

谈谈受控核聚变

卫增泉

(中国科学院近代物理研究所)

一、前言

在阶级社会中，任何一门科学技术都是阶级斗争的工具。“受控核聚变”也不例外。这门学科的产生是同这种聚变反应能产生大量中子，可以用来生产钚，具有着重要的军事意义密切有关的。早在四十年代末，美、苏等国都为了自己的军事目的，在极为保密的条件下进行这项工作，都想利用这门科学技术来为本国政治服务。到了五十年代，由于裂变堆的迅速发展，中子的来源已不象初期那样困难；同时，人们从实践中认识到，要实现受控核聚变不是象当初认为的那样容易：用已经掌握的带电粒子在磁场中的行为、气体放电知识以及裂变堆的经验等还不行，必须从建立等离子体物理学，发展实验工艺，深入了解等离子体基本行为入手，在理论和实验上奠定这门学科发展的基础。也就是要想使受控核聚变达到应用的目的，必须先要有一个基础理论研究阶段，而当时这种研究在许多方面（例如宏观不稳定性等）遇到了很大困难，这就迫使一些国家放松了部分保密要求，同其它国家进行所谓交流与合作。从1958年第二次日内瓦和平利用原子能会议到现在，名目繁多的有关聚变研究的各种专门会议，虽然逐渐公开了这门学科的部分研究结果，但是一些重要成果仍是保密的。1972年苏美两霸签订了包括聚变研究在内的所谓和平利用原子能协定，他们表面上鼓吹合作，背地里却相互争夺，抢先建造大型装置，加紧堆的研究，都想取得聚变研究的领先地位，妄图主宰世界。可见，苏美两霸在科学技术领域内，也是互相勾结，又互相争夺，都想利用先进的科学技术来为自己的政治野心服务，特别是苏修社会帝国主义表现更为露骨。

当前，苏修美帝在搞受控核聚变研究的同时，总是叫嚷他们研究的目的是：“为人类解决能源”，“为人类造福”，“和平利用”等等。其实，这些都是为了掩盖他们上述政治野心和军事目的所放的烟幕，也是他们为了追逐高额垄断利润所制造的谎言。

应当指出，由于轻核聚变反应可以放出巨大能量，

因此只要人们能够控制这个反应，那么它就可以成为一个重要能源。这种聚变能源的利用，如同历史上每次新能源的出现一样，将会对社会生产力的发展起着积极的促进作用。同时，要想利用这个聚变能源，还需要我们从理论上、技术上、工艺上以及材料上等各个方面去进行探索或突破，这种探索和突破也会反过来促进工业技术的发展。此外，这种能源所需要的核燃料资源几乎是无穷无尽的，而且是廉价的；更可贵的是，它在环境保护方面具有一定的优点。因此，我们应以阶级斗争为纲，“一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平”¹⁾，努力把这个重大的长远的科研课题搞上去，来巩固国防，为我国无产阶级专政服务，反对两个超级大国的霸权主义，打破他们在受控领域中妄想称霸世界的核垄断和核讹诈，支援世界革命，支援第三世界人民的革命斗争。

在受控核聚变实现之前，这项工作的主要任务，是证实它在“科学上实现的可能性”。过去二十年来虽然有了一些进展，但比较显著的研究成果还是在最近几年才取得的；尤其进入七十年代以来，前进的步伐大大加快。然而，当前最迫切的研究目标，仍然是高温等离子体的加热和约束问题，它体现在实验上，就是要研究满足控制核聚变反应的必要条件。今后，在关于高温等离子体的加热和约束研究的同时，还应考虑到建造聚变堆所必要的工程方面研究的相应发展。

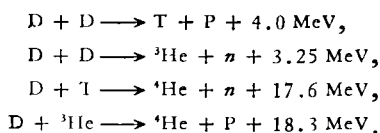
尽管我国对受控核聚变的研究工作开始得较晚，但是，有着毛主席革命路线的指引和党的领导，有着优越的社会主义制度，有着广大工人、技术人员和研究工作者的努力，我们也一定会同其他事业的发展一样，把受控核聚变工作搞上去。

二、核聚变的原理

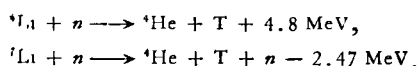
核聚变的基本过程，就是将两个轻原子核克服其相互之间的库仑排斥力发生聚变反应，转变成一个较重的原子核和一个核子（根据反应种类，可以是质子，

