

# 有关惯性约束聚变和磁约束聚变在技术上所遇到的难点的几点补充

王 乃 彦

(中国原子能科学研究院)

**[摘要]** 本文对惯性约束聚变和磁约束聚变中的技术困难做些讨论,拟对何祚庥教授、庆承瑞教授“一种新型的干净的核能源”文章中的论点做进一步的补充和阐明。

在过去的40多年中,在世界上人们为了获得干净的取之不尽的能源进行了巨大的努力并取得了重大的进展,尤其在最近十年内。虽然现在人们对于磁约束聚变和惯性约束聚变实现的科学可行性似乎是可以相信,然而它的实现仍然还要经历很长的道路,在实现聚变能的应用中必须解决许多技术上的困难。例如在MCF中,在强中子通量的辐照下所产生的第一壁材料的损坏和容器的放射性活化。这些问题MCF比ICF更为严重。这是因为在MCF中驱动器和反应堆是在同一反应器室中,而在ICF中两者是分开的。从聚变反应堆的结构和维修角度看,ICF比MCF具有更大的优点,这一点在“马德里宣言”中已经声明了。

迄今在国际上研究最多的热核反应是氘氘反应。在温度 $T < 100\text{keV}$ 范围内,它具有最大的热核反应截面,反应所释放出的能量比较大,因此氘氘反应可以在所有热核反应中最低的温度实现点火,这个温度约为 $5\text{keV}$ 。然而这个反应的缺点在于它的反应能量的大部份都由 $14\text{MeV}$ 的中子带走,这就造成容器的活化,从而产生放射性及放射性废物的问题。作为氘氘反应燃料之一的氘,由于它的半衰期为12年,因此在自然界中含量很少。

$p\text{-}^{11}\text{B}$ 反应是一种理想的干净的聚变能反应的候选者,这种不产生中子的反应对于使放射性限制在最低水平十分有利;同时 $^{11}\text{B}$ 和H元素在自然界中含量很多,这一点也十分有利。但是另一方面它也有一个缺点,即它的反应截面很小(指在温度 $< 100\text{keV}$ 时),这意味着点火的难度大。 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反应虽然在目前实现点火还做不到,但随着技术的进步是可以实现的。一个干净的取之不尽的聚变能将最终得以实现。

读何祚庥、庆承瑞先生有关“一种新型的干净的核能源”文章(以下简称何、庆的文章)后,这里拟做进一步的补充,以更清晰地阐明何、庆的文章所说的观点。

1. 磁约束聚变(MCF)走过了漫长的道路,取得许多进展,达到点火是可能的,但要建堆,成为能源尚有很长的道路和必需克服一系列技术的难题和障碍。最主要的有下面几点:

(1) 中子辐照造成第一壁材料的损坏,这一点在何、庆文章中已经明确指出了。现再给出一篇“Needs for  $14\text{MeV}$  Neutron Source for Material R&D”的文献,该文发表在1988年日美关于等离子体装置上材料研究用的 $14\text{MeV}$ 中子源研讨会。在*Journal of Fusion Energy*, Vol 10, No 1 (1991) 63, “ITER. A Global Response to a Global Issue”一文中也可看出第

本文于1993年4月10日收到。

一壁的负荷要达  $1\text{MW}/\text{m}^2 = 0.1\text{kW}/\text{cm}^2$ 。这种热负荷要选择特种的石墨，它必须有很高的熔点，同时有很好的导热性能。问题的严重性还在于，在很强的中子通量的情况下， $1\text{MW}\cdot\text{a}/\text{m}^2$  (ITER) 石墨受中子辐照后导热情况发生变化，导热性会下降10倍，这样就会导致石墨层熔化。因此，国际上都在寻求强中子源以研究中子辐照效应，但困难很大。

(2) 磁约束聚变中的驱动器和反应堆是一体的，因此维修和放射性问题的处理难度很大，而 ICF 中的驱动器（指激光器、轻粒子束产生器…）和反应堆是分开的，因此驱动器检修不会影响到反应堆，反应堆的放射性不会影响驱动器。

由于 MCF 中驱动器和反应堆一体化，造成结构复杂，造价高，可靠性差。请参看 *Journal of Fusion Energy*, Vol 10, No3, 1991, “Panel Discussion of Status and Plans for Inertial Confinement Fusion” 中的 “Remarks of Guillermo Velarde”。

(3) 在聚变中燃料燃耗  $f_b$  可以表达为

$$f_b = \frac{\rho R}{6.5 + \rho R} \quad \begin{cases} \text{MCF} & \rho R = 0.3\text{g}/\text{cm}^2 \\ & f_b = 0.045 \\ \text{ICF} & \rho R = 3\text{g}/\text{cm}^2 \\ & f_b = 0.30 \end{cases}$$

