

医院中子照射器堆芯中子学参数计算方法

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. 中国中原对外工程公司, 北京 100191

摘要 建立了利用 WIMS/CITATION 计算医院中子照射器 I 型堆 (IHNI-I) 堆芯中子学参数的模型。栅元群常数计算采用 WIMS 束棒几何模型, 控制棒、顶铍反射层、底铍反射层、侧铍反射层以及堆芯每一环燃料元件作为不同栅元类型; 全堆芯计算采用 CITATION 程序 $R-z$ 几何模型。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。本文所建立的计算模型可用于 IHNI-I 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 模型; CITATION 程序

中图分类号 TL329.2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.007

Calculation of IHNI-1 Reactor Core's Neutronics Parameters

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, Beijing 100191, China

Abstract Using the WIMS/CITATION program, a neutronic parameter calculating model for the IHNI-I (In-Hospital Neutron Irradiator Mark I) reactor is presented in this paper. In the calculations of the cell group parameters, the bundle model is adopted. The control rod, the top Be reflector, the bottom Be reflector, the side Be reflector and each circle fuel rod of the core are taken as different cell types. In the whole core calculation, the $R-z$ model is adopted by using the CITATION code. The power distribution, the reactivity worth of the control rod and the top beryllium, the temperature coefficient and the burnup are calculated. It is shown that the results agree with the values in literature, and the method is appropriate for the physical calculation of the IHNI-I reactor.

Keywords IHNI-I reactor; reactor core; neutron; WIMS model; CITATION code

0 引言

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 (In-Hospital Neutron Irradiator Mark I, IHNI-I) 设计有 BNCT 超热中子束流孔道^[2-3], 为优化提高 IHNI-I 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。本文建立了利用 WIMS^[4]/CITATION^[5] 计算堆芯中子学参数的模型, 并计算了堆芯的功率分布、顶铍反应性价值、控制棒价值、温度系数和堆芯燃耗等中子学参数, 与设计参数相比, 结果合理。本文模型与方法提供了一种计算

IHNI-I 堆芯参数的途径。

WIMS^[4] 是一个国际通用的栅元计算程序。该程序最初是英国 Winfrinth 原子能所于 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, 后来被广泛用于水压堆 PWR、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, 提供根据 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^[5] 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。CITATION 可以

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2012-06-18

作者简介: 赵柱民, 副研究员, 研究方向为核能科学与工程, 电子信箱: 13891853450@163.com

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、中子价值、固定源和本征值问题的计算,也可以输出堆芯中子通量分布及有效增殖系数 k_{eff} 。本文计算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。

1 堆芯结构描述

堆芯外围有侧铍反射层和底铍反射层,无顶铍反射层,堆芯和侧铍反射层内均无控制棒、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 30kW, 装置总体布局采用罐-池结构,燃料元件采用 UO_2 燃料芯体,包壳采用锆-4;燃料元件采用同心圆排列,堆芯由中心控制棒栅元(净堆计算时该栅元为水)和 10 圈燃料栅元组成。每圈燃料栅格孔在该圈内均匀分布,共有 351 个栅位。中心栅位为中心控制棒。

燃料元件由上、下栅板定位,上、下栅板通过锆-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。在热中子束流孔道部分内,引出一用于硼浓度测量的实验中子束流孔道。

2 计算模型

本文首先利用 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

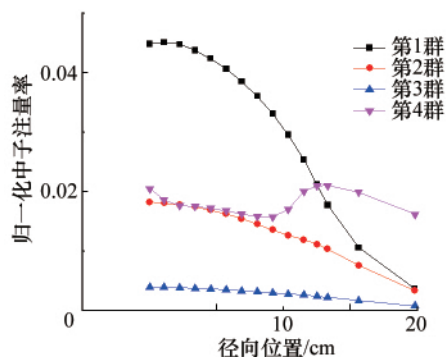


图 1 径向四群中子注量率归一化分布

Fig. 1 Radial distribution of 4 groups normalization neutron flux

3.2 温度系数的计算

单位温度变化引起的反应性变化称为反应性温度系数,以 α_T 表示。计算温度系数起始状态和终了状态的有效增殖系数分别用 k_{eff0} 和 k_{eff1} 表示,起始状态和终了状态的温度差用

群 0—0.625eV, 第 3 群 0.625—4eV, 第 2 群 4eV—9.118keV, 第 1 群 9.118keV—10MeV。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,在利用 WIMS 进行计算时,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 求解主输运程序。对堆芯的上部和下部采用中心是燃料的多层平板几何,上下栅板、燃料元件的端塞及燃料元件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,本文 CITATION 采用 $R-z$ 几何进行全堆芯计算。活性区的径向分区是:第 1 区为中央棒区(水或控制棒);第 2—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。轴向分区有: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。

