2023-F-056

核技术利用项目

南京同仁医院有限公司
扩建动物影像实验室及放射诊疗
项目环境影响报告表

南京同仁医院有限公司（公章）

2023 年 **7** 月

生态环境部监制

核技术利用项目

南京同仁医院有限公司
扩建动物影像实验室及放射诊疗项目
环境影响报告表

建设单位名称：南京同仁医院有限公司

建设单位法人代表（签名或盖章）：

通讯地址：江苏省南京市江宁经济技术开发区吉印大道

邮政编码：**211102**　　联系人：

电子邮箱：/　　联系电话：



持证人签名：
Signature of the Bearer

管理号：05353243505320171
File No.：

姓名：
Full Name 张斌

性别：
Sex

出生年月：
Date of Birth 320106197504291279

专业类别：
Professional Type 环境评价四科

批准日期：
Approval Date 200505

签发单位盖章：
Issued by

签发日期：2005 年 07 月 22 日
Issued on

本证书由中华人民共和国人事部和国家环境保护总局批准颁发。它表明持证人通过国家统一组织的考试合格，取得环境影响评价工程师的职业资格。

This is to certify that the bearer of the Certificate has passed national examination organized by the Chinese government departments and has obtained qualifications for Environmental Impact Assessment Engineer.

中华人民共和国人事部
approved & authorized
by
Ministry of Personnel
The People's Republic of China

国家环境保护总局
approved & authorized
by
State Environmental Protection Administration
The People's Republic of China

编号：
No.： 0001750

表 1 项目基本情况

<table>
<tr><td colspan="2">建设项目名称</td><td colspan="7">扩建动物影像实验室及放射诊疗项目</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设单位</td><td colspan="7">南京同仁医院有限公司</td></tr>
<tr><td colspan="2">法人代表</td><td>郭美保</td><td>联系人</td><td></td><td>联系电话</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">注册地址</td><td colspan="7">江苏省南京市江宁经济技术开发区吉印大道</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目建设地点</td><td colspan="7">江苏省南京市江宁经济技术开发区吉印大道</td></tr>
<tr><td colspan="2">立项审批部门</td><td colspan="2">/</td><td>批准文号</td><td colspan="3">/</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设项目总投资（万元）</td><td></td><td>项目环保投资（万元）</td><td></td><td>投资比例（环保投资/总投资）</td><td colspan="2">25%</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目性质</td><td colspan="4">□新建 □改建 ☑扩建 □其它</td><td>占地面积（m^2）</td><td>/</td></tr>
<tr><td rowspan="9">应用类型</td><td rowspan="2">放射源</td><td>□销售</td><td colspan="6">□I类 □II类 □III类 □IV类 □V类</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="6">□I类（医疗使用） □II类 □III类 □IV类 ☑V类</td></tr>
<tr><td rowspan="3">非密封放射性物质</td><td>□生产</td><td colspan="6">□制备 PET 用放射性物质</td></tr>
<tr><td>□销售</td><td colspan="6">/</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="6">☑乙 □丙</td></tr>
<tr><td rowspan="3">射线装置</td><td>□生产</td><td colspan="6">□II类 □III类</td></tr>
<tr><td>□销售</td><td colspan="6">□II类 □III类</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="6">☐II类 ☑III类</td></tr>
<tr><td>其它</td><td colspan="7">/</td></tr>
</table>

1 医院基本情况、项目建设规模及任务由来

1.1 医院基本情况

南京同仁医院有限公司位于南京市江宁经济技术开发区吉印大道，是由北京同仁医院发起、同仁医疗产业集团和南京江宁经济技术开发区共同投资兴建的一家三级综合医院。医院占地面积 240 亩，首期建筑面积 12.1 万平方米，设置床位 1200 张，为大众提供便捷、舒适、精准的医疗服务。

南京同仁根生于北京同仁，技术上一脉相承，以三级甲等医院设置要求为发展方向，以耳鼻咽喉头颈外科、眼科优势技术为先导，形成了内、外、妇、儿全面发展的综合医院框架。设有 41 个临床医技科室，其中国家临床重点专科 1 个（耳鼻咽喉头

颈外科），省级临床重点专科 1 个（耳鼻咽喉头颈外科），市级医学重点专科 6 个（耳鼻咽喉头颈外科、眼科、神经内科、医学影像科、麻醉科、医学检验科），设有院士工作站，并于卫生主管部门获批南京同仁耳鼻喉医院、南京同仁儿童医院。

1.2 项目建设规模及任务由来

南京同仁医院有限公司核医学中心位于医院医疗综合楼负一层西南角，核医学中心东部为核素显像区，已环评使用 1 台 SPECT/CT 及 1 台 PET/CT 进行核素显像诊断（原环评批复中 1 台 PET/MR 设备未安装，PET/MR 扫描项目未投入运行），使用的核素为 ^{18}F 及 ^{99m}Tc，该场所的日等效最大操作量为 $3.11\times10^{7}Bq$，为乙级非密封工作场所；核医学中心西部为核素治疗区，已开展甲功测定、甲亢治疗及甲癌治疗（均使用 ^{131}I 核素），共设置 6 间甲癌治疗病房，该场所的日等效最大操作量为 $3.7\times10^{9}Bq$，为乙级非密封工作场所。

为进一步完善医院卫生服务设施，优化医疗资源布局，更好地给周边患者服务，南京同仁医院有限公司拟扩建动物影像实验室及放射诊疗项目，主要包括：

（1）于核医学中心核素显像区外北侧新建动物影像实验室（属于乙级非密封放射性物质工作场所），使用 ^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 共 14 种放射性核素，用于放射性药物的开发和研究；拟配套 1 台小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统，其型号未定，最大管电压不超过 100kV，最大管电流不超过 2mA。

（2）对核医学中心核素显像区内原有的 1 座 PET/MR 机房进行改造，将其改造成心脏 ECT 机房，并拟于心脏 ECT 机房内新增 1 台 Discovery NM 530c 设备（单光子发射计算机断层扫描系统，不含 CT），使用 ^{99m}Tc 放射性药物进行显像检查，心脏 ECT 每日最多进行 5 名病人的扫描，每名病人用药量约为 25mCi。同时还拟配备 2 枚活度为 $7.4\times10^{8}Bq$（20mCi）的 ^{57}Co 线源用于对 Discovery NM 530c 设备进行校准。

于核医学中心核素显像区内新增 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等 7 种核素的治疗，^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等 7 种核素每天门诊量均约为 1 人。

于核医学中心核素显像区内新增 ^{68}GaPET/CT 扫描，^{68}Ga 核素显像诊断门诊量为 10 人/天。扩建后医院拟将原 ^{18}F 核素 PET/CT 显像诊断的门诊量由原先的 20 人/天调整

为 10 人/天，扩建后 PET/CT 每日扫描病人最大量仍保持原环评的 20 人/天不变。

于核医学中心核素显像区内新增 ^{123}I 核素 SPECT/CT 扫描，^{123}I 核素显像诊断门诊量为 3 人/天。扩建后医院拟将原 ^{99m}Tc 核素 SPECT/CT 显像诊断的门诊量由原先的 20 人/天调整为 15 人/天，同时 SPECT/CT 还拟进行 ^{90}Y 树脂微球治疗项目最多 2 名/天病人注射 ^{99m}Tc 药物后的扫描，扩建后 SPECT/CT 每日扫描病人最大量仍保持原环评的 20 人/天不变。

医院在扩建心脏 ECT 机房及 ^{68}Ga、^{123}I 核素的显像诊断后，拟调整 ^{18}F 及 ^{99m}Tc 放射性药物的日等效最大操作量及年使用量。其中，^{18}F 放射性药物的日等效最大操作量拟由原环评的 $1.258\times10^{7}Bq$ 调整为 $3.7\times10^{6}Bq$，年最大用量拟由原环评的 $3.145\times10^{12}Bq$ 调整为 $9.25\times10^{11}Bq$；^{99m}Tc 放射性药物的日等效最大操作量拟由原环评的 $1.85\times10^{7}Bq$ 调整为 $1.888\times10^{7}Bq$（包括三部分：①^{99m}Tc 核素 SPECT/CT 显像诊断日等效最大操作量 $1.388\times10^{7}Bq$；②心脏 ECT 显像诊断日等效最大操作量 $4.625\times10^{6}Bq$；③^{90}Y 树脂微球治疗日等效最大操作量 $3.7\times10^{5}Bq$），年最大用量拟由原环评的 $4.625\times10^{12}Bq$ 调整为 $4.644\times10^{12}Bq$（包括三部分：①^{99m}Tc 核素 SPECT/CT 显像诊断年最大用量 $3.469\times10^{12}Bq$；②心脏 ECT 显像诊断日等效最大操作量 $1.156\times10^{12}Bq$；③^{90}Y 树脂微球治疗日等效最大操作量 $1.85\times10^{10}Bq$）。

（3）于核医学中心核素治疗区内新增 ^{177}Lu 核素治疗，每周进行 1 名 ^{177}Lu 病人治疗。医学中心核素治疗区内原有 6 座 ^{131}I 甲癌治疗病房，现拟将其中的病房 6 作为 ^{177}Lu 核素治疗病房，甲癌病房由 6 间减为 5 间，甲癌治疗病人由原先的每周 6 人调为每周 5 人，甲癌病人日等效最大操作量由 $3.33\times10^{9}Bq$ 调为 $2.775\times10^{9}Bq$，年用量由 $1.665\times10^{12}Bq$ 调为 $1.388\times10^{12}Bq$。

（4）利用医院门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室开展 ^{90}Y 树脂微球治疗项目（DSA2 室的建设项目环境影响评价手续正在履行中），借助 DSA 的血管造影技术将 ^{90}Y 树脂微球通过肝动脉插管直接输注至肿瘤病灶，达到肝癌治疗的目的；并在门诊楼三楼拟设置 1 间 ^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房；^{90}Y 的贮存、质控、分装与扫描依托于医疗综合楼负一层核医学中心核素显像区 SPECT/CT 工作场所。在实施治疗前 7~14 天需使用锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）注入肝动脉，以评估患者是否适合此项治疗，该阶段 ^{99m}Tc 放射性核素单人次使用量为 1~5mCi，^{99m}Tc-MAA 的注射在 DSA 手术室内进行，

核医学中心核素显像区内进行 SPECT/CT 扫描。

（5）拟将核医学中心核素治疗区外的检测室改建为 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴室，并于 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴室内开展 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴治疗；拟将核医学中心核素显像区内运动室改为 ^{32}P 敷贴室，并于 ^{32}P 敷贴室内开展 ^{32}P 敷贴治疗。

以上为本次环评内容，医院本次核技术利用项目情况一览表见下表 1-1：

表 1-1 医院本次核技术利用项目一览表

放射源

序号	放射源名称	数量	总活度（Bq）	类别	工作场所名称	活动种类	环评情况	许可情况
1	^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器	1	1.48×10^{9}	V	医疗综合楼负一层核医学中心核素治疗区敷贴室	使用	新建项目本次环评	未许可
2	^{57}Co（校准源）	2	7.4×10^{8}	V	医疗综合楼负一层核医学中心心脏 ECT 机房	使用	新建项目本次环评	未许可

非密封放射性物质

序号	工作场所等级	核素名称	日等效最大操作量（Bq）	工作场所名称	活动种类	环评情况	许可情况
1	乙级	^{68}Ge（^{68}Ge-^{68}Ga 发生器）	3.7×10^{6}	动物影像实验室	使用	新建项目本次环评	未许可
2		^{68}Ga	1.85×10^{6}		使用	新建项目本次环评	未许可
3		^{64}Cu	1.85×10^{6}		使用	新建项目本次环评	未许可
4		^{89}Zr	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
5		^{123}I	1.85×10^{6}		使用	新建项目本次环评	未许可
6		^{124}I	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
7		^{177}Lu	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
8		^{223}Ra	1.85×10^{8}		使用	新建项目本次环评	未许可
9		^{225}Ac	1.85×10^{8}		使用	新建项目本次环评	未许可
10		^{125}I	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
11		^{90}Y	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
12		^{212}Pb	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
13		^{212}Bi	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
14		^{67}Cu	1.85×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
15		^{227}Th	1.85×10^{8}		使用	新建项目本次环评	未许可

16	乙级	^{99m}Tc (SPECT/CT)	1.388×10^{7}	医疗综合楼负一层核医学中心核素显像区	使用	**已环评**	**已许可**
17		^{99m}Tc (心脏 ECT)	4.625×10^{6}		使用	新建项目本次环评	未许可
18		^{99m}Tc (^{90}Y 微球治疗)	3.7×10^{5}		使用	新建项目本次环评	未许可
19		^{18}F	3.7×10^{6}		使用	**已环评**	**已许可**
20		^{68}Ga	1.85×10^{6}		使用	新建项目本次环评	未许可
21		^{123}I	1.11×10^{6}		使用	新建项目本次环评	未许可
22		^{89}Sr	1.48×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
23		^{223}Ra	3.7×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
24		^{225}Ac	3.7×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
25		^{212}Pb	1.85×10^{6}		使用	新建项目本次环评	未许可
26		^{212}Bi	3.7×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
27		^{67}Cu	1.48×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
28		^{227}Th	3.7×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
29		^{90}Y（微球）	6.0×10^{7}		使用	新建项目本次环评	未许可
30		^{32}P	7.4×10^{7}	核医学中心核素显像区内 ^{32}P 敷贴室	使用	新建项目本次环评	未许可
31	乙级	^{90}Y（微球）	5.0×10^{7}	门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室	使用	新建项目本次环评	未许可
32		^{99m}Tc (^{90}Y 微球治疗)	3.7×10^{5}		使用	新建项目本次环评	未许可
33	乙级	^{131}I（甲癌）	2.775×10^{9}	医疗综合楼负一层核医学中心核素治疗区	使用	**已环评**	**已许可**
34		^{131}I（甲亢）	3.7×10^{8}		使用	**已环评**	**已许可**
35		^{131}I（甲测）	7.4×10^{5}		使用	**已环评**	**已许可**
36		^{177}Lu	7.4×10^{8}		使用	新建项目本次环评	未许可

射线装置

序号	射线装置名称及型号	数量	管电压 kV	管电流 mA	类别	工作场所名称	活动种类	环评情况	许可情况	备注
1	小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统	1	≤100	≤2	III	动物影像实验室	使用	新建项目本次环评	未许可	/
2	Bioggraph mCT S（40）型 PET/CT	1	140	666	III	核医学中心 PET/CT 机房	使用	已环评，批复文号：苏环辐(表)审[2021]13 号	**已许可**	/
3	Symbia Intevo 6 型 SPECT/CT	1	140	350	III	核医学中心 SPECT/CT 机房	使用		**已许可**	/

根据《中华人民共和国环境影响评价法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《建设项目环境保护管理条例》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放

射性同位素与射线装置安全许可管理办法》及《建设项目环境影响评价分类管理名录》等法律法规的规定，本项目动物影像实验室、核医学中心核素显像区、核医学中心核素治疗区及 ^{90}Y 树脂微球治疗工作场所均为乙级非密封放射性物质工作场所，应编制环境影响报告表。受南京同仁医院有限公司委托，江苏玖清玖蓝环保科技有限公司承担该项目的环境影响评价工作。我公司通过资料调研、现场监测、评价分析，编制该项目环境影响报告表。

2 项目周边保护目标及项目选址情况

南京同仁医院有限公司位于南京市江宁经济开发区吉印大道 2007 号，医院东侧依次为长亭街及彩云居（居民区），南侧为吉印大道，西侧为停车场及空地，西北侧依次为空地及康博花园（居民区），康博花园（居民区）。南京同仁医院有限公司地理位置示意见附图 1，医院平面布局及周围环境图见附图 2。

动物影像实验室项目：本项目动物影像实验室拟建于核医学中心核素显像区外北侧。动物影像实验室拟建址东侧为过道、医学工程部仓库、零配件库、麻醉品库、草药库、冷藏库、科教室、办公室、中成药库、阴凉库、扫描间、操作室、预留间、更衣室及报告间等，南侧依次为卫生间、库房、客服中心、核医学中心核素显像区、电梯厅、核医学中心大厅等，西侧依次为排烟机房、核医学中心核素治疗区、净化空调机房、汽车通道、前室、库房、更衣室、淋浴间等，北侧依次为道路、办公室、空调机房、电梯厅、医工部及弱电间等，楼上为疏散出口、过道、挂号收费处、办公室、金库及值班室等，楼下为地下车库。动物影像实验室项目拟建址周围环境图见附图 3，动物影像实验室拟建址楼上、楼下布局图见附图 4 及附图 5。

核医学中心项目：本项目核医学中心位于医院医疗综合楼负一层西南角，核医学中心核素显像区东侧为过道、扫描间、操作间、预留间、等候区、观察室、超声室、胃镜室、心电图室、妇科及就餐区，南侧为室外下沉庭院道路，西侧为库房、客服中心、电梯厅、核医学中心大厅、导医台、空调机房、污洗间、弱电间、新风机房及强电间等，北侧为拟建动物影像实验室，楼上为中央大厅、空调机房及配镜中心，楼下为地下车库；核医学中心核素治疗区东侧为排烟机房、护士站、卫生间、客服中心、电梯厅，南侧依次为卫生间、会议室、门诊检查、门诊治疗、会诊中心、主任办公、诊室、下沉庭院等，西侧依次为楼梯、储物间、电梯前室、走廊、医生值班、护士值班室及土层，北侧为采光井、汽车坡道等，楼上为留观病房、抢救室、值班室、卫生

间、办公室、用餐间、配液室、库房、注射室及输液室等，楼下为地下车库。核医学中心周围环境图见附图 3，核医学中心楼上、楼下布局图见附图 4 及附图 5。

^{90}Y 树脂微球治疗项目：本项目利用医院门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室开展 ^{90}Y 树脂微球治疗项目，^{90}Y 的贮存、质控、分装与扫描依托于医疗综合楼负一层核医学中心核素显像区 SPECT/CT 工作场所。DSA2 室东侧为员工通道，南侧为设备间和洽谈室，西侧为走道，北侧为控制间，楼上为仪器间、一次性物品间及走廊，楼下为走廊、更衣室及净化室。DSA2 室平面及周围环境图见附图 15，DSA 机房楼下及楼上区域图分别见附图 16 及附图 17。

根据本项目特点，结合《辐射环境保护管理导则-核技术利用项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）的相关规定，确定以本项目各场所边界外周围 50m 的范围作为评价范围。根据现场调查可知，本次评价项目所在区域 50m 范围内无居民区、学校等敏感点。因此，本项目保护目标主要为辐射工作人员及辐射工作场所拟建址周围评价范围内的医务人员、患者及患者家属。

3 建设单位已有核技术利用项目许可情况

南京同仁医院有限公司于 2022 年 09 月 05 日已取得辐射安全许可证，证书编号为苏环辐证[01402]，种类和范围：使用Ⅴ类放射源；使用II类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所。有效期至：2025 年 02 月 03 日。医院辐射安全许可证正副本复印件详见附件 3。

医院已有核医学科项目已于 2021 年 5 月通过江苏省生态环境厅的审批，并于 2023 年 4 月完成了项目竣工环保验收，其环评批复复印件及验收意见复印件详见附件 5。

表 2 放射源

序号	核素名称	总活度（Bq）/活度（Bq）×枚数	类别	活动种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
1	^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器	$1.48\times10^{9}\times1$ 枚	V	使用	敷贴治疗	医疗综合楼负一层核医学中心核素治疗区敷贴室	贮存在储源柜中，放置在敷贴室保险柜内	/
/	^{57}Co（校准源）	$7.4\times10^{8}\times2$ 枚	V	使用	心脏 ECT 校准	医疗综合楼负一层核医学中心心脏 ECT 机房	贮存在储源罐中，放置在心脏 ECT 机房的保险柜内	/

注：放射源包括放射性中子源，对其要说明是何种核素以及产生的中子流强度（n/s）。

表 3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量（Bq）	日等效最大操作量（Bq）	年最大用量（Bq）	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	^{68}Ge（^{68}Ge-^{68}Ga 发生器）	液态/中毒	使用	3.7×10^{9}	3.7×10^{6}	3.7×10^{9}/柱×2 柱/年=7.4×10^{9}	科研应用	源的贮存	动物影像实验室	贮存在动物影像实验室的核素标记实验室的热室中
2	^{68}Ga	液态/低毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{6}	2.775×10^{10}	科研应用	简单操作		不贮存，通过 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器淋洗，当天使用。多余的放射性药物连同铅罐一起于废物间 1 内暂存衰变后作为医疗废液处理处置

3	^{64}Cu	液态/低毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{6}	1.85×10^{9}	科研应用	简单操作		不贮存，按需订购，当天用完，暂存于动物影像实验室的热室内
4	^{89}Zr	液态/中毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{7}	1.48×10^{10}	科研应用	简单操作		
5	^{123}I	液态/低毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{6}	9.25×10^{8}	科研应用	简单操作	动物影像实验室	不贮存，按需订购，当天用完，暂存于动物影像实验室的热室内
6	^{124}I	液态/中毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{7}	9.25×10^{8}	科研应用	简单操作		
7	^{177}Lu	液态/中毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{7}	5.55×10^{9}	科研应用	简单操作		
8	^{223}Ra	液态/极毒	使用	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	3.7×10^{7}	科研应用	简单操作		
9	^{225}Ac	液态/极毒	使用	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	5.55×10^{7}	科研应用	简单操作		
10	^{125}I	液态/中毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{7}	3.7×10^{8}	科研应用	简单操作		
11	^{90}Y	液态/中毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{7}	3.7×10^{8}	科研应用	简单操作		
12	^{212}Pb	液态/中毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{7}	9.25×10^{8}	科研应用	简单操作		
13	^{212}Bi	液态/高毒	使用	1.85×10^{7}	1.85×10^{7}	3.7×10^{7}	科研应用	简单操作		
14	^{67}Cu	液态/中毒	使用	1.85×10^{8}	1.85×10^{7}	3.7×10^{8}	科研应用	简单操作		
15	^{227}Th	液态/极毒	使用	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	3.7×10^{7}	科研应用	简单操作		

16	^{99m}Tc（SPECT/CT）	液态/低毒	使用	1.388×10^{10}	1.388×10^{7}	3.469×10^{12}	核素诊断	很简单操作	核医学中心核素显像区	不贮存，按需订购，当天用完，暂存于核医学中心核素显像区分装注射室的手套箱内
17	^{99m}Tc（心脏ECT）	液态/低毒	使用	4.625×10^{9}	4.625×10^{6}	1.156×10^{12}	核素诊断	很简单操作		
18	^{99m}Tc（^{90}Y 微球治疗）	液态/低毒	使用	3.7×10^{8}	3.7×10^{5}	1.85×10^{10}	核素诊断	很简单操作		
19	^{18}F	液态/低毒	使用	3.7×10^{9}	3.7×10^{6}	9.25×10^{11}	核素诊断	很简单操		
20	^{68}Ga	液态/低毒	使用	1.85×10^{9}	1.85×10^{6}	4.625×10^{11}	核素诊断	很简单操		
21	^{123}I	液态/低毒	使用	1.11×10^{9}	1.11×10^{6}	2.775×10^{11}	核素诊断	很简单操		
22	^{89}Sr	液态/中毒	使用	1.48×10^{8}	1.48×10^{7}	3.7×10^{10}	核素治疗	简单操作		
23	^{223}Ra	液态/极毒	使用	3.7×10^{6}	3.7×10^{7}	9.25×10^{8}	核素治疗	简单操作		
24	^{225}Ac	液态/极毒	使用	3.7×10^{6}	3.7×10^{7}	9.25×10^{8}	核素治疗	简单操作		
25	^{212}Pb	液态/中毒	使用	1.85×10^{7}	1.85×10^{6}	4.625×10^{9}	核素治疗	简单操作		
26	^{212}Bi	液态/高毒	使用	3.7×10^{7}	3.7×10^{7}	9.25×10^{9}	核素治疗	简单操作		
27	^{67}Cu	液态/中毒	使用	1.48×10^{8}	1.48×10^{7}	3.7×10^{10}	核素治疗	简单操作		不贮存，按需订购，当天用完，暂存于

28	^{227}Th	液态/极毒	使用	3.7×10^{6}	3.7×10^{7}	9.25×10^{8}	核素治疗	简单操作		
29	^{90}Y（微球）	悬浮液/中毒	使用	6.0×10^{9}	6.0×10^{7}	3.0×10^{11}	抽取、活度测量	很简单操作		
30	^{32}P	液态/中毒	使用	7.4×10^{8}	7.4×10^{7}	1.85×10^{11}	核素治疗	简单操作	核医学中心核素显像区 ^{32}P 敷贴室	
31	^{90}Y（微球）	悬浮液/中毒	使用	5.0×10^{9}	5.0×10^{7}	2.5×10^{11}	介入注射	很简单操	门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室	不贮存，当天用完
32	^{99m}Tc	液态/低毒	使用	3.7×10^{8}	3.7×10^{5}	1.85×10^{10}	介入注射	很简单操作		
33	^{131}I（甲癌）	液态/中毒	使用	2.775×10^{10}	2.775×10^{9}	1.388×10^{12}	核素治疗	简单操作	核医学中心核素治疗区	按需订购，不贮存，暂存于分装室手套箱内
34	^{131}I（甲亢）	液态/中毒	使用	3.7×10^{9}	3.7×10^{8}	9.25×10^{11}	核素治疗	简单操作		
35	^{131}I（甲测）	液态/中毒	使用	7.4×10^{6}	7.4×10^{5}	1.85×10^{9}	核素治疗	简单操作		
36	^{177}Lu	液态/中毒	使用	7.4×10^{9}	7.4×10^{8}	3.7×10^{11}	核素治疗	简单操作		

注：日等效最大操作量和操作方式见《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）。

表 4 射线装置

（一）加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量（MeV）	额定电流（mA）/剂量率（Gy/h）	用途	工作场所	备注
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

（二）X 射线机：包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压（kV）	最大管电流（mA）	用途	工作场所	备注
1	小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统	III	1	未定	≤100	≤2	小动物影像诊断	动物影像实验室	/
2	PET/CT	III	1	Bioggraph mCT S（40）型	140	666	医用诊断	核医学中心 PET/CT 机房	/
3	SPECT/CT	III	1	Symbia Intevo 6 型	140	350	医用诊断	核医学中心 SPECT/CT 机房	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

（三）中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压（kV）	最大靶电流（μA）	中子强度（n/s）	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度（Bq）	贮存方式	数量	
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
退役源	固态	^{57}Co	/	/	/	/	贮存在储源罐中，放置在心脏 ECT 机房的保险柜内	交由原生产厂家回收处置
废 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器	固态	^{68}Ge、^{68}Ga	/	/	约 2 柱	/	暂存于动物影像实验室的动物尸体/废物间中	供应商回收
放射性固废（动物影像实验室、核医学中心、^{90}Y 微球治疗场所内产生的被放射性核素污染的一次性手套、一次性防护服、注射器、西林瓶、输液管、患者体内导管、V 瓶及有机玻璃防护罐、吸水纸、去污用纸、医护人员手套、手术服、口罩、眼罩、有机玻璃盒子、废弃 ^{32}P 敷贴器、湿纸巾、含有动物排泄物的废弃垫料、体内带有放射性核素的动物尸体、组织等）	固态	^{18}F、^{99m}Tc、^{131}I、^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th、^{32}P 等	/	80.42kg	约 965kg	辐射剂量率满足所处环境本底水平，α表面污染小于 0.08Bq/cm^2，β表面污染小于 0.8Bq/cm^2	先分类收集于各非密封放射性物质工作场所内的放射性废物桶内，然后送至各场所的废物间内暂存	所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍，含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天，经监测满足清洁解控要求后作为普通固体废物处理

放射性废水	液态	^{18}F、^{99m}Tc、^{68}Ga、^{123}I	/	约 10.26m^3	约 123.13m^3	总β<10Bq/L	新建衰变池	含 ^{18}F、^{99m}Tc、^{68}Ga、^{123}I 的放射性废水暂存 30 天后可直接解控排放
		^{131}I、^{177}Lu	/	约 17.81m^3	约 213.75m^3	总β不大于 10Bq/L，^{131}I 的放射性活度浓度不大于 10Bq/L	原有衰变池	含 ^{131}I、^{177}Lu 的放射性废水暂存 180 天，达到排放标准后，排放至医院污水处理系统
放射性废气	气体	^{18}F、^{99m}Tc、^{131}I、^{68}Ga、^{177}Lu、^{32}P 等共 18 种放射性核素	/	/	微量	微量	不暂存	经手套箱管道内及屋顶排放口活性炭装置过滤后排放
废活性炭过滤器	固态	^{18}F、^{99m}Tc、^{131}I、^{68}Ga、^{177}Lu、^{32}P 等共 18 种放射性核素	/	/	约 50kg	/	暂存于各非密封放射性物质工作场所的废物间内	暂存时间超过 594 天（^{125}I 核素最长半衰期的 10 倍），经监测满足清洁解控要求后委托有资质的单位处理
臭氧、氮氧化物	气态	/	/	/	/	/	不暂存	通过通风系统排出各机房室，臭氧在大气中 50min 内可自动分解为氧气，对环境影响较小

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/l，固体为 mg/kg，气态为 mg/m^3,年排放总量用 kg。

2.含有放射性的废弃物要注明，其排放浓度用比活度(Bq/l，或 Bq/kg，或 Bq/m^3)，年排放总量分别用 Bq 和 kg。

表 6 评价依据

法规文件	（1）《中华人民共和国环境保护法》（修订版），国家主席令第 9 号，2015 年 1 月 1 日施行 （2）《中华人民共和国环境影响评价法》（2018 修正版），中华人民共和国主席令第 24 号，2018 年 12 月 29 日修订，2018 年 12 月 29 起施行 （3）《中华人民共和国放射性污染防治法》，国家主席令第 6 号，2003 年 10 月 1 日起施行 （4）《建设项目环境保护管理条例》（2017 年修正版），国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日发布施行 （5）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2019 年修正版），国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日公布施行 （6）《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版），生态环境部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日实施 （7）《关于发布放射性废物分类的公告》，环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月 1 日起施行 （8）《关于发布放射源分类办法的公告》，国家环境保护总局公告 2005 年第 62 号，2005 年 12 月 23 日起施行 （9）《关于发布射线装置分类的公告》，原环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年 第 66 号，2017 年 12 月 5 日起施行 （10）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2021 年修正版），生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日施行 （11）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环保部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行 （12）《放射性废物安全管理条例》国务院令第 612 号，2012 年 3 月 1 日起施行 （13）《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》国家环保总局，环发[2006]145 号，2006 年 9 月 26 日起施行 （14）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》生态环境部部令第 9 号，2019 年 11 月 1 日起施行

	（15）《关于发布<建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法>配套文件的公告》生态环境部公告 2019 年第 38 号，2019 年 11 月 1 日起施行 （16）《关于启用环境影响评价信用平台的公告》生态环境部公告第 39 号，2019 年 10 月 25 日印发 （17）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》生态环境部公告 2019 年第 57 号，2020 年 1 月 1 日起施行 （18）《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》环办辐射函[2016]430 号，2016 年 3 月 7 日起施行 （19）《江苏省辐射污染防治条例》（2018 年修正版），江苏省第十三届人民代表大会常委会公告第 2 号，2018 年 5 月 1 日起施行 （20）《江苏省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》，苏政发〔2018〕74 号，2018 年 6 月 9 日 （21）《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》，苏政发〔2020〕1 号，2020 年 1 月 8 日 （22）《省政府关于印发江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知》，苏政发〔2020〕49 号，2020 年 6 月 21 日 （23）《省生态环境厅关于进一步做好建设项目环境影响报告书（表）编制单位监管工作的通知》，苏环办〔2021〕187 号，2021 年 11 月 9 日
技术标准	（1）《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016） （2）《辐射环境保护管理导则-核技术利用项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016） （3）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021） （4）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021） （5）《表面污染测定 第 1 部分β发射体（Eβmax>0.15MeV）和α发射体》（GB/T14056.1-2008） （6）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002） （7）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021） （8）《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020） （9）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）

	（10）《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005） （11）《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）
其它	**与本项目相关附件：** （1）项目委托书（附件 1） （2）放射源、非密封放射性物质及射线装置使用承诺书（附件 2） （3）辐射安全许可证正副本复印件（附件 3） （4）本项目辐射环境现状监测报告复印件（附件 4） （5）环评批复复印件及验收意见复印件（附件 5） （6）2022 年年度检测报告复印件（附件 6） （7）2022 年 3 月~2023 年 3 月个人剂量检测报告复印件（附件 7）

表 7 保护目标与评价标准

评价范围

本项目动物影像实验室及核医学中心工作场所均为乙级非密封放射性物质工作场所，根据《辐射环境保护管理导则-核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）中 1.5 的规定，本项目评价范围确定为动物影像实验室及核医学科乙级工作场所取其半径 50m 的范围。

保护目标

本项目评价范围内不涉及自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74 号）及《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》（苏政发〔2020〕1 号），本项目评价范围不涉及江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域。对照《环境影响评价技术导则 生态影响》（HJ19-2022），本项目评价范围内不涉及受影响的重要物种、生态敏感区以及其他需要保护的物种、种群、生物群落及生态空间等生态保护目标。本次评价项目拟建址周围 50m 范围内均无居民区、学校等敏感点，且评价范围内未涉及《江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案》（苏政发〔2020〕49 号》中划分的环境管控单元中的优先保护单元，本项目的建设符合《江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案》的要求。因此，本项目保护目标主要为辐射工作人员及辐射工作场所拟建址周围评价范围内的医务人员、患者及患者家属。保护目标详见表 7-1。

表 7-1 本项目评价范围内保护目标情况一览表

项目名称	保护目标分类	方位	点位描述	最近距离（m）	规模
动物影像实验室项目	辐射工作人员	/	动物影像实验室内辐射工作人员	0.55m	2 人
	公众	东侧、南侧、西侧、北侧、顶部及底部	院内医务人员、患者、患者家属	2m	80~100 人
核医学中心项目	辐射工作人员	/	控制室、控制区内医务人员	/	8 人
	公众	东侧、南侧、西侧、北侧、顶部及底部	院内医务人员、患者、患者家属	2m	120~130 人
^{90}Y 微球治疗项目	辐射工作人员	/	核医学中心核素显像区内医务人员	/	2 人
			DSA 手术室内及控制室内医务人员	/	3 人
	公众	东侧、南侧、西侧、北侧、顶部及底部	院内医务人员、患者、患者家属	2m	110~130 人

评价标准

1《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）

表 7-2 工作人员职业照射和公众照射剂量限值

	剂量限值
职业照射 剂量限值	工作人员所接受的职业照射水平不应超过下述限值： ①由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv； ②任何一年中的有效剂量，50mSv。
公众照射 剂量限值	实践使公众有关关键人群组的成员所受的平均剂量估计值不应超过下述限值： ①年有效剂量，1mSv； ②特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

11.4.3.2 剂量约束值通常在公众照射剂量限值 10%~30%（即 0.1mSv/a~0.3mSv/a）的范围之内。但剂量约束的使用不应取代最优化要求，剂量约束值只能作为最优化值的上限（见 4.3.4）。

表 7-3 表面污染控制水平单位: Bq/cm²

表面类型		α放射性物质		**β放射性物质**
		极毒性	其它	
工作台、设备、墙壁、地面	控制区 1)	4	4×10^{1}	**4×10^{1}**
	监督区	4×10^{-1}	4	**4**
工作服手套、工作鞋	控制区、监督区	4×10^{-1}	4×10^{-1}	**4**
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-2}	4×10^{-2}	**4×10^{-1}**
1）该区内的高污染子区除外。				

表 7-4 非密封源工作场所的分级

级别	日等效最大操作量/Bq
甲	$>4\times10^{9}$
乙	2×10^{7}~4×10^{9}
丙	豁免活度值以上~2×10^{7}

本项目放射性核素的毒性分组及毒性组别修正因子见表 7-5，与操作方式有关的修正因子见表 7-6。

表 7-5 本项目放射性核素的毒性分组及毒性组别修正因子

毒性组别	放射性核素	毒性组别修正因子
极毒	^{223}Ra、^{225}Ac、^{227}Th	10
高毒	^{212}Bi	1
中毒	^{68}Ge、^{89}Zr、^{90}Y、^{124}I、^{177}Lu、^{125}I、^{131}I、^{212}Pb、^{67}Cu、^{89}Sr、^{32}P	0.1
低毒	^{68}Ga、^{64}Cu、^{123}I、^{18}F、^{99m}Tc	0.01

表7-6 操作方式与放射源状态修正因子

操作方式	放射源状态			
	表面污染水平较低的固体	液体，溶液，悬浮液	表面有污染的固体	气体，蒸汽，粉末，压力很高的液体、固体
源的贮存	1000	100	10	1
很简单操作	100	10	1	0.1
简单操作	10	1	0.1	0.01
特别危险操作	1	0.1	0.01	0.001

2 《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）

5.3.1 辐射工作人员应熟练掌握安全与防护技能，取得相应资质。

5.3.2 辐射工作人员应根据实际需要配备适用、足够和符合标准的个人防护用具（器械、衣具），并掌握其性能和使用方法。个人防护用具应有备份，均应妥善保管，并应对其性能进行检验。