ICF 中靶中燃料30%燃烧，因为温度很高，激光打靶靶就气化。而 MCF 燃耗很低，存在着燃料的循环问题。

2. 惯性约束聚变 (ICF) 也发展了27年左右的历史，它比 MCF 晚起步20年，由于高功率束流技术（包括激光束和粒子束）的迅速发展，以及靶物理在理论和实验上借助于核武器研究的坚实基础因而发展极其迅速，大有超过 MCF 之势。这就是在何、庆的文章中所指出的“这就使两者竞争的天平，更移向惯性约束这一边”。这一论断是有科学根据的。这里附上1988年10月在马德里召开的欧洲第19届激光物质相互作用会议上的“马德里宣言”。在宣言上签名的有美国 LLNL 的 E·Storm，日本大阪大学的 C·Yamanaka，澳大利亚的 Hora 等9位国际著名的聚变 (ICF) 科学家。

目前两位诺贝尔奖获得者 N·G·Basov (Lebedev) 和 C·Rubbia (CERN) 正在倡议建立像 CERN 一样的欧洲联合机构，并建立欧洲激光大装置（是 Nd 玻璃还是 KrF 激光未定）。

3. ICF 中光学镜子一般离开聚变的反应器室很远，所以中子辐照对镜子的损坏很小，镜子主要要能耐住强激光的破坏。

④  $\rho\text{-}^{11}\text{B}$  激光驱动器的 ICF 是一个很有前景的方向。虽然点火温度要求比驱动 D-T 的高许多，但它的固有优点是很吸引人的。为了使更多的读者了解这一动向，特此尽可能搜集了一些  $\rho\text{-}^{11}\text{B}$  聚变反应文献，并写了一个综合介绍，也一并做为这一补充的附录。

### 3. FURTHER DISCUSSION ON TECHNICAL DIFFICULTY FOR INERTIAL CONFINEMENT FUSION AND MAGNETIC CONFINEMENT FUSION

Wang Naiyan

(China Institute of Atomic Energy)

Some technical difficulties for ICF and MCF are discussed in this paper, Which further complements and clarifies the views reported in the paper "a new and clean nuclear energy source" by Prof. T·H·Ho and Prof. C·R·Ching.

## 附1

# 马 德 里 宣 言

(1988年10月)

### 惯性约束聚变：下一个步骤

最近惯性约束聚变(ICF)的研究结果已使获得高增益 ICF 最基本的可行性问题得到解决。问题已经明朗化,即应该制定一个十分积极的设计、建造和运转 ICF 的计划来演示实验室高增益聚变。实现这一目标将使 ICF 技术应用于很多方面,并可以创造过去不能达到的超高温、高密度极端物理条件,用于前沿科学研究探索。

ICF 的应用包括裂变/聚变混合堆,特定同位素生产,在解决环境污染方面令人鼓舞的发电用清洁聚变能源和先进的空间驱动器。作为未来聚变能技术的一种选择,ICF 比磁约束聚变途径具有明显的技术优势,并已成为更加令人信服的一种手段。

要想实现和运用高增益 ICF,应该做协调一致的努力来提供必要的实验室装备。实验室实现高增益 ICF 所带来的效益是如此之重要,现在已经是讨论有关物理、技术和经济方面细节的时候了。开始严肃地探索 ICF 发展新纪元的时刻已经到来。

国际 ICF 社会的理想目标是利用最充分的国家间合作之可能性,提供聚变技术方面的效益,服务于全人类。

鉴于在马德里召开的欧洲第19届激光与物质相互作用会议的主导精神,我们呼吁,现在是国际社会采取行动的时候了!

## 附2

# $p-^{11}\text{B}$ 聚变反应文献综述

姚 刚 王乃彦

(中国原子能科学研究院)

### 一、背景知识

目前,热核聚变的实验研究较多集中于 D-T 反应,其中原因在于 D-T 反应具有以下优点<sup>[1]</sup>:

1. 在低能范围其反应截面最大;
2. 能释放出相当大的能量 (17.8MeV);
3. 其韧致辐射能量损失最小。

由于上述优点,在所有聚变反应中它的点火温度最低,最容易实现。但是这个反应也存在以下一些缺点:



