

CNIC-01385
SIP-0116

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

FEB-E 三维中子学屏蔽分析和计算
THREE-DIMENSIONAL NEUTRONICS SHIELDING
ANALYSIS AND CALCULATION FOR FEB-E
(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01385, SIP-0116: FEB-E 三维中子学屏蔽分析和计算/张国书等著. —北京: 原子能出版社, 1999. 10

ISBN 7-5022-2061-5

I. 中... II. 张... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 29768 号

原子能出版社出版 发行

责任编辑: 武 洁

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 mm 1/16 印张 1/2 字数 17 千字

1999年 12 月北京第一版 1999年 12 月北京第一次印刷

印数: 1—150

定价: 5.00 元



张国书：副研究员，1987年毕业于清华大学工程物理系反应堆专业，1993年获硕士学位。现在核工业西南物理研究员主要从事聚变-裂变混合堆中子学和数据库等方面的工作。

ZHANG Guoshu: Assistant professor, graduated from Department of Engineering Physics, Tsinghua University in 1987 and received Master Degree in 1993.

CNIC-01385

SIP-0116

FEB-E 三维中子学屏蔽分析和计算

张国书 黄锦华 邓培智 王 军

(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

摘 要

借助蒙特卡罗程序 MCNP 对 FEB-E 屏蔽问题进行了分析研究。基于 143 MW 聚变功率和非均匀中子源抽样, 首先计算得到平均中子壁负载 0.481 MW/m^2 , 内侧最大中子壁负载 0.864 MW/m^2 , 外侧最大中子壁负载 0.861 MW/m^2 。根据对沿环向场线圈方向的内侧区域和偏滤器通道区域的中子学分析和计算, 得到了可行的屏蔽层设计。由于空间的严格限制, 在内侧屏蔽设计中总共使用了 17 cm 厚的金属钨。为了更有效防止偏滤器道道区域飞行中子的辐照损伤, 在该区域的环向场线圈侧壁额外增加 25 cm 的屏蔽层。FEB-E 设计的环向场线圈的总核热约 4.2 kW, 小于 55 kW 的限制条件。

Three-dimensional Neutronics Shielding Analysis and Calculation for FEB-E

(In Chinese)

ZHANG Guoshu HUANG Jinhua DENG Peizhi WANG Jun
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

Three-dimensional shielding analysis has been performed for the FEB-E design by using the Monte Carlo code MCNP. Based on 143 MW fusion power and non-uniform source neutron sampling of the FEB-E, the average neutron wall loading is 0.481 MW/m^2 , and the peak outboard and inboard wall loading are 0.861 and 0.864 MW/m^2 , respectively. According to neutronics shielding analysis and calculation for the inboard and divertor duct regions along the toroidal field (TF) coils, adequate shielding designs have been obtained. Tungsten 17 cm thick in total is used in the inboard shield because of serious constraint of the space. In order to provide adequate protection against serious streaming neutron radiation in the divertor duct regions, total additional shield of 25 cm thick is used in the side of TF coils. The value of total heating in the TF coils is about 4.20 kW for the FEB-E design less than the requirement of 55kW.

引言

FEB-E 是聚变实验增殖堆 FEB (Fusion Experimental Breeder) 的工程设计^[1]。FEB 是中国 863 高科技发展项目中的混合堆专题里的子课题。FEB 的主要目标是对未来托卡马克商用混合堆: 演示工程特性和裂变燃料和氦的增殖性能; 试验关键部件和聚变结构材料。如图 1 为 FEB-E 设计的三维示意总图。根据 FEB-E 设计报告, 该堆主要设计参数为: 143 MW 聚变功率、单零偏滤器、托卡马克磁约束位形(环径比 $A = R/a = 400\text{cm}/100\text{cm}$)、低聚变功率增益、自举电流份额 28%, 等离子体电流 5.7 MA, 铀-钚(U-Pu)裂变燃料循环包层, 16 个 TFC 线圈, 结构材料为 316SS, 冷却剂为氦气, 氦增殖剂为 LiI, 裂变燃料增殖剂为金属铀。Fe, W 和 B_4C 为屏蔽材料。FEB-E 与 FEB 的最主要改进主要基于中子学屏蔽角度考虑, 如偏滤器及其抽气通道区域的几何结构和材料等不同, FEB-E 采用的是盒式喷气靶偏滤器, 而原来的 FEB 采用的是开式斜置平板偏滤器, 可见前者比后者屏蔽效果好。FEB-E 与 FEB 在内侧区域的几何结构和材料等基本没有变化。

