

医院中子照射器试运行

李义国^{1,2}, 彭 旦¹, 邹淑芸¹, 吴小波¹, 张金花¹,
张紫竹¹, 夏 普¹, 左晓艳², 刘 彤², 周永茂³

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 北京凯伯特科技有限公司, 北京 102413;
3. 中国核工业集团中原对外工程有限公司, 北京 100191)

[摘要] 医院中子照射器及其辅助系统于2010年年初完成热调试试验, 随后投入试运行至今, 共开堆99次(天), 累积释放能量1 832.42 kW·h (折合积分中子注量为 $2.1989 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$)。试运行期间实验数据显示, 医院中子照射器及其辅助系统满足规定的运行限值和条件, 未发生任何事故, 具有很好的安全性与可靠性, 达到了设计要求。

[关键词] 医院中子照射器; 试运行; 限值和条件

[中图分类号] TL374.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)08-0023-05

1 前言

医院中子照射器(in-hospital neutron irradiator, IHNI)^[1]反应堆为罐-池式结构, 额定热功率为30 kW, 采用富集度为12.5%的二氧化铀作为燃料, 以Zr-4为包壳作为燃料元件, 用轻水作慢化剂和冷却剂, 以金属铍作反射层。由去离子水通过自然循环方式冷却堆芯并与池水进行热交换, 在堆芯相对两侧设有热中子束流和超热中子束流, 见图1。医院中子照射器厂房为三层建筑, 其中地下一层, 地上两层。堆芯位于地下一层, 在堆芯的两侧有两个病人治疗照射室, 在治疗房间外设有观察室。其中两个治疗照射室为控制区, 观察室为监督区。

2 辅助系统

2.1 控制系统

控制系统由控制棒(中心控制棒、辅助控制棒和反应性调节器)、控制棒传动机构、控制单元和计

算机组成(见图2), 用于医院中子照射器的启动、稳定功率运行、正常停堆和紧急停堆, 并能显示运行参数、提供警告信号和紧急停堆信号。

2.2 净化系统

医院中子照射器设有堆水和池水净化系统, 利用树脂离子交换法净化水质, 确保堆水和池水水质满足设计要求, 防止堆芯结构材料和水池衬里的腐蚀, 其流程图见图3和图4。为防止反应堆正常运行时积聚堆容器壳体上部空间的氢气浓度过高和元件破损时放射性裂变气体向环境释放, 本堆还设有堆气净化系统(见图5)。

2.3 中子束流装置

医院中子照射器设置两个中子束照射装置, 分别是热中子束照射装置和超热中子束照射装置, 用于中子俘获治疗方法的研究和照射治疗, 另外在热中子束照射装置一侧垂直地引出一个实验用中子束流装置, 用于实时分析患者肿瘤组织和血液中¹⁰B浓度。