5.3.3 辐射工作场所应具备适当的防护手段与安全措施，做好个人防护工作。

5.3.4 在伴有外照射的工作场所，应做好个人外照射防护，包括β外照射防护。

5.3.5 在任何情况下均不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物件的操作。

3《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）

表7-7 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值（日均值）

序号	控制项目	排放标准	预处理标准
22	总α/（Bq/L）	1	1
23	总β/（Bq/L）	10	10

4《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）

6.3 密闭和通风要求

6.3.1 核医学工作场所应保持良好的通风，工作场所的气流流向应遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

6.3.4 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。

6.3.5 通风橱应有足够的通风能力。制备放射性药物的回旋加速器工作区域、碘-131 治疗病房以及设有通风橱、手套箱等场所的通风系统排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平，α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：

a）所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；

b）所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍；

c）含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天。

7.2.3.2 不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，表面污染水平对β和γ发射体以及低毒性α发射体应小于 4Bq/cm^2、其他α发射体应小于 0.4Bq/cm^2。

7.2.3.3 固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息。

7.3.3.1 对于槽式衰变池贮存方式：

a）所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放；

b）所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（含碘-131 核素的暂存超过 180 天），监测结果经审管部门认可后，按照 GB 18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总α不大于 1Bq/L、总β不大于 10Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10Bq/L。

7.3.3.3 放射性废液的暂存和处理应安排专人负责，并建立废物暂存和处理台账，详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。

7.4 气态放射性废物的管理

7.4.1 产生气态放射性废物的核医学场所应设置独立的通风系统，合理组织工作场所的气流，对排出工作场所的气体进行过滤净化，避免污染工作场所和环境。

7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理。

5《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）

5.1.1 在医疗机构内部区域选择核医学场址，应充分考虑周围场所的安全，不应邻接产科、儿科、食堂等部门，这些部门选址时也应避开核医学场所。尽可能做到相对独立布置或集中设置，宜有单独出、入口，出口不宜设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。

5.1.2 核医学工作场所平面布局设计应遵循如下原则：

a) 使工作场所的外照射水平和污染发生的概率达到尽可能小；

b) 保持影像设备工作场所内较低辐射水平以避免对影像质量的干扰；

c) 在核医学诊疗工作区域，控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门等安全措施，限制患者或受检者的随意流动，保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射；

d) 在分装和给药室的出口处应设计卫生通过间，进行污染检测。

5.1.3 核医学工作场所从功能设置可分为诊断工作场所和治疗工作场所。其功能设置要求如下：

a) 对于单一的诊断工作场所应设置给药前患者或受检者候诊区、放射性药物贮存室、分装给药室（可含质控室）、给药后患者或受检者候诊室(根据放射性核素防护特性分别设置)、质控（样品测量）室、控制室、机房、给药后患者或受检者卫生间和放射性废物储藏室等功能用房；

b) 对于单一的治疗工作场所应设置放射性药物贮存室、分装及药物准备室、给药室、病房（使用非密封源治疗患者）或给药后留观区、给药后患者专用卫生间、值班室和放置急救设施的区域等功能用房；

c) 诊断工作场所和治疗工作场所都需要设置清洁用品储存场所、员工休息室、护士站、更衣室、卫生间、去污淋浴间、抢救室或抢救功能区等辅助用房；

d) 对于综合性的核医学工作场所，部分功能用房和辅助用房可以共同利用；

5.1.4 核医学放射工作场所应划分为控制区和监督区。控制区一般包括使用非密封源核素的房间（放射性药物贮存室、分装及（或）药物准备室、给药室等）、扫描室、给药后候诊室、样品测量室、放射性废物储藏室、病房（使用非密封源治疗患者）、卫生通过间、保洁用品储存场所等。监督区一般包括控制室、员工休息室、更衣室、医务人员卫生间等。应根据 GB18871 的有关规定，结合核医学科的具体情况，对控制区和监督区采取相应管理措施。

5.1.5 核医学工作场所的布局应有助于开展工作，避免无关人员通过。治疗区域和诊断区域应相对分开布置。根据使用放射性药物的种类、形态、特性和活度，确定核医学治疗区(病房)的位置及其放射防护要求，给药室应靠近病房，尽量减少放射性药物和给药后患者或受检者通过非放射性区域。

5.1.6 通过设计合适的时间空间交通模式来控制辐射源（放射性药物、放射性废物、给药后患者或受检者）的活动，给药后患者或受检者与注射放射性药物前患者或受检者不交叉，给药后患者或受检者与工作人员不交叉，人员与放射性药物通道不交叉。合理设置放射性物质运输通道，便于放射性药物、放射性废物的运送和处理；便于放射性污染的清理、清洗等工作的开展。

5.1.7 应通过工作场所平面布局的设计和屏蔽手段，避免附近的辐射源（核医学周边场所内的辐射装置、给药后患者或受检者）对诊断区设备成像、功能检测的影响。

6 操作中的放射防护要求

6.1 个人防护用品、辅助用品及去污用品配备

6.1.1 个人防护用品及去污用品

开展核医学工作的医疗机构应根据工作内容，为工作人员配备合适的防护用品和去污用品(见表 7-8)，其数量应满足开展工作需要。对陪检者应至少配备铅橡胶防护衣。当使用的 ^{99m}Tc 活度

大于 800MBq 时，防护用品的铅当量应不小于 0.5mmPb，个人防护用品及去污用品具体配置见表 7-8；对操作 ^{68}Ga、^{18}F 等正电子放射性药物和 ^{131}I 的场所，此时应考虑其他的防护措施，如：穿戴放射性污染防护服、熟练操作技能、缩短工作时间、使用注射器防护套和先留置注射器留置针等措施。

6.1.2 辅助用品

根据工作内容及实际需要,合理选择使用移动铅屏风、注射器屏蔽套、带有屏蔽的容器、托盘、长柄镊子、分装柜或生物安全柜、屏蔽运输容器/放射性废物桶等辅助用品。

表 7-8 核医学个人防护用品和辅助防护设施配置要求

场所类型	工作人员		患者或受检者
	必备	选备	个人防护用品
普通核医学和 SPECT 场所	铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖	铅橡胶帽、铅玻璃眼镜	-
正电子放射性药物和 ^{131}I 的场所	放射性污染防护服	-	-

7.2.1 接受 ^{131}I 治疗的患者，应在其体内的放射性活度降至 400MBq 或距离患者体表 1m 处的周围剂量当量率不大于 25μSv/h 方可出院，以控制该患者家庭与公众成员可能受到的照射。

6《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）

6.3 X 射线设备机房屏蔽体外剂量水平

6.3.1 机房的辐射屏蔽防护，应满足下列要求：

b) CT 机、乳腺摄影、乳腺 CBCT、口内牙片摄影、牙科全景摄影、牙科全景头颅摄影、口腔 CBCT 和全身骨密度仪机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h；

7 项目管理目标

综合考虑《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）、《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）等评价标准要求：

（1）距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 **2.5μSv/h**，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 **10μSv/h**；放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 **2.5μSv/h**，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量

率小于 **25μSv/h**；

（2）固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 **2.5μSv/h**；

（3）本项目剂量约束值为：职业人员年有效剂量不超过 **5mSv**，公众年有效剂量不超过 **0.1mSv**。

8 参考资料

（1）《辐射防护导论》，方杰主编；

（2）《辐射防护手册》，李德平、潘自强主编；

（3）《放射防护实用手册》，赵兰才、张丹枫编著；

（4）《简明放射性同位素应用手册》，卢玉楷主编；

（5）《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 I）》，辐射防护，2000 年第 20 卷第 3 期，李士骏；

（6）《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 II）》，辐射防护，2000 年第 20 卷第 4 期，李士骏；

（7）《江苏省环境天然贯穿辐射水平调查研究》，辐射防护 第 13 卷第 2 期，1993 年 3 月，江苏省环境监测站。

表 7-9 江苏省环境天然γ辐射水平调查结果（单位：nGy/h）

	原野	道路	室内
测值范围	33.1～72.6	18.1～102.3	50.7~129.4
均值	50.4	47.1	89.2
标准差（s）	7.0	12.3	14.0

注：[1]测量值已扣除宇宙射线响应值。

[2]现状评价时，以“均值±3s”作为参考值：原野为（50.4±21.0）nGy/h；道路为（47.1±36.9）nGy/h；室内为（89.2±42.0）nGy/h。

表 8 环境质量和辐射现状

环境质量和辐射现状

1 项目地理位置及场所位置

南京同仁医院有限公司位于南京市江宁经济开发区吉印大道 2007 号，医院东侧依次为长亭街及彩云居（居民区），南侧为吉印大道，西侧为停车场及空地，西北侧依次为空地及康博花园（居民区），康博花园（居民区）。南京同仁医院有限公司地理位置示意见附图 1，医院平面布局及周围环境图见附图 2。

本项目动物影像实验室拟建于核医学中心核素显像区外北侧。动物影像实验室拟建址东侧为过道、医学工程部仓库、零配件库、麻醉品库、草药库、冷藏库、科教室、办公室、中成药库、阴凉库、扫描间、操作室、预留间、更衣室及报告间等，南侧依次为卫生间、库房、客服中心、核医学中心核素显像区、电梯厅、核医学中心大厅等，西侧依次为排烟机房、核医学中心核素治疗区、净化空调机房、汽车通道、前室、库房、更衣室、淋浴间等，北侧依次为道路、办公室、空调机房、电梯厅、医工部及弱电间等，楼上为疏散出口、过道、挂号收费处、办公室、金库及值班室等，楼下为地下车库。动物影像实验室项目拟建址周围环境图见附图 3，动物影像实验室拟建址楼上、楼下布局图见附图 4 及附图 5。

本项目核医学中心位于医院医疗综合楼负一层西南角，核医学中心核素显像区东侧为过道、扫描间、操作间、预留间、等候区、观察室、超声室、胃镜室、心电图室、妇科及就餐区，南侧为室外下沉庭院道路，西侧为库房、客服中心、电梯厅、核医学中心大厅、导医台、空调机房、污洗间、弱电间、新风机房及强电间等，北侧为拟建动物影像实验室，楼上为中央大厅、空调机房及配镜中心，楼楼下为地下车库；核医学中心核素治疗区东侧为排烟机房、护士站、卫生间、客服中心、电梯厅，南侧依次为卫生间、会议室、门诊检查、门诊治疗、会诊中心、主任办公、诊室、下沉庭院等，西侧依次为楼梯、储物间、电梯前室、走廊、医生值班、护士值班室及土层，北侧为采光井、汽车坡道等，楼上为留观病房、抢救室、值班室、卫生间、办公室、用餐间、配液室、库房、注射室及输液室等，楼下为地下车库。核医学中心周围环境图见附图 3，核医学科楼上、楼下布局图见附图 4 及附图 5。

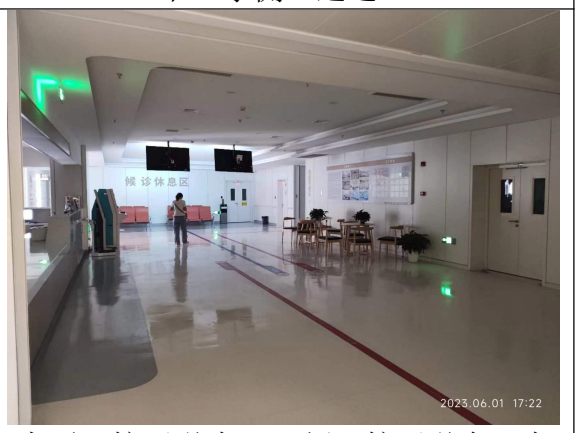
本项目利用医院门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室开展 ^{90}Y 树脂微球治疗项目，^{90}Y 的贮存、质控、分装与扫描依托于医疗综合楼负一层核医学中心核素显像区 SPECT/CT

工作场所。DSA2 室东侧为员工通道，南侧为设备间和洽谈室，西侧为走道，北侧为控制间，楼上为仪器间、一次性物品间及走廊，楼下为走廊、更衣室及净化室。DSA2 室平面及周围环境图见附图 15，DSA 机房楼下及楼上区域图分别见附图 16 及附图 17。

根据现场调查分析及附图 2 可知，本次评价项目所在区域 50m 范围内无居民区、学校等敏感点。因此，本项目保护目标主要为辐射工作人员及辐射工作场所拟建址周围评价范围内的医务人员、患者及患者家属。本项目所各场所周围环境现状见图 8-1。

<table>
<tr>
<td> 

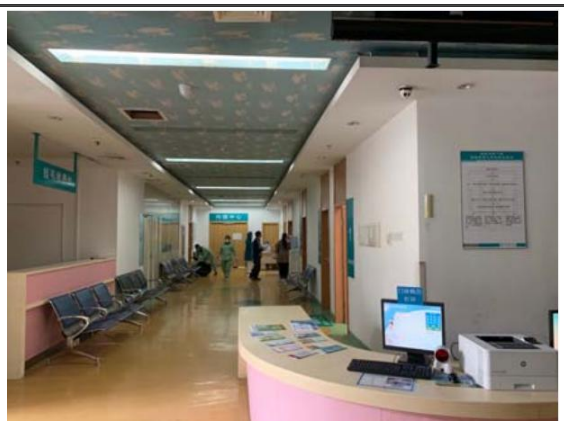
本项目动物影像实验室拟建址现状</td>
<td> 

本项目动物影像实验室拟建址及核医学中心东侧（过道）</td>
</tr>
<tr>
<td> 
本项目核医学中心南侧（道路）</td>
<td> 

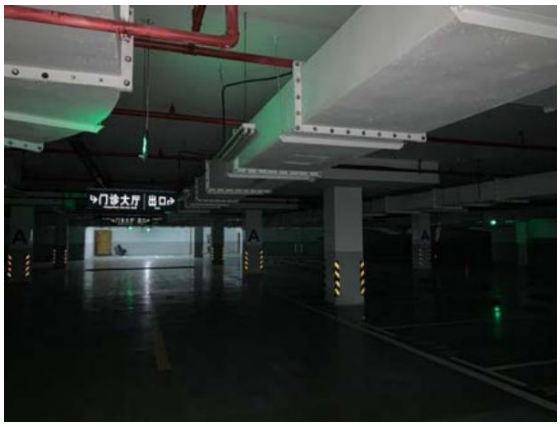
本项目核医学中心西侧（核医学中心大厅）</td>
</tr>
</table>



本项目核医学中心拟改建心脏 ECT 机房拟建址现状



本项目动物影像实验室拟建址楼上（挂号收费处）



本项目动物影像实验室拟建址楼下（地下车库）



本项目核医学中心核素显像区入口



本项目核医学中心核素显像区出口



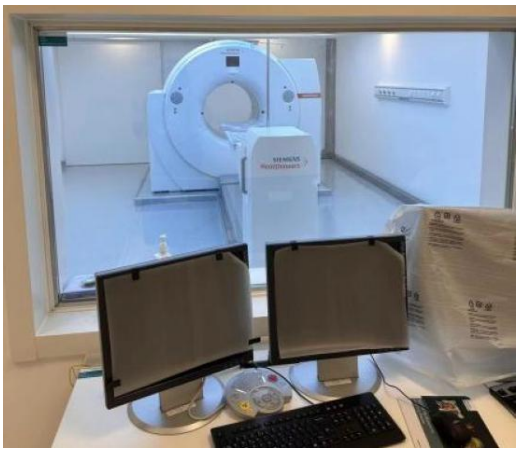
本项目核医学中心核素治疗区入口



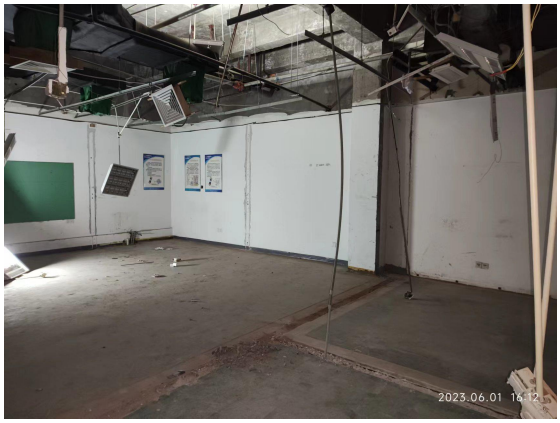
本项目核医学中心核素治疗区出口



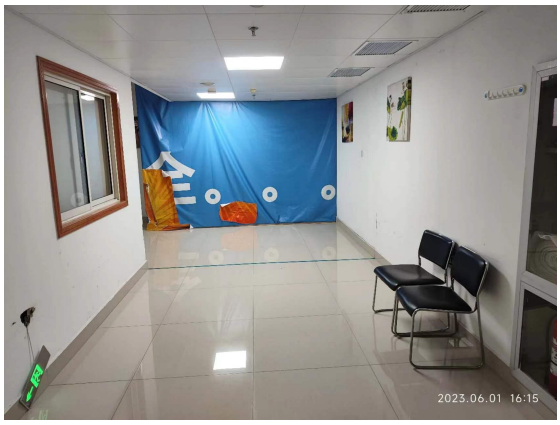
本项目核医学中心核素显像区SPECT/CT机房现状



本项目核医学中心核素显像区 PET/CT机房现状



本项目 DSA2 室现状



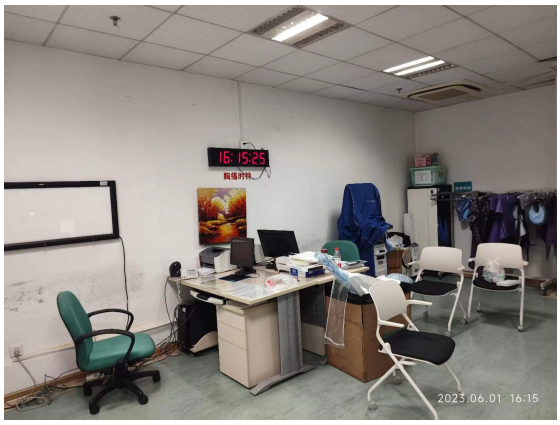
本项目 DSA2 室东侧员工通道



本项目 DSA2 室南侧走廊



本项目 DSA2 室西侧走廊



本项目 DSA2 室北侧控制室



本项目 DSA2 室楼上一次性物品间



本项目 DSA2 室楼下净化室

图 8-1 本项目各场所拟建址及周围环境现状图

2 环境现状评价的对象、监测因子和监测点位

评价对象：本项目各非密封放射性物质工作场所拟建址及周围辐射环境

检测因子：α、β表面污染、γ辐射空气吸收剂量率

检测点位：在本项目各非密封放射性物质工作场所拟建址及周围布置检测点位，γ辐射空气吸收剂量率共布 48 个检测点位，α、β表面污染水平共布 46 个检测点位

3 监测方案、质量保证措施及监测结果

3.1 检测方案

检测单位：江苏玖清玖蓝环保科技有限公司

检测仪器：FH40G 型辐射剂量检测仪（探头型号 FHZ672E-10）（设备编号：J0317，检定有效期：2022.10.10~2023.10.9，能量响应：48keV~4.4MeV，测量范围：1nSv/h～100μSv/h）

Como170 高灵敏α/β/γ便携式沾污检测仪（设备编号：J0417，检定有效期：2022.10.12~2023.10.11）

检测项目：γ辐射空气吸收剂量率和α、β表面污染水平

检测布点：在本项目各场所拟建址及周围进行布点，具体点位见图 8-2~8-4

检测时间：2023 年 6 月 1 日

检测方法：《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）

《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）

《表面污染测定 第 1 部分β发射体（Eβmax>0.15MeV）和α发射体》（GB/T14056.1-2008）

数据记录及处理：γ辐射空气吸收剂量率监测每个点位读取 10 个数据，读取间隔不小于 20s，并待计数稳定后读取数值。每组数据计算每个点位的平均值并计算标准差。根据《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），本项目空气比释动能和周围剂量当量的换算系数参照 JJG 393-2018，使用 ^{137}Cs 作为检定/校准参考辐射源，换算系数取 1.20Sv/Gy。α、β表面污染水平每个点位读取 5 个数据，读取间隔不小于 20s，并待计数稳定后读取数值。每组数据计算每个点位的平均值并计算方差。

3.2 质量保证措施

检测单位：江苏玖清玖蓝环保科技有限公司

检测布点质量保证：根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）有关布点原则进行布点

检测过程质量控制质量保证：本项目检测按照《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）的要求，实施全过程质量控制

检测人员、检测仪器及检测结果质量保证：检测人员均经过考核并持有合格证书，所有检测仪器均经过计量部门检定，并在有效期内，检测仪器使用前经过校准或检验，检测报告实行三级审核

3.3 检测结果

3.3.1 γ辐射空气吸收剂量率检测结果

评价方法：参照江苏省环境天然γ辐射水平调查结果，监测结果见表 8-1，详细检测结果见附件 4。

表 8-1 本项目各场所拟建址及周围环境γ辐射空气吸收剂量率

序号	监测点位描述	监测结果（nGy/h）	备注
1	DSA2 室内	77.5	室内
2	DSA2 室东侧员工通道	78.5	室内
3	DSA2 室南侧设备间	69.7	室内

4	DSA2 室西侧走廊	73.7	室内
5	DSA2 室北侧控制室	73.6	室内
6	DSA2 室楼上仪器间	73.0	室内
7	DSA2 室楼下更衣室	73.1	室内
8	Y-90 留观室内	73.7	室内
9	Y-90 留观室南侧走廊	74.5	室内
10	Y-90 留观室西侧走廊	74.2	室内
11	Y-90 留观室北侧空调机房	86.5	室内
12	Y-90 留观室楼上 OR-1 室	88.0	室内
13	Y-90 留观室下乙肝治疗室	80.1	室内
14	动物影像实验室拟建址处（东侧）	79.6	室内
15	动物影像实验室拟建址处（中侧）	78.2	室内
16	动物影像实验室拟建址处（西侧）	77.8	室内
17	动物影像实验室拟建址东侧过道	78.5	室内
18	动物影像实验室拟建址南侧客服中心	76.8	室内
19	动物影像实验室拟建址西侧净化空调机房	76.6	室内
20	动物影像实验室拟建址北侧走廊	77.4	室内
21	动物影像实验室拟建址楼上挂号收费处	75.4	室内
22	动物影像实验室拟建址楼下停车场	76.6	室内
23	核素显像区分装注射室内	76.6	室内
24	核素显像区 ^{32}P 敷贴室内	78.2	室内
25	核素显像区 SPECT/CT 候诊室 1 内	74.2	室内
26	核素显像区 SPECT/CT 候诊室 2 内	73.2	室内
27	核素显像区 SPECT/CT 机房内	71.7	室内
28	核素显像区 PET/CT 候诊室 1 内	73.5	室内
29	核素显像区 PET/CT 候诊室 2 内	69.0	室内
30	核素显像区 PET/CT 机房内	67.1	室内
31	核素显像区心脏 ECT 候诊室内	70.9	室内
32	核素显像区心脏 ECT 机房内	70.0	室内
33	核素显像区诊后观察室内	68.1	室内
34	核素显像区东侧走廊	67.1	室内
35	核素显像区南侧走廊	68.3	室外
36	核素显像区西侧控制室内	67.8	室内
37	核素显像区楼上中央大厅	68.0	室内
38	核素显像区楼下停车场	69.8	室内
39	核素治疗区分装室内	70.9	室内

40	核素治疗区配餐间内	70.2	室内
41	核素治疗区治疗室内	69.4	室内
42	核素治疗区患者走廊内	76.1	室内
43	核素治疗区病房 6 内	74.9	室内
44	核素治疗区东侧护士站处	72.8	室内
45	核素治疗区南侧医护走廊	75.1	室内
46	核素治疗区西侧楼梯间	71.9	室内
47	核素治疗区楼上输液室内	75.8	室内
48	核素治疗区楼下停车场	76.5	室内

注：测量数据已扣除仪器宇宙响应值，楼房对宇宙射线的屏蔽修正因子取 0.8，平房对宇宙射线的屏蔽修正因子取 0.9，原野、道路对宇宙射线的屏蔽修正因子取 1。

3.3.2 α、β表面污染检测结果

在本项目各非密封放射性物质工作场所拟建址及周围布置检测点位，检测结果见表 8-2，检测点位见图 8-2~图 8-4。

表 8-2 本项目各场所拟建址以及周围α、β表面污染检测水平

序号	监测点位描述	测量结果（Bq/cm^2）		备注
		α	β	
1	DSA2 室内地面	＜MDL	＜MDL	/
2	DSA2 室东侧员工通道地面	＜MDL	＜MDL	/
3	DSA2 室南侧设备间地面	＜MDL	＜MDL	/
4	DSA2 室西侧走廊地面	＜MDL	＜MDL	/
5	DSA2 室北侧控制室地面	＜MDL	＜MDL	/
6	动物影像实验室拟建址地面（东侧）	＜MDL	＜MDL	/
7	动物影像实验室拟建址地面（南侧）	＜MDL	＜MDL	/
8	动物影像实验室拟建址地面（西侧）	＜MDL	＜MDL	/
9	动物影像实验室拟建址东侧地面	＜MDL	＜MDL	/
10	动物影像实验室拟建址西侧净化空调机房地面	＜MDL	＜MDL	/
11	动物影像实验室拟建址北侧走廊地面	＜MDL	＜MDL	/
12	核素显像区入口外地面	＜MDL	＜MDL	/
13	核素显像区入口内地面	＜MDL	＜MDL	控制区
14	核素显像区分装注射室内地面	＜MDL	＜MDL	
15	核素显像区分装注射室工作台面	＜MDL	＜MDL	
16	^{32}P 敷贴室内地面	＜MDL	＜MDL	
17	核素显像区分装注射室 F-18 手套箱表面	＜MDL	0.21	
18	核素显像区分装注射室 Tc-99 手套箱表面	＜MDL	0.22	
19	核素显像区 PET-CT 注射窗口台面	＜MDL	＜MDL	
20	核素显像区 SPECT-CT 注射窗口台面	＜MDL	＜MDL	
21	核素显像区废物库地面	＜MDL	＜MDL	
22	核素显像区患者走廊地面	＜MDL	＜MDL	
23	核素显像区 SPECT-CT 机房地面	＜MDL	＜MDL	
24	核素显像区 PET-CT 机房地面	＜MDL	＜MDL	

25	核素显像区心脏 ECT 机房拟建址地面	＜MDL	＜MDL	
26	核素显像区控制室内地面	＜MDL	＜MDL	监督区
27	核素显像区 SPECT-CT 候诊室 1 内地面	＜MDL	＜MDL	控制区
28	核素显像区 SPECT-CT 候诊室 2 地面	＜MDL	＜MDL	
29	核素显像区 PET-CT 候诊室 1 地面	＜MDL	＜MDL	
30	核素显像区 PET-CT 候诊室 2 地面	＜MDL	＜MDL	
31	核素显像区心脏 ECT 候诊间地面	＜MDL	＜MDL	
32	核素显像区诊后观察室地面	＜MDL	＜MDL	
33	核素显像区患者走廊地面	＜MDL	＜MDL	
34	核素显像区患者出口地面	＜MDL	＜MDL	/
35	核素治疗区病房入口区外地面	＜MDL	＜MDL	/
36	核素治疗区病房入口区内地面	＜MDL	＜MDL	控制区
37	核素治疗区分装室内地面	＜MDL	＜MDL	
38	核素治疗区分装室内工作台面	＜MDL	＜MDL	
39	核素治疗区手套箱表面	＜MDL	＜MDL	
40	核素治疗区废物库 2 地面	＜MDL	＜MDL	
41	核素治疗区患者走廊地面	＜MDL	＜MDL	
42	核素治疗区配餐间地面	＜MDL	＜MDL	
43	核素治疗区治疗室地面	＜MDL	＜MDL	
44	核素治疗区病房 6 地面	＜MDL	＜MDL	
45	患者走廊出口内地面	＜MDL	＜MDL	
46	患者走廊出口外地面	＜MDL	＜MDL	/

注：表中α表面污染 MDL=2.75×10^{-3}Bq/cm^2；
β表面污染 MDL=6.22×10^{-2}Bq/cm^2。

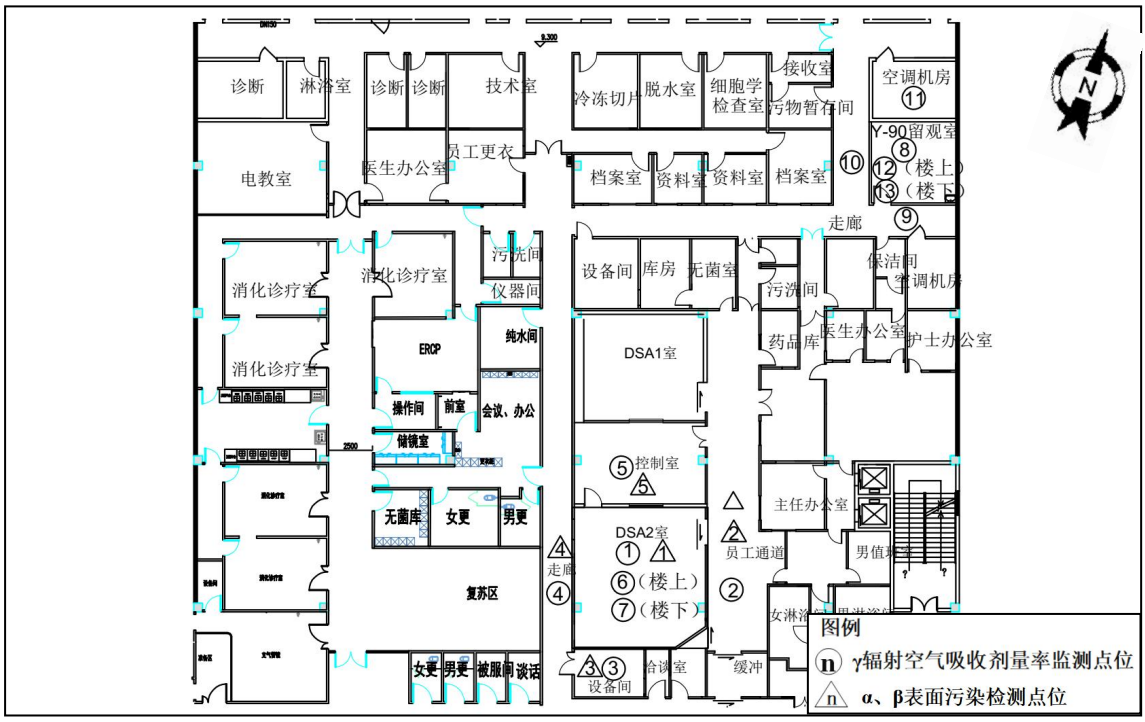


图 8-2　DSA2 室周围检测点位图

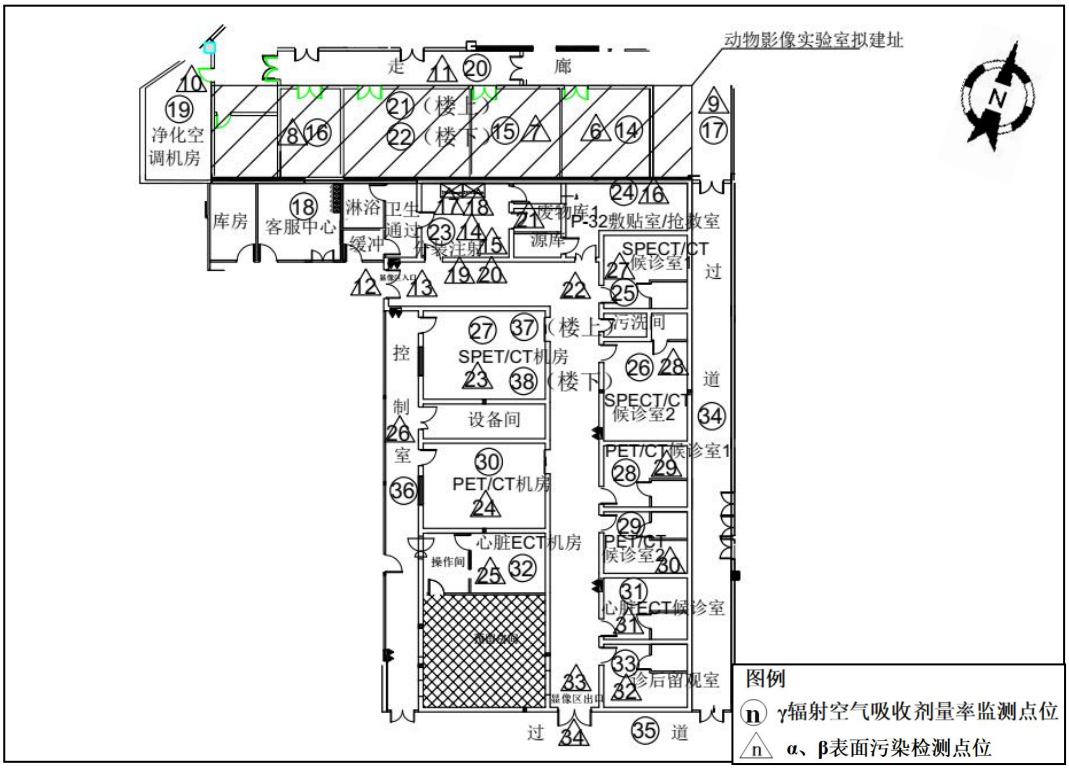


图 8-3　核素显像区及动物影像实验室周围检测点位图

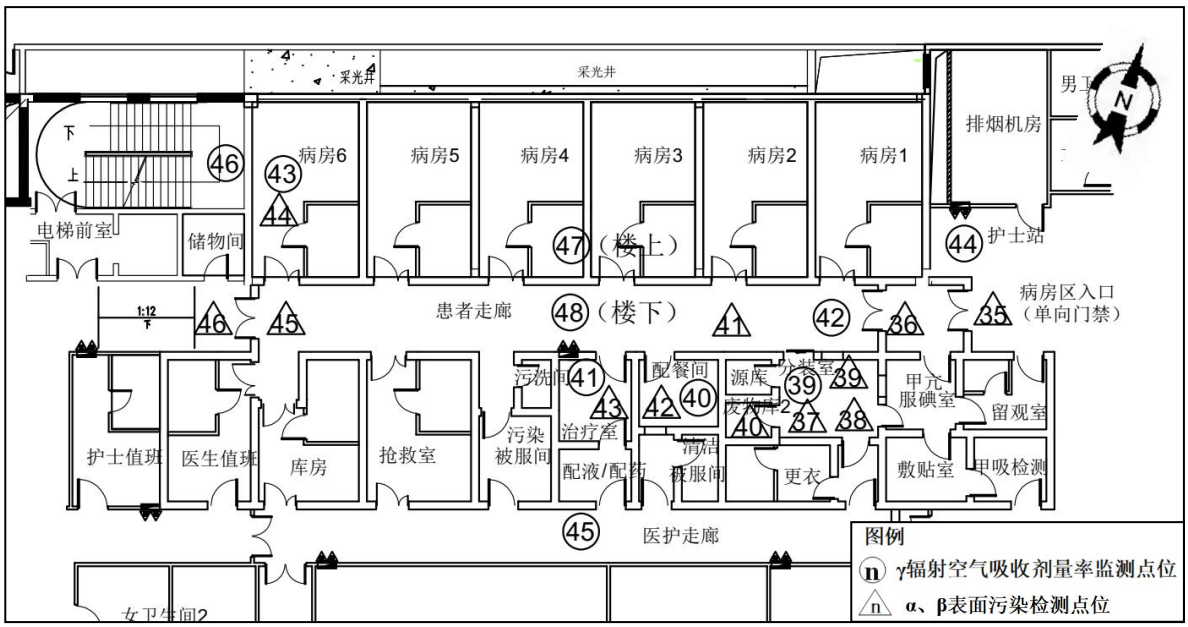


图 8-4　核素治疗区周围检测点位图

4 环境现状调查结果评价

从现场检测结果可知，本项目 DSA 机房、动物影像实验室及 ^{90}Y 留观室周围环境γ辐射空气吸收剂量率为（67.1～88.0）nGy/h，处于江苏省环境天然γ辐射水平涨落范围内。DSA 机房及动物影像实验室周围α表面污染水平<MDL，β表面污染水平＜MDL。

本项目核医学中心核素显像区及核素治疗区为已许可的非密封放射性物质工作场

所。通过现场检测可知，核医学中心核素显像区及核素治疗区的辐射剂量率为（67.1～78.2）nGy/h，能够满足标准中各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h 的剂量限值要求。核医学中心核素显像区及核素治疗区控制区的α表面污染水平<MDL，β表面污染水平在（<MDL~0.22）Bq/cm^{2}之间，非控制区的α表面污染水平<MDL，β表面污染水平<MDL，均能够满足 GB18871-2002 中“控制区的工作台、设备、墙壁、地面α表面污染控制水平不大于 4Bq/cm^2，β表面污染控制水平不大于 40Bq/cm^2，监督区的工作台、设备、墙壁、地面α表面污染控制水平不大于 0.4Bq/cm^2，β表面污染控制水平不大于 4Bq/cm^2”的要求。

表 9 项目工程分析与源项

工程设备和工艺分析

1 动物影像实验室项目

1.1 工程设备

本项目动物影像实验室拟使用 ^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等 14 种放射性核素，其中 ^{68}Ga 核素由 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行淋洗，其余放射性核素均外购。动物影像实验室的核素标记实验室内拟设置 2 台合成热室和 1 台分装热室，热室型号均未定，合成热室内拟配备合成模块，用于放射性药物的合成，分装热室内拟配备分装模块，用于放射性药物的分装。一般使用的合成热室、分装热室、^{68}Ge-^{68}Ga 发生器外形示意见图 9-1，热室拟设置区域及数量等见表 9-1。



