

# 低浓化医院中子照射器 (IHNI-1) 堆芯的物理方案设计

江新标<sup>1</sup>, 张文首<sup>1</sup>, 高集金<sup>2</sup>, 李义国<sup>2</sup>, 周永茂<sup>3</sup>

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

3. 中国核工业集团公司, 北京 100822)

[摘要] 采用蒙特卡罗程序 MCNP/4B 模拟计算了功率为 30 kW 的低浓化医院中子照射器的堆芯物理参数, 设计了合理的堆芯布置方案、<sup>235</sup>U 富集度、控制棒价值、后备反应性和停堆深度, 得到固有安全性较高、寿期达 10 年且无需换料、采用低浓化 UO<sub>2</sub> 燃料的医院中子照射器的堆芯物理设计方案, 为后续反应堆工程设计以及硼中子俘获治疗肿瘤用中子束的设计提供理论依据。

[关键词] 医院中子照射器; 硼中子俘获治疗; 反应性

[中图分类号] TL329.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)11-0017-05

## 1 前言

国内外早期微堆(功率小于 30 kW、池水自然循环冷却、寿期内不换料)堆芯一般采用高浓铀 AlU<sub>4</sub> 合金燃料<sup>[1,2]</sup>, 其<sup>235</sup>U 富集度均大于 90%。为了将该堆推广应用于硼中子俘获治疗(boron neutron capture therapy, BNCT)恶性肿瘤领域, 一方面, 反应堆堆芯燃料元件需要进行低浓化处理, 以满足国际原子能组织(IAEA)规定的<sup>235</sup>U 富集度小于 20% 的民用标准<sup>[3,4]</sup>, 另一方面, 反应堆功率需要适当提高, 以便在孔道出口处得到较强的满足 BNCT 临床治疗的中子束流。文章中反应堆堆芯燃料低浓化物理方案设计着重研究反应堆功率为 30 kW 且满足热工条件下的低浓铀堆芯的堆芯结构布置、 $N_H/N_S$  比(氢原子数与<sup>235</sup>U 原子数的比值)、<sup>235</sup>U 临界装载质量、控制棒价值、后备反应性等堆芯关键物理参数, 通过分析比较, 得到固有安全性较高、寿期达 10 年且寿期内无需换料、采用低浓化 UO<sub>2</sub> 燃料元件的 IHNI-1 反应堆(in hospital neutron irradiator - mark 1)堆芯的物理设计方案, 确保 IHNI-1 反应堆辅助

系统少、运行灵活、寿期内不换料及堆芯反应性的安全可控。

## 2 净堆堆芯燃料低浓化物理设计

文章首先采用具有 324, 340, 345 个燃料栅位的 3 种低浓铀净堆堆芯来研究堆芯  $N_H/N_S$  比、<sup>235</sup>U 临界装载量与堆芯<sup>235</sup>U 富集度的关系, 通过分析比较, 优选一个<sup>235</sup>U 富集度小于 20%,  $N_H/N_S$  比较小的堆芯布置方案, 为 IHNI-1 堆芯物理参数的模拟设计提供依据。

### 2.1 堆芯结构描述

图 1~图 3 分别给出了 3 种低浓铀净堆堆芯的布置方式, 图 4、图 5 分别给出了堆芯辅助组件和实验孔道的布置方式。由图 1~图 5 可知, 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。

低浓铀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

[收稿日期] 2008-12-25

[作者简介] 江新标(1967-), 男, 江苏如东县人, 西北核技术研究所研究员, 现从事反应堆物理和核技术应用研究工作;

E-mail: jiangxb67@yahoo.com.cn

孔在该圈内均匀排布,燃料元件由上、下栅板定位,324,340,345个燃料栅位堆芯均有5根<sup>4</sup>Zr连接杆(直径8 mm),布置方式示于图1~图3。