[收稿日期] 2012-05-28

[作者简介] 李义国(1964—), 男, 山东莱西县人, 研究员, 研究方向为反应堆物理; E-mail: ygli@ciae.ac.cn

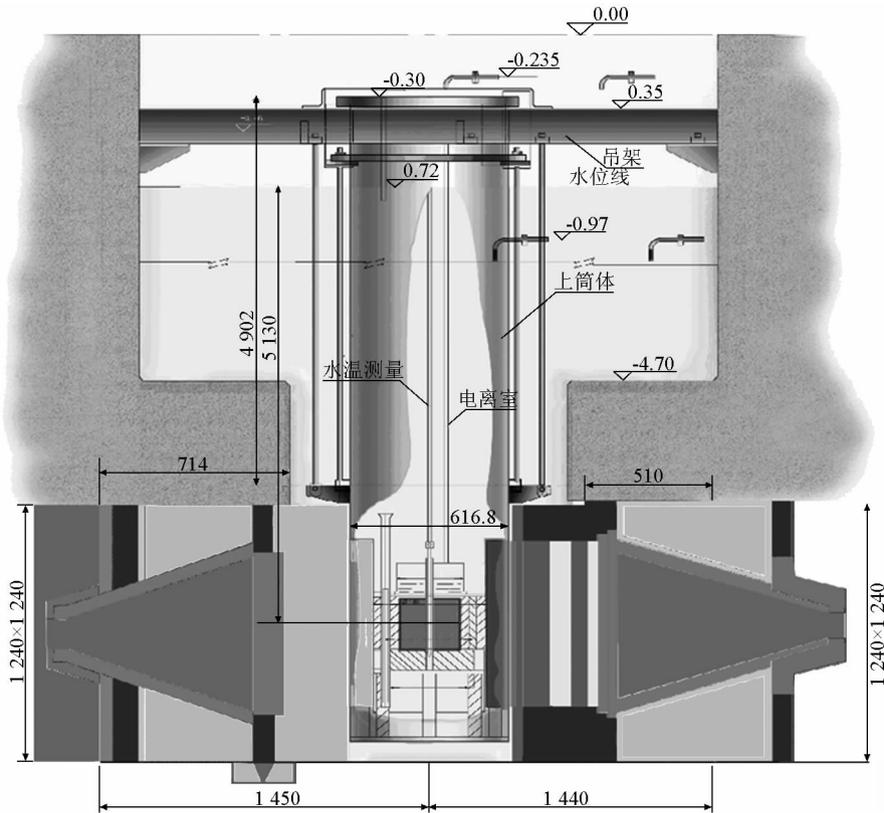


图1 医院中子照射示意图 (单位:mm)

Fig.1 Cross section of IHNI (unit:mm)

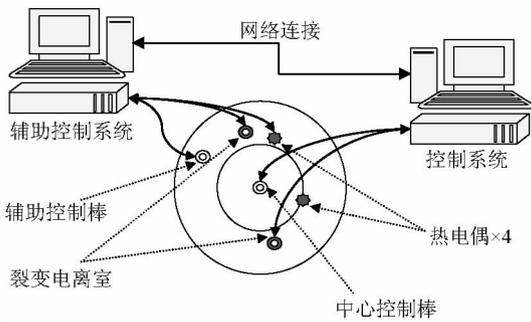


图2 医院中子照射器控制系统示意图

Fig.2 Control system of IHNI

表1 IHNI 满功率时运行参数

Table 1 Operating parameters of IHNI at full power

时间	中心控 制棒 棒位/mm	堆芯中子 注量率 $/(cm^{-2} \cdot s^{-1})$	入口温度 / $^{\circ}C$	出口温度 / $^{\circ}C$	进出口 温差/ $^{\circ}C$
9:00	147.8	1.002×10^{12}	20.3	41.1	20.8
10:00	166.8	1.001×10^{12}	27.3	49.1	21.8
11:00	176.6	1.002×10^{12}	29.7	48.0	18.3
12:00	182.7	1.009×10^{12}	30.7	52.0	21.3
13:00	185.7	1.001×10^{12}	30.8	49.0	18.2
14:00	193.3	1.003×10^{12}	31.4	50.8	19.4
15:00	194.9	9.974×10^{11}	31.6	47.4	16.1
16:00	198.4	9.984×10^{11}	31.7	50.2	18.5
17:00	205.9	9.984×10^{11}	32.4	52.2	19.8
18:00	214.3	1.000×10^{12}	32.5	50.6	18.1
19:00	220.0	1.000×10^{12}	32.6	50.2	17.6
20:00	229.0	1.003×10^{12}	33.1	49.9	17.2
21:00	239.5	1.001×10^{12}	33.4	52.4	19.0

注:限值为堆芯中子注量率 $\leq 1.2 \times 10^{12} cm^{-2} \cdot s^{-1}$; 温差 $\leq 23^{\circ}C$

