

·论著·

回旋加速器工作场所辐射水平的调查与分析

马永忠 王宏芳 冯泽臣 朱维杰 孙亚茹 娄云 万玲 孟庆华 田青香

【摘要】目的 调查回旋加速器工作场所辐射剂量水平及其分布状况,以期更好地指导现场人员的防护并为放射性药物生产场所的屏蔽设计提供技术依据。**方法** 以某医院安装的1台HM-20S型回旋加速器及其放射性药物生产场所为研究对象,使用LiF(Mg, Cu, P)热释光剂量计、CR39中子剂量计、NH-1B中子剂量当量率仪和451B剂量巡测仪测量加速器室内中子和 γ 射线辐射剂量率,并对室外关注点的辐射水平进行验证。**结果** 在质子能量20 MeV、束流100 μ A条件下,回旋加速器自屏蔽体南侧表面中子最高剂量率为北侧表面的63倍、 γ 射线最高剂量率为北侧的6.0倍;机房南墙内表面中子和 γ 射线剂量率分别为北墙内表面的11倍和5.3倍;机房东墙内表面中子和 γ 射线剂量率平均值分别为21 μ Sv/h和45 μ Sv/h,西墙内表面中子和 γ 射线剂量率平均值分别为34 μ Sv/h和69 μ Sv/h。**结论** 回旋加速器室内辐射水平及其分布状况与束流方向和靶位置等因素密切相关,其实测值可用于指导场所的屏蔽设计和人员防护。

【关键词】 回旋加速器;回旋加速器室;辐射剂量;辐射防护

Investigation and analysis of radiation dose levels in a cyclotron room Ma Yongzhong, Wang Hongfang, Feng Zechen, Zhu Weijie, Sun Yaru, Lou Yun, Wan Ling, Meng Qinghua, Tian Qingxiang. Institute of Radiohygiene Protection, Beijing Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100013, China

Corresponding author: Ma Yongzhong, Email: myz0905@126.com

【Abstract】 Objective Levels and distribution of radiation dose in a cyclotron room were investigated to guide protection of personnel against radiation onsite and provide technical basis for the shielding design of workplaces with radioactive drugs. **Methods** A cyclotron HM-20S and the room in a hospital where it was installed were investigated. Several LiF (Mg, Cu, and P) thermoluminescence dosimeters, CR39 neutron dosimeters, a neutron dose equivalent rate meter NH-1B, and a dose survey meter 451 B were used to measure the neutron and gamma radiation dose rates in the cyclotron room. Radiation dose levels outside the room were also validated. **Results** When irradiation conditions were 20 MeV of proton energy and 100 μ A of beam current, the maximum neutron dose rate from the southern surface of the self-shielding body of the equipment was 63 times higher than that from northern surface of the self-shielding body. Additionally, the maximum gamma-ray dose rate of the southern surface was 6.0 times higher than that of the northern surface. Neutron and gamma-ray dose rates measured on the inner surface of the southern wall were 11 and 5.3 times higher than those measured on the inner surface of the northern wall, respectively. In addition, mean values of neutron and gamma-ray radiation dose rates from the inner surface of the eastern wall were 21 and 45 μ Sv/h, correspondingly, whereas those from the western side were 34 and 69 μ Sv/h, respectively. **Conclusion** Levels and distribution of radiation dose in a cyclotron room are closely related to several factors, such as beam direction and target position. Radiation dose values measured onsite can be used to facilitate the shielding design of workplaces and provide radiation safety for personnel.

【Key words】 Cyclotron; Cyclotron room; Radiation dose; Radiation protection

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2015.05.013

作者单位: 100013, 北京市疾病预防控制中心放射卫生防护所

通信作者: 马永忠(Email: myz0905@126.com)

随着核医学显像诊断技术的不断发展, PET的应用越来越普及。回旋加速器作为PET和PET/CT显像用正电子类放射性药物生产的关键设备, 已越

来越多地被人们关注^[1-4]。由于回旋加速器加速粒子能量较高,在进行核素生产时会产生较强的放射性,在加速器室内及其外围场所潜在的辐射危害不容忽视^[5-6]。为了掌握回旋加速器工作场所的辐射剂量水平及其分布状况,为正电子放射性药物的生产提供有效的防护指导,本研究以某医院安装的1台 HM-20S 回旋加速器及其使用场所为研究对象,对加速器工作场所关注位置的辐射剂量水平进行了调查与分析。

