

聚变-裂变混合堆——中国发展增殖堆的道路

李寿楠

(中国原子能科学院)

核能是 21 世纪的替代能源, 远期靠聚变能, 前期靠裂变能。地球上天然铀储量不多, 必须充分利用丰产核 ^{238}U 和 ^{232}Th 。裂变增殖堆(快堆)和聚变增殖堆(聚变-裂变混合堆)是利用 ^{238}U 和 ^{232}Th 的两条主要途径。

聚变-裂变混合堆概念早在五十年代初就已提出^[1]。1960 年, 英国 J. W. Weale 的 DT 中子在天然铀铀柱中的宏观实验^[2], 为混合堆奠定了实验基础。六十年代开展了大量混合堆包层中子学理论和实验研究。1965 年美国 L. N. Lontai 第一个提出融盐增殖包层的概念设计^[3]。1969 年美国 L. M. Lidsky 第一个提出“混合堆-裂变堆共生系统”概念^[4]。1972 年美国 J. D. Lee 第一个提出快裂变色层概念^[5]。1977 年, L. M. Lidsky 第一个提出抑制裂变概念^[6]。七十年代后, 随着聚变研究迅速发展, 混合堆研究日益受到重视, 它已成为比快堆具有更大优越性的增殖途。

对于我国核能发展战略, 我在 1980 年中国核学会成立大会上所作报告中, 曾提出在我国核能发展第二阶段能否甩掉快堆, 走聚变-裂变混合堆道路的建议。它受到中国科学院等离子体物理研究所的重视。此后, 开始成立小组开展混合堆研究, 并于 1985 年提出我国第一个混合堆 HTHR 物理概念设计^[7]。1984 年我先后在核工业部快堆论证会和西南物理研究所等场合系统介绍了聚变-裂变混合堆^[8], 并提出我国聚变发展分混合堆和纯聚变堆两个阶段发展的建议。它受到西南物理研究所领导和科技人员的一致支持。该所于 1985 年完成了一个比较完整的磁镜混合堆 (CHD) 概念设计^[9]。1985 年 12 月在四川乐山召开了我国第一次混合堆讨论会。会上一致赞同我国核聚变分两个阶段发展的战略设想。经过各方面努力, 现在聚变-

物理

裂变混合堆已与快堆并列为我国“七五”预研项目, 以进一步论证决策。

本文将简要介绍混合堆原理, 并就混合堆优越性作若干比较。

一、聚变-裂变混合堆原理

1. 混合堆的核物理基础

聚变-裂变混合堆以聚变堆芯作为驱动器, 堆芯外为增殖包层。包层是一个次临界装置。图 1 是纯聚变堆与混合堆比较示意图。两者主要差别是在混合堆包层中增加了肥料核 ^{238}U 或 ^{232}Th , 有时还有其他可裂变核 ^{235}U 和 ^{239}Pu , 或 ^{233}U 。

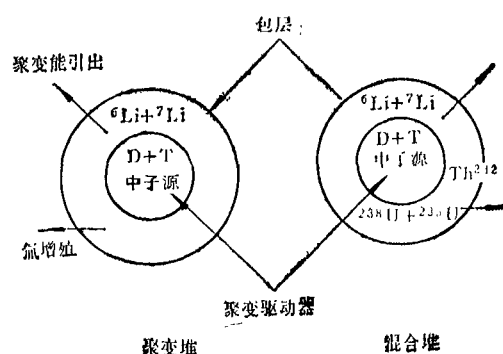
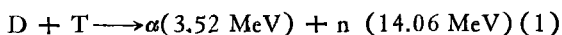
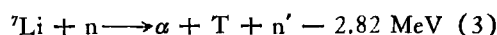
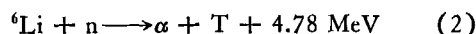


图 1 聚变堆和混合堆比较

第一代聚变堆将是氘氚反应聚变堆。在聚变堆芯中高温等离子体发生热核反应:



产生 14 MeV 快中子, 通过第一壁进入包层。和纯聚变堆一样, 快中子进入混合堆包层与锂反应生成氦以补偿聚变反应消耗的氦:



但混合堆与纯聚变堆不同, 快中子进入包层后, 除了造氦反应外, 还与 ^{238}U 或 ^{232}Th 发生

(n, γ)俘获反应,生成核燃料²³⁹Pu或²³³U,从而起到增殖核燃料的作用。

聚变中子还可与²³⁸U和²³²Th等发生快裂变反应(阈值分别为0.7 MeV和1.2 MeV),慢化后也可与²³⁵U,²³⁹Pu或²³³U发生热中子裂变。每次裂变沉积于包层中的裂变能约为190 MeV,从而达到倍增能量的作用。

聚变中子通过裂变,通过与第一壁材料、燃料核和中子倍增剂(如Be, Pb等)等的(n, 2n), (n, 3n)反应,可以达到倍增中子的目的。

图2(a)是对混合堆有意义的各种燃料核的快中子截面。图2(b)是几种非燃料核的(n, 2n), (n, 3n)截面。一个聚变中子在混合堆包层中,通过裂变、(n, 2n), (n, 3n)等反应,一般可倍增2—4个中子。除一个中子用于增殖氚外,1—3个中子可用于增殖核燃料或增加裂变,叫净增殖比($C_{RR}^{净}$)。快堆中子谱较软。在快堆中,²³⁸U和²³²Th的快裂变极少,没有(n, 2n), (n, 3n)反应,中子倍增性能差,增殖比低。混合氧化物钠冷快堆,增殖比只能达到1.1—1.3,将来用碳化物或金属燃料,有可能到1.4—1.5。每次裂变增殖的燃料有一个用于生产补偿消耗了的核燃料,净增殖比($C_{RR}^{净}$)只有0.1—0.3,将来最多也只能达到0.4—0.5。

混合堆与快堆年生产核燃料能力之比(Y)为混合堆聚变反应率(R_f)和包层净增殖比之乘积与快堆的裂变率(R_F)和净增殖比乘积之比为

$$Y = R_f C_{RR}^{净} / R_F C_{RR}^{快} \quad (4)$$

对于功率,同为P(MW)的混合堆和快堆,

$$R_f / R_F = 190 / (3.52 + 14M), \quad (5)$$

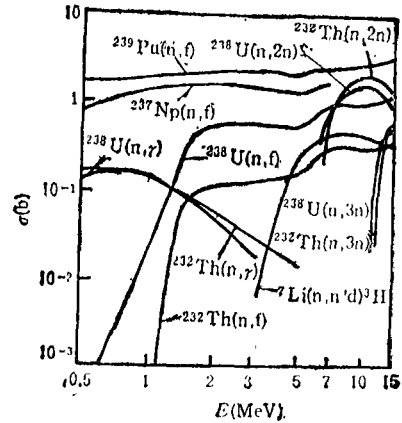
其中M为混合堆包层能量倍增因子。所以,

$$Y = 190 C_{RR}^{净} / (3.52 + 14M) C_{RR}^{快} \quad (6)$$

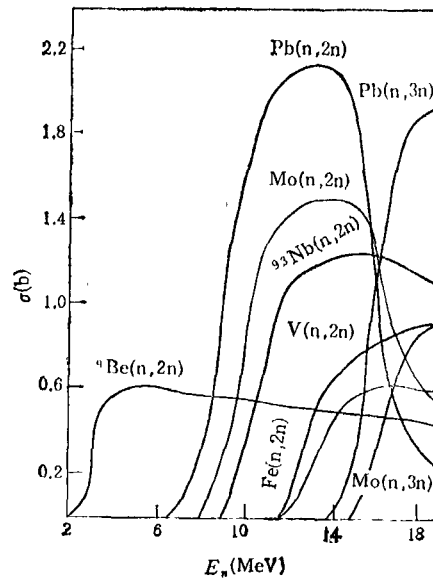
因为 $C_{RR}^{净} > C_{RR}^{快}$,所以在M不太大时, $Y \gg 1$ 。可见混合堆增殖能力比快堆大得多。