图 9-1 一般使用的合成热室、分装热室、^{68}Ge-^{68}Ga 发生器外观图

表 9-1 热室拟设置区域及数量等一览表

区域	设备名称	数量（台）	通风系统	设计风速（m/s）
动物影像实验室的核素标记实验室	合成热室	2	设置独立通风系统	设计风速≥0.5m/s
	分装热室	1		

本项目 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器一般从国内生产厂家定期采购，其自带铅屏蔽套，由生产厂家发货至医院，辐射工作人员接收后，将发生器暂存在动物影像实验室的合成热室内。本项目拟购的 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器规格为 100mCi/柱（最大贮存 1 柱），单柱发生器一般使用 6 个月后退役，退役的发生器暂存于动物影像实验室的动物尸体/废

物间内，由供货商定期回收。

本项目动物实验拟配备 1 台小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统，该设备是一种先进的临床前分子影像设备，可以对动物的生理过程进行活体、无创、高分辨的分子显像。该设备配备的微米量级分辨率 CT 可以精确地显像出代谢机体的解剖结构，通过对同一体位 CT 和 PET/SPECT 图像的融合，为实验人员提供生物更准确的生理、病理生理及生化等信息。PET/SPECT/CT 是将三种技术有机融合的产物，即同时进行 PET、SPECT 和 CT 扫描获得融合图像的成像技术。该系统能在细胞和分子层面对活体生物的生理、病理、生化、代谢情况进行成像，与传统结构影像相比，它注重探测细胞生物学和分子生物学水平上的变化，是体外研究过渡到体内研究的重要工具，对疾病产生和治愈机理探究以及新药在预临床实验阶段的评价具有重要作用。

医院拟购的小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统型号未定，根据医院招标意向，其最大管电压为 100kV，最大管电流为 2mA。常见小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统外观见图 9-2。



图 9-2 常见小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统外观图

1.2 工作原理

1.2.1 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器工作原理

^{68}Ge-^{68}Ga 发生器是一种由母体核素 ^{68}Ge 衰变制备 ^{68}Ga 正电子显像药物的装置，^{68}Ge-^{68}Ga 发生器属于色谱柱型发生器，用二氧化锡作吸附柱。二氧化锡对母体核素

^{68}Ge 有很强的亲和力，子体核素 ^{68}Ga 则几乎不被吸附。用 HCl 溶液淋洗吸附柱，则仅有 ^{68}Ga 被洗出。由于母体核素的不断衰变就不断地产生子体核素，因而核素发生器可以反复淋洗制得子体核素。

具体工作原理为：^{68}Ge 离子吸附在色层柱上，^{68}Ge 离子衰变后产生 ^{68}Ga 离子，^{68}Ga 离子与 ^{68}Ge 离子化学性质不同，使用时每隔数小时用 0.05~0.15mol/L 的 HCl 溶液淋洗即可得到含有 ^{68}Ga 离子的淋洗液，而 ^{68}Ge 仍留在发生器内，一般情况下，发生器每隔 4 小时可淋洗一次。

1.2.2 小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统工作原理

本项目主要利用分子影像技术对有机小分子、生物大分子药物及内源性药物进行小动物活体成像及精确定量研究。

分子影像技术（molecular imaging）是运用影像学手段显示组织水平、细胞和亚细胞水平的特定分子，反映活体状态下分子水平变化，对其生物学行为在影像方面进行定性和定量研究的科学。分子影像技术是医学影像技术和分子生物学、化学、物理学、放射医学、核医学以及计算机科学相结合的一门新的技术。本项目主要使用 PET/SPECT/CT 设备进行显像，辐射工作人员给实验动物注射含发射正电子或γ射线放射性核素的药物，该示踪药物在动物体内参与特定的生物活动，在不影响体内内环境平衡的生理条件下，获得动物体内某一正常组织或病灶在某一时刻的血流灌注、糖/氨基酸/核酸/氧代谢或受体的分布及其活性状况等功能信息。

PET（Positron Emission Tomography，简称 PET），全称正电子发射断层扫描。成像原理：小动物摄入含有发射正电子的放射性核素的药物，在特定的组织器官衰变发射出正电子，正电子在运动的过程中发生湮灭发射出一对方向相反的γ光子，探测器通过对γ光子的扫描来确定正电子的位置，再经过计算机系统的处理成像的一门核医学显像技术，主要用于功能成像。

正电子发射是放射性核素衰变的方式之一。这类核素在自发的从不稳定状态向基态衰变过程中，从核内释放出与普通电子一样但电荷相反的粒子，即正电子。正电子是一种反物质，从核内放出后很快与环境中自由电子碰撞湮灭，转化为一对方向相反、能量为 0.511MeV 的γ光子。如果在这对光子飞行方向上对置一对探测器，便可以几乎同时接受到这两个光子，并可推定光子发源（即正电子发射）点在两控头间连线上。通过环绕 360°排列的多组配对探头，经探头对之间符合线路检验判定每只探头信号时间耦合性，排除其他来源射线的干扰，得到探头对连线上的一维信息，再用滤波反投射方式，将信号按探头对的空间位置向中心点反投射，便可形成

与探头组连线轴平行的断层面正电子发射示踪剂分布图像。这种探测方式一次只反映一个层面的信息。实用中常用多层排列的探头对，配合层间符合线路，以利探测并重建更多层面的图像。

SPECT（Single photon emission computed tomography，简称 SPECT），即单光子发射型计算机断层显像。成像原理：利用放射性同位素作为示踪剂，将示踪剂注入活体内，使该示踪剂浓聚在被测脏器上，从而使该脏器成为γ射线源，然后利用探测器对该器官进行扫描，并将扫描到的γ射线转化为电信号并输入计算机，经计算机断层重建为反映小动物某一器官生理状况的断面或三维图像。

CT 成像是利用组织的密度不同造成对 X 射线透过率的不同而成像的技术，是一门解剖成像技术。

1.3 工艺流程及产污环节

本项目为医院首次开展动物放药临床前研究，与医院现有非密封放射性物质工作场所工艺流程均不同。根据医疗科研需求，医院辐射工作人员制定工作计划，确定需要的动物数量、放射性核素的种类及用量，提交申请，向有资质的实验动物生产繁育机构购买实验动物（本项目实验动物类型为老鼠，单次实验最多使用 10 只老鼠），实验动物由动物供应商负责运送至医院动物影像实验室的注射前饲养间内；向有资质的供应商订购放射性核素，供应商根据预约的时间和用量定时送药，医院指定专人负责放射性核素的接收和登记。

本项目动物实验拟使用 ^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等 14 种放射性药物，医院每天只进行 1 次放射性核素动物实验，每次实验只使用 1 种放射性核素，每年最多进行 300 次实验。每次实验最多使用 10 只老鼠，单只老鼠的注射量由老鼠体重及放射性药物的核素特性决定，用药量在 5μCi~50μCi 之间（其中 ^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 等α核素的用药量约为 5μCi，其余核素的用药量约为 50μCi），给药后的老鼠放置在 10mmPb 的防护拖车内，依次进行扫描，每次最多同时扫描 1 只老鼠，每只老鼠需扫描 1~2 次，每次描约 10min。

本项目注射放射性药物后的老鼠分为两种：①注射治疗用相关放射性药物（如 ^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等）的老鼠扫描后送至注射后饲养间内进行饲养，饲养期间进行病理观察及老鼠存活情况观察，饲养时间不超过 5 天，饲养结束后于生物操作间内对老鼠进行处死处理，老鼠处死后尸体分类收集于密封袋内，送至动物影像实验室的冰柜内贮存，作为放射性固废处理。②注

射显像用相关放射性药物（如 ^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I 等）的老鼠扫描后送至生物操作间内进行解剖，对解剖后的老鼠器脏进行称重及活度测量后，实验结束，将老鼠尸体、器脏等分类收集于密封袋内，送至动物影像实验室的冰柜内贮存，作为放射性固废处理。本项目主要工艺流程如下：

①购买老鼠和放射性核素：根据科研需求，向有资质的实验动物生产繁育机构购买老鼠，老鼠由动物供应商负责运送至医院动物影像实验室的注射前饲养间内；向有资质的供应商订购放射性核素，由供应商负责运送至医院动物影像实验室的核素标记实验室的合成热室内。

②放射性药物标记、分装：辐射工作人员在核素标记实验室的合成热室内对药物进行放射性标记，根据各质检项目所需用药量及动物注射所需用药量，将标记好的放射性药物分装至一次性注射器内（设有铅防护套屏蔽），并利用分装热室内的活度计测定相应注射器内药物活度，确保无误后用铅盒将药物注射器分别转移到 QC 室及生物操作间内进行质检及注射。

③质检：用铅盒将分装好的药物送至 QC 质检室内进行性状检查、PH 值检查、放射化学纯度测定、放射性活度测定等。根据医院提供的信息，每次动物实验放射性药物的标记活度为老鼠用药总活度的 10 倍，QC 质检所需的放射性药物活度为单只老鼠的用药量。对于每次动物实验未使用完的放射性药物，将连同铅罐一起于废物间 1 内暂存衰变后作为医疗废液处理处置。

④动物给药及转移：辐射工作人员先将动物转移至生物操作间内的药物注射区域，麻醉后在 10mmPb 的 L 防护屏后为动物注射放射性药物，然后将给药后的动物通过防护推车送至小动物 PET 机房内进行扫描，半衰期较短的放射性药物扫描一般在给药后 0.5h、1.5h、3h 进行，半衰期较长的放射性药物扫描一般在给药后 0.5h、1.5h、3h、6h 进行（不同项目时间长短略有不同）。根据实验需求：1）注射治疗用相关放射性药物（如 ^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等）的老鼠扫描后送至注射后饲养间的笼盒内进行饲养；2）注射显像用相关放射性药物（如 ^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I 等）的老鼠扫描后送至生物操作间内进行解剖，对解剖后的老鼠器脏进行称重及活度测量后，实验结束。

⑤动物饲养：注射治疗用相关放射性药物的老鼠在注射放射性药物并扫描后，送至注射后饲养间内进行动物饲养，饲养期间进行病理观察及老鼠存活情况观察，饲养时间不超过 5 天，注射后饲养间内最多同时饲养 50 只老鼠。

⑥动物最终处理：注射显像用相关放射性药物的老鼠，在描后送至生物操作间

内进行解剖，对解剖后的老鼠器脏等进行称重及活度测量，然后将老鼠尸体、器脏等分类收集于密封袋内，送至动物影像实验室的冰柜内贮存，作为放射性固废处理；注射治疗用相关放射性药物的老鼠，扫描后送至注射后饲养间内进行饲养，饲养期间进行病理观察及老鼠存活情况观察，饲养结束后送至生物操作间内对老鼠进行处死处理，老鼠处死后尸体分类收集于密封袋内，送至动物影像实验室的冰柜内贮存，作为放射性固废处理。

本项目放射性核素在操作过程中，以及给药后实验动物在饲养、扫描、解剖等过程中，会产生α射线和（或）β射线和（或）γ射线、表面污染以及放射性固废、放射性废气；小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统的 CT 装置在开机并处于出束状态时，会产生 X 射线。本项目工艺流程及产污环节见图 9-3。

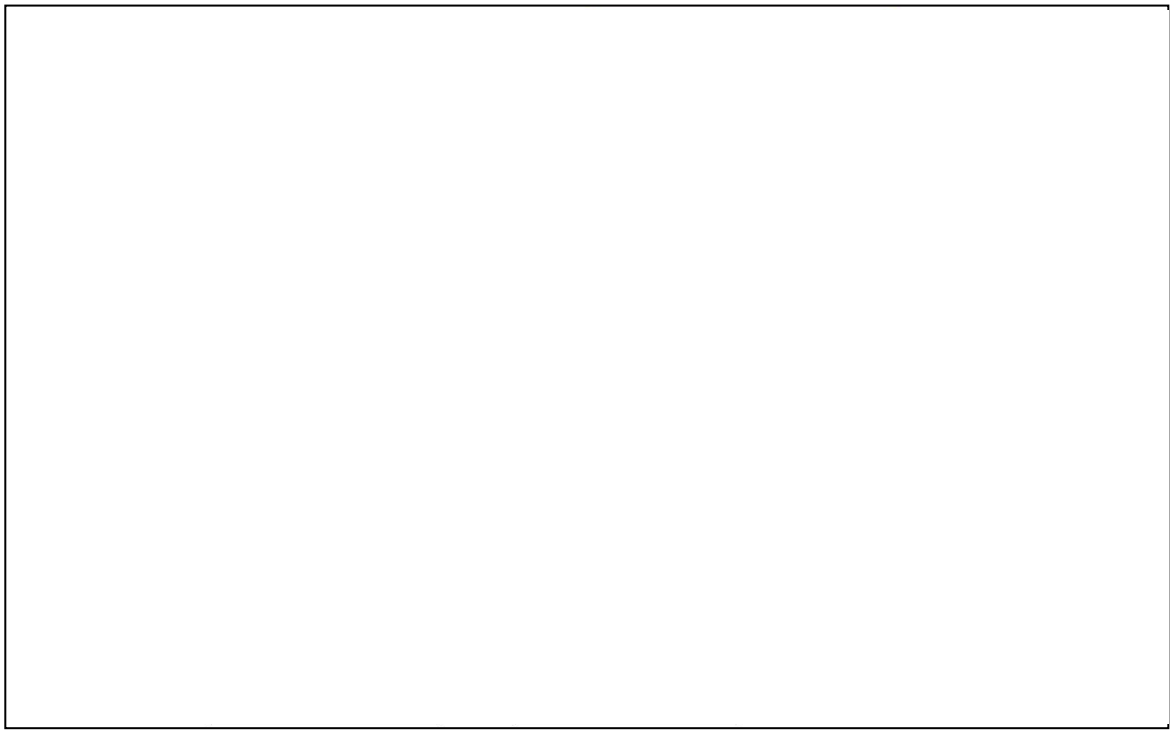


图 9-3 动物实验工艺流程及产污环节

1.4 人流、物流路径规划

本项目动物影像实验室设有人流、放射性物流、动物运输路径等，各路径如下：

辐射工作人员路径：卫生通过间→研发实验室走廊→一更→二更→洁净走廊→核素标记实验室→缓冲间→检测/去污间→一更→研发实验室走廊→QC 室（生物操作间、控制室、缓冲间、注射后饲养间、动物尸体/废物间）→研发实验室走廊→卫生通过间。

小动物运输路径：注射前饲养间→缓冲间→生物操作间→小动物 PET 机房→生

物操作间→缓冲间→注射前饲养间→注射后饲养间→动物尸体/饲养间。

放射性药物路径：放射性药物购置→研发实验室走廊东侧入口→研发实验室走廊→物料间→传递柜→核素标记实验室的热室。

放射性废物路径：核素标记实验室/QC 室/生物操作间/小动物 PET 机房→研发实验室走廊→缓冲间→注射前饲养间→注射后饲养间→动物尸体/饲养间。

本项目动物影像实验室路径图见附图 6。

1.5 劳动定员和工作负荷

1.5.1 劳动定员

本项目拟配备 2 名辐射工作人员，负责放射性核素的接收以及药物的标记、分装、注射、动物的接收、给药后动物的转移、动物的显像扫描（包括扫描前摆位）、饲养、解剖、检测等。2 名辐射工作人员均为新增人员。

1.5.2 工作负荷

本项目每年总共最多开展 300 次实验，每天最多开展 1 次实验，每次实验只使用 1 种放射性核素，每次实验最多使用 10 只老鼠，每次最多同时扫描 1 只老鼠，每只老鼠需扫描 1~2 次，每次描约 10min。各核素年开展实验次数见表 9-2，各环节具体操作时间见表 9-3。

表 9-2 动物影像实验室各核素年试验次数及单只老鼠用量情况表

放射性核素	单只老鼠最大注射量（Bq）	单次实验 10 只老鼠最大注射量（Bq）	单次实验药物标记量（Bq）	年实验次数	年用量（Bq）
^{68}Ga	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	150	2.775×10^{10}
^{64}Cu	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	10	1.85×10^{9}
^{89}Zr	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	80	1.48×10^{10}
^{123}I	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	5	9.25×10^{8}
^{124}I	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	5	9.25×10^{8}
^{177}Lu	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	30	5.55×10^{9}
^{223}Ra	1.85×10^{5}	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	2	3.7×10^{7}
^{225}Ac	1.85×10^{5}	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	3	5.55×10^{7}
^{125}I	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	2	3.7×10^{8}
^{90}Y	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	2	3.7×10^{8}
^{212}Pb	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	5	9.25×10^{8}
^{212}Bi	1.85×10^{5}	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	2	3.7×10^{7}
^{67}Cu	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	1.85×10^{8}	2	3.7×10^{8}
^{227}Th	1.85×10^{5}	1.85×10^{6}	1.85×10^{7}	2	3.7×10^{7}

表 9-3 本项目各环节操作时间一览表

工作环节	年总工作时间（h）	备注

2 核医学中心项目

医院拟对核医学中心核素显像区内原有的 1 座 PET/MR 机房进行改造，于 PET/MR 机房内中部及西侧新增屏蔽墙体，将其改造成 1 座心脏 ECT 机房，并拟于心脏 ECT 机房内新增 1 台 Discovery NM 530c 设备（单光子发射计算机断层扫描系统，不含 CT），使用 ^{99m}Tc 放射性药物进行显像检查。

医院拟于核医学中心核素显像区内新增 ^{68}Ga、^{123}I 核素的显像诊断及 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等 7 种核素的治疗，其中 ^{68}Ga 核素使用 PET/CT 扫描显像，^{123}I 核素使用 SPECT/CT 扫描显像。

医院拟于核医学中心核素治疗区内新增 ^{177}Lu 核素治疗，每周进行 1 名 ^{177}Lu 病人治疗。医学中心核素治疗区内原有 6 座 ^{131}I 甲癌治疗病房，现拟将其中的病房 6 作为 ^{177}Lu 核素治疗病房，甲癌病房由 6 间减为 5 间。

2.1 心脏 ECT 项目

2.1.1 工程设备

Discovery NM 530c 设备是用于核素心肌灌注显像的专用成像设备。核素心肌灌注显像是一种影像学的诊断方法，主要用于冠心病的检查，它具有简单、无创伤、安全、诊断准确性高等优点。通过核素心肌灌注显像可以观察到心脏的血流灌注情况以及心肌的功能状态，简单来说，可以直接看到心肌是否存在缺血情况。与传统碘化钠（NaI）晶体的 SPECT 相比，Discovery NM 530c 设备采用了最先进的全数字、碲锌镉（CZT）固态探测器，从而将灵敏度提高了 10 倍，分辨率提高了 2 倍，扫描

速度提高了 10 倍。本项目 Discovery NM 530c 设备未配备 CT 设备，无管电压和管电流，其外观示意图见图 9-4。



图 9-4 本项目 Discovery NM 530c 设备外观图

2.1.2 工作原理

心脏 SPECT 检查主要是利用放射性同位素 ^{99m}Tc 作为示踪剂（显像剂），将这种示踪剂注射进入病人体内，其随血液流动，在心肌内聚集，使心肌成为γ射线的发射源，利用 Discovery NM 530c 设备检测心肌发出的射线多少，就可以知道示踪剂在心肌内的分布情况，而心肌每个部位聚集放射性示踪剂的多少与到达该部位的血流量的多少有关。因而根据心肌局部放射性示踪剂的多少可以分析心肌的血流灌注情况，判断是否存在心肌缺血。在 Discovery NM 530c 设备检查图像上，那些能摄取一定量放射性示踪剂的心肌会在图像中呈现亮块。如果有心肌缺血，导致局部心肌摄取的放射性示踪剂减少，图像就会偏暗（缺血越严重，缺血部位心肌的颜色就会越暗）。

2.1.3 工艺流程及产污环节

患者在注射前候诊区候诊，经语音呼叫后，至注射窗口注射 ^{99m}Tc 放射性药物，单名患者用药量约为 25mCi，注射 ^{99m}Tc 药物的患者进入心脏 ECT 候诊室进行候诊，候诊约 15min 后进食，再继续候诊 90min 左右，进入扫描室进行扫描，患者躺在扫描床上，经医护人员通过对讲装置指导摆位或现场指导摆位后（每位患者现场摆位时间约 1min），开始扫描，每次扫描约 15~20min，得到最终的扫描图像。扫描完成后，患者进入诊后留观室留观约 20min，无碍后由患者专用出口离开。心脏 ECT 检查具体工艺流程及产污环节见图 9-5。

图 9-5 心脏 ECT 检查具体工艺流程及产污环节示意图

受检查者在进行显像检查当日空腹或早餐进素食，检查前 1-2 日应避免进食含咖啡因的饮料，停用扩张血管药物和β受体阻滞剂，检查当日携带油煎鸡蛋或牛奶等脂肪餐到心脏 ECT 检查室，因肝脏等器官距离心脏较近，进食脂肪餐可使肝脏代谢掉吸收的放射性药物，减小对心脏显像结果的影响。

2.2 SPECT/CT 诊断项目

2.2.1 工程设备

SPECT/CT 的基本结构分 3 部分，即旋转探头装置、电子线路、数据处理和图像重建的计算机系统。SPECT/CT 将功能显像的 SPECT 与解剖显像的 CT 图像有机融合，提高信噪比，在获取衰减校正后的核医学影像同时与同机 CT 图像融合，实现 SPECT 的高敏感性优势及 CT 的解剖准确性优势互补，既可显示病变的血液及功能改变，又可显示其解剖学影像，有效提高病灶的检出能力和定位能力，提高疾病诊断的准确率从而大大提高了诊断的效能。本项目 SPECT/CT 外观图见图 9-6。



图 9-6 本项目 SPECT/CT 外观图

2.2.2 工作原理

SPECT/CT 即单光子发射计算机断层扫描。它将发射单光子的核素药物如^{99m}Tc、^{123}I 引入生物体，其经代谢后在脏器内外或病变部位和正常组织之间形成放射性浓度差异，这些差异通过计算机处理成 ECT 图像，为肿瘤的诊治提供多方位信息。γ照相机探头的每个灵敏点探测沿一条投影线（Ray）进来的γ光子，其测量值代表人体在该投影线上的放射性之和。在同一条直线上的灵敏点可探测人体一个断层上的放射性药物，它们的输出称作该断层的一维投影（Projection）。各条投影线都垂直于探测器并互相平行，称之为平行束，探测器的法线与 X 轴的交角θ称为观测角（View）。γ照相机是二维探测器，安装了平行孔准直器后，可以同时获取多个断层的平行束投影，这就是平片。平片表现不出投影线上各点的前后关系。要想知道生物体在纵深方向上的结构，就需要从不同角度进行观测。可以证明，知道了某个断层在所有观测角的一维投影，就能计算出该断层的图像。 从投影求解断层图像的过程称作重建（Reconstruction）。这种断层成像术离不开计算机，所以称作计算机断层成像术（Computered Tomography，CT）。CT 设备的主要功能是获取投影数据和重建断层图像。

SPECT/CT 是将 SPECT 和 CT 这两种设备安装在同一个机架上，两种显像技术的定位坐标系统相互校准，在两次扫描期间患者处于同一个检查床上且保持体位不变，可防止因患者移位产生的误差，在一定程度上也解决了时间配准的问题。通过 SPECT/CT 图像融合技术，可以将 SPECT 灵敏反映体内组织器官生理、生化和功能的变化与 CT 提供的精确的解剖结构信息相结合，真正实现了功能、代谢、生化影像与解剖结构影像的实时融合，为临床提供了更加全面、客观、准确的诊断依据。不仅如此，CT 提供的图像数据还可用于 SPECT 的衰减校正，有效提高 SPECT 的图像质量。

2.2.3 工艺流程及产物环节

本项目SPECT/CT主要使用含放射性同位素^{123}I的药物进行显像，医院根据患者预约情况，确定当天^{123}I药物所使用的剂量，向专业供应商订购，供应商根据医院预约的时间和用量定时将药物送达核医学中心核素显像区的分装注射室内，医院指定专人负责药物的接收和登记，并暂存到分装注射室手套箱内，当天用完。^{123}I到货时为装入铅罐内的整罐药液，需要由医护人员按病人所需活度进行分装（在分装注射

室手套箱内进行分装），每次最多1.11×10^{9}Bq（3人量，单人用量10mCi）。患者注射完药物后的患者进入SPECT候诊室1/2等待，一定时间后进行扫描检查，如无异常情况，患者当天就可以离开医院。本项目SPECT/CT诊断工艺流程如下：

（1）购置的^{123}I放射性药物由医药公司送至核医学中心核素显像区；

（2）于分装注射室内进行^{123}I放射性药物的分装；

（3）给病人注射^{123}I放射性药物（静推给药）；

（4）病人在SPECT/CT候诊室1/2静坐候诊约20～30分钟；

（5）到SPECT/CT检查床开始扫描（10～20分钟不等）；

（6）扫描完成后进入诊后留观室内留观一段时间后离开。

本项目SPECT/CT诊断部分具体工艺流程及产物环节见图9-7。

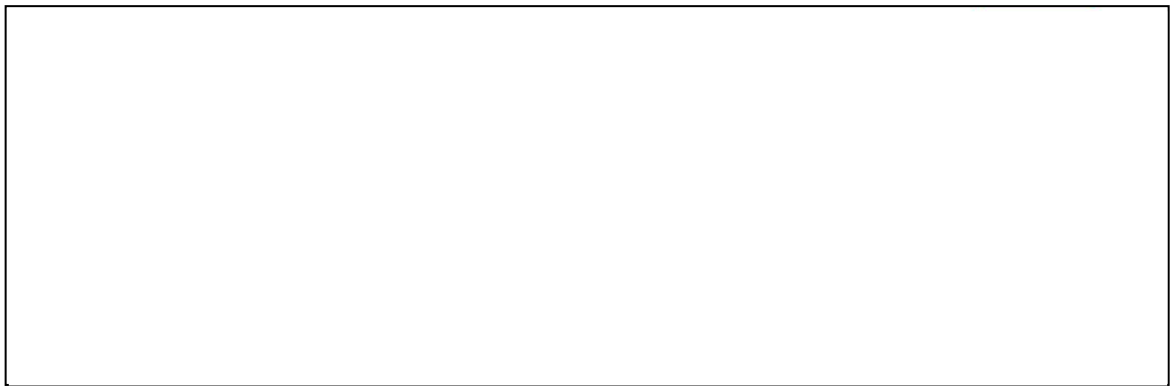


图 9-7 SPECT/CT 诊断部分具体工艺流程及产物环节图

2.3 PET/CT 诊断项目

2.3.1 工程设备

PET/CT 是将 PET 与 CT 融为一体，由 PET 提供病灶详尽的功能与代谢等分子信息，而 CT 提供病灶的精确解剖定位。PET 系统的主要部件包括机架、环形探测器、符合电路、检查床及工作站等。探测系统是整个正电子发射显像系统中的主要部分，它采用的块状探测结构有利于消除散射、提高计数率。CT 主要有扫描部分、计算机系统、图像显示和存储系统组成，其中扫描部分由 X 线管、探测器和扫描架组成。本项目 PET/CT 外观图见图 9-8。



图 9-8 本项目 PET/CT 外观图

2.3.2 工作原理

PET 是使用正电子衰变的核素而成像的设备。正电子发射是放射性核素衰变的方式之一。这类核素在自发的从不稳定状态向基态衰变过程中，从核内释放出与普通电子一样但电荷相反的粒籽，即正电子。正电子是一种反物质，从核内放出后很快与环境中自由电子碰撞湮灭，转化为一对方向相反、能量为 0.511MeV 的γ光子。如果在这对光子飞行方向上对置一对探测器，便可以几乎同时接受到这两个光子，并可推定光子发源（即正电子发射）点在两探头间连线上。通过环绕 360°排列的多组配对探头，经探头对之间符合线路检验判定每只探头信号时间耦合性，排除其他来源射线的干扰，得到探头对连线上的一维信息，再用滤波反投射方式，将信号按探头对的空间位置向中心点反投射，便可形成与探头组连线轴平行的断层面正电子发射示踪剂分布图像。这种探测方式一次只反映一个层面的信息。实用中常用多层排列的探头对，配合层间符合线路，以利探测并重建更多层面的图像。

PET/CT（Positron Emission Tomography and Computer Tomography），全称正电子发射断层与计算机断层诊断技术，是在 PET（Positron Emission Tomography）和 CT（Computer Tomography）的基础上发展起来的新设备，充分结合了 PET 高灵敏度和 CT 高分辨率的优势。其原理是通过正电子核素或其标记的示踪剂，示踪人体内特定生物物质的生物活动，采用多层、环形排列于发射体周围的探头，由体外探测正电子示踪剂湮灭辐射所产生的光子，然后将获得的信息，通过计算机处理，以解剖影像的形式及其相应的生理参数，显示靶器官或病变组织的状况，藉此诊断疾病，又称为生化显像或功能分子显像，是目前唯一可以在活体分子水平完成生物学显示

的影像技术；同时结合应用高档多排 CT 技术进行精确定位，可精确地提供靶器官的解剖和功能双重信息，并能够独立完成多排螺旋 CT 的临床显像，大大提高临床使用价值。

2.3.3 工艺流程及产污环节

南京同仁医院有限公司核医学中心 PET/CT 诊断项目根据患者预约情况提前向专业供应商订购 ^{68}Ga 正电子药物，正电子药物送达核医学中心核素显像区分装注射室。医护人员从铅罐中取出，放入手套箱内。^{68}Ga 放射性药物到货时为装入铅罐内的整罐药液，需要由医护人员按病人所需活度进行分装（在分装注射室手套箱内进行分装），每次最多 $1.85\times10^{9}Bq$（10 人量，单日用药量为 5mCi）。患者注射完药物后的患者进入 PET/CT 候诊室 1/2 等待，一定时间后进行扫描检查，如无异常情况，患者当天就可以离开医院。本项目 PET/CT 诊断工艺流程如下。

（1）购置的^{68}Ga正电子药物由医药公司送至核医学中心核素显像区分装注射室；

（2）于分装注射室内进行^{68}Ga放射性药物的分装；

（3）给病人注射药物（静推给药）；

（4）病人在PET/CT候诊室1/2静坐候诊约20~30分钟；

（5）到PET/CT检查床开始扫描（10～20分钟不等）；

（6）扫描完成后进入诊后留观室内留观一段时间后离开。

PET/CT 诊断部分具体工艺流程及产物环节见图 9-9。

图9-9　PET/CT诊断项目工作流程及产污环节示意图

2.4 放射性核素治疗

2.4.1 工程设备

医院拟于核医学中心核素显像区内新增 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、

^{227}Th 等 7 种核素的治疗，医院还拟于核医学中心核素治疗区内新增 ^{177}Lu 核素治疗。^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等核素治疗门诊量均为 1 人/天，^{177}Lu 核素治疗门诊量为 1 人/周。医院核医学中心核素治疗区内原有 6 座 ^{131}I 甲癌治疗病房，医院拟将其中的病房 6 作为 ^{177}Lu 核素治疗病房，甲癌病房由 6 间减为 5 间。

2.4.2 工作原理

一些放射性核素在衰变过程中，可以释放出α射线或β射线等，具有较强的电离辐射效应，对于肿瘤细胞或异常增殖组织等具有较强的杀灭作用。放射性核素治疗就是指利用具有治疗作用的放射性核素，如^{89}Sr、^{177}Lu、^{223}Ra等核素或标记药物等，近距离精准杀伤病变细胞和组织，达到治疗的目的。

放射性核素治疗主要有内照射、粒子或玻璃微球治疗和硼中子俘获治疗等方法。核素治疗的主要适应证为恶性肿瘤和其他异常增殖性病变，如甲状腺机能亢进症、血管瘤、瘢痕、结节等。每一种诊治项目都有不同的适应证，如^{89}Sr适用于骨转移肿癌治疗，^{177}Lu奥曲肽的适应证为生长抑素受体高表达的神经内分泌肿瘤等，具体需参看不同的项目。

内照射治疗主要是摄入或注射具有治疗作用的核素或核素标记分子，这些分子将在病变靶细胞和组织高度聚集，利用放射性核素释放出来的α射线或β射线等，近距离精准杀伤病变细胞和组织，达到治疗目的。其中适合于治疗用的β放射性核素有^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu、^{177}Lu等，适合于治疗用α放射性核素仅有^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th等。其中$^{89}SrCl_2$主要用于治疗骨转移肿癌，这些药物均具有趋骨性、在骨组织代谢活跃的部分浓聚更多，静脉注射后骨转移肿瘤病灶呈明显的浓聚，利用这些趋骨性放射性药物发射的β射线对肿瘤进行内照射，达到止痛、抑制或破坏骨转移肿瘤病灶。^{90}Y可用来治疗转移性肝癌。^{177}Lu-PSMA、^{225}Ac-PSMA可用来治疗转移性去势抵抗性前列腺癌（mCRPC）。由于^{223}Ra具有趋骨性，^{223}Ra的二氯化物$^{223}RaCl_2$为一种可发射α射线的新型放射性药物，可用来治疗前列腺癌骨转移。

2.4.3 工艺流程及产污环节

2.4.3.1 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{9227}Th等7种核素治疗工艺流程及产污环节

本项目^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{227}Th等7种核素治疗均采用针剂静脉注射方式给药进行治疗，医院拟根据与病人预约情况提前向药物供货商订药，由药物供货商负责将分装好的药物运输至核医学中心核素显像区的手套箱内，医生通知患者进入，在分

装注射室的注射窗口给患者注射，患者注射后如无异常即可离开。

本项目预计每名患者所使用^{89}Sr及^{67}Cu的活度约为1.48×10^{8}Bq（4mCi）左右；每名患者所使用^{223}Ra、^{225}Ac、^{227}Th的活度均约为3.7×10^{6}Bq（0.1mCi）左右；每名患者所使用^{212}Pb放射性药物的活度约为1.85×10^{7}Bq（0.5mCi）左右；每名患者所使用^{212}Bi放射性药物的活度约为3.7×10^{7}Bq（1mCi）左右。每种放射性核素病人的年门诊量均约为250人。本项目^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{227}Th等7种核素治疗工作流程及产污环节分析见图9-10。

图9-10 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{227}Th等7种核素治疗工作流程及产污环节图

2.4.3.2 ^{177}Lu核素治疗工艺流程及产污环节

本项目^{177}Lu核素治疗采用针剂静脉注射方式给药进行治疗，医院拟根据与病人预约情况提前向药物供货商订药，由药物供货商负责将分装好的药物运输至核医学中心核素治疗区分装室内。根据医院提供资料，本项目^{177}Lu治疗患者单次给药剂量平均在200mCi左右，一般需要住院5天左右。本项目^{177}Lu病人周收治量为1人，年收治量约为50人，医院计划每周选定1天集中预约^{177}Lu病人及甲癌病人在分装室服药及注射。^{177}Lu患者在注射药物后进入病房6住院，住院治疗期间活动仅限于病房、配餐间及卫生间，本项目配餐间拟设于分装室西侧，用餐前辐射工作人员将^{177}Lu患者的餐食送至配餐间内，待辐射工作人员离开后通知患者依次进入配餐间领餐。本项目^{177}Lu治疗工作流程及产污环节分析见图9-11。

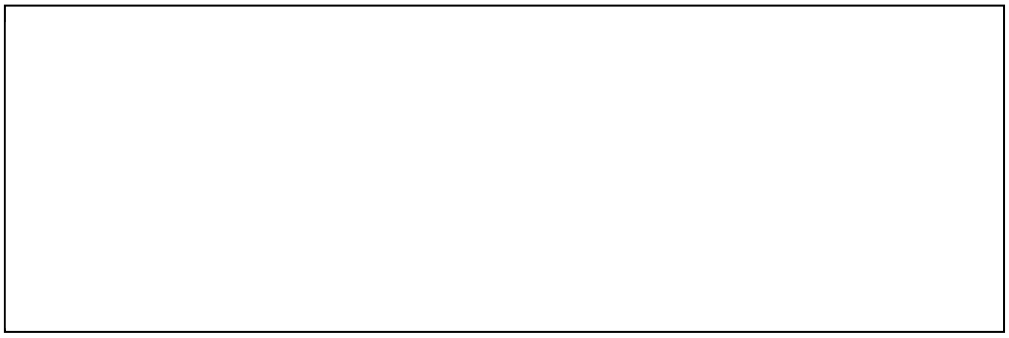


图9-11 ^{177}Lu核素治疗工作流程及产污环节图

2.5 体外敷贴治疗

2.5.1 工程设备

医院拟于拟于核医学中心核素显像区的^{32}P敷贴室内开展^{32}P体外敷贴治疗，在核医学中心核素治疗区的敷贴室内开展^{90}Sr-^{90}Y体外敷贴治疗。^{32}P敷贴治疗门诊量约为10人/天，^{90}Sr-^{90}Y敷贴治疗门诊量为1人/天。

2.5.2 工作原理

体外敷贴治疗一般使用发射β射线的放射性核素，如^{32}P，将其均匀吸附于滤纸或银箔上，按病变大小和形状制成专用的敷贴器，紧贴于病变表面，对体表病变进行外照射，经电离辐射作用，而达到治疗效果。主要适用于皮肤血管瘤、瘢痕疙瘩、顽固性湿疹和局限性神经性皮炎等疾病的治疗。其中^{90}Sr-^{90}Y敷贴器为成品供应的放射源，治疗首先根据患者情况，确定治疗剂量后，病人在专用的敷贴治疗室内接受敷贴治疗，将敷贴器持续的放在病人病灶部位，一次或分次完成疗程总剂量。