1 材料与方法

1.1 研究对象

以某医院安装的1台 HM-20S 型回旋加速器(由日本住友重机械工业株式会社生产)及其放射性药物生产场所为研究对象。加速器及其产生的放射性核素为场所中的主要辐射源项。加速器的主要技术指标:①质子能量:20 MeV;②最大束流:100 μ A;③束功率:2000 W;④离子源为注入 H₂ 的冷潘宁离子源;⑤剥离器上的碳膜:50 μ g/cm²;⑥束流引出口:双引出口(每口可将离子束引至4个不同的靶位之一)。该加速器带有自屏蔽系统,生产的放射性核素包括¹⁸F、¹¹C、¹³N、¹⁵O、¹²⁴I 和⁶⁴Cu,以¹⁸F 和¹¹C 为主,向南侧照射。

药物生产场所设置于医院门诊楼地下三层(无地下四层),按照放射性药物生产的基本要求设置回旋加速器运行、药物合成分装和质量控制实验等工作区,其中加速器室东侧为地下土层,南侧为过道,西侧为控制室和质控室,北侧为制药热室。具体布局见图1。

加速器室的屏蔽设计:加速器室设置为机房和迷路两部分,机房内安装回旋加速器,并设置迷路减少入口的散射辐射并降低防护门的负担。加速器室外围的防护墙均采取60 cm 砼屏蔽,迷路内墙为30 cm 砼,防护门为10 mm 铅+100 mm 聚乙烯。

1.2 测量方法

1.2.1 测量位点设置

回旋加速器室平面布局及场所测量点设置方案见图1。在加速器机房内,设置回旋加速器设备自屏蔽体表面测量点9个,其中E11、E12、E13为自屏蔽体东侧表面测量位点,S11、S12为自屏蔽体南侧表面测量位点,W1、W2为自屏蔽体西侧表面测量位点,N11、N12为自屏蔽体北侧表面测

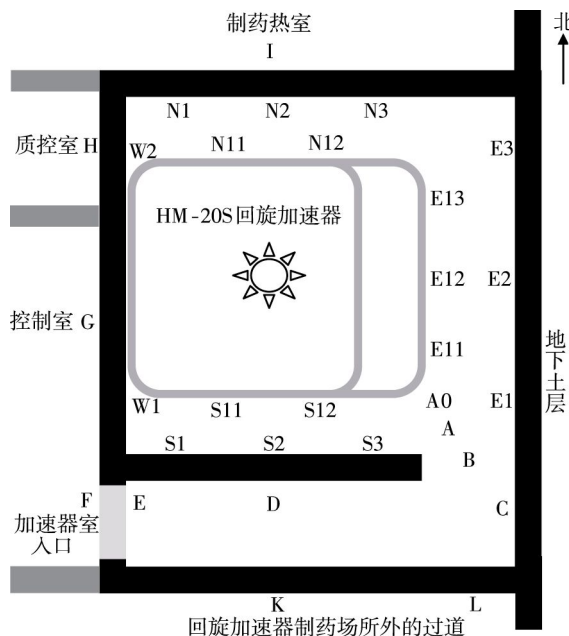


图1 回旋加速器室平面布局及场所测量点设置示意图

Fig.1 The plane layout of Cyclotron room and the measurement points to be set on site

量位点;设置机房墙内表面测量点11个,包括东墙内表面3个点(E1、E2、E3),南墙内表面3个点(S1、S2、S3),西墙内表面2个点(W1、W2)和北墙内表面3个点(N1、N2、N3);在机房内东南端迷路内口方向,设置与设备自屏蔽体表面不同距离的4个测量点(A0、A、B、C);从迷路内口至加速器室入口方向设置3个测量点(C、D、E),其中测量点C同时作为迷路内及迷路内口拐角关注点;在加速器室外各方向人员可接触区域设置关注点6个,分别为西墙外加速器室入口F点、控制室G点和质控室H点,北墙外制药热室I点,南墙(迷路外墙)外过道L点和K点。所有测量点距离地面为150 cm,相当于靶平面的高度。