TFC 磁体的中子学屏蔽设计是 FEB-E 设计中的关键问题之一。TFC 位于真空室及屏蔽层外侧, 是 FEB-E 关键部件之一, 其造价约占整个堆的 40%。TFC 由超导(Nb_3Sn)、绝缘体(聚酰亚胺)、稳定剂(Cu)和结构(316SS)等材料组成。由于 TFC 的超导、绝热和绝缘等材料易受来自堆芯聚变中子的辐照损伤, 从而会严重影响混合堆的经济、稳定及安全运行。因此在等离子体堆芯与 TFC 之间增加一个屏蔽层以保护 TFC 磁体是十分重要的。

防止因中子辐照而引起的 TFC 磁体失超是 FEB-E 中子学屏蔽设计的最重要的目标和任务。为了防止 FEB-E 混合堆 TFC 超导磁体发生失超事故, 设计时需要 TFC 绕组上产生的中子辐射损伤、铜的原子位移和核热沉积等进行严格限制。经国内外多年分析研究表明: 应着重从以下四个方面进行考察: (1) 防止超导材料本身被中子直接辐射损伤; (2) 防止因稳定材料铜被辐射损伤而导致的失超事故; (3) 防止因绝缘材料被击穿而导致的失超事故; (4) 防止因核热沉积过多导致的排热耗电量大, 进而可能引起的失超事故。

基于以前的 FEB 混合堆中子学屏蔽工作基础和参考国外的相关工作^[2], 特别是近年 ITER 设计的相关工作等经验^[3], 认定在托卡马克聚变堆的内侧等离子体中水平面区域和偏滤器通道区域是最易出现中子学屏蔽问题的两个最危险区域。这是因为, 一方面, 混合堆内侧等离子体中水平面是中子壁负载的峰值处, 而内侧空间又非常有限; 另一方面, 偏滤器处需要有一些大通道与外界连通, 而通道与 TFC 的侧壁之间的空间非常狭小, 通道内的大量穿透力很强的高能飞行中子对 TFC 侧超导材料构成了极大危险。

本文将在以前的 FEB 中子学屏蔽工作的基础上, 并结合 FEB-E 新的工程结构及材料设计结果, 应用三维蒙特卡罗中子-光子输运程序 MCNP/3B^[4], 着重对 FEB-E 的内侧等离子体中水平面区域和偏滤器通道区域的 TFC 中子学屏蔽问题进行分析与计算研究。另外, 本文还采用源中子的非均匀抽样, 用 MCNP 计算出第一壁中子负载的沿极向分布, 并以此计算出 TFC 的辐照损伤和核热沉积。最后, 经分析和计算, 得到一个合理可行的 FEB-E 中子屏蔽设计结果。

