

医用直线加速器机房改建回旋加速器机房的优化设计

周钊匡¹ 刘建功¹ 冯泽臣² 郭支喜³ 张钦富⁴

¹(山西兴新安全生产技术服务有限公司 太原 030008)

²(北京市疾病预防控制中心 北京 100013)

³(山西省卫生健康委监督检查中心 太原 030013)

⁴(河南省职业病医院 郑州 450052)

摘要 针对核医学发展需求,本研究提出将直线加速器机房改建为回旋加速器机房的解决方案。通过理论计算与MCNP (Monte Carlo N-particle transport code) 模拟,评估原重混凝土机房(厚度1.2~2.6 m)对 γ 射线的屏蔽效能,并针对中子辐射提出内壁增设含硼聚乙烯(24~48 cm)的优化方案。结果表明:原有混凝土结构满足 γ 防护要求,选择屏蔽中子效率高、次生 γ 增量少的含硼聚乙烯,经模拟验证剂量率水平较低;采用聚乙烯慢化层与含硼聚乙烯(11%)吸收层组合,有效避免铁矿石骨料的中子活化风险;该方案施工难度低,成本可控,能够实现医疗设施高效再利用。本研究为同类改造提供技术参考,符合我国核医学高质量发展政策需求。

关键词 医用回旋加速器,辐射屏蔽,中子防护,含硼聚乙烯,优化设计

中图分类号 R318.6, TH774

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0076

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0076

引用该文:

周钊匡,刘建功,冯泽臣,等.医用直线加速器机房改建回旋加速器机房的优化设计[J].辐射研究与辐射工艺学报,2026,44(1):010601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0076.

ZHOU Zhaokuang, LIU Jianguo, FENG Zechen, *et al.* Optimal design for the renovation of a medical linear accelerator room into a cyclotron room[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2026, 44(1): 010601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0076.



Optimal design for the renovation of a medical linear accelerator room into a cyclotron room

ZHOU Zhaokuang¹ LIU Jianguo¹ FENG Zechen² GUO Zhixi³ ZHANG QinFu⁴

¹(Shanxi Xingxin Safety Production Technology Service Co., Ltd., Taiyuan 030008, China)

²(Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013, China)

³(Shanxi Provincial Health Supervision and Inspection Center, Taiyuan 030013, China)

⁴(Henan Provincial Occupational Disease Hospital, Zhengzhou 450052, China)

ABSTRACT In response to the development needs of nuclear medicine, this study proposes a solution to convert

基金资助: 2022年度公共卫生领域卫生健康标准评估项目

第一作者: 周钊匡,男,1989年4月出生,2012年于中北大学获学士学位,助理工程师,从事放射防护工作

通信作者: 刘建功,硕士,副研究员, E-mail: liujianguo2005@126.com

收稿日期: 初稿 2025-08-26; 修回 2025-10-14

Supported by Evaluation Project of the Public Health Standard for Health and Hygiene in the Field of Public Health in 2022

First author: ZHOU Zhaokuang (male) was born in April 1989, and obtained his bachelor's degree from North University of China in 2012, assistant engineer, mainly engaged in radiation protection

Corresponding author: LIU Jianguo, master's degree, associate researcher, E-mail: liujianguo2005@126.com

Received 26 August 2025; accepted 14 October 2025

a linear accelerator into a cyclotron room. Through theoretical calculations and MCNP (Monte Carlo N-particle transport code) simulations, we evaluated the shielding effectiveness of the original heavy-concrete structure (1.2 – 2.6 m thick) against γ -rays, and proposed an optimized scheme that adds boron-containing polyethylene (24 – 48 cm) to the inner walls for neutron shielding. The results show that the original concrete structure meets the requirements for γ -ray protection. Simulations verify that selecting boron-containing polyethylene provides high neutron-shielding efficiency with a smaller increase in secondary γ radiation, resulting in lower dose rates. By combining a polyethylene moderator layer with an 11% boron-containing polyethylene absorption layer, the risk of neutron activation from iron-ore aggregates is effectively avoided. This solution involves low construction difficulty and controllable costs, and enables efficient reuse of medical facilities. The study provides technical guidance for similar renovations and supports policy goals for the high-quality development of nuclear medicine in China.