3 试运行情况

3.1 医院中子照射器运行情况

医院中子照射器满功率(30 kW)运行时主要运行参数,如中子注量率、堆芯冷却剂的进出口温差等见表1。

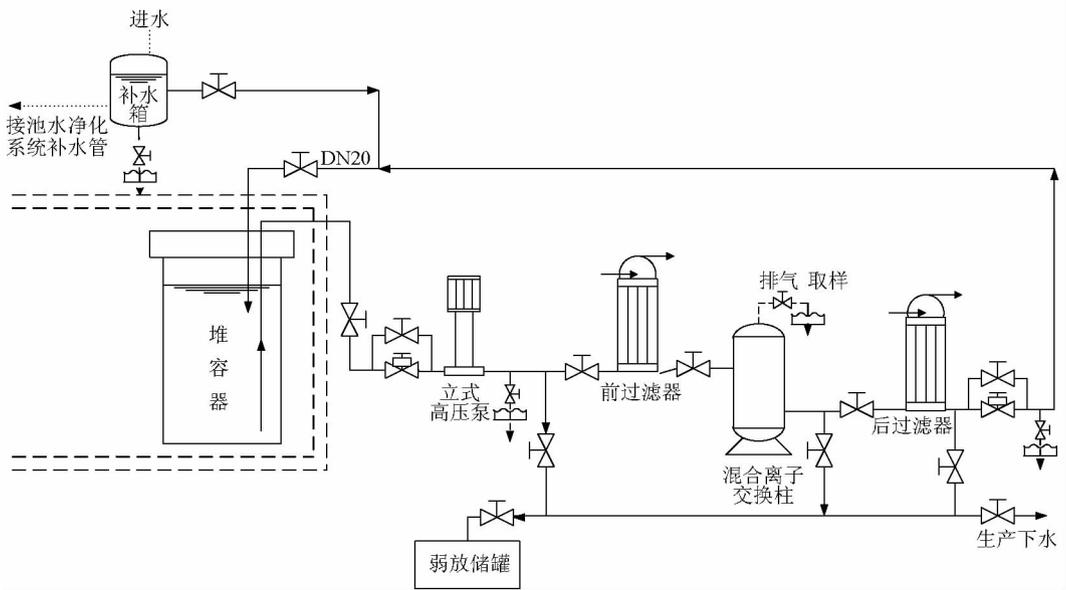


图3 堆水净化系统

Fig. 3 Purification system of reactor water

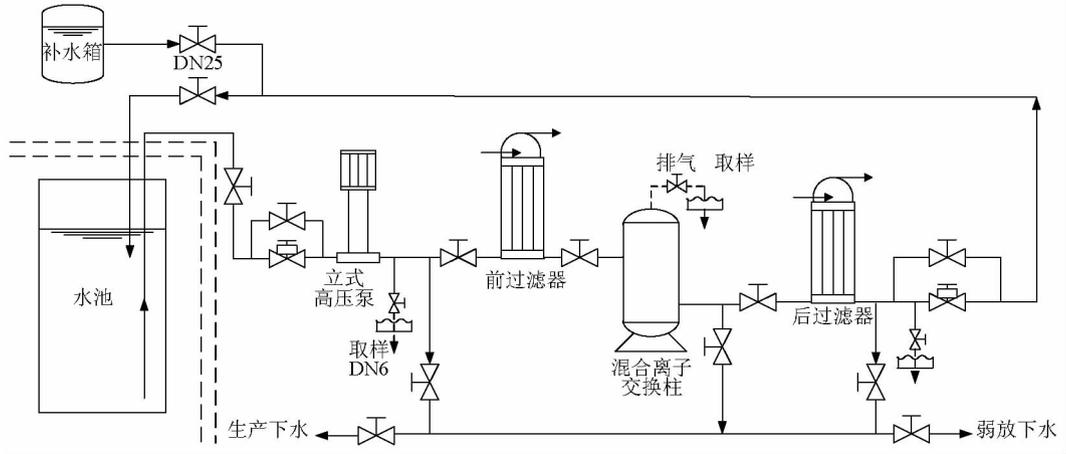


图4 池水净化系统

Fig. 4 Purification system of pool water

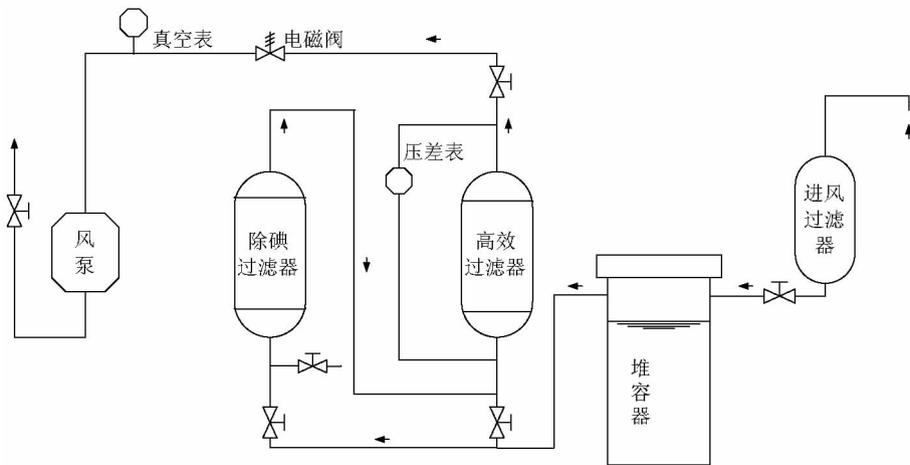


图5 堆气净化系统

Fig. 5 Purification system of reactor gas

3.2 水净化运行情况

堆水和池水水质监测值见表 2,水质指标要求见表 3。

表 2 12 个月堆水和池水的电导和 pH 值

Table 2 Conduct and pH values of reactor water and pool water in 12 months

月份	电导值/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)		pH 值	
	堆水	池水	堆水	池水
1 *	0.57	1.09	6.0	5.8
2 *	0.57	0.90	6.1	6.1
3 *	0.86	0.48	6.1	6.1
4 *	0.77	0.43	6.3	6.3
5 *	0.92	1.80	6.4	6.4
6	0.48	1.66	6.2	6.2
7	1.50	1.73	6.2	6.2
8	0.80	0.89	6.1	6.1
9	0.31	0.40	6.1	6.1
10	0.15	0.29	6.1	6.1
11	0.49	0.95	6.1	6.1
12	0.42	0.74	6.1	6.1

注:表中 * 表示 2011 年的月份,其余表示 2010 年的月份

表 3 堆水和池水的水质指标

Table 3 Indices of water quality of reactor water and pool water

参数	堆水	池水
电导率/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	≤ 2	≤ 3
pH(25 °C)	6.0 ± 0.5	6.0 ± 0.5
固体总量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 5	≤ 5
Cl^- 离子/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.1	≤ 0.1
Cu^{++} 离子/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.05	≤ 0.05

3.3 辐射监测^[2]

停堆和满功率运行时,由北京辐射安全技术中心对医院中子照射器厂房内外不同位置剂量进行监测,监测数据见表 4。

表 4 各工艺房间辐射水平

Table 4 The dose rate of γ and neutron at different rooms

测点位置	γ 辐射空气吸收剂量率/($\text{nSv} \cdot \text{h}^{-1}$)		中子当量剂量率/($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)		辐射区域划分
	满功率	停堆	满功率	停堆	
通风室中部	372.9	105.9	< LLD	< LLD	监督区
水处理室中部	320.1	116.6	< LLD	< LLD	监督区
观察室门外	126.1	119.2	< LLD	< LLD	监督区
热中子照射室门外	256.7	103.8	< LLD	< LLD	监督区