3 IHNI-1 堆芯物理参数计算

3.1 中子注量率和功率分布计算

利用 WIMS/CITATION 模型计算了 IHNI-1 堆的中子注量率和功率分布。图 1 给出了 WIMS/CITATION 计算的径向归一化四群中子注量率分布,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 2 给出了径向功率的归一化分布与 MCNP 计算结果的比对,基本趋势与 MCNP 计算结果一致,第 2 圈燃料元件的功率与 MCNP 的结果相比偏高,可能是由扩散模型计算误差引起的。

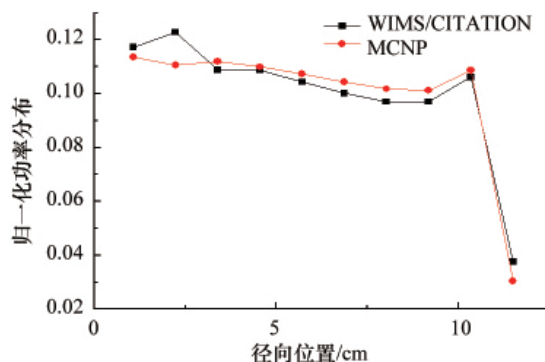


图 2 径向功率归一化分布

Fig. 2 Radial distribution of normalization power

ΔT 表示,本文采用式(1)计算温度系数:

$$\alpha_T = \frac{k_{eff1} - k_{eff0}}{k_{eff0} \cdot \Delta T} \quad (1)$$

燃料、慢化剂水的温度变化引起堆芯反应性变化的机制

不同,计算方法也不同。对于燃料,反应性系数主要由多普勒效应决定,而慢化剂水主要由密度随温度变化影响其慢化能力引起。燃料反应性温度系数计算只需要考虑温度的变化,而慢化剂水的反应性温度系数的计算除了考虑温度的变化外,还需要考虑密度随温度的变化。

本文分别计算了 IHNI-I 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有效增殖系数 k_{eff} 。利用 WIMS/CITATION 计算的温度系数如表 1 所示。由表 1 可知,本文计算结果与文献结果一致。

表 1 WIMS/CITATION 计算的温度系数
Table 1 WIMS/CITATION's results of temperature coefficient

材料	温度/°C	k_{eff}	反应性/mk	温度范围/°C	平均反应性系数/°C ⁻¹	
					本文计算值	文献[6]设计值
燃料	20	1.001999	8.082	20—800	-1.03615×10^{-6}	-9.914498×10^{-6}
	100	0.993917				
慢化剂水	20	1.002299	8.186	20—100	-1.02325×10^{-4}	-1.0×10^{-4}
	100	0.994113				

3.3 燃耗计算

燃耗特性决定了 IHNI-I 后备反应性的设计,因此需要准确计算堆芯燃耗。IHNI-1 堆运行模式为:1d 运行 8h、每周运行 5d,在不换料条件下运行 10a。WIMS 本身具有燃耗计算功能,WIMS 直接计算 10a 燃耗为 -19.2893mk。用 WIMS/CITATION 计算 10a 燃耗为 -18.3720mk,燃耗的计算结果见表 2。由设计结果^[7]可知,顶铍反射层的总效率为 17.6mk,2 根铍塞和 2 根镉调节器的总价值为 10.85mk,总的后备反应堆约 28mk,能够抵消 10a 运行的燃耗反应性消耗。本文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 Reactivity expenditure of 10 year 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	0.999910		1.000134	
1	0.993690	-6.220	0.9936324	-6.5016
2	0.991489	-8.421	0.9913299	-8.8041
3	0.989669	-10.241	0.9894658	-10.6682
4	0.988115	-11.795	0.9878759	-12.2581
5	0.986756	-13.154	0.9864842	-13.6498
6	0.985547	-14.363	0.9851995	-14.9345
7	0.984445	-15.465	0.9840682	-16.0658
8	0.983421	-16.489	0.9829396	-17.1944
9	0.982452	-17.458	0.9817994	-18.3346
10	0.981538	-18.372	0.9808447	-19.2893

3.4 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 8mk,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 6mk,这样才能补偿反应堆 1d 运行 5—8h、每周运行 5d 所产生的碘坑深度。

本文通过更换 IHNI-I 堆计算模型中心控制棒的材料,计算填控制棒和水情况下 k_{eff} 的变化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,与文献参考值基本一致。

表 3 中心控制棒冷态反应性价值的计算结果
Table 3 Calculation results of the reactivity worth of central control rods

本文计算值 /mk	MC 计算值 ^[9] /mk	文献[6]设计值 /mk	实验测量值 ^[7] /mk
6.604	6.13±0.48	6.8	6.40

3.5 顶铍反射层价值计算

顶铍反射层、铍塞、镉调节器用来弥补堆芯燃耗产生的负反应性,确保反应堆在不换料条件下运行 10a 以上。图 3 给出了顶铍反应性价值随顶铍厚度的变化曲线。由图 3 可知,顶铍反射层厚度为 110mm 时,价值基本达到饱和,因此,本文