燃料元件采用烧结UO<sub>2</sub>燃料芯体,密度10.6 g/cm<sup>3</sup>,芯体活性区高度240 mm;包壳采用<sup>4</sup>Zr,密度6.5 g/cm<sup>3</sup>,包壳外径5.1 mm,内径4.3 mm;芯体与包壳管之间为0.05 mm厚的氦气;芯体上下端塞采用<sup>4</sup>Zr材料,上下端塞的厚度分别为8 mm,7 mm,上端塞与燃料芯体之间有1 mm厚的气隙;中心控制棒栅元外围有<sup>4</sup>Zr导管,内径8 mm,外径12 mm。

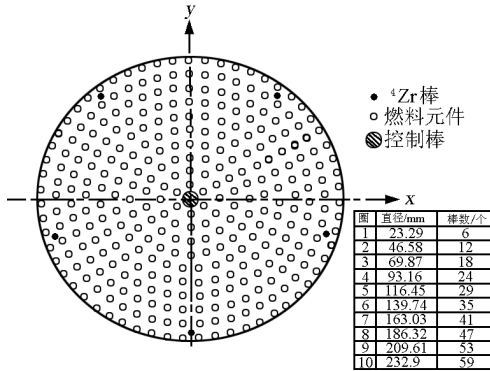


图1 324个燃料栅位的低浓铀堆芯布置图

Fig.1 Chart of low - enrichment core with 324 fuel cells

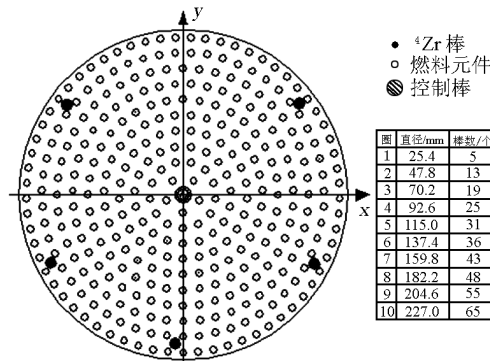


图2 340个燃料栅位的低浓铀堆芯布置图

Fig.2 Chart of low - enrichment core with 340 fuel cells

## 2.2 堆芯燃料低浓化模拟设计计算

采用蒙特卡罗程序MCNP/4B<sup>[3]</sup>模拟计算3种净堆堆芯的<sup>235</sup>U临界装载量、 $N_H/N_S$ 比与<sup>235</sup>U富集度的对应关系,计算中,UO<sub>2</sub>燃料的<sup>235</sup>U富集度分别采用10%,11%,12%,13%,14%,15%,20%,25%,30%,对应于不同<sup>235</sup>U富集度,堆芯有不同的燃料元件临界装载量,而未装载燃料元件的外围栅元由水填充,计算结果示于图6和图7。