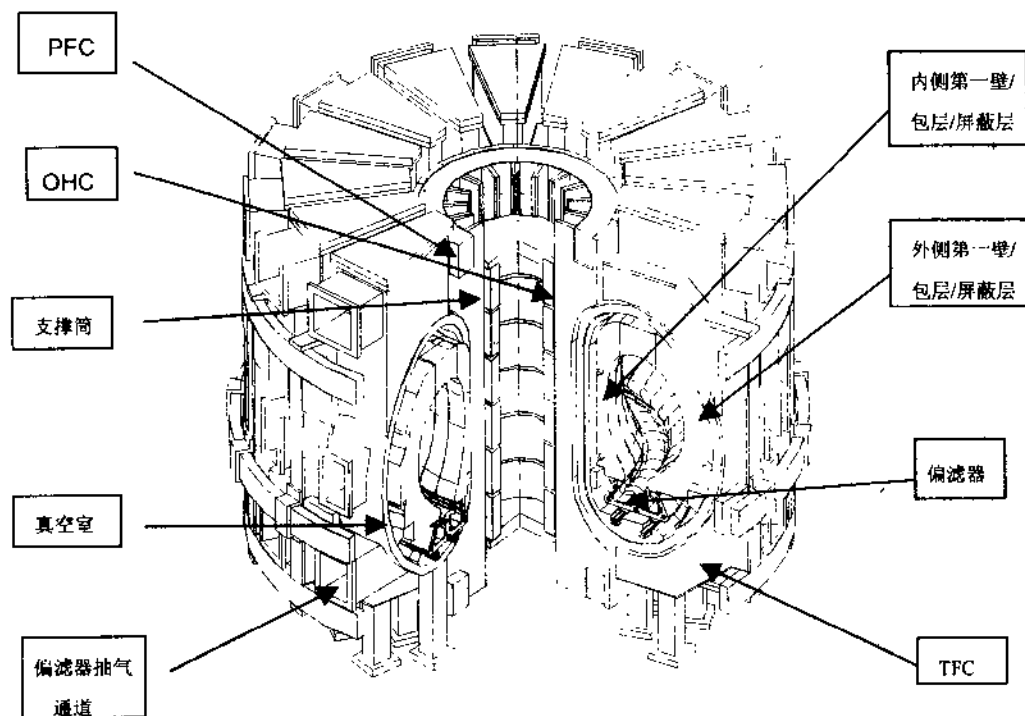


图1 FEB-E 设计的三维示意总图

1 非均匀源中子抽样

在三维蒙特卡罗中子-光子输运程序 MCNP 计算中, 需要用户首先提供用于源中子抽样计算的子程序。以下简述该抽样计算过程。

根据 FEB-E 设计, 中子密度沿环向均匀分布, 对于三维环形等离子体空间区域任意点 $P(x, y, z)$ 的中子密度沿极向分布假定由下述分布公式确定, 即

$$\begin{cases} x = [R + r \times \cos(t + \delta \times \sin t)] \times \cos \theta \\ y = [R + r \times \cos(t + \delta \times \sin t)] \times \sin \theta \\ z = k \times r \times \sin t \end{cases} \quad (1)$$

式中, R (cm) —— 托卡马克大半径;

k —— 等离子体拉长度;

δ —— 三角变形因子;

t —— 极向角度参数;

θ —— 环向角度;

r (cm) —— 等离子体中水平面上从等离子体磁轴中心到沿径向任意点的距离。

从式(1)可以看出, 当 θ 一定(即中子密度沿环向均匀分布), r 取一系列值时, 可得到一组等值曲线, 而每一条曲线上对应相等的中子密度。

假定 FEB-E 的等离子体 D 形截面沿径向的中子密度分布 $S(r)$ 由下式确定,

$$S(r) = [1 - (r/a)^2]^\alpha \quad r \in [0, a] \quad (2)$$

其中, $a(\text{cm})$ —— 小半径;

α —— 由等离子体聚变功率密度分布确定的分布指数。

当 $\alpha = 0$ 时, 源中子为均匀分布。抽样计算时, 首先从式(2)抽样计算出径向位置 r , 再将 r 代入式(1), 进一步抽样计算出 t 、 x 、 y 和 z , 从而给出了源中子出发时的位置和发射方向。

2 面临等离子体的中子壁负载极向分布

首先通过 MCNP 程序计算得到 FEB-E 面临等离子体中子壁(即第一壁)负载极向分布结果。如图 2 所示为本次计算采用的简化垂直几何截面, 图中仅显示了等离子体中水平面以下部分, 从 A 点出发, 第一壁沿极向反时针方向分为三大段, 即内侧段、偏滤器段和外侧段, 最后在 B 点终止。在计算中采用的主要输入参数为: $P_{\text{FUS}} = 143 \text{ MW}$, $R = 400 \text{ cm}$, $A = 4.0$, $k = 1.7$, $\delta = 0.4$ 及 $\alpha = 4.0$ 。等离子体磁轴的垂直和水平漂移输入值分别为 5 cm 和 -10 cm 。计算中还假定源粒子自产生后穿过等离子体空间直达第一壁, 透过第一壁的粒子被记录一次后立即被杀死。为了获得比较准确的面临等离子体的中子壁负载极向分布, 我们沿极向分割成 40 小段, 每段都设置一个粒子流记录器。在本次跟踪运行中, 所用源粒子数 50 万, 在第一壁的所有 40 个小断面上的统计记录结果的方差均小于 0.5%。