KEYWORDS Medical cyclotron, Radiation shielding, Neutron protection, Boron-containing polyethylene, Optimal-design

CLC R318.6, TH774

2021年, 国家原子能机构联合科技部等7部门正式发布《医用同位素中长期发展规划》(2021–2035年), 标志着我国核医学将迎来快速发展^[1]。回旋加速器作为生产正电子发射断层显像(PET)用放射性药物的关键设备, 备受越来越多人们的关注^[2–4]。PET所用正电子核素均为短半衰期核素, 这是决定能否正常进行临床诊治的首要因素^[5]。为此, 医疗机构愿意购置回旋加速器, 自行制备放射性药物, 以减少流通的中间环节, 保证药物尽快用于临床并有效缓解工作压力。某医院核医学科拟增加PET项目, 将原放疗中心直线加速器机房改造为回旋加速器机房。以此为研究对象, 笔者对机房防护设计方案利弊进行分析, 为此类情况下放射性核素生产的回旋加速器改建提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 选址

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188—2021)^[6]和《核医学放射防护要求》(GBZ 120—2020)^[7]对核医学诊疗场所选址的要求, 本项目设置在建筑物的底层, 设置有相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。某医院规划利用原核医学科(二层结构)和原放疗中心(单层结构), 二者融合为新核医学中心。新核医学中心应避免毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区, 并应与非放射性工作场所有明确的分界隔离。

1.2 辐射源项分析

本项目为拟配置的回旋加速器(10~11 MeV),

选取相同或相近能量加速器厂家(HM-10)给出靶为中心自屏蔽体外参考点处中子和 γ 射线的能量和当量剂量率, 作为计算回旋加速器室屏蔽厚度的依据。因此, 参考点屏蔽体表面1 m处各个方向的 γ 射线和中子剂量率最大值(γ 射线剂量率取55.9 $\mu\text{Sv/h}$, 中子剂量率取112.7 $\mu\text{Sv/h}$), γ 射线和中子能量分别取8 MeV和5 MeV^[8]。

1.3 屏蔽计算参数

参考《放射防护实用手册》^[8], 在参考 r_0 处的中子和 γ 射线剂量当量率分别为 H_n 和 H_γ ($\mu\text{Sv/h}$), 所需屏蔽厚度 X , 在点 R 处中子和 γ 射线剂量当量率的总和 H_R , 见式(1)。

$$H_R = \left[\frac{r_0}{R} \right]^2 \times (H_n \times 10^{-X/\text{TVL}_n} + H_\gamma \times 10^{-X/\text{TVL}_\gamma}) \quad (1)$$

式中: H_R 为加速器墙内侧屏蔽层参考点 R 处中子和 γ 射线剂量当量率的总和, $\mu\text{Sv/h}$; H_γ 为厂家给出定点 r_0 处的 γ 射线剂量当量率, $\mu\text{Sv/h}$; H_n 为厂家给出定点 r_0 处的中子剂量当量率, $\mu\text{Sv/h}$; X 为所需屏蔽厚度, cm; TVL_n 为屏蔽的中子能量相应的什值层; TVL_γ 为屏蔽 γ 射线能量相应的什值层。

1.4 屏蔽设计方案及改进

本项目核素生产区域利用原放疗中心的直线加速器机房、钴疗机房和后装治疗机房, 直线加速器机房拟改建为回旋加速器机房, 其他为热室、质控室等, 场所见图1, 改建设计详见表1。