1.2.2 加速器自屏蔽体表面和机房内墙表面辐射剂量水平的测量

按照图1测量位点的设置方案,在每个测量点同时设置LiF(Mg, Cu, P)热释光剂量计和CR39中子剂量计,分别测量各位点的中子(n)和 γ 射线剂量,在持续30 d内回旋加速器正常运行出束累积照射48 h,根据测量出的累积剂量和照射时间推算出各位置中子和 γ 射线的周围剂量当量率。

1.2.3 加速器室迷路和室外关注点辐射剂量水平的测量

使用NH-1B中子剂量当量率仪和451B剂量巡

测仪分别测量自屏蔽体表面至迷路内口方向、迷路及室外各关注位置的中子和 γ 射线的周围剂量当量率。

1.3 质量控制措施

(1)在回旋加速器室内测量点的设置中,对每个测量点编制唯一编码并标识,确认剂量计编号与其准确对应。

(2)加速器室内自屏蔽体表面和墙表面每个测量点均采用双元件监测,并留存相应的本底探测器,测量结果取两个元件测读剂量的平均值。迷路内口方向、迷路和室外关注点巡测时,每个点重复测读3次取其平均值。

(3)所用热释光剂量计和CR39中子剂量计,以及中子和 γ 剂量巡测仪均经法定计量部门检定合格,其中热释光剂量计采用 ^{60}Co 放射源刻度,用于 γ 射线的测量,CR39中子剂量计使用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源刻度,用于中子的测量,所测的操作量均为周围剂量当量(率)。

(4)热释光剂量计所用LiF(Mg, Cu, P)探测器预先进行筛选,保证其分散性在3%之内。

2 结果

2.1 回旋加速器自屏蔽体表面辐射剂量水平

HM-20S回旋加速器在30 d监测周期内进行放射性核素 ^{18}F 和 ^{11}C 生产时,质子能量20 MeV、束流100 μA ,累积出束照射48 h。通过LiF(Mg, Cu, P)和CR39的累积照射测量结果,计算出机房内设备自屏蔽体表面的周围剂量当量率($\mu\text{Sv/h}$)。表1中列出了自屏蔽体表面关注位置中子和 γ 射线的周围剂量当量率及其 n/γ 百分比。结果表明,自屏蔽体表面中子剂量率为(0.83~157) $\mu\text{Sv/h}$, γ 射线剂量率为(21.5~142) $\mu\text{Sv/h}$,最高点位于自屏蔽体东南侧表面,即束流前方旁侧,自屏蔽体南侧表面中子最高剂量率为北侧表面的63倍, γ 射线最高剂量率为北侧的6.0倍。根据测量结果同时估算出自屏蔽体表面 n/γ 比值范围为2.19%~111%, n/γ 平均值为50.6%。

2.2 回旋加速器机房内墙表面辐射剂量水平

进行回旋加速器机房内墙表面辐射剂量水平测量时,设备运行条件和出束时间均与自屏蔽体表面辐射剂量水平的测量条件相同。表2中列出了机房内墙表面关注位置中子和 γ 射线的周围剂量当量率及相应位置的 n/γ 百分比。结果表明,机房内墙表

表1 回旋加速器自屏蔽体表面辐射剂量水平

Table 1 The levels of radiation dose from the self-shielding surface of Cyclotron

编号	测量位置描述	辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$)		n/γ (%)
		中子	γ 射线	
E11	回旋加速器东南侧表面	157.00	142.00	111.00
E12	回旋加速器东侧正中表面	30.80	66.00	46.70
E13	回旋加速器东北侧表面	12.10	23.20	52.10
S11	回旋加速器南侧偏西表面	66.70	68.30	97.60
S12	回旋加速器南侧偏东表面	27.30	46.60	58.60
W1	回旋加速器西南侧表面	67.90	98.10	69.20
W2	回旋加速器西北侧表面	0.83	38.00	2.19
N11	回旋加速器北侧偏西表面	2.50	23.80	10.50
N12	回旋加速器北侧偏东表面	1.67	21.50	7.77

