

WIMS/CITATION 在 IHNI - 1 堆芯物理计算中的应用

赵柱民¹, 张 良¹, 江新标¹, 陈立新¹, 朱养妮¹, 周永茂²

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 中国核工业集团中原对外工程有限公司, 北京 100191)

[摘要] 建立了利用 WIMS + CITATION 计算医院中子照射器 I 型堆堆芯中子学参数的模型, 计算了堆芯的功率分布、顶铍反应性价值、控制棒价值、温度系数、堆芯燃耗等中子学参数, 计算结果与文献数据一致, 表明文章所建立的计算模型可用于医院中子照射器 I 型堆堆芯的物理计算。

[关键词] 医院中子照射器 I 型堆; 堆芯; 中子; WIMS; CITATION

[中图分类号] TL329.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009 - 1742(2012)08 - 0038 - 04

1 前言

高品质的超热中子束是硼中子俘获治疗 (boron neutron capture therapy, BNCT) 恶性肿瘤取得成功的关键条件之一^[1]。医院中子照射器 I 型堆 (inhospital neutron irradiator mark 1, IHNI - 1) 设计有 BNCT 超热中子束流孔道^[2,3], 为优化提高 IHNI - 1 堆超孔道热中子参数, 需要对堆芯的中子学参数进行准确计算。文章建立了利用 WIMS/CITATION^[4,5] 计算堆芯中子学参数的模型, 计算了堆芯的功率分布、顶铍反应性价值、控制棒价值、温度系数、堆芯燃耗等中子学参数, 与设计参数相比, 结果合理, 提供了一种理论研究 IHNI 堆芯参数的途径。

WIMS 是一个国际通用的栅元计算程序^[4]。该程序最初由位于 Winfrith 的英国原子能研究中心 (Atomic Energy Establishment, AEE) 于 20 世纪 60 年代为石墨高温气冷堆而研制的一个栅元计算程序, 后来被广泛用于压水堆、重水堆和各种研究堆的栅元计算。目前国内应用的 WIMS 是 20 世纪 80 年代推出的 WIMS 改进型的微机版本。国际原子能机构网站定期对 WIMS 的数据库进行更新, 提供 ENDF/B VII.0 和 JENDL4.0 等国际通用评价库最

新版本制作的多群截面库。CITATION 是采用细网有限差分扩散理论求解中子输运方程的反应堆堆芯分析程序^[5]。CITATION 可以处理一维、二维和三维问题, 可以用于 $X - Y - Z$ 、 $\theta - R - Z$ 、六角形 - Z 和三角形 - Z 等几何问题。该程序可以作燃耗计算、中子价值计算、固定源和本征值问题计算, 也可以输出堆芯中子通量分布及有效增殖系数 k_{eff} 。文章的计算工作在使用通用计算程序的同时, 增加了计算结果的可验证性和可比性。

2 堆芯结构描述

图 1 给出了 IHNI - 1 反应堆净堆堆芯、堆芯控制棒和实验孔道的布置方式。堆芯外围有侧铍反射层、底铍反射层、无顶铍反射层, 侧铍反射层内无控制棒、中子探测器等吸收体, 侧铍反射层外有热中子滤束装置和超热中子滤束装置。

IHNI - 1 的功率为 30 kW, 装置总体布局采用罐 - 池结构, 燃料元件采用 UO_2 燃料芯体, 包壳采用 Zr - 4。

燃料元件由上下栅板定位, 上下栅板通过 Zr - 4 拉杆组成燃料元件鸟笼架。采用金属铍作反射层, 轻水作慢化和冷却剂, 堆芯采用自然循环冷却方式。反应堆燃料组件位于密闭的堆容器内, 堆容器悬挂

