

# 重离子束聚变装置

袁光曦

可以预见,作为21世纪的主要能源,氘氚聚变反应核能源,将取代目前宝贵的石油与煤炭。当前,各国核科学家与工程人员正在紧张地研究各型聚变装置。用磁约束氘氚等离子体的大型托克马克装置,已取得很好的进展。如日本原研的JT-60在今年4月点火成功,已得到 $10^{12}/\text{cm}^3$ 的等离子体密度,温度高达20万度,放电电流150千安,约束时间80毫秒。但是自70年代以来,科学家们又开辟了另一条路径:惯性约束聚变方案<sup>[1][2]</sup>。

所谓惯性约束就是将固态氘氚物质集中置放在一固定位置上,然后用外部能源、迅速将其加热,在高温高压下,氘氚还来不及飞散而达到聚变的条件,产生聚变反应。这种靠氘氚的惯性使其约束,达到“点燃”的方式,称之为惯性约束聚变。这种方式省去了巨大的磁约束的耗能装置,而代之以大功率的、快速的加热系统。加热源正尝试采用脉冲激光束,并开始了模型试验。人们也提出电子束,但认为比较有希望的是重离子束<sup>[3]</sup>。本文将对重离子脉冲束的多路轰击氘氚靶丸的装置方案的进展,作一简单介绍。

重离子束,特别是很重的离子束,如铀或铋,轰击物质材料的特点是,射程短、单位路径上的损失能量大;这样将可以把重离子全部动能变成热能聚在薄层物质之中,从而产生高温条件。十多年来,重离子聚变装置方案吸引了各国核物理、加速器 and 核能专家们的注意。如西德为主的HIBALL方案<sup>[4]</sup>、美国的西屋方案<sup>[5]</sup>、日本东京大学的日本方案<sup>[6]</sup>和英国卢瑟福实验室的方案<sup>[7]</sup>等,都十分具体规划了聚变装置中的强流重离子加速器、束流叠和与压缩的储运系统、靶丸

设计、聚变堆选型和电功率输出等。可以说物理设计基本有了个眉目。

## 1. 重离子束驱动惯性约束聚变总体指标

上述方案中,最有雄心的规划是西德HIBALL方案。该方案的净电功率输出达到380万瓩!即差不多等于葛洲坝和刘家峡两个水电站的总发电量。该方案的重离子加速器是直线型的,长达5公里,给出的 $^{208}\text{Bi}$ (或 $^{209}\text{Bi}$ )离子束能量为10GeV。束流经叠合并束和时间压缩后,达到20ns脉冲束,分20路从四周共击靶丸,每路脉冲为2.5千安。该方案共有四个相同的聚变堆,各个堆轮番实现靶丸氘氚的聚变反应,每个堆一秒内“点燃”靶丸5个。在表1中列出各方案的总指标。

为了给出该装置的全貌,在图1中显示了HIBALL系统的原理图<sup>[8]</sup>。该图中加速单电荷 $\text{Bi}^{+}$ 离子,到10GeV,电流为165mA。然后进入转换环TR(并行放置两个),在TR环中将束流叠合10次后输出经并束后,转90°进入10个存储环SR内。在SR中束流叠合5次后分别进入10个超导存储环。在超导存储环中经过RF共振腔将束流时间压缩10倍后由两个方向引出到20条管道中去。脉冲束流沿这20条管道在经过小于1公里长的距离后从四周同时对准氘氚靶丸轰击,在20毫秒时间内使靶丸得到4.8兆焦耳的能量。这样集中而快速的加热,使氘氚物质处于高温及向心挤压状态,从而达到聚变“点燃”的目的。

继1982年1月在西德GSI召开重离子束作惯性约束的会议<sup>[9]</sup>后,去年1月在东京又再次召开这个主题的会议<sup>[10]</sup>。从会议文集看出,过去提出的一些问题,包括强流加速原理、并束、强流存储环、聚变堆和靶丸结构

表 1

重离子束聚变装置总指标

规划	HIBALL (西德)		西屋(美)		日 本	RAL (英)
	I	I	I	I		
净输出功率 (万千瓦)	380	380	135	135	36	/
直线加速器输出 束流(安培)	0.16	0.64	0.1	0.1	0.48	0.28
束流能量 (GeV)	Bi <sup>++</sup> , 10	Bi <sup>+</sup> , 10	Xe <sup>+</sup> , 10	Xe <sup>++</sup> , 10	U <sup>+</sup> , 10	Bi <sup>+</sup> , 8.4
加热靶丸热量 (兆焦耳)	4.8	4.8	2	2	1(1.2)	5(3)
爆炸靶丸次数 (1/秒)	5×4	5×4	10	10	10-100	/
束流打靶路数	20	20	20	16	20	30
束流时间宽度 (毫微秒)	20	20	15	15	10	25
束流重复频率 (赫芝)	20	20	10	10	10-100	/