医院回旋加速器利用原直线加速器机房, 所用的屏蔽材料为富含铁矿物质的重混凝土, 与现有标准GBZ 120—2020^[7]中“回旋加速器机房的建

适应避免采用富含铁矿物质的混凝土,避免混凝土中采用重晶石或铁作为骨料”的要求相矛盾,为

此,需采取相应的措施避免中子对混凝土中骨料特殊物质(钴、镍)的活化。

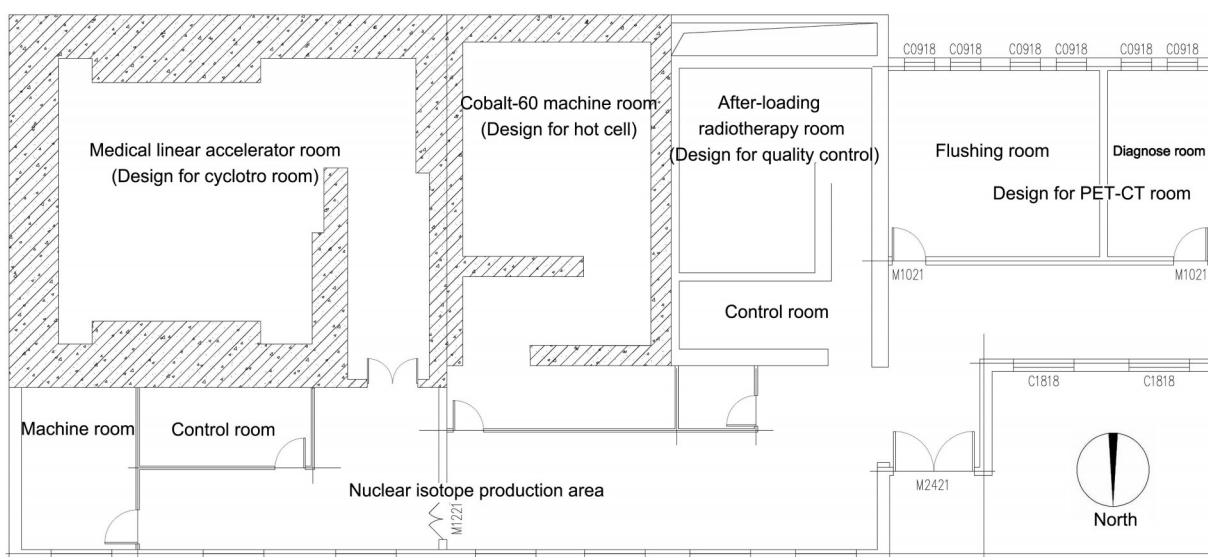


图1 某医院核素生产区域平面示意图(改建前)
Fig.1 Schematic plan of the nuclear isotope production area before the renovation

表1 回旋加速器机房屏蔽改建设计厚度表
Table 1 Design thickness for shielding of the cyclotron accelerator room renovation project

工作场所名称 Name of the workplace	屏蔽层 Shielding layer	辐射类型 Radiation types	原有屏蔽层厚度 / mm Original shielding thickness	拟设计屏蔽层厚度 Proposed design thickness of shielding layer	屏蔽材料 Shielding material
回旋加速器 机房 Cyclotron machine room	东墙 East wall	漏射、散射 Leak, catter	1 450	/②	重混凝土① Heavy concrete
	西墙 West wall		1 050+920	/	
	南墙 South wall		1 880(局部 2 590)	/	
	北墙 North wall		1 880 (Local area 2 590)	/	
			1 280(局部 1 950)	/	
			1 280 (Local area 1 950)	/	
	屋顶 Roof		1 600(局部 2 300)	/	
			1 600 (Local area 2 300)	/	
	地板 Floor		1 600	/	普通混凝土 Ordinary concrete
	防护门 Protective door		6	10	铅 Lead

注:①重混凝土(含铁矿石骨料)的密度为 $3.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,普通混凝土的密度为 $2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,铅的密度为 $1.134 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$,硫酸钡水泥为 3.25 t/m^3 ,铅玻璃窗以铅当量表示,以上资料由医院提供;②"/"表示原有机房未设置或机房未做改动,原有机房门拆除,更换新防护门。

Note: ① The density of heavy concrete (containing iron ore aggregate) is $3.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, that of ordinary concrete is $2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, that of lead is $1.134 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$, that of barium sulfate cement is 3.25 t/m^3 , and that of lead glass windows is expressed in lead equivalents. The above information is provided by the hospital; ② "/" indicates that the original machine room was not set up or the machine room was not modified, the original organic door was removed and replaced with a new protective door.

2 结果

2.1 平面布局

核医学科在原有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 甲亢诊疗基础上,

增加PET诊断、 ^{131}I 甲癌治疗,原放疗中心(直线加速器、钴治疗机、后装治疗机)改建为PET诊断的核素生产区域(回旋加速器、热室、质控室及其他辅助场所),形成相对独立的功能区域,且回旋加速器机房、药物合成热室与质控室3个功能单元有效分隔