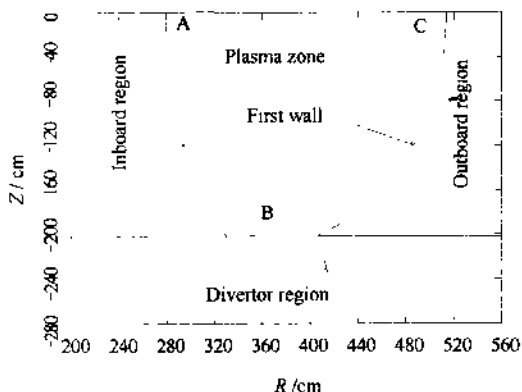


图 2 MCNP 计算采用的面临等离子体
简化垂直几何截面

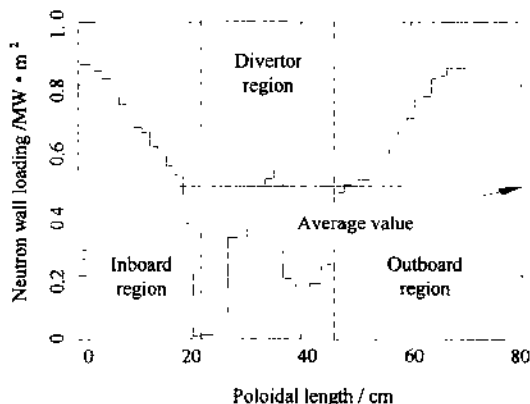


图 3 面临等离子体的中子壁负载
沿极向长度的变化情况

如图 3 所示为面临等离子体的中子壁负载沿极向长度的分布结果。图 3 中给出的结果与图 2 的几何模型相对应,即中子壁负载沿极向反时针方向考察其变化情况。从图 3 中可见, FEB-E 内侧段的中子第一壁负载峰值为 0.864 MW/m^2 , 外侧段的中子第一壁负载峰值为 0.861 MW/m^2 , 偏滤器段的中子第一壁负载峰值为 0.529 MW/m^2 。沿极向的平均中子第一壁负载为 0.481 MW/m^2 , 其中内侧段平均中子第一壁负载为 0.688 MW/m^2 , 外侧段平均中子第一壁负载为 0.573 MW/m^2 。可见, 中子壁负载峰值出现在最靠近等离子体磁轴的地方。

3 MCNP 屏蔽计算模型

根据以前的混合堆屏蔽中子学工作及国外同类工作中可知, 托卡马克聚变堆的内侧等离子体的水平面区域和偏滤器抽气通通区域被认为是最易出现中子学屏蔽问题的两个危险区域。考虑到本次 FEB-E 屏蔽中子学计算中偏滤器通道区域飞行中子的屏蔽问题是重点关注之一, 而该区域的几何及结构又十分复杂, 因此我们采用三维蒙特卡罗中子-光子输运程序 MCNP 作为计算工具。

基于 FEB-E 的 TFC 超导磁体的设计特点, 以及参考 ITER 设计的经验, 并通过分析与估算, 提出了适于 FEB-E 超导磁体的屏蔽设计要求的 5 个限制条件, 即, 运行 4.5 个满功率年(FPY, Full Power Year)后, 必须满足: (1) 16 个 TFC 磁体核热率 $< 55 \text{ kW}$; (2) 绕阻最大快中子($E_n > 0.1 \text{ MeV}$), 积分通量 $< 1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 \cdot 4.5 \text{ FPY}$; (3) 绕阻最大核热密度 $< 5.0 \text{ W/cm}^3$; (4) 绕阻最大有机绝缘材料的吸收剂量 $< 0.5 \times 10^8 \text{ Gy/4.5FPY}$; (5) Cu 的最大原子位移损伤 $< 5 \times 10^{-4} \text{ dpa/4.5FPY}$ 。