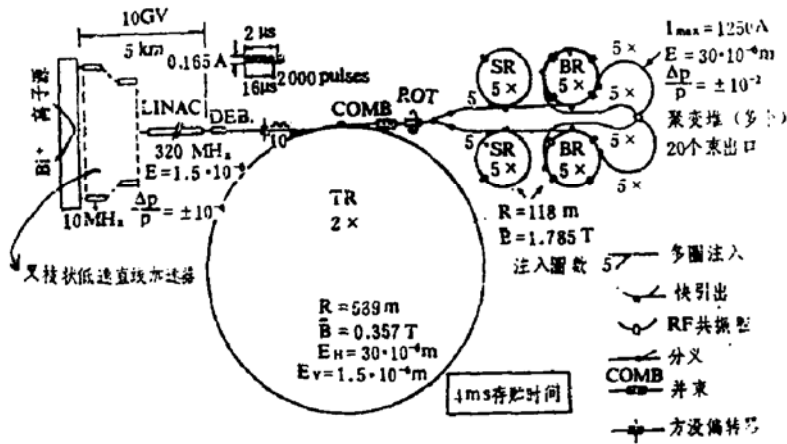


图1 HIBALL加速器与存贮环配置原理图

电排斥, 会使束流在加速过程中增加横向动量, 使束流因发散而透射率降低。因此最好加速单电荷离子, 将这两种效应减到最小。同时, 单电荷离子源也易于给出较高的产率。

为解决强流加速, 目前还提出管状束流加速的原理<sup>[7]</sup>。离子从离子源的环状孔引出, 进入环状束流加速管加速。这时由于束流分散

等, 都作了实验研究或电子计算机模拟。看来重离子束聚变方案的前途是大有希望的。

## 2. 强流、高亮度、单电荷、很重离子的加速器与存贮环

要达到惯性约束条件, 从表 1 可见, 必需在极短时间内(20毫微秒), 供给靶丸以极高热量, 达到1-5兆焦耳。只有这样才可产生高温高压, 使大约 5 毫克左右的氘氚燃烧聚变。靶丸以金属壳包装, 仅 8mm 左右直径, 所以要求重离子射到靶丸上的射程不能太长, 这就要求用很重的离子束, 如<sup>209</sup>Bi或<sup>238</sup>U 等。离子能量不能太高, 否则无法停阻在靶丸金属壳中; 但又不能太低, 否则又会要求增加流强。由于空间电荷效应的存在, 使加速器最大输出束流有个上限; 而离子间静

到环圈中, 从而减少了空间电荷效应, 也大大降低了横向动量增加的效应; 这就增加了可加速的最大流强。当然, 整个运输系统的聚焦元件, 也需要设计成环状式的。管状束流强度可以很高, 在打靶终端, 再将它聚成线束, 给出高强度和高亮度的重离子束来。现在对这种管状束, 已开始进行实验研究。

在图 1 中显示了 HIBALL-II 方案的加速系统。为克服上述两种效应, 低速区采用并行加速, 待达到一定速度后, 两两合并, 再行加速, 再合并……。这就把低速区的加速器安排成树枝的枝叉形式。当加速离子达到较高能量后, 再并成一束作最后加速。这样就解决了低速区, 离子束漂移时间长而存在严重的横向发散的问题。该方案总的加速