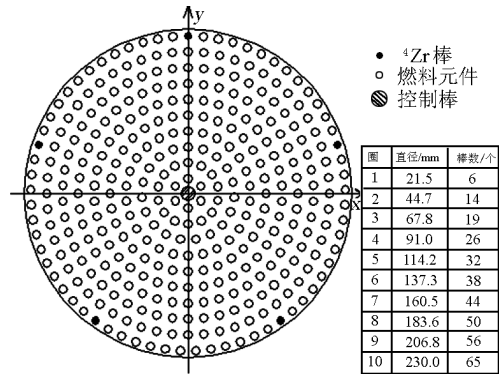


图3 345个燃料栅位的低浓铀堆芯布置图

Fig.3 Chart of low - enrichment core with 345 fuel cells

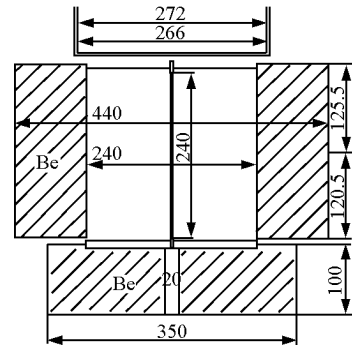


图4 低浓铀堆芯辅助组件布置图

Fig.4 Chart of auxiliary components of low - enrichment core

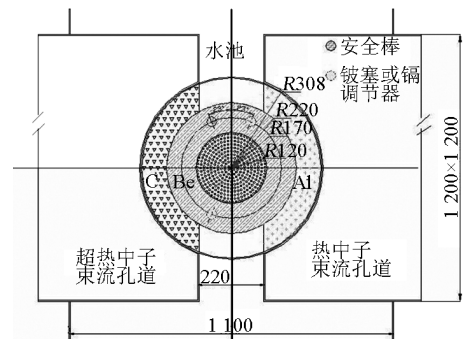


图5 低浓铀堆芯控制棒及实验孔道布置图

Fig.5 Chart of control rods and experiment ducts of low - enrichment core

由图7可知,采用<sup>235</sup>U富集度小于20%的UO<sub>2</sub>燃料元件时,堆芯装载1 kg左右的<sup>235</sup>U就可以达到临界,与采用AlU<sub>4</sub>合金燃料的高浓铀堆芯的<sup>235</sup>U临界装载量基本相当<sup>[2]</sup>,因此,文章采用低浓化的UO<sub>2</sub>燃料元件来设计30 kW IHNI-1堆是可行的。其次,由图6和图7可知,在<sup>235</sup>U富集度相同情况下,345燃料栅位堆芯的 $N_H/N_S$ 比最小,<sup>235</sup>U临界装载

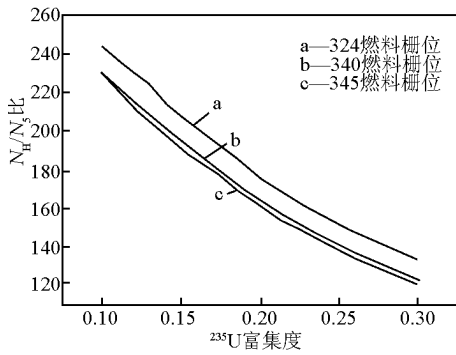


图6 采用不同燃料栅位堆芯时,净堆冷态临界条件下的堆芯  $N_H/N_S$  比与  $^{235}\text{U}$  富集度的关系曲线

Fig. 6 The ratio of  $N_H/N_S$  vs.  $^{235}\text{U}$  enrichment of three bared reactors at coolant state

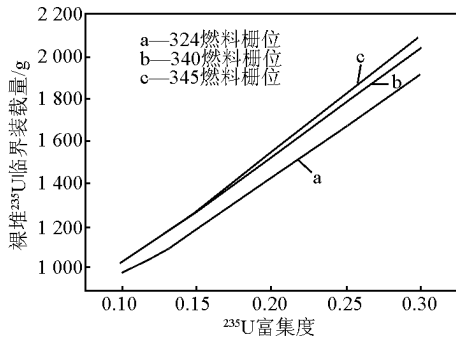


图7 采用不同燃料栅位堆芯时,低浓铀净堆堆芯  $^{235}\text{U}$  冷态临界装载量与  $^{235}\text{U}$  富集度的关系曲线

Fig. 7  $^{235}\text{U}$  critical quantity vs.  $^{235}\text{U}$  enrichment of three bared reactors at coolant state

量稍大,由于  $N_H/N_S$  比较小的堆芯其堆芯慢化能力较弱,中子泄漏较大,从而可在水平孔道外得到较强的中子束流,因此,在  $^{235}\text{U}$  临界装载量相差不大的情况下,建议选择  $N_H/N_S$  比较小的 345 燃料栅位堆芯来设计 IHNI-1 堆及其 BNCT 中子束流。

### 3 345 燃料栅位堆芯物理参数的模拟设计

#### 3.1 净堆 $^{235}\text{U}$ 富集度的设计计算

为了保证堆芯达到临界,需考虑以下因素可能引起 45 mk 左右的堆芯负反应性:临界计算偏差  $\pm 1\%$ ,可引起 10 mk 负反应性;燃料  $^{235}\text{U}$  富集度偏差  $\pm 0.1\%$ ,可引起 5 mk 负反应性;铍反射层的杂质含量不同,可引起 10~15 mk 的负反应性;中心控制棒需补偿 6~8 mk 的负反应性;其他不确定因素可能引起 10 mk 负反应性。