注:表中,W1和W2也分别邻近西墙内表面南侧和北侧;现场本底为(0.09~0.13) $\mu\text{Sv/h}$,表中数据含本底。

面中子和 γ 射线剂量率范围分别为(0.83~104) $\mu\text{Sv/h}$ 和(21.4~98.1) $\mu\text{Sv/h}$,剂量率最高点位于东墙中部内表面,墙表面 n/γ 比值范围为2.19%~139%, n/γ 平均值为62.1%。南墙内表面中子和 γ 射线剂量率分别为北侧墙内表面的11倍和5.3倍;东墙内表面中子和 γ 射线剂量率平均值分别为21 $\mu\text{Sv/h}$ 和45 $\mu\text{Sv/h}$,西侧表面 n 和 γ 射线剂量率平均值为34 $\mu\text{Sv/h}$ 和69 $\mu\text{Sv/h}$ 。

表2 回旋加速器机房内墙表面辐射剂量水平

Table 2 The levels of radiation dose from the inner wall surface of Cyclotron room

编号	测量位置描述	与同侧设备 表面中心的 距离(cm)	辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$)		n/γ (%)
			中子	γ 射线	
E1	东墙内表面南侧	253	66.20	64.10	103.00
E2	东墙内表面中部	179	104.00	74.90	139.00
E3	东墙内表面北侧	253	33.80	36.40	92.80
S1	南墙内表面西侧	181	52.30	64.50	81.10
S2	南墙内表面中部	138	43.80	60.10	72.80
S3	南墙内表面东侧	181	42.90	51.60	88.10
W1	西墙南侧表面	0	67.90	98.10	69.20
W2	西墙北侧表面	0	0.83	38.00	2.19
N1	北墙内表面西侧	211	3.54	31.50	11.20
N2	北墙内表面中部	181	1.67	30.90	5.40
N3	北墙内表面东侧	211	3.96	21.40	18.50

注:表中,W1和W2也分别邻近回旋加速器西南侧表面和西北侧表面;现场本底为(0.09~0.13) $\mu\text{Sv/h}$,表中数据含本底。

2.3 回旋加速器室迷路辐射剂量水平

在回旋加速器自屏蔽体至迷路内口、迷路内口

至加速器室入口处,使用 NH-1B 中子剂量当量率仪和 451B 剂量巡测仪分别测量相应位点中子和 γ 射线的周围剂量当量率,结果见表 3。从表 3 可见,机房内加速器自屏蔽体→迷路内口→加速器室入口路径上,关注点中子和 γ 射线剂量率范围分别为(0.15~150) $\mu\text{Sv/h}$ 和(0.70~108) $\mu\text{Sv/h}$, n/γ 比值范围为 21.4%~222%, n/γ 平均值为 110%。

表 3 回旋加速器室迷路辐射剂量水平
Table 3 The levels of radiation dose from the maze of Cyclotron room

编号	测量位置描述	与该侧设备表面中心的距离(cm)	辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$)		n/γ (%)
			中子	γ 射线	
A0	机房内自屏蔽体至迷路内口方向(与束流轴成 45°角)	100	150.00	108.00	139.00
A	机房内自屏蔽体至迷路内口方向(与束流轴成 45°角)	210	110.00	77.00	143.00
B	机房东南角迷路内口(与束流轴成 45°角的方向)	260	94.00	67.00	140.00
C	迷路内口旁侧东墙和南墙表面(迷路拐口)	340	40.00	18.00	222.00
D	迷路内与回旋加速器靶点正对位置	-	0.28	1.26	22.10
E	迷路内回旋加速器室入口处(防护门内)	-	0.15	0.70	21.40

注:表中,“A0”和“A”实际位置在机房内,因其指向迷路内口方向故将相应测量结果归入到本表以便反映迷路辐射剂量水平的变化趋势;“-”表示所测量点位于回旋加速器室的迷路内,测量点与设备表面之间设置有迷路内墙,无需标注测量点与设备表面距离。

2.4 回旋加速器室外关注点的辐射剂量水平

按照图 1 回旋加速器室外测量点设置方案,室外关注点的辐射剂量水平见表 4。

表 4 回旋加速器室外关注点的辐射剂量水平
Table 4 The levels of radiation dose from the attention focus outside Cyclotron room

