

CN8800008

CNIC-00036

SIP-0015

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

聚变增殖堆中子学设计



中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

**CNIC-00036**

**SIP-0015**

# **聚变增殖堆中子学设计**

**游承伦 谢中友**

**(西南物理研究所, 四川)**

**中国核情报中心**

**北京·1987**

## 摘 要

为了在满足增殖堆自身氙需要的前提下,提高堆性能参数——支持比,本文利用一维ANISN输运程序,对直接浓缩抑制裂变包层的中子学性能作了优化计算,研究了 $^6\text{Li}$ 丰度和U-233浓度及其分布对包层中子学性能的影响,提出了改进包层设计的几种措施,得到了满意的结果。在堆运行周期内,平均产氙率 $T$ 可达到1.11,支持比明显提高,达到14,包层中功率密度分布均匀,使堆的安全、冷却问题容易解决,给堆的结构设计带来方便。

**关键词** 裂变燃料增殖率 产氙率 能量增益 支持比

# NEUTRONICS DESIGN FOR A FUSION BREEDER

You Chenglun. Xie Zhongyou

( South western Institute of Physics, Sichuan )

## ABSTRACT

As a fusion breeder, one of the most important figure is support ratio which reflects the economic and fuel production performance of the system to a great extent. In this paper, the support ratio is calculated by using one dimension transport program ANISN and optimized by adjusting  $^6\text{Li}$  enrichment and blanket arrangement. The radial distribution of produced U-233 is also taken into account. Measures are taken for better blanket design and satisfactory results are obtained. Tritium breeding ratio  $T$  reaches 1.11 and the support ratio is enhanced from 11 to 14. The engineering, safety and environment performance are improved.

## 一、包层结构

在包层材料的选择中：考虑了堆运行温度下材料的强度、耐腐蚀、抗辐照性能以及材料之间的相容性，液态金属锂作为增殖剂和冷却剂，容易与Be-Th小球比重相匹配，并且与Th相容性比铀合金Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>好，但从安全性考虑，它比Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>差。我们对两种材料的包层都进行了研究，图一是包层结构示意图，以及各区材料的体积比。

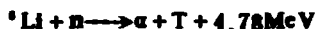
R (cm)		厚度 (cm)
0.0		
45.0	等离子体	45
60.0	真空	15
60.4	第一壁	
	HT-9 (316SS)	0.4
	Li <sub>17</sub> Pb <sub>83</sub> (LLi) 97.5%	
65.0	HT-9 (316SS) 2.5%	4.6
65.6	HT-9 (316SS)	0.6
	Li <sub>17</sub> Pb <sub>83</sub> (LLi) 40%	
75.6	HT-9 (316SS) 2%	10
85.6	Be Th(U) } 58%	10
88.8	HT-9 (316SS)	1.2
	Li <sub>17</sub> Pb <sub>83</sub> (LLi) 40%	
96.8	HT-9 (316SS) 2%	10
106.8	Be Th(U) } 58%	10
116.8	反射层	10
126.8	HT-9 (316SS)	10

图一 包层结构示意图

Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> (或液态金属锂) 既是增殖剂又是冷却剂, HT-9 (或316SS) 是结构材料, Be是中子增殖剂, Th是裂变燃料U-233的增殖材料。

## 二、 ${}^6\text{Li}$ 在Li中的最佳丰度

无论用 $\text{Li}_1, \text{Pb}_3$ , 还是液态金属锂作为包层的氦增殖剂, 均通过下列反应生产氦:



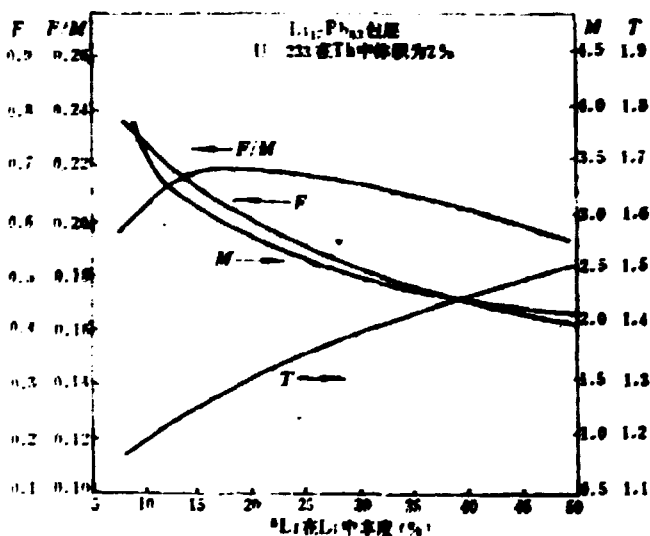
对于一个以生产核燃料为主要目的的聚变增殖堆来说, 最重要的品质因数是支持比, 即增殖堆生产的裂变燃料能够供应同等功率裂变堆的数目, 计算公式可写为<sup>[1]</sup>:

$$N = 33.7 \cdot \frac{F}{M} \cdot f(M) \quad \text{对U-235压水堆}$$

$$N = 54.0 \cdot \frac{F}{M} \cdot f(M) \quad \text{对U-233压水堆}$$

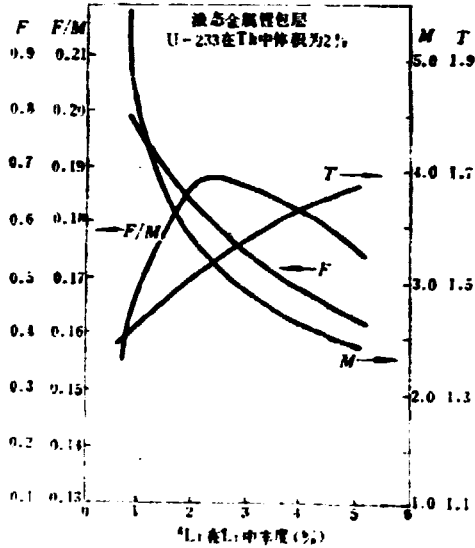
这里  $f(M) = \frac{14.1 \cdot M}{14.1 \cdot M + 3.5}$ , 它的值近似为1, 因此支持比 $N$ 近似与 $\frac{F}{M}$ 成正比例,

支持比的大小反映了增殖堆经济性能的好坏。 ${}^6\text{Li}$ 丰度对增殖堆中子学性能影响很大, 因此我们对两种包层的 ${}^6\text{Li}$ 丰度进行了优化。 ${}^6\text{Li}$ 在不同丰度时, 表征中子学性能的几个参数的变化情况表示在图二、三中。



图二  $\text{Li}_1, \text{Pb}_3$  包层中 ${}^6\text{Li}$ 丰度与 $F, T, M, \frac{F}{M}$ 的关系

从图看到两种包层的曲线变化趋势相同,在 $Li_{17}Pb_{83}$ 包层中, ${}^6Li$ 丰度是15%时,  $\frac{F}{M}$ 有最大值,这时  $\frac{F}{M}=0.22$ ,  $T=1.27$ ,  $M=3.0$ ,  $F=0.65$ ,  $N=10$ 。对液态金属锂包层,  ${}^6Li$ 丰度是2%时,  $\frac{F}{M}$ 有最大值,  $\frac{F}{M}=0.19$ ,  $T=1.53$ ,  $M=3.31$ ,  $F=0.61$ ,  $N=9$ 。



图三 液态金属锂包层中 ${}^6Li$ 丰度与  $F, T, M, \frac{F}{M}$  的关系

### 三、U-233浓度对中性学性能的影响

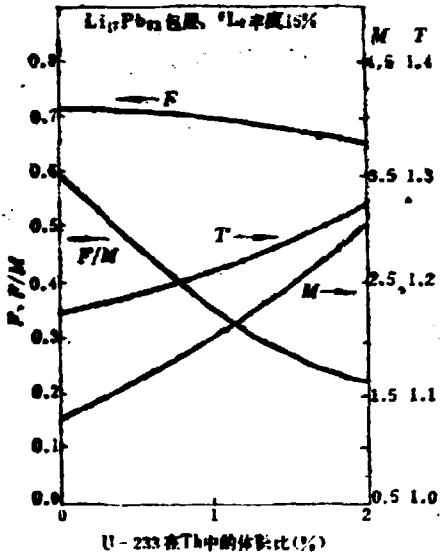
增殖堆起动后,随着堆运行时间增长, Th中U-233浓度增高,包层中子学性能发生变化,图四、五是两种包层 ${}^6Li$ 丰度分别在15%和2%时U-233在Th中的体积比与中性学性能的关系。