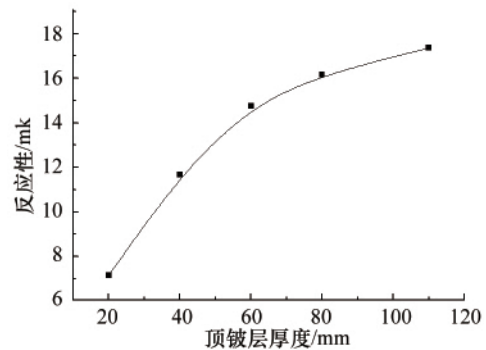


图 3 堆芯剩余反应性随顶铍厚度的变化曲线
Fig. 3 Curve of excess reactivity worth with the thickness of upside beryllium

顶铍反射层的设计厚度为 110mm, 其价值为 16.164mk, 与文献[5]中的 MC 计算值 (17.31±0.46)mk 相比, 误差为 6.6%, 基本一致。

4 结论

本文建立了利用 WIMS/CITATION 计算 IHNI-I 堆芯中子学参数的模型, 计算了堆芯的功率分布、温度系数、堆芯燃料、控制棒价值、顶铍反应性价值等中子学参数, 并与设计参数的比对, 说明本文的计算结果的合理性。本文开发的 WIMS/CITATION 计算模型为 IHNI-I 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 (References)

- [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] Jiang X B, Zhu Y N, Gao J J, et al. The conceptual calculation for the neutron beam device at <In Hospital Neutron Irradiator>Mark 1 [C].

- Advances in Neutron Capture Therapy 2006: Proceedings of 12th International Congress on Neutron Capture Therapy, Takamatsu, Kagawa, Japan, October 14-17, 2006.
- [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.
Jiang Xinbiao, Zhang Wenshou, Gao Jijin, et al. *Engineering Science*, 2009, 11(11): 17-21.
 - [4] Roth M J, Macdougall J D, Kemshell P B. The preparation of input data for WIMS[R]. Winfrith, England: Winfrith Establishment, 1967.
 - [5] Fowler T B, Vondy D R, Cunningham G W. Nuclear reactor core analysis code -CITATION [R]. ORNL-TM-2496 Rev 2, Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1971.
 - [6] 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.
Li Yiguo, Xia Pu, Gao Jijin, et al. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 2006(1): 231-232.
 - [7] 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.
Li Yiguo, Xia Pu, Zou Shuyun, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43 (S): 201-203.

(责任编辑 马宇红, 代丽)

·学术动态·

“2012 年电站自动化信息化学术和技术交流会议”征文



由中国动力工程学会自动控制专委会主办的“2012 年电站自动化信息化学术和技术交流会议”将于 2012 年 11 月 1 日在南京市召开。

征稿范围: (1) 电站自动控制技术: 国内外电站自动化信息化技术发展综述(火电、核电、水电等); 新理论新技术在电站自动控制应用; (2) 电站信息化技术: 数据挖掘技术在电站信息化中的应用; 厂级监控信息系统(SIS)和管理信息系统(MIS); 电站建模仿真技术发展与应用; 智能仪表与智能传感器应用技术; 分散控制系统(DCS)和可编程控制器(PLC)应用技术; 现场总线与计算机网络技术及其在电站的应用; (3) 主辅机性能监测与故障诊断技术和寿命管理: 机组状态维修和设备维修管理; 火电机组性能监测与故障诊断; 寿命管理; (4) 机组节能减排与运行优化技术: 锅炉燃烧优化技术; 节能减排控制技术; 运行优化理论与技术; 机组间负荷优化分配和调度; 电站成本分析与实时报价; (5) 新型机组控制技术(循环流化床锅炉控制系统的设计与应用; 超临界、超超临界机组控制系统的设计与应用; 垃圾炉控制系统的设计与应用; 燃气蒸汽联合循环控制系统的设计与应用; 天然气热电冷三联供控制系统的设计与应用; 可再生能源发电系统控制技术; IGCC 控制系统的设计与应用; 环保监控装置与系统; 脱硫脱硝监控技术和设备运行)。

论文截稿日期: 2012 年 8 月 15 日

联系电话: 021-64358710-361

电子邮箱: luwenhua@speri.com.cn

会议网站: www.cpeweb.com.cn/dongli/article.asp?class_id=36&bclass_id=643&art_id=993

大会网站: www.cacm.org.cn/coboport/portal/channel_tzgg.ptview?funcid=showContent&infoLinkId=29261&infoSortId=52281