2.5.3 敷贴治疗工作流程及产污环节

本项目用于敷贴治疗的^{90}Sr-^{90}Y敷贴器是活度为40mCi（1.48E+09Bq）的密封面源，不使用时贮存在敷贴室一角的贮源保险箱柜内。医院根据患者情况，确定治疗剂量后，病人在负一层专用的敷贴治疗室内接受敷贴治疗，医生手持^{90}Sr-^{90}Y敷贴器，将敷贴器持续的放在病人病灶部位，一次或分次完成疗程总剂量。治疗完毕后病人即可离院。医院预计每年^{90}Sr-^{90}Y发生器的治疗门诊约为250人。

进行^{32}P敷贴治疗时，根据患者病变形状不同，一般每平方厘米采用活度大概20μCi的^{32}P进行敷贴治疗，整个敷贴治疗过程用时短，单名患者用药活度小，一般在1mCi左右，最大不超过2mCi，医院预计每年^{32}P敷贴的治疗门诊约为2500人。医院拟根据患者情况，在核医学中心核素显像区的分装注射室内制作好^{32}P敷贴器，预约病人在^{32}P敷贴室内进行敷贴，敷贴后病人直接离院，废弃的^{32}P敷贴器由病人下次复诊

时带回交由医务人员回收。敷贴治疗时，医院拟采用无纺布胶带等，将^{32}P敷贴器固定在治疗部位，防止^{32}P敷贴器脱落、丢失等。

2.6 人流、物流路径规划

2.6.1 核医学中心核素显像区项目

本项目核医学中心核素显像区设有人流、放射性物流路径，各路径如下：

辐射工作人员路径：①心脏 ECT、SPECT/CT、PET/CT 诊断项目及核素治疗项目（不含 ^{177}Lu 核素治疗）核素操作医务人员路径：缓冲间→卫生通过间→分装注射室→卫生通过间→缓冲间；**②心脏 ECT、SPECT/CT、PET/CT 设备操作医务人员路径：**核医学中心入口→控制室/操作间→设备间、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、心脏 ECT 机房。**③^{32}P 医务人员路径：**缓冲间→卫生通过间→分装注射室→^{32}P 敷贴室→分装注射室→卫生通过间→缓冲间。

心脏 ECT 患者路径：核医学中心核素显像区入口→分装注射室注射窗口→心脏 ECT 候诊室→心脏 ECT 机房→诊后留观室→核素显像区出口离院。

^{68}Ga 患者路径：核医学中心核素显像区入口→分装注射室注射窗口→PET/CT 候诊室 1/2→PET/CT 机房→诊后留观室→核素显像区出口离院。

^{123}I 患者路径：核医学中心核素显像区入口→分装注射室注射窗口→SPECT 候诊室 1/2→SPECT/CT 机房→诊后留观室→核素显像区出口离院。

核素治疗项目（不含 ^{177}Lu 核素治疗）患者路径：核医学中心核素显像区入口→分装注射室注射窗口→核素显像区出口离院。

^{32}P 敷贴患者路径：核医学中心核素显像区入口→^{32}P 敷贴室→核素显像区出口离院。

放射性药物路径：核素显像区出口→分装注射室。

放射性废物路径：放射性同位素操作过程中产生的固体废弃物，在各产生点（如各候诊室、留观室、心脏ECT机房、SPECT/CT机房、PET/CT机房等）就近设置放射性废物收集桶，每天工作结束后由各活性区域分类收集，通过分装注射室送至废物库1内。

本项目核医学中心核素显像区路径图见附图7。

2.6.2 核医学中心核素治疗区项目（^{177}Lu核素治疗）

本项目核医学中心核素治疗区设有人流、放射性物流路径，各路径如下：

医务人员路径：医护走廊东侧出入口→卫生通过间→分装室→清洁被服间/配液/配药室/清洁被服间/污物被服间/抢救室/库房→医护走廊东侧出入口离开。

^{177}Lu 治疗患者路径：患者走廊东侧进入→分装室服药窗口→病房 6/配餐间/治疗室/污洗间/抢救室→患者走廊西侧出口离开。

放射性药物路径：医护走廊东侧出入口→卫生通过间→分装室。

放射性废物路径：放射性同位素操作过程中产生的固体废弃物，在各产生点（如病房6、配餐间、治疗室等）就近设置放射性废物收集桶，每批患者离院后由各活性区域分类收集，通过分装室送至废物库2内。

本项目核医学中心核素治疗区路径图见附图8。

2.7 劳动定员和工作负荷

2.7.1 劳动定员

医院为核医学中心核素显像区配备了 6 名辐射工作人员，为核医学中心核素治疗区配备了 2 名辐射工作人员，8 名辐射工作人员均为核医学中心已有辐射工作人员。

2.7.2 工作负荷

本项目核医学中心核素显像区内心脏 ECT 患者每年约 1250 人，^{68}Ga PET/CT 扫描患者每年约 2500 人，^{123}I SPECT/CT 扫描患者每年约 750 人，^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等 7 种核素治疗患者每年共约 1750 人，^{177}Lu 核素治疗患者每年约 50 人。各环节具体操作时间见表 9-4。

表 9-4 本项目各环节操作时间一览表

场所/项目	工作环节	年总工作时间（h）	备注
核医学中心核素显像区心脏 ECT 项目			
核医学中心核素显像区 ^{68}Ga 核素 PET/CT 诊断项目			
核医学中心核			

素显像区 ^{123}I 核素 SPECT/CT 诊断项目	
核医学中心核素显像区核素治疗项目	
核医学中心核素治疗区	

3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

3.1 工程设备

医院拟利用门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室开展 ^{90}Y 树脂微球治疗项目（DSA2 室的建设项目环境影响评价手续正在履行中），借助 DSA 的血管造影技术将 ^{90}Y 树脂微球通过肝动脉插管直接输注至肿瘤病灶，达到肝癌治疗的目的；并在门诊楼三楼拟设置 1 间 ^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房；^{90}Y 的贮存、质控、分装与扫描依托于医疗综合楼负一层核医学中心核素显像区 SPECT/CT 工作场所。在实施治疗前 7~14 天需使用锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）注入肝动脉，以评估患者是否适合此项治疗，该阶段 ^{99m}Tc 放射性核素单人次使用量为 1~5mCi，^{99m}Tc-MAA 的注射在 DSA 手术室内进行，在核医学中心核素显像区内进行 SPECT/CT 扫描。

3.2 工作原理

钇 90（Y-90）树脂微球是一款靶向放射治疗产品，由含有钇的生物相容性树脂微球组成，直径为 20-60um。该产品被广泛应用于肝癌的选择性体内放射治疗（SIRT）中，即在肝脏病灶处，通过靶向的大剂量高能量β辐射起到杀死癌症细胞的目的，同时不伤害健康肝脏组织。被广泛用于手术治疗不可切除的肝癌，包括结直肠癌肝脏转移癌症、原发性肝癌、胆管癌、神经内分泌细胞瘤、乳腺癌肝脏转移癌症等。具体疗效包括：1）对于原发性肝癌和结直肠癌肝转移的中晚期患者，可以有效延长患者 6~17 个月的生存期；2）患者治疗后的生存质量得到显著的提升，有效缓解晚期病患所承受的痛苦和副作用；3）约 10%患者使用该产品后生存期可能延长至 3 年以上甚至有望长期生存，甚至少数案例显示产品有机会让晚期癌症患者回到可被手术切除的状态，再通过手术实现康复。

3.3 工作流程及产污环节

^{90}Y 树脂微球治疗项目以介入式治疗形式进行，树脂微球通过导管经由肝总动脉、右肝动脉或左肝动脉注射引导到肝脏肿瘤中，在输送到肝动脉后，树脂微球被选择性地输送并停留在肿瘤的微血管中，发挥局部放射疗效，具体手术步骤如下：

第一阶段：^{99m}Tc 放射性药物的前期检验

在治疗前 7~14 天需使用锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）注入肝动脉，以评估患者是否适合此项治疗。该阶段锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）注射过程在门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室内完成，其原理为：锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）为一种对人体无害的诊断用蛋白，分子大小近似 ^{90}Y 树脂微球，可模拟 ^{90}Y 树脂微球于体内分布的状态，确保 ^{90}Y 树脂微球会停驻在肝脏，而非其他器官，不会造成其他器官的放射性伤害。本次 ^{90}Y 树脂微球治疗项目该阶段 ^{99m}Tc 放射性核素单人次使用量仅为 1~5mCi，锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）为有资质供货商按照医院所需用量分装好的针剂。该阶段工作流程具体如下：

（1）前一天住院并填妥血管摄影同意书。

（2）前一天通知禁食 6~8 小时，并将两侧腹股毛发剔除干净以预防感染。

（3）当日送检前注射静脉输注，排空尿液。

（4）送 DSA2 室作血管造影、放置导管并栓塞胃肠侧枝血管。

（5）行腹部电脑断层确定导管位置。

（6）导管注入锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）至肝脏。

（7）2 小时内至核医学中心 SPECT/CT 机房接受 SPECT/CT 扫描。

（8）扫描完成后，患者即可从患者专用通道离开。

（9）医生根据显像结果，了解锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）在人体分布情况，确定患者是否适合 ^{90}Y 树脂微球治疗。^{90}Y 树脂微球治疗工作第一阶段工艺流程及产物环节图见图 9-12。



图9-12 ^{90}Y树脂微球治疗工作第一阶段工艺流程及产物环节

第二阶段：^{90}Y 树脂微球总活度测量和抽取

在第一阶段，若确定患者适合 ^{90}Y 树脂微球治疗，则需在 7~10 天内完成 ^{90}Y 树脂微球输注。医院根据患者具体情况，制定治疗方案及手术时间后，按照处方剂量向供货公司提前订购 ^{90}Y 树脂微球，订购回的 ^{90}Y 树脂微球剂量西林瓶外含 1 个透明的有机玻璃瓶防护罩，被放置在 1 个 20mmPb 铅罐内由供货商送入核医学科，经质检人员核对放射性药物名称、活度，检查药品包装和外观质量，与供药公司办理交接手续后，妥善放入核医学中心核素显像区的源库内。使用时根据患者情况确定需要的放射性药物活度，该阶段涉及到的 ^{90}Y 树脂微球操作过程包括放射性药物活度测量和抽取。图 9-13 给出 ^{90}Y 树脂微球准备环节基本过程。每剂 ^{90}Y 树脂微球在西林瓶中，总活度约为 3.0×10^{9}Bq，容积约为 5ml。一般每位患者仅需注射 1.5~2.5GBq 即可满足治疗需求，每位患者对应 1 瓶 ^{90}Y 树脂微球，剩余 ^{90}Y 树脂微球作为放射性固体废物进行处理。

测量时，先将无菌 V 瓶置于 15mm 有机玻璃 V 架上。辐射工作人员手持内置 ^{90}Y 树脂微球西林瓶的防护罐（未打开）进行摇晃，持续时间大约 30s/例。摇匀后，迅速打开防护罐盖子，使用长柄镊子夹取含 ^{90}Y 树脂微球的西林瓶放置在活度计测井内，测量 ^{90}Y 树脂微球总活度并进行记录。其次将带有 15mm 有机玻璃防护的注射器扎入西林瓶底部，快速抽压数次，使西林瓶中 ^{90}Y 树脂微球混合均匀，抽取一定

量的 ^{90}Y 树脂微球注入 V 瓶，将剩余放射性药物放置在活度计测井中测量，直至抽取完成患者所需的合适的活度为止。注入结束后，拔出注射器并装好针管，将 V 瓶屏蔽罐的顶部塞盖好。^{90}Y 树脂微球的活度测量、抽取过程均在核医学中心核素显像区手套箱内开展。

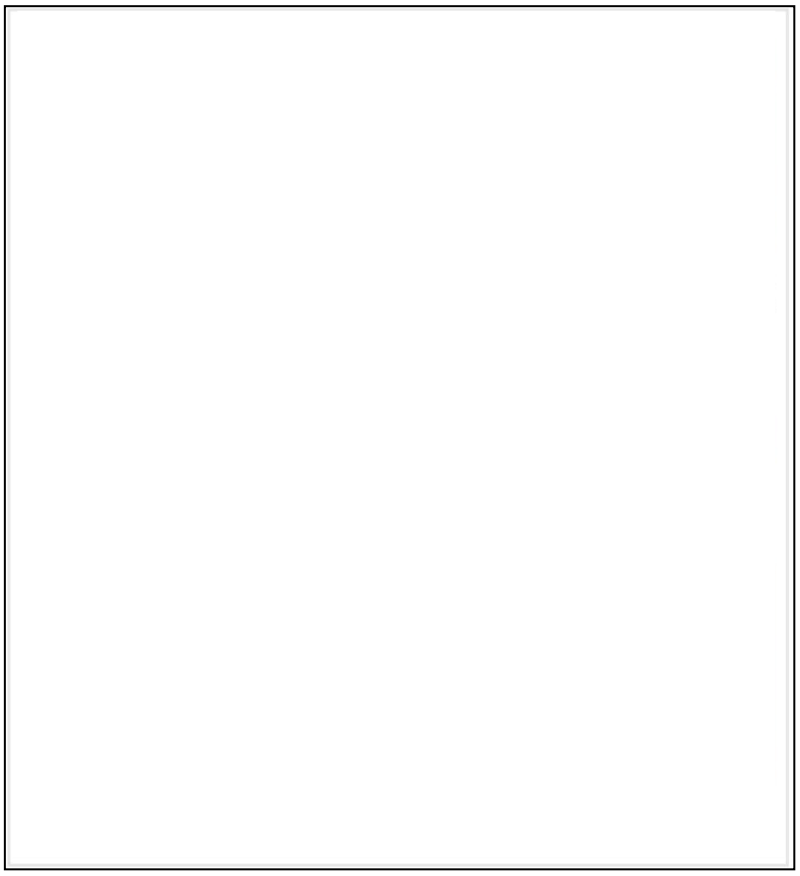


图 9-13 ^{90}Y 树脂微球剂量准备流程及产污环节图

第三阶段：^{90}Y 树脂微球的介入注射

分装好的 ^{90}Y 树脂微球装在 V 瓶中，使用时，取出送入门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室。第三阶段具体工作流程如下：

（1）入院后按血管摄影检查流程执行术前准备（同第一阶段步骤（1）-（4））。

（2）患者至 DSA2 室进行血管造影，放置导管并栓塞胃肠侧枝血管（插管过程需借助 DSA 血管造影技术，此时 ^{90}Y 树脂微球存放于铅罐中，故机房内外主要受到 DSA 曝光产生的辐射影响）。将运送至 DSA2 室的 ^{90}Y 树脂微球与一次性输入装置组装完毕，于 DSA2 室内经导管将 ^{90}Y 树脂微球注入（输注过程无需 DSA 出束照射，故机房内外主要受到 ^{90}Y 树脂微球的辐射影响）。

（3）依血管摄影检查流程执行术后调理。

（4）患者进入 ^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房（门诊楼三楼）住院留观，留观 2~6h。

（5）治疗 24 小时内安排时间至核医学中心做辐射扫描，需耗时约 20min，可以确定 ^{90}Y 树脂微球体植入位置。扫描完成后可直接离院。

^{90}Y 树脂微球治疗工作第三阶段工艺流程及产物环节图见图 9-14。



图9-14 ^{90}Y树脂微球治疗工作第三阶段工艺流程及产物环节图

3.4 工作场所人流、物流路径

本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗项目设有人流、放射性物流路径，各路径如下：

医护人员路线：①核医学中心：辐射工作人员经缓冲间、卫生通过间进入分装注射室，工作结束后原路返回；SPECT/CT 操作人员经 SPECT/CT 机房控制进入 SPECT/CT 机房指导病人摆位；②介入科：^{90}Y 树脂微球输注辐射工作人员经卫生通过间、洁净走廊、员工通道、控制室进入 DSA2 室，工作结束后原路返回。

患者路线：①介入科：进行 ^{99m}Tc 放射性药物的前期检验的病人，在注射 ^{99m}Tc 后 2h 内，需要去核医学中心核素显像区进行 SPECT/CT 扫描；进行 ^{90}Y 树脂微球介入治疗的病人，在术后由护士推床进入 ^{90}Y 专用留观病房，^{90}Y 专用留观病房位于门诊楼三楼 DSA2 室外东北侧，病人留观 2~6h 后可直接离开医院。②核医学科：病人注射 ^{99m}Tc 药物 2h 内由护士送至核医学中心核素显像区检查，在 SPECT/CT 机房进行扫描检查后，由核医学中心核素显像区出口离开；病人进行 ^{90}Y 树脂微球治疗 24h 内，需到核医学中心核素显像区检查，病人由核医学中心核素显像区入口进入，然

后进入 SPECT/CT 机房内进行扫描，扫描完成后由核医学中心核素显像区出口离开。

药物路线：含 ^{99m}Tc、^{90}Y 的放射性药物由专业供货商经核素显像区出口送至分装注射室的手套箱内。核医学科辐射工作人员根据患者的治疗需求，抽取分装好 ^{90}Y 树脂微球（^{99m}Tc 送来时已分装好）。手术当天由核医学中心辐射工作人员在患者就诊前从核素显像区分装注射室经核素显像区病人出口、院内道路将放射性药物送达门诊楼三楼 DSA2 室内。

放射性固废路线：①核医学科：^{90}Y 树脂微球治疗项目分装质控过程中产生的剂量瓶、滤纸、注射器、擦拭废纸、手套等放射性固体废物，收集至废物容器桶内。②介入科：^{90}Y 树脂微球治疗项目输注过程中产生的剂量瓶、一次性使用输注装置、输注导管、纱布、毛巾、手套等放射性固体废物，收集至 5mm 铅当量的废物容器桶内，患者接受输注、进入患者专用留观病房留观后，铅废物容器桶由介入科辐射工作人员通过电梯转运送至核医学中心废物间 1 内。

本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗项目核医学中心路径图见附图 7，介入科路径图见附图 15。

3.5 劳动定员和工作负荷

3.5.1 劳动定员

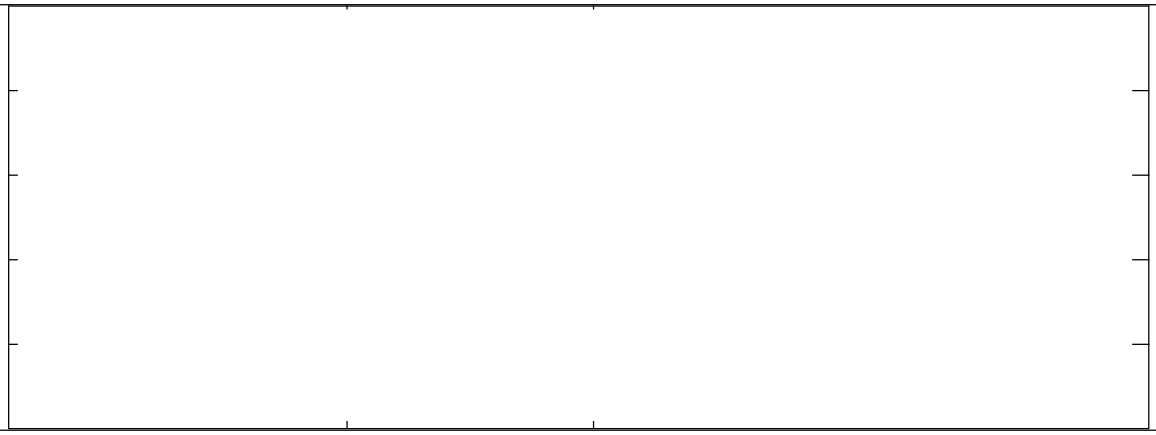
医院拟为 ^{90}Y 树脂微球治疗项目配备 5 辐射工作人员，其中核医学中心核素显像区配备 2 名辐射工作人员，2 名辐射工作人员均为核素显像区现有辐射工作人员，DSA2 室配备 3 名辐射工作人员，3 名辐射工作人员均为 DSA2 室现有辐射工作人员。

3.5.2 工作负荷

本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗患者每年约 100 人，^{90}Y 树脂微球治疗各环节具体操作时间见表 9-5。

表 9-5 本项目各环节操作时间一览表

工作环节	年总工作时间（h）	备注
介入科将核素核医学		



污染源项描述

1 放射性污染

1.1 放射性污染因子源强

本项目动物影像实验室共使用 14 种核素，核医学中心核素显像区共使用 13 种核素，核医学中心核素治疗区共使用 2 种核素，^{90}Y 树脂微球治疗项目共使用 2 种核素。各场所拟使用的放射性药物日使用量及年使用量见表 9-6，日等效最大操作量核算见表 9-7。

表 9-6 各场所使用的放射性药物日使用量及年使用量

场所	核素	用量	
动物影像实验室	^{68}Ge（^{68}Ge-^{68}Ga 发生器）	日最大用量	单柱活度最大 3.7×10^{9}Bq×日最高贮存 1 柱=3.7×10^{9}Bq
		年总量	单柱活度最大 3.7×10^{9}Bq×每年最多使用 2 柱 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器=7.4×10^{9}Bq
	^{68}Ga	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×150 次/年=2.775×10^{10}Bq
	^{64}Cu	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×10 次/年=1.85×10^{9}Bq
	^{89}Zr	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×80 次/年=1.48×10^{10}Bq
	^{123}I	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×5 次/年=9.25×10^{8}Bq
	^{124}I	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×5 次/年=9.25×10^{8}Bq
	^{177}Lu	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×30 次/年=5.55×10^{9}Bq
	^{223}Ra	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{7}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×2 次/年=3.7×10^{7}Bq

	^{225}Ac	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{7}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×3 次/年=5.55×10^{7}Bq
	^{125}I	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×2 次/年=3.7×10^{8}Bq
	^{90}Y	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×2 次/年=3.7×10^{8}Bq
	^{212}Pb	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×5 次/年=9.25×10^{8}Bq
	^{212}Bi	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{7}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×2 次/年=3.7×10^{7}Bq
	^{67}Cu	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{8}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{8}Bq×2 次/年=3.7×10^{8}Bq
	^{227}Th	日最大用量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×1 次实验/天=1.85×10^{7}Bq
		年总量	单次实验最大标记量 1.85×10^{7}Bq×2 次/年=3.7×10^{7}Bq
核医学中心核素显像区	^{99m}Tc（SPECT/CT）	日最大用量	单次平均使用量 9.25×10^{8}Bq×日最大门诊量 15 人=1.388×10^{10}Bq
		年总量	单次平均使用量 9.25×10^{8}Bq×年门诊量 3750 人=3.469×10^{12}Bq
	^{99m}Tc（心脏ECT）	日最大用量	单次平均使用量 9.25×10^{8}Bq×日最大门诊量 5 人=4.625×10^{9}Bq
		年总量	单次平均使用量 9.25×10^{8}Bq×年门诊量 1250 人=1.156×10^{12}Bq
	^{99m}Tc（^{90}Y微球治疗）	日最大用量	单次平均使用量 1.85×10^{8}Bq×日最大门诊量 2 人=3.7×10^{8}Bq
		年总量	单次平均使用量 1.85×10^{8}Bq×年门诊量 100 人=1.85×10^{10}Bq
	^{18}F	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{8}Bq×日最大门诊量 10 人=3.7×10^{9}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{8}Bq×年门诊量 2500 人=9.25×10^{11}Bq
	^{68}Ga	日最大用量	单次平均使用量 1.85×10^{8}Bq×日最大门诊量 10 人=1.85×10^{9}Bq
		年总量	单次平均使用量 1.85×10^{8}Bq×年门诊量 2500 人=4.625×10^{11}Bq
	^{123}I	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{8}Bq×日最大门诊量 3 人=1.11×10^{9}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{8}Bq×年门诊量 750 人=2.775×10^{11}Bq
	^{89}Sr	日最大用量	单次平均使用量 1.48×10^{8}Bq×日最大门诊量 1 人=1.48×10^{8}Bq
		年总量	单次平均使用量 1.48×10^{8}Bq×年门诊量 250 人=3.7×10^{10}Bq
	^{223}Ra	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{6}Bq×日最大门诊量 1 人=3.7×10^{6}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{6}Bq×年门诊量 250 人=9.25×10^{8}Bq
	^{225}Ac	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{6}Bq×日最大门诊量 1 人=3.7×10^{6}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{6}Bq×年门诊量 250 人=9.25×10^{8}Bq
	^{212}Pb	日最大用量	单次平均使用量 1.85×10^{7}Bq×日最大门诊量 1 人=1.85×10^{7}Bq
		年总量	单次平均使用量 1.85×10^{7}Bq×年门诊量 250 人=4.625×10^{9}Bq
	^{212}Bi	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{7}Bq×日最大门诊量 1 人=3.7×10^{7}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{7}Bq×年门诊量 250 人=9.25×10^{9}Bq

	^{67}Cu	日最大用量	单次平均使用量 1.48×10^{8}Bq×日最大门诊量 1 人=1.48×10^{8}Bq
		年总量	单次平均使用量 1.48×10^{8}Bq×年门诊量 250 人=3.7×10^{10}Bq
	^{227}Th	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{6}Bq×日最大门诊量 1 人=3.7×10^{6}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{6}Bq×年门诊量 250 人=9.25×10^{8}Bq
	^{90}Y（微球）	日最大用量	单次平均使用量 3.0×10^{9}Bq×日最大门诊量 2 人=6.0×10^{9}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.0×10^{9}Bq×年门诊量 100 人=3.0×10^{11}Bq
	^{32}P	日最大用量	单次平均使用量 7.4×10^{7}Bq×日最大门诊量 10 人=7.4×10^{8}Bq
		年总量	单次平均使用量 7.4×10^{7}Bq×年门诊量 2500 人=1.85×10^{11}Bq
放射科 DSA 2 室	^{90}Y（微球）	日最大用量	单次平均使用量 2.5×10^{9}Bq×日最大门诊量 2 人=5.0×10^{8}Bq
		年总量	单次平均使用量 2.5×10^{9}Bq×年门诊量 100 人=2.5×10^{11}Bq
	^{99m}Tc	日最大用量	单次平均使用量 1.85×10^{8}Bq×日最大门诊量 2 人=3.7×10^{8}Bq
		年总量	单次平均使用量 1.85×10^{8}Bq×年门诊量 100 人=1.85×10^{10}Bq
和医学中心核素治疗区	^{131}I（甲癌）	日最大用量	单次平均使用量 5.55×10^{9}Bq×日最大门诊量 5 人=2.775×10^{10}Bq
		年总量	单次平均使用量 5.55×10^{9}Bq×年门诊量 250 人=1.388×10^{12}Bq
	^{131}I（甲亢）	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{8}Bq×日最大门诊量 10 人=3.7×10^{9}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{8}Bq×年门诊量 2500 人=9.25×10^{11}Bq
	^{131}I（甲测）	日最大用量	单次平均使用量 3.7×10^{5}Bq×日最大门诊量 20 人=7.4×10^{6}Bq
		年总量	单次平均使用量 3.7×10^{5}Bq×年门诊量 5000 人=1.85×10^{9}Bq
	^{177}Lu	日最大用量	单次平均使用量 7.4×10^{9}Bq×日最大门诊量 1 人=7.4×10^{9}Bq
		年总量	单次平均使用量 7.4×10^{9}Bq×年门诊量 50 人=3.7×10^{11}Bq

表 9-7 各场所使用的放射性药物日等效最大操作量核算

场所	核素	状态/毒性组别	操作方式	日等效最大操作量	场所总日等效最大操作量*
动物影像实验室	^{68}Ge(^{68}Ge-^{68}Ga 发生器)	液态/中毒	源的贮存	日最大操作量 3.7×10^{9}Bq×0.1（中毒）/100（液态/源的贮存）=3.7×10^{6}Bq	1.887×10^{8}Bq
	^{68}Ga	液态/低毒	简单操作	日最大操作量 1.85×10^{8}Bq×0.01（低毒）/1（液态/简单操作）=1.85×10^{6}Bq	
	^{64}Cu	液态/低毒	简单操作	日最大操作量 1.85×10^{8}Bq×0.01（低毒）/1（液态/简单操作）=1.85×10^{6}Bq	
	^{89}Zr	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 1.85×10^{8}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=1.85×10^{7}Bq	
	^{123}I	液态/低毒	简单操作	日最大操作量 1.85×10^{8}Bq×0.01（低毒）/1（液态/简单操作）=1.85×10^{6}Bq	
	^{124}I	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 1.85×10^{8}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=1.85×10^{7}Bq	
	^{177}Lu	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 1.85×10^{8}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=1.85×10^{7}Bq	

	^{223}Ra	液态/极毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{7}Bq\times10$（极毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{8}Bq$	
	^{225}Ac	液态/极毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{7}Bq\times10$（极毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{8}Bq$	
	^{125}I	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{8}Bq\times0.1$（中毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{7}Bq$	
	^{90}Y	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{8}Bq\times0.1$（中毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{7}Bq$	
	^{212}Pb	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{8}Bq\times0.1$（中毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{7}Bq$	
	^{212}Bi	液态/高毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{7}Bq\times1$（高毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{7}Bq$	
	^{67}Cu	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{8}Bq\times0.1$（中毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{7}Bq$	
	^{227}Th	液态/极毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{7}Bq\times10$（极毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{8}Bq$	
核医学中心核素显像区	^{99m}Tc（SPECT/CT）	液态/低毒	很简单操作	日最大操作量 $1.388\times10^{10}Bq\times0.01$（低毒）/10（液态/很简单操作）$=1.388\times10^{7}Bq$	$3.386\times10^{8}Bq$
	^{99m}Tc（心脏ECT）	液态/低毒	很简单操作	日最大操作量 $4.625\times10^{9}Bq\times0.01$（低毒）/10（液态/很简单操作）$=4.625\times10^{6}Bq$	
	^{99m}Tc（^{90}Y 微球治疗）	液态/低毒	很简单操作	日最大操作量 $3.7\times10^{8}Bq\times0.01$（低毒）/10（液态/很简单操作）$=3.7\times10^{5}Bq$	
	^{18}F	液态/低毒	很简单操作	日最大操作量 $3.7\times10^{9}Bq\times0.01$（低毒）/10（液态/很简单操作）$=3.7\times10^{6}Bq$	
	^{68}Ga	液态/低毒	很简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{9}Bq\times0.01$（低毒）/10（液态/很简单操作）$=1.85\times10^{6}Bq$	
	^{123}I	液态/低毒	很简单操作	日最大操作量 $1.11\times10^{9}Bq\times0.01$（低毒）/10（液态/很简单操作）$=1.11\times10^{6}Bq$	
	^{89}Sr	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 $1.48\times10^{8}Bq\times0.1$（中毒）/1（液态/简单操作）$=1.48\times10^{7}Bq$	
	^{223}Ra	液态/极毒	简单操作	日最大操作量 $3.7\times10^{6}Bq\times10$（极毒）/1（液态/简单操作）$=3.7\times10^{7}Bq$	
	^{225}Ac	液态/极毒	简单操作	日最大操作量 $3.7\times10^{6}Bq\times10$（极毒）/1（液态/简单操作）$=3.7\times10^{7}Bq$	
	^{212}Pb	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 $1.85\times10^{7}Bq\times0.1$（中毒）/1（液态/简单操作）$=1.85\times10^{6}Bq$	
	^{212}Bi	液态/高毒	简单操作	日最大操作量 $3.7\times10^{7}Bq\times1$（高毒）/1（液态/简单操作）$=3.7\times10^{7}Bq$	

	^{67}Cu	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 1.48×10^{8}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=1.48×10^{7}Bq	
	^{227}Th	液态/极毒	简单操作	日最大操作量 3.7×10^{6}Bq×10（极毒）/1（液态/简单操作）=3.7×10^{7}Bq	
	^{90}Y（微球）	悬浮液/中毒	很简单操作	日最大操作量 6.0×10^{9}Bq×0.1（中毒）/10（液态/很简单操作）=6.0×10^{7}Bq	
	^{32}P	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 7.4×10^{8}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=7.4×10^{7}Bq	
放射科DSA 2 室	^{90}Y（微球）	悬浮液/中毒	很简单操作	日最大操作量 5.0×10^{9}Bq×0.1（中毒）/10（液态/很简单操作）=5.0×10^{7}Bq	5.0×10^{7}Bq
	^{99m}Tc	液态/低毒	很简单操作	日最大操作量 3.7×10^{8}Bq×0.01（低毒）/10（液态/很简单操作）=3.7×10^{5}Bq	
核医学中心核素治疗区	^{131}I（甲癌）	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 2.775×10^{10}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=2.775×10^{9}Bq	3.886×10^{9}Bq
	^{131}I（甲亢）	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 3.7×10^{9}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=3.7×10^{8}Bq	
	^{131}I（甲测）	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 7.4×10^{6}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=7.4×10^{5}Bq	
	^{177}Lu	液态/中毒	简单操作	日最大操作量 7.4×10^{9}Bq×0.1（中毒）/1（液态/简单操作）=7.4×10^{8}Bq	

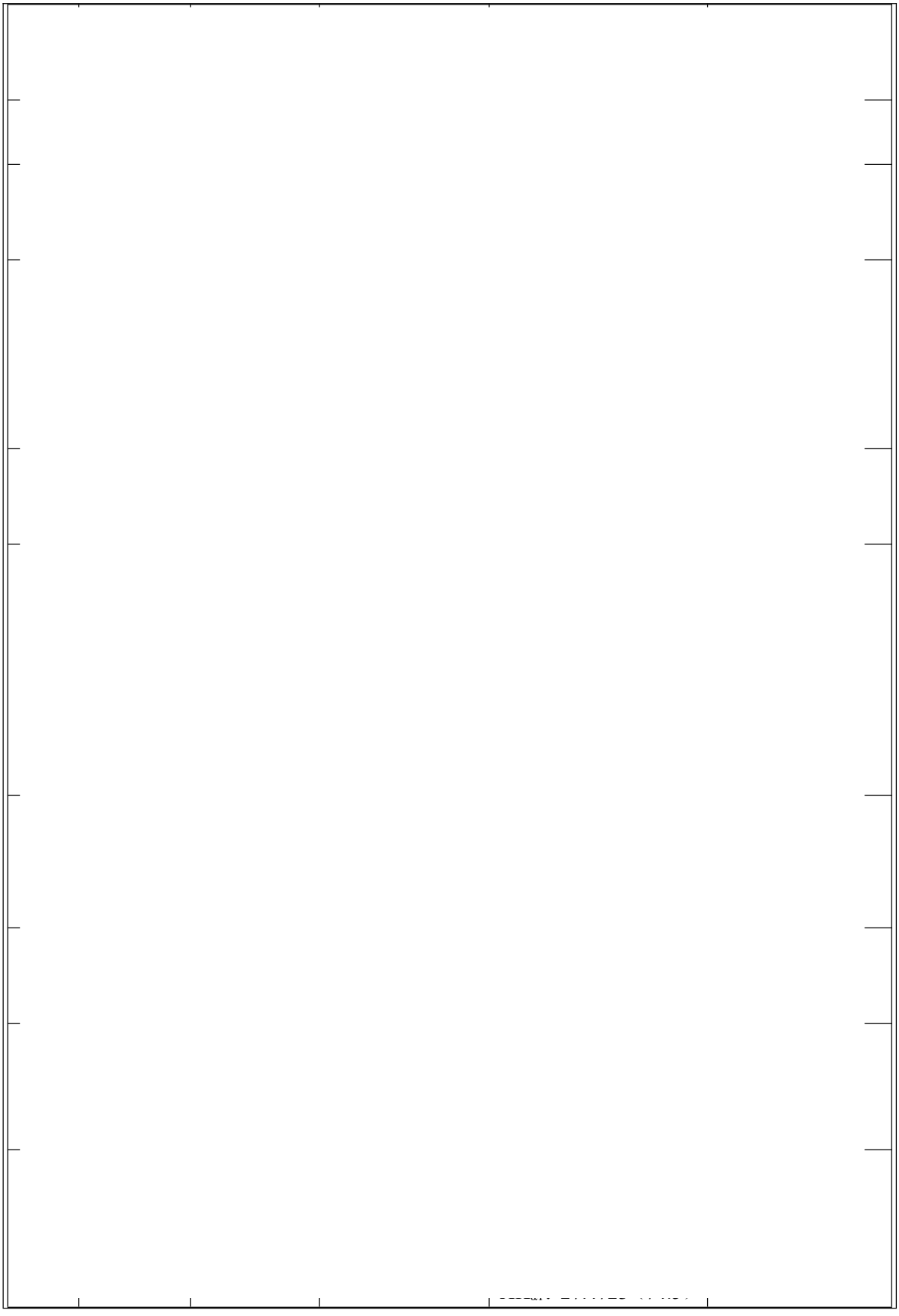
*：由于动物影像实验室每天仅进行 1 次实验，因此取影响最大核素（^{223}Ra、^{225}Ac 或 ^{227}Th）的日等效最大操作量及 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器储存时日等效最大操作量之和作为动物影像实验室的日等效最大操作量，即 1.85×10^{8}Bq+3.7×10^{6}Bq=1.887×10^{8}Bq。^{90}Y 树脂微球治疗项目中，^{90}Y 和 ^{99m}Tc 操作不在同一天使用，两种核素日等效操作量不叠加，按照 ^{90}Y 日等效最大操作量来核算核医学科和 DSA 手术室场所等级，即 5.0×10^{7}Bq。

