

**CNIC-01636**  
**SWIP-0158**

球环形托卡马克堆嬗变中子学设计  
**NEUTRONICS DESIGN FOR A SPHERICAL  
TOKAMAK FUSION-TRANSMUTATION REACTOR**  
*(In Chinese)*

中国核情报中心  
China Nuclear Information Centre

CNIC-01636  
SWIP-0158

## 球形环托卡马克堆嬗变中子学设计

邓梅根 冯开明

(核工业西南物理研究院, 四川成都, 610041)

杨邦朝

(电子科技大学, 四川成都, 610054)

### 摘 要

基于对球形环托卡马克(ST)聚变堆的研究, 提出了 ST 聚变-嬗变堆的设计概念。运用一维输运燃料计算程序 BISON3.0 进行了优化设计, 确定了适合嬗变少量锕系核素 MA (Minor Actinides) 的 ST 堆芯等离子体参数、包层结构及合适的换料周期。在此基础上, 运用二维中子学程序 TWODANT 进行了二维中子输运计算。利用 TWODANT 给出的中子通量, 运用一维放射性计算程序 FDKR 进行了燃料计算, 并给出了有关的计算结果。

关键词: 球形环托卡马克堆 嬗变 中子学

# **Neutronics Design for a Spherical Tokamak Fusion-Transmutation Reactor**

*(In Chinese)*

DENG Meigen FENG Kaiming  
(Southwest Institute of Physics, Chengdu, 610041)  
YANG Bangchao  
(Electronics Science and Technology University, Chengdu, 610054)

## **ABSTRACT**

Based on studies of the spherical tokamak fusion reactors, a concept of fusion-transmutation reactor is put forward. By using the one-dimension transport and burn-up code BISON3.0 to process optimized design, a set of plasma parameters and blanket configuration suitable for the transmutation of MA (Minor Actinides) nuclear waste is selected. Based on the one-dimension calculation, two-dimension calculation has been carried out by using two-dimension neutronics code TWODANT. Combined with the neutron flux given by TWODANT calculation, burn-up calculation has been processed by using the one-dimension radioactivity calculation code FDKR and some useful and reasonable results are obtained.

**Key words:** Spherical Tokamak Reactor, Transmutation, Neutronics

## 引言

经过半个世纪各国科学家的共同努力，国际磁约束核聚变研究已经从科学实验阶段进入了发展经济实用的能源阶段。但“传统”的托卡马克有非稳态运行、聚变功率密度低、装置尺寸大、电成本高等致命缺点。因此，人们正努力寻求一种先进的托卡马克概念，期望最终建成结构简单、稳态运行，且在经济上有吸引力的聚变电站。

近年来，对球形环托卡马克 ST (Spherical Torus) 聚变途径的探索，引起了聚变界的广泛关注。一些研究机构提出了尽快建造 ST 聚变实验装置的建议，并对其未来的前景做了有价值的评估。ST 途径极具吸引力的关键物理特点是等离子体约束性能好、MHD 稳定和高比压值。由于尺寸小，功率低，扩大成较大规模的装置具有很强的经济性。根据 ST 的物理和结构特点，采用这种位形的聚变装置，既适合于以增殖核燃料为目标的聚变-裂变混合堆设计，也适合于以嬗变处置裂变核电站卸出的长寿命核废物为目标的聚变-嬗变堆设计，直至最终建造商用聚变堆电站。本文的目的在于验证 ST 嬗变堆在嬗变处置 MA 方面的物理可行性，并说明在 ST 嬗变计算中采用二维计算程序的必要性。

## 1 ST 一维中子输运和能耗计算

### 1.1 ST 嬗变堆参数选择和包层设计

目前世界上已提出的或建造的 ST 位形的托卡马克实验装置，其环径比一般都选择在 1.1~1.5 之间<sup>[1]</sup>。ST 嬗变堆芯参数选择和包层设计的基本目标是，装置结构尺寸和中子壁负载要尽可能小，相应的聚变功率和建造费用也较小。由于嬗变包层的能量增益较高，因此装置的总热功率输出比普通概念的托卡马克聚变堆要大得多。考虑到工程可行性和经济性的方面的因素，尽量降低中子壁负载是必要的。

从装置的上述用途出发，经反复计算比较后，所设计的 ST 嬗变堆的环径比选择为 1.47，聚变功率约为 30.5 MW。在参考国内外同行工作的基础上，通过反复计算比较，所选择 ST 嬗变堆有关计算参数如表 1 所示。在此基础上，进行了嬗变物理及工程可行性的设计研究。