行程为5公里,总加速电压为10GV。由于选用直线加速器的类型,这个行程是相当短的,减少了离子与残余气体的电荷交换而中途逸去的几率,提高了加速效率。从加速器引出的单电荷离子 $\text{Bi}^+$ 为160毫安,看来是不难达到的。不管束流微观结构,每个脉冲束段延续 $1.6\mu\text{s}$ ,间隙 $0.4\mu\text{s}$ 。在以后的转移环(TR)、存贮环(SR)和超导环(BR)中,都是将 $\text{Bi}^+$ 束在时间上进行叠合与压缩的作用;换言之,将上述160mA的连续束,转换成20毫微秒的25kA的强脉冲束。如在TR环,注满全环要20个小脉冲段(经历 $40\mu\text{s}$ ),而注入10圈则经历 $0.4\text{ms}$ ,两个TR环为 $0.8\text{ms}$ 。注完后两环同时快速引出经并速后弯 $90^\circ$ ,以改善水平聚焦,然后分成二路对SR环进行注入。SR环半径为TR环的 $1/5$ ,故TR环的一环束流可以注满SR环5次,束流增加5倍。5个SR环需要5次TR环引出的束流依次注满,因此需要160mA的束流时间为 $5 \times 0.8\text{ms}$ ,即 $4\text{ms}$ 。故该方案中的存贮时间为 $4\text{ms}$ 。SR环中有一个RF谐振腔。待束流注满后启动该腔,可将束流延续时间压缩到三分之一。5个SR环同时快速引出后分别注入超导环。超导环中有4个谐振腔和两个引出口。这样束流脉冲又被压缩到十分之一后进入20条管道。这20条管道的出口经四极透镜组聚焦后对准靶丸,同时打靶。这时每条管道束流强度1.25kA,脉冲束时宽为20ns。总的束流叠合与压缩时间共16万倍,使 $4\text{ms}(0.165\text{A})$ 束流变成 $20\text{ns}(25\text{kA})$ 强脉冲束。 $10\text{GeVBi}^+$ 束,共在靶丸上放出热量为4.8兆焦耳。

### 3. 氘氚靶丸

氘氚靶丸的一个核心指标是靶能增益 $G$ 。 $G = E_{\text{TN}}/E_b$ ,在此 $E_{\text{TN}}$ 是氘氚聚变的热核能输出, $E_b$ 是打到靶上的束流能量。HI-BALL对于靶丸设计指标是, $G = 83$ ,即4毫克DT物质在点燃后释放400MJ(兆焦耳)的能量。其中中子带走285MJ,X射线带走90MJ,碎片带走21MJ,损失4MJ。DT物质

燃烧部分为29%。

图2中显示了靶丸结构图。整个靶丸是个空心的直径8毫米的球。最外层是 $0.14\text{mm}$ 厚的铅壳,然后是 $0.74\text{mm}$ 的PbLi合金,最内层是 $0.16\text{mm}$ 厚的氘氚燃料层(共4mg)。

$10\text{GeV}$ 的 $\text{Bi}^+$ 离子打到靶丸后,停滞在PbLi层中产生高温高压等离子体作向心挤压。这时在最内层的PbLi熔化并以一定动能压缩DT物质,使它被压缩到 $0.2\text{mm}$ 的火花半径之内。这时其温度达到点火所需要的温度 $T_i$ , $kT_i \cong 5\text{KeV}$ ,即 $\sim 6$ 千万度。

利用含 $^6\text{Li}$ 的PbLi材料,使得在这热核微爆炸中产生的中子,通过 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反应而添增一部分氚( $^3\text{H} = \text{T}$ )燃料,以与过量添加的氘再进行反应。