且通过药物传递窗进行有效衔接。并能较短距离 运输到注射室，满足相关标准的要求，详见图2。

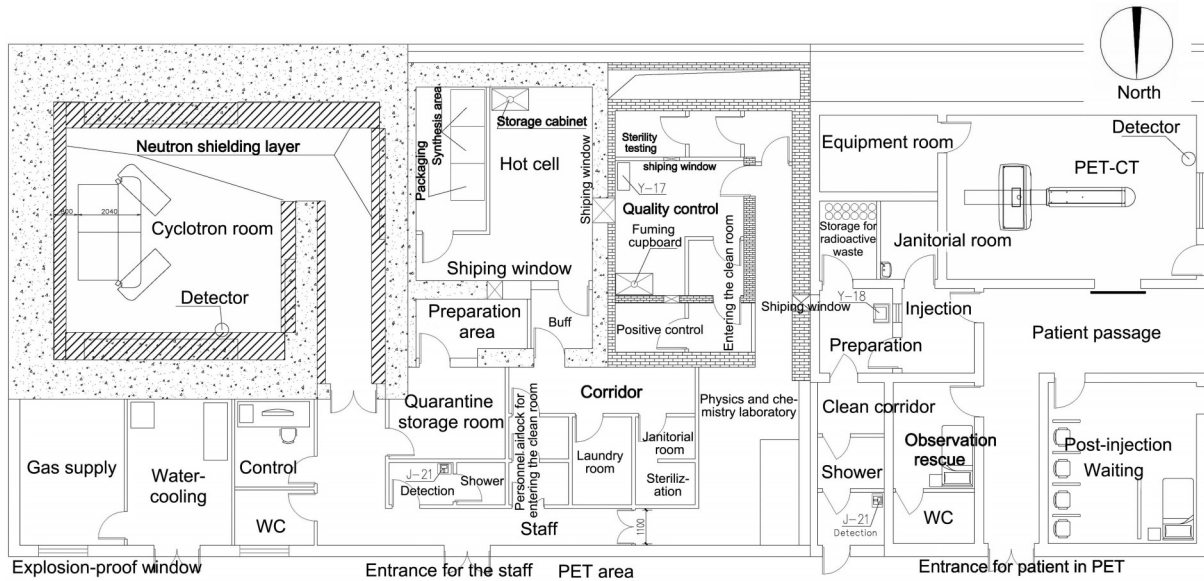


图2 核医学科PET诊断区域改建设计平面布局示意图
Fig.2 Layout plan for the reconstruction design of the PET diagnostic area in the nuclear medicine department

2.2 机房屏蔽材料及计算结果

按上述方法估算求得相应混凝土和防护门屏蔽厚度，经过屏蔽计算与原有直线加速器机房的

屏蔽材料进行比较，四周墙体及屋顶利用原有材料的厚度大于验证计算厚度，防护门在设计基础上增加防中子材料，见表2。

表2 回旋加速器机房验证计算厚度和屏蔽设计厚度对照表
Table 2 Verification calculations for the thickness of the cyclotron room and the design thickness of the shielding

工作场所名称 Name of the workplace	屏蔽层 Shielding layer	关注点剂量率 H_c $/(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$	关注点距离 R / m	原有屏蔽层厚度 / mm Original shielding thickness	验证计算厚度 / mm Verification calculation of thickness	评价 Assessment
回旋加速器机房 Cyclotron machine room	东墙 East wall	2.5	3.6	1 450	280	维持原结构 Maintain the original structure
	西墙 West wall	2.5	10.3	1 050+920	580	
	南墙 South wall	2.5	5.7	1 880(局部2 590) 1 880 (Local area 2 590)	340	
	北墙 North Wall	2.5	6.4	1 280(局部1 950) 1 280 (Local area 1 950)	340	
	屋顶 Roof	2.5	5.75	1 600(局部2 300) 1 600 (Local area 2 300)	580	
	地板 Floor	2.5	/	1 600	560	
	防护门 Protective door	2.5	16.5	10 mm 铅 10 mm lead	10 mm 铅+ 150 mm 聚乙烯 10 mm lead + 150 mm polyethylene	设计不够 Inadequate design

2.3 机房内层改建计算结果

查阅文献、分析标准要求避免骨料为重晶石或铁的内在原理及解决途径，为了屏蔽中子活化

材料引起的放射性核素，参考文献[9-10]在同一材料厚度下观察其中子能谱，整体中子能量选择慢化层聚乙烯，吸收层选择含硼聚乙烯(11%)的屏蔽效果相对最好，中子减少得最多，为93.36%；次

生 γ 增加量最少，为304.36%。为此，选择聚乙烯材料经过屏蔽计算得出，改建回旋加速器机房内南侧墙采用不少于48 cm，北墙不少于32 cm，其他墙面和屋顶内侧不少于24 cm聚乙烯材料或等效材料进行中子的防护，见表3。通过MCNP (Monte