参照表 1 的系统的有关参数，在满足系统嬗变性能和安全裕度的前提下，对相关参数进行了适当的优化和限制。其主要限制目标是：第一壁中子负载 $\leq 1 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$  (D-T 中子通量为  $4.43 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )；嬗变区的峰值功率密度 $< 200 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ ；有效中子倍增

表 1 ST 嬗变堆有关计算参数

参数	数值
聚变功率 $P_f/\text{MW}$	30.5
大半径 $R/\text{m}$	0.81
小半径 $a/\text{m}$	0.55
环径比	1.47
中子壁负载 $P_w/\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$	0.8
三角变形 $\delta$	0.61

因子  $k_{\text{eff}} < 0.9$ ，且氙增殖率  $T > 1$ 。

燃料包层是聚变驱动的嬗变堆最重要的组成部分，设计中嬗变包层内采用  $^{239}\text{Pu}$  作为中子增殖剂，这样可以在较低的中子壁负载下获得较高的中子通量。同时，有关研究表明，在混合堆快谱包层内用  $^{239}\text{Pu}$  作中子增殖剂对于嬗变高放废物中的少量锕系核素 ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ) 是很有效的<sup>[2]</sup>。

冷却剂的选择对于核废物的嬗变是非常重要的。第一壁 FW (first wall) 采用氦气作为冷却剂。这是因为混合堆系统内的中子壁负载比纯聚变堆低，这样第一壁和中心柱的热负载都比较低，用氦气作冷却剂即有可能去除第一壁的热沉积。之所以不采用液态金属作第一壁的冷却剂，是基于安全的角度，因为液态金属有可能泄漏到等离子体区域。

嬗变包层采用氟锂铍熔盐作冷却剂，同时作为氙增殖剂。少量锕系核素 MA 被溶于氟锂铍熔盐中。为了保持良好的相容性，MA 的浓度应严格限制，根据文献[4]的经验一般不高于 1%。为了提高包层的嬗变率，在第九区设计了一个主氙增殖区，采用固态氙增殖剂，厚度为 15 cm，冷却剂为氦气。为了简化计算，屏蔽区采用铁素体钢、碳化硼和水组成的三元混合材料，厚度为 40 cm。

### 1.2 一维计算模型

从装置的用途出发，参照前面给出的嬗变堆基本参数，根据一维中子运输和燃耗计算程序 BISON3.0 的要求，经过反复计算和比较得出了表 2 所示的一维运输和燃耗计算模型。

表 2 ST 嬗变堆一维计算模型

区号	半径/cm	宽度/cm	区域	材料与成分
1	0.0~20.0	20.0	中心柱	70%AL/30%H <sub>2</sub> O
2	20.0~20.5	0.5	第一壁	90%FS/10%He
3	20.5~26.5	6.0	空隙	空隙
4	26.5~136.5	110.0	等离子体	等离子体
5	136.5~142.5	6.0	空隙	空隙
6	142.5~143.5	1.0	第一壁	90%FS/10%He
7	143.5~183.5	40.0	嬗变区	Actinides/Molten salt
8	183.5~191.5	8.0	第二壁	90%FS/10%He
9	191.5~206.5	15.0	氙增殖区	Mixture
10	206.5~226.5	20.0	反射层	90%FS/10%He
11	226.5~266.5	40.0	屏蔽层	30%FS/30%B <sub>4</sub> C/40%H <sub>2</sub> O

### 1.3 一维计算程序和数据库

一维运输和燃耗计算采用 BISON3.0<sup>[3]</sup>程序来完成，核数据处理和嬗变计算的流程如图 1 所示。

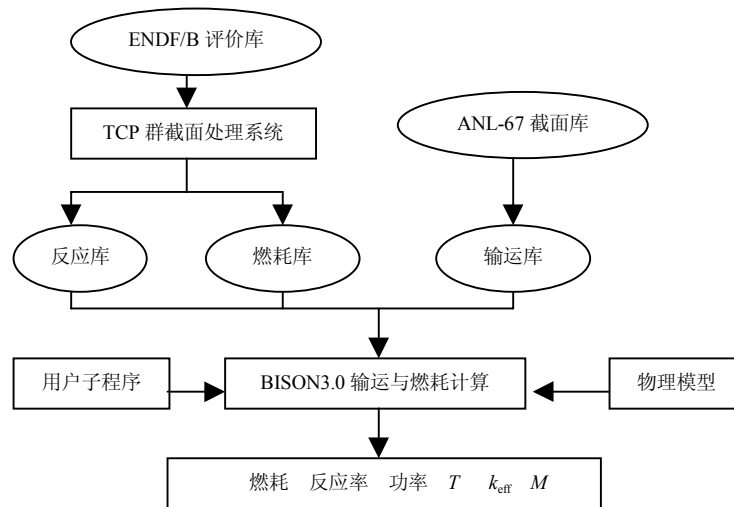


图 1 BISON3.0 计算流程图

一维运输燃耗耦合程序 BISON1.5<sup>[5]</sup>是为混合堆中子运输和燃耗计算而研制的，它的中子运输计算是以一维  $S_N$  程序 ANISN 为基础，计算出通量后，再用 Bateman 方法求解核素的产生与贫化方程。为满足嬗变堆包层的中子学计算，对原程序作了适当改进，并更换了原程序的运输截面和反应截面数据库，建立了 MA 中钢系核素燃烧链，补充了相应的燃耗数据，研制成功新的燃耗库。改进后的程序为 BISON3.0。