如图 4 为本次 MCNP 计算总流程框图。图中源中子抽样模块向用户子程序模块提供抽样计算过程的条件和公式, 用户子程序模块将计算得到的源中子出发时的位置和发射方向提供给 MCNP 程序, 根据 FEB-E 设计报告编制的 FEB-E 参数模块向 MCNP 提供输入参数, FSWIP/MC 为 MCNP 输入核截面数据库, 该库为基于 ENDF/B-IV 核数据评价库制作的适应 FEB-E 设计特征的中子和 γ 光子连续截面工作库。

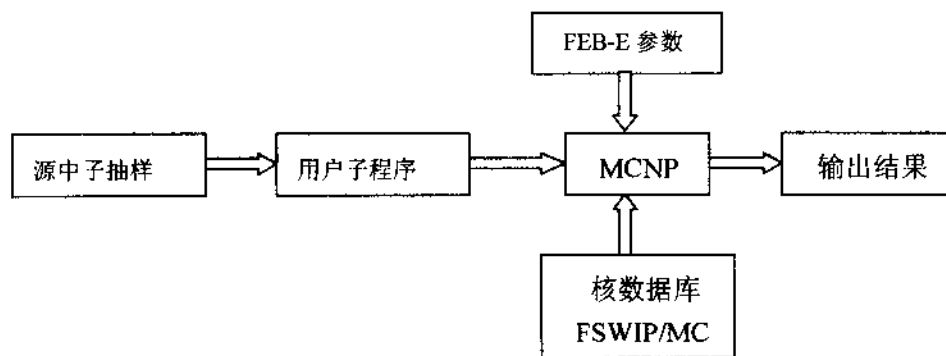


图 4 MCNP 中子学屏蔽计算总流程框图

表 1 FEB-E 内侧第一壁/包层/真空/屏蔽几何及材料组分

厚度, $\Delta R/cm$	材料组分及体积百分比			区域名
120.0	Void			等离子体
2.0	100%C			第一壁
1.2	53%316SS	47%He		
7.0	50%Be	50%LLi		
1.2	53%316SS	47%He		包层
5.0	100%LLi			
5.0	100%316SS			
6.6	10%316SS	90%He		
5.0	100%316SS			真空室
15.0	80%W	20%He		屏蔽层
2.0	100%316SS			
6.0	100%316SS			
3.0	80%W	20%He		
16.0	75%B ₄ C	5%316SS	20%He	
5.0	100%316SS			真空室
0.85	Void			绝热层
1.65	100%316SS			
1.5	5%Kapton	30%LN ₂	10%316SS	
1.65	100%316SS			
0.9	Void			
63.0	31.6%316SS	11.8%Cu		TF 线圈
	23.7%Nb ₃ Sn	21.1%LHe		
	11.8%Polyimide			

根据 FEB-E 设计及 MCNP 程序输入数据卡要求,在详细地分析和简化基础上我们对 FEB-E 的第一壁、包层、屏蔽、真空室、偏滤器和 TFC 磁体等部件的几何结构及材料进行了模拟。图 5 所示为 FEB-E 沿 TFC 磁体中心垂直平面剖面的 MCNP 计算模型图。模型总共由 59 个几何栅元组成。考虑到空间几何的对称性,该模型几何上仅为原 FEB-E 的 1/32,即,模型仅含半个 TFC 和半个偏滤器及其抽气通道,环向角仅为 11.25°。图 6 所示为在等离子体中水平面以下 261cm 处的水平剖面的 MCNP 计算模型图。该剖面正好处于偏滤器真空抽气通道的中水平面。偏滤器抽气通道的垂直高度和环向半宽度分别为 118 cm 和 38 cm。TFC 磁体侧壁额外增加一层 25 cm 厚的屏蔽层,其材料组分为 W, B₄C 和 316SS。表 1 和表 2 分别给出 FEB-E 内侧和外侧等离子体中水平面第一壁/包层/真空/屏蔽几何及材料组分。