1) 转引自1966年10月29日《解放军报》。

也可以是中子)。其特征是反应产物具有很高的能量,就是说,核聚变反应是一个放能反应。在核聚变中,主要利用的反应有:



因为在自然界中不存在氚这种同位素,所以,利用上面 D-D 反应中产生的中子,去同锂(Li)发生反应,来制造氚:



因为原子核都带正电荷,所以,两个原子核一旦接近,就增大了相互排斥的库仑力,使聚变发生了困难。假如使参加反应的每个原子核处在高温状态,那么,一方面增加了它们的平均动能,克服库仑力而发生反应的几率增大;另一方面增大了每一个核与另外的核之间可以发生碰撞的次数,这样,每一个原子核可能发生核反应的几率就增大了。所以,为了实现核聚变,必须使参加反应的原子核都处在高温状态。所谓“受控热核反应”中的“热核”,就是指这种高温加热的原子核;所谓“受控”,就意味着要使核聚变反应缓慢地、并且人为地控制,使其达到利用的目的(氢弹爆炸是人工产生的未加控制的热核反应)。

对于参加聚变反应的核燃料——氘、氚气体一旦被加热到高温,气体分子就全部电离,变成了电子和离子(原子核)的集合体,把这种状态的电离气体就称为“等离子体”。为了充分地、自持地发生核聚变反应,应满足两个基本条件,也就是通常说的热核“点火”条件:

1. 高温

为了使聚变核反应的放热功率与因辐射而损失的功率相平衡,等离子体内的离子温度必须超过某一最小值。对氘-氚各半的混合物而言,约为五千万度(K);对氘-氘等离子体而言,约为一亿度(K)或更高。

2. 等离子体内的热能应保持足够长的时间

为使聚变反应产生的热核能量补偿加热等离子体所需要的能量和损失,需满足 $n\tau > A$ 的条件。 n 为等离子体密度 (cm^{-3}), τ 为等离子体的约束时间 (Sec), A 为与核燃料组成和能量循环效率有关的系数。这个关系也表示发生核反应的核数目(正比于 $n^2\tau$) 与总核数(正比于 n) 之比应大于一定值。这个比例亦即等离子体中每一个核在 τ 时间内发生核反应的几率。根据劳森(Lawson)判据,对氘-氚各半的混合物来说, $n\tau > 10^{14} \text{ sec/cm}^3$; 对氘-氘来说, $n\tau > 10^{16} \text{ sec/cm}^3$ 。上述的所谓劳森判据,是英国科学家劳森(J. D. Lawson)

早在 1950 年提出来的,它是建立在能量平衡的基础上的。对于脉冲聚变反应,要使反应释放出来的能量超过输入到等离子体中去的能量的两倍,由这个条件决定了等离子体温度 T 、密度乘约束时间的最小值 $n\tau$ 应满足的关系。通常的表示方法,是对一定的离子温度(T_i),给出等离子体密度和约束时间的乘积 $n\tau$ 。若将劳森判据用曲线表示出来,如图 1 中打斜线的区域是满足 D-T 劳森判据的区域。劳森判据只是必要条件,真正实现能量输出,条件还要更苛刻,困难更大。

其次,劳森判据还建立在等离子体满足麦克斯韦

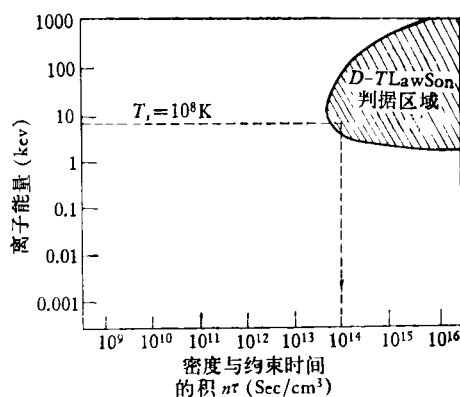


图 1 D-T 劳森判据曲线

粒子分布的基础上。如果不满足麦克斯韦分布,那么劳森判据可以放宽些。例如,用 150keV 左右的氘中性粒子束注入到电子温度为 5keV 左右的氚靶等离子体中去,这时, $n\tau$ 只需 $8-10 \times 10^{12} \text{ sec/cm}^3$, 也就是说,可比原先的“点火”条件降低一个数量级左右。