在 BISON3.0 程序中，中子运输库和反应截面库能群已由 42 群改为 46 群，新的运输截面库数据主要来自美国 ANL-67 库和 ENDF/B-6 库数据经处理后获得。新的 46 群燃耗及反应函数库的数据来自评价核数据库 ENDF/B-5 的钢系核素专用数据库，经由美国利弗莫尔劳伦斯实验室 (LLNL) 的 Cullen 研制的 TCP 群截面处理系统<sup>[6]</sup>完成。

#### 1.4 一维稳态中子学计算

本文的中子学计算结果是按包层覆盖率为 100%给出的。表 3 给出了应用一维中子学程序 BISON3.0 计算得到的包层能量沉积分布。可以看出，主要的能量沉积来自嬗变区，即沉积的能量主要是 MA 核素吸收中子后发生核反应释放的能量。

表 3 能量沉积的一维计算结果 MeV/聚变中子

区号	区域	n	$\gamma$	n+ $\gamma$
1	中心柱	0.46	0.97	1.43
2	第一壁	0.14	0.32	0.46
3	空隙	-	-	-
4	等离子体	-	-	-
5	空隙	-	-	-
6	第一壁	0.80	4.44	5.24

续表 3

区号	区域	n	$\gamma$	n+ $\gamma$
7	嬗变区	769.3	64.1	833.39
8	第二壁	0.21	4.58	4.79
9	氚增殖区	5.30	0.57	5.87
10	反射层	0.005	0.08	0.085
11	屏蔽层	1.92	0.56	2.48
总计		778.15	75.57	853.72

在稳态运行时，系统的能量增益为 60.5，氚增殖率为 1.19，满足大于 1 的设计要求。氚增殖率的贡献主要来自氚增殖区中  ${}^6\text{Li}$  的  $(n, \alpha, t)$  反应，为总氚增殖率的 90.1%。表 4 给出了系统中子学参数的主要结果。

表 4 系统中子学参数的主要结果

参数	内侧包层	外侧包层
能量增益 $M$	0.1	60.4
氚增殖率 $T$	-	1.19
功率密度/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$	3.29	173
有效中子增益 $k_{\text{eff}}$	-	0.89

表 5 给出了主要核素的反应率。可以看出，系统中核素的总吸收反应率和总裂变率比较接近，分别为 4.85 和 4.37。对吸收反应和裂变反应的主要贡献核素是  ${}^{239}\text{Pu}$ ，约占系统中反应率的 50%。 ${}^{239}\text{Pu}$  的主要作用是通过裂变反应增殖中子，提高系统的中子通量和增殖率。在嬗变区，峰值功率密度为  $173 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，排热应不成问题。

表 5 核素反应率

截面	${}^{237}\text{Np}$	${}^{238}\text{Pu}$	${}^{239}\text{Pu}$	${}^{240}\text{Pu}$	${}^{241}\text{Pu}$	${}^{242}\text{Pu}$	${}^{241}\text{Am}$	${}^{243}\text{Am}$	${}^{244}\text{Cm}$	总计
n, f	2.1-2 <sup>1)</sup>	3.8-1	2.94	1.1-1	8.3-1	2.0-2	6.7-2	1.3-3	2.3-2	4.37
n, $\gamma$	3.8-1	4.7-1	2.03	1.05	1.9-1	1.2-1	4.8-1	6.2-2	6.6-2	4.85

1) 2.1-2 表示  $2.1 \times 10^{-2}$ 。

### 1.5 一维嬗变燃耗计算

表 6 和图 2 给出了系统的能量增益因子  $M$ ，氚增殖率  $T$  和有效中子倍增因子  $k_{\text{eff}}$  随运行时间的变化。根据计算的结果选择系统的加料周期为 30 天，即以 30 天为周期动态地向系统添加 MA 靶核和氚增殖剂。这样，既能实现氚自持，又能保持较高的增殖效率。同时，按照这种设计，系统的能量倍增因子在嬗变周期内始终保持在较高的值，使系统

