

# 医院中子照射器 I 型堆超热中子束流孔道的优化设计

江新标<sup>1</sup>, 朱养妮<sup>1</sup>, 赵柱民<sup>1</sup>, 陈立新<sup>1</sup>, 周永茂<sup>2</sup>

(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公司, 北京 100191)

**[摘要]** 采用蒙特卡罗程序 (Monte Carlo neutron and photo transport code, MCNP) 对医院中子照射器 I 型堆 (IHNI-1) 超热中子束流孔道的慢化层、反射层进行了优化设计。首先对 FLUENTIAL、Al 等材料组成的 6 种慢化体方案进行了分析比较, 给出了孔道出口处超热中子通量密度较大的两种设计方案; 基于此两种慢化体设计方案, 在保持束流孔道外框尺寸不变情况下, 对慢化体周围的反射层进行了分析比较, 给出了反射层的推荐方案; 基于慢化体和反射层优化方案, 最后给出了超热中子束流孔道出口处束流参数的空间分布。

**[关键词]** 医院中子照射器 I 型堆; 超热中子束流; 中子通量密度

**[中图分类号]** TL329.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)08-0033-05

## 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<sup>[1]</sup>。由于超热中子束 (0.4 ~ 10 000 eV) 具有以下两个优点:

1) 穿透力强, 能深入到大脑深部;

2) 与热中子相比, 超热中子对正常脑细胞的损伤较小。

因此目前国际上倾向于采用超热中子束来开展 BNCT 研究。超热中子经过人体组织慢化后, 可在人体组织较深部位得到较为理想的热中子, 该热中子可与富集在肿瘤区域的含硼药物中的<sup>10</sup>B 发生核反应, 释放出传能线密度较高的  $\alpha$  粒子和<sup>7</sup>Li 粒子来杀伤肿瘤细胞, 实现肿瘤的二元治疗目的。

医院中子照射器 I 型堆 (IHNI-1) 设计有 BNCT 超热中子束流孔道<sup>[2,3]</sup>, 该孔道最初采用 Al 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为慢化材料来设计超热中子孔道, 其几何结构横截面图如图 1 所示。在设计 BNCT 超热中子束流方面, Al 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 慢化材料的性能不如专用材料 FLUENTIAL<sup>[4]</sup>, 因此, 最初采用 Al 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 慢

化材料设计的超热中子通量密度较小, 约为  $4.58 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 没有达到  $1.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的国际通用要求。因此, 为了进一步提高 IHNI-1 堆超热中子孔道的束流强度, 文章利用 Al、FLUENTIAL 等材料对图 1 中的超热中子束流装置的慢化体进行优化设计。

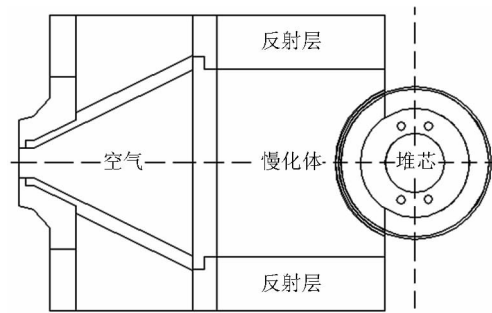


图 1 IHNI-1 堆超热中子束流孔道的几何示意图  
Fig.1 Epithermal neutron duct of IHNI-1 reactor

## 2 IHNI-1 堆超热中子束流孔道慢化体的优化设计及分析

**[收稿日期]** 2012-04-06

**[作者简介]** 江新标 (1967—), 男, 江苏如东县人, 研究员, 博士, 主要研究方向为核能科学与工程; E-mail: jiangxb67@yahoo.com.cn

## 2.1 IHNI-1 堆超热中子束流孔道慢化体优化设计

由于慢化体、反射层材料等对超热中子束流影响较大,因此主要对这两部分的材料和结构进行优化设计。针对图 1 中的慢化体,文章利用 FLUENT 和 AI 材料组合了 6 种不同尺寸不同材料组成的慢化体方案,采用蒙特卡罗程序 (MCNP) 对 IHNI-1 堆超热中子束流孔道的 6 种慢化体方案进行了模拟计算。

## 2.2 计算结果及分析

计算时,堆芯归一化热功率为 30 kW,堆芯产生的中子速度为  $2.5327 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ ,6 种慢化体方案时的超热中子束流孔道出口处 ( $r < 6 \text{ cm}$ ) 束流参数的蒙特卡罗计算结果列于表 1。其中,中子、 $\gamma$  剂量率