文章采用 345 燃料栅位堆芯来模拟计算不同  $^{235}\text{U}$  富集度的满装载净堆堆芯(无中心控制棒、安全棒和 2 根镉调节器)的冷态后备反应性,表 1 列出了其蒙特卡罗计算结果。由表 1 可知,  $^{235}\text{U}$  富集度为 12.5% 时,净堆堆芯冷态后备反应性为 49.95 mk,可补偿上述 45 mk 左右的堆芯负反应性。即采用 12.5% 富集度燃料元件时,堆芯后备反应性满足设计要求,在设计偏差范围内,堆芯能够满足临界要求。

表 1 采用不同  $^{235}\text{U}$  富集度,冷态净堆堆芯  $^{235}\text{U}$  装载量、 $N_H/N_S$  比、后备反应性的蒙特卡罗计算值

Table 1 The Monte Carlo calculation results of  $^{235}\text{U}$  loading quantity, ratio of  $N_H/N_S$  and excess reactivity of bared reactors at coolant state by using different  $^{235}\text{U}$  enrichment fuels

燃料元件根数	345(堆芯装满燃料)				
$^{235}\text{U}$ 富集度/%	11.2	11.5	11.7	12.0	12.5
$^{235}\text{U}$ 装载量/g	1 187.10	1 218.89	1 240.09	1 271.89	1 339.656 4
$N_H/N_S$	199.59	194.39	191.06	186.29	177.244 3
冷态后备反应性 $\Delta K/mk$	32.28 $\pm$ 0.46	36.59 $\pm$ 0.48	39.80 $\pm$ 0.51	43.57 $\pm$ 0.46	49.95 $\pm$ 0.45

#### 3.2 中心控制棒价值设计计算

IHNI-1 堆的固有安全性在于能够依靠池水负温度效应抑制事故所产生的正反应性,因此,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。表 2 列出了中心控制棒反应性价值的蒙特卡罗计算结果,由表 2 可知,方案 1 和方案 2 的中心控制棒价值均在 6~8 mk 之间,满足设计要求,笔者建议采用方案 1。

表 2 中心控制棒冷态反应性价值的蒙特卡罗计算结果

Table 2 The Monte Carlo calculation results of coolant reactivity value of central control rods

计算方案	吸收体长度/mm	Cd 内径/mm	Cd 外径/mm	理论计算值/mk	实验测量值 <sup>[6]</sup> /mk
1	280	2	4	6.13 $\pm$ 0.48	6.40
2	280	3	5	7.36 $\pm$ 0.46	7.78

注:方案 1 不锈钢外壳的外径为 5 mm,方案 2 不锈钢外壳的外径为 6 mm,镉吸收体内充铝

### 3.3 安全棒价值设计计算

安全棒价值的设计准则是在中心控制棒和安全棒全部插入堆芯后,反应堆的停堆深度大于 $2.5 mk$ 。表3列出了安全棒反应性价值的计算结果,计算模型采用蒙特卡罗方法。由表3可知,方案5的安全棒反应性价值为 $5.44 mk$ ,不管中心控制棒位于何处,反应堆的冷态停堆深度均大于 $5.44 mk$ ,即满足停堆深度大于 $2.5 mk$ 的设计要求。

表3 安全棒冷态反应性价值的蒙特卡罗计算结果

Table 3 The Monte Carlo calculation results of coolant reactivity value of safty rods

计算方案	吸收体材料	吸收体内径/mm	吸收体外径/mm	理论计算值/ $mk$	实验测量值 <sup>[6]</sup> / $mk$
1	Ag-In-Cd	-	24	$6.23 \pm 0.46$	-
2	Ag-In-Cd	-	30	$8.27 \pm 0.47$	-
3	Ag-In-Cd	-	34	$8.64 \pm 0.47$	-
4	Cd	32	34	$6.60 \pm 0.48$	-
5	Cd	22	24	$5.44 \pm 0.47$	3.78

