

受控热核聚变发展现状

曹株兴

(清华大学 北京 100084)

摘要 核聚变动力的应用将提供几乎是无限、清洁的新一代能源。当前已经看到受控热核聚变的科学可能性，在利用核聚变生产动力之前，还要解决其工艺技术可行性及经济竞争能力等问题。聚变裂变混合堆是改善其经济性和减少工艺技术难点的方向之一，还可创造一个核能利用的有效途径。

关键词 聚变能 惯性约束 磁约束 聚变裂变混合堆

1 引言

能源是发展国民经济的基础，我国能源不足已影响工农业生产，民用能源的需求量又在迅速增长，如果还要解决发展中产生的新问题，如调整能源结构和改善生态环境等，都需开发可长期起作用的新能源。从这一战略远见出发，在国家863高技术能源规划中，包括了聚变裂变混合堆项目。它既明确了开发聚变的重要性，又为我国发展核能事业，充分利用裂变核资源，提供了更有效的途径^[1~3]。

核聚变研究已取得有实际意义的进展，但要商用，尚要一段相当长的时间。欧共体进行过商用可能性分析，认为在当前技术水平下，聚变堆在能量利用上并不比压水堆有利，纯聚变要进入电力市场，还有很长的距离。因此，认为聚变技术将率先在聚变裂变混合堆上得到应用。当前研究的氘氚热核聚变，不论采用惯性约束还是磁约束，都可以建造聚变裂变混合堆。根据当今世界聚变技术的发展趋势，为了便于跟踪，现设计的是磁约束托卡马克型聚变裂变混合堆。

2 聚变与裂变有广泛的互补性

核聚变与核裂变是取得核能的两种不同方式，除各有合适的使用场合外，还存在广

泛的互补性。可以取长补短地设计出聚变裂变混合堆。

众所周知，恒星的能量来源于核聚变，其进行速度十分缓慢。氢弹是惯性约束的内爆形式，利用核裂变去引发核聚变释放聚变能。在多级热核弹中，聚变产生的高能中子又使其周围的贫铀进一步裂变，以增强威力。而这些核武器的核裂变和核聚变过程则在极短的时间内完成。

由此可见，核聚变能的获得和应用，在历史上已经提供了可供参考的实例。各国聚变研究的进展显示了受控热核聚变的实现时间将取决于生产力发展的需求，以及能否作出相应的努力。中国是一个有裂变技术与聚变基础的发展中国家，有可能在跟踪世界聚变研究的同时，创建聚变裂变混合堆。其近期目标是把氘氚聚变产生的高能中子当作一个强中子源，在次临界贫铀或钍的包层中倍增能量，生产易裂变核素，为裂变堆提供核燃料，并发展一个有竞争力的核能系统。研究早已表明聚变反应堆在生产易裂变核素上是很有效的，以致于为了从这种聚变裂变混合堆的共生系统中获得净功率输出，甚至不需要达到聚变反应堆的劳孙条件。当今对核能的安全性提出了更多要求。因此，安全的聚变裂变堆对贫铀和钍资源的利用，以及为裂变堆供料的作用将更为明显。

3 受控热核聚变的探索

按照热核聚变概念,受控热核装置将具有相当大的规模,且要求可观的投资.这对急需能源的发展中国家开展聚变研究带来了难题.因此,我国对受控热核聚变的探索更应面向世界,面向未来,在跟踪聚变研究的基础上,找出可能突破的方向.

世界上研究受控热核聚变的装置不下数百台,一台大型的过渡性研究装置,如欧洲的JET的投资就达60亿美元,在此装置上除 α 粒子自加热、长脉冲运行实验外,已完成计划中四个阶段的实验研究任务,达到了得失相当的条件,即证实了受控热核聚变的科学可行性.日本的JT-60U也达到了这一指标.产生的聚变功率等于维持等离子体温度所需的输入功率,或称等离子体功率增益 $Q=1$.

1991年,JET率先实现了氘氘热核聚变,现正在解决周围部件中核素进入并污染高温等离子体区,继而影响等离子体聚变参数的问题.计划再提高功率运行^[4].受控热核聚变进展的历史表明,每一步进展都要克服难点,要求某项科技的突破,以及相应的财力和时间.这也是聚变裂变混合堆能率先使聚变技术进入商用,并能在相当长时期内起作用的原因之一.

下一步聚变研究的过渡性装置是国际聚变实验堆ITER,预计装置投资49亿美元^[5].在设计建造过程中各参加方,即欧洲、日本、美国和俄罗斯还将对设计不断用实验验证和技术支援.ITER将从整体上证明受控热核聚变的科学和工艺可行性.即(1)证实受控D-T热核聚变的“点火”和稳态运行.(2)证实聚变堆系统整体的工艺可行性.(3)对高热流密度、强辐照部件做模拟实验.