表 2 FEB-E 外侧第一壁/包层/真空/屏蔽几何及材料组分

厚度, $\Delta R/\text{cm}$	材料组分及体积百分比	区域名
115.0	Void	等离子体
1.0	100%Cu	第一壁
1.2	53%316SS 47%He	
10.0	2%U 60%Be 37%LLi 4%316SS	包层
1.2	53%316SS 47%He	
12.4	20%U 35%Be 37%LLi 5%316SS	
1.2	53%316SS 47%He	
16.3	30%U 25%Be 37%LLi 5%316SS	
1.2	53%316SS 47%He	
20.0	100%LLi	
5.0	100%316SS	
20.0	10%316SS 90%He	
5.0	100%316SS	真空室
9.3	10%316SS 90%He	
3.0	100%316SS	
15.0	Void	屏蔽层
4.0	100%316SS	
17.0	75%B ₄ C 5%316SS 20%He	
4.0	100%316SS	绝热层
1.75	Void	
0.5	100%316SS	
1.5	5%Kapton 30%LN ₂ 10%316SS	
0.5	100%316SS	
1.75	Void	TF 线圈
84.0	31.6%316SS 11.8%Cu	
	23.7%Nb ₃ Sn 21.1%LHe	
	11.8%Polyimide	

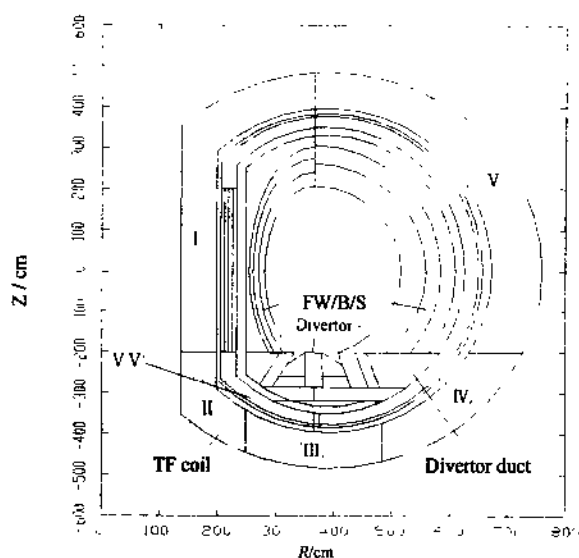


图 5 FEB-E 沿 TFC 磁体中心垂直平面剖面的
MCNP 计算模型图

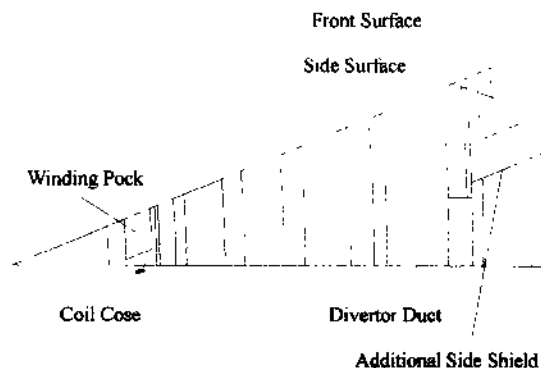


图 6 FEB-E 等离子体中水平面以下 261 cm 处的俯视剖面图

MCNP 计算之前, 首先对建立的几何模型正确性进行了检验。检验的步骤是: (1) 通过 MCNP 配套提供的绘图程序画出模型图, 如有几何问题, 输出图上将有显示; (2) 将 FEB-E 输入参数文件的 59 个几何模元的材料全置零, 再使用 MCNP 运行大量的源粒子数, 如有几何问题, 在输出文件中将显示出来。只要反复进行上述步骤, 最终定能把模型的几何问题一一找出并校正过来。我们在本文工作中沿随机方向运行了 5 百万个源粒子, 对我们的几何模型进行了成功检验。

MCNP 计算过程中最关键也是最难处理好的就是降低方差技巧。通过本次计算工作的反复实践, 我们逐渐掌模了一些行之有效的降低方差技巧, 并成功的应用在 FEB-E 中子学屏蔽问题的分析和计算。当然, 由于使用了运算速度较快的先进计算机, 从另一个方