采用 ICRU-46 软组织中的 Kerma 因子<sup>[5]</sup> 转换得到。对应于 6 种慢化体方案的孔道出口处 ( $r < 6 \text{ cm}$ ) 超热中子通量密度与原设计值的变化曲线如图 2 所示。

由表 1、图 2 可知,采用方案 4~6 时,孔道出口处的超热中子通量密度均大于 IHNI-1 堆原超热中子孔道的设计值  $4.58 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中,方案 5 孔道出口处的超热中子通量密度  $\varphi_{epi}$  为  $5.93 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,方案 6 的能量密度  $\varphi_{epi}$  为  $6.02 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分别是原设计值的 1.29 倍和 1.31 倍。因此,文章建议 IHNI-1 堆超热中子孔道的慢化体选择方案 5 或方案 6。

下文中的慢化体外围反射层的优化即基于上述两种慢化体优化方案。

表 1 采用 6 种慢化体方案时的超热中子束流孔道出口处束流参数的蒙特卡罗计算结果  
Table 1 The Monte Carlo calculation results of neutron beam parameters at exit of epithermal neutron duct for six moderator schemes

变量	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
$\varphi_{th} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$1.36485 \times 10^7$	$1.57862 \times 10^7$	$1.94814 \times 10^7$	$2.64519 \times 10^7$	$2.68411 \times 10^7$	$2.83680 \times 10^7$
$\varphi_{epi} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.03743 \times 10^8$	$3.60151 \times 10^8$	$4.59397 \times 10^8$	$5.55532 \times 10^8$	$5.91053 \times 10^8$	$6.06335 \times 10^8$
$\varphi_{\gamma} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$1.86578 \times 10^7$	$2.35425 \times 10^7$	$2.66791 \times 10^7$	$3.56571 \times 10^7$	$3.54242 \times 10^7$	$3.55505 \times 10^7$
$\dot{D}_f / (\text{cGy} \cdot \text{s}^{-1})$	$8.31197 \times 10^{-3}$	$1.32784 \times 10^{-2}$	$1.73302 \times 10^{-2}$	$2.75532 \times 10^{-2}$	$3.22275 \times 10^{-2}$	$3.41871 \times 10^{-2}$
$\dot{D}_{\gamma} / (\text{cGy} \cdot \text{s}^{-1})$	$6.11819 \times 10^{-3}$	$8.41449 \times 10^{-3}$	$8.49336 \times 10^{-3}$	$1.16527 \times 10^{-2}$	$1.17413 \times 10^{-2}$	$1.16981 \times 10^{-2}$
$\dot{D}_f / \varphi_{epi} / (\text{cGy} \cdot \text{cm}^2)$	$2.73651 \times 10^{-11}$	$3.68689 \times 10^{-11}$	$3.77238 \times 10^{-11}$	$4.95979 \times 10^{-11}$	$4.90936 \times 10^{-11}$	$5.63832 \times 10^{-11}$
$\dot{D}_{\gamma} / \varphi_{epi} / (\text{cGy} \cdot \text{cm}^2)$	$2.01426 \times 10^{-11}$	$2.33638 \times 10^{-11}$	$1.84881 \times 10^{-11}$	$2.09757 \times 10^{-11}$	$1.89906 \times 10^{-11}$	$1.92931 \times 10^{-11}$
$\varphi_{epi} / \varphi_{th}$	22.25	22.81	23.58	21.00	23.17	21.37

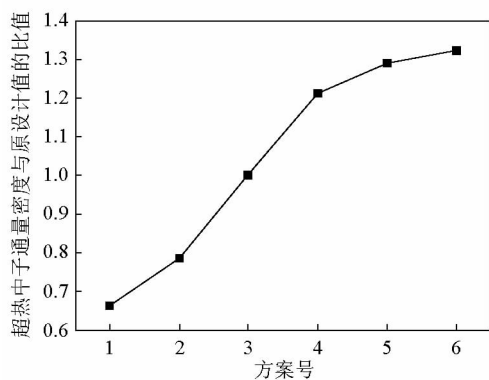


图 2 对应于 6 种慢化体方案的孔道出口处超热中子通量密度与原设计值的比值

Fig. 2 The ratio of calculated epithermal neutron flux density of six new moderator schemes to the value of primary scheme

