

# 一种聚变反应堆装置的新概念\*

蔡诗东 陈雁萍 郭世宠 柯孚久  
沈解伍 徐民健 俞雪华 周玉美  
陈允明\*\* 汪诗金 张淳沅

(等离子体研究会, 中国科学院物理研究所, 北京)

本文提出了一个聚变反应堆装置的新概念, 它由两个轴对称的类似串联磁镜的部分和两个螺旋仿星器U形弯曲段组成, 并综合了直管和环形、快过程和慢过程的优点。文中研究了起动、过渡和运行阶段, 讨论了D-D反应堆参数和稳定性。射频和高能分量只在起动阶段才需要, 在整个过程中只有瞬时的能量消耗。端塞也只需在起动阶段存在, 这大大降低了工程技术要求。

关键词 反应堆概念, 第二稳定区。

## 一、引言

根据目前的发展情况, 托卡马克、仿星器和轴对称串联磁镜等准稳态装置, 最有可能成为将来的聚变反应堆装置。托卡马克和仿星器是环形几何位形, 具有相对简单的封闭磁面, 受气泡模不稳定性所限, 它们的 $\beta$ 值十分低( $\leq a/Rq^2$ ,  $a$ 和 $R$ 分别是环的小半径和大半径,  $q$ 是安全因子)。串联磁镜成功地证明了直管装置中具有静电终端堵塞的磁约束的有效性, 但这类装置必须在整个运行过程中维持高能成分, 这将耗费大量的能量。最近对聚变装置提出了一些新的设想, 试图找到一种办法避开环形装置中的气泡模和扭曲模不稳定性, 以便在高 $\beta$ 的第二稳定区运行<sup>[1-3]</sup>。

本文根据各种已有装置的实验结果, 综合它们的优点, 提出了一个新的聚变反应堆概念。

## 二、装置简述

我们提出的反应堆装置由两个轴对称的类似串联磁镜的部分和两个具有旋转变换 $l=2$ 的U形螺旋仿星器(以下简称U形弯曲段)组成, 如图1所示。该装置综合了磁约束和静电约束、磁镜和环形位形的优点, 采用了高能粒子和射频加热两种稳定方法, 把快、慢两种过程联合在一起。在起动阶段, 串联磁镜的中心室等离子体被加热, 其 $\beta$ 值记为 $\beta_{cc}$ 。串联磁镜中的端塞把具有较高 $\beta_{cc}$ 的中心室等离子体与U形弯曲段中低 $\beta$ (记作 $\beta_{vb}$ )的等离子体隔开,

\* 中国科学院科学基金资助课题。

\*\* 中国科学院力学研究所。

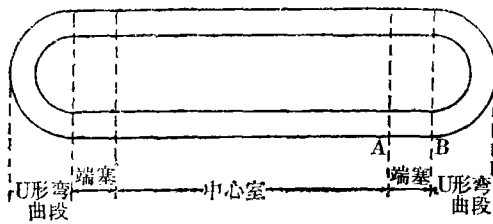


图1 跑道型位形

当 $\beta_{cc} \geq 0.4$ 时，端塞中的辅助加热（中性注入和射频加热）和磁镜线圈电流迅速撤去，使端塞位势在一个弛豫时间（或毫秒）内消失。这样，中心室高 $\beta_{cc}$ 的等离子体以超声速流出，而使U形弯曲段中低 $\beta_{ub}$ 等离子体足够快地进入第二稳定区。在此过程中，MHD不稳定性还未来得及增长到足以破坏约束的程度。以后，反应堆就可作为高 $\beta$ 跑道形仿星器而自持地运行。如果允许存在纵向电流，这就是运行在第二稳定区的高 $\beta$ 托卡马克。

由于射频、高能粒子加热和稳定只在起动阶段需要（起动阶段时间 $\tau \leq 0.1s$ ,  $\tau_s^{NB} < \tau \ll \tau_r^{i^0}$ ,  $\tau_s^{NB}$ 是中性注入的慢化时间， $\tau_r^{i^0}$ 是离子-电子碰撞时间），所以对端塞和稳定的要求比串联磁镜和EBT大大降低。