面为我们的工作提供了很多便利。此次计算中我们采用的主要降低方差技巧有源粒子偏倚分布、权重截断、几何重要性分裂 / 俄罗斯轮盘赌。几何重要性分裂/俄罗斯轮盘赌是一种最古老和应用最广泛的降低方差技巧之一, 该技巧在本次计算中起主要作用。实际应用过程中, 上述技巧需要相互权衡与配合, 并经过反复试算与仔细分析, 方可找到一条快速降低方差的捷径。在本次 MCNP 程序对我们感兴趣的区域进行的磁体核辐射计算中, 仅用 30 万源粒子数就把中子和 γ -光子的统计方差分别降低到 6% 和 10% 以下, 满足误差要求。

4 结果及讨论

表 3 给出了 FEB-E 内侧区域 TFC 磁体的正面辐射效应结果, 并与以前 FEB 内侧屏蔽计算结果进行了比较。表中对于 FEB 设计分别列出一维中子输运程序 BISON 和三维中子输运程序 MCNP 的计算结果, 该结果是在 BISON 采用平均中子壁负载, MCNP 采用均匀源中子抽样的情况下得到的^[5]。由于内侧区域的几何结构及材料布置比较简单, 过去通常用一维中子输运程序 BISON 即能较好地对屏蔽问题进行模拟计算, 采用三维中子输运程序 MCNP 来计算混合堆内侧屏蔽问题的其中一个重要原因正是为了检验 MCNP 计算方法混合堆计算模型是否正确合理。从表中看出, 对于 FEB 内侧屏蔽问题, 一维和三维的计算结果是吻合的, 表明我们已经正确掌握了 MCNP 程序的使用方法。在以前对混合堆中子学屏蔽分析计算中我们知道, 内侧区域磁体屏蔽问题中最危险的地方是在等离子体中水平面的 TFC 绕组的正表面上。从表 3 中可见, 由表 1 给出的 FEB-E 内侧第一壁/包层/真空/屏蔽层材料总的来讲刚好使 TFC 磁体上受到的中子辐射效应在限制值以内, 不过内侧区域对快中子的辐射屏蔽还显得余量不足。由于 FEB-E 与 FEB 在内侧区域的几何结构和材料等基本没有变化, 不同的是本次 FEB-E 屏蔽计算采用了非均匀源中子抽样。FEB-E 结果与过去 FEB 计算结果相比较, 绕组的快中子积分通量和核热率有所增大, 绝缘体吸收剂量有较大幅度降低, 因此 FEB-E 中子辐射效应受非均匀源中子分布的影响还是很明显的。

表 3 内侧区域 TFC 磁体最大辐射效应及比较

辐射效应	正面			限制值
	FEB (BISON)	FEB (MCNP)	FEB-E (MCNP)	
绕组最大有机绝缘吸收剂量 $\times 10^9$ (rad/4.5FPY)	3.07	3.41	0.941	5.0
绕组最大快中子积分通量 $\times 10^{18}$ (n/cm ² 4.5FPY)	3.60	3.84	4.40	1.0
绕组最大核热密度 (mW/cm ³)	0.425	0.389	0.833	5.0

表 4 偏滤器侧区域 TFC 磁体最大辐射效应及比较

辐射效应	正面		侧面		限制值
	FEB (MCNP)	FEB-E (MCNP)	FEB (MCNP)	FEB-E (MCNP)	
绕组最大有机绝缘吸收剂量 $\times 10^9$ (rad/4.5FPY)	4.40	0.112	3.50	0.137	5.0
绕组最大快中子积分通量 $\times 10^{18}$ (n/cm ² · 4.5FPY)	6.30	0.860	4.50	1.16	10
绕组最大核热密度 (mW/cm ³)	0.64	0.166	0.48	0.176	5.0