2. 两类混合堆

任何一种氚源都有可能成为混合堆的驱动器,即使加速器中子源如散裂源也可成为混合堆驱动器。混合堆因驱动器不同可分为磁约束聚变-裂变混合堆和惯性约束聚变-裂变



(a) 各种燃料核的快中子截面



(b) 几种中子倍增剂的(n, 2n), (n, 3n)截面

图 2

混合堆两大类。前者如托卡马克混合堆、串列磁镜混合堆;后者如激光惯性约束混合堆、粒子束聚变混合堆。惯性约束混合堆不需要强磁场,结构简单,堆芯功率密度高,经济性好,维修方便。磁约束混合堆结构复杂,需要强磁场,堆芯功率密度低、经济性能相对较差。但是,托卡马克聚变装置研究最成熟,第一代混合堆将是托卡马克混合堆。

混合堆因燃料体系不同分为U/Pu体系混合堆和Th/U体系混合堆。核燃料增殖后一般经过后处理提取增殖的Pu或²³³U。近来随着中子学的发展,提出了一种新的概念,即增殖到一

定同位素浓度如含 3% ^{233}U 后,不经后处理就送至热堆去用.这类称直接浓缩混合堆.它可省去后处理费用,对降低燃料成本和提前商用均有利.

混合堆根据 14 MeV 中子进入包层后引起裂变的性质和程度的不同,可设计成裂变混合堆和抑制裂变混合堆.裂变混合堆是利用了 ^{238}U 和 ^{232}Th 的快中子裂变(快裂变混合堆)或利用慢化后的热中子与包层中含有的 ^{235}U 、生成的 ^{239}Pu 或 ^{233}U 的热中子裂变(热中子裂变混合堆).裂变混合堆因为利用了裂变能,在包层中沉积能量比纯聚堆可大许多倍.如在混合堆设计中,使 14 M 中子很快慢化到 ^{238}U 或 ^{232}Th 的裂变阈之下,尽量避免引起快裂变,同时在包层中尽可能降低燃料 ^{239}Pu , ^{233}U , ^{235}U 的含量,以避免热中子裂变,从而使聚变中子在包层中倍增的中子尽可能用于增殖核燃料,这种混合堆称抑制裂变混合堆.这种堆能量倍增不大,但核燃料生产能大,称为核燃料工厂.

一个混合堆生产的核燃料能支持同等功率裂变堆的数量叫支持比,可简化地表示为

$$N = \frac{\text{每裂变反应释放的能量} \cdot \frac{C_{\text{BR}}}{(1-c)}}{\text{每聚变反应在混合堆中释放的能量}}$$

$$= \frac{190}{14.06M + 3.52} \cdot \frac{C_{\text{BR}}}{1-c}$$

$$= \frac{13.5}{1-c} \frac{C_{\text{BR}}}{M} f(M),$$

其中 C_{BR} 为净增殖比, M 为包层能量倍增因子, c 为裂变堆燃料转换比,

$$f(M) = 14.06M / (14.06M + 3.52),$$

$$N = 33.7 \frac{C_{\text{BR}}}{M} f(M)$$

$$\text{对 } ^{239}\text{Pu} \text{ 压水堆 } (c = 0.6), \quad (7)$$

$$N = 54.0 \frac{C_{\text{BR}}}{M} f(M)$$

$$\text{对 } ^{233}\text{U} \text{ 压水堆 } (c = 0.75). \quad (8)$$

表 1 为不同混合堆对压水堆的支持比的具有代表性的例子.根据不同要求,可设计成以生产核燃料为主或以生产动力为主,或两者兼顾的混合堆.