应当指出,上述点火条件和劳森判据都是对无杂质的“纯净”燃料系统而言的。假如含有极少量的高 Z (原子序数)杂质,就会影响点火条件和劳森判据,这是因为在高温等离子体中杂质的存在,会使电子与离子及电子与电子间碰撞产生的韧致辐射功率大大增加,使等离子体温度显著减小。现在已有计算:当杂质 Mo 的浓度 $> 0.8\%$, 或 W 的浓度 $\approx 0.2\%$ 时 (Mo 与 W 一般都是反应堆的结构材料)即使再任何高的温度上也不可能“点火”。所以,有人作过一个简单的比喻:针尖大小的金属汽化后,就足以熄灭几辆火车车厢大小的氘等离子体。

因此,要实现点火,必须从根本上提高等离子体参数(温度、密度、约束时间),同时必须控制或清除杂质。这些问题正是当前力求解决的研究课题,它们的解决便反映了受控核聚变研究中无论在物理方面,还是在工程方面都向前跨了一大步。可以说,“点火”的实现是受控核聚变研究中的一个新的里程碑。但是,必须指出,点火装置也不一定是未来反应堆的最佳形式,从“点火”的实现到反应堆的建成,还有相当长的路

程,将还有不少新问题需要我们从各个途径去探索和解决。

三、高温等离子体的形成、加热和约束

当前,高温等离子体研究的主要问题是加热和约束,也就是如何进一步将等离子体加热到高温,同时又保持一定的稳定时间。下面,简单的叙述一下等离子体的形成、加热方法以及等离子体的约束。

1. 等离子体的形成和加热

由于科学技术的不断发展,人们逐渐掌握了形成等离子体的方法和技术。根据现代技术的进展,为聚变堆建立必要的高温等离子体认为是完全可能的。在加热方面,现在存在多种方法,根据约束等离子体装置的类型,能选择各种方法的组合。

欧姆加热是最简单的方法,将大电流(数百 kA 以上)流经等离子体,利用等离子体电阻的欧姆损失,就将等离子体本身加热了。这种方法的缺点,在于等离子体的电阻随着温度的升高而急剧下降;当等离子体温度大约达到一千万度(k)时,它的电阻值就和铜差不多了;也就是说,等离子体变成高温后,加热效率就很低了。但由于反常电阻的出现,有人认为通过某种微观不稳定激发起来的反常电阻,也有可能单靠欧姆加热达到热核温度。

快速中性粒子注入加热法,就是将作为核聚变燃料的原子,在预加速器中加速到数十至数百 keV 的能量,然后将这种能量的粒子束注入到等离子体的约束装置中去,被约束装置捕获的这些粒子,来回的互相碰撞使其加热,于是就变成高温等离子体。1974 年 5 月,美国原子能委员会宣称,用中性束注入加热,可使装置的点火条件降低一个数量级。如果这种说法确实可靠,那么实现“点火”的时间就有可能进一步提前。因此,近几年来不少装置试验了这种加热方法,比较普遍的认为这可能是一种有希望的加热方法。随之,中性束注入器的研制也迅速发展,据报导,美国已在利弗摩尔(Livermore)“2X-II”磁镜装置上装有 12 台巨型中性束注入器,每台向等离子体反应室注入 50A、20keV、10ms 的中性氖原子脉冲,据说,这种新型注入系统将使燃料温度提高到目前所产生温度的 10 倍,即达到一亿至二亿度(°C)。

另外,被约束在磁场中的等离子体粒子,是在磁力线周围回旋运动。假如这种回旋频率正好同外界加于等离子体的高频相等,那么等离子体粒子就和这种高频发生共振,粒子由于得到了这种高频波的能量就被加热到高温。使等离子体的电子发生共振的情况,称为电子回旋共振加热法,它要使用 10^9 赫芝量级的微波;而使离子发生共振的情况,就叫离子回旋共振加

热法,要使用 10^8 赫芝量级的中波。

除此之外,还有应用热力学原理,将等离子体作绝热压缩的加热方法。还有湍流加热,高频加热,快磁声波加热,冲击波加热,混合共振加热等方法,以及最近迅速发展起来的用大功率(10GW—100GW, 1GW = 10^6 kW)脉冲激光去照射固体燃料(氘丸或氚丸),获得高温等离子体的方法。