测点位置	γ 辐射空气吸收剂量率/($\text{nSv} \cdot \text{h}^{-1}$)		中子当量剂量率/($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)		辐射区域划分
	满功率	停堆	满功率	停堆	
超热中子照射室门外	108.7	87.6	< LLD	< LLD	监督区
控制室	136.7	112.8	0.050	< LLD	监督区
堆厅外走廊中部	142.6	121.3	0.030	< LLD	监督区
堆厅南侧	958.3	119.8	0.040	< LLD	监督区
堆气净化间中部	126.6	124.0	< LLD	< LLD	监督区
制冷机组房	132.3	123.4	0.030	< LLD	监督区
厂房外厂区内	84.2	83.7	< LLD	< LLD	—
北坊村	77.9	70.2	< LLD	< LLD	—

注:仪器探测限(lower limit of detection, LLD)为 30 nSv/h;监督区:剂量率 $\leq 7.5 \mu\text{Sv/h}$

4 结语

医院中子照射器试运行过程中,其运行参数满足运行限值要求,未发生超出限值情况;堆水和池水净化系统能够满足水质指标要求;满功率运行时,厂房内外剂量监测结果满足设计分区剂量要求,在正常运行时,工作人员和公众有效剂量分别为 $218.32 \mu\text{Sv/a}$ 和 $9.17 \mu\text{Sv/a}$,远低于职业照射剂量的约束值(20 mSv/a)和公众的剂量管理目标值(0.01 mSv/a)。试运行情况表明,医院中子照射器及其辅助控制系统的运行参数和条件一直保持在运行限值及条件范围内,具备正式运行的能力和条件。

参考文献

- [1] 李义国,夏 普,高集金. 医院中子照射器-I[J]. 核动力工程,2006(4):28-29.
- [2] 吕红宁. 医院中子照射器项目环保验收监测[R]. 北京:北京辐射安全技术中心,2011.

Test operation of in-hospital neutron irradiator

Li Yiguo^{1,2}, Peng Dan¹, Zou Shuyun¹, Wu Xiaobo¹,
Zhang Jinhua¹, Zhang Zizhu¹, Xia Pu¹, Zuo Xiaoyan²,
Liu Tong², Zhou Yongmao³

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 2. Beijing Capture Technology Co. Ltd., Beijing 102413, China; 3. China Zhongyuan Engineering Corporation, China National Nuclear Corporation, Beijing 100191, China)

[**Abstract**] In 2010, the commissioning of in-hospital neutron irradiator (IHNI) and its systems were completed. The operation with power started since then. The IHNI has operated by 99 times. The release of total energy is 1 832.42 kW · h with the corresponding integral neutron flux of $2.1989 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. The test operation data shows that the operation values of IHNI and its relevant systems are smaller than the limited value, which manifests that IHNI is safe and reliable.

[**Key words**] in-hospital neutron irradiator (IHNI); test operation; limited value and condition

(上接 22 页)

Performance and characteristic of in-hospital neutron irradiator

Li Yiguo^{1,2}, Xia Pu¹, Peng Dan¹, Zou Shuyun¹, Wu Xiaobo¹,
Zhang Jinhua¹, Zhang Zizhu¹, Gao Jijin², Wang Liyu²,
Fu Jinshu², Liu Tong², Zhou Yongmao³

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 2. Beijing Capture Technology Limited Co. Ltd., Beijing 102413, China; 3. China Zhongyuan Engineering Corporation, China National Nuclear Corporation, Beijing 100191, China)

[**Abstract**] The design of in-hospital neutron irradiator (IHNI) and its systems were introduced, and the performance and characteristics of IHNI were described. In order to test the inherent safety of IHNI, the experiment of 4.2 mk reactivity release was done. The experimental results showed that the peak power of IHNI was 85.7 kW at the time of 229 s after 4.2 mk reactivity release, and then, the power decreased owing to the negative temperature coefficient of moderator. The radiation dose rates at different rooms were lower than the standard value.

[**Key words**] in-hospital neutron irradiator (IHNI); boron neutron capture therapy (BNCT); inherent safety