这种加热点燃的过程目前已用流体动力学作了计算机模拟,表明这种高温向心挤压的过程是稳定的。

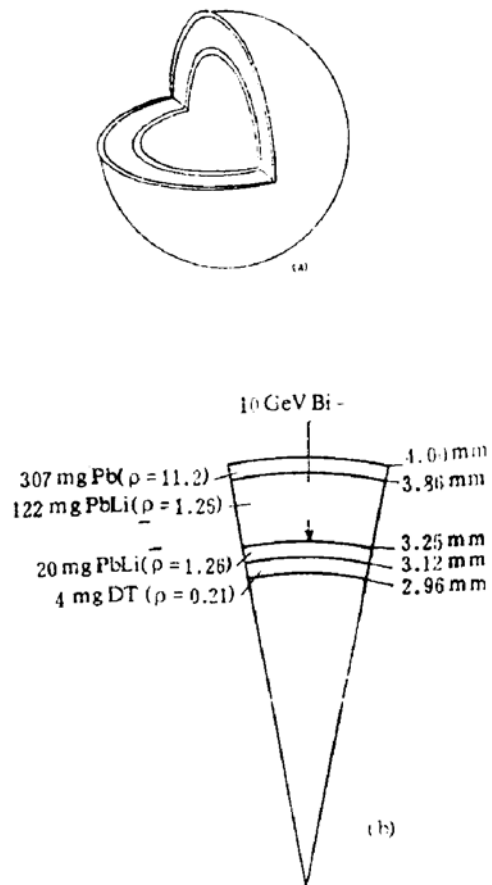


图2 单壳型氘氚靶丸结构图  
a.外形、b.各层材料与厚度

#### 4. 聚变堆设计

聚变堆是将热核反应能转换成热能并用来发电的装置。同时由于热核反应能大部分由中子带走，所以还将利用这些中子来再生氚，用来生产新的靶丸，氚的再生率为1.25。

图中显示了HIBALL聚变堆的方案。它是一个12米高、直径14米的圆筒状钢容器：其真空器壁厚1cm，外包以0.4米厚的钢反射层，后者由铅-锂液体冷却的。在这之外是3.5米厚的水冷的水泥防护墙。在容器内，紧贴真空壁放置一些管子，管内流着 $Pb_{83}Li_{17}$ （83%的Pb与17%的Li的混合液体），作为冷却和再生氚的流剂。这些管子由SiC材料做成。在室的顶部， $Pb_{83}Li_{17}$ 流过SiC编织的网孔板结构层。从顶部朝着四周靠壁的SiC管注入铅-锂液体时，也漏出一部分湿润SiC管的外侧。这样在管外约1mm厚的铅-锂液体薄膜，足以将靶上来的x射线和碎片吸收掉。

10米长的SiC管分内外两组，内组由1230根内径为3cm的管子组成，专用作移去很强的x光与离子碎片释放的热能，其铅锂流速为5m/s；外组由3070根粗管子（内径10cm）组成，主要用作吸收中子动能并再生氚，其流速从0.8m/s（靠内部管）到0.1m/s（靠外部的管子）来变化。 $Li_{17}Pb_{83}$ 金属液体冷却剂的入口温度为330℃，出口温度500℃。

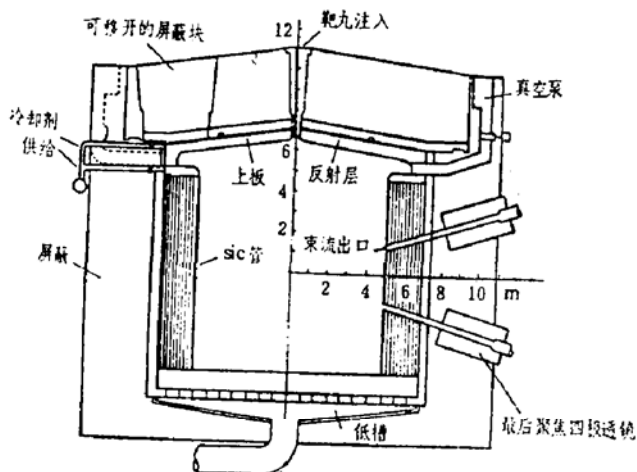


图3 HIBALL聚变堆设计方案

靶丸从顶部射入真空室中，射速200 m/s。其中心偏差不大于0.7mm。在靶丸达到中心时，束流立即打靶。靶丸一直处于4°K低温下保存，用气导管（气用 $D_2$ ）将它射入真空室内。靶丸在气导管中，包在热绝缘的软套中，使它仍保持在超低温状态，并保护其机械形状。在射入真空室时，该绝缘套自动脱开。

由铅锂合金液体从聚变堆带出的热量，经热交换器赋予发电机组进行发电。同时，还要进行氚的捕集与处理过程。这是提出的研究课题。

HIBALL的聚变堆共有4座，每座每秒引爆5个靶丸，共20个靶丸。

#### 5. 重离子束作可控聚变研究的意义

HIBALL方案估算所需资金约20亿美元。这种耗资巨大的设备当然不会贸然去做，一定要有十分把握，才可能投资。各国政府对这种研究抱着积极态度，因为这是彻底解决能源的一个根本大计。而研究的本身，带动了强流、高亮度、重离子中能加速器；带动了束流与物质作用的动力学研究；聚变堆技术与靶丸设计等。很可能，这种类型的加速器，还会作为星际战争的粒子束武器来利用。从核物理研究上看，强流中能重离子加速器的研制成功，将把目前可用束流提高5到6个量级；这样就可以用次级束做一些核物理实验，并有可能研究一些超低截面的核反应事件。

#### 参考文献

- (1) R. Bock, Proceedings of the Symposium on Accelerator Aspects of Heavy Ion Fusion, GSI-82-8 Report (1982) 50
- (2) R. Bock, Studies on the Feasibility of Heavy ion beams for inertial Confinement fusion, GSI-84-17 Report (1984) 1
- (3) 戴光曦等, 重离子物理 (1980) 283
- (4) R. O. Bangerter, 同(1)刊7页
- (5) Y. Hirao, 同(1)刊33页
- (6) N. M. King, 同(1)刊19页
- (7) P. Krejcik, 同(1)刊255页