物理

表 1 不同包层混合堆对压水堆支持比

	M	C_{BR}	N	
			^{239}Pu	^{233}U
热中子裂变 (动力堆)	25	1.04	~1	~2
快裂变	10	1.6	~5	~8
抑制裂变	2	0.92	~14	~22

3. 混合堆可以提前实现聚变能利用

混合堆包层产生裂变能越多,包层能量倍增因子越大,对聚变驱动器的要求可以降低得越多,有利于提前实现聚变能利用.设每个聚变中子在包层中平均沉积能量为

$$E_b = Mq_n, \quad (9)$$

q_n 为聚变中子能量.混合堆包层功率为

$$P_B = R_f E_b = Mq_n R_f, \quad (10)$$

R_f 为聚变堆芯的聚变反应率.对于包层功率一定的混合堆,

$$R_f = \frac{P_B}{q_n} \cdot \frac{1}{M}, \quad (11)$$

$$P_F = \text{聚变功率} = R_f(q_a + q_n)$$

$$= \frac{P_B(q_a + q_n)}{q_n} \cdot \frac{1}{M}, \quad (12)$$

$$Q = \text{能量增益} = \frac{R_f(q_a + q_n)}{\gamma P_B}$$

$$= \frac{(q_a + q_n)}{\gamma q_n} \cdot \frac{1}{M}, \quad (13)$$

$$I = \text{第一壁中子负荷} = \frac{R_f q_n}{A}$$

$$= \frac{P_B}{A} \cdot \frac{1}{M}, \quad (14)$$

其中 $q_a = 3.52$ MeV, A 为第一壁面积, γ 为包层功率用于堆芯输入能的份额.一定包层功率的聚变堆或聚变-裂变混合堆,对聚变驱动器要求与 M 成反比.所以,混合堆(尤其是裂变混合堆)可以大大降低聚变驱动器在工程技术上的难度.表 2 为不同包层对 Q 值的要求(假定 $\gamma = 5\%$).

裂变混合堆对 Q 值要求达到 1—2 就可以.目前国际上四大点火装置 TFTR, JET, JT-60, T-15 的 Q 值都在 1—4 左右.这些装置实现点火后,就可在这代装置基础上建造聚变-

表2 不同包层对聚变堆芯Q值的要求

	热中子裂变混合堆	快裂变混合堆	抑制裂变混合堆	纯聚变堆
包层平均能量倍增因子(M)	25	10	2	1.3
对有效产电的增益要求(Q)	1	2.5	12.5	19

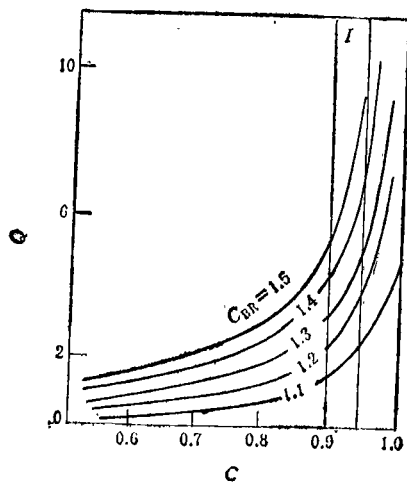
裂变混合堆的工程试验堆。托卡马克裂变混合堆可以首先实现。据估计可以比纯聚变堆提前20年左右。如果开始只用于生产核燃料，不并网送电，则还有可能更提前。抑制裂变混合堆是理想的核燃料工厂。由于对驱动器要求降低不多，建成时间将迟于裂变混合堆。

二、两种增殖堆比较

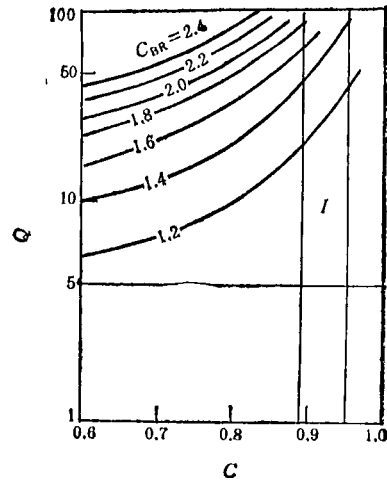
为说明混合堆优点，现就聚变增殖堆(混合堆)和裂变增殖堆(快堆)作些比较。

1. 混合堆增殖能力比快堆大得多

前面已讲到快堆净增殖比较小，倍增时间



(a) 快堆增殖能力 ($Q = \text{转换堆功率}/\text{快堆功率}$, c 为热堆转换比, C_{BR} 为增殖比);