注:方案1、方案2、方案3采用实心的Ag-In-Cd吸收体,方案4、方案5采用Cd吸收体,内充铝

### 3.4 堆芯运行寿期设计计算

铍塞、镉调节器和顶铍反射层是用来弥补堆芯燃料所产生的负反应性,确保反应堆在不换料条件下运行10年以上。根据该堆一天运行 $5 \sim 8 h$ ,每周运行5 d的运行模式,反应堆堆芯每年燃料消耗大约为 $2.8 mk$ ,10年总燃料消耗约为 $28 mk$ ,即铍塞、镉调节器和顶铍反射层的总价值须大于 $28 mk$ 。

#### 3.4.1 顶铍反射层价值计算

文章顶铍反射层外径 $264 mm$ ,内径 $20 mm$ ,中心有直径 $20 mm$ 的空腔。图8给出了顶铍反应性价值随顶铍厚度的变化曲线。由图8结果可知,顶铍反射层厚度为 $110 mm$ 时,顶铍反射层价值基本

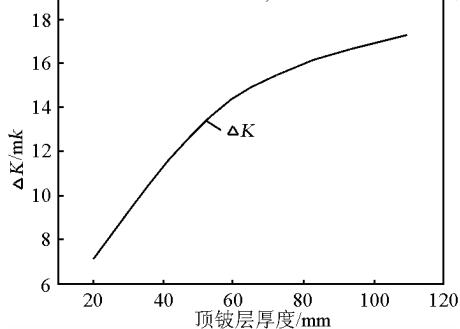


图8 顶铍反应性价值随顶铍厚度的变化曲线  
Fig. 8 The curve of reactivity value vs. thickness about up-beryllium reflector

达到饱和,因此,顶铍反射层的设计厚度为 $110 mm$ ,其价值约为 $(17.31 \pm 0.46) mk$ ,与文献[6]中的实验测量值 $16.11 mk$ 符合一致。

#### 3.4.2 铍塞和镉调节器价值的设计计算

根据铍塞、镉调节器和顶铍反射层的总价值要求以及顶铍反射层价值的计算结果,铍塞和镉调节器价值需大于 $11 mk$ 。表4列出了铍塞和镉调节器反应性价值的蒙特卡罗计算结果,计算中,铍塞直径 $34 mm$ ,长 $250 mm$ ,镉调节器长 $250 mm$ ,镉吸收体内径 $28 mm$ ,外径 $30 mm$ ,内部填充铝,镉吸收体外围由 $2 mm$ 厚的铝包壳包裹。

表4 镉调节器和铍塞冷态反应性价值的蒙特卡罗计算结果

Table 4 The Monte Carlo calculation results of cadmium regulators and beryllium plugs

计算项	理论计算值/ $mk$	实验测量值 <sup>[6]</sup> / $mk$
铍塞(2根)	$2.64 \pm 0.45$	2.96
镉调节器(2根)	$7.94 \pm 0.45$	8.07
2根镉调节器和2根铍塞的总价值	$10.85 \pm 0.45$	11.03

由表4计算结果可知,2根铍塞和2根镉调节器的总价值为 $10.85 mk$ ,与实验测量值符合一致,基本满足 $11 mk$ 的设计要求。

### 3.5 冷态临界装料量及后备反应性、停堆深度计算

根据工程设计要求,反应堆需要设置大于 $4.0 mk$ 的后备反应性,这样才能抵消反应堆1 d运行 $5 \sim 8 h$ ,每周运行5 d时反应堆碘坑、燃料和冷却剂温升所产生的负反应性,同时后备反应性的上限值设置要合理,以满足停堆深度大于 $2.5 mk$ 的要求,即后备反应性在 $4.0 \sim 5.0 mk$ 之间比较合适。表5列出了堆芯冷态临界 $^{235}U$ 装料量、后备反应性和停堆深度的蒙特卡罗计算结果,表5中的后备反应性是中心控制棒、安全棒全部提出堆芯后的过剩反应性,停堆深度是中心控制棒、安全棒全部插入堆芯的次临界度,计算时两根镉调节器均插入堆芯。