经过详细计算，我们建议端塞位势放在端塞的最小 $B$ 位置，晃荡（Sloshing）电子<sup>[4]</sup>用来产生热垒。ECRH和ICRF用来加热等离子体，并增加各种势垒的高度。起动阶段加在中心室的中性束和ICRF使得 $T_{ic} \gg T_{e0}$ （因为 $\tau_r^{i^0} \gg \tau$ ）和 $T_{iL} > T_{iH}$ （ $\tau \lesssim \tau_L = \tau_{ii}$ ），这样大大放松了对离子泵浦的要求，增加了效率。径向势差和热分量也有助于减少Pfirsch-Schluter电流。

### 三、结构和尺寸

所述装置可以是跑道形的几何位形（见图1），它包含两个直的螺线管中心室部分，两个 $l=2$ 的螺旋U形弯曲段和4个轴对称的端塞（夹在螺线管和U形弯曲段中间，只在起动阶段需要）。图2是起动阶段装置四分之一部分的磁场 $B$ 轴向分布。

为了得到高的 $Q$ 值和相对小的 $\beta_{cc}/\beta_{ub}$ ，希望中心室的体积较大。这里取 $V_{cc}/(V_{ub}+V_p) = 3$ （其中 $V_{cc}$ ,  $V_{ub}$ ,  $V_p$ 分别是中心室、U形弯曲段和端塞的体积），并且要求在起动阶段结束时 $\beta_{cc} \approx 0.5$ ,  $\beta_{ub} \approx 0.01$ ，以保证U形弯曲段等离子体处于第一稳定区，而最终等离子体将处于第二稳定区。设U形弯曲段的纵横比 $R/a=4$ ，中心室和U形弯曲段的镜比（ $R_{mc}$ ,  $R_{mu}$ ）是8，端塞镜比 $R_{mp}=4$ 。因此装置全长

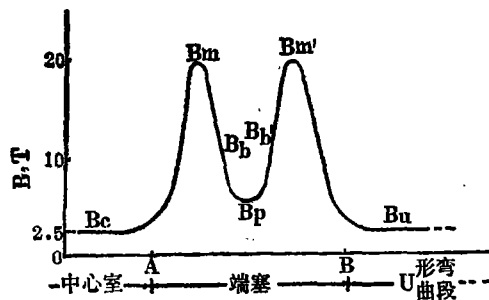


图2 起动阶段四分之一装置的磁场轴向分布  
镜比： $R_{mc} = B_m/B_c = 8$ ,  $R_{mp} = B_m/B_p = 4$ ,  
 $R_{bp} = B_b/B_p = 2$ ,  $B'_m = B_m$ . A和B与图1中A、B两点相对应。

$$\begin{aligned} L_{总} &= 2[L_{cc} + L_{ub} + 2L_p] \\ &= 2[3(L_{ub} + 2L_p) + L_{ub} + 2L_p] \\ &\approx 8\left(\pi \frac{R}{a}\right)a + 16(0.6R_{mp})a. \end{aligned} \quad (1)$$

这里已设 $L_{cc} = 3(L_{ub} + 2L_p)$ ，磁镜半径 $a$ 应由中性束的贯穿深度确定。例如当 $a = 0.5m$ 时， $L_{总} \approx 70m$ 。具有这种尺寸的反应堆是十分紧凑的，其磁场强度如图2所示，取 $B_c = B_u = 2.5T$ ,  $B_m = 20T$ ,  $B_p = 5T$ ,  $B_b = B_b' = 10T$ 。

## 四、起 始 阶 段

### 1. 位形、加热和功率平衡等参数的计算

开始起动时, 得到一个低 $\beta$ 等离子体, 其参数为 $n_{ic}^0 = n_{ie}^0 = 2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_{cu}^0 = n_{iu}^0 \ll 10^{13} \text{cm}^{-3}$  (见注1),  $T_e = T_i \lesssim 5 \text{keV}$ . 中心室的热核等离子体借助中性注入 (中性束粒子能量 $e_1 \approx 70-100 \text{keV}$ ) 和 ICRF 获得, 它们在 0.1s 内把 $\beta_{cc}$  升高到约 0.5, 也就是 $n_{ic} = n_{ec} \approx 1.4 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  $T_{ic} \approx 50 \text{keV}$ ,  $T_{ec} \approx 5 \text{keV}$ . 在中心室加热过程中, 端塞用来把高 $\beta_{cc}$  的中心室等离子体与低 $\beta_{ub}$  的 U 形弯曲段等离子体隔开. 在端塞最小  $B$  处 ( $P$  点), 垂直注入能量 $e_1 \approx 300 \text{keV}$  的中性束产生端塞正势垒. ECRH 用来加热端塞  $P$  处电子提高端塞正势垒, 并在  $b$  和  $b'$  处 (图 3) 形成晃荡电子以便在  $b$ ,  $b'$  处造成热垒. 同时, 可在中心室加上 ICRF 以增加等离子体稳定性<sup>[5]</sup>, 减少粒子从中心室流向端塞.