从图看到 $F, T, M$ 、曲线近似是直线,因此我们的设计不仅适于分析直接浓缩抑制裂变包层中子学性能,也可以通过曲线分析抑制裂变包层的中子学性能。随着U-233浓度提高,支持比和裂变燃料增殖率都下降,产氚率增大。

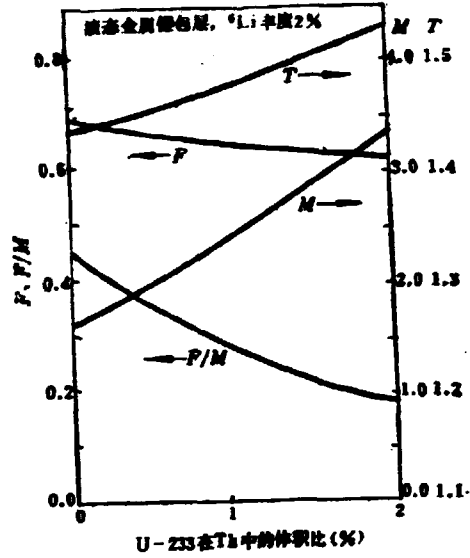
### 四、U-233在包层中的非均匀分布

实际上,在包层中生产的U-233并不是均匀分布的,为了分析方便,如图一所示,我们把裂变燃料增殖区分成五个小区,对 $Li_{17}Pb_{83}$ 包层的U-233非均匀分布效应作了研究。表一是U-233均匀分布和非均匀分布计算结果的比较, ${}^6Li$ 丰度是15%,U-233在Th中的体积比是2%。

考虑了U-233的非均匀分布后,  $M$ 值增大,  $F$ 值降低,增殖堆的支持比从10.8降到6.7。因为在一、二区U-233浓度远大于平均值,U-233裂变率也很高,使一、二区  $M$  值很大,功



图四 中子学性能参数与U-233浓度的关系



图五 中子学性能参数与U-233浓度的关系

表一 <sup>233</sup>U两种分布的结果比较

参 数	M (裂变燃料区)					M	T	F <sub>0</sub>	F <sub>0</sub> /M	N
	1	2	3	4	5					
U-233均匀分布	1.23	0.78	0.38	0.17	0.071	3.00	1.27	0.85	0.22	10.8
U-233非均匀分布	2.40	1.13	0.29	0.093	0.019	4.29	1.29	0.56	0.13	6.7

率密度分布也很不均匀，这给堆的排热带来困难。由此看到，在包层设计中有必要考虑U-233的分布。

## 五、包层设计的改进

为了使包层结构设计简单，使堆的支持比增大，包层中功率密度分布均匀，我们对Th在各区所占的体积比作了仔细研究。在前面计算的基础上改变Th在裂变燃料区总的体积比和在各小区的体积比，得到的结果表示在表二中。

从表中结果看到，当Th在五个小区的体积比都是3%，U-233在Th中的平均体积比是2%时，能量增益M值很大，支持比小。如果在一、二区降低Th的体积比，提高其余三区Th的体积比，Th在整个裂变燃料区的平均体积比仍保持3%，这时产氦率提高，M值降低，支持比增大。从表中也可以看到继续增加Th的体积比（Be的体积比作相应减小，一、二区Th的体积比保持2.5%），虽然产氦率稍有下降，但仍大于1，支持比却明显增大。

从表中我们还可以看到另外一个重要的改变，即是在后几种方案中，U-233的裂变率和(n,γ)反应率都大大降低。例如在一、四方案中，虽然Th的(n,γ)反应率几乎相等，但是第四方案的U-233裂变率和(n,γ)反应率分别只有0.16和0.024（第一方案是0.24和0.034），使裂变燃料净增殖率增大，能量增益M值减小，支持比从11.49上升到14.75。