[收稿日期] 2012 - 03 - 13

[作者简介] 赵柱民 (1970—), 男, 陕西周至县人, 副研究员, 研究方向为核能科学与工程; E-mail: woodowner@163.com

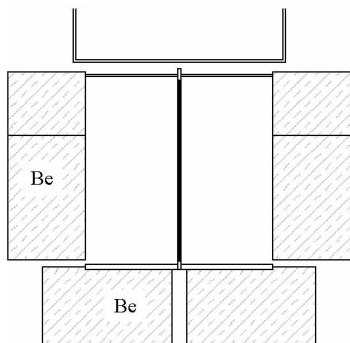


图1 IHNI-1堆芯辅助组件示意图

Fig.1 Chart of auxiliary components of IHNI-1 core

在水池内,在堆芯的相对两侧分别引出热中子束流和超热中子束流用于硼中子俘获治疗。在热中子束流部分内,引出一个用于硼浓度测量的实验中子束流孔道。

3 计算模型简介

首先利用 WIMS 计算堆芯各区域(栅元)的少群常数,然后利用CITATION计算堆芯参数。全堆芯计算采用4群,69群归并成4群的群结构为:第4群为0~0.625 eV,第3群为0.625~4 eV,第2群为4 eV~9.118 keV,第1群为9.118 keV~10 MeV。由于医院中子照射器I型堆堆芯结构是典型的束棒性堆芯,因此利用 WIMS 进行计算,在定义栅元类型时,选择 CELL 7 卡将堆芯栅元定义为束棒型栅元。医院中子照射器I型堆堆芯燃料棒布置在不同直径的同心圆环上,故采用适用于解环形几何的碰撞几率法,选择 SEQUENCE 2 来求解主输运程序。对堆芯的上部和下部采用中心为燃料的多层平板几何,将上下栅板、燃料元件的端塞及之间的水等高度方向无法分层的材料打混成一层材料处理。

由于 IHNI - 1 具有轴对称性,文章中的 CITATION采用 R - Z 几何做全堆芯计算。活性区的径向分区是:第1区为中央棒区(水或控制棒);第2区~第9区为打混的标准燃料元件区;第10区为带5根铝连接杆含贫铀棒的燃料区;第12区为侧铍反射层。轴向有:底铍、顶铍托盘(水)、底铍和活性区之间的区域、顶铍和活性区之间的区域、底铍和顶铍(水)周围的水。CITATION 给出的是离散体积块的平均中子注量率和平均功率。

4 IHNI - 1 堆芯物理参数计算

4.1 中子注量率和功率分布计算

利用以上模型计算了 IHNI - 1 堆芯的中子注量率和功率分布。图2给出了 WIMS/CITATION 计算的径向归一化4群中子注量率分布,可明显看到第4群中子(热中子)在侧铍反射层有抬高的现象。图3给出了径向功率的归一化分布与蒙特卡罗粒子输运计算程序(Monte Carlo N-particle transport code, MCNP)计算结果的比对,其基本趋势与 MCNP 计算结果一致。其中第2圈燃料元件的功率与 MCNP 的结果相比偏高,这可能是扩散模型计算误差引起的。

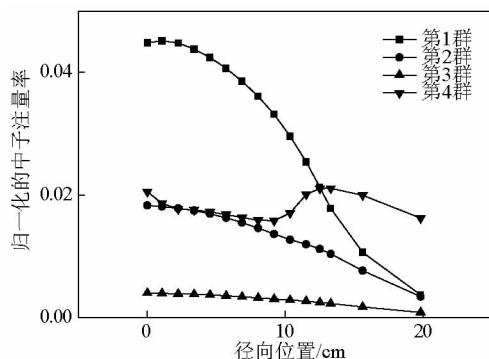


图2 径向4群中子注量率归一化分布

Fig.2 The radial distribution of 4 groups of normalization neutron flux

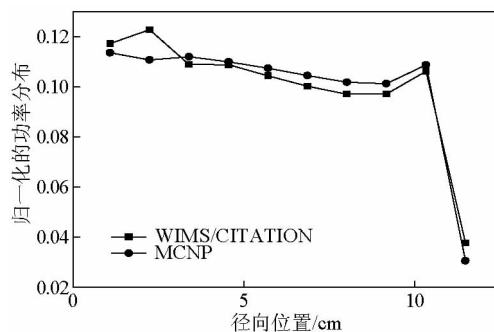


图3 径向功率归一化分布

Fig.3 The radial distribution of normalization power

4.2 温度系数的计算

单位温度变化所引起的反应性变化称为反应性温度系数,以 α_T 表示,文章采用以下公式计算温度系数:

$$\alpha_T = \frac{k_{\text{eff},1} - k_{\text{eff},0}}{k_{\text{eff},0} \cdot \Delta T} \quad (1)$$