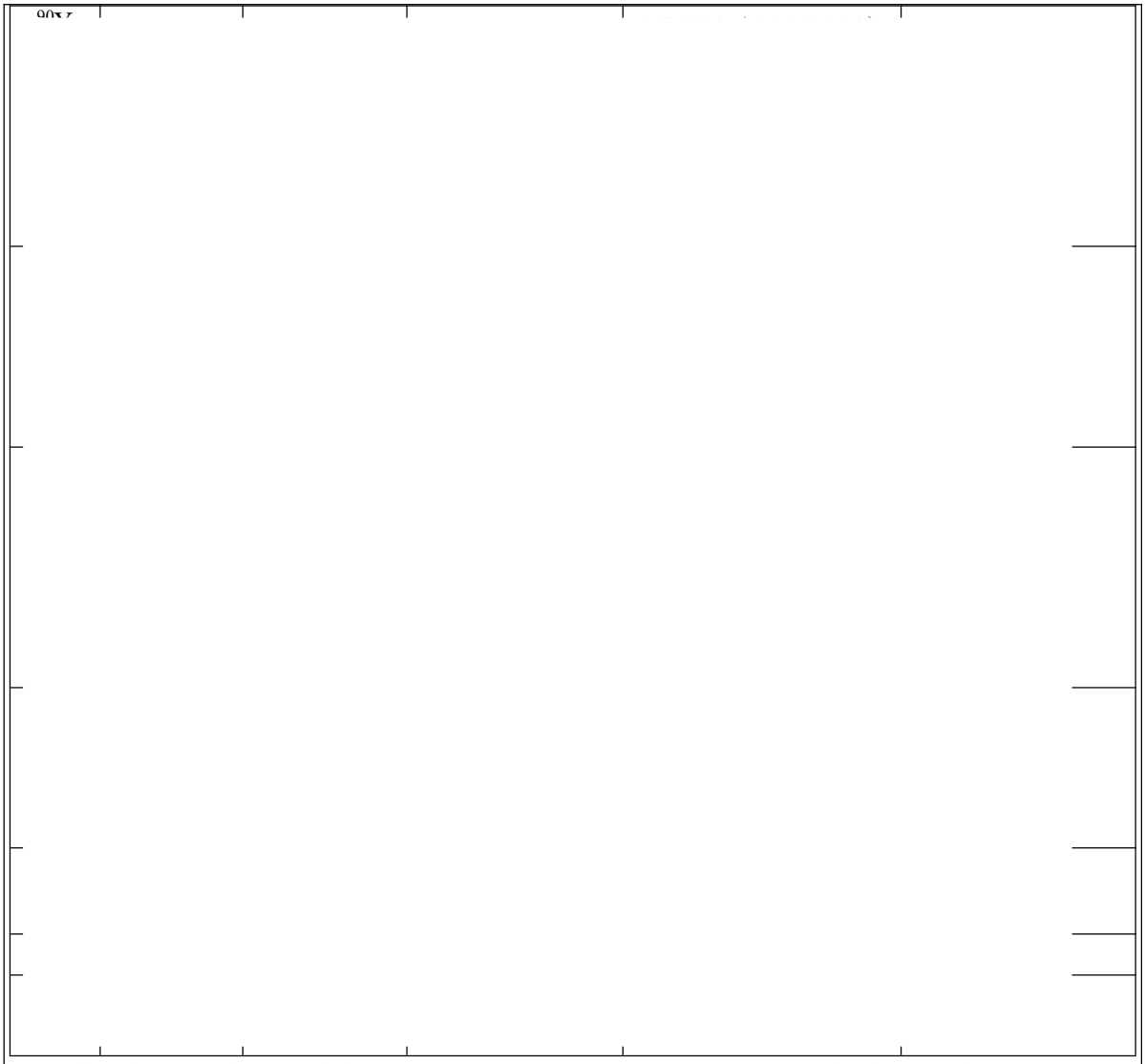
由上述表 9-7 可知，动物影像实验室日等效最大操作量为 1.85×10^{8}Bq，核医学中心核素显像区的日等效最大操作量作为 3.386×10^{8}Bq，放射科 DSA2 室的日等效最大操作量作为 5.0×10^{7}Bq，核医学中心核素治疗区的日等效最大操作量作为 3.886×10^{9}Bq，均属于 GB18871 中**乙级**非密封放射性物质工作场所范围（2×10^{7}Bq~4×10^{9}Bq）。因此本项目动物影像实验室、核医学中心核素显像区、核医学中心核素治疗区及放射科 DSA2 室均为**乙级**非密封放射性物质工作场所。

本项目涉及的各放射性核素特性见表 9-8。

表 9-8 放射性核素特性一览表

核素	半衰期	衰变类型及分支比（%）	主要α、β 射线能量（keV）与绝对强度（%）	主要 γ、X 射线能量（keV）与绝对强度（%）	周围剂量当量率常数（$Sv\cdot m^{2}\cdot Bq^{-1}\cdot h^{-1}$）





注：数据来源于《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）、《简明放射性同位素应用手册》、《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 I）》、《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 II）》。

1.2 放射性工作场所污染因子

本项目各放射性工作场所产生的主要放射性污染因子见表 9-9。

表 9-9 放射性工作场所产生的主要放射性污染因子一览表

放射性工作场所	主要放射性污染因子
动物影像实验室	X 射线、α射线、β射线、γ射线、表面污染、放射性固体废物、放射性废气、臭氧及氮氧化物
核医学中心核素显像区	X 射线、α射线、β射线、γ射线、表面污染、放射性固体废物、放射性废水、放射性废气、臭氧及氮氧化物
核医学中心核素治疗区	β射线、γ射线、表面污染、放射性固体废物、放射性废水、放射性废气
放射科 DSA2 室	X 射线、β射线、γ射线、表面污染、放射性固体废物、放射性废水、放射性废气、臭氧及氮氧化物

1.2.1 动物影像实验室

本项目动物实验在动物影像实验室开展，项目开展过程中产生的放射性污染因子主要包括：X 射线、α射线、β射线、γ射线、表面污染、放射性固体废物、放射性废气、臭氧及氮氧化物。

①射线：在药物的动物实验过程中，使用的大部分放射性药物主要对局部环境产生α射线、β射线、γ射线，此外，小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统工作时，还会产生 X 射线。因此，α射线、β射线、γ射线及 X 射线是主要污染因子。

②表面污染：辐射工作人员在放射性核素操作过程中，可能会发生药物撒落事故，对工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾污。

③放射性固体废物：本项目产生的放射性固废主要包括：1）放射性药物标记、分装及动物实验过程中产生的沾染放射性核素的废试剂瓶、棉球、吸水纸、手套、注射器等。2）注射放射性药物后的小动物在注射后饲养间临时饲养过程中，产生的含有少量小动物排泄物的木屑等垫料。3）动物解剖后，带有放射性核素的动物尸体、组织。4）通风系统中置换下的废活性炭。5）事故状况下发生药物泼洒等意外事故时，对于污染场所将采用干法去污，去污过程中产生的擦拭用吸水纸、酒精棉球等。6）动物饲养笼具擦拭，采用消毒水喷洒后，用吸水纸、干/湿纸巾进行擦拭清洗，擦拭后产生的带有放射性核素的吸水纸、干/湿纸巾等。

④放射性废气：辐射工作人员进行放射性药物的标记、分装及给老鼠注射放射性药物时，将会产生微量放射性气体，放射性气体通过热室内或生物操作间内的通风系统排出，通风系统设置活性炭过滤装置，排放口高出本栋建筑屋脊。放射性气体不会对项目周围环境带来明显影响。放射性气体对辐射工作人员的影响可以忽略。

1.2.2 核医学中心核素显像区及核素治疗区显像诊断及治疗

本项目核医学中心核素显像区及核素治疗区在进行放射诊断核治疗过程中，产生的放射性污染因子主要包括：X 射线、α射线、β射线、γ射线、表面污染、放射性固体废物、放射性废水、放射性废气、臭氧及氮氧化物。

①射线：SPECT/CT 及 PET/CT 扫描时产生的 X 射线；各放射性核素在取药、分装、注射、注射后候诊、扫描、留观等过程中产生的α射线、β射线、γ射线。因此，α射线、β射线、γ射线及 X 射线是主要污染因子。

②表面污染：辐射工作人员在放射性核素分装、注射过程中，可能会发生药物撒落事故，对工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾污。

③放射性固体废物：各放射性核素操作过程中产生的如注射器、一次性手套、一次性纸杯、棉签、滤纸等带微量放射性核素的医疗固体废弃物，通风管道内更换下来的废活性炭等，^{32}P 敷贴时产生的废弃的 ^{32}P 敷贴器。

④放射性废水：本项目核医学中心核素显像区进行显像诊断及核素治疗区进行核素治疗时，产生的放射性废水主要有擦拭冲洗受放射性同位素污染物品用水、操作人员进行放射性药物操作后洗涤用水、用药患者的排泄物及其冲洗水等。

⑤放射性废气：液态放射性同位素在进行操作时，空气中挥发的微量放射性同位素；污染途径为放射性药物在空气中挥发散逸，被医务人员和公众呼吸入体内造成的内照射。

1.2.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

本项目在进行 ^{90}Y 树脂微球治疗过程中，产生的放射性污染因子主要包括：X 射线、β射线、韧致辐射、表面污染、放射性固体废物、放射性废水、放射性废气、臭氧及氮氧化物。

①射线：使用 SPECT/CT 进行扫描时、放射科 DSA2 室使用 DSA 进行介入手术时，会产生 X 射线；^{99m}Tc 放射性核素衰变方式为同质异能跃迁，伴随发射 0.14MeV 的γ射线；^{90}Y 放射性核素衰变产生的β射线。因此，β射线、γ射线及 X 射线是主要污染因子。

②表面污染：本项目放射性药物在分装与注射过程中可能会发生药物撒落事故，对工作台、设备、墙壁、地面等产生放射性沾污。

③放射性固体废物：^{90}Y 树脂微球抽取过程中产生的转移用的一次性手套、注射器、含剩余药物的西林瓶等；注射 ^{99m}Tc、^{90}Y 放射性药物产生的一次性手套、输液管、患者体内导管、V 瓶及有机玻璃防护罐等。

④放射性废水：患者在注入 ^{90}Y 树脂微球后留观过程中，会有含有 ^{90}Y 核素的尿液排出。

⑤放射性废气：液态放射性同位素在进行操作时，空气中挥发的微量放射性同位素。

1.3 放射性三废产生量

本项目各非密封放射性物质工作场所放射性废水及固废产生量见表 9-10、表 9-11。

表 9-10 放射性废水产生量

工作场所	核素名称	产生量	年产生量
核医学中心核素显像区	^{18}F、^{99m}Tc、^{68}Ga、^{123}I、^{90}Y	492.5L/天	492.5L/天×年工作250天=123.13m^3
核医学中心核素治疗区	^{131}I、^{177}Lu	4275L/周	4275L/周×年工作50周=213.75m^3

表 9-11 放射性固废产生量

工作场所/项目	核素名称	日产生量（kg/天）	年生产/工作天数（天）	年产生量（kg/年）
动物影像实验室	^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th	1	300	300
	^{68}Ge、^{68}Ga	退役的 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器：约 2 柱		
核医学中心核素显像区	^{68}Ga、^{123}I、^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th、^{32}P	1.2	250	300
核医学中心核素治疗区	^{131}I、^{177}Lu	1.2	250	300
^{90}Y 树脂微球治疗	^{99m}Tc、^{90}Y	0.65	100	65
各辐射工作场所通风系统	^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th、^{131}I、^{32}P、	废活性炭：50kg/a		

2 非放射性污染源分析

①废气：小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统、SPECT/CT、PET/CT 和 DSA 机房内的空气在 X 射线、γ射线及β射线作用下，分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，通过动力排风装置排入大气，臭氧在大气中 50 分钟可自行分解为氧气，对周围环境影响较小。

②废水：主要是辐射工作人员产生的生活污水，将进入医院污水处理系统，处理达标后排入城市污水管网，对周围环境影响较小。

③固体废物：主要是辐射工作人员产生的一般生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

表 10 辐射安全与防护

项目安全设施

1 工作场所布局合理性分析

1.1 动物影像实验室项目

本项目动物影像实验室内设置有单独的人流和物流通道；放射性工作场所和非放射性工作场所均采用实体隔断分开布置，放射性药物的标记、分装均在热室内进行，动物饲养室、小动物 PET 机房等均设置实体屏蔽，控制室位于扫描机房外，尽可能避免对周围人员的辐射影响；辐射工作人员出入口和物流出入口拟设置门禁系统，禁止无关人员进入；辐射工作人员出入口处设有缓冲区，配备表面沾污仪进行污染检测，同时拟设置可更换衣物、铅衣等防护用品，避免对工作场所外造成污染；辐射工作人员操作后离开控制区前均作表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，则采取去污措施，从控制区取出任何物件都拟进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区，避免对控制区外造成污染，本项目动物影像实验室平面布局合理。本项目动物影像实验室的平面布局见附图 3。

本项目将动物影像实验室主要包括的核素标记实验室、物料间、卫生通过间、洁净走廊、缓冲间（共 3 间）、检测/去污间、二更、一更、理化室、研发实验室走廊、QC 室、生物操作间、小动物 PET 机房、控制室、细胞实验室、更衣间、注射前饲养间、注射后饲养间、动物尸体/废物间等。动物影像实验室工作场所具体分区情况见表 10-1，动物影像实验室平面布置及“两区”划分见附图 3。

表 10-1 动物影像实验室工作场所分区情况一览表

控制区	监督区
核素标记实验室、理化试验室、QC 室、生物操作间、小动物 PET 机房、注射后饲养间、动物尸体/废物间	物料间、卫生通过间、洁净走廊、缓冲间（共 3 间）、检测/去污间、二更、一更、研发实验室走廊、控制室、细胞实验室、更衣间、注射前饲养间

医院拟在动物影像实验室控制区设置辐射屏蔽和安全防护设施，入口拟设置明显的符合 GB18871-2002 要求的电离辐射警告标志。动物影像实验室工作场所设计有辐射工作人员路径、放射性物流路径、小动物运输路径及放射性废物路线，医院拟采取相应的管理措施，在时间上将人流、物流分开，防止发生交叉污染，医院拟制定相应的管理制度，工作人员严格按照管理制度进行操作以减少交叉照射。本项目动物影像实验室控制区和监督区划分明显，布局及通道设计合理，符合《电离辐射

防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.4 款中有关辐射工作场所的分区规定。

1.2 核医学中心项目

本项目核医学中心建于医院医疗综合楼负一层西南角，其工作场所布局及分区如附图 3 所示。核医学中心未邻接产科、儿科、食堂等部门，且核医学中心设置相对集中，并设有单独出、入口，出口避开了门诊大厅、收费处等人群稠密区域。

1.2.1 核医学中心核素显像区分区

本项目核医学中心核素显像区主要包括缓冲间、淋浴间、卫生通过间、分装注射室、废物库 1、源库、^{32}P 敷贴室、患者走廊、SPECT/CT 候诊室 1、污洗间、SPECT/CT 候诊室 2、SPECT/CT 机房、设备间、PET/CT 机房、PET/CT 候诊室 1、PET/CT 候诊室 2、心脏 ECT 候诊室、心脏 ECT 机房、预留 PET/MR 机房、诊后留观室、控制室、操作间等。核医学中心核素显像区工作场所具体分区情况见表 10-2，核医学中心核素显像区平面布置及“两区”划分见附图 3。

表 10-2 核医学中心核素显像区工作场所分区情况一览表

控制区	监督区
分装注射室、废物库 1、源库、^{32}P 敷贴室、患者走廊、SPECT/CT 候诊室 1、污洗间、SPECT/CT 候诊室 2、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/CT 候诊室 1、PET/CT 候诊室 2、心脏 ECT 候诊室、心脏 ECT 机房、诊后留观室	缓冲间、淋浴间、卫生通过间、控制室、操作间、设备间、预留 PET/MR 机房

1.2.2 核医学中心核素治疗区分区

本项目核医学中心核素治疗区主要包括病房 1~病房 6、患者走廊、甲亢留观室、甲亢服碘室、分装室、源库、废物库 2、卫生通过间、更衣室、卫生间、配餐间、清洁被服间、治疗室、配液/配药室、污洗间、污染被服间、抢救室、库房、医护走廊等。核医学中心核素治疗区工作场所具体分区情况见表 10-3，核医学中心核素治疗区平面布置及“两区”划分见附图 3。

表 10-3 核医学中心核素治疗区工作场所分区情况一览表

控制区	监督区
病房 1~病房 6、患者走廊、甲亢留观室、甲亢服碘室、分装室、源库、废物库 2、配餐间、治疗室、污洗间、污染被服间、抢救室	卫生通过间、更衣室、卫生间、清洁被服间、配液/配药室、库房、医护走廊

医院在核医学中心核素显像区和核素治疗区控制区拟设置辐射屏蔽和安全防护设施，入口拟设置明显的符合 GB18871-2002 要求的电离辐射警告标志。核医学科工

作场所设计有病人进出路线、医务人员进出路线及放射性废物路线；控制每个时段就诊患者数量，前一位病人注射（服药）完进入候诊室后，医生通知下一位病人进行注射（服药），同理，当上一位病人扫描完从通道离开后，方通知下一位病人进行扫描，以避免病人之间交叉照射。本项目线路设置可有效避免带有放射性的病人对其它人员造成不必要照射，核医学科控制区和监督区划分明显，布局及通道设计合理，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.4 款中有关辐射工作场所的分区规定。

1.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

本项目利用医院门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室开展 ^{90}Y 树脂微球治疗项目，借助 DSA 的血管造影技术将 ^{90}Y 树脂微球通过肝动脉插管直接输注至肿瘤病灶，达到肝癌治疗的目的；并在门诊楼三楼拟设置 1 间 ^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房；^{90}Y 的贮存、质控、分装与扫描依托于医疗综合楼负一层核医学中心核素显像区 SPECT/CT 工作场所。在实施治疗前 7~14 天需使用锝标记的亚锡聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）注入肝动脉，以评估患者是否适合此项治疗，该阶段 ^{99m}Tc 放射性核素单人次使用量为 1~5mCi，^{99m}Tc-MAA 的注射在 DSA 手术室内进行，核医学中心核素显像区内进行 SPECT/CT 扫描。

为加强辐射防护管理和职业照射控制，本项目拟进行分区管理。对核医学中心显像区分区见表 10-2。对放射科 DSA2 室，医院拟将 DSA2 室的机房、患者专用留观病房作为辐射防护控制区，严格控制人员进出，在机房、病房入口处设置有“当心电离辐射”警告标志，在机房门上方设置有工作状态指示灯，防止无关人员逗留和误入；拟将控制间、设备间及洽谈室作为辐射防护监督区。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定要求。介入科平面布局及控制区与监督区划分图见附图 15。

2 辐射防护屏蔽设计

2.1 动物影像实验室项目

本项目动物影像实验室的屏蔽情况见表 10-4。

表 10-4 动物影像实验室屏蔽情况一览表

工作场所设施/机房	屏蔽情况	用途
标记实验室内合成热室及分装热室	六面：68mmPb 铅	放射性核素的淋洗、放射性药物的合成和分装等
核素标记实验室	屋顶为 15cm 混凝土，底部为 35cm 混凝土，防护门为防盗门	放射性核素的淋洗、放射性药物的合成和分装等

QC 室	南侧、西侧、北侧墙体采用 3mmPb+净化彩钢板，东侧墙体采用 5mmPb+净化彩钢板，屋顶为 15cm 混凝土，底部为 35cm 混凝土，防护门采用 3mmPb	药物质检
理化试验室	四周墙体采用 3mmPb+净化彩钢板，屋顶为 15cm 混凝土，底部为 35cm 混凝土，防护门采用 3mmPb	进行简单的理化实验，理化实验不涉及放射性操作；后期可能作为 QC 室的扩展房间
生物操作间	四周墙体采用 5mmPb+净化彩钢板，屋顶为 15cm 混凝土，底部为 35cm 混凝土，防护门采用 5mmPb	动物给药注射、动物解剖
小动物 PET 机房	东、南、北墙体采用 3mmPb+净化彩钢板，西墙体采用 5mmPb+净化彩钢板，屋顶为 15cm 混凝土，底部为 35cm 混凝土，防护门采用 3mmPb，观察窗采用 3mm 铅当量防护玻璃	给药后小动物的扫描
注射后饲养间、动物尸体/废物间	四周墙体采用 4mmPb+净化彩钢板，屋顶为 15cm 混凝土，底部为 35cm 混凝土，防护门采用 4mmPb	注药后小动物临时饲养；动物影像实验室内产生的放射性固体废物的暂存
细胞实验室	四周墙体采用净化彩钢板，屋顶为 15cm 混凝土，底部为 35cm 混凝土，防护门采用普通门	进行细胞培养，构建肿瘤模型，此过程不涉及放射性核素操作
配备 2 块 10mm 铅当量的 L 屏及 2 块 1cm 厚的有机玻璃 L 屏		
各场所的墙体均采用易于去污的实验室级净化彩钢板，顶部为 150mm 砼加净化彩钢板吊顶，地面铺设易于去污、易于移除且防渗的 PVC 地板，门为不锈钢门。保证车间内墙体、地面、天棚的建筑材料具有较好的耐辐照、耐火性能，并具有不易污染、耐化学腐蚀、容易去污等特点。地面与墙壁间的接缝均无缝隙。		

2.2 核医学中心核素显像区及核素治疗区

本项目核医学中心核素显像区及核素治疗区辐射防护屏蔽设计参数见表 10-5。

表 10-5 核医学中心核素显像区及核素治疗区工作场所屏蔽设计

场所		屏蔽设计参数
核医学中心核素显像区	SPECT/CT 机房	四周墙体：30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层； 顶棚：15cm 混凝土+8mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+4.5mm 铅板+4.5cm 混凝土； 防护门：6mm 铅板； 观察窗：6mm 铅当量
	PET/CT 机房	四周墙体：30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层； 顶棚：15cm 混凝土+8mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+4.5mm 铅板+4.5cm 混凝土； 防护门：8mm 铅板； 观察窗：8mm 铅当量

	心脏 ECT 机房		东墙、北墙：30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层； 南墙：1mmPb 铅板+1mm 铅当量硫酸钡板 西墙：2mmPb 铅板 顶棚：15cm 混凝土； 地面：35cm 混凝土； 防护门：2mm 铅板； 观察窗：2mm 铅当量
	分装注射室		四周墙体：30cm 混凝土+90mm 硫酸钡涂层； 顶棚：15cm 混凝土+8mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+4.5cm 混凝土； 防护门：8mm 铅板；
	^{32}P 敷贴室/抢救室、SPECT/CT 候诊室 1、SPECT/CT 候诊室 2、PET/CT 候诊室 1、PET/CT 候诊室 2、心脏 ECT 候诊室、诊后留观室、废物库 1		四周墙体：30cm 混凝土+90mm 硫酸钡涂层（候诊室之间隔墙取消硫酸钡）； 顶棚：15cm 混凝土+8mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+4.5cm 混凝土； 防护门：6mm 铅板
	手套箱	共配有 2 个手套箱，1 个手套箱为 45mm 铅当量，1 个手套箱为 10mm 铅当量	
	注射窗	共配有 2 个注射窗，1 个注射窗拟由原先的 20mm 铅当量改为 28mm 铅当量，1 个注射窗保持原先的 20mm 铅当量不变	
核医学中心核素治疗区	甲亢服碘室、甲亢留观室、^{90}Sr-^{90}Y 敷贴室		四周墙体：30cm 混凝土+45mm 硫酸钡涂层（甲亢留观室西墙取消硫酸钡）； 顶棚：15cm 混凝土+5mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+4.5cm 混凝土； 防护门：6mm 铅板； 给药窗：20mm 铅当量
	分装室		四周墙体：30cm 混凝土+60mm 硫酸钡涂层； 顶棚：15cm 混凝土+15mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+3cm 硫酸钡土层+8cm 混凝； 防护门：10mm 铅板； 给药窗：20mm 铅当量
	病房 1~6		四周墙体：30cm 混凝土+60mm 硫酸钡+1mm 铅板（病房 1 东墙另加 3mm 铅板，病房之间隔墙取消硫酸钡及铅板）； 顶棚：15cm 混凝土+15mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+3cm 硫酸钡土层+8cm 混凝； 防护门：3mm 铅板
	源库、废物库 2、治疗室、配液/配药室、抢救室、污染被服间、患者走廊		四周墙体：30cm 混凝土+60mm 硫酸钡涂层； 顶棚：15cm 混凝土+15mm 铅板； 地面：35cm 混凝土+3cm 硫酸钡土层+8cm 混凝； 防护门：抢救室南侧防护门 12mm 铅板，其余防护门 10mm 铅板
	配餐间		四周墙体：30cm 混凝土+60mm 硫酸钡涂层； 顶棚：15cm 混凝土+15mm 铅板；

		地面：35cm 混凝土+3cm 硫酸钡土层+8cm 混凝； 防护门：10mm 铅板； 玻璃窗：10mm 铅当量防护玻璃
	手套箱	40mmPb
注：混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，硫酸钡涂层密度不低于 3.8g/cm^3。		

2.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

本项目涉及核医学中心核素显像区的场所屏蔽见表 10-4，涉及 DSA2 室及 ^{90}Y 留观室的屏蔽参数见表 10-6。

表 10-6 本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗工作场所辐射防护屏蔽设计参数

具体房间/设施	四周墙体	屋顶及地面	防护门	观察窗
DSA 手术室	12cm 实心砖+2mm 铅板	12cm 混凝土+3cm 硫酸钡水泥	3mmPb	3mm 铅当量防护玻璃
^{90}Y 留观室	—	11cm 混凝土	—	—
注：砖墙密度为 1.65g/cm^3，混凝土密度为 2.35g/cm^3，铅板密度为 11.35g/cm^3，硫酸钡涂层密度为 3.8g/cm^3。				

3 辐射安全措施

3.1 动物影像实验室项目

（1）门禁系统。动物影像实验室辐射工作人员出入口及物流出入口拟设置门禁系统，只有经授权的工作人员才能进入，禁止无关人员进入。

（2）电离辐射警告标志及警示说明。动物影像实验室内小动物 PET 机房门上、核素标记实验室门上、QC 室门上、生物操作间门上、注射后饲养间门上、动物尸体/废物间门上等明显位置处粘贴电离辐射警告标志及中文警示说明，严禁非辐射工作人员进入。热室表面、放射性废物桶表面等拟按要求设置有放射性标识和中文警示说明。

（3）视频监控、观察窗。动物影像实验室工作人员出入口及物流出入口处、核素标记实验室、QC 室、生物操作间、注射前动物饲养室、注射后动物饲养室、动物尸体/废物间内均拟安装视频监控探头，监视器设置于医院保卫处的值班室；小动物 PET 机房拟设置观察窗，同时拟设置视频监控探头，监视器设置于控制台处，工作人员在控制室内可及时观察室内情况及防护门开闭情况，防止意外情况的发生。

（4）双人双锁。动物影像实验室的动物尸体/废物间拟设置双人双锁管理，确保放射性废物的安全。

（5）小动物 PET 机房入口防护门上方拟设置工作状态指示灯，灯箱上设置“射线有害、灯亮勿入”的警示语句，工作状态指示灯与防护门拟设置门灯联锁装置。同时，小动物 PET 机房平开防护门拟设置自动闭门装置。

（6）急停按钮。小动物 PET 机房及控制室内均拟设置紧急停机按钮，并在醒目处设置标签，标明使用方法，一旦有人员滞留立即按下紧急停止按钮，切断电源。

（7）其他安全措施要求

①严禁工作人员在控制区内进食、饮水、吸烟、化妆，严禁进行无关工作及存放无关物件，防止含有微量放射性核素的空气被工作人员吸入体内造成内照射；

②本项目所有放射性药物的标记、分装均在热室内进行，辐射工作人员进入控制区均穿戴工作服、一次性手套、工作鞋，佩戴过滤式口罩，近距离接触放射性核素或给药后动物时还将穿戴铅衣等个人防护用品，并尽可能熟练操作技能、缩短操作时间；

③实验室控制区内墙面、地面均拟采用易于去污的材料或涂料，并平整光滑；地面与墙面交接做成圆角，且有一定的坡度朝向地漏（如设置地漏）；放射性核素操作设备的表面、工作台台面等平整光滑，室内地面与墙壁衔接处无接缝，易于清洗、去污；

④检测/去污间配备 1 台α-β表面沾污仪，辐射工作人员操作放射性核素后离开核素标记实验室前进行表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施。从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区；

⑤配备至少 2 套 0.5mmPb 防护铅衣、铅帽、铅眼镜、2 块 10mmPb L 防护屏及 2 块 1cm 厚的有机玻璃 L 屏等防护用品。

3.2 核医学中心项目

（1）医院在核医学中心核素显像区的控制区出入口、分装注射室、废物库 1、源库、^{32}P 敷贴室、SPECT/CT 候诊室 1、SPECT/CT 候诊室 2、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/CT 候诊室 1、PET/CT 候诊室 2、心脏 ECT 候诊室、心脏 ECT 机房、诊后留观室等场所外明显位置粘贴符合 GB18871-2002 规范的电离辐射警告标志；在核素治疗区的控制区出入口、病房 1~病房 6、甲亢留观室、甲亢服碘室、分装室、源库、废物库 2、配餐间、治疗室、配液/配药室、污洗间、污染被服间、抢救室等场所外明显位置粘贴符合 GB18871-2002 规范的电离辐射警告标志，用于提醒无关人员

不要靠近和逗留。

（2）医院在 SPECT/CT 及 PET/CT 机房门口设有工作状态指示灯，拟在心脏 ECT 机房门口设有工作状态指示灯，用于提示机房内设备的运行状态；SPECT/CT 及 PET/CT 机房防护门安装有闭门装置，确保防护门处于常闭状态，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动，医院还拟将心脏 ECT 机房防护门安装闭门装置，并将 ECT 机房工作状态指示灯与机房门联动。

（3）医院在核医学中心核素显像区及核素治疗区控制区病患入口及病患出口处设有带门禁系统的单向门，实现“入口只进不出，出口只出不进”的单向路线，加强对控制区带药患者的管理，并防止无关人员入内。在开展核医学诊断及治疗工作中，医务人员均会告知检查完成后病人离开路线，防止其对其他公众造成不必要照射。核医学中心核素显像区患者出口在医疗综合楼负一层南端，核素治疗区患者出口在医疗综合楼负一层西端，均未经过病房大厅、收费处等人群稠密区域。

（4）医院在医院在核医学中心核素显像区及核素治疗区的控制区内安装有监控及对讲设备，通过监控及对讲设备对控制区内用药后患者进行有序管理，使患者有序进入核医学科用药就诊。同时，除了使用监控及对讲设备对患者进行逐个叫号注射（服药）以及扫描外，医院还在地面设置指示箭头以及指示牌指示患者进行有序注射（服药）以及扫描，通过加强管理的方式减少了患者的交叉辐射影响。

（5）核医学科工作场所内不得安排与放射性无关的工作。

（6）本项目所有放射性药物的操作均在核医学中心核素显像区分装注射室的手套箱及核素治疗区分装室的手套箱内进行。放射性药物操作时均在衬有吸水纸的托盘内进行，药物在使用前有铅盒和铅套屏蔽，注射药物时工作人员穿戴个人防护用品，尽可能缩短操作时间。

（7）在核医学中心核素显像区及核素治疗区的控制区和监督区内不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物件。辐射工作人员操作后离开工作室前洗手和进行表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施。从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区。

（8）使用操作均在指定的工作台或搪瓷盘内进行，操作人员均配戴个人防护用品，避免皮肤直接接触放射性物质。

（9）核医学中心核素显像区及核素治疗区的门窗及内部结构简单，墙面、地面均采用易于去污的材料或涂料，并平整光滑；地面与墙面交接处为圆角，且有一定的

坡度朝向地漏。

（10）医院为辐射工作人员配备铅当量不小于 0.5mm 的铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖、铅橡胶帽、铅玻璃眼镜。

（11）医院为核医学中心配有应急及去污用品，主要包括下列物品：一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂和/或喷雾（至少为加入清洗洗涤剂和硫代硫酸钠的水）；小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔（水溶性油墨） 、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签、不透水的塑料布、一次性镊子。

3.3 ^{90}Y 树脂微球治疗

（1）拟将放射科 DSA2 室、患者专用留观病房作为辐射防护控制区，严格控制人员进出，在机房、病房入口处设置有“当心电离辐射”警告标志；核医学科已将本项目涉及到的分装室、废物间 1、SPECT/CT 机房和卫生通过间等设置为辐射防护控制区，将 SPECT/CT 机房控制室和办公室设置为辐射防护监督区。

（2）DSA2 室门口拟设置工作状态指示灯，且工作状态指示灯与机房相通的门设置联锁装置，用于提示机房内设备的运行状态；机房门设置闭门装置。

（3）DSA2 室控制室、机房内的治疗床边操作面板均设置有急停按钮，各按钮分别与 X 射线系统连接，在出现紧急情况下，按下急停按钮，即可停止 X 射线系统出束。

（4）在 DSA2 室内使用 ^{90}Y 治疗前，拟在 DSA 设备及治疗床周边地面铺设防水布，防止 ^{90}Y 微球放射性悬液在机房地面的泼洒渗漏污染。

（5）工作人员离开 DSA2 室前做表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，应采取去污措施。从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区。

（6）医院计划在 ^{90}Y 树脂微球输注场所（DSA2 室）内配备应急及去污用品，主要包括下列物品：一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂和/或喷雾（至少为加入清洗洗涤剂和硫代硫酸钠的水）、小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔（水溶性油墨）、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签、不透水的塑料布、一次性镊子。

（7）医院拟为本项目辐射工作人员配备个人剂量计，定期送检且需做好个人剂量档案管理工作。本项目辐射工作由现有介入科、核医学科工作人员承担，医院应注意若有新增辐射工作人员，应为其配备个人剂量计并建立个人剂量档案。该医院已开

展辐射工作人员的职业健康监护，定期安排其在有相应资质医院体检，建立个人剂量档案。

（8）完善并落实射线装置相关的安全新建制度、管理制度，从事本项目辐射工作的医务人员均已通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习辐射安全和防护专业知识及相关法律法规并通过考核。医务人员在操作过程中遵守以上制度，严格按操作程序，避免发生事故。

（9）由于本项目 ^{90}Y 树脂微球输注场所（DSA2 室）与 ^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房相距不远，手术期间无无关人员逗留，故患者在完成微球输注手术后被送入专用留观病房的过程中对家属及周围公众造成辐射影响较小，医院在移动患者的过程中可注意以下几点进一步减少其辐射影响：

①在患者身体肝脏部位穿戴 0.25mm 铅当量的铅橡胶围裙；

②移动患者时应尽量避开人员较为集中的时段，快速、平稳地将患者送至专用留观病房；

③^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房门口设置电离辐射警告标志，警示周围人群远离专用病房；

④提醒患者家属注意与患者保持距离，尽量减少与患者近距离接触的时间。医护人员查房，家属成员如需长时间陪护应与患者保持 1m 以上的距离。

另外，在专用留观病房所在楼层值班的护士严密注意患者动向，尽量避免患者在病房外停留；严禁无关人等进入病房。

三废处理

1 放射性废水

1.1 动物影像实验室项目放射性废水

本项目无放射性废水产生。辐射工作人员在进行动物注药、解剖等操作时，均穿戴一次性防护服、一次性手套等，实验完成后一次性防护服、沾染了动物血液的一次性手套等均作为固体废物处理处置；动物实验过程中，发生泼洒等意外事故时，对于污染场所将采用干法去污，去污过程中产生的擦拭用吸水纸、酒精棉球作为放射性固废处置；对于动物饲养笼具清洗，采用消毒水喷洒后，用吸水纸、干/湿纸巾进行擦拭清洗，擦拭后产生的带有放射性核素的吸水纸、干/湿纸巾作为放射性固废处置。

1.2 核医学中心项目放射性废水

医院于医疗综合楼南侧地下设有 1 座衰变系统，由 4 个小池串联，包含 1 个沉淀池和 3 个衰变池，3 个衰变池尺寸均为 5.0m（长）×4.6m（宽）×3.4m（高），有效容积均约为 60m^3，总有效容积约 180m^3。衰变池为槽式结构。衰变池四周墙体、底部采用四周池壁采用 300mm 混凝土、顶部采用 500mm 混凝土浇筑，池底和池壁坚固采用耐腐蚀、防渗漏措施。该衰变池原为核医学中心核素显像区及核素治疗区共用衰变池，现医院拟将该衰变池单独由核医学中心核素治疗区使用。

医院计划于医疗综合楼南侧负一层地面新建一座短半衰期放射性废水衰变间，衰变间内配备 1 套槽式放射性废水衰变系统，用于储存核医学中心核素显像区产生的放射性废水。该衰变系统由碳钢制作，并做防腐处理。拟建衰变间尺寸为 10.0m（长）×4.4m（宽）×3.9m（高），衰变间四周墙体及顶部屏蔽体均拟采用 8mmPb+1mm 铅当量硫酸钡板屏蔽，防护门拟采用 9mmPb 屏蔽。衰变间内设有 3 个衰变罐，衰变罐为槽式结构，衰变间外地下设有 2 个化粪池。衰变间内 3 个衰变罐尺寸均为 3.0m（长）×2.0m（宽）×2.0m（高），有效容积均约为 9m^3，总有效容积约 27m^3。医院拟对核医学中心核素显像区内的排水管道进行改建，改建后核医学中心核素显像区内的放射性排水均排至新建衰变池内，原衰变池单独由核医学中心核素治疗区使用。