具有良好的经济性。

表 6  $M$ ,  $T$  和  $k_{\text{eff}}$  随运行时间的变化

时间/月	0	1	2	3	4	5
$M$	60.5	51.3	45.4	41.1	37.7	35.1
$T$	1.19	1.03	0.91	0.83	0.77	0.72
$k_{\text{eff}}$	0.89	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83

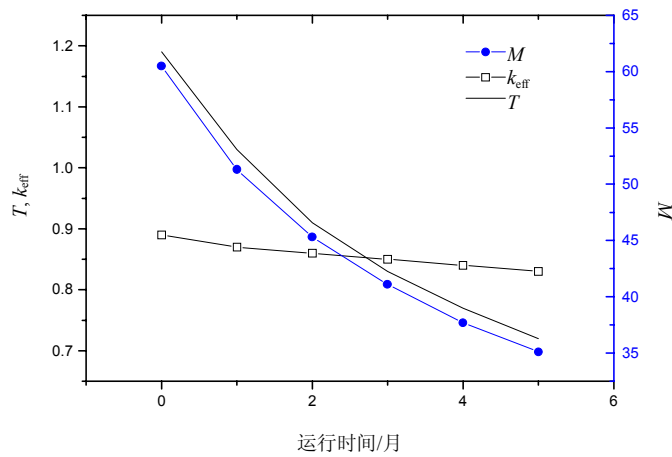


图 2  $M$ ,  $T$  和  $k_{\text{eff}}$  随时间的变化

燃耗计算结果表明，在 MA 嬗变区，核素  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  具有较高的嬗变率。而  $^{240}\text{Pu}$  和  $^{242}\text{Pu}$  是增加的，这主要来自于  $^{239}\text{Pu}$  的  $(n,\gamma)$  反应的贡献。计算表明，系统对核素  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  的年嬗变率分别为 24.9%，24.5% 和 20.2%，表 7 和图 3 为核素密度随运行时间的变化。

表 7 核素密度随运行时间的变化

时间/月	0	1	2	3	4	年嬗变率
$^{239}\text{Pu}$	3.863	3.761	3.675	3.600	3.533	24.5%
$^{241}\text{Am}$	3.811	3.732	3.629	3.561	3.501	20.2%
$^{242}\text{Pu}$	3.573	3.584	3.593	3.601	3.608	-3.5%
$^{237}\text{Np}$	3.335	3.245	3.169	3.103	3.043	24.9%
$^{240}\text{Pu}$	1.776	1.787	1.811	1.825	1.863	-6.9%
$^{244}\text{Cm}$	1.337	1.327	1.319	1.311	1.303	8.3%
F.P. <sup>1)</sup>	-	1.001	1.851	2.602	3.281	-

