等人报告的温度还要高!自那以后,托卡马克在聚变研究中脱颖而出,成为磁约束聚变的主要研究平台,世界范围内也掀起了托卡马克研究热潮。

美国首先把当时最大的仿星器改装成托卡马克,并很快投入运行,获得了跟T-3类似的结果。这期间世界上建造了许多托卡马克装置,如美国普林斯顿大学的ATC、橡树岭国家实验室的ORMAK、麻省理工学院的Alcator、英国的Cleo、法国的TFR-40Q、西德的Pulsator、日本的JFT-2等。这批装置一般称为第一代托卡马克。在此基础上,紧接着又建造了规模较大的第二代托卡马克装置,典型的有美国普林斯顿大学的PLT,苏联的T-10,美国通用原子能机构的Doublet,西德伽兴的ASDEX。这批装置在70年代中期先后投入运行,并获得重要进展。为了研究接近聚变点火条件的高温等离子体性质,开始设计第三代托卡马克装置。这就是美国的TFTR、欧洲的JET、日本的JT-60和苏联的T-15。前三个装置已分别于1982年、1983年和1985年投入运行,取得非常显著的成果。1991年11月9日,在JET装置上首次获得了1.7MW的受控聚变能;接着,1993年在TFTR装置上通过氘氘等离子体燃烧获得了10MW的聚变能;1997年,JET装置获得16MW聚变能,为当前世界最高纪录。

我国开展核聚变研究最早可追溯到20世纪50年代中期,主要有两大研究基地:核工业西南物理研究院(成都)和中科院等离子体物理研究所(合肥)。70年代左右,中科院物理所的CT-6和中科院等离子体所的HT-6B、HT-6M等小型托卡马克装置对放电物理等课题进行了研究。1984年,中国环流器一号(HL-1)投入运行;1992年,HL-1改造成HL-1M;1994年,中科院等离子体所成功研制HT-7超导托卡马克,使我国成为继法、日、俄之后第四个具有超导托卡马克装置的国家。2002年中国环流器二号A装置(HL-2A)在成都核工业西南物理研究院建成并投入运行。目前,中科院等离子体所主建的世界第一座具有偏滤器位形的全超导托卡马克装置EAST,将于2005年建成。HL-2A主要研究强功率加热和高密度区物理,EAST主要研究长脉冲物理。随着HL-2A和EAST这两个大型托卡马克实验装置的先后建成并投入运行,中国将在国际核聚变领域占有越来越重要的地位!

为开展燃烧等离子体实验,给未来演示堆提供经验,1985年,在美国、苏联倡议下,由美国、日本、苏联及欧共体共同设计建造国际热核实验反应堆即ITER(International Thermonuclear Experiment Reactor),其目标是验证氘氘等离子体自持燃烧的科学可行性及聚变反应堆建造的工程可行性。迄今为止,ITER计划已完成概念设计CDA和工程设计EDA,进入选址建造阶段,目前主要是法国和日本两个国家在激烈竞争。进入21世纪,中国和韩国也加入到ITER国际组织,使得聚变研究的国际合作得到进一步加强。

能源是维持人类社会可持续发展的动力。为获得取之不尽,用之不竭的清洁能源,受控热核聚变研究激起数代科学家的无限遐思和不懈追求。从20世纪50年代前苏联、美国、英国等少数几个核大国的秘密研究到50年代末的解密,再到60年代后很多国家参与受控聚变的研究,从开始以小型脉冲放电装置到具有大型磁体的实验装置研究,对许多设想都进行了原理性的探索,现在集中到以托卡马克为主的装置研究上。经过半个多世纪的艰苦探索,受控热核聚变研究取得了令人瞩目的成就,其科学性及其可行性均已得到证实。跨入新世纪,在更加广泛的国际合作背景下,随着世界上第一座试验性聚变反应堆的不久建成,受控热核聚变的成功已是曙光初现,有理由相信聚变能将会最终造福全人类,在人类科学史、技术史和文明史上写下极其光辉灿烂的华彩篇章!