## 3 反射层的优化设计

### 3.1 不改变慢化体横截面尺寸的反射层优化设计

这里仅对慢化体方案 5 和慢化体方案 6 的反射层进行优化设计,计算中,不改变束流孔道的总体外框尺寸以及慢化体的横截面尺寸,也不改变慢化体材料及其厚度,仅调整反射层中原有的 Pb 层和 B-poly 层的厚度。其束流孔道出口处超热中子通量密度的蒙特卡罗计算结果列于表 2。表 2 中,  $\varphi_{epi,5}$  和  $\varphi_{epi,6}$  分别为对应于慢化体方案 5 和慢化体方案 6 的采用初始反射层方案时的超热中子通量密度的计算值。

表2 不改变慢化体横截面尺寸时,对应于各反射层方案的超热中子通量密度蒙特卡罗计算值

Table 2 The Monte Carlo calculation results of epithermal neutron flux density for every reflector schemes on the condition of unchanging the transverse cross section of moderation layer

调整方案号	慢化体采用方案5		慢化体采用方案6	
	$\varphi_{epi} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_{epi} / \varphi_{epi,5}$	$\varphi_{epi} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_{epi} / \varphi_{epi,6}$
1	$5.92 \times 10^8$	99.737 %	$6.07 \times 10^8$	100.782 %
2	$5.93 \times 10^8$	99.877 %	$6.11 \times 10^8$	101.535 %
3	$5.97 \times 10^8$	100.619 %	$6.17 \times 10^8$	102.557 %
4	$5.93 \times 10^8$	100.000 %	$6.02 \times 10^8$	100.000 %
5	$5.82 \times 10^8$	98.015 %	$6.05 \times 10^8$	100.465 %
6	$5.78 \times 10^8$	97.454 %	$5.93 \times 10^8$	98.605 %
7	$5.73 \times 10^8$	96.553 %	$5.86 \times 10^8$	97.373 %
8	$5.65 \times 10^8$	95.179 %	$5.80 \times 10^8$	96.381 %
9	$5.54 \times 10^8$	93.454 %	$5.76 \times 10^8$	95.784 %

由表2 计算结果可知,仅调整反射层 Pb 和 B - poly 的厚度,出口处超热中子通量密度变化范围在 7 % 以内。采用方案 3 时,束流孔道出口处的超热中子通量密度达到最大值,对应于慢化体方案 5 和慢化体方案 6 的孔道出口处的超热中子通量密度分别为  $5.97 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $6.17 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 仅比初始反射层方案(铅反射层 200 mm、B - poly 反射层 20 mm) 的超热中子通量密度提高 0.6 % 和 2.6 %。因此,在慢化体横截面尺寸保持不变时,仅改变 Pb 反射层和 B - poly 反射层的厚度,对提高束流孔道出口处超热中子通量密度的作用不太明显。

### 3.2 改变慢化体横截面尺寸的反射层优化设计

保持束流孔道的外框尺寸以及 B - poly 反射层的尺寸不变,调整慢化体的横截面尺寸以及 Pb 反射层的厚度,慢化体材料保持不变。其束流孔道出口处超热中子通量密度的蒙特卡罗计算结果列于表 3,束流孔道出口处快中子、 $\gamma$  射线本底干扰与超热中子通量密度的比值如图 3 所示。表 3 中的  $\varphi_{epi,5}$  和  $\varphi_{epi,6}$  分别为对应于慢化体方案 5 和方案 6 的采用初始反射层方案时的超热中子通量密度的计算值。

表3 改变慢化体横截面尺寸时,对应于各反射层方案的超热中子通量密度蒙特卡罗计算值

Table 3 The Monte Carlo calculation results of epithermal neutron flux density for every reflector schemes on the condition of changing the transverse cross section of moderation layer

计算条件	慢化体采用方案5		慢化体采用方案6	
	$\varphi_{epi} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_{epi} / \varphi_{epi,5}$	$\varphi_{epi} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_{epi} / \varphi_{epi,6}$
Pb 反射层厚度/mm				
250	$6.29973 \times 10^8$	106.183 %	$6.54974 \times 10^8$	108.836 %
240	$6.23205 \times 10^8$	105.042 %	$6.48254 \times 10^8$	107.720 %
230	$6.12289 \times 10^8$	103.202 %	$6.34501 \times 10^8$	105.434 %
220	$6.05844 \times 10^8$	102.116 %	$6.32756 \times 10^8$	105.144 %
210	$5.93418 \times 10^8$	100.022 %	$6.16295 \times 10^8$	102.409 %
200	$5.93289 \times 10^8$	100.000 %	$6.01798 \times 10^8$	100.000 %
150	$5.47572 \times 10^8$	92.294 %	$5.61776 \times 10^8$	93.350 %
100	$5.04346 \times 10^8$	85.008 %	$5.13981 \times 10^8$	85.407 %
50	$4.63980 \times 10^8$	78.205 %	$4.72370 \times 10^8$	78.493 %