下面自治地计算起始阶段结束时的各种物理参数, 静电位势和密度分布如图 3, 图 4 所示.

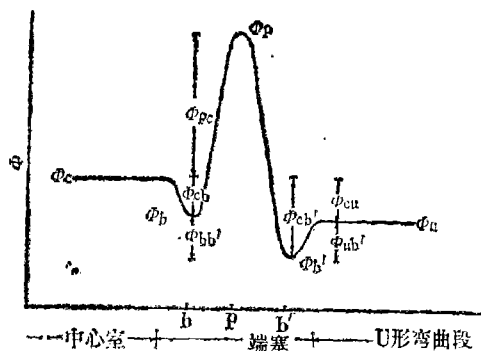


图3 静电位势分布

$\Phi_{cb} = 15 \text{keV}$ ,  $\Phi_{pc} = 150 \text{keV}$ ,  $\Phi_{cu} = 11 \text{keV}$ ,  $\Phi_{ub} = 7.4 \text{keV}$ ,  $\Phi_{cb'} = 18.4 \text{keV}$ ,  $\Phi_{bb'} = 3.4 \text{keV}$ .

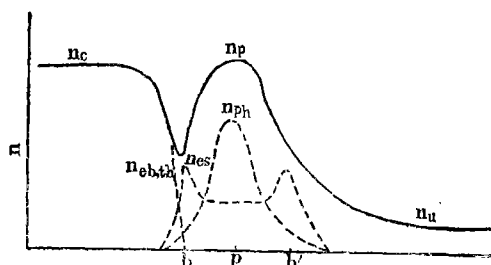


图4 慢模运行起动阶段结束时密度的轴向分布

——总密度; ---不同种类电子的密度.

$n_c = 1.4 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_b = 7.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_{eb,th} = 7.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_{es} = 6.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_p = 1.47 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_{ps} = 3.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_{ph} = 1.15 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_{eu} = 1.55 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $n_{eb',th} = 3.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ .

令  $\Phi_{cb} = 3T_{ec} = 15 \text{keV}$  (见图 3), 得到  $b$  处的通行离子密度<sup>[6]</sup> (本文密度均以  $\text{cm}^{-3}$  为单位)

$$n_{ib,pass} = \frac{n_c}{R_{mb}} \left( \frac{T_{ic}}{\pi \Phi_{cb}} \right)^{1/2} = 7.2 \times 10^{13}, \quad (2)$$

平衡时  $b$  处的离子总密度

$$n_{ib} = n_c \exp(\Phi_{cb}/T_{ic}) = 1.89 \times 10^{14}, \quad (3)$$

这意味着

$$g \equiv n_{ib}/n_{ib,pass} = 2.6. \quad (4)$$

使中心室加热过程加快有很重要的意义, 因为中心室的离子-电子能量等分时间大于 0.1s, 若中心室加热时间短于 0.1s, 有  $T_{ic} \gg T_{ec}$ , 这就会大大减少实际的  $n_{ib}$  值. 因而, 只需要低能 ( $e_1 \leq 50 \text{keV}$ ) 和不强的离子泵浦就可到达  $g=1$ ,  $\alpha \equiv n_b/n_{b,th} = 10.3$ , 以及在  $b$  和  $b'$  处形成所

注1: 为了保证  $\beta_u \ll 0.01$ , 我们希望  $n_u^0 < n_c^0$ . 只要从一开始就把端塞位势逐渐建立起来, 就能达到以上要求.

要求的热垒高度.  $b$  处的热电子密度

$$n_{ob,th} = n_c \exp(-\Phi_{cb}/T_{oc}) = 7.0 \times 10^{12}. \quad (5)$$

要求该处的晃荡电子密度 (由适当设计的 ECRH 产生)

$$n_{os} = (\alpha - 1)n_{ob,th} = 6.5 \times 10^{13}, \quad (6)$$

由中性化条件

$$n_{ou} \exp(-\Phi_{ub}'/T_{ou}) + n_{os} = n_{iu} \exp(\Phi_{ub}'/T_{iu}), \quad (7)$$