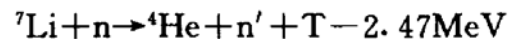
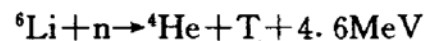
ITER于1988年4月开始做概念设计,于1990年按时完成.计划1997年完成施工设计,2005年建成,并开始物理和工艺两个阶段的实验.物理实验阶段,要进行15000次脉冲运行,以完成五项实验:(1)“点火”.(2)控制燃

烧过程并去除其产物氦.(3)选择等离子体面对部件(第一壁及偏滤器)的最佳参数.(4)不用感应电流驱动的稳态运行时间.(5)降低等离子体破裂的概率.工艺实验阶段,要求脉冲运行长度大于2000s.直至取得稳态运行,以完成另五项实验:(1)在装置上考验包层模块.(2)验证氚生产.(3)中子学验证.(4)考验等离子体面对的高热流密度部件和材料.(5)这些部件的传热实验.如能按计划完成.2012年设计示范堆,2025年建成.2032年设计商用堆,2040年建成.这是聚变堆理想的国际开发计划.如无方案性突破,聚变堆商用的实际时间,不会早于2050年.

除磁约束聚变外,惯性约束聚变也取得了很大进展.激光惯性约束、离子束惯性约束都已开展.我国在激光约束聚变方面也进行了大量工作.日本计划1997年达到 $Q=1$,2017年实现“点火”, Q 值可高达100.在等离子体与短波长激光作用机理,氘氘靶丸最佳结构,钨玻璃、氟化氦短波长激光器的研制等方面也有显著进展.但这些技术也和军事有关,不易跟踪.在聚变研究中,世界上每年投入的资金已超过10亿美元.主要发达国家在投入,跟踪是有益的.

4 聚变裂变混合堆的开发

从ITER的实验计划中可以看到,受控热核聚变的开发中也包括裂变区包层的开发,氘氘聚变中的燃料氚应由聚变反应产生的高能中子,在包层中自行生产.



为增加氚的生产,在包层中除含锂材料外还可加入铍、铅等中子倍增材料,利用 $(n, 2n)$ 反应来倍增中子.如果这些倍增材料换成贫铀或钍,除了能倍增更多的中子外,还会有裂变倍增能量,就会增加经济效益.理论计算表明,这种混合堆除氚能自给外,包层内能量倍增比可达10,易裂变核素增值比可达1.5.

我国对聚变裂变混合堆的研究和开发已有较长的时间, 有多个成套的概念设计^[6,7]. 商用聚变裂变混合堆和纯聚变堆所要求的技术指标是不同的, 例如等离子体功率增益 Q 相差10倍, 第一壁的壁负载也可达3~5倍. 因此, 如果能有足够的投入, 计划到2030年, 聚变裂变混合堆能在我国投入商用.

为了扩大聚变裂变堆对核能利用, 近年探索了直接使用富集燃料元件, 这样可不经后处理直接向裂变堆提供具有一定富集度的燃料元件. 也探索了处理高效长寿期裂变核废料的可能性, 使锕系元素转化成裂变产物, 同时生产能量. 这些都已取得阶段成果.

在聚变堆芯及关键技术实验等也做了不少工作, 如改建环流一号、新建超导线圈磁体的托卡马克装置、建立锂自冷回路实验台架及氚工艺, 第一壁和偏滤器材料的实验研究^[8]. 并且现已有一支聚变裂变混合堆的研究设计队伍, 扩大了国际合作.

5 结束语

开发和应用聚变能是世界上一项重要的

科技项目, 作为我国863计划之一的聚变裂变混合堆的开发和应用将是21世纪初我国能源结构发展中的一个重大项目. 目前各国核聚变研究的进展已经使开发聚变能的目标与途径进一步明朗化. 例如, 在国际上有几个主要发达的国家共同开发的 ITER 项目, 也有各国独立开发的计划. 我国作为能源短缺的发展中国家, 现在正积极进行投入, 跟踪和选择可能突破的方向做了研究设计并取得了阶段性成果.

参 考 文 献

- 1 盛光照, 黄锦华. 核动力工程, 1991, 6
- 2 曹栋兴. 国际学术动态, 1993
- 3 邱励俭等. 核科学与工程, 1990, 4
- 4 Keilbacker M. JET: Power Through Purity, Nuclear Eng. International, 1993, 437
- 5 Dean, S O. A Programme in Transition, Nuclear Eng. International, 1993, 437
- 6 黄锦华等. 核聚变与等离子体物理, 1991, 4
- 7 邱励俭等. 聚变裂变混合堆概念设计, 中国科学院等离子体物理所, 1990.
- 8 戴受惠. 核动力工程, 1991, 6

Status of Development in Controlled Nuclear Fusion

Cao Dongxing

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract An almost limitless and clean source of energy for future generation should be provided by the successful use of nuclear fusion for generating power. At present the scientific feasibility of controlled nuclear fusion is visible and before fusion can be harnessed for generating power, it will be necessary to develop suitable technology and to prove economic viability. The fusion-fission hybrid reactor is one way to improve the economy and to reduce the technological difficulties. It will create a better condition to use nuclear power in China.

Key Words fusion energy ICF MCF fusion-fission hybrid