2. 等离子体的约束

假如把高温等离子体直接置于金属容器中,高温等离子体就和容器壁相接触,结果容器壁就被溶解,同时等离子体也被冷却了。因此,一般来说,采用磁场来包围高温等离子体,用很强的磁场压力,使高温等离子体限制在容器的中央,不同金属器壁接触。但在这种情况下,金属器壁还会受到高温等离子体的辐射加热,对于聚变反应堆,这种加热可以高达 10^3 度(K)左右。将等离子体永远约束在磁场内,在原理上是不可能的,而对聚变堆来说,永久性的约束也是不必要的;但是,如前节已讲过的,最少的必要约束时间是需要的,它是由反应堆类型和等离子体状态来决定的。对于氘-氚稳态堆来说,约束时间约一秒;对脉冲堆来说,约束时间可以短些。

大家知道,等离子体粒子一般沿磁力线运动比较容易,而横越磁力线运动比较困难,假如以相同方向的电流流经两个平行线圈时(如图 2),那么就会形成一

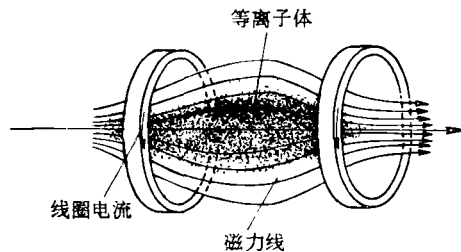


图 2 开端磁镜示意图

个由中间向两端增强的磁场,在这种情况下,粒子沿磁力线运动时,由于两端线圈附近的磁场较强,因而就被约束回中间部分去,这就是早期简单的开端磁镜的约束原理。但发现这种结构的磁场强度,在径向是减弱的,这样,由于横越磁力线的运动,使等离子体很快损失掉。后来的发展,便引入磁阱概念,即极小 B (磁场强度)原理,在原来镜场上再叠加一个稳定场,使其形成中间最弱而在所有方向增强的场形,这样,被捕获于磁阱底部的等离子体,由于能量关系不能有任何方向的整体运动,这种位形使约束时间比原来提高了两个数量级。现在,在磁阱结构基础上,探索各种灵活多样的磁场位形有:阴阳线圈、全球线圈、四极场、六极场、八极场、圆盘磁镜以及填缝会切等。另外一种磁场,是电流

流经一个闭合环形螺旋线圈时形成的(如图3),在这

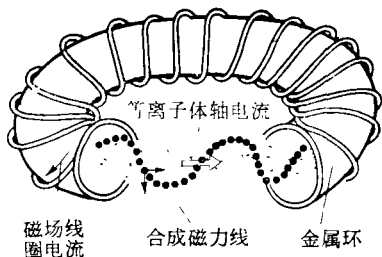


图3 闭合型(环状)约束等离子体示意图

种情况下,粒子就沿着闭合环状磁力线运动,不能外逸,等离子体就被约束在圆环状的磁场内。虽然约束在磁场范围内的等离子体在磁力线周围回旋运动,横越磁力线运动是困难的;但是,在运动中一旦发生等离子体粒子之间的碰撞,此瞬间粒子就会改变原来轨道,而朝着横越磁力线的方向前进,这样的等离子体就逐渐扩散,向外逸漏,这种现象称为等离子体的“经典扩散”。这种扩散速度同等离子体温度 T 和磁场强度 B 成 $[T^{-1/2}B^{-1}]$ 比例。另外,由于等离子体中存在着各种不稳定性,就产生了另一种“快速扩散”,这就是所谓“波姆(Bohm)扩散”,它是由于等离子体中带电粒子(电子和离子)在磁场中运动时,由于种种原因产生了异常电场,致使带电粒子向横越磁力线方向前进,波姆扩散的速度是同 $[TB^{-1}]$ 成比例。目前利用磁剪切来抑制环形系统中等离子体的快速扩散已取得显著成绩。不过,从许多实验装置观察到的结果来看,重要的损失机制,主要还是经典扩散,所以,除了增加磁场强度可以同时减小这两种扩散速度外,提高等离子体温度,看来会加快波姆扩散的速度,但对减小造成主要损失的经典扩散速度有更大的作用。据报导,在上面所说的“2X-II”装置上采用了中性束注入法,不仅提高了等离子体温度,而且可望其约束时间提高4倍。因此,进一步增加磁场强度和提高等离子体温度对更好的约束等离子体和实现受控核聚变是非常需要的。