得

$$\Phi_{ub}' = 7.45, \quad (8)$$

以 keV 为单位 (取  $n_{iu} = n_{ou} = 1.55 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_{iu} = T_{ou} = 5 \text{ keV}$ ), 由此

$$n_{ob',th} = n_u \exp(-\Phi_{ub}'/T_{ou}) = 3.5 \times 10^{12}, \quad (9)$$

所以

$$\alpha' \equiv n_{ob}/n_{ob',th} = 19.6. \quad (10)$$

在  $P$  处, 取端塞位势

$$\Phi_{pb} = 3T_{ic} + 3T_{oc} = 165, \quad (11)$$

以 keV 为单位, 热电子温度

$$T_{op} = 150, \quad (12)$$

以 keV 为单位. 它们决定了端塞处热电子密度

$$n_{ph} = n_c \left( \frac{T_{op}}{T_{oc}} \right)^{1/2} \exp\left( \frac{\Phi_{pb}}{T_{op}} - \frac{\Phi_{cb}}{T_{oc}} \right) = 1.15 \times 10^{14}. \quad (13)$$

晃荡电子对  $P$  处的总电子密度也有贡献. 从粒子通量守恒, 得到端塞处晃荡电子密度

$$n_{ps} \approx n_{os}/R_{bp} \approx 3.2 \times 10^{13}. \quad (14)$$

所以,  $P$  处总电子密度

$$n_p = n_{ph} + n_{ps} = 1.47 \times 10^{14} \approx n_c. \quad (15)$$

中心室和 U 形弯曲段之间的位势差可用 Catto 等<sup>[7]</sup>建议的方法算出:

$$\frac{\Phi_{cb}'}{T_{oc}} = \frac{\Phi_{ub}'}{T_{ou}} - \ln \left[ \frac{n_u}{n_c} \left( \frac{T_{oc}}{T_{ou}} \right)^{1/2} \right] = 3.69, \quad (16)$$

联合(8)式和(16)式, 得

$$\Phi_{cu} \approx 11, \quad (17)$$

以 keV 为单位. 整个反应堆的全部静电位势应近似为零, 即

$$\frac{1}{3}(150 - 15 - 18.4) \times 2L_p - 11L_{ub} + L_c \Phi_c \approx 0. \quad (18)$$

其中设端塞位势和两个热垒各占端塞室的三分之一. 由此

$$\Phi_c \approx -\frac{L_{ub}}{L_c} \left( \frac{2L_p}{L_{ub}} \times 38.9 - 11 \right) \approx 1. \quad (19)$$

$\Phi_c$  以 keV 为单位. 因此, 该装置可称为“平衡模”<sup>[8]</sup>.

晃荡电子的能量可由下式算出<sup>[9]</sup>

$$E_{s0} = \frac{T_{oc}(\alpha - 1)}{\exp(-E_b'/T_{oc}) \log_{10} R_{mb}} = 3 \times 10^3, \quad (20)$$

其中  $E_b$  是捕获在热垒中的电子的最小能量, 而  $E_b' = \Phi_b/(R_{ob} - 1)$ .  $E_{s0}$  以 keV 为单位.

计算所得的其它能量和功率的参数列于表 1.

· 4 ·

表1 慢模的参数 ( $g=1, \tau=0.1$ )

参 数	功率, MW	单位面积上的功率, kW/cm <sup>2</sup>	
端	ECRH (获得 $T_{e,p}=150\text{keV}$ )	5.4	0.68 (表面面积为 $2\pi r_p^2$ )
	从晃荡电子得到的功率	4.4	
	损失给中心室通行电子的功率	9.6	
	损失给U形弯曲段通行电子的功率	4.8	
塞	中性束注入 ( $E_i=300\text{keV}$ )	48	
	中性束注入 ( $E_i=70\text{keV}$ )	254	3 (表面面积为 $0.2\pi r_c L_c$ )
中心室	ICRF (用于稳定, 并使离子不进入损失锥)	远小于中性束注入	
	ECRH (产生晃荡电子)	34	8.6 (表面面积为 $2\pi r_b^2$ )
热	回旋辐射	41	
	晃荡电子和端塞捕获的热电子之间的功率交换	4.4	
	中性束泵浦 ( $\theta_{inj} < 45^\circ$ )		
空	$E_i=20\text{keV}$	0.77	
	$\frac{\langle \sigma v \rangle_{e\alpha}}{\langle \sigma v \rangle_{ion}} \simeq 3$ (氦原子)		
	$E_i=50\text{keV}$	3.0	
	$\frac{\langle \sigma v \rangle_{e\alpha}}{\langle \sigma v \rangle_{ion}} \simeq 1$ (氦原子)		