注：1) F.P.表示裂变产物



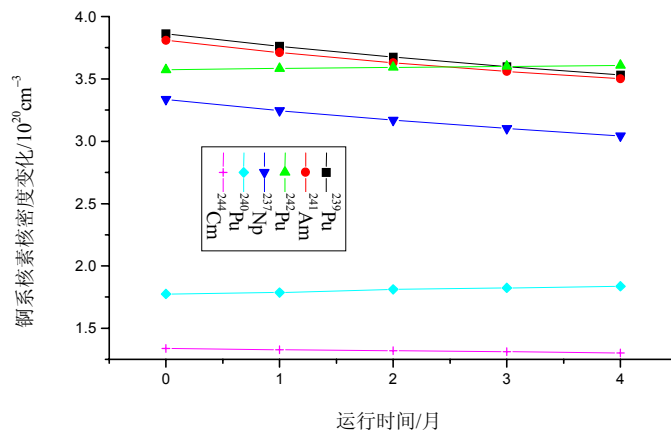


图3 核密度随运行时间的变化

## 2 ST 二维中子输运和燃耗计算

### 2.1 ST 二维中子输运计算

#### 2.1.1 二维计算模型

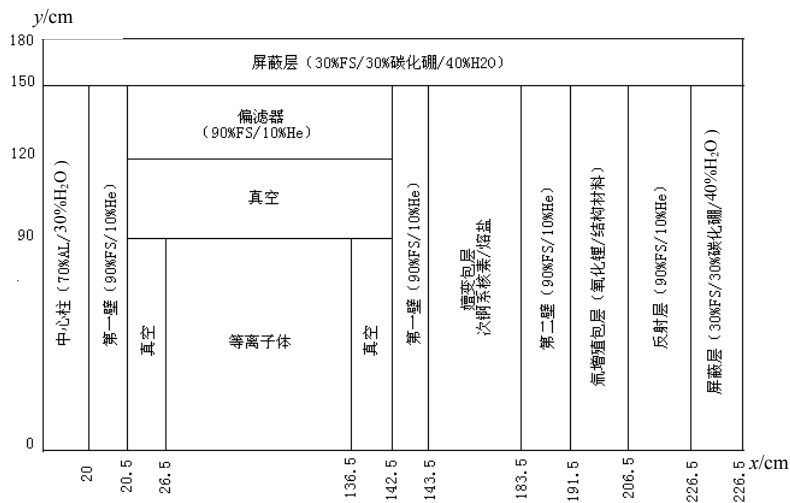


图4 二维嬗变计算模型图

比照表 2 的一维计算模型，参考国外有关文献资料，经过反复计算和优化得到图 4 所示的二维计算模型。二维计算模型在  $x$  方向的结构分布一维模型完全一致，只是从  $y$  方向进一步详细地描述 ST 的真实几何。

#### 2.1.2 TWODANT 程序和数据库

二维中子输运计算采用 TWODANT 程序来完成。TWODANT 由模块式的计算机程序组成，它是为求解二维、稳态、多群离散坐标形式的玻尔兹曼输运方程而设计的计

计算机程序。核数据处理和输运计算程序流程如图 5 所示。

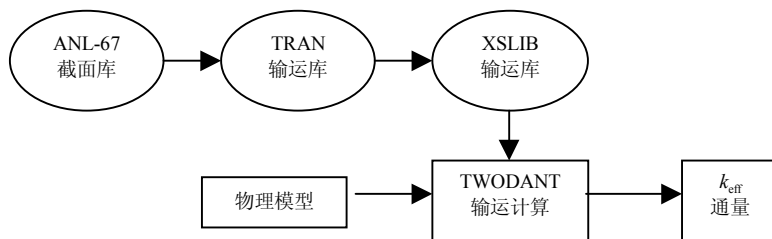


图 5 二维输运计算流程图

### 2.1.3 二维中子输运计算

与 BISON3.0 程序有所不同，TOWDANT 程序只能计算稳态情况下的有效中子倍增因子  $k_{\text{eff}}$  和中子通量  $\Phi$ ，并且  $k_{\text{eff}}$  和  $\Phi$  的计算要分开进行。计算得到稳态时系统的  $k_{\text{eff}}$  为 0.84，而一维情况下  $k_{\text{eff}}$  的计算结果为 0.89，应该说二者的差别比较明显。

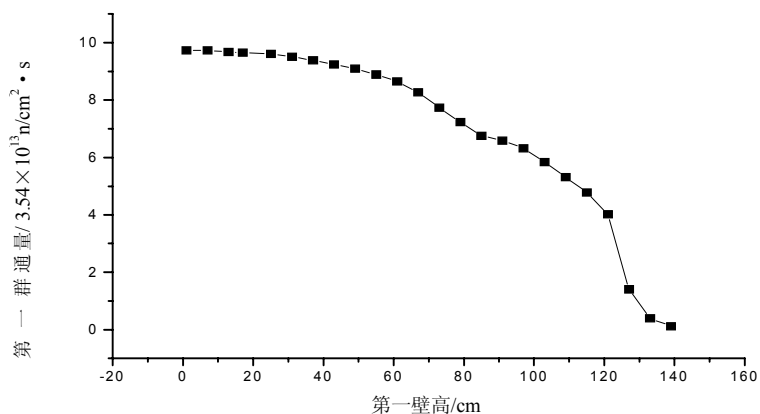


图 6 中子通量随第一壁高度的变化

表 8 中子通量随第一壁高度和嬗变包层厚度的变化

第一壁高度/cm	中子通量 $3.54 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	嬗变包层厚度/cm	中子通量 $3.54 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
1	9.732	1	9.732
7	9.730	2	7.591
13	9.671	3	6.123
19	9.654	4	5.055
25	9.606	5	4.237
31	9.503	6	3.59
37	9.384	7	3.064

续表 8

第一壁 高度/cm	中子通量 $3.54 \times 10^{13}/n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	嬗变包层 厚度/cm	中子通量 $3.54 \times 10^{13}/n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
43	9.241	8	2.626
49	9.096	10	1.948
55	8.888	12	1.457
61	8.649	14	1.096
67	8.268	16	0.829
73	7.735	18	0.630
79	7.228	20	0.480
85	6.759	22	0.367
91	6.589	24	0.282
97	6.325	26	0.217
103	5.842	28	0.168
109	5.317	30	0.13
115	4.779	32	0.1
121	4.021	34	0.078
127	1.410	36	0.061
133	0.40	38	0.048
139	0.12	40	0.039