本项目核医学中心核素治疗区产生的放射性废水均排入原有衰变池内，核医学中心核素显像区产生的放射性废水均拟排入新建短半衰期衰变池内。原有衰变池及新建衰变池均为槽式结构。2座衰变池处理系统的衰变池均交替使用，放射性废水接出后首先经生化池进入1#衰变池，此时，2#和3#衰变池进水口和三个衰变池的出水口全部处于关闭状态。当1#衰变池液面达到设定液位时，关闭1#池的进水阀，2#池的进水阀门开启，放射性废水经生化池进入2#衰变池。当2#衰变池液面达到设定液位时，关闭2#衰变池的进水阀，开启3#衰变池进水阀，当3#衰变池水液面达到设定液位时，打开1#衰变池排水阀，此时1#衰变池废水经缓冲池排出。当液位传感器感知到1#衰变池液位排空后，关闭3#衰变池进水阀，同时打开1#衰变池进水阀，如此循环，确保每次排放的衰变池内废液都是贮存时间最长的。本项目原有衰变池设计图见附图13及附图14。

本项目核医学中心核素治疗区内的病人主要为甲亢治疗病人、甲癌治疗病人及^{177}Lu 治疗病人。^{131}I 甲亢治疗每天约 10 个病人，每人按 1 次洗手间计，每次冲厕水取 6.5L 计，则每天废水产生量约为 0.065m^3，每周废水产生量约为 0.325m^3；以甲癌治疗平均住院时间 4 天/次、每人每天废水 150L 估算，则每周废水产生量约为 150L/

人×5 人×4 天/周=3.0m^3；^{177}Lu 治疗病人周收治量最大为 1 人，产生量按 150L/人次计算，则每周废水产生量约为 150L/人×1 人×5 天/周=0.75m^3；工作场所平均每周的清洗废水约为 200L。则核医学中心核素治疗区放射性废水排放量为 0.325m^3+3.0m^3+0.75m^3+0.2m^3=4.275m^3/周。以 ^{131}I 核素贮存 180d（约 26 周，130 个工作日）的废水产生量约为 111.2m^3，本项目原有衰变池废水处理系统 2 个衰变池的总有效容积为 120m^3，因此原有衰变池废水处理系统的设计能够满足核医学中心核素治疗区放射性废水的暂存衰变要求。

医院甲癌项目在实际运行过程中，对于各病房内的淋浴间均采用节水龙头，医院给住院病人发放淋浴卡，淋浴卡可限制病人洗澡时间，因此核医学中心核素治疗区内病人实际产生的废水量将低于上述估算值，原有衰变池废水处理系统能够满足核医学中心核素治疗区放射性废水的暂存衰变要求。

本项目核医学中心核素显像区内拟进行 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{227}Th、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu 等 7 种核素的放射性治疗，该 7 种核素治疗的病人可在注药/服药后直接离开医院，不产生放射性废水。

本项目核医学中心核素显像区内还拟进行核素诊断项目，其中核医学中心核素显像区内 SPECT/CT 日门诊量按 20 人计（使用 ^{99m}Tc、^{123}I 放射性药物），PET/CT 日门诊量按 20 人计（使用 ^{18}F、^{68}Ga 放射性药物），心脏 ECT 门诊量按 5 人计（使用 ^{99m}Tc 放射性药物），每人按 1 次洗手间计，每次冲厕水取 6.5L 计，则每天废水产生量约为 0.2925m^3，辐射工作人员及工作场所每日冲洗废水按 0.2m^3 计，则 SPECT/CT、PET/CT 及心脏 ECT 诊断每天产生的废水量约为 0.4925m^3。本项目短半衰期衰变池中的放射性废水含有 ^{99m}Tc、^{123}I、^{18}F 及 ^{68}Ga 等放射性核素，^{99m}Tc、^{123}I、^{18}F 及 ^{68}Ga 放射性核素的半衰期均小于 24h，需贮存 30d，核素贮存 30d（约 22 个工作日）的废水产生量约 10.84m^3，本项目新建短半衰期系统 2 个衰变罐的总有效容量为 18m^3，因此本项目新建短半衰期放射性废水处理系统的设计能够满足放射性废水的暂存衰变要求，本项目短半衰期衰变池设计合理。

1.3 ^{90}Y 树脂微球治疗

患者在注入 ^{90}Y 树脂微球后，尿液中会有少量的 ^{90}Y 核素排出。本项目患者最大注射活度为 2.5×10^{9}Bq，留观时间为 2~6h，留观期间排泄 2 次，单次排泄量一般为 200~400mL，则单名留观患者住院留观期间总排泄量不超过 800mL。根据生态环境部核与辐射安全中心出具的《钇-90 树脂微球使用过程辐射安全风险研究报告》“患

者在接受 ^{90}Y 树脂微球核素治疗后，0~24h 每例患者尿液中 ^{90}Y 核素总活度最大为 $3.11\times10^{5}Bq$”。医院计划在留观病房内配备接尿袋，用于留观患者排泄接尿使用。尿液经酸化处理后，将尿袋口密封，防止洒漏污染，然后同放射性固废统一转移至核医学中心核素显像区废物间 1 内贮存，贮存 45 天（17 个半衰期）后，活度浓度将低于 10Bq/L，作为普通医疗废水处理。

2 放射性废气

2.1 动物影像实验室项目

为减少放射性气载废物对环境造成影响，本项目动物影像实验室场所安装有通风系统，主要由送风系统、回风（排风）系统及空调机组组成，动物影像实验室内设备排风和场所排风拟分开设置，设备排风及控制区内场所排风的排风口均由净化空调机房外西北侧接至屋面排放，场所排放口及设备排放口设置均高于本建筑屋顶。本项目动物影像实验室场所排风管道平面布置示意见附图 9。

本项目动物影像实验室内热室及注射后饲养间内的生物安全柜均拟设计单独的排风系统，设计风速不小于 0.5m/s，并在热室及生物安全柜的顶壁安装活性炭过滤装置。动物影像实验室内气压设计为清洁区气压>监督区气压>控制区气压，使气体由清洁区流向监督区，再流向控制区。本项目动物影像实验室内排风系统，排风机组布设在楼顶管道末端，运行时不断将场所内空气抽出，排风管道内压力相对于连通的房间、热室或生物安全柜为负压，可确保废气不会倒流入房间、热室或生物安全柜；各房间送、排风口均设置止回阀，确保废气不会由房间通过送风口排出，或由排风管道通过排风口排入房间。排风机组入口处设常闭电动阀并与机组同时启闭，确保不同管路废气不会发生串气，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。放射性废气由单独的管道延伸至楼顶排放。

医院应定期更换活性炭过滤装置，医院计划每半年更换一次，确保活性炭过滤装置的吸附效率，通风系统内更换下来的含放射性核素的废活性炭将作为放射性固体废物进行收集、处理。

在采取以上措施后，本项目排风设计能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中关于场所通风的相关要求。

2.2 核医学中心项目

在进行液态放射性药物活度操作过程中，若放射性药物液面处于开放状态，空气中可能挥发微量放射性同位素，污染途径为放射性药物在空气中挥发散逸造成人

员吸入的内照射。本项目核医学中心核素显像区分装注射室内设有 1 个 45mmPb 的手套箱和 1 个 10mmPb 的手套箱，分装和测试操作均在手套箱中进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s），风管道的排放口最终从核素治疗区病房 6 西北侧引致屋面排放，排放口设置高于本建筑屋顶。

核医学中心核素治疗区分装室内设置了 1 个 40mmPb 的手套箱，放射性核素的操作均在手套箱内进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s），能够有效减少放射性废气对工作人员的影响。手套箱及服药后患者主要活动区域设有独立排风系统，风管道的排放口最终从核素治疗区病房 6 西北侧引致屋面排放，排放口设置高于本建筑屋顶。

本项目核医学中心核素显像区及核素治疗区排风设计能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中关于场所通风的相关要求。同时医院在手套箱管道内及屋顶排放口处设有活性炭过滤吸附装置，对放射性气溶胶进行吸附，降低放射性气溶胶外排浓度。医院每半年更换一次活性炭过滤装置，废活性炭过滤装置作为放射性固废处理。整个核医学中心工作场所均设有新风系统及独立的排风系统，保证工作场所内空气循环。

2.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

^{90}Y 树脂微球药品中，绝大多数 ^{90}Y 核素附着在“大孔型结构”的树脂微球表面和内部孔道内，以不溶性固体形式存在，极少量（0.04~0.4%）^{90}Y 核素以游离状态出现在液体中，游离的 ^{90}Y 核素以氯化钇（$^{90}YCl_3$）形式存在，氯化钇不具备挥发性，故不考虑放射性气体或气溶胶的辐射影响。

3 放射性固废

3.1 动物影像实验室项目

（1）动物影像实验室控制区内各房间内均拟配备 1 个 10mm 铅当量的放射性废物收集铅桶，铅桶内放置专用垃圾袋，用于收集放射性核素操作过程中各场所产生的放射性固体废物。放射性固废经分类收集后进行密封并在垃圾袋表面贴上标签（注明核素种类、存放日期等信息），送至动物尸体/废物间内暂存。

本项目动物尸体/废物间容积为 15m^3，主要用于暂存动物影像实验室内的放射性废物，总共约 300kg/a（约 25kg/月）。根据 HJ1188-2021，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍，并经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2，可对废物清洁解控并作为医疗废

物处理，在定期对满足储存时间要求的废物进行监测及清洁解控后，本项目动物尸体/废物间的容量能够满足贮存要求。

（2）本项目动物实验产生的体内带有放射性核素的动物尸体、组织集中收集于密封袋内，贴上标签（标明核素种类、存放日期等信息）后送至动物尸体/废物间的冰箱中衰变，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍，经监测辐射剂量率处于环境本底水平，α表面沾污小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 后，交由有资质单位处理。

（3）本项目动物影像实验室控制区地面每次拖洗产生的沾有放射性核素的干湿纸巾及动物饲养笼具清洗产生的带有放射性核素的吸水纸、干/湿纸巾等集中收集于专用塑料袋内，贴上标签（标明存放日期等信息）后暂存于动物尸体/废物间内，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍，经监测辐射剂量率处于环境本底水平、α表面沾污小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 后，作为医疗废物处理。

（4）核素标记实验室内产生的退役 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器将暂存于动物尸体/废物间内，由供货商定期上门回收。

（5）本项目动物影像实验室通风系统中置换下的含放射性核素的废活性炭集中收集于专用塑料袋内，贴上标签（标明存放日期等信息）后放置在动物尸体/废物间内，暂存时间超过核素最长半衰期 10 倍后，经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 后委托有资质的单位处理。

3.2 核医学中心项目

核医学中心项目在使用过程中产生的放射性固体废物为：各放射性核素操作过程中产生的如注射器、一次性手套、一次性纸杯、棉签、滤纸等带微量放射性核素的医疗固体废弃物，通风管道内更换下来的废活性炭，^{32}P 敷贴时产生的废弃的 ^{32}P 敷贴器等，平均每天排放量约 2.4kg，每月排放量约 50kg，排放年总量约 600kg。

核医学中心核素显像区内设有废物库 1，核素治疗区设有废物库 2，废物库 1 的容积约为 20m^3，废物库 2 的容积约为 10m^3，医院拟将核医学中心内产生的放射性固体废物收集于各工作场所铅污物桶（5mmPb）内的专用塑料包装袋内，包装袋标明收贮时间、种类及数量等内容。核医学中心核素显像区内放射性废物收集后最终送

至废物库 1 内暂存，核医学中心核素治疗区内放射性废物收集后最终送至废物库 2 内暂存。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的要求，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍、含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天，并经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理，在定期对满足储存时间要求的废物进行监测及清洁解控后，本项目废物间 1、废物间 2 的容量能够满足贮存要求。

3.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

^{90}Y 树脂微球抽取过程中产生会产生转移用的一次性手套、注射器、含剩余药物的西林瓶等放射性固体废物约 200g/例，注射 ^{99m}Tc、^{90}Y 放射性药物会产生一次性手套、输液管、患者体内导管、V 瓶及有机玻璃防护罐等放射性固体废物合计约 450g。综上，开展一次 ^{90}Y 树脂微球介入治疗产生放射性固体废物约 0.65kg。^{90}Y 树脂微球介入治疗一年最多开展 100 次，则 ^{90}Y 树脂微球治疗项目每年产生的固体废物量约 65kg。

本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗产生的放射性固废统一收集于铅污物桶（5mmPb）内的专用塑料包装袋内，包装袋标明收贮时间、种类及数量等内容，最终送至核医学中心核素显像区废物库 1 内暂存，废物库 1 的容积约为 20m^3。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的要求，含 ^{99m}Tc 核素的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、含 ^{90}Y 核素的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍（26.7 天），并经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理，在定期对满足储存时间要求的废物进行监测及清洁解控后，本项目废物间 1 的容量能够满足贮存要求。

4 普通三废

本项目产生的普通三废主要为动物影像实验室内的小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统、核医学中心 PET/CT 及 SPECT/CT 运行时产生的少量臭氧及氮氧化物。少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排出机房，弥散在大气环境中，对环境影响较小。

本项目辐射工作人员在工作过程中产生的生活污水拟排入城市污水管网，一般生活垃圾收集后将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

表 11 环境影响分析

建设阶段对环境的影响

本项目动物影像实验室属于新建项目，心脏 ECT 项目涉及房间改造，项目建设施工时对环境会产生如下影响：

（1）大气：本项目在建设施工期的各种施工将产生地面扬尘，另外机械和运输车辆作业时排放废气和扬尘，但这些方面的影响仅局限在施工现场附近区域。针对上述大气污染采取以下措施：a.及时清扫施工场地，并保持施工场地一定的湿度；b.车辆在运输建筑材料时尽量采取遮盖、密闭措施，以减少沿途抛洒；c.施工路面保持清洁、湿润，减少地面扬尘。

（2）噪声：整个建筑施工阶段，建筑设备在运行中将产生不同程度的噪声，对周围环境造成一定影响。在施工时严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）标准，尽量使用噪声低的先进设备，同时严禁夜间进行强噪声作业。

（3）固体废物：项目施工期间，产生一定量以建筑垃圾为主的固体废弃物，委托有资质的单位清运，并做好清运工作中的装载工作，防止建筑垃圾在运输途中散落。

（4）废水：项目施工期间，有一定量含有泥浆的建筑废水产生，对这些废水进行初级沉淀处理，并经隔渣后排放。

该医院在施工阶段计划采取上述污染防治措施，将施工期的影响控制在医院局部区域，对周围环境影响较小。

运行阶段对环境的影响

1 动物影像实验室

医院拟于核医学中心核素显像区外北侧新建动物影像实验室（属于乙级非密封放射性物质工作场所），使用 ^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 共 14 种放射性核素，用于放射性药物的开发和研究。除 ^{68}Ga 核素由医院通过 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行淋洗外，其余核素均从有资质的医药公司购置。医院每天只进行 1 次放射性核素动物实验，每次实验只使用 1 种放射性核素，每年最多进行 300 次实验，每次实验最多使用 10 只老鼠。在进行老鼠注射药物及解剖时，人员操作位拟设置 10mmPb 铅防护 L 屏。

本项目动物实验所用放射性药物中，^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 主要考虑α射线影响，^{177}Lu 主要考虑β射线及γ射线影响，^{90}Y、^{212}Pb、^{67}Cu 主要考虑β射线影响，^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{125}I 考虑均γ射线影响。注药后扫描时，小动物 PET/SPECT/CT

三模态成像系统会产生 X 射线。

1.1 辐射环境影响分析

本项目动物影像实验单次最多使用 10 只老鼠，单只老鼠的注射量由老鼠体重及放射性药物的核素特性决定，用药量在 5μCi~50μCi 之间（其中 ^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 等α核素的用药量约为 5μCi，其余核素的用药量约为 50μCi），医院拟根据每次动物实验所需的放射性药物用量，提前向有资质的药物厂家订购放射性核素，由药物厂家将放射性核素送至医院核动物影像实验室核素标记实验室的热室内，动物影像实验室的辐射工作人员对放射性核素进行标记、分装。据医院提供的信息，单次动物实验放射性药物标记活度约为单次实验动物总用药量活度的 10 倍，即 ^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 等α核素的单次标记活度约为 0.5mCi，其余核素的单次标记活度约为 5mCi。核素标记完成后，会将分装好的药物送至 QC 室内进行质检，一般质检活度与单只老鼠用药量相当，即 ^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 等α核素药物的质检活度约为 5μCi，其余核素药物的质检活度约为 50μCi。

给药后的老鼠需送至小动物 PET 机房内依次进行扫描，每次最多同时扫描 1 只老鼠，每只老鼠扫描约 10min。本项目扫描后的老鼠分为两种：①注射治疗用相关放射性药物（如 ^{177}Lu、^{223}Ra、^{225}Ac、^{125}I、^{90}Y、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等）的老鼠扫描后送至注射后饲养间内进行饲养，饲养期间进行病理观察及老鼠存活情况观察，饲养时间不超过 5 天，饲养结束后于生物操作间内对老鼠进行处死处理。②注射显像用相关放射性药物（如 ^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I 等）的老鼠扫描后送至生物操作间内进行解剖，对解剖后的老鼠器脏进行称重及活度测量后，实验结束。

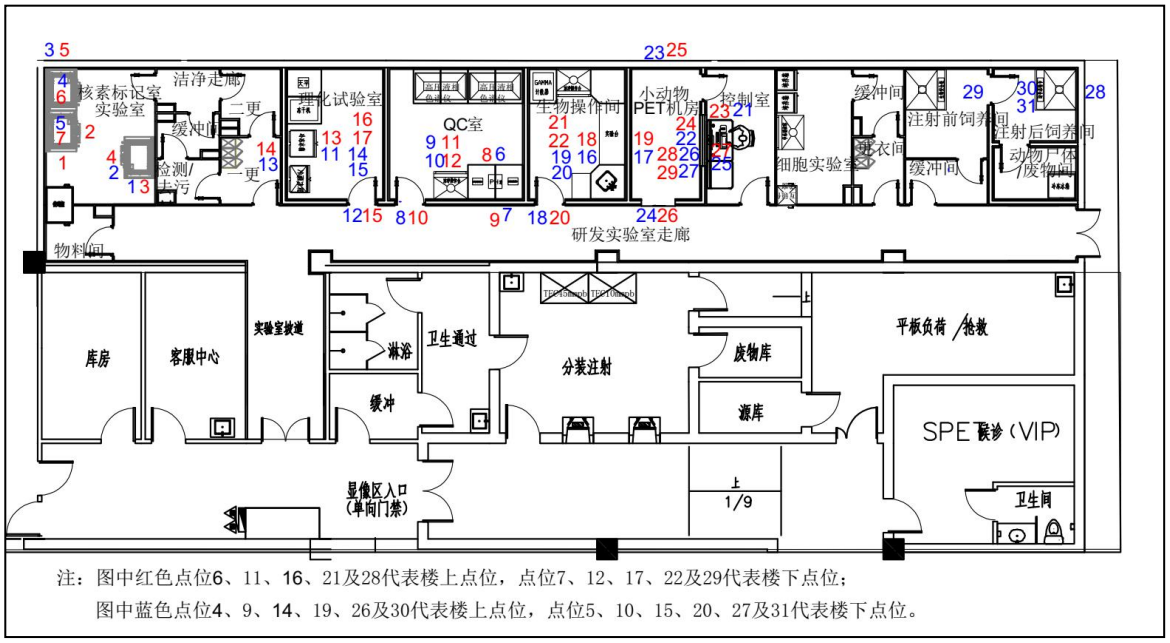
1.1.1 α射线辐射环境影响分析

在进行动物影像实验过程中，^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 核素的操作需考虑α射线对周围环境的辐射影响。由于α粒子在空气中的平均射程只有 4 厘米，而且α粒子的穿透能力很弱，会被热室屏蔽，因此对α粒子的外照射影响很小。但α粒子具有很强的电离能力，如果进入体内时对组织器官造成严重的电离伤害，因此要严防α内照射。一般情况下，内照射主要通过吸入、食入及皮肤吸收等途径进入人体内，为减少内照射的影响，公司应加强对动物影像实验室的管理：禁止在控制区和监督区内进食、饮水、吸烟，同时在控制区和监督区也不得进行无关工作及存放无关物件。辐射工作人员操作后离开动物影像实验室前洗手和作表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施。从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，

以保证超过规定限值的物件不携出控制区。

1.1.2 γ射线辐射环境影响分析

本项目动物影像实验拟使用的放射性药物中，^{68}Ga、^{64}Cu、^{89}Zr、^{123}I、^{124}I、^{125}I等 6 种核素主要考虑γ射线影响，以上 6 种核素单只老鼠的使用量均约为 50μCi，单次实验药物标记量均约为 5mCi，单次质检量均约为 50μCi。根据表 9-8，与其它几种核素射线能量及空气比释动能率相比，^{89}Zr 的γ射线能量（0.909MeV）以及空气比释动能率常数（$1.9\times10^{-13}Sv\cdot m^2\cdot Bq^{-1}\cdot h^{-1}$）均最大，且单次用药量不低于其它核素，故本报告选取 ^{89}Zr 为代表对动物影像实验室的核素标记实验室、QC 室、生物操作间、小动物 PET 机房等场所周围γ辐射环境影响进行分析评价。



注：图中红色点位6、11、16、21及28代表楼上点位，点位7、12、17、22及29代表楼下点位；
图中蓝色点位4、9、14、19、26及30代表楼上点位，点位5、10、15、20、27及31代表楼下点位。

图 11-1 动物影像实验室计算点位图

在进行放射性核素的辐射环境影响预测时，将核素简化成点源，采用《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 I 中公式（I.1）计算参考点周围剂量当量率：

$$x = TVL \times \lg\left(\frac{A \times \Gamma}{\dot{H}_p \times r^2}\right) \qquad \cdots\cdots（11\text{-}1）$$

由公式（11-1）可推断得出：

$$\dot{H}_p = \frac{A \times \Gamma \times 10^{-x/TVL}}{r^2} \qquad \cdots\cdots（11\text{-}2）$$

上式中：X－屏蔽厚度，单位为毫米（mm）；

TVL－γ射线的十分之一值层厚度，单位为毫米（mm）；

A－放射性药物的活度，单位为兆贝可（MBq）；

Γ_k－周围剂量当量率常数，单位为 $\mu Sv\cdot m^2/MBq\cdot h$，值见表 9-8；

$\dot{H}_p$ —屏蔽体外关注点剂量率控制值，单位为微希沃特每小时（μSv/h）；

r—参考点与放射源间的距离，单位为米（m）。

γ射线对周围环境的辐射影响估算采用公式（11-2），计算点位图见图 11-1 中红色点位，预测结果见表 11-1。

表 11-1 ^{89}Zr 放射性药物动物实验对周围参考点辐射水平估算结果

序号	参考点位置	源强*（Bq）	与源的距离(m)	屏蔽材料及厚度	透射比#	参考点辐射水平(μSv/h)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						

19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	

*：生物操作间及小动物 PET 机房内老鼠存于防护拖车内（10mmPb），每次进行 1 只老鼠的注药或解剖，因此生物操作间及小动物 PET 机房外的剂量率按照 1 只老鼠体内的药量进行计算。
#：未获得什值层厚度的情况下，查取《放射防护实用手册》附录 2 的衰减倍数 K 值，η=1/K。

根据表 11-1 可知，动物影像实验室在操作放射性核素 ^{89}Zr 时：

（1）合成/分装热室表面 30cm 处人员操作位的辐射剂量率最大为 0.366μSv/h，非正对人员操作位表面的辐射剂量率最大为 0.775μSv/h，满足合成/分装热室外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求；

（2）注射、解剖人员操作位处辐射剂量率最大为 0.782μSv/h，满足小于 2.5μSv/h 的要求；

（3）动物影像实验室控制区内房间四周墙体、观察窗、防护门、顶部、底部外表面 30cm 处辐射剂量率最大为 0.352μSv/h，满足小于 2.5μSv/h 的要求。

1.1.3 β射线辐射环境影响分析

本项目 ^{177}Lu、^{90}Y、^{212}Pb、^{67}Cu 核素主要考虑β射线及韧致辐射影响。由于 4 种核素中，^{90}Y 核素的β射线能量最高（约为 2.284MeV），因此本项目选取射线能量较大的核素 ^{90}Y 进行计算。

1.1.3.1 ^{90}Y 核素β辐射环境影响分析

β粒子在低 Z 物质中的射程，与能量等于β粒子最大能量的单能电子的射程是一样的，可以采用方杰主编的《辐射防护导论》中的公式（4.15）进行计算：

$$d \approx R/\rho \qquad \text{……（11-3）}$$

式中：

d—β粒子的最大射程，cm；

R—β粒子在低 Z 物质中的射程，g/cm^2；

ρ—物质的密度，g/cm^3。

本项目 ^{90}Y 核素衰变放出的β射线能量约为 2.284MeV。其在低 Z 物质中的射程 R 可根据方杰主编的《辐射防护导论》中的公式（4.13）进行计算：

$$R=0.412\cdot E^{(1.265-0.0954\cdot \ln E)} \text{……（11-4）}$$

式中，E 为β射线的能量，MeV。

根据公式（11-3）、（11-4）可估算出本项目 ^{177}Lu 衰变发出的β射线在不同材料中的射程，预测结果见表 11-2。

表 11-2 β射线在不同材料中射程

放射性核素	E（MeV）	R（g·cm^{-2}）	材料	密度（g·cm^{-3}）	射程（cm）

由表 11-2 可知，^{90}Y 在有机玻璃中的最大射程约为 0.941cm，在铅中的最大射程约为 0.098cm，在混凝土中的最大射程约为 0.472cm。本项目 ^{90}Y 核素的和合成和分装均在 68mmPb 的热室内进行，QC 质检、给药后动物的扫描、饲养、解剖均在不低于 3mmPb 厚度的实体屏蔽的房间内进行，辐射工作人员不直接接触放射性药物，^{90}Y 发射的β射线对周围环境影响较小。

1.1.3.2 ^{90}Y 核素韧致辐射对周围环境的影响

对于能量为 E 的β射线在屏蔽材料中产生的韧致辐射可采用方杰主编的《辐射防护导论》中的公式（4.21）进行计算：

$$\dot{H}_r = 4.58\times10^{-14} A\cdot Z_e(\frac{E_b}{r})^2\cdot(\mu_{en}/\rho)\cdot q\cdot\eta \qquad \text{……（11-5）}$$

式中：$\dot{H}_r$ —β射线在屏蔽材料中产生的韧致辐射在 r（m）处剂量当量率，Sv/h；

A—放射源活度，Bq；

Z_e－屏蔽材料有效原子序数；

μ_{en}/ρ－韧致辐射的平均能量在屏蔽材料中的质量能量吸收系数，$m^2 \cdot kg^{-1}$，查《辐射防护导论》附表 1 得 ^{90}Y 在空气中的质量能量吸收系数为 $2.882\times10^{-3}m^2 \cdot kg^{-1}$；

q－居留因子，取 1；

r－参考点到放射源的距离，m；

η－透射比；

E_b－韧致辐射的平均能量，MeV，根据《辐射防护导论》P132“韧致辐射具有连续能谱。在实际屏蔽计算时，可以假定韧致辐射的平均能量 E_b 是入射β粒子的最大能量的 1/3，即 $E_b \approx E_{max}/3$”，本项目 ^{90}Y 产生韧致辐射的平均能量为约为 0.761MeV。

根据公式 11-5，^{90}Y 核素韧致辐射防护计算参数及预测结果见表 11-3，计算点位图见图 11-1 中蓝色点位。

表 11-3 ^{90}Y 韧致辐射预测结果

序号	点位	A（Bq）	r（m）	屏蔽材料及厚度	η*	Z_e	$\dot{H}_r$（μSv/h）
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							

*未获得什值层厚度的情况下，查取《放射防护实用手册》附录 2 的衰减倍数 K 值，η=1/K。

根据表 11-3 的计算结果可知，动物影像实验室在操作放射性核素 ^{90}Y 时：

（1）热室表面 30cm 处人员操作位的辐射剂量率最大为 0.004μSv/h，非正对人员操作位表面的辐射剂量率最大为 0.008μSv/h，满足热室外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求；

（2）QC 质检、注射、解剖人员操作位处辐射剂量率最大为 0.02μSv/h，满足小于 2.5μSv/h 的要求；

（3）动物影像实验室控制区内房间四周墙体、观察窗、防护门、顶部、底部外表面 30cm 处辐射剂量率最大为 0.824μSv/h，满足小于 2.5μSv/h 的要求。

1.1.4 III 类射线装置环境影响分析

本项目 III 类射线装置为小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统（最大管电压不超过 100kV，最大管电流不超过 2mA），在开机过程中需要考虑泄漏辐射和散射辐射。本项目小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统扫描过程中 CT 最大工况为 100kV、2mA，根据《辐射防护手册（第一分册）》（李德平 潘自强著）P448 的能量散射公式计算一次散射能量与初级能量的比值，100kV 射线经过一次散射后能量约为 84kV，保守取 90kV 计算。

根据《辐射防护手册（第一分册）》给出的 X 射线机散射线在关注点的周比释动能计算公式（公式 10.10）进行推导，得到散射线计算公式（推导中，将原公式中的使用因子、居留因子均取为 1）：

$$H_s = \frac{H_0 \cdot I \cdot a \cdot (s / 400) \cdot B_s}{d_0^2 \cdot d_s^2} \quad \text{.....（11-6）}$$

式中：H_0—X 射线机发射率常数（当管电流为 1mA 时，距离阳极靶 1m 处由主束产生的比释动能率），$mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，本项目小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统正常使用的最大管电压为 90kV、过滤片取 2mmAl（根据《辐射防护手册（第一分册）》P232 可知，对于医用 X 射线机来说，为了减少低能光子对皮肤的照射，机头窗口处按照有符合要求的永久性过滤片，其中 70~100kV 以内用 2mm 铝片）。根据《辐射防护导论》附图 3 查得本项目取 $8mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$；

I—管电流，mA；本项目小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统正常使用的最大管电流为 2mA；

a—动物对 X 射线的散射照射量与入射照射量之比值，查《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1，对于本项目小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统正常工作使用电压最大为 90kV 下 90°时的α查取值约为 0.0013；

S—主束在受照体上的散射面积，本项目取 $20cm^2$；

d_0—源至受照点的距离，根据设备参数确定，本项目取 d_0 最小值 0.2m；

d_s—受照体至关注点的距离。

Bs—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见式（11-7）：

$$B_s=[(1+\frac{\beta}{\alpha})e^{\alpha\gamma X}-\frac{\beta}{\alpha}]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \cdots\cdots（11\text{-}7）$$

式中：X—铅厚度；

α、β、γ—铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数，根据 GBZ130-2020 表 C.2 可知，管电压为 90kV（本项目正常运行最大管电压）下铅的α、β、γ数值分别为 3.067、18.83、0.7726；混凝土的α、β、γ数值分别为 0.04228、0.1137、0.4690。

泄漏辐射影响采用下述公式计算：

$$\dot{H}_L=\frac{H_l \bullet B}{r^2} \quad \cdots\cdots（11\text{-}8）$$

式中：H_l—距靶 1m 处泄漏射线的空气比释动能率，mGy/h；根据国际放射防护委员会第 33 号出版物《医用外照射源的辐射防护》“(77)”及《医用电气设备第 1 部分：安全通用要求三.并列标准诊断 X 射线设备辐射防护通用要求》(GB9706.12-1997)中 29.204.3，本项目 1m 处泄漏射线的空气比释动能率取 1.0mGy/h。

B—泄漏射线屏蔽透射因子，本项目小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统正常运行最大管电压 90kV 工况下，小动物 PET 机房四周屏蔽墙与防护门的泄漏射线屏蔽透射因子同表散射线中 Bs 计算值。

将小动物 PET 机房屏蔽体的厚度 X、有关的拟合参数α、β、γ值代入公式（11-7），计算相应的散射辐射屏蔽透射因子值，列于表 11-4。

同时，利用公式（11-7）对小动物 PET 机房的泄露辐射屏蔽透射因子进行计算，也列于表 11-4。

表 11-4 小动物 PET 机房屏蔽体的屏蔽透射因子计算结果

屏蔽体（设施）		屏蔽厚度	Bs
小动物 PET 机房	东墙、南墙、北墙	3mmPb	7.93×10^{-6}
	西墙	5mmPb	1.72×10^{-8}
	顶部	15cm 混凝土	1.18×10^{-4}
	地板	35cm 混凝土	2.32×10^{-8}
	防护门	3mmPb	7.93×10^{-6}
	观察窗	3mm 铅当量防护玻璃	7.93×10^{-6}

小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统开机过程中泄漏辐射和散射辐射根据公式（11-6）~公式（11-8）进行计算，预测结果分别见表 11-5~表 11-6。

表 11-5 小动物 PET 机房散射辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_0	I	a	S	Bs	d_0	ds	Hs
	mGy•m²/（mA•min）	mA	/	cm²	/	m	m	μGy/h
小动物 PET 机房东墙（控制室）								
小动物 PET 机房防护门外 30cm								
小动物 PET 机房观察窗外 30cm								
小动物 PET 机房南墙外 30cm								
小动物 PET 机房西墙外 30cm								
小动物 PET 机房北墙外 30cm								
小动物 PET 机房顶部外 30cm								
小动物 PET 机房底部外离地 1.7m 处								

表 11-6 小动物 PET 机房泄漏辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_l	r	B	$\dot{H}_L$
	mGy/h	m	cm²	μGy/h
小动物 PET 机房东墙（控制室）				
小动物 PET 机房防护门外 30cm				
小动物 PET 机房观察窗外 30cm				
小动物 PET 机房南墙外 30cm				
小动物 PET 机房西墙外 30cm				
小动物 PET 机房北墙外				

30cm	
小动物 PET 机房顶部外 30cm	
小动物 PET 机房底部外离地 1.7m 处	

将表 11-5 及 11-9 理论估算进行叠加，可得小动物 PET 机房外的散射辐射与泄漏辐射的叠加剂量率，结果见表 11-7。

表 11-7 小动物 PET 机房散射辐射与泄漏辐射叠加结果

参考点	散射辐射（μGy/h）	泄漏辐射（μGy/h）	叠加剂量率（μGy/h）
小动物 PET 机房东墙（控制室）	0.007		
小动物 PET 机房防护门外 30cm			
小动物 PET 机房观察窗外 30cm			
小动物 PET 机房南墙外 30cm			
小动物 PET 机房西墙外 30cm			
小动物 PET 机房北墙外 30cm			
小动物 PET 机房顶部外 30cm			
小动物 PET 机房底部外离地 1.7m 处			

根据表 11-1、表 11-3 及表 11-7 理论估算结果可知，在开展动物影像实验项目过程中，考虑放射性同位素和 CT 共同辐射影响后，小动物 PET 机房外剂量当量率最大为 0.213μSv/h（控制室内叠加剂量率，为 0.208μSv/h+0.012μSv/h=0.22μSv/h）。动物影像实验项目相关工作场所屏蔽能够满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

1.2 保护目标剂量评价

按照联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）-2000 年报告附录 A，X-γ 射线产生的外照射人均年剂量当量计算公式如下。

$$H_{E,r}=D_r\times t\times T\times 1\times 10^{-3} \quad \text{……（11-9）}$$

式中：$H_{E,r}$—外照射年有效剂量，mSv；

D_r—吸收剂量率，mGy/h；

t—照射时间，h；

T—居留因子；

1—剂量换算系数，Sv/Gy。

在进行动物影像实验过程中，各工艺环节操作人员操作时间见表 9-3，根据公式（11-9）和表 11-1、表 11-3 及表 11-7 可估算得出动物影像实验室辐射工作人员和场所周围公众的年有效剂量，具体计算参数及计算结果见表 11-8。

表 11-8 动物影像实验室辐射工作人员和场所周围公众年有效剂量估算一览表

参考点位置		居留因子	年工作时间（h）*	参考点辐射剂量率(μSv/h)	人员年有效剂量(mSv)#	
辐射工作人员	^{68}Ge-^{68}Ga 发生器淋洗热室外 30cm	负责放射性核素淋洗、合成及分装，1	^{68}Ga 淋洗：7.5	0.004	<0.001	**1.009**
	合成/分装热室外 30cm		150	0.366	0.055	
	QC 质检室操作位	1	200	0.782	0.156	
	生物操作间操作位	老鼠打药+老鼠解剖及器脏活度测量，1	25+625=650	0.782	0.508	
	老鼠扫描前摆位	1	50	1.406	0.070	
	控制室内	老鼠扫描，1	1000	0.22	0.22	
公众	核素标记实验室西墙外	1/16（空调机房）	157.5	0.234	0.002	
	核素标记实验室北墙外	1/8（走廊）	157.5	0.234	0.005	
	核素标记实验室顶部	1/2（急诊科）	157.5	0.008	0.001	
	核素标记实验室底部	1/16（地下车库）	157.5	0.002	<0.001	
	QC 室北墙外	1/8（走廊）	200	0.352	0.009	
	QC 室顶部	1/2（急诊科）	200	0.012	0.001	
	QC 室底部	1/16（地下车库）	200	0.002	<0.001	
	生物操作间北墙外	1/8（走廊）	650	0.352	0.029	
	生物操作间顶部	1/2（急诊科）	650	0.012	0.004	
	生物操作间底部	1/16（地下车库）	650	0.002	<0.001	
	小动物 PET 机房北墙外	1/8（走廊）	1000	0.213	0.027	
	小动物 PET 机房顶部	1/2（急诊科）	1000	0.033	0.017	
	小动物 PET 机房底部	1/16（地下车库）	1000	0.002	<0.001	
	注射后饲养间北墙外	1/8（走廊）	440	0.824	**0.045**	
	注射后饲养间东墙	1/8（走廊）	440	0.824	**0.045**	