## 2. 稳定性

与 EBT 和串联磁镜相似, 本装置中也存在坏曲率区。许多作者从理论<sup>[10]</sup>和实验<sup>[5,11]</sup>上对稳定性进行了充分的研究。我们预期端塞区域的热分量和适当选择的 ICRF<sup>[5]</sup>将为起动阶段的等离子体提供必要的稳定性。Berk<sup>[12]</sup>和 Rosenbluth<sup>[8]</sup>等关于高能粒子在 EBT, 串联磁镜和托卡马克中的稳定作用的理论与 EBT<sup>[13]</sup>, Phaerdrus 及 HIEI<sup>[6]</sup>装置上最近的实验结果是非常令人鼓舞的。

如果端塞区域中晃荡电子的能量为 3MeV, 则  $\bar{\beta}_p$  值在 Van Dam-Lee 极限值<sup>[14]</sup>以内, 盘状分布的热电子分布使压力梯度驱动的热电子模也是稳定的<sup>[12,15]</sup>。若使晃荡电子的轴向延伸大于  $L_p/2$  (即  $B_b = B_b' > 10\text{T}$ ), 则晃荡电子在好曲率区的权重大得多, 从而能够稳定坏曲率驱动的槽形模<sup>[16]</sup>。

此外, 可以在中心室或 U 形弯曲段应用适当的 ICRF 以提供射频稳定性<sup>[5]</sup>。

## 五、快速过渡

### 1. 静电势垒和磁势垒的中断

只要  $\beta_{cc} \sim 0.5$ , 我们就中断磁镜线圈电流、中性束注入及 ECRF, 以便撤去磁镜磁场、端塞电势和热垒。仔细设计回路, 适当选择元件, 镜场可以在毫秒时间内撤去, 而只有很小的垂直方向的磁场振荡。我们现在已具有迅速撤去磁场的技术条件, 爆炸法就是其中之一。采用一维模型, 假定绝热过程和通量守恒, 从数值计算结果证明, 当磁场撤去时间大于  $3\mu\text{s}$  时, 端塞中的磁场将无振荡地减少到中心室磁场值。

### 2. 平行激波加热

由于端塞能够在毫秒时间内迅速撤去, 可以设想这将激发一个平行激波快速扫过 U 形弯

曲段, 在MHD不稳定性还来不及破坏约束时就将U形弯曲段中的等离子体加热上去。端塞撤去后产生的压力间断 $\sim 34\text{N/cm}^2$  (设 $\beta_{ec}\sim 0.5$ ), 激波速度 $\sim 1.4\times 10^8\text{cm/s}$ 。如果采用MHD激波模型, 最大瞬时局域 $\beta$ 值可达到0.63。预期 $\beta$ 值最终可 $\sim 0.48$ , 因为电子热速度比离子和电子流体之间的相对速度大得多, 不可能激发任何种类的双流不稳定性。

## 六、运行阶段——高 $\beta$ 仿星器

快速过渡阶段结束后, 得到一个处于跑道型仿星器位形中的高 $\beta$ 等离子体, 这与Furth及Boozer<sup>[2]</sup>所建议的终态等离子体相同。如果允许纵向电流存在, 这就是高 $\beta$ 托卡马克等离子体, 与Rosenbluth等<sup>[3]</sup>所建议的相似, 这些等离子体将自持地运行在第二稳定区。

## 七、讨 论

我们根据现有的实验结果和理论工作, 提出了一个聚变反应堆的新概念, 并建议把磁约束和静电约束, 环形和磁镜位形的优点结合起来, 利用准静态和快过程两种方式以获得在第二稳定区运行的仿星器或托卡马克高 $\beta$ 等离子体。射频和高能粒子稳定作用只在起动阶段才需要, 端塞也只是起动阶段需要。因为起动阶段周期 $\tau$ 比中性束慢化时间长得多, 比电子-离子能量等分时间短得多, 因此 $T_{ic}\gg T_{ec}$ , 这就使 $g$ 值大大减小(因为 $\Phi_{eb}\ll T_{ic}$ )。所以只要求低能( $E_i\lesssim 50\text{keV}$ )和不强的离子泵浦, 完全避免了串联磁镜反应堆中所用的效率极低的( $\langle\sigma v\rangle_{ex}/\langle\sigma v\rangle_{ion}\ll 1$ )高能离子泵浦。由于旋转变换 $l=2$ , U形弯曲段中环效应引起的 $\Delta B$ 电荷分离消除了。起动阶段周期短不仅能节省巨大的加热能量以获得较高的反应堆 $Q$ 值, 而且大大降低了对端塞的要求及工程难度, 不再需要超导高磁场磁镜线圈, 并且迅速撤除镜场的技术已经成熟。依靠ICRF, 高能粒子和使晃荡电子在好曲率区停留较长的时间可以保证等离子体的稳定性, 如有必要还可在每个中心室和端塞之间加上八极场。纵向激波加热能把 $\beta_{ob}$ 在几毫秒时间内升高到第二稳定区, 而不会激起不稳定性, 所需要的射频和中性束功率都是现有技术可以达到的。