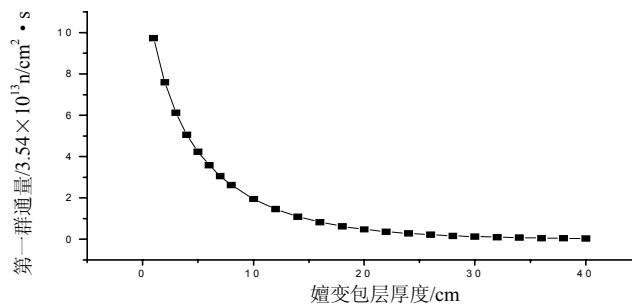


图 7 中子通量随嬗变包层厚度的变化

TWODANT 中子通量的计算结果给出二维空间每个细网格上的按能群分布的中子通量。表 8 为第一群(中子源)中子通量随第一壁高度和嬗变包层厚度的变化。图 6 和图 7 分别为相应的变化曲线。计算表明中子通量随第一壁高度的增加而减小,且中子通量也随嬗变包层厚度的增加而减小。

## 2.2 ST 嬗变包层燃耗计算

### 2.2.1 计算模型

TWODANT 计算虽给出了呈二维分布的中子通量,但目前尚没有适用于聚变-嬗变堆的二维燃耗计算程序,所以只能用一维燃耗计算程序对模型分块计算。图 8 (a) 为嬗变

包层在高度方向的分块模型图，图 8 (b) 是对具体的某块在厚度方向的分区图。

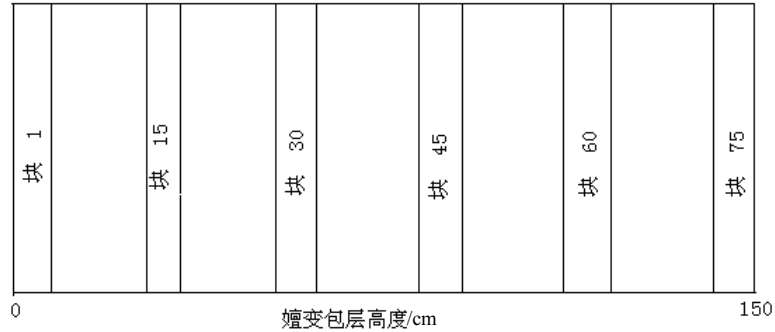


图 8(a) 嬗变包层在高度方向的分块模型图

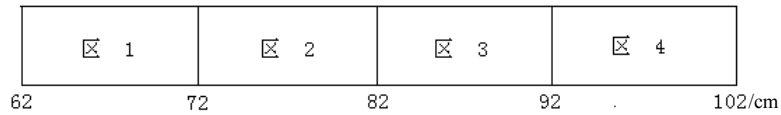


图 8(b) 嬗变包层在厚度方向的分区模型图

### 2.2.2 FDKR 程序和数据库

DKR 程序是美国威斯康星大学研制用于纯聚变堆放射性计算的程序，它不能计算裂变材料，配套的数据库也不含裂变材料数据和截面。FDKR<sup>[8]</sup>程序是在 DKR 程序的基础上研制成的，适合于混合堆放射性计算，同时也适用于纯聚变堆和裂变堆的放射性衰变功率，BHP 的计算等。

锕系核素、裂变产物衰变链数据库 AF-DCDLIB (Actinide Fission Product- Decay Chain Data Library, 简称 AF 库) 是为放射性计算程序 FDKR 建立的配套数据库。AF 库目前包含了 581 个核素的有关截面和数据，可以满足混合堆、裂变堆的放射性、衰变剩余发热、BHP 和剂量率计算的需要。AF 库的有关数据分别来自国内外不同的文献资料，其中子截面采用 ENDF/B-V 数据库，由美国 LLNL 发展的 TCP 处理系统完成，中子能群为 46 群。

在 TWODANT 输运计算已给出中子通量的情况下，嬗变包层燃耗计算由 FDKR 程序来完成，核数据处理和嬗变计算流程如图 9 所示。

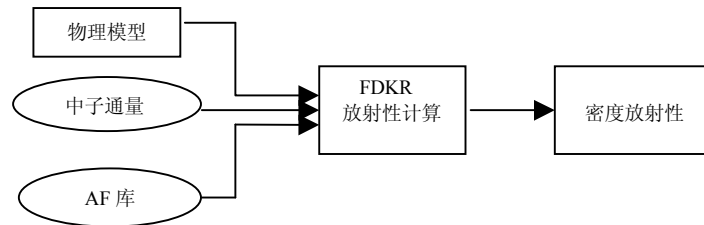


图 9 FDKR 核数据处理和计算流程图

### 2.2.3 FDKR 嬗变燃耗计算

如图 7 所示，进行燃耗计算时，在高度方向将嬗变包层平均划分为 75 块，从中取出图示的 6 块来进行计算，这样可以考察嬗变率随嬗变包层高度的变化；同时，对于具体的某块，在厚度方向将其划分为 4 个区，这样可以考察嬗变率随嬗变包层厚度的变化。表 9 和图 10 为嬗变包层的第一块第一区内核素密度随运行时间的变化。