编号	室外关注点描述	辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	
		中子	γ 射线
F	加速器室入口防护门外(西侧)	N	0.09~0.13
G	回旋加速器控制室(西侧)	N	1.90
H	质控室(西侧)	N	0.60
I	制药热室(北侧)	N	0.40
K	回旋加速器制药场所外的过道(南侧正对迷路内口)	N	0.09~0.13
L	回旋加速器制药场所外的过道(南侧迷路外墙中部)	N	0.09~0.13

注:表中,“N”表示未测出。

3 讨论

本研究中所用 HM-20S 型回旋加速器进行放射性药物生产时,加速器室内的辐射主要来源于加速的粒子束撞击靶而产生的中子和 γ 射线。该回旋加速器以最高 20 MeV 质子、100 μA 束流,照射氧靶生产 ^{18}F 时,中子总产生率为 5.37×10^{12} n/s,中子能量为 0.41 eV~15 MeV;韧致辐射产生率为 8.07×10^{12} 光子/s。根据同类型回旋加速器的相关资料,该设备平均能量中子的剂量转换因子为 $3.4\times 10^{-4} \mu\text{Sv}/(\text{n}\cdot\text{cm}^{-2})$,从理论上估算出回旋加速器运行时产生中子和 γ 射线辐射剂量水平还是相当大的。出于辐射防护安全考虑,设备加装了自屏蔽系统。自屏蔽装置由 2 个屏蔽层组成,内屏蔽层由含环氧树脂和碳硼化合物的高密度铅构成,将高能中子的能量降低至热中子水平,并吸收放射性核素产生的 γ 射线;外屏蔽层为含聚乙烯和碳硼化合物的砼,可通过热中子的弹性碰撞,继续减缓中子的运动,并最终将其吸收,考虑到中子在吸收过程中还会产生不可忽略的次级 γ 射线剂量^[7],所以设置的外层砼还同时将产生的次级 γ 射线的辐射剂量水平减至最小。在加速器自屏蔽功能正常状态下运行时,使用热释光剂量计和 CR39 中子剂量计累积探测自屏蔽体表面和机房内墙表面的 γ 射线和中子的辐射水平,同时结合 γ 射线和中子剂量巡测仪测量迷路及室外关注点的周围剂量当量率,真实反映了回旋加速器工作场所的防护状况。

该回旋加速器自身原有设计目标为:在具有自屏蔽的条件下出束时,距设备表面 1 m 处总的辐射剂量率不高于 15 $\mu\text{Sv/h}$,从而据此初步确定了回旋加速器室的防护屏蔽方案。据报道,较小型回旋加速器通常具有防护效果较好的自屏蔽系统,实测设备壳体外 γ 射线和中子剂量水平仅为生产厂家给出的剂量等高线数值的 1/5~1/10^[5]。而本研究中回旋加速器自屏蔽体外,实测自屏蔽机房内自屏蔽体至迷路内口方向 A0 点(距离设备表面 1m 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 $\mu\text{Sv/h}$,远高于实际提供的剂量率设计目标值,国内报道的同系列 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 $\mu\text{Sv/h}$ ^[2],质子能量虽然低于本加速器,但实测结果也同样反映出了回旋加速器室内存在明

显较高的辐射场,说明设备自屏蔽还可能存在一定的完善空间,同时应进一步加强加速器室内的防护、控制人员进入。该回旋加速器工作场所设置有自屏蔽联锁系统和门机联锁系统等安全设施,在自屏蔽未关闭或出现故障,或加速器室入口防护门未关闭等情况下,均不能运行出束,表明防护措施是可行的。当然,针对回旋加速器室内辐射水平实测值高于设计目标值的情况,还需在进一步分析设备自屏蔽结构的基础上,以多种实验方法进行测量结果验证,以确认室内存在局部较高辐射剂量水平的内在因素。