(b) 混合堆增殖能力 ($Q = \text{裂变能}/\text{聚变能}$, c 为热堆转换比, C_{BR} 为净增殖比)

图3

长(如超凤凰-1的增殖比为1.1,倍增时间为40年),核燃料增殖能力差,支持比要比混合堆小得多。表3是快堆和混合堆对压水堆支持比的典型范围。

P. Fortescue 从理论上曾对聚变增殖堆和裂变增殖堆增殖性能作了比较^[10]。见图3(a), 3(b)。Q为能量倍增,相当于支持比(此处快堆 $C_{BR}-1$ 为净增殖比)。

2. 混合堆不受工业钚限制

快堆电站建设受初始装料工业钚限制混合堆没有这个问题。超凤凰-1快堆初始装料需工业钚堆内8t,年产钚200kg。氧化物钠冷快堆改进后,最好情况估计可达到初始装料5t,年产钚250kg。将来用碳化物或金属铀燃料,初始装料可到3t,年产钚300kg,但仍然要受初始装料工业钚的限制。

我国发电装机容量到2000年预计可能达230GWe如2000年后平均年增长为4%,则到

表3 快堆和混合堆对压水堆支持比

	氧化物快堆	碳化物快堆	金属铀快堆	U/Pu 快裂变混合堆	Th/U 快裂变混合堆	Th/U 抑制裂变混合堆
C_{BR}	0.1-0.3	≤ 0.4	≤ 0.5	1.5-2	1.8-2.5	0.6-0.85
M				8-12	10-14	2.5-1.6
N	0.25-0.7	≤ 1	≤ 1.25	4-6	8-12	12-25

2050年总装机容量约为1635 GWe (图4中的曲线IV)我国铀矿探明储量据说只能供15GWe压水堆三十年之用。加U/Pu循环也只能建21 GWe。我国核电站建设太迟太慢,对积累工业钚发展快堆极不利。如果2010年前15 GWe核电全建成,2011—2015年再增建10 GWe,则到2015年共达25 GWe。如果2010年开始引入快堆,并将所有压水堆和快堆生产的工业钚都用于发展快堆,则不同增殖能力的快堆和压水堆一起能提供的核电装机容量如图4曲线I, II, III所示。从图4可见,快堆不能解决我国21世纪能源问题。

混合堆建设不受工业钚积累的限制,一旦技术成熟,经济力量许可,就可加速发展。如能集中力量认真抓,则2015年在我国裂变混合堆投入使用,2020—2025年左右抑制裂变混合堆投入使用是可能的。由于混合堆增殖能力强,建成后很快可供压水堆燃料。上述25 GWe核电站燃料总共可用750堆年。如压水堆前15—20年用低浓缩度天然铀,以后用混合堆提供的燃料。这样前期可以多建压水堆。如2020年开始每年建设一套支持比为6的快裂变混合堆-压水堆共生系统,2025年后每年增建二套;2025年后每年建设一套抑制裂变混合堆共生系统(支持比为20),2030年后每年增建二套,则按这个方案混合堆-压水堆共生系统的核电装机容量发展如图4曲线VI所示。这表示混合堆-压水堆共生系统将解决我国21世纪能源短缺问题提供了可能途径。

3. 混合堆-压水堆共生系统的电能价格比快堆-压水堆共生系统便宜

图5是美国EPRI评价的几种燃料循环的

表4 几种混合堆条件

混合堆	造价(LWR)	支持比	净产电(MWe)
H ₁	1.5	4	800
H ₂	2.5	4	800
H ₃	2.5	12	100
H ₄	2.5	8	800