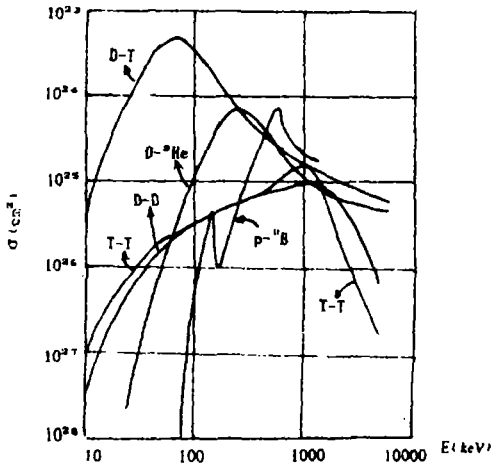


图1 对于各种聚变反应的反应截面 $\sigma$ 和碰撞核的相对运动的动能 $E$ 的函数关系

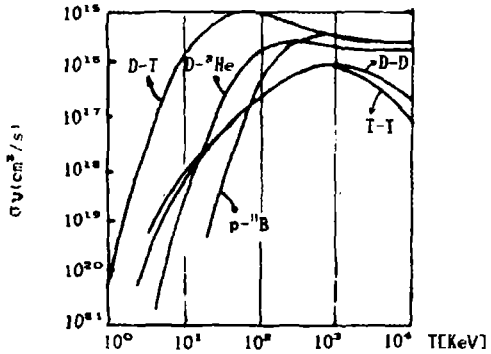


图2 对于几种聚变反应的反应参量 $\sigma v$ 和温度 $T$ 的函数关系<sup>[1,4]</sup>。D-D曲线对应于D(d,p)T的分支反应

2. 中子主要由反应 $^{11}\text{B}(\bar{\alpha}, n)^{14}\text{N}$ 产生 ( $\bar{\alpha}$ 表示快 $\alpha$ 粒子), 而在离子温度 $T_i > 500\text{keV}$ 时, 反应 $^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$ 起主要作用。文献 [7] 的计算表明, 在 $T_i = 300\text{keV}$ 时, 反应能量的0.16%释放为中子能量。离子温度 $T_i < 1000\text{keV}$ 时, 文献 [8] 计算得到中子产物小于 $10^{-1}\text{Ci/GW}\cdot\text{h}$ 。

3.  $^{11}\text{B}(\bar{\alpha}, p)^{11}\text{C}$ 产生的长寿命 $^{11}\text{C}$ 的产生率远低于 $1\text{Ci/GW}\cdot\text{h}$ , 而在D-T反应堆中每 $\text{GW}\cdot\text{h}$ 燃烧 $\approx 10^5\text{Ci}$ 的氘<sup>[8]</sup>。

4. 热质子通过反应 $^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$ 产生的短寿命 $^{11}\text{C}$ 是等离子体放射性的主要来源<sup>[7]</sup>,  $^{11}\text{C}$ 的半衰期为20.38分钟。其平衡活性在 $10^6\text{Ci/GW}$ 量级, 不过仍比D-T反应小。

总之,  $p-^{11}\text{B}$ 的放射性比相等体积的D-T反应堆小几个数量级, 也比别的燃料的放射性危害小, 不过其可能的放射性危害也是不能忽视的。

#### 四、 $p-^{11}\text{B}$ 用于惯性约束核聚变

尽管有关 $p-^{11}\text{B}$ 的反应点火可行性的首次讨论是与ICF有关的<sup>[4]</sup>, 仍然有不少作者讨论了 $p-^{11}\text{B}$ 聚变反应应用于磁约束装置的可能性。他们的计算结果表明, 在目前的物理思想基础上, 由于同步辐射损失的影响,  $p-^{11}\text{B}$ 应用于磁约束聚变是不可行的<sup>[7,6]</sup>。而对于 $p-^{11}\text{B}$ 反应作为ICF聚变燃料的研究<sup>[4,5,9]</sup>表明, 这是有希望的。

引入超高密度等离子体的自加热机制, 理论计算表明<sup>[5,9]</sup>, 体积点火的最佳初始温度仅约为 $20\text{keV}$ , 密度压缩比要求达到 $10^5$ 倍, 输入能量需达到GJ; 如果密度压缩达到 $2 \times 10^5$ 固体密度, 输入能量为 $100\text{MJ}$ 时获得增益为 $20^{[9]}$ 。文献 [9] 认为 $p-^{11}\text{B}$ 作为聚变反应的要求在今后80年内不难达到。

### 参 考 文 献

[1] J·M·Dawson, Fusion (TELLER, E., Ed.) Vol. 1, Part B, Academic Press, (1981) 453.  
 [2] G·H·Miley, Proc. 4th. Topical Meeting on The Tech. of Controlled Nuclear Fusion, Vol. 2, (1980) 905-911.  
 [3] J·Rand McNally, Jr., Nuclear Technology/Fusion, Vol. 2, (1982) 9-28.  
 [4] H·Hora, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 144, (1977) 17-25.  
 [5] P·Pieruschka et al., Laser and Particle Beams, Vol. 10, No. 1, (1992) 145-154.  
 [6] J·Raeder et al., Controlled Nuclear Fusion (1986, John Wiley & Sons Ltd.), pp. 6-9.  
 [7] J·D·Gordon et al., Nuclear Technology/Fusion, Vol. 4, (1983) 348-352.  
 [8] W·Kernbichler et al., Proc. 10th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Vol. 3, (1984) 429-440.  
 [9] G·H·Miley et al., Fusion Technology, Vol. 19, (1991) 43-51.