关于加速器室内剂量分布的特征,无论从自屏蔽体表面,还是机房内墙表面,各方向均存在明显的不同。结合表1和表2的数据分析表明,室内南侧辐射水平明显高于北侧,而东西方向墙内表面辐射水平无明显差异。室内辐射水平及其分布的不同,与靶点位置和束流方向等因素有密切的关系,现场测试时回旋加速器设备内部的南侧靶受到照射,室内南侧为束流方向,所以束流前方的剂量率相对较高。同时需明确的是,机房内 n/γ 比值为回旋加速器的关键防护性能指标之一,与设备生产不同正电子核素所用照射靶的不同而有所差别,而且由于中子和 γ 射线物理特性的差异,在加速器室内不同位置 n/γ 比值也可能存在较大差异。本研究结合自屏蔽体表面、机房内墙表面和迷路辐射水平测量结果可知,该回旋加速器室内 n/γ 比值总体范围为2.19%~222%,整体平均值为74%,以此可通过 γ 射线的辐射剂量水平推算出中子的剂量率,或通过监测中子的辐射水平推算出 γ 射线的剂量率,从而综合反映出回旋加速器室内混合辐射场的强度。

加速器室入口设计有迷路,经散射后入口处的中子平均能量小于0.5 MeV。从表3可知,所测迷路拐口(C)处中子和 γ 射线剂量率分别为30 $\mu\text{Sv/h}$ 和18 $\mu\text{Sv/h}$,取散射因子为0.1,迷路长7.2 m,估算出加速器室入口处中子和 γ 射线剂量率应分别为0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 和0.04 $\mu\text{Sv/h}$,若考虑本底,则现场 γ 射线剂量率应为0.17 $\mu\text{Sv/h}$,表3中给出了该处实测值中子和 γ 射线剂量率分别为0.70 $\mu\text{Sv/h}$ 和0.15 $\mu\text{Sv/h}$ 。针对该量级的辐射剂量率,在入口处仅需设置一般安全门,不需使用屏蔽防护门。而实际上已在该加速器入口设置了含10 mm铅+100 mm聚乙烯的防护门,对迷路散射中子和 γ 射线具有

不低于100倍的衰减效果,所以加速器室入口门外不应探测到来自于迷路的中子和 γ 射线辐射,表4中给出的实测结果也证明了这一点,可见该防护门的屏蔽是过于保守的。另外,结合加速器室内墙表面的辐射剂量率,在表4中描述了室外关注点的实测周围剂量当量率,室内西侧墙面与设备表面贴近,相应西墙外控制室内的剂量率最高,为1.90 $\mu\text{Sv/h}$,北墙外剂量率最高值为0.40 $\mu\text{Sv/h}$,南墙(迷路外墙)外与加速器靶平面距离在4 m以上,且迷路内外墙总屏蔽厚度大于其余方向的屏蔽厚度,故加速器室外其余人员可接触位置剂量率均为现场本底水平。室内辐射水平及分布状况与室外关注点的剂量率实测值存在基本一致的对应关系。为进一步降低加速器室西墙外控制室的辐射水平,设备在机房内的安装位置应尽可能向东侧偏移,以此加大辐射源与西墙外控制室关注点的距离,提高该处辐射剂量水平的距离衰减效果。

总体分析表明,回旋加速器室内设备自屏蔽体南侧表面和南侧墙内表面辐射水平均明显高于北侧,东西两侧辐射水平相近,这是与束流方向和照射靶位置等因素密切相关的。室内辐射水平及分布状况的实测值,可作为回旋加速器室及相关工作场所防护设计的技术依据,并可用于指导人员防护。

参 考 文 献

- [1] Dirk R, Bertrand K, Annelaure D, et al. Synthesis of fluorine-18-labelled TSPO ligands for imaging neuroinflammation with Positron Emission Tomography[J/OL]. J Fluorine Chemistry, 2012, 134: 107-114 [2015-05-20]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022113911000868>.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Tan EH, Goh SW. Exploring new frontiers in molecular imaging: Emergence of ^{68}Ga PET/CT[J]. World J Radiol, 2010, 2(2): 55-67.
- [5] 包宝亮,何玉林,李剑波.自屏蔽回旋加速器辐射剂量测定[J].中国医疗设备,2014,29(1): 122-123.
- [6] IAEA. Applying radiation safety standards in nuclear medicine. IAEA Safety Reports Series No. 40. Vienna: IAEA, 2005.
- [7] 庞健,何小中,荆晓兵,等.正电子发射成像回旋加速器屏蔽材料防护性能[J].强激光与粒子束,2013,25(11): 2981-2985.

(收稿日期: 2015-06-30)