电厂价格^[11]。图中OT+F为快堆(造价比LWR高30%,倍增时间为15年)+LWR(一次物理

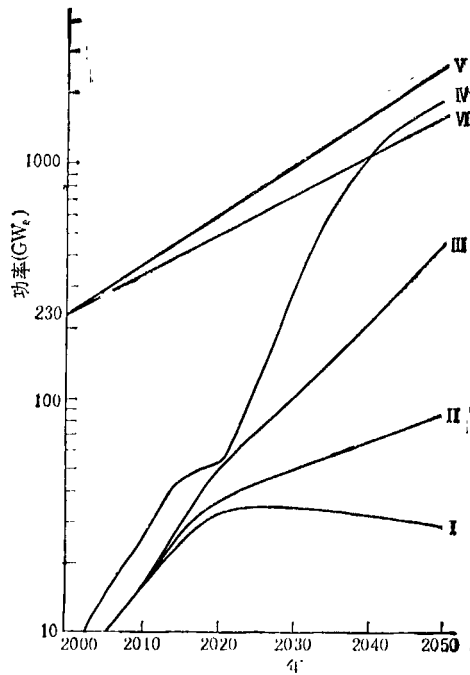


图4 不同增殖堆系统能提供的核电
 曲线 I 为快堆+LWR, 初始装料 6 t, 年产钚 150 kg;
 II 为快堆+LWR, 初始装料 5 t, 年产钚 250 kg;
 III 为快堆+LWR, 初始装料 3 t, 年产钚 300 kg;
 IV 为混合堆+LWR, 2020 年引入快裂变混合堆(支持比为 6),
 2025 年引入抑制裂变混合堆(支持比为 20);
 V 和 VI 为我国电力增长需要(V 为 2000 年后每年增长 4%, VI 为 2000 年后每年增长 5%)

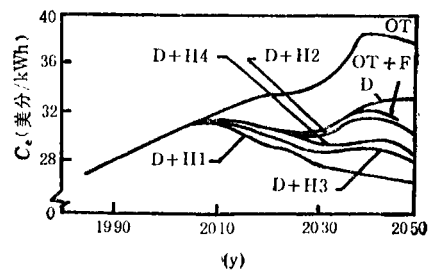


图5 电价与不同燃料循环关系

通过)共生系统; D + H₁, D + H₂, D + H₃, D + H₄ 都是混合堆+LWR (U/Pu 循环)共生系统。混合堆共生系统厂电价格都比快堆共生系统便宜。OT 为一次通过 LWR; D 为 U/Pu 循环 LWR。H 为混合堆,其性能如表4所示。
4. 混合堆-LWR 共生系统对铀资源消耗比快堆-LWR 共生系统低

图6是按 OECD 世界核电预测的低方案

分析的全世界铀耗量与不同堆系统和燃料循环关系^[12]。图中 FB 是 LMFBR + LWR, HP 是 U/Pu 循环混合堆+LWR, HU 是 Th/U 循环混合堆+LWR。显然, HP 和 HU 都比 FB 低。横线是全世界可信铀储量。可见, 只有混合堆共生系统才可能使铀耗量保持在 5×10^6 t 以下。图 6 中 OT 为一次通过 LWR; LU 为

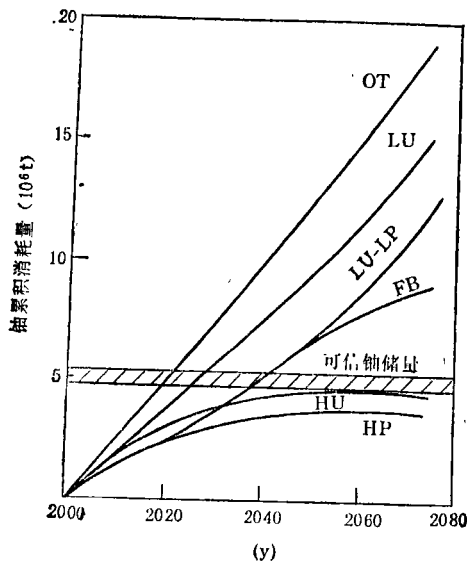


图 6 按核电预测低方案全世界铀耗量 (假定新堆型自 2000 年引入, 按市场渗透模型)