燃料、慢化剂水的温度变化引起堆芯反应性变化机理不同,计算方法也不同。对于燃料主要由多普勒效应决定,而堆芯中慢化剂水的温度系数的计算必须考虑密度随温度的变化。这是因为温度变化引起水的密度变化,密度变化引起宏观截面的变化,从而引起堆芯反应性的变化。燃料反应性温度系数计算只需要考虑温度的改变,而慢化剂水的反应性

温度系数的计算除了考虑温度的改变外,还需要考虑密度随温度的改变。

文章分别计算了 IHNI - 1 堆芯燃料、慢化剂水的反应性温度系数。首先用 WIMS 计算与材料温度有关的少群常数,再通过 CITATION 临界计算得到不同材料温度对应的 k_{eff} 。温度系数如表 1 所示,由表 1 可知,文章计算结果与文献的结果一致。

表 1 WIMS + CITATION 计算的温度系数

Table 1 The temperature coefficients of WIMS + CITATION calculation

材料	温度/°C	k_{eff}	反应性 $\Delta k/k$	温度范围/°C	平均反应性系数 /°C ⁻¹	
					文章计算值	文献[6]设计值
燃料	20	1.001 999	-0.008 186	20 ~ 800	$-1.036 15 \times 10^{-6}$	$-9.914 498 \times 10^{-6}$
	800	0.993 917				
慢化剂水	20	1.002 299	-0.008 186	20 ~ 100	$-1.023 25 \times 10^{-4}$	-1.0×10^{-4}
	100	0.994 113				

4.3 燃耗计算

燃耗特性决定了 IHNI - 1 后备反应性的设计,因此需要准确地计算堆芯燃耗。IHNI - 1 堆运行模式为:一天运行 8 h,每周运行 5 d,在不换料条件下运行 10 年。WIMS 本身具有燃耗计算功能,WIMS 直接计算 10 年燃耗为 -19.289 3 mk。用 WIMS/CITATION 计算 10 年燃耗为 -18.372 0 mk,燃耗的计算结果见表 2。由设计结果^[6]可知,顶铍反射层的总效率为 17.6 mk,2 根铍塞和 2 根镉调节器的总价值为 10.85 mk,总的后备反应堆约为 28 mk,能够抵消 10 年运行的燃耗反应性消耗,文章的燃耗计算结果具有一定的合理性。

表 2 燃耗反应性消耗

Table 2 The reactivity expenditure of 10 years burnup

燃耗时间/a	CITATION 结果		WIMS 结果	
	k_{eff}	燃耗反应性/mk	k_{eff}	燃耗反应性/mk
0	0.999 910	—	1.000 134	—
1	0.993 690	-6.220	0.993 632 4	-6.501 6
2	0.991 489	-8.421	0.991 329 9	-8.804 1
3	0.989 669	-10.241	0.989 465 8	-10.668 2
4	0.988 115	-11.795	0.987 875 9	-12.258 1
5	0.986 756	-13.154	0.986 484 2	-13.649 8
6	0.985 547	-14.363	0.985 199 5	-14.934 5
7	0.984 445	-15.465	0.984 068 2	-16.065 8
8	0.983 421	-16.489	0.982 939 6	-17.194 4
9	0.982 452	-17.458	0.981 799 4	-18.334 6
10	0.981 538	-18.372	0.980 844 7	-19.289 3

4.4 中心控制棒价值设计计算

首先,中心控制棒的价值不能大于 8 mk,否则在中心控制棒的卡棒事故下,堆芯难以依靠水的负

温度效应抑制其正反应性;其次,该堆中心控制棒的价值需大于 6 mk,这样才能补偿反应堆一天运行 5 ~ 8 h、每周运行 5 d 所产生的碘坑深度。

文章通过更换 IHNI - 1 堆计算模型中心控制棒的材料,计算控制棒和水情况下 k_{eff} 的变化来预测中央控制棒的价值。表 3 列出了中心控制棒反应性价值的计算结果,与文献参考值一致。

表 3 中心控制棒冷态反应性价值的计算结果

Table 3 The calculation results of coolant reactivity value of central control rods

文章计算值/mk	MCNP 计算值 ^[3] /mk	设计值 ^[6] /mk	实验测量值 ^[7] /mk
6.604	6.13(±0.48)	6.8	6.40