四、受控核聚变研究的现状和趋向

受控核聚变研究从四十年代末美、苏、英三国开始,到现在已发展到十七个国家和一个欧洲原子能联营。在这二十多年的时间内,受控研究走过了曲折的路程。从五十年代的盲目乐观,到五十年代后期转入的悲观保守,由六十年代后期又开始谨慎的乐观,到七十年代初直到现在,乐观情绪更进一步上升。在过去的二十多年中,据不完全统计,世界各国在等离子体物理学和受控核聚变研究上共花了15—20亿美元,投入了相当可观的人力和物力,但进展不很大,离点火目标还有相当距离。至今这一领域虽已取得了重要进展,可望不久其重点能从基础研究阶段,转向工程研究

和核动力方面,但是很多关键问题尚未完全解决,仍需进行多途径探索。至于要使受控核聚变进入到应用阶段,看来至少还得经过二十多年的艰苦努力。我们应从这段发展受控的历史经验中吸取教训,不能盲目地随着国外的错误倾向跑。要防止采取盲目乐观或一味保守的错误作法。

从进入七十年代以来,世界核聚变研究(包括新途径探索)进展快,方向更加明确,重点开始形成,力量逐步集中。磁约束方面的三条主要途径:低 β (β =等离子体压力/磁场压力)环形系统(托卡马克,低 β 仿星器等),高 β ($\beta \geq 0.1$) 环形系统(高 β 仿星器,螺旋箍缩,皮带箍缩等)和磁镜,近几年发展都比过去快。特别是托卡马克型装置,在近20台新装置建成后,都得到了良好的结果,并已成为各国的研究重点。

六十年代初出现的激光聚变,进展也快。到1971年在美国采取了部分解密措施后,高能量、短脉冲、多路激光器的研制加快了,并已在实验上观察到激光的压缩效果,使每次脉冲的中子产额大大增加。因此,对这一新途径的探索,许多国家都比较重视,认为它是受控核聚变研究中有希望的途径之一。

对于强流相对论电子束聚变的研究,最近也取得了新结果。等离子体聚焦也在进行探索。

“托卡马克”用类似普通变压器的原理,由脉冲大电流流经变压器初级线圈,在相当于次级线圈的圆环状容器中产生了放电,这个放电电流可达数百kA,在放电中形成的等离子体就被这个放电电流所加热。另一方面,依靠沿着圆环状容器绕制的线圈所产生的强磁场来约束等离子体(见图4)。由于托卡马克位形本

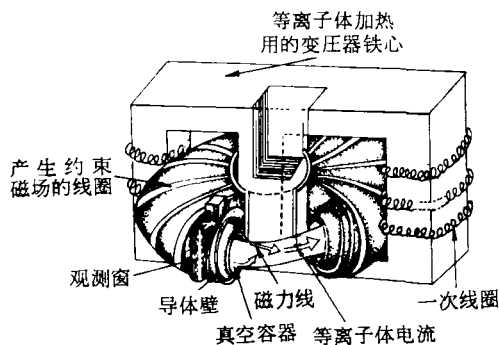


图4 托卡马克型装置原理图

身所具有的特点,其工作比较成熟,理论与实验比较一致,现有水平最接近劳森判据,处于领先地位,故除德意志联邦共和国外,其他国家都把它列为优先发展的重点途径。德意志联邦共和国、苏联和英国仍很重视仿星器工作,而美国从1969年起停止了这方面的工作。美国把高 β 环形装置 Scyllac 列为第二优先发展的重点,德意志联邦共和国、日本等国也很重视这方面的工作,而苏联和法国却不重视高 β 环形装置的研究。西

欧和日本基本上不搞磁镜装置，而美国把它作为第三个优先发展的重点(2X-II 磁镜装置)，苏联等国也开展着这方面的工作。激光聚变的研究工作，总的说来各国都比较重视。

象受控核聚变这种处于探索和迅速发展的尖端科研领域，制订正确的技术路线是十分重要的。我们必须根据我国的具体情况，遵照毛主席的教导，在党的基本路线指导下，独立自主，自力更生，艰苦奋斗，奋发图强，制定出多快好省发展我国受控事业的正确路线。

目前看来，世界核聚变研究的趋向是把1980年前后，建成“临界堆芯等离子体”(即满足劳森判据的等离子体)，作为目标。在此十年之后，积极重视动力实验堆的建造和实验，从1990年到2000年的十年间，预定达到实用反应堆建造的程度。