	外				
	注射后饲养间顶部	1/2（急诊科）	440	0.003	0.001
	注射后饲养间底部	1/16（地下车库）	440	<0.001	<0.001

*：对于注射后饲养间的年工作时间，由于仅注射治疗核素的老鼠才需进行饲养观察，且治疗核素年实验 50 次，因此本次估算按照注射后饲养间内同时储存 50 只老鼠，连续实验 50 天计算，最后一次连续实验结束后，需要再储存 5 天，因此注射后饲养间年工作时间取 8h/天×55 天=440h。

#：辐射工作人员年有效剂量保守按照所有辐射工作均由同 1 人完成计算。

根据表 11-8 估算结果可知，本项目动物影像实验室辐射工作人员年有效剂量最大为 1.009mSv，公众人员所受年有效剂量约为 0.045mSv，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员受照剂量限值要求以及本项目剂量约束值要求：职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众人员年有效剂量不超过 0.1mSv。

2 核医学中心核素显像区及核素治疗区项目

2.1 核医学中心核素显像区项目

2.1.1 核医学中心核素显像区心脏 ECT 项目

2.1.1.1 辐射防护效果预测与评价

医院拟对核医学中心核素显像区内原有的 1 座 PET/MR 机房进行改造，于 PET/MR 机房内中部及西侧新增屏蔽墙体，将其改造成 1 座心脏 ECT 机房，并拟于心脏 ECT 机房内新增 1 台 Discovery NM 530c 设备（单光子发射计算机断层扫描系统，不含 CT），使用 ^{99m}Tc 放射性药物进行显像检查。心脏 ECT 单名病人用药量约为 25mCi 左右，由药物供货商将分装好的 ^{99m}Tc 药物送至核医学中心核素显像分装注射室的手套箱内（约 10mmPb）。本项目主要分析 ^{99m}Tc 药物注射过程、注射后病人候诊、心脏 ECT 扫描过程及留观过程中对辐射工作人员和周围公众的辐射环境影响。

本项目在用 ^{99m}Tc 核素进行预测时，对分装注射室、心脏 ECT 机房、心脏 ECT 候诊室、诊后留观室周围参考点的辐射剂量率进行估算。根据公式（11-2）可估算出各参考点处的辐射水平，^{99m}Tc 放射诊断工作场所各参考点位置见图 11-2 中红色点位，^{99m}Tc 放射诊断工作场所预测结果见表 11-9。

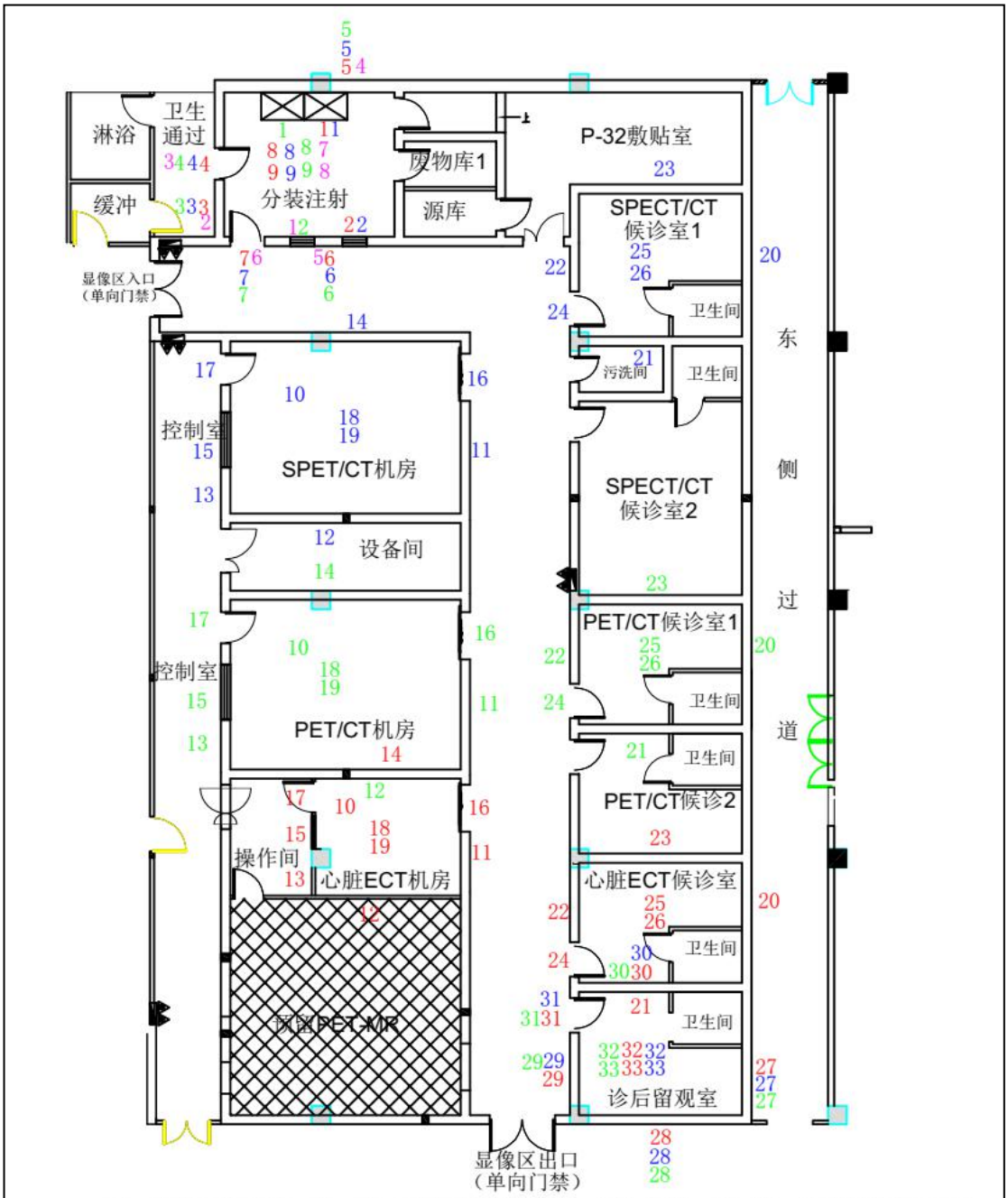


图 11-2 计算点位图

表 11-9 心脏 ECT 放射诊断项目工作场所参考点辐射水平估算结果

	参考点	源活度 MBq①	屏蔽措施	透射比②	距离 r（m）③	估算结果 (μSv/h)
1						
2	医					

3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	

26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	

注：①^{99m}Tc 药物单次储存在手套箱内的总活度不超过 15 人用量（包括 10 名 ^{99m}Tc 显像患者及 5 名心脏 ECT 患者），即 1.3875×10^{9}Bq；考虑到 ^{99m}Tc 候诊室及诊断后留观室内同时有 2 人候诊留观，因此心脏 ECT 候诊室及诊断后留观室均按 2 名病人进行预测；其余场所均按 1 名病人预测；

②混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，硫酸钡涂层密度不低于 3.8g/cm^3，75mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 121mm，90mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 145mm，减弱倍数计算按十值层算，其中铅取 1mm，混凝土取 110mm；

③参考点 1、2：r=0.6m（医生分装药物时距药物及给病人注射时距离病人约 0.6m）；

参考点 3、4：r=3.465m（药物距离墙体约 2.775m，墙厚约 0.39m，参考点 0.3m）；

参考点 5、6、7：r=3.04m（药物距离墙体约 2.35m，墙厚约 0.39m，参考点 0.3m）

参考点 8、18、25、32：r=4.1m（病人/药物距离顶部约 3.65m，顶部墙厚约 0.15m，参考点距离顶部外 0.3m）；

参考点 9、26、33：r=2.895m（病人/药物距离地面约 0.5m，底部墙厚约 0.395m，参考点距离底部外 2m）；

参考点 19：r=2.85m（病人/药物距离地面约 0.5m，底部墙厚约 0.35m，参考点距离底部外 2m）；

参考点 10：r=1.0m（指导摆位时医生距离扫描床约 1m）

参考点 11、16：r=3.04m（病人距离墙体约 2.365m，屏蔽墙厚 0.375m，参考点距离墙、门外 0.3m）；

参考点 12：r=2.2m（病人距离墙体约 1.9m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 13、15、17：r=2.665m（病人距离墙体约 2.365m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 14：r=2.575m（病人距离墙体约 1.9m，屏蔽墙厚 0.375m，参考点距离墙外 0.3mm）；

参考点 20、22、24、27、29、31：r=3.34m（病人距离墙体约 2.65m，墙厚约 0.39m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 21：r=2.64m（病人距离墙体约 1.95m，墙厚约 0.39m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 23：r=2.55m（病人距离墙体约 1.95m，墙厚约 0.3m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 28、30：r=2.74m（病人距离墙体约 2.0m，墙厚约 0.39m，参考点距离墙外 0.3m）

从表 11-9 中的理论估算结果可知，在 ^{99m}Tc 核素做心脏 ECT 诊断时，医务人员穿戴铅衣情况下，负责指导病人摆位的医护人员有一定的外照射影响（8.857μSv/h）；手套箱外表面 30cm 处的最大剂量当量率小于 0.001μSv/h；^{99m}Tc 核素诊断时，核医学中心核素显像区控制区内各房间防护门、观察窗、墙体外表面 30cm 处人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处最大剂量当量率约为 0.072μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“手套箱外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h，距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求。

2.1.1.2 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

根据表 11-9 和公式（11-9）可计算得到各个流程中辐射工作人员及周围公众的年有效剂量，计算结果见表 11-10。

表 11-10 ^{99m}Tc 心脏 ECT 放射诊断项目各个流程年剂量计算结果一览表

序号	参考点	参考点剂量率（μSv/h）	居留因子	照射时间（h/a）①	居留人群	年有效剂量（mSv/a）
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	

注：①^{99m}Tc 心脏 ECT 年门诊量 1250 人，单次分装药物约 2min，年分装 1250 次的时间约 41.7h；每名病人注射时间约 2min，年注射时间约为 41.7h；单个病人摆位过程约 1min，心脏 ECT 机房的年摆位时间约为 20.8h；单个病人扫描时间约 20min，心脏 ECT 机房年扫描时间约为 416.7h；单个病人在候诊室内时间约 105min（2 人同时候诊），年候诊时间约为 1094h；单个病人留观时间约为 20min（2 人同时留观），年留观时间约为 208.3h。

根据表 11-10 的理论估算结果可知，假设注射、摆位及操作均由同一名辐射工作人员负责，则开展 ^{99m}Tc 核素心脏 ECT 诊断项目时该辐射工作人员所受的年有效剂量约为 0.2mSv，周围公众的年有效剂量最大约为 0.008mSv。

2.1.2 核医学中心核素显像区 PET/CT 及 SPECT/CT 项目

医院拟于核医学中心核素显像区内新增 ^{68}Ga、^{123}I 核素的显像诊断，其中 ^{68}Ga 核素使用 PET/CT 扫描显像，^{123}I 核素使用 SPECT/CT 扫描显像。

2.1.2.1 CT 泄漏辐射和散射辐射影响评价

2.1.2.1.1 与标准对照预测

本项目 SPECT/CT 机房及 PET/CT 机房辐射防护屏蔽设计参数与标准对比见表 11-11。

表 11-11 本项目屏蔽设计参数与标准对照表

机房	本项目拟建机房参数		标准要求（CT 机）	是否满足要求
SPECT/CT 机房	设计尺寸	有效使用面积：43.4m^2	30m^2	满足
		最小单边长度：5.6m	≥4.5m	满足
	屏蔽设计	四周墙体：30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层（约 5mm 铅当量）	≥2.5mmPb	满足

		顶棚：15cm 混凝土+8mm 铅板（约 9.5mm 铅当量）	≥2.5mmPb	满足
		地面：35cm 混凝土+4.5mm 铅板+4.5cm 混凝土（约 9mm 铅当量）	≥2.5mmPb	满足
		防护门：6mmPb 铅板	≥2.5mmPb	满足
		观察窗：6mm 铅当量防护玻璃	≥2.5mmPb	满足
PET/CT 机房	设计尺寸	有效使用面积：41.85m^2	30m^2	满足
		最小单边长度：5.51m	≥4.5m	满足
	屏蔽设计	四周墙体：30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层（约 5mm 铅当量）	≥2.5mmPb	满足
		顶棚：15cm 混凝土+8mm 铅板（约 9.5mm 铅当量）	≥2.5mmPb	满足
		地面：35cm 混凝土+4.5mm 铅板+4.5cm 混凝土（约 9mm 铅当量）	≥2.5mmPb	满足
		防护门：8mmPb 铅板	≥2.5mmPb	满足
		观察窗：8mm 铅当量防护玻璃	≥2.5mmPb	满足

注：硫酸钡涂层密度约为 3.8g/cm^3，混凝土的密度约为 2.35g/cm^3。

根据表 11-11 可知，本项目 SPECT/CT 机房及 PET/CT 机房各侧墙体及门窗的屏蔽设计满足 GBZ130-2020 标准中的关于 CT 机房的铅当量厚度要求，且机房的最小有效使用面积最小单边长度也能够满足 GBZ130-2020 标准中的相关要求，因此本项目 SPECT/CT 机房及 PET/CT 机房的屏蔽防护设计能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h”的要求。

医院拟为患者配备铅橡胶性腺防护围裙或方巾、铅橡胶颈套及铅橡胶帽子等，医院个人防护用品的配备能够满足 GBZ130-2020 标准中的相关要求。

2.1.2.1.2 理论预测

根据前面“污染源项描述”中所述，本项目 SPECT/CT 及 PET/CT 在开机过程中需要考虑泄漏辐射和散射辐射。本项目 SPECT/CT 型号为 Symbia Intevo 6，最大管电压为 140kV，最大管电流约为 350mA；PET/CT 型号 Bioggraph mCT S（40），最大管电压为 140kV，最大管电流约为 666mA。SPECT/CT 及 PET/CT 扫描过程中 CT 最大工况均为 140kV、200mA，根据《辐射防护手册（第一分册）》（李德平 潘自强著）P448 的能量散射公式计算一次散射能量与初级能量的比值，140kV 射线经过一次散射后能量约为 109.9kV，本项目取 110kV、200mA 计算。

将相关参数带入公式（11-6）~公式（11-8）中，计算得到相应的散射辐射及漏射辐射屏蔽透射因子值，列于表 11-12 及表 11-13。SPECT/CT 机房及 PET/CT 机房外散射线及漏射线所致剂量率估算见表 11-14~表 11-17。

表 11-12 SPECT/CT 及 PET/CT 机房屏蔽体散射屏蔽透射因子计算结果

屏蔽体（设施）		屏蔽设计参数	等效铅当量（mm）	B_S
SPECT/CT 机房	东墙、南墙、西墙、北墙	30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层	5	1.02E-06
	顶部	15cm 混凝土+8mm 铅板	9.5	2.11E-11
	地板	39.5cm 混凝土+4.5mm 铅板	9	6.99E-11
	东侧、西侧防护门	6mmPb	6	9.27E-08
	观察窗	6mm 铅当量防护玻璃	6	9.27E-08
PET/CT 机房	东墙、南墙、西墙、北墙	30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层	5	1.02E-06
	顶部	15cm 混凝土+8mm 铅板	9.5	2.11E-11
	地板	39.5cm 混凝土+4.5mm 铅板	9	6.99E-11
	南侧、西侧防护门	8mmPb	8	7.68E-10
	观察窗	8mm 铅当量防护玻璃	8	7.68E-10

表 11-13 SPECT/CT 及 PET/CT 机房屏蔽体漏射屏蔽透射因子计算结果

屏蔽体（设施）		屏蔽设计参数	等效铅当量（mm）	B_S
SPECT/CT 机房	东墙、南墙、西墙、北墙	30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层	5	1.89E-06
	顶部	15cm 混凝土+8mm 铅板	9.5	2.11E-10
	地板	39.5cm 混凝土+4.5mm 铅板	9	5.76E-10
	东侧、南侧防护门	6mmPb	6	2.45E-07
	观察窗	6mm 铅当量防护玻璃	6	2.45E-07
PET/CT 机房	东墙、南墙、西墙、北墙	30cm 混凝土+75mm 硫酸钡涂层	5	1.89E-06
	顶部	15cm 混凝土+8mm 铅板	9.5	2.11E-10
	地板	39.5cm 混凝土+4.5mm 铅板	9	5.76E-10
	南侧、西侧防护门	8mmPb	8	4.31E-09
	观察窗	8mm 铅当量防护玻璃	8	4.31E-09

表 11-14　SPECT/CT 机房散射辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_0	I	a	S	Bs	d_0	ds	Hs
东墙外 30cm								

南墙外30cm	12							
西墙外30cm								
北墙外30cm								
顶部外30cm								
底部离地170cm								
东侧防护门外30cm								
西侧防护门外30cm								
观察窗外30cm								

表 11-15　SPECT/CT 机房泄漏辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_l	r	B	$\dot{H}_L$
	mGy/h	m	cm^2	/
东墙外 30cm				
南墙外 30cm				
西墙外 30cm				
北墙外 30cm				
顶部外 30cm				
底部 170cm				
东侧防护门外 30cm				
西侧防护门外 30cm				
观察窗外 30cm				

表 11-16　PET/CT 机房散射辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_0	I	a	S	Bs	d_0	ds	Hs
	$mGy•m^2$/（mA•min）	mA	/	cm^2	/	m	m	μGy/h
东墙外30cm								
南墙外30cm								
西墙外30cm								
北墙外30cm								
顶部外30cm								
底部离地170cm								
东侧防护门外								

30cm	
西侧防护门外30cm	
观察窗外30cm	

表 11-17 PET/CT 机房泄漏辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_l	r	B	$\dot{H}_L$
	mGy/h	m	cm^2	/
东墙外 30cm				
南墙外 30cm				
西墙外 30cm				
北墙外 30cm				
顶部外 30cm				
底部离地 170cm				
东侧防护门外 30cm				
西侧防护门外 30cm				
观察窗外 30cm				

表 11-18 SPECT/CT 机房及 PET/CT 机房散射辐射与泄漏辐射叠加结果

参考点		散射辐射（μGy/h）	泄漏辐射（μGy/h）	叠加剂量率（μGy/h）
SPECT/CT 机房				
PET/CT 机房				

根据表 11-18 的计算结果可知，本项目 SPECT/CT 机房及 PET/CT 机房四周墙、顶部、底部、观察窗及防护门外的泄露及散射辐射所致最大叠加辐射剂量约为 0.025μSv/h，能够满足相关标准的要求。

2.1.2.2 SPECT/CT 显像诊断

2.1.2.2.1 辐射防护效果预测与评价

本项目 SPECT/CT 诊断拟使用 ^{123}I 核素进行显像。^{123}I 显像时单名病人药物用量一般为 10mCi 左右，由药物供货商将 ^{123}I 药物送至核医学中心核素显像区分装注射室，暂存于手套箱内（约 10mmPb）。本项目主要分析 ^{123}I 分装、注射过程、注射后病人候诊、SPECT/CT 扫描过程及留观过程中对辐射工作人员和周围公众的辐射环境影响。

本项目在用 ^{123}I 核素进行预测时，对分装注射室、SPECT/CT 机房、SPECT/CT 候诊室 1、诊后留观室周围参考点的辐射剂量率进行估算。根据公式（11-2）可估算出各参考点处的辐射水平，^{123}I 放射诊断工作场所各参考点位置见图 11-2 中蓝色点位，^{123}I 放射诊断工作场所预测结果见表 11-19。

表 11-19 ^{123}I 放射诊断项目工作场所参考点辐射水平估算结果

参考点		源活度 MBq①	屏蔽措施	透射比②	距离 r（m）③	估算结果 (μSv/h)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32

33	

注：①^{123}I 药物单次分装总活度不超过 3 人用量，即 1.11×10^{9}Bq；考虑到 ^{123}I 候诊室及诊断后留观室内同时有 2 人候诊留观，因 ^{123}I 候诊室及诊断后留观室均按 2 名病人进行预测；其余场所均按 1 名病人预测；

②混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，硫酸钡涂层密度不低于 3.8g/cm^3，75mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 121mm，90mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 145mm，未获得什值层厚度的情况下，查取《放射防护实用手册》附录 2 的衰减倍数 K 值，η=1/K；

③参考点 1、2：r=0.6m（医生分装药物时距药物距离及给病人注射时距离病人约 0.6m）；

参考点 3、4：r=3.465m（药物距离墙体约 2.775m，墙厚约 0.39m，参考点 0.3m）；

参考点 5、6、7：r=3.04m（药物距离墙体约 2.35m，墙厚约 0.39m，参考点 0.3m）

参考点 8、18、25、32：r=4.1m（病人/药物距离顶部约 3.65m，顶部墙厚约 0.15m，参考点距离顶部外 0.3m）；

参考点 9、19、26、33：r=2.895m（病人/药物距离地面约 0.5m，底部墙厚约 0.395m，参考点距离底部外 2m）；

参考点 10：r=1.0m（指导摆位时医生距离扫描床约 1m）

参考点 11、13、15、16、17：r=4.425m（病人距离墙体约 3.75m，屏蔽墙厚 0.375m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 12、14：r=3.475m（病人距离墙体约 2.8m，屏蔽墙厚 0.375m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 20、22、24、27、29、31：r=3.34m（病人距离墙体约 2.65m，墙厚约 0.39m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 21、23：r=3.015m（病人距离墙体约 2.325m，墙厚约 0.39m，参考点距离墙外 0.3m）

参考点 28、30：r=2.74m（病人距离墙体约 2.0m，墙厚约 0.39m，参考点距离墙外 0.3m）

从表 11-19 中的理论估算结果可知，^{123}I 核素诊断时，医务人员穿戴铅衣情况下，负责指导病人摆位的医护人员有一定的外照射影响（14.245μSv/h）；^{123}I 核素分装时，手套箱外表面 30cm 处的最大剂量当量率小于 0.594μSv/h；^{123}I 核素诊断时，核医学中心核素显像区控制区内各房间防护门、观察窗、墙体外表面 30cm 处人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处最大剂量当量率约为 0.073μSv/h，根据表 11-18，考虑放射性同位素和 CT 共同辐射影响后，SPECT/CT 机房外剂量当量率约为 0.024μSv/h。能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“手套箱外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h，距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求。

2.1.2.2.2 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

根据表 11-19 和公式（11-9）可计算得到各个流程中辐射工作人员及周围公众的

年有效剂量，计算结果见表 11-20。

表 11-20 ^{123}I 核素放射诊断项目各个流程年剂量计算结果一览表

序号	参考点	参考点剂量率（μSv/h）	居留因子	照射时间（h/a）①	居留人群	年有效剂量（mSv/a）
1	分装工作位	0.594	1	25	辐射工作人员	**0.015**
2	医务人员注射位置	<0.001	1	25		<0.001
3	分装注射室西墙外	<0.001	1/4（卫生通过间）	25		<0.001
4	分装注射室西侧防护门外	0.012	1/4（卫生通过间）	25		<0.001
5	SPECT/CT 机房西侧墙外	0.014	1（控制室）	250		0.004
6	SPECT/CT 机房观察窗外	0.022	1（控制室）	250		**0.006**
7	SPECT/CT 机房西侧防护门外	0.022	1（控制室）	250		0.006
8	SPECT/CT 机房内摆位处	14.245	1	20.8		**0.296**
9	分装注射室北墙外	<0.001	1/4（动物影像实验室走廊）	25		<0.001
10	分装注射室楼上	<0.001	1/4（中央大厅）	25	公众	<0.001
11	分装注射室楼下	<0.001	1/4（停车场）	25		<0.001
12	SPECT/CT 机房楼上	<0.001	1/4（中央大厅）	250		<0.001
13	SPECT/CT 机房楼下	<0.001	1/4（停车场）	250		<0.001
14	SPECT/CT 候诊室 1 东侧墙外	<0.001	1/8（过道）	187.5		<0.001
15	SPECT/CT 候诊室 1 楼上	<0.001	1/4（中央大厅）	187.5		<0.001
16	SPECT/CT 候诊室 1 楼下	<0.001	1/4（停车场）	187.5		<0.001
17	诊后留观室东侧墙外	<0.001	1/8（过道）	125		<0.001
18	诊后留观室南侧墙外	<0.001	1/8（过道）	125		<0.001
19	诊后留观室楼上	<0.001	1/4（中央大厅）	125		<0.001

20	诊后留观室楼下	<0.001	1/4（停车场）	125		<0.001

注：①^{123}I 核素年门诊量 750 人，单次分装药物约 2min，年分装 750 次的时间约 25h；每名病人注射时间约 2min，年注射时间约为 25h；单个病人摆位过程约 1min，SPECT/CT 机房的年摆位时间约为 12.5h；单个病人扫描时间约 20min，SPECT/CT 机房年扫描时间约为 250h；单个病人在候诊室内时间约 30min（2 人同时候诊），年候诊时间约为 187.5h；单个病人留观时间约为 20min（2 人同时留观），年留观时间约为 125h。

根据表 11-20 的理论估算结果可知，假设分装、注射、摆位及操作均由同一名辐射工作人员负责，则开展 ^{123}I 核素诊断项目时该辐射工作人员所受的年有效剂量约为 0.317mSv，周围公众的最大年有效剂量小于 0.001mSv。

2.1.2.3 PET/CT 显像诊断

2.1.2.3.1 辐射防护效果预测与评价

本项目 PET/CT 诊断拟使用 ^{68}Ga 放射性核素进行显像，显像时单名病人药物用量一般为 5mCi 左右。由药物供货商将 ^{68}Ga 放射性药物送至核医学中心核素显像区分装注射室，暂存于手套箱内（约 45mmPb）。本项目主要分析核素在分装、注射过程、注射后病人候诊、扫描及留观过程中对辐射工作人员和周围公众的辐射环境影响。在进行预测时，选取分装注射室、PET/CT 机房、PET/CT 候诊室 1、诊后留观室周围参考点进行预测。根据公式（11-2）可估算出各参考点处的辐射水平，参考点位置见图 11-2 中绿色点位，^{68}Ga 的预测结果见表 11-21。

表 11-21 ^{68}Ga 放射诊断项目工作场所参考点辐射水平估算结果

参考点		源活度 MBq①	屏蔽措施	透射比②	距离 r（m）③	估算结果 (μSv/h)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	

33	

注：①^{123}I 药物单次分装总活度不超过 10 人用量，即 1.85×10^{9}Bq；考虑到 ^{68}Ga 候诊室及诊断后留观室内同时有 2 人候诊留观，因此 ^{68}Ga 候诊室及诊断后留观室均按 2 名病人进行预测；其余场所均按 1 名病人预测；

②混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，硫酸钡涂层密度不低于 3.8g/cm^3，75mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 121mm，90mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 145mm，未获得什值层厚度的情况下，查取《放射防护实用手册》附录 2 的衰减倍数 K 值，η=1/K；

③参考点 1、2：r=0.6m（医生分装药物时距药物距离及给病人注射时距离病人约 0.6m）；

参考点 3、4：r=3.465m（药物距离墙体约 2.775m，墙厚约 0.39m，参考点 0.3m）；

参考点 5、6、7：r=3.04m（药物距离墙体约 2.35m，墙厚约 0.39m，参考点 0.3m）

参考点 8、18、25、32：r=4.1m（病人/药物距离顶部约 3.65m，顶部墙厚约 0.15m，参考点距离顶部外 0.3m）；

参考点 9、19、26、33：r=2.895m（病人/药物距离地面约 0.5m，底部墙厚约 0.395m，参考点距离底部外 2m）；

参考点 10：r=1.0m（指导摆位时医生距离扫描床约 1m）

参考点 11、13、15、16、17：r=4.425m（病人距离墙体约 3.75m，屏蔽墙厚 0.375m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 12、14：r=3.43m（病人距离墙体约 2.755m，屏蔽墙厚 0.375m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 20、22、24、27、29、31：r=3.34m（病人距离墙体约 2.65m，墙厚约 0.39m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 21、23：r=2.55m（病人距离墙体约 1.95，墙厚约 0.3m，参考点距离墙外 0.3m）

从表 11-21 中的理论估算结果可知，^{68}Ga 核素诊断时，医务人员穿戴铅衣情况下，负责指导病人摆位的医护人员有一定的外照射影响（23.865μSv/h）；^{68}Ga 核素分装时，手套箱外表面 30cm 处的最大剂量当量率小于 0.663μSv/h；^{68}Ga 核素诊断时，核医学中心核素显像区控制区内各房间防护门、观察窗、墙体外表面 30cm 处人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处最大剂量当量率约为 1.797μSv/h，根据表 11-18，考虑放射性同位素和 CT 共同辐射影响后，PET/CT 机房外剂量当量率约为 0.402μSv/h。能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“手套箱外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h，距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求。

2.1.2.3.2 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

根据表 11-21 和公式（11-9）可计算得到各个流程中辐射工作人员及周围公众的

年有效剂量，计算结果见表 11-22。

表 11-22 ^{68}Ga 核素放射诊断项目各个流程年剂量计算结果一览表

序号	参考点	参考点剂量率（μSv/h）	居留因子	照射时间（h/a）①	居留人群	年有效剂量（mSv/a）
1	分装工作位	0.663	1	83.3	辐射工作人员	**0.055**
2	医务人员注射位置	1.107	1	83.3		**0.092**
3	分装注射室西墙外	0.010	1/4（卫生通过间）	83.3		<0.001
4	分装注射室西侧防护门外	0.656	1/4（卫生通过间）	83.3		0.014
5	PET/CT 机房西侧墙外	0.023	1（控制室）	833.3		0.019
6	PET/CT 机房观察窗外	0.402	1（控制室）	833.3		**0.335**
7	PET/CT 机房西侧防护门外	0.402	1（控制室）	833.3		0.335
8	PET/CT 机房内摆位处	23.865	1	41.7		**0.995**
9	分装注射室北墙外	0.013	1/4（动物影像实验室走廊）	83.3		<0.001
10	分装注射室楼上	0.162	1/4（中央大厅）	83.3	公众	0.003
11	分装注射室楼下	0.031	1/4（停车场）	83.3		0.001
12	PET/CT 机房楼上	0.162	1/4（中央大厅）	833.3		0.034
13	PET/CT 机房楼下	0.017	1/4（停车场）	833.3		0.004
14	PET/CT 候诊室 1 东侧墙外	0.021	1/8（过道）	625		0.002
15	PET/CT 候诊室 1 楼上	0.324	1/4（中央大厅）	625		**0.051**
16	PET/CT 候诊室 1 楼下	0.063	1/4（停车场）	625		0.010
17	诊后留观室东侧墙外	0.021	1/8（过道）	416.7		0.001
18	诊后留观室南侧墙外	0.032	1/8（过道）	416.7		0.002
19	诊后留观室楼上	0.324	1/4（中央大厅）	416.7		0.034

20	诊后留观室楼下	0.063	1/4（停车场）	416.7		0.007

注：①^{68}Ga 核素年门诊量 2500 人，单次分装药物约 2min，年分装 2500 次的时间约 83.3h；每名病人注射时间约 2min，年注射时间约为 83.3h；单个病人摆位过程约 1min，PET/CT 机房的年摆位时间约为 41.7h；单个病人扫描时间约 20min，PET/CT 机房年扫描时间约为 833.3h；单个病人在候诊室内时间约 30min（2 人同时候诊），年候诊时间约为 625h；单个病人留观时间约为 20min（2 人同时留观），年留观时间约为 416.7h。

根据表 11-22 的理论估算结果可知，假设分装、注射、摆位及操作均由同一名辐射工作人员负责，则开展 ^{68}Ga 核素诊断项目时该辐射工作人员所受的年有效剂量约为 1.477mSv，周围公众的最大年有效剂量小于 0.051mSv。

2.1.2.4 核素治疗项目

医院拟于核医学中心核素显像区内新增 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等 7 种核素的治疗，其中 ^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 均为α核素，主要考虑α射线影响，^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu 核素均为纯β放射性核素，主要考虑β射线影响。

2.1.2.4.1 α射线辐射环境影响分析

在核素治疗过程中，^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Bi、^{227}Th 核素的操作需考虑α射线对周围环境的辐射影响。由于α粒子在空气中的平均射程只有 4 厘米，而且α粒子的穿透能力很弱，会被注射窗屏蔽，因此对α粒子的外照射影响很小。但α粒子具有很强的电离能力，如果进入体内时对组织器官造成严重的电离伤害，因此要严防α内照射。一般情况下，内照射主要通过吸入、食入及皮肤吸收等途径进入人体内，为减少内照射的影响，公司应加强对核医学中心的管理：禁止在核医学中心控制区和监督区内进食、饮水、吸烟，同时在控制区和监督区也不得进行无关工作及存放无关物件。辐射工作人员操作后离开核医学中心前洗手和作表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施。从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区。

2.1.2.4.2 β射线辐射环境影响分析

在核素治疗过程中，^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu 核素均会产生β射线。根据医院提供资料，本项目 ^{89}Sr 核素治疗的单次用药剂量约为 4mCi，^{212}Pb 核素治疗的单次用药剂量约为 0.5mCi，^{67}Cu 核素治疗的单次用药剂量约为 4mCi，根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）表 B.1，^{89}Sr 患者出院时体内放射性活度小于 200MBq 的要求，^{212}Pb、^{67}Cu 患者出院时体内放射性活度参考 ^{90}Y 患者，小于 2500MBq。病人可以在口服 4mCi^{89}Sr 药物或 0.5mCi^{212}Pb 药物或 4mCi ^{67}Cu 药物后直接出院。

本项目主要分析核素在服用过程中对辐射工作人员和周围公众的辐射环境影响。在

进行预测时，选取分装注射室周围参考点进行预测。根据公式（11-3）、（11-4）可估算出本项目 ^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu 衰变发出的β射线在不同材料中的射程，预测结果见表 11-23。

表 11-23 β射线在不同材料中射程

放射性核素	E（MeV）	R（g·cm^{-2}）	材料	密度（g·cm^{-3}）	射程（cm）
			水	1	0.72

由表 11-23 可知，^{89}Sr 在水中的最大射程约为 0.72cm，在铅中的最大射程约为 0.063cm，在混凝土中的最大射程约为 0.029cm；^{212}Pb 及 ^{67}Cu 在水中的最大射程约为 0.113cm，在铅中的最大射程约为 0.010cm，在混凝土中的最大射程约为 0.048cm。本项目 ^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu 放射性药物的打针均在分装注射室内进行，分装注射室墙体混凝土厚度均不低于 150mm，铅屏蔽厚度均不低于 8mm，辐射工作人员不直接接触放射性药物，^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu 发射的β射线对周围环境影响较小。

由于 ^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu 核素中，^{89}Sr 核素发射的β射线能量最大，且单名病人用药活度不低于 ^{67}Cu 及 ^{212}Pb，因此本次选取 ^{89}Sr 核素进行预测。根据公式（11-5），参考点位置见图 11-2 中粉色点位，^{89}Sr 核素轫致辐射防护计算参数及预测结果见表 11-24。

表 11-24 ^{89}Sr 轫致辐射预测结果

点位	A（Bq）	r（m）	屏蔽材料及厚度	η*	Z_e	$\dot{H}_r$（μSv/h）
厂务人员注射位置						

*：未获得什值层厚度的情况下，查取《放射防护实用手册》附录 2 的衰减倍数 K 值，η=1/K。

根据表 11-24 的计算结果可知，在进行 ^{89}Sr、^{212}Pb、^{67}Cu 核素治疗时，核医学中心核素显像区控制区内分装注射室防护门、墙体外表面 30cm 处人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处最大剂量当量率为 0.486μSv/h，人员注射位处剂量当量率为 0.546μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“注射窗等表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5 μSv/h，距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求

2.1.2.4.4 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

根据表 11-23、表 11-24 和公式（11-9）可计算得到各个流程中辐射工作人员及周围公众的年有效剂量，计算结果见表 11-25。

表 11-25 核素治疗项目各个流程年剂量计算结果一览表

序号	参考点	参考点剂量率（μSv/h）①	居留因子	照射时间（h/a）②	居留人群	年有效剂量（mSv/a）
1	医务人员注射位置	0.546	1	58.3	辐射工作人员	**0.032**
2	分装注射室西墙外	0.001	1/4（卫生通过间）	58.3		<0.001
3	分装注射室西侧防护门外	0.374	1/4（卫生通过间）	58.3		0.022
4	分装注射室北墙外	0.002	1/4（动物影像实验室走廊）	58.3		<0.001
5	分装注射室楼上	0.016	1/4（中央大厅）	58.3	公众	<0.001
6	分装注射室楼下	0.003	1/4（停车场）	58.3		<0.001

注：①剂量率保守取各治疗核素治疗时参考点为处的最大辐射剂量率进行预测。

②^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等核素年门诊量均约为 250 人，总门诊量约为 1750 人，每名病人注射时间约 2min，年注射时间约为 58.3h。