4.5 顶铍反射层价值计算

顶铍反射层、铍塞、镉调节器是用来弥补堆芯燃耗所产生的负反应性,确保反应堆在不换料条件下运行 10 年以上。表 4 列出了顶铍反射层厚度为 110 mm 时,反应性价值的计算结果与参考文献的对比。由表 4 可见,计算值与参考值基本一致。图 4 给出了顶铍反应性价值随顶铍厚度的变化曲线。由图 4 可知,顶铍反射层厚度为 110 mm 时,价值基本达到饱和,其价值为 16.164 mk。

表 4 顶铍反射层反应性价值的计算结果

Table 4 The calculation results of coolant reactivity value of upside beryllium reflector

文章计算值/mk	MCNP 计算值 ^[3] /mk	设计值 ^[7] /mk	实验测量值 ^[6] /mk
16.164	17.31 ± 0.46	17.6	16.11

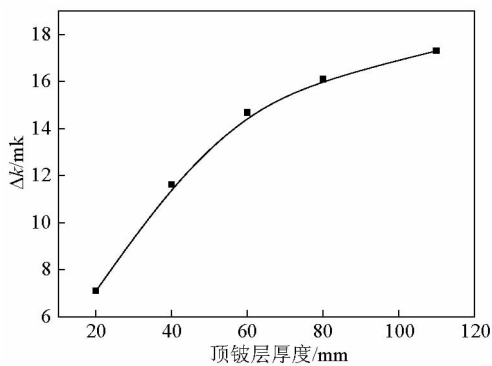


图4 堆芯剩余反应性随顶铍厚度的变化曲线
Fig.4 The curve of excess reactivity value vs. the thickness of upside beryllium

5 结语

文章建立了利用 WIMS/CITATION 计算 IHNI-1 堆芯中子学参数的模型, 计算了堆芯的功率分布、温度系数、堆芯燃耗、控制棒价值、顶铍反应性价值等中子学参数, 与设计参数的比对表明文章的计算结果合理。WIMS/CITATION 计算模型为 IHNI-1 堆芯参数设计提供了一种理论验证比对途

径, 为 IHNR 堆的工程设计及应用优化提供了一种有效验算手段。

参考文献

- [1] Moss R L, Aizawa O, Beynon D, et al. The requirements and development of neutron beams for neutron capture therapy of brain cancer[J]. Journal of Neuro - Oncology, 1997, 33:27 - 40.
- [2] 周永茂. 一种二元放疗靶向治癌的新技术——中子俘获疗法(NCT)与医院中子照射器(IHNI) [J]. 自然杂志, 2009, 31(3): 125 - 135.
- [3] 江新标, 张文首, 高集金, 等. 低浓化医院中子照射器(IHNI-1)堆芯的物理方案设计[J]. 中国工程科学, 2009, 11(11): 17 - 21.
- [4] Roth M J, Macdougall J D, Kemsell P B. The Preparation of Input Data for WIMS [M]. England: Winfrith Establishment, 1967.
- [5] Fowler T B, Vondy D R, Cunningham G W. Nuclear reactor core analysis code—CITATION, ORNL-TM-2496 Rev 2 [R]. USA: Oak ridge National Laboratory, 1971.
- [6] 李义国, 夏普, 邹淑芸, 等. 医院中子照射器反应堆实验研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(S): 201 - 203.
- [7] 李义国, 夏普, 高集金, 等. 医院中子照射器设计[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2006(1): 231 - 232.

Application of WIMS/CITATION in the calculation of IHNI-1 reactor core physics

Zhao Zhumin¹, Zhang Liang¹, Jiang Xinbiao¹,
Chen Lixin¹, Zhu Yangni¹, Zhou Yongmao²

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 2. China Zhongyuan Engineering Corporation, China National Nuclear Corporation, Beijing 100191, China)

[Abstract] Using WIMS & CITATION program, the neutronic parameters calculating model of in-hospital neutron irradiator mark 1 (IHNI-1) reactor is presented in this paper. The power distribution, reactivity worth of control rod and top beryllium, temperature coefficient and burnup are calculated. It proves that the results are consistent with the literature values and the method is appropriate to physical calculation of IHNI-1 reactor.

[Key words] IHNI-1 reactor; reactor core; neutron; WIMS; CITATION