今后，在堆芯等离子体研究的同时，应考虑迅速地扩大进行聚变堆工艺方面的研究，特别应包括建造反应堆所必要的材料的辐照损伤、材料强度等基础研究，也应当重视发展氦的生成和处理技术，排热技术和为了产生强磁场的大型超导磁铁等技术。

五、受控核聚变的应用

核能的利用通常有两种方法。其一，是众所周知的利用重原子核(例如U, Pu等)在裂变时放出的能量，现在它已进入实用阶段；另一个就是这里所讲的利用热核发生聚变反应来获得巨大的能量，它目前还处在发展和研究阶段。利用受控核聚变产生的核能来作为动力资源是极为有利的。

1. 燃料资源丰富

作为聚变堆主要燃料的氘，能从中水来提取。大约25升水中就含1克氘。这1克氘在核聚变堆中完全“燃烧”时产生的能量约为 10^8 千瓦时，假如把地球上所有海水中含有的氘全部用于核聚变的话，估计约能释放 3×10^{14} 千瓦时的能量。因此，核聚变堆的燃料资源看来是“无穷无尽”的。

2. 安全性高

因为聚变堆运转时，加到堆芯去的燃料是极其微量的(在堆芯内，只不过注入 10^{-4} 气压左右的气态燃料)氘，或氘和氦的混合物，所以，聚变堆发生重大事故的危险性很小，安全性很高。而在环境保护的安全性方面，聚变堆也具有很大的优越性。首先，因为它同以往使用煤、石油、天然气这类燃料的发电装置不同，它无需担心 CO_2 、CO、 SO_3 、 SO_2 、 NO_2 和NO等大气污染；其次，还因为它能量转换效率高，排放的废热少，造成的废热公害也小，所以有“干净能源”的称号。因此，就能允许在城市附近直接建造发电站，这样，就缩

短了输电网，而且城市生活和工业都可以利用发电站的温排水，在经济上也是很有利的。

3. 没有经常性的放射性废物处理问题

利用裂变反应堆来发电作为能源，存在于燃料“燃烧”中的放射性废物的处理问题是一个很重要的研究课题。但在聚变反应堆中，放射性废物经常性的处理问题事实上是不存在的。正如前面所述，虽然在D-D聚变反应中产生了放射性产物氚，但它可作为燃料再使用，所以就不成为废物了。当然，氚的泄漏问题，倒是应当注意的，不过，根据现在核裂变发展的技术，认为这个问题是可以解决的。除此之外，还存在聚变反应中产生的中子对反应堆结构材料的活化问题，但是，这种活化程度，以相同功率的反应堆来比较，聚变堆要比裂变堆大约小100倍，而且受到活化的物质主要是固体，所以也较容易处理。

4. 能量的价格便宜

关于在核聚变发电中的发电价格，曾有人作过估算。根据这个估算，电功率为210万kW的D-T反应堆，燃料费是平均每1千瓦小时的电力为人民币0.007分。包括发电站的建设和损耗等费用在内，全部发电价格估计是平均每1千瓦小时为人民币0.4分。可见，燃料费只占总发电价格的极小部分，因此，随着建设费用的降低和损耗的减小，发电价格还可以继续下降。

六、结束语

由上看出，受控核聚变反应在理论上是可以实现的，在技术上经过努力之后，也是可以达到的，在应用上又是有利的，所以，近几年来，世界上不少国家都在努力。但是，去年以来，却有一些国家放慢了发展计划的步伐。这是由于资本主义世界遭受着一场战后最严重的经济危机的结果。

我们是社会主义国家，一切工作的规划和开展，都是从整个无产阶级事业的需要考虑的，从我国国家长远利益和当前的经济技术水平出发的。根据国际阶级斗争的需要和巩固无产阶级专政的需要，以及目前的可能条件，我们应当积极地、适当地、有成效地开展这项工作，坚决粉碎右倾翻案风的破坏，努力用马列主义、毛泽东思想去占领这个科学技术的新领域，为我国社会主义革命和建设，为人类作出新的贡献！

参 考 文 献

- [1] 《动力》，23-126, (1973).
- [2] 140th Meeting of the American Association for the Advancement of Science, *Fusion Power Research and Development: The Science Today*, Feb., (下转225页)