表 9 核素密度随运行时间的变化

$10^{20}\text{cm}^{-3}$

核素	0 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
$^{239}\text{Pu}$	3.863	3.779	3.698	3.618	3.540	3.464
$^{241}\text{Am}$	3.811	3.755	3.701	3.648	3.579	3.549
$^{242}\text{Pu}$	3.573	3.598	3.622	3.6446	3.669	3.691
$^{237}\text{Np}$	3.335	3.267	3.20	3.135	3.071	3.009
$^{240}\text{Pu}$	1.776	1.792	1.807	1.821	1.835	1.847
$^{242}\text{Am}$	0.050	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022
$^{244}\text{Cm}$	1.337	1.316	1.296	1.275	1.255	1.235

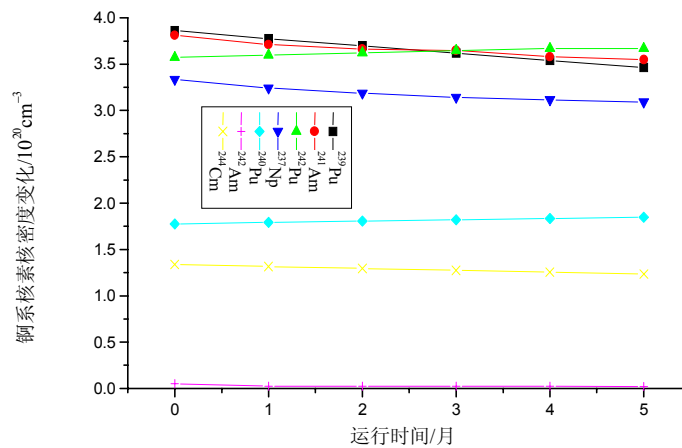


图 10 核密度随运行时间的变化

表 10 核素年嬗变率随包层厚度的变化

%

核素	区 1	区 2	区 3	区 4
$^{237}\text{Np}$	19.4	17.8	14.7	11.2
$^{239}\text{Pu}$	20.1	18.3	15	11.3
$^{241}\text{Am}$	14.5	12.9	9.4	5.4

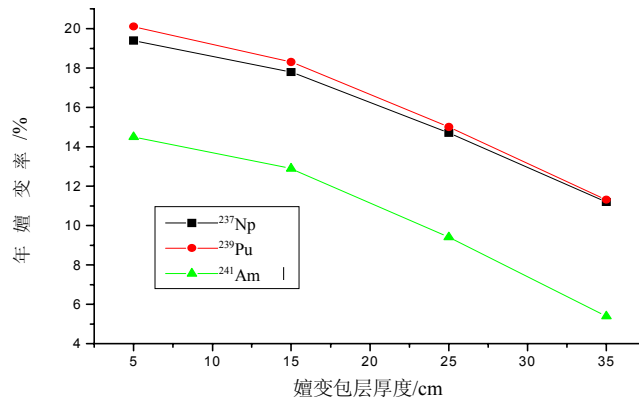


图 11 核素年嬗变率随嬗变包层厚度的变化

表 11 核素年嬗变率随嬗变包层高度的变化 %

核素	块 1	块 15	块 30	块 45	块 60
$^{237}\text{Np}$	18.2	18	17.8	16.5	13.1
$^{239}\text{Pu}$	18.8	18.5	18.3	17	13.4
$^{241}\text{Am}$	13.6	13.4	12.9	11.4	7.6

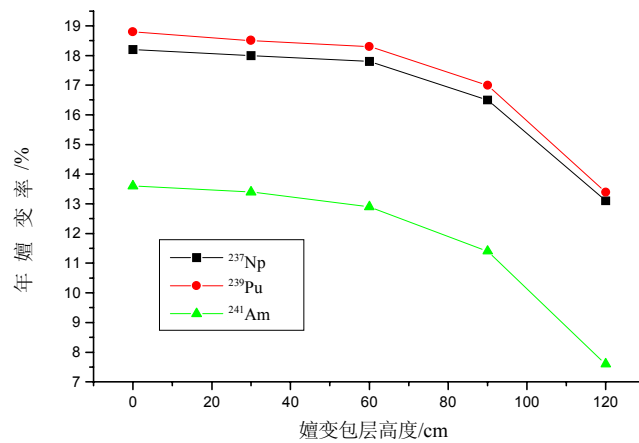


图 12 核素年嬗变率随嬗变包层高度的变化

表 10 和图 11 为嬗变包层第 30 块内核素的年嬗变率随嬗变包层厚度的变化；表 11 和图 12 为嬗变包层第 2 区内核素的年嬗变率随嬗变包层高度的变化。可以看出，核素的年嬗变率随着嬗变包层厚度的增加而减小；同时，核素的年嬗变率随着嬗变包层高度的增加而减小。