LWR 铀循环; LU-LP 为 LWR U/Pu 循环。

从图 6 还可见, 如果一次通过 LWR, 则全世界铀储量到 2020 年前将用完。用 U/Pu 循环和快堆+LWR 共生系统, 到 2040 前也将用尽。如快堆引入时间推迟, 则铀耗尽时间提前。

5. Th/U 体系混合堆-LWR 共生系统, 对于钍资源利用比较经济, 快堆不能经济利用钍资源

由于²³²Th 的快中子裂变截面比²³⁸U 快裂变截面小得多, ²³²Th 的裂变阈能(1.2MeV)比²³⁸U (0.7 MeV)高得多, 在混合堆中 Th/U 体系比 U/Pu 体系有更多中子用于增殖核燃料, 而²³²Th 和²³⁸U 的俘获面差不多。所以, 在混合堆中 Th/U 体系增殖性能比 U/Pu 体系好, 在抑制裂变情况下更是如此。另外, ²³³U 在热能区的 η 值比²³⁹Pu 高 (对²³³U, $\eta = 2.2966$; 对²³⁹Pu, $\eta = 2.1137$), 所以在热堆中烧²³³U 比烧²³⁹Pu 经

济(²³³U 为 0.14 kg/MW·y, ²³⁹Pu 为 0.2 kg/MW·y)。在混合堆-LWR 共生系统中, Th/U 体系比 U/Pu 体系支持比大, 钍的利用也较经济, 抑制裂变混合堆 Th/U 体系特别有利。

在快堆中, 由于²³³U 在高中子区 (>100 keV) 的 η 值比²³⁹Pu 低得多, ²³²Th 快裂变截面比²³⁸U 小得多, 而裂变阈恰比²³⁸U 高, 俘获截面与²³⁸U 差不多。所以, 在快堆中²³³U 和²³²Th 的增殖性能都差, 总的增殖性能, Th/U 体系要比 U/Pu 体系低约 20%。快堆如用 Th/U 体系, ²³³U 的初始装料和倍增时间都比 U/Pu 体系大, 比现在的铀钍混合氧化物快堆经济性更差, 增殖能力更低, 更缺乏竞争力。

我国钍储量比较丰富, 查明储量在 20 万吨以上。发展混合堆可有效利用钍资源, 使我国核燃料资源扩大三倍以上。

6. 混合堆比快堆安全

第一, 混合堆是一个次临界装置; 第二, 堆后热问题比快堆少, 抑制裂变混合堆比 LWR 还安全, 裂变率极低(每次聚变在包层中引起裂变次数 < 0.05), 卸料裂变产物只相当于 LWR 的 1/60; 第三, 流动床式燃料循环可以在紧急停堆时将核燃料全部从底部泻出堆外, 不存在堆内熔化问题; 第四, 直接浓缩混合堆没有后处理问题; 第五, 混合堆-卫星堆共生系统需要后处理时, 可以将卫星堆全部废元件集中到混合堆厂区处理。

7. 其他优点

混合堆还有一系列优点是快堆所不具备的。如混合堆可生产同位素纯度达 95.5% 以上的²³⁹Pu; 可以建成造钚堆; 有可能成为最终处置长寿命放射性废物的途径; 可以建成 1000℃ 以上高温热源, 代替高温气冷堆, 用于煤的气化, 氢的生产, 甲烷、甲醇、汽油的有机合成。

混合堆的另一个重要作用, 它作为过渡到纯聚变堆的中间阶段, 可作为纯聚变开发的 2 程试验堆, 考验材料与设备, 积累设计、建造和运行的经验。而快堆作为一种过渡堆是完全孤立的, 对聚变发展没有直接关系。