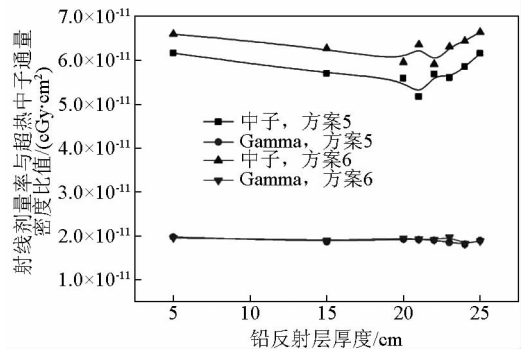


图3 快中子和  $\gamma$  射线剂量率与超热中子通量密度的比值随铅反射层厚度的对应关系

Fig. 3 The ratio of fast neutron,  $\gamma$  - ray dose rate to epithermal neutron flux density vs the thickness of lead reflector

由表 3 可知,在保持外围 B - poly 反射层厚度不变时,通过调整慢化体的横截面尺寸以及 Pb 反射层的厚度,可以适当提高束流孔道出口处的超热中子通量密度。铅反射层厚度位于 50 ~ 250 mm 之间时,束流孔道出口处的超热中子通量密度随 Pb

反射层厚度的增加而增加。由图 3 可知,铅反射层厚度位于 50 ~ 250 mm 之间时,软组织中  $\gamma$  射线剂量率与超热中子通量密度的比值均小于  $2 \times 10^{-11} \text{ cGy} \cdot \text{cm}^2$ , 满足水平超热中子束流孔道(射线本底的设计要求。但当铅反射层厚度大于 220 mm 或小于 200 mm 时,快中子本底抬高,而铅反射层厚度位于 200 ~ 220 mm 之间时,快中子本底较小且基本相当。因此,建议铅反射层的厚度选为 220 mm。此时,对应于慢化体方案 5 和方案 6 的超热中子通量密度分别为  $6.05844 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $6.32756 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 分别比初始反射层方案(铅反射层 200 mm、B - poly 反射层 20 mm)的超热中子通量密度提高 2.1 % 和 5.1 %。

#### 4 超热中子束流参数的模拟计算

根据以上优化结果,文章采用慢化体方案 5、Pb 反射层厚度 220 mm、B - poly 反射层厚度不变来模拟计算超热中子束流孔道出口处的束流参数。表 4 给出了超热中子束流孔道出口中心处( $r < 6 \text{ cm}$ )的中子、 $\gamma$  参数的蒙特卡罗计算结果,图 4 和图 5 分别给出了孔道出口处不同网格内( $r < 1 \text{ cm}$ ,  $1 \text{ cm} < r < 2 \text{ cm}$ , ...,  $13 \text{ cm} < r < 14 \text{ cm}$ ,  $14 \text{ cm} < r < 15 \text{ cm}$ )中子、 $\gamma$  通量密度的空间分布以及中子、 $\gamma$  在软组织中的剂量率的空间分布。

表 4 超热中子束流孔道出口中心处( $r < 6 \text{ cm}$ )的中子、 $\gamma$  参数的蒙特卡罗计算结果

Table 4 The Monte Carlo calculation results of neutron and  $\gamma$  parameters at the center exit of epithermal neutron duct

变量	文章计算值	原设计值 <sup>[3]</sup>
$\varphi_{th} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$2.54445 \times 10^7$	$2.08 \times 10^7$
$\varphi_{epi} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$6.05844 \times 10^8$	$4.58 \times 10^8$
$\varphi_f / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$7.40531 \times 10^7$	$5.06 \times 10^7$
$\varphi_\gamma / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.52238 \times 10^7$	$3.07 \times 10^7$
$\dot{D}_f / \varphi_{epi} / (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$5.68721 \times 10^{-13}$	$5.60 \times 10^{-11}$
$\dot{D}_\gamma / \varphi_{epi} / (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$1.89839 \times 10^{-13}$	$1.98 \times 10^{-11}$
$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	0.042	0.045
$J_n^- / (\text{cm}^{-2}/\text{s})$	$5.52412 \times 10^8$	$4.22 \times 10^8$
$J_n^- / \varphi_n$	0.783	0.796