表 12 和图 13 为嬗变包层内  $^{237}\text{Np}$  的年嬗变率，它从整体上体现了核素的年嬗变率

随嬗变包层的厚度和高度的变化。

表 12 嬗变包层内  $^{237}\text{Np}$  的年嬗变率 %

位置	块 1	块 15	块 30	块 45	块 60
区 1	20	19.6	19.4	18.5	15.9
区 2	18.2	18	17.8	16.5	13.1
区 3	15.5	15.2	14.7	13.4	10
区 4	11.7	11.5	11.2	10	7.3

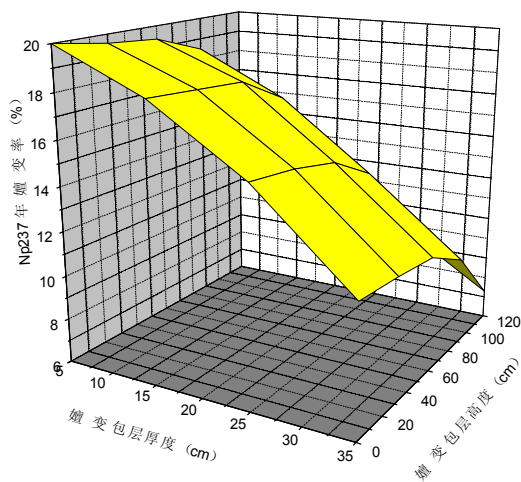


图 13 嬗变包层内  $^{237}\text{Np}$  的年嬗变率

燃耗计算的结果表明，系统对核素  $^{237}\text{Np}$ ， $^{239}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  的平均年嬗变率分别为 14.9%，15.3%和 9.6%。

### 3 结论

本文分别用一维和二维程序对 ST 嬗变包层进行了中子学和燃耗的初步计算。二维的燃耗计算结果表明，以 30 天为换料周期，系统对核素  $^{237}\text{Np}$ ， $^{239}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  的平均年嬗变率较高，分别为 14.9%，15.3%和 9.6%。系统中包层的峰值功率密度不高，热工安全裕度较大，且换料周期内系统能实现氙自持。这些结果表明，将 ST 概念应用于聚变—嬗变堆的设计，具有潜在的应用价值，可促进聚变能的发展。

同样以 30 天为换料周期，一维情况下得到系统对核素  $^{237}\text{Np}$ ， $^{239}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  的平均年嬗变率分别为 24.9%，24.5%和 20.2%。通过比较分析可发现二者的差别较大。这主要是因为本文采用的是球形环托卡马克，尺寸小。同时，计算使用的二维模型在结构上比

较特殊, 而一维计算程序不可能精确描述复杂的堆芯和包层几何。计算表明, 进行基于 ST 的嬗变计算时采用二维计算程序是很有必要的。

作者感谢黄锦华研究员、张国书副研究员和阳彦鑫副研究员等对本文给予的指导和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Peng Y-K M, Cheng E T. Magnetic Fusion Driven Transmutation of Nuclear Waste (FTW) [J]. J. Fusion Energy, 1993, 12(4): 381
- 2 杨永伟, 邱励俭. 高放废物中  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  在聚变-裂变混合堆内的嬗变研究. 高技术通讯, 1994, 4: 3~8  
Yang Yongwei, Qiu Lijian. Transmutation of High Level Waste of  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  and  $^{242}\text{Pu}$  in a Fusion-Fission Reactor. High-tech Communication, 1994, 4: 3~8
- 3 谢中友, 霍铁军, 冯开明. BISON3.0——维输运燃耗程序 NPSC-277[J].核电脑, 1991. 1~26  
XIE Zhongyou, HUO Tiejun, FENG Kaiming. BISON3.0—One-dimension Transport and Burn-up Code, NPSC-277[J]. Nuclear Computer, 1991, 1~26
- 4 Cheng E. T. A Libe Based Actinides Transmutation Blanket. Fusion Technology, 2001, 1: 530~534  
Bell M J. ORNL-4628[R]. Oak Ridge National Laboratory, 1973
- 5 Cullen D E. UCLA-5040 [R]. LLNL, Pro-processing Program of the ENDF/B Date Library. Part A-C, 1980  
Cullen D E. UCLA-5040[R]. LLNL, 1980
- 6 Furata K, Oak Y, Kondo S. CCC-464, RSIC Computer Code Collection [R]. Oak Ridge National Laboratory, 1987