Carlo N-particle transport code) 模拟回旋加速器室内拟设计聚乙烯材料屏蔽后的中子与 γ 射线总周围剂量当量，不同屏蔽材料厚度的中子与 γ 射线总剂量如表4所示。

表3 回旋加速器机房内壁中子防护材料厚度
Table 3 Thickness of the neutron shielding material on the inner walls of the cyclotron accelerator room

屏蔽层 Shielding layer	关注点距离 / m R	1 m处剂量率 / ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) ^① Dose rate at 1 m	验证计算厚度 / cm Verify the calculated thickness
东墙 East wall	3.85	14.1	24
西墙 West wall	4.06	6.7	24
南墙 South wall	3.46	112.7	48
北墙 North wall	3.48	30.3	32
屋顶 Roof	5.75	14.4	24

注：①1 m处剂量率数据来源于厂家测试结果。

Note: ① The data of dose rate at 1 m is derived from the manufacturer's test results.

表4 回旋加速器机房内壁中子防护材料的中子与 γ 射线剂量率
Table 4 Total dose of neutrons and gamma rays for the neutron protection materials on the inner walls of the cyclotron machine room

屏蔽层 Shielding layer	1 m处剂量率 / ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) Dose rate at 1 m	验证计算厚度 / cm Verify the calculated thickness	剂量控制水平 / ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) Dose control level
东墙 East wall	14.1	24	0.130
西墙 West wall	6.7	24	0.167
南墙 South wall	112.7	48	0.124
北墙 North wall	30.3	32	0.126

2.4 机房穿墙结果

为了不影响屏蔽效果，进入加速器机房的强弱电桥架、冷水机组和空调冷媒管，利用原直线加速器机房与设备间预留斜60°管道，通风管道利用原有直线加速器机房迷道入口和防护门上方原有管道口，最大程度避免射线泄漏出去。

3 讨论

医用回旋加速器是生产放射性核素的必要设备，使粒子获得高能量后轰击靶物质产生核反应而生产放射性核素^[11-13]。通过改变靶物质可获得不同的放射性核素，主要是通过中子吸收材料将热中子吸收^[14-15]。因此，应选择热中子吸收截面大、俘获 γ 射线、辐射能量低的材料作为热中子吸收材料^[16]。目前，使用的回旋加速器本身具有良好的自屏蔽，内层用于慢化中子并吸收大部分瞬发 γ 辐射，外层用于将中子慢化为热中子，并吸收大部

分热中子及次级 γ 辐射但在运行时产生的放射性核素和伴随产生的中子、中子活化产物及中子在慢化吸收过程中产生的高能 γ 射线能量平均值分别为8 MeV、5 MeV^[17]。

IAEA 147号报告^[18]指出，回旋加速器机房屏蔽材料避免使用含铁矿石的原因是中子对铁矿石中的钴、镍元素活化产生⁶⁰Co。重混凝土是采用密度大的重晶石碎石、砂石、铁矿石等粗细骨料搅拌而成的，表观密度大，防护性能良好的材料。天然钴中⁵⁹Co吸收热中子，经(n, γ)反应生成⁶⁰Co。⁵⁸Ni被中子轰击，经(n,p)反应生成⁵⁸Co，吸收两个中子后生成⁶⁰Co。铁矿石中的⁵⁸Fe中子辐照后，有可能转变为⁵⁹Fe，⁵⁹Fe经过 β -衰变可以变为⁵⁹Co，而⁵⁹Co再接受中子辐照，最终将会生成⁶⁰Co^[9]。重混凝土中可能存在其他的化学元素，当这些元素被回旋加速器靶的中子照射时，可能被激活成为较长寿命放射性核素。另外，混凝土中一些元素被回旋加速器中子或 γ 射线激活，为短半衰期的核

素^[18-19]。

有文献^[20]报道, 自屏蔽机房内自屏蔽体至迷路内口方向(距离设备表面1 m处)的最高剂量率为258 $\mu\text{Sv/h}$, 其中, 中子剂量率为150 $\mu\text{Sv/h}$, γ 射线剂量率为108 $\mu\text{Sv/h}$, 国内任庆余^[3]报道的同系列12 MeV回旋加速器室内中子和 γ 射线最高剂量率分别为85.09 $\mu\text{Sv/h}$ 和96.16 $\mu\text{Sv/h}$, 因此, 回旋加速器机房内中子的防护值得关注, 重混凝土机房内壁增加中子防护材料是一种技术难度小、容易实现的机房改建方法。