由表5计算结果可知,在堆芯装载308根燃料元件且侧铍环内安装2根镉调节器时,堆芯后备反应性和停堆深度均满足工程设计要求,与侧铍环内安装1根镉调节器时的燃料装载量相差6根,若考虑1根镉调节器 $3.97 mk$ 负反应性所带来的影响,实际燃料装载量仅相差3根左右,即理论计算值和实验测量值符合一致。

表5 冷态临界堆芯<sup>235</sup>U装料量、后备反应性和停堆深度的蒙特卡罗计算结果

Table 5 The Monte Carlo calculation results of <sup>235</sup>U loading quantity, excess reactivity and shutdown margin of coolant critical reactor

燃料元件数/根	控制棒棒位		<sup>235</sup> U装料量/g	后备反应性/mk	停堆深度/mk
理论	310	中心控制棒底位 安全棒顶位 2根镉调节器底位	1 203.75	6.70 ± 0.48	4.87 ± 0.47
计算值	308	中心控制棒 70 mm 安全棒顶位 2根镉调节器底位	1 195.98	4.66 ± 0.46	6.90 ± 0.47
实验	296.8	无中心控制棒、安全棒和镉调节器	1 145.97	0.0	0.0
测量值 <sup>[6]</sup>	302	中心控制棒 65 mm 安全棒顶位 1根镉调节器底位	1 166.05	4.85	5.30

## 4 结语

文章利用蒙特卡罗方法模拟设计了可用作医院中子照射器的低浓铀堆芯的堆芯结构布置、 $N_H/N_5$ 比、<sup>235</sup>U临界装载质量、控制棒价值、后备反应性、停堆深度等堆芯关键物理参数,得到满足工程设计要求、寿期达10年且寿期内无需换料、采用低浓化UO<sub>2</sub>燃料元件的IHNI-1堆的物理设计方案,为IHNI-1堆的工程设计提供了参考依据。

### 参考文献

[1] Harnden - Gillis A C, Bennett L G I, Lewis B J. Experiments and analysis of fission product release in HEU - fuelled SLOWPOKE -

2 reactors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1994, 345(3): 520 - 527

[2] Zhou Yongmao. The MNSR Reactor [R]. IAEA - TEC - DOC - 384. Vienna: IAEA, 1987

[3] Hilborn J W, Townes B M. Converting the SLOWPOKE reactor to low - enrichment uranium fuel [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1987, 110(2): 385 - 392

[4] 吕 征, 孙志勇, 王思广. 低浓化微堆拓展应用可行性研究 [J]. 原子能科学技术, 2003, 37(2): 106 - 110

[5] Briesmeister J F. MCNP - A General Monte Carlo N - Particle Transport Code [R]. Ver. 4B, LA - 12625 - M. New Mexico: Los Alamos Scientific Laboratory, 1997

[6] 郑武钦, 李义国. 医院中子照射器零功率实验报告 [R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007

# The physics scheme design for In-Hospital Neutron Irradiator-Mark 1 reactor loaded low-enrichment fuel

Jiang Xinbiao<sup>1</sup>, Zhang Wenshou<sup>1</sup>, Gao Jijin<sup>2</sup>,  
Li Yiguo<sup>2</sup>, Zhou Yongmao<sup>3</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

3. China National Nuclear Corporation, Beijing 100822, China)

[Abstract] The core physics properties of 30 kW In-Hospital Neutron Irradiator-Mark 1 (IHNI-I) reactor loaded low-enrichment fuel are simulated by using MCNP/4B Monte Carlo code. The arrangement scheme of core, <sup>235</sup>U enrichment, control rods' value, excess reactivity and shutdown margin are also reasonably introduced. The results show that the physics scheme of IHNI-I reactor which possesses some particular characteristics, such as high inherent safety, 10 years lifetime without any refueling and low-enrichment UO<sub>2</sub> fuel, has been discovered in the paper and it will provide theoretic basis for reactor engineering design and neutron beam design for Boron Neutron Capture Therapy in the future.

[Key words] IHNI-I reactor; boron neutron capture therapy; reactivity