表 4 给出了通过 MCNP 计算得到的 FEB-E 偏滤器抽气通道区域的 TFC 磁体正面和侧面的辐射效应结果及比较, 该结果是在 FEB-E 偏滤器抽气通道区域 TFC 磁体的侧壁额外增加一层厚度为 25 cm、材料组分为 W, B₄C 和 316SS 的屏蔽层的情况下得到的。从表中可见, FEB-E 偏滤器抽气通道区域的 TFC 磁体受到了很好的保护, 而且余量也很大。与原来的 FEB 设计比较, FEB-E 的最主要改进就是偏滤器及其抽气通道区域的几何结构和材料等不同, FEB-E 采用的是盒式喷气靶偏滤器, 而 FEB 采用的是开式斜置平板偏滤器, 从表中看出, 前者比后者的中子学屏蔽效果要好得多, 这一点也是 FEB-E 设计比 FEB 设计更为先进的重要标志之一。

表 5 FEB-E 的 16 个 TFC 磁体核热率结果

核热率/kW	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV	Zone V	总计	限制值
-- 中子	0.1074	0.0008	0.006495	0.1010	0.0541	0.2698	
-- γ -光子	0.8651	0.0127	0.4060	1.7346	0.9125	3.9309	
-- 总计	0.9725	0.0135	0.4125	1.8356	0.9666	4.2007	55

表 5 给出的是 16 个 TFC 磁体的核热产生计算结果。表中的 Zone I、-II、-III、-IV 和-V 如图 4 所示, 它们表示沿 TFC 磁体极向的区段划分。从表中可见, 对于核热率这项指标, 沿 TFC 磁体极向的第 IV 区段, 即偏滤器抽气通道区域最大, 占总核热率的 43.7%, 核热率最小的在第 II 区段, 即偏滤器的径向内侧区域。TFC 磁体的总核热率中包括中子和 γ -光子的热沉积, 其中 γ -光子的热沉积占总核热率的 93.6%, 起支配作用。不过, 16 个 TFC 磁体的总核热率产生仅为约 4.2 kW, 远低于屏蔽设计要求的 55 kW 的限制值。

5 总结与结论

(1) 通过对 FEB-E 混合堆非均匀源中子抽样计算, 当等离子体聚变功率为 143 MW

时, 内侧段、外侧段及偏滤器段的中子第一壁负载峰值分别为 0.864 MW/m^2 , 0.861 MW/m^2 和 0.529 MW/m^2 。沿极向的平均中子第一壁负载为 0.481 MW/m^2 , 其中内侧段和外侧段的平均中子第一壁负载分别为 0.688 MW/m^2 和 0.573 MW/m^2 。

(2) FEB-E 内侧第一壁/包层/真空/屏蔽层材料总的来讲刚好使 TFC 磁体上受到的中子辐射效应在限制值以内, 不过内侧区域对快中子的辐射屏蔽还显得余量不足。非均匀源中子对计算结果有明显影响。

(3) 在 FEB-E 偏滤器抽气通道区域 TFC 磁体的侧壁额外增加一层厚度为 25 cm、材料组分为 W、 B_4C 和 316SS 的屏蔽层的情况下, FEB-E 偏滤器抽气通道区域的 TFC 磁体受到了很好的保护, 而且余量也很大。

(4) 16 个 TFC 磁体的总核热率产生仅为约 4.2kW, 远低于屏蔽设计要求的 55 kW 的限制值。

(5) 通过中子学屏蔽的计算与分析, 给出了一个基本合理可行的 FEB-E 的屏蔽设计。

参 考 文 献

- 1 Huang Jinhua, Qiu Lijian, et al Detailed Engineering Conceptual Design for Fusion-fission Experimental Breeder Interim report, 1998
- 2 Wang Jun, Huang Jinhua Three-dimensional Shielding Design and Calculation for the Toroidal Field Coil of Fusion-fission Experimental Breeder (FEB) Dissertation for Master's Degree, 1996
- 3 Sawan M E, Gohar Y, Santoro R Shielding analysis for the ITER Divertor and Vacuum-pumping Ducts. Fusion Engineering and Design 1995, 28 429~436
- 4 Briesmeister J(ed). MCNP, a General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport. (Version 3A) Los Alamos National Laboratory LA-7396-M, Rev 2, 1986 (Revised 1991)
- 5 Kazuo Furuta, Yoshiaki Oka, Shunsuke Kondo BISON1.5-A One-dimensional Transport and Burnup Calculation Code Department of Nuclear Engineering, University of Tokyo, Japan, 1987

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-2061-5



9 787502 220617 >