4 结论

研究表明, 通过在直线加速器机房中补充中子防护材料(如含硼聚乙烯)进行针对性屏蔽优化, 可有效实现向核医学科回旋加速器机房的适应性改造。原直线加速器机房的重混凝土屏蔽结构(厚度 ≥ 1.2 m)可满足回旋加速器 γ 射线的初级屏蔽需求, 但需针对中子辐射补充含硼聚乙烯(240~480 mm)以吸收快中子并抑制次级 γ 射线^[21-22]。通过MCNP软件验证中子的剂量水平较低, 验证了“重混凝土+中子材料”组合的有效性。该方案为医疗机构提升核医学诊疗能力提供标准化技术路径, 为低能回旋加速器设备的机房改造提供新的思路。本研究结论基于某三甲医院改造项目屏蔽计算与模拟数据, 具体参数需结合设备型号与场地条件调整。

作者贡献声明 周钊匡负责数据测量、数据分析、屏蔽计算、论文撰写及起草论文; 刘建功负责构思设计、论文审核。冯泽臣参与数据分析、计算审核; 郭支喜、张钦富负责数据分析、审核。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 彭述明, 杨宇川, 杨夏, 等. 反应堆产医用同位素及药物的创新发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 224-233. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.02.009.
PENG Shuming, YANG Yuchuan, YANG Xia, *et al.* Innovative development of reactor-produced radionuclides and radiopharmaceuticals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 224-233. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.02.009.
- 2 Roeda D, Kuhnast B, Damont A, *et al.* Synthesis of fluorine-18-labelled TSPO ligands for imaging neuroinflammation with Positron Emission Tomography

[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2012, 134: 107-114. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2011.03.020.

- 3 任庆余, 杨星, 张延华, 等. 医用回旋加速器辐射剂量检测与评价[J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(4): 84-85. DOI: 10.7687/J.ISSN1003-8868 2014.04.084.
REN Qingyu, YANG Xing, ZHANG Yanhua, *et al.* Radiation dose detection and evaluation of medical cyclotron[J]. Medical and Health Equipment, 2014, 35(4): 84-85. DOI: 10.7687/J.ISSN1003-8868 2014.04.084.
- 4 Tan E H. Exploring new frontiers in molecular imaging: Emergence of 68 PET/CT[J]. World Journal of Radiology, 2010, 2(2): 55. DOI: 10.4329/wjr.v2.i2.55.
- 5 马永忠, 万玲, 娄云, 等. 回旋加速器放射性药物生产场所的防护设计与分析[J]. 首都公共卫生, 2013, 7(1): 7-13. DOI: 1673-7830(2013)01-0007-07.
MA Yongzhong, WAN Ling, LOU Yun, *et al.* Design and analysis of protection for radioactive drug production site in cyclotron accelerator[J]. Capital Public Health, 2013, 7(1): 7-13. DOI: 1673-7830(2013)01-0007-07.
- 6 中华人民共和国生态环境部. 核医学辐射防护与安全要求: HJ 1188—2021[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Requirements for radiation protection and safety in nuclear medicine: HJ 1188—2021[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- 7 国家卫生健康委员会. 核医学放射防护要求: GBZ 120—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
National Health Commission of the People's Republic of China. Requirements for radiation protection in nuclear medicine: GBZ 120—2020[S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- 8 赵兰才, 张丹枫, 张翼, 等. 放射防护实用手册[M]. 济南: 济南出版社, 2009: 299-309.
ZHAO Lancai, ZHANG Danfeng, ZHANG Yi, *et al.* Radiation protection user manual[M]. Jinan: Jinan Publishing House, 2009: 299-309.
- 9 叶豪, 胡斌, 张焱, 等. 11 MeV质子回旋加速器自屏蔽体MC模拟设计[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(4): 723-728. DOI: 0258-0934(2022)4-0723-06.
YE Hao, HU Bin, ZHANG Yan, *et al.* MC simulation design of self-shielding body for 11 MeV proton cyclotron[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2022, 42(4): 723-728. DOI: 0258-100934(2022)4-0723-06.
- 10 钦佩, 唐斌, 傅玉川, 等. 低能电子韧致辐射的蒙特卡罗模拟[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2009, 27(6): 337-340.