如果中心室等离子体能够在百分之几秒的时间内被加热, 那么离子泵浦可以免去。但中心室的中性束注入功率需要较高, 此时来自中心室的通行离子和热垒处的总密度降低, 因此热垒处电子的平均能量和回旋辐射损失减少。

本文所有位势、密度、温度以及功率平衡都是自洽地求得的。为了完成这个令人鼓舞的反应堆新概念, 还应做进一步的计算和实验, 特别是必须仔细研究高 $\beta$ 环形平衡、稳定性和输运, 这将在以后的工作中做出。

## 参 考 文 献

- [1] Furth, H. P. et al., PPPL-2126, 1984. Yoshikawa, S., PPPL-2028, 1984.
- [2] Furth, H. P., Boozer, A. H., Private Communication, 1982.
- [3] Rosenbluth, M. N., Tsai, S. T. (蔡诗东) et al., *Phys. Rev. Lett.*, 51(21), 1967(1983).
- [4] Kesner, J. R. et al., *Nucl. Fusion*, 21(1), 97(1981).
- [5] Ferron, J. R. et al., *Phys. Rev. Lett.*, 51(21), 1955(1983). Yasaka, Y. et al., *Nucl. Fusion*, 25(1), 29(1985).
- [6] Baldwin, D. E. et al., *Phys. Rev. Lett.*, 43(18), 1318(1979).

- [7] Catto, P. J. et al., *Nucl. Fusion*, 24(2), 229(1984).
- [8] Nexson, W. E., UCID-20261, 1984.
- [9] Kantrowitz, F. et al., *J. Fus. Energy*, 2(1), 59(1982).
- [10] Nelson, D. B., *Phys. Fluids*, 23(9), 1850(1980). Berk, H. L. et al., *Phys. Fluids*, 26(1), 201(1983). Kesner, J., *Nucl. Fusion*, 25(3), 275(1985), Li, X. Z. (李兴中) et al., *Nucl. Fusion*, 25(8), 907(1985).
- [11] Yasaka, Y. et al., *Nucl. Fusion*, 24(4), 445(1984).
- [12] Berk, H. L. et al., *Phys. Fluids*, 27(11), 2705(1984).
- [13] Hiroe, S. et al., *Phys. Fluids*, 27(4), 1019(1984).
- [14] Van Dam, J. W. et al., in Proceedings of the EBT Ring Physics Workshop, CONF-791228, 1979, p.471.
- [15] 刘亚东, 全国核聚变与等离子体物理第二届年会, 合肥, 1985年.
- [16] Teller, E., *Fusion*, Vol.1, Magnetic Confinement, Part A, Academic Press, New York, 1981.

(编辑部1986年3月17日收稿)

## A NEW CONCEPT FOR FUSION REACTOR DEVICE

CAI Shidong CHEN Yanping GUO Shichong KE Fujun  
SHEN Jiewu XU Minjian YU Xuehua ZHOU Yumei  
CHEN Yunming WANG Shijin ZHANG Chunyuan

(Association for Plasma Studies, Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing)

### ABSTRACT

A new advanced concept for fusion reactor device is suggested. Combining the merits of linear and toroidal configurations as well as the fast and slow process concepts, we consider a fusion reactor consisting of two axisymmetric tandem mirror-like sections and two heliac stellarator U-bends.

Start-up, transition and operating phases are studied. The D-D reactor parameters and stabilities are discussed. The RF and energetic components are only needed for start-up; their production would constitute only a temporary energy drain on the overall reactor economics of such a system. Besides, the plugs are needed only at the start-up phase. This also greatly relax the technical requirements of engineering.

**Key words**, Fusion reactor concept, Second stability region.