从上面列举的几点看, 混合堆与快堆比较,

优越性是明显的。现在大家关心的问题是混合堆现实性如何。就这点来说,快堆发展当然已较成熟,原型堆已并网送电了。混合堆要发展到今天原型快堆阶段,预计还要15年左右。混合堆发展中,还有许多工程技术问题有待解决。不过,混合堆的建设原理上已经解决,同时由于工程技术上主要建立在现有裂变堆和聚变工程研究基础上,也不存在不可克服的困难,建成是可能的,只是时间问题。我国发展增殖堆,是为了解决21世纪能源短缺问题。一种能源系统的引入,技术成熟是必要条件,但不是充分条件。能不能或在多大程度上能解决我国21世纪能源短缺问题才是充分条件。从这个角度看,从我国实际出发,我国发展增殖堆,走混合堆之路,似为上策。

三、发展混合堆是我国面临的一次重要的挑战和机会

前面已谈到,发展混合堆尽管还有困难,但已是现实的可行的途径。国际上由于发现纯聚变堆难度较大,建成时间可能比预想的要推迟。因此,以混合堆作为中间阶段的呼声越来越高。苏联把混合堆作为聚变能利用的第一阶段已是既定方针。苏联 E. P. Velikhov 院士在第十次等离子体和核聚变国际会议上宣布,苏联将发电与生产核燃料两用的混合堆作为聚变能利用的第一步,并公布了以 T-15 为基础的托卡马克混合堆工程试验堆 OTR 的指标^[43]。此堆预计在2000年前建成。苏联巴索夫院士1984年文章^[44]指出,苏联在激光聚变上规划了纯聚变堆、动力用裂变混合堆、抑制裂变混合堆-裂变堆电站共生系统。并指出,混合堆对激光效率要求可以从5%降低到0.5%。在1986年马德里会议上,苏联巴索夫院士等人作了激光约束混合堆概念设计报告^[45],指出发电成本可低于常规核电。

美国对混合堆研究最早,工作最多。由于能源过剩,铀和油价下跌,同时由于防止核扩散

和反核影响,所以快堆与混合堆都得不到国会支持。近来鉴于纯聚变难度大,看到苏联在坚定不移地发展混合堆,在美国混合堆呼声又有所提高。1985年能源部组织专门委员会对混合堆进行九个月的评议。由于经济、政治、社会原因,美国发展混合堆不会太顺利。

西欧聚变负责人 D. Palumb 表示,西欧搞纯聚变堆,不准备搞混合堆,因为第一,西欧已投资发展了快堆;他们有足够工业钷;第二,反核运动太厉害;第三,没有建混合堆的地方。他认为只有苏联和中国有条件搞混合堆。

1983年第三次新核能系统国际会议后,混合堆开始受到更多国家的重视,日本^[46]、印度等都已开始积极发展混合堆。

西欧、苏联、美国等发展快堆已有30多年历史。他们有足够工业钷积累。快堆的路走下去是当然的,发展混合堆,对他们来说技术上也是不难的。但是,由于政治、经济、社会影响,除苏联外,他们难于走混合堆之路。

中国没有30年快堆工作的基础,没有工业钷积累,发展快堆解决不了长远能源问题。与快堆相比,我国聚变研究却有两个基地和相当好的基础。中国发展核能道路没有必要再抱着热堆—快堆—聚变堆三步曲老路走下去。在新的技术革命形势下,我们需要高瞻远瞩,加强领导,集中力量,走发展混合堆之路。这样,我们有可能后来居上。“机不可失,时不再来”,我们不能再坐失时机。

参 考 文 献

- [1] P. F. Powell, LWS-24920, California Research and Develop. Company (1953); J. D. Lawson, AERE-GP/M, (1955), 185.
- [2] J. W. Weale et al., *J. Nuclear Energy A/B*, 14 (1961), 91.
- [3] L. N. Lontai, MS Thesis, Technical Report, No. 436, MIT, (1965).
- [4] L. M. Lidsky, CLM-NFR, (1969), 41—53.
- [5] J. D. Lee, Proceedings 7th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, American Chemical Society, (1972), 1294.
- [6] L. M. Lidsky, Proceedings 2nd Fusion-Fission Energy Systems Review Meeting, (1977), 83.

(下转第460页)