- QIN Pei, TANG Bin, FU Yuchuan, *et al.* Monte Carlo simulation on the bremsstrahlung of low energy electrons [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2009, **27**(6): 337-340.
- 11 王娟, 郁丹炯, 吴剑, 等. PET-CT工作场所及医用回旋加速器机房辐射水平监测与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2014, **23**(6): 504-505. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.06.010.
- WANG Juan, YU Danjiong, WU Jian, *et al.* Monitoring and analysis of radiation levels in PET-CT workplaces and medical cyclotron accelerator rooms[J]. *Chinese Radiation Hygiene*, 2014, **23**(6): 504-505. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.06.010.
- 12 吴丹芸. 医院PET中心暖通空调系统的设计探讨[J]. *暖通空调*, 2010, **40**(2): 53-56.
- WU Danyun. Discussion on the design of HVAC system for hospital PET center[J]. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*, 2010, **40**(2): 53-56.
- 13 何正中, 李宁, 杨鸿宇, 等. HM-10HC回旋加速器运行时工作人员辐射剂量分析[J]. *中国医疗设备*, 2021, **36**(6): 79-83. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.06.020.
- HE Zhengzhong, LI Ning, YANG Hongyu, *et al.* Analysis of radiation dose for staff during operation of HM-10HC cyclotron accelerator[J]. *Chinese Medical Equipment*, 2021, **36**(6): 79-83. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.06.020.
- 14 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 28-31.
- LI Xinghong. *Radiation protection fundamentals*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982: 28-31.
- 15 石伟娜, 艾尔肯·阿不列木. 医用直线加速器机房辐射屏蔽分析[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2012, **30**(3): 174-177. DOI: 10.11889/j.1000-3434.2012.rj.30.120309.
- SHI Weina, Abulimu·Aierken. Analysis of the shielding design for medical linear accelerator room[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2012, **30**(3): 174-177. DOI: 10.11889/j.1000-3434.2012.rj.30.120309.
- 16 夏益华, 陈凌. 高等电离辐射防护教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 18-22, 110-116.
- XIA Yihua, CHEN Ling. *Advanced ionizing radiation protection course*[M]. Harbin: Harbin University of Engineering Press, 2010: 18-22, 110-116.
- 17 翟自坡, 翟贺争, 陈东辉. Eclipse RD型回旋加速器建设项目职业病危害放射防护检测与评价[J]. *中国辐射卫生*, 2017, **26**(1): 100-102. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2017.01.042.
- ZHAI Zipo, ZHAI Hezheng, CHEN Donghui. Radiation protection detection and evaluation of occupational hazards in Eclipse RD cyclotron construction project[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2017, **26**(1): 100-102. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2017.01.042.
- 18 International Atomic Energy Agency (IAEA). *Cyclotron produced radionuclides: guidelines for setting up a facility* [R]. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2009.
- 19 潘自强. 辐射安全手册[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 158-173.
- PAN Ziqiang. *Radiation safety manual*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 158-173.
- 20 马永忠, 王宏芳, 冯泽臣, 等. 回旋加速器工作场所辐射水平的调查与分析[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2015, **39**(5): 407-411. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2015.05.013.
- MA Yongzhong, WANG Hongfang, FENG Zechen, *et al.* Investigation and analysis of radiation levels in the cyclotron accelerator work area[J]. *International Journal of Radiological Medicine and Nuclear Medicine*, 2015, **39**(5): 407-411. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2015.05.013.
- 21 张磊, 贾铭椿, 龚军军, 等. 中子辐照铅硼聚乙烯致次级 γ 剂量模拟研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2017, **259**(6): 575-579. DOI: 0258-0934(2017)6-0575-05.
- ZHANG Lei, JIA Mingchun, GONG Junjun, *et al.* Simulation study on secondary γ dose caused by neutron irradiation of lead-boron polymethylene[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2017, **259**(6): 575-579. DOI: 0258-0934(2017)6-0575-05.
- 22 罗宇, 李欢, 荣茂凯, 等. ^{225}Ac 使用过程中的辐射防护[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2024, **42**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0067.
- LUO Yu, LI Huan, RONG Maokai, *et al.* Radiation protection during use of ^{225}Ac [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2024, **42**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0067.