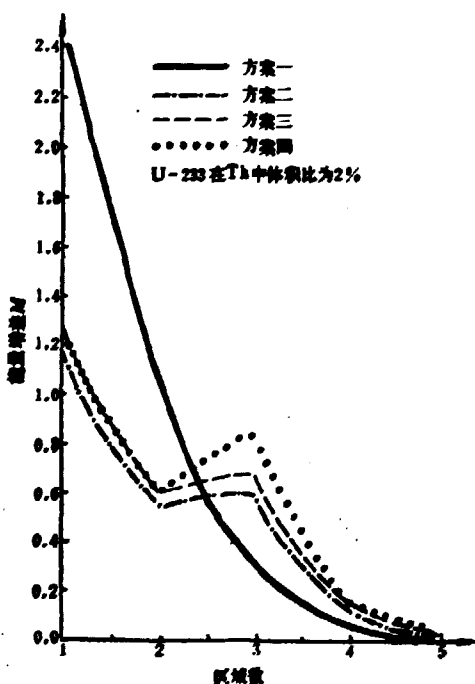
表二 Th 的不同体积比的结果比较

计算方案	1					2					3					4				
裂变燃料区	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Th 体积比 (%)	3					2 3.67					2.5 5					2.5 8.3				
Th 平均体积比 (%)	3					3					4					6				
U 在 Th 中体积比	0%	2%				0%	2%				0%	1%	2%			0%	1%	2%		
T	1.17	1.27				1.22	1.31				1.12	1.16	1.21			1.07	1.11	1.15		
F	0.72	0.83				0.55	0.63				0.66	0.71	0.76			0.71	0.77	0.84		
U(n, f)		0.24					0.13					0.072	0.15				0.079	0.16		
U(n, γ)		0.034					0.019					0.011	0.022				0.011	0.024		
F <sub>D</sub>	0.72	0.56				0.55	0.48				0.66	0.63	0.59			0.71	0.68	0.65		
M	1.18	4.29				1.21	2.90				1.18	2.12	3.16			1.17	2.19	3.31		
F <sub>D</sub> /M	0.61	0.13				0.46	0.17				0.56	0.30	0.19			0.61	0.31	0.20		
N	27	6.7				20	8.2				25	14	9			27	15	10		
F*	0.635					0.515					0.625					0.68				
M*	2.735					2.055					2.170					2.240				
N*	11.49					12.07					13.95					14.75				

\* 堆运行周期内的平均值。

U-233 裂变率低，包层中放射性物质少，堆的安全问题容易解决。

图六是几种方案的能量增益分布图。从图看到后三个方案的 M 值没有第一方案变化剧烈，这说明包层中功率密度分布比第一方案均匀，给堆的排热、结构设计带来了方便。



图六 能量增益分布图

## 六、总 结

计算结果表明：如果设计的增殖堆主要目的是生产裂变燃料U-233，则采用Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>包层为好；如果除了生产U-233外，还希望能生产较多的氚，以采用液态金属锂包层为宜。

通过对<sup>6</sup>Li丰度的优化，得到了<sup>6</sup>Li丰度最佳值。计算结果指出，在包层设计中必须考虑U-233的非均匀分布效应，它对结果的影响是不能忽略的。

改变Th在裂变燃料区的体积比，得到了好的结果，增殖堆支持比大大提高，包层中功率密度分布比较均匀。计算中U-233在Th中的体积比为2%，相当于U-233在Th中浓度已达到3%。我们可以在此时对包层各区同时卸料，使运行操作简便。

如果增殖堆中子壁负载为3.3MW/m<sup>2</sup>，聚变功率为2000MW，堆运行因子是0.7，增殖堆每年可生产氚87公斤，生产U-233 4100公斤。

在本文的计算中黄锦华同志提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 黄锦华，磁镜混合堆（CHD）概念设计初步报告（第一章），（内部资料）。

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



China Nuclear Information Centre