由表 4 计算结果可知,超热中子束流孔道出口中心处( $r < 6 \text{ cm}$ )的超热中子通量密度大于  $6.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 比原设计值高 32 %,伽玛射线本底小于  $2.0 \times 10^{-11} \text{ cGy} \cdot \text{cm}^2$ , 满足设计指标要求,而快中子本底为  $5.68721 \times 10^{-11} \text{ cGy} \cdot \text{cm}^2$ , 与原设计方案  $5.60 \times 10^{-11} \text{ cGy} \cdot \text{cm}^2$  的快中子本底设计值<sup>[3]</sup> 基本保持一致。因此,文章超热中子束流孔道的优化设计取得理想结果。

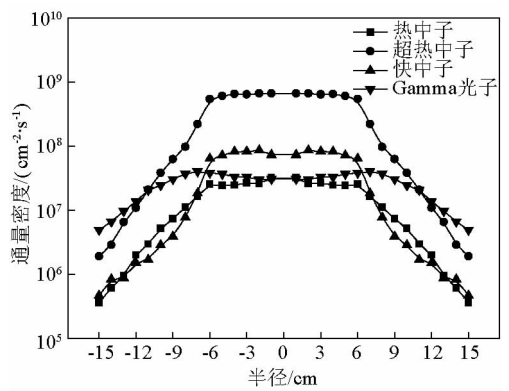


图 4 超热中子束流孔道出口处的中子、Gamma 通量密度的空间分布

Fig. 4 The distribution of neutron and gamma flux density at the exit of epithermal neutron duct

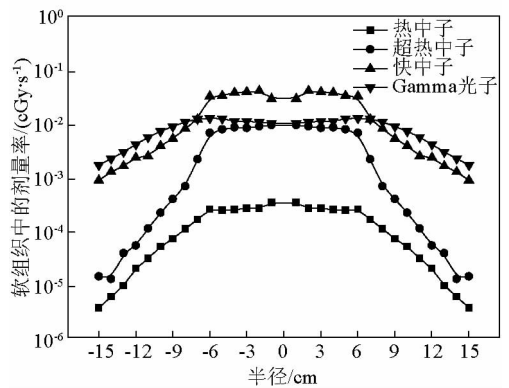


图 5 超热中子束流孔道出口处中子、Gamma 在软组织中剂量率的空间分布

Fig. 5 The space distribution of neutron and gamma dose rate at the exit of epithermal neutron duct

#### 5 结语

文章采用蒙特卡罗程序(MCNP)对医院中子照射器 I 型堆(IHNI - 1)超热中子束流孔道的慢化层、反射层进行了优化设计,并基于慢化体和反射层的优化方案,模拟给出了超热中子束流孔道出口处的束流参数。从计算结果看,在快中子、 $\gamma$  本底保持不变的情况下,虽然采用优化方案可以提高超热中子通量密度 32 %,但仍小于  $1.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的设计指标,且快中子本底偏高,因此要想得到更为理想的超热中子束流,需要进一步提高 IHNI - 1 堆的功率水平且设计布局更合理的垂直超热中子束流孔道。

## 参考文献

- [1] Moss RL, 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 Xinbiao, Zhu Yangni, Gao Jijin, 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, 2006.
- [3] 江新标, 朱养妮. 医院中子照射器 I 型堆 (IHNI - 1) BNCT 中子束的校核计算报告[R]. NINT09 - IHNI - 007. 西安: 西北核技术研究所, 2010.
- [4] J R Venhuizen. INEEL BNCT Research Program Annual Report, CY - 2000 [M]. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel BWXT Idaho, LLC. 2001.
- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements. Photon, Electron, Photon and Neutron Interaction Data for Body Tissues[R]. ICRU - 46. Bethesda: ICRU Publication. 1992.

# Optimization design for the epithermal neutron duct of in-hospital neutron irradiator mark 1 reactor

Jiang Xinbiao<sup>1</sup>, Zhu Yangni<sup>1</sup>, Zhao Zhumin<sup>1</sup>,  
Chen Lixin<sup>1</sup>, Zhou Yongmao<sup>2</sup>

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

**[Abstract]** Optimization design for the moderation layer and reflection layer of the epithermal neutron duct at in-hospital neutron irradiator mark 1 (IHNI-1) reactor is carried out by using MCNP in this paper. Firstly, six moderator schemes combined with FLUENTIAL are compared with Al materials, and two moderation optimization schemes which can obtain intensive epithermal neutron flux density at exit of this duct are chosen. Secondly, based on these two moderation schemes, the optimization design for reflectors around the moderator is introduced, and the recommended reflector schemes are given. Finally, based on the moderation layer and reflection layer optimization schemes, the neutron and gamma space distribution of the epithermal neutron beam at exit of this duct are detailed calculated.

**[Key words]** IHNI-1 reactor; epithermal neutron beam; neutron flux density