根据表 11-25 的理论估算结果可知，开展 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{225}Ac、^{212}Pb、^{212}Bi、^{67}Cu、^{227}Th 等核素治疗项目时，辐射工作人员所受的年有效剂量约为 0.032mSv，周围公众的最大年有效剂量小于 0.001mSv。

2.1.2.5 ^{32}P 敷贴治疗项目

本项目 ^{32}P 敷贴治疗拟由辐射工作人员在核医学中心核素显像区分装注射室的手套箱佩戴乳胶手套制作，拟采用三层优质塑料薄膜与胶布套封，以保证其密封性，制作好的 ^{32}P 敷贴器应经检测表面无放射性污染后方能使用。本项目拟在敷贴室内对患者进行敷贴治疗，实施治疗时，由辐射工作人员进行操作，在不接触患者皮肤的一面应采用 3mm 厚的橡皮覆盖屏蔽；^{32}P 敷贴器用后应由医护人员清点收回，并做记录。能够满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中关于 ^{32}P 敷贴器的特殊防护要求。

医院拟根据患者的病变形状准确计算剂量，一般每平方厘米采用活度大概 20μCi 的 ^{32}P 进行敷贴治疗，整个敷贴治疗过程用时短，单名患者用药活度小，一般在 1mCi 左右，最大不超过 2mCi。又核素 ^{32}P 为纯β放射性核素，其平均能量为 0.695MeV，释放的β射线的射线能量较低，仅需要 3mm 厚的组织就可吸收其 90%的能量，因此在不接触患者皮肤的一面采用 3mm 厚的橡皮覆盖屏蔽后，其对周围辐射工作人员及周围工作的辐射影响可忽略。

2.2 核素治疗区 ^{177}Lu 核素治疗项目

2.2.1 核素治疗区 ^{177}Lu 核素治疗项目辐射防护效果预测与评价

医院拟于核医学中心核素治疗区内新增 ^{177}Lu 核素治疗，每周进行 1 名 ^{177}Lu 病人治疗。医学中心核素治疗区内原有 6 座 ^{131}I 甲癌治疗病房，医院拟将其中的病房 6 作为 ^{177}Lu 核素治疗病房。

^{177}Lu 核素主要考虑β射线及γ射线影响，^{177}Lu 治疗项目辐射影响主要包括服药、患者住院等过程，主要对核医学中心工作人员及室外公众产生外照射辐射影响。

2.2.1.1 γ射线辐射环境影响分析

根据公式（11-2）可估算出 ^{177}Lu 治疗项目周围各参考点处的γ辐射水平，各参考点位置见图 11-2 中红色点位，预测结果见表 11-26。

表 11-26 ^{177}Lu 核素治疗项目工作场所参考点γ辐射水平估算结果

参考点	源活度 MBq	屏蔽措施	透射比①	距离 r（m）②	估算结果 (μSv/h)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26

27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	

注：①混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，硫酸钡涂层密度不低于 3.8g/cm^3，30mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 48mm，60mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 96mm；

②参考点 1：r=0.6m（医生给药时距离病人约 0.6m）；

参考点 2、3、4：r=2.51m（药物距离墙体约 1.85m，墙厚约 0.36m，参考点 0.3m）；

参考点 5、6、7、8：r=2.11m（药物距离墙体约 1.45m，墙厚约 0.36m，参考点 0.3m）

参考点 9、16、24、32、40：r=4.115m（病人距离顶部约 3.65m，顶部墙厚约 0.165m，参考点距离顶部外 0.3m）；

参考点 10、17、25、33、41：r=2.96m（病人距离地面约 0.5m，底部墙厚约 0.46m，参考点距离底部外 2m）；

参考点 11：r=2.6m（病人距离墙体约 2m，墙厚约 0.3m，参考点 0.3m）；

参考点 14：r=2.66m（病人距离墙体约 2m，墙厚约 0.36m，参考点 0.3m）

参考点 12、13、15：r=3.935m（病人距离墙体约 3.275m，屏蔽墙厚 0.36m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 18、21：r=2.135m（病人距离墙体约 1.475m，墙厚约 0.36m，参考点 0.3m）；

参考点 19、20、22、23：r=1.91m（病人距离墙体约 1.25m，屏蔽墙厚 0.36m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 26、29：r=2.01m（病人距离墙体约 1.35m，屏蔽墙厚 0.36m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 27、28、30、31：r=2.185m（病人距离墙体约 1.525m，墙厚约 0.36m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 34、37：r=2.61m（病人距离墙体约 1.95，墙厚约 0.36m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 35、36、38、39：r=3.31m（病人距离墙体约 2.65，墙厚约 0.36m，参考点距离墙外 0.3m）；

参考点 42：r=0.5m（医生抢救时距离病人约 0.5m）；

2.2.1.2 β射线辐射环境影响分析

由前文表 11-2 可知，^{177}Lu 在有机玻璃中的最大射程约为 0.137cm，在铅中的最大射程约为 0.014cm，在混凝土中的最大射程约为 0.069cm，本项目 ^{177}Lu 核素治疗场所墙体混凝土厚度均不低于 150mm，铅屏蔽厚度均不低于 3mm，辐射工作人员不直接接触放射性药物，^{177}Lu 发射的β射线对周围环境影响较小。

根据公式（11-5）可估算出 ^{177}Lu 治疗项目开展时韧致辐射对周围各参考点处辐射水平，各参考点位置见图 11-2 中红色点位，预测结果见表 11-27。

表 11-27 ^{177}Lu 韧致辐射预测结果

序号	点位	A（Bq）	r（m）	屏蔽材料及厚度*	η*	Z_e	$\dot{H}_r$（μSv/h）
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	

*混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，硫酸钡涂层密度不低于 3.8g/cm^3，30mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 48mm，60mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 96mm；未获得什值层厚度的情况下，查取《放射防护实用手册》附录 2 的衰减倍数 K 值，η=1/K。

2.2.1.3 ^{177}Lu 核素γ射线与韧致辐射叠加剂量率

现将 ^{177}Lu 核素治疗时产生的γ射线与韧致辐射进行叠加，各参考点处叠加剂量率见表 11-28。

表 11-28 ^{177}Lu 核素治疗时产生的 γ 射线与韧致辐射得加剂量率

序号	点位	γ射线剂量率（μSv/h）	韧致辐射（μSv/h）	叠加剂量率（μSv/h）
1				

2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				
42				

根据表 11-28 中计算结果，考虑 ^{177}Lu 核素γ射线与韧致辐射叠加影响，^{177}Lu 核

素治疗需抢救患者时，抢救位处的医护人员有一定的外照射影响（159.6μSv/h）；^{177}Lu核素治疗区控制区内房间四周墙体、观察窗、防护门、顶部、底部外表面30cm处辐射剂量率最大为1.766μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 中“距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面30cm处的周围剂量当量率应小于2.5μSv/h”的要求。

2.2.2 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

根据表11-28和公式（11-9）可计算得到各个流程中辐射工作人员及周围公众的年有效剂量，计算结果见表11-29。

表11-29 辐射工作人员及公众年有效剂量估算

序号	参考点	参考点剂量率（μSv/h）	居留因子	照射时间（h/a）①	居留人群	年有效剂量（mSv/a）
1	分装室北侧给药窗口	0.017	1	1.67	辐射工作人员	<0.001
2	分装室南侧防护门外	0.192	1/4（卫生通过间）	1.67		<0.001
3	分装室南墙外	<0.001	1/4（更衣室）	1.67		<0.001
4	配餐间南墙外	<0.001	1/4（清洁被服间）	12.5		<0.001
5	配餐间南侧防护窗外	0.234	1/4（卫生通过间）	12.5		**0.001**
6	治疗室南侧防护门外	0.179	1/4（配液/配药室）	12.5		**0.001**
7	治疗室南墙外	<0.001	1/4（配液/配药室）	12.5		<0.001
8	抢救室南墙外	<0.001	1/4（医护走廊）	1		<0.001
9	抢救室南侧防护门外	0.051	1/4（医护走廊）	1		<0.001
10	抢救室西墙外	<0.001	1/8（库房）	1		<0.001
11	抢救室抢救位处	159.6	1	1		**0.160**
12	分装室楼上	<0.001	1（输液室）	1.67	公众	<0.001
13	分装室楼下	<0.001	1/4（停车场）	1.67		<0.001
14	病房6西墙外	<0.001	1/8（楼梯）	2000		<0.001
15	病房6楼上	<0.001	1（输液室）	2000		<0.001

16	病房 6 楼下	<0.001	1/4（停车场）	2000		<0.001
17	配餐间楼上	<0.001	1（输液室）	12.5		<0.001
18	配餐间楼下	<0.001	1/4（停车场）	12.5		<0.001
19	治疗室楼上	<0.001	1（输液室）	500+4.17=504.17		<0.001
20	治疗室楼下	<0.001	1/4（停车场）	500+4.17=504.17		<0.001
21	抢救室楼上	<0.001	1（医生办公室）	1		<0.001
22	抢救室楼下	<0.001	1/4（停车场）	1		<0.001

注：①^{177}Lu 核素年门诊量 50 人，单次给药时间约 2min，年给药时间约为 1.67h；单个病人于治疗室内打针用时约 1min，单次输液准备及扎针用时约 2min（输液期间辐射工作人员不陪同），年打针 250 次，年输液 250 次，则打针及输液用时约 12.5h；单个病人于病房内留观时，按照每天 8 小时计算，则留观时间约 2000h；单个病人取餐时间约 1min，则年取餐时间约为 12.5h；患者于抢救室内抢救时，按照年抢救 2 名患者，单次抢救 0.5h 算，则年抢救时间约 1h。

根据表 11-29 的理论估算结果可知，假设给药、配餐、病人打针/输液、抢救等均由同一名辐射工作人员负责，则开展 ^{177}Lu 核素治疗项目时，该辐射工作人员所受的年有效剂量约为 0.162mSv，周围公众的最大年有效剂量小于 0.001mSv，能够满足本项目职业人员年有效剂量不大于 5mSv/a，公众年有效剂量不大于 0.1mSv/a 的剂量约束值要求。

2.3 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴治疗项目

本项目 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器活度为 40mCi（1.48E+09Bq），是密封面源，当 ^{90}Sr 衰变时，它放出 0.56MeV 的β粒子后变为 ^{90}Y，而 ^{90}Y 纯β放射性核素，其最大能量为 2.284MeV，平均能量为 0.761MeV，因此治疗时主要考虑 ^{90}Y 对周围环境的辐射影响。

根据《电离辐射防护技术与管理》中的实测结果，在进行敷贴治疗时，医生手持 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器，离源 10cm 距离，无防护的状态下手部辐射剂量率达到 228μSv/h，而离源 40cm 的躯干处辐射剂量率也达到 31μSv/h。因此，开展敷贴治疗，也必须被限制在具有一定屏蔽的室内，而手持敷贴治疗源的工作人员也应进行屏蔽防护。

^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器自带生产厂家提供的贮源保险屏蔽箱，采用内外两层屏蔽结构，内层采用约 10mm 有机玻璃屏蔽β粒子，外层采用厚度约 3cm 的铅屏蔽韧致辐射，确保距离贮源箱表面 5cm 和 100cm 处的韧致辐射的空气吸收剂量率分别不超过

10μSv/h 和 1μSv/h。该贮源保险屏蔽箱具有防盗功能，将固定于敷贴室室内的一角，同时安装监控设备对放射源进行 24h 实时监控。能够满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中的相关要求。

本项目 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴治疗室设置在核医学中心核素治疗区外东南侧，仅供敷贴治疗使用。敷贴治疗室四周墙采用 300mm 混凝土+90mm 硫酸钡涂层屏蔽，顶部采用 150mm 混凝土+5mmPb 屏蔽，底部采用 395mm 混凝土屏蔽，防护门具有 6mm 铅当量。将相关参数带入公式（11-5）中，计算得到 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴治疗室外四周的辐射剂量率见表 11-30。

表 11-30 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴治疗室 ^{90}Y 韧致辐射预测结果

点位	A（Bq）	r（m）	屏蔽材料及厚度	η*	Z_e	$\dot{H}_r$（μSv/h）
防护门外 30cm						

*混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，硫酸钡涂层密度不低于 3.8g/cm^3，90mm 硫酸钡涂层按密度换算为混凝土厚度约为 145mm；未获得什值层厚度的情况下，查取《放射防护实用手册》附录 2 的衰减倍数 K 值，η=1/K。

在经过墙体及防护门屏蔽后，^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器治疗时，敷贴治疗室四周、顶部、底部及防护门外最大辐射剂量率约为 0.094μSv/h，能够满足不大于 2.5μSv/h 的标准要求。

2.4 核医学中心辐射工作人员及公众所受叠加年有效剂量估算

2.4.1 核医学中心核素显像区辐射工作人员所受叠加年有效剂量估算

根据前文表 11-10、表 11-20、表 11-22 及表 11-25 计算结果可知，假设核医学中心核素显像区内所有工作均由同一名辐射工作人员完成，则辐射工作人员所受叠加

年有效剂量为 0.2mSv+0.317mSv+1.477mSv+0.032mSv=2.026mSv。由于本项目核医学中心核素显像区辐射工作人员仍负责原有辐射工作，因此还需考虑本项目与原有项目叠加的辐射影响。根据医院 2022 年 3 月~2023 年 3 月个人剂量检测报告（见附件 7）可知，辐射工作人员所受最大年有效剂量约为 1.11mSv，再叠加上本项目辐射工作人员所受年有效剂量 2.026mSv 后，本项目辐射工作人员所受最大年有效剂量约为 3.136mSv，能够满足本项目职业人员剂量约束值不大于 5mSv/a 的要求。

2.4.2 核医学中心核素治疗区辐射工作人员所受叠加年有效剂量估算

由于本项目核医学中心核素治疗区辐射工作人员还需负责原有辐射工作，因此还需考虑本项目与原有项目叠加的辐射影响。根据医院 2022 年 3 月~2023 年 3 月个人剂量检测报告可知，辐射工作人员所受最大年有效剂量约为 1.11mSv，再叠加上本项目核医学中心核素治疗区辐射工作人员所受年有效剂量 0.162mSv 后，本项目辐射工作人员所受最大年有效剂量约为 1.272mSv，能够满足本项目职业人员剂量约束值不大于 5mSv/a 的要求。

2.4.3 核医学中心公众人员所受叠加年有效剂量估算

由于本项目核医学中心核素显像区、核素治疗区相距较近，且与动物影响实验室相邻，因此需考虑公众所受剂量叠加影响。根据前文表 11-8、表 11-10、表 11-20、表 11-22、表 11-25 及表 11-29 计算结果可知，核医学中心楼上公众所受叠加年有效剂量保守取表 11-8、表 11-10、表 11-20、表 11-22、表 11-25 及表 11-29 中楼上公众最大年剂量值相加，即 0.017mSv+0.008mSv+0.001mSv+0.051mSv+0.001mSv+0.001mSv=0.089mSv，核医学中心楼下公众所受叠加年有效剂量保守取表 11-8、表 11-10、表 11-20、表 11-22、表 11-25 及表 11-29 中楼下公众最大年剂量值相加，即 0.001mSv+0.001mSv+0.001mSv+0.010mSv+0.001mSv+0.001mSv=0.015mSv，核医学中心四周公众所受叠加年有效剂量保守取表 11-8、表 11-10、表 11-20、表 11-22 及表 11-29 中四周公众最大年剂量值相加，即 0.045mSv+0.001mSv+0.001mSv+0.002mSv+0.001mSv=0.05mSv，均能够满足本项目公众人员剂量约束值不大于 0.1mSv/a 的要求。

3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

本次 ^{90}Y 树脂微球治疗项目涉及的 ^{90}Y 放射性核素为β衰变，衰变时仅产生β射线，β射线与物质相互作用会产生轫致辐射，因而在评价工作场所的辐照水平时，需要同时考虑β射线和轫致辐射。^{99m}Tc 放射性核素衰变方式为同质异能跃迁，伴随发

射 0.14MeV 的γ射线，因此需要考虑在 ^{99m}Tc 药物分装、注射、注射后病人候诊、扫描过程中对辐射工作人员和周围公众的辐射环境影响。

3.1 ^{90}Y 放射性药物环境影响分析

3.1.1 β射线辐射环境影响分析

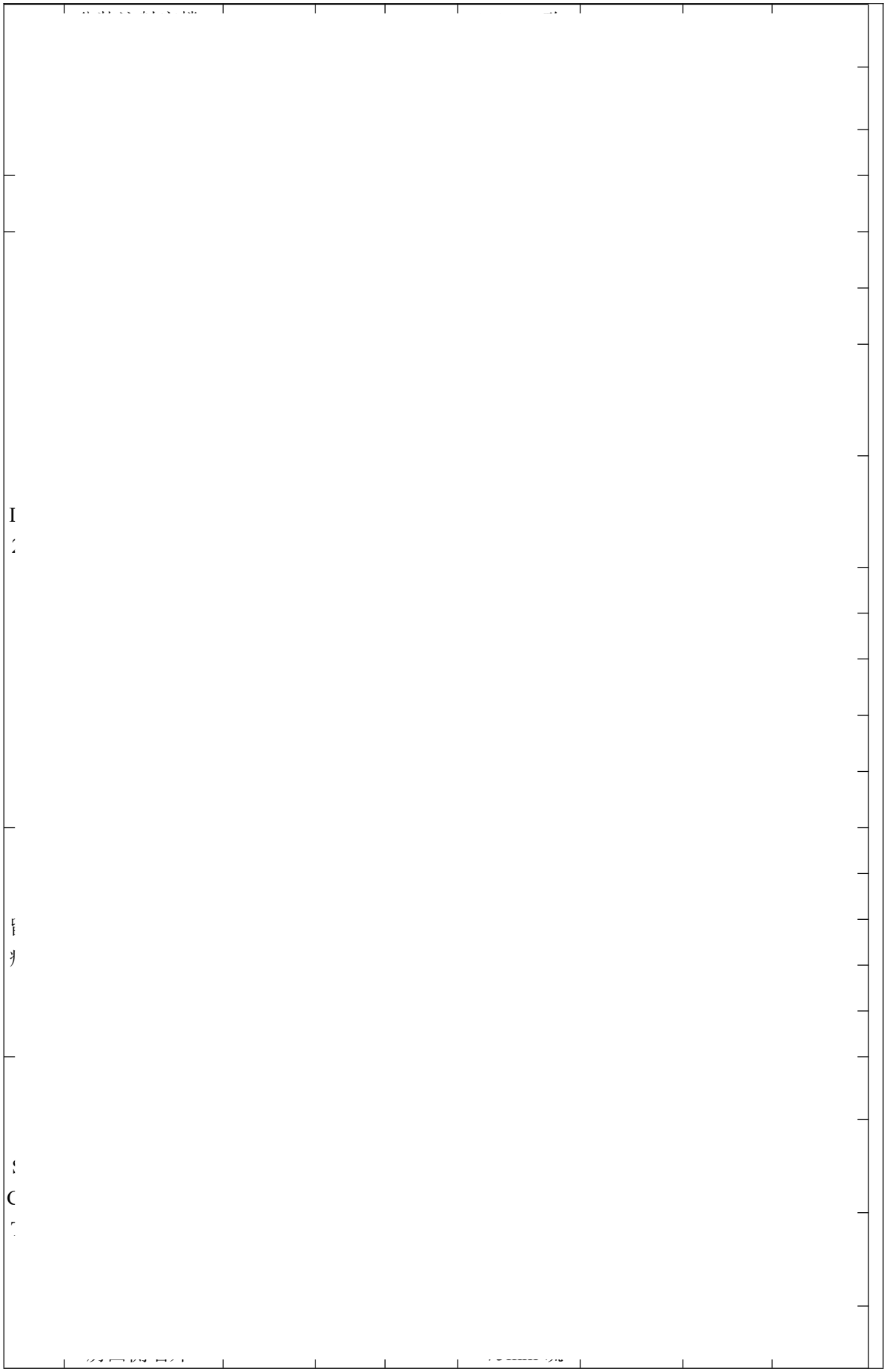
由前文表 11-5 可知，^{90}Y 在有机玻璃中的最大射程约为 0.941cm，在铅中的最大射程约为 0.098cm，在混凝土中的最大射程约为 0.472cm。本项目 ^{90}Y 核素治疗场所墙体混凝土厚度均不低于 110mm，铅屏蔽厚度均不低于 2mm，辐射工作人员不会直接接触放射性核素，在操作时会佩戴医用手套与使用专用防护用具，因此β射线对本项目放射工作人员的影响可以忽略。

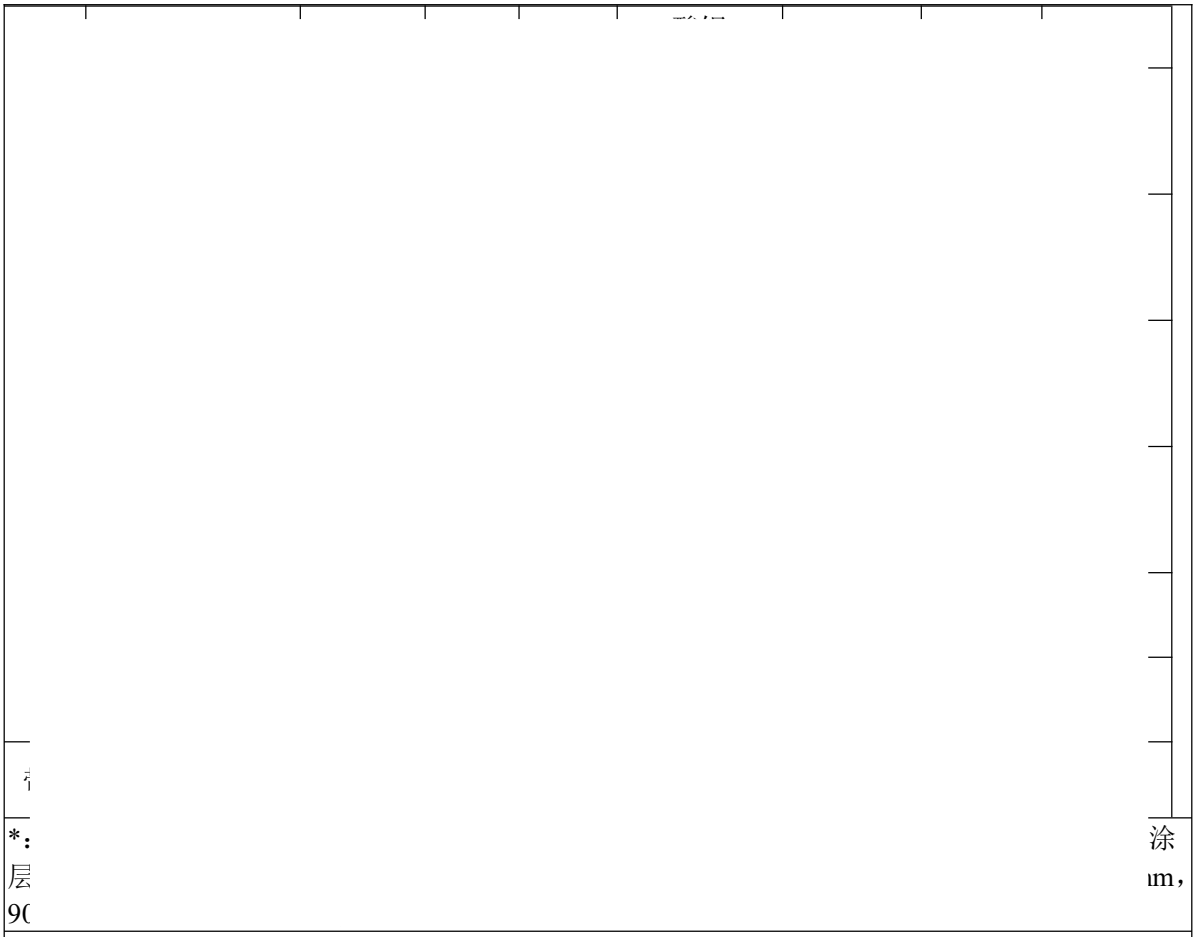
3.1.2 β射线所致轫致辐射辐射影响分析

根据 ^{90}Y 树脂微球治疗工艺流程可知，每剂 ^{90}Y 树脂微球使用西林瓶封装，并置于铅罐中进行运输，运至医院核医学中心核素显像区后，由核医学放射工作人员在手套箱内进行拆封、活度测定、分装，分装好的药物置于专用转运装置内运送至 DSA2 室进行介入注射 ^{90}Y 分装（注射器防护套，15mm 有机玻璃）、转运（V 型瓶防护+有机玻璃防护罐，18+15mm 有机玻璃）、注射（V 型瓶防护+传输系统防护，18+6mm 有机玻璃）全过程均采用有机玻璃对其β射线进行屏蔽。将相关参数带入公式（11-5），计算得到 ^{90}Y 韧致辐射对周围辐射环境影响见表 11-31。

表 11-31 屏蔽前 ^{90}Y 韧致辐射计算参数及结果一览表

参考点（^{90}Y）	A（Bq）	Z_e	E_b	屏蔽材料*	η	r（m）	$\dot{H}_r$ (μSv/h)





根据表 11-31 理论估算结果可知，在 ^{90}Y 树脂微球治疗工作开展过程中手套箱表面辐射工作人员分装工作位处剂量当量率为 0.174μSv/h；分装室、DSA 手术室、留观病房及 SPECT/CT 机房外表面 30cm 处剂量当量率最大为 0.372μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

根据理论估算结果可知，在穿戴铅衣情况下负责输注 ^{90}Y 树脂微球的医护人员有一定的外照射影响，在分装时手部剂量率为 268.3μSv/h，手术室进行输注时手部剂量率为 127.3μSv/h、身体处所受剂量率为 4.882μSv/h，建议医院为分装及输注人员配备铅防护手套，以降低其辐射影响。

3.2 ^{99m}Tc 放射性药物环境影响分析

本项目 ^{99m}Tc 放射性核素单人次使用量为 1~5mCi，^{99m}Tc-MAA 的注射在 DSA2 室内进行，在核医学中心核素显像区进行 SPECT/CT 扫描。因此主要估算 ^{99m}Tc-MAA 药物分装、在 DSA2 室内开展 ^{99m}Tc-MAA 注射工作、^{99m}Tc 药物转运及在 SPECT/CT 机房内扫描时的辐射影响。计算根据公式（11-2），计算结果见表 11-32。

表 11-32 ^{99m}Tc 工作场所各房间屏蔽体外关注点辐射剂量率计算结果

参考点（^{99m}Tc）	A（MBq）	X*	透射比	r（m）	结果（μSv/h）

度 度 弱

密 密 减

根据表 11-32 理论估算结果可知，在 DSA2 室进行 ^{99m}Tc 药物注射开展过程中 DSA2 室外表面 30cm 处剂量当量率最大为 0.020μSv/h，在分装注射室分装及 SPECT/CT 机房内扫描时，分装注射室及 SPECT/CT 机房外表面 30cm 处最大剂量当量率小于 0.001μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。在穿戴铅衣情况下负责输注 ^{99m}Tc 药物及负责指导摆位的医护人员有一定的外照射影响，手术室进行输注时手部剂量率为 529.2μSv/h、身体处所受剂量率为 7.085 μSv/h，SPECT/CT 机房内指导摆位时所受剂量率为 1.771μSv/h，建议医院为分装及输注人员配备铅防护手套，以降低其辐射影响。

3.3 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

本项目每天最多治疗 2 例病人，年最多治疗 100 例病人，核医学科辐射工作人员进行 ^{90}Y 树脂微球准备及转移至 V 瓶约 10min，^{99m}Tc 药物分装约 10min，则在核医学科 ^{90}Y 树脂微球分装及 ^{99m}Tc 药物分装等相关操作总时间均约为 16.67h；^{90}Y 树脂微球或 ^{99m}Tc 药物由核医学转运至手术室约 10min，年转运时间约为 16.67h；^{90}Y 树脂微球或 ^{99m}Tc 药物带药病人由介入科转移至核医学约 10min，年转移时间约为 16.67h；^{90}Y 树脂微球或 ^{99m}Tc 药物输注一个病人约 30min，则年输注时间约为 50h；单名 ^{90}Y 患者留观时间一般为 6h，则 2 人同时留观，年留观时间为 300h；^{90}Y 带药病人在 SPECT/CT 机房单人扫描时间约 20min，年扫描时间约为 33.33h。

根据预测的各参考点处辐射剂量率，结合工作时间，辐射工作人员和公众停留概率，根据公式（11-9）即可得到各参考点处公众及工作人员的年受照剂量，计算结果见表 11-33。

表 11-33　本项目辐射工作人员和周围保护目标年有效剂量

人员类别			H (μSv/h)	居留因子	时间 T（h）	关注点人员年有效剂量（mSv/a）		所在场所名称
核医学科辐射工作人员	^{90}Y 药物分装		0.174	1	16.67	**0.003**		分装注射室
	^{99m}Tc 药物分装		＜0.001	1	16.67	＜0.001		分装注射室
	^{90}Y 树脂微球转运		0.845	1	16.67	0.014	**0.014**	沿途
	^{99m}Tc 药物转运		＜0.001	1	16.67	＜0.001		沿途
DSA2 室内辐射工作人员	^{90}Y 树脂微球输注	手部	127.3	1	50	6.365	32.825	DSA2 室
	^{99m}Tc 药物输注		529.2	1	50	26.46		
	^{90}Y 树脂微球输注	身体	4.882	1	50	0.244	**0.598**	
	^{99m}Tc 药物输注		7.085	1	50	0.354		
DSA2 室外辐射工作人员	^{90}Y 树脂微球输注		0.054	1	50	0.003	0.003	控制室
	^{99m}Tc 药物输注		0.001	1	50	<0.001		
SPECT/CT 控制室辐射工作人员	^{90}Y 带药扫描		0.039	1	33.33	0.001	**0.002**	控制室
	^{99m}Tc 带药扫描		0.021	1	33.33	0.001		
核医学中心核素显像区周围公众	分装注射室北墙外		＜0.001	1/4	16.67	<0.001		动物影像实验室走廊
	分装注射室楼上		＜0.001	1/4	16.67	＜0.001		中央大厅
	分装注射室楼下		＜0.001	1/4	16.67	<0.001		停车场
	SPECT/CT 机房楼上		＜0.001	1/4	16.67	<0.001		中央大厅
	SPECT/CT 机房楼下		＜0.001	1/4	16.67	<0.001		停车场
^{90}Y 树脂微球转运周围公众			0.845	1/5	16.67	0.003	0.043	沿途
^{99m}Tc 药物转运周围公众			＜0.001	1/5	16.67	＜0.001		
^{90}Y 树脂微球带药病人转移周围公众			4.882	1/5	16.67	0.016		
^{99m}Tc 带药病人转移周围公众			7.085	1/5	16.67	0.024		
DSA2 室周围公众	DSA2 室南侧	^{90}Y 树脂微球输注	0.027	1/4	50	＜0.001	<0.001	洁净走廊
		^{99m}Tc 药物输注	0.001	1/4	50	＜0.001		

	DSA2 室西侧	^{90}Y 树脂微球输注	0.027	1/4	50	＜0.001	<0.001	设备间/洽谈室
		^{99m}Tc 药物输注	0.001	1/4	50	＜0.001		
	DSA2 室北侧	^{90}Y 树脂微球输注	0.027	1/4	50	＜0.001	<0.001	洁净走廊
		^{99m}Tc 药物输注	0.001	1/4	50	＜0.001		
	DSA2 室楼上	^{90}Y 树脂微球输注	0.016	1/4	50	<0.001	<0.001	仪器室/一次性物品间
		^{99m}Tc 药物输注	0.009	1/4	50	<0.001		
	DSA2 室楼下	^{90}Y 树脂微球输注	0.037	1/4	50	<0.001	<0.001	走廊、更衣室、置管室
		^{99m}Tc 药物输注	0.020	1/4	50	<0.001		
^{90}Y 留观病房周围公众	^{90}Y 留观病房东侧		0.345	1/16	300		0.006	空调机房
	^{90}Y 留观病房西侧		0.345	1/4	300		0.026	走廊
	^{90}Y 留观病房北侧		0.372	1/16	300		0.007	档案室
	^{90}Y 留观病房楼上		0.131	1/4	300		0.010	走廊/OR-1 室
	^{90}Y 留观病房楼下		0.303	1/4	300		0.023	乙肝治疗室/新风机房

根据表 11-33 可知，假设本项目分装、药物运输、SPECT/CT 扫描均由同一名核医学中心辐射工作人员完成，则该辐射工作人员受到的年有效剂量最大值为 0.019mSv/a；本项介入科辐射工作人员受到的年有效剂量最大值为 0.598mSv/a。

医院拟为本项目配备 5 名辐射工作人员，其中 2 人为核医学中心核素显像区原有辐射工作人员，3 人为 DSA 项目原有辐射工作人员。因此还需考虑与原有项目的叠加影响。

根据本报告第 2.4.1 章节，核医学中心核素显像区辐射工作人员所受年有效剂量约为 3.136mSv/a，再叠加上本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗时的年有效剂量 0.019mSv/a，则本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗核医学中心辐射工作人员所受年有效剂量约为 3.155mSv/a，能够满足本项目职业人员剂量约束值不大于 5mSv/a 的要求。

根据医院 2022 年 3 月~2023 年 3 月个人剂量检测报告可知，辐射工作人员所受最大年有效剂量约为 1.11mSv/a，再叠加上本项目介入科辐射工作人员所受最大年有

效剂量 0.598mSv/a 后，本项目介入科辐射工作人员所受最大年有效剂量约为 1.708mSv，能够满足本项目职业人员剂量约束值不大于 5mSv/a 的要求。

根据表 11-33 可知，公众的年有效剂量最大为 0.043mSv，能够满足本项目公众剂量约束值不超过 0.1mSv/a 的要求。

4 α、β放射性表面污染影响分析

本项目动物影像实验室项目、核医学中心核素显像区及核素治疗区项目、^{90}Y 树脂微球治疗项目会产生α、β表面沾污，α、β表面沾污的影响主要来源于液体放射性核素操作时打翻、漏洒造成地面、台面、设备仪器表面污染，对周围环境产生辐射影响。因此，为了使本项目非密封放射性物质工作场所的α、β表面污染水平达到 GB18871-2002 规定的要求，医院拟采取以下防护措施：

①使用、操作放射性物质的工作人员接受相关培训，具备相应的技能与防护知识；

②开瓶、标记、分装等易产生放射性物质逸出或飞散的操作，其操作在手套箱内进行；

③操作液体放射性物质在易去除污染的工作台上进行，并铺以吸水性好的材料；

④不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物件操作；

⑤严格划定好控制区和监督区，禁止无关人员随意进入控制区以及患者在留观病房外随意走动；

⑥放射性操作之后对工作台、设备、地面及个人防护用品等进行表面污染检测，如α、β表面污染水平超过 GB18871-2002 规定值，暂停开展相关业务，去污经监测符合标准后方可重新开展工作。同时辐射工作人员的手、皮肤、工作袜等出现污染情况需及时进行去污操作并暂停放射性物质操作，评估其受照剂量，并根据评估结果采取下一步措施，如调整工作或接受治疗等。

5 衰变池环境影响分析

5.1 核医学中心核素显像区衰变池环境影响分析

本项目计算核医学中心核素显像区衰变池对外环境的辐射影响时，因放射性核素 ^{18}F 及 ^{68}Ga 的辐射影响较大，本项目选取放射性核素 ^{18}F 及 ^{68}Ga 进行辐射影响分析。参照公式（11-2），从保守角度考虑，将衰变池内放射性废水的源强按照点源进行计算，其参考点处的辐射水平计算结果见表 11-34。

表 11-34 核医学中心核素显像区新建衰变池外辐射水平估算结果

序号	参考点位置	源强（mCi）	屏蔽材料及厚度	屏蔽距离（m）	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）

由表 11-34 估算结果可知，衰变池周围辐射剂量率最大为 2.138μSv/h，满足不大于 2.5μSv/h 的剂量约束值要求。

5.2 核医学中心核素治疗区衰变池环境影响分析

本项目计算核医学中心核素治疗区衰变池对外环境的辐射影响时，选取放射性核素 ^{117}Lu 及 ^{131}I 进行辐射影响分析。参照公式（11-2），从保守角度考虑，将衰变池内放射性废水的源强按照点源进行计算，其参考点处的辐射水平计算结果见表 11-35。

表 11-35 核医学中心核素治疗区衰变池外辐射水平估算结果

序号	参考点位置	源强（mCi）	屏蔽材料及厚度	屏蔽距离（m）	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）

由表 11-35 估算结果可知，衰变池周围辐射剂量率最大为 0.252μSv/h，满足不大于 2.5μSv/h 的剂量约束值要求。

6 放射性废水管道外环境影响分析

本项目核医学中心有两个衰变池，其中核素显像区产生的放射性废水排入新建衰变池，核素治疗区产生的放射性废水排入原有衰变池。核医学中心排水管道见附图 11 及附图 12，排水管道均采用地面板下敷设，并使用 4mm 铅皮包裹。本项目计算放射性废水管道对外环境的辐射影响时，核素显像区选取影响较大的 ^{18}F 核素，核素治疗区选取 ^{177}Lu 及 ^{131}I 核素。参照辐射防护导论 P78 公式（c）：其参考点处的辐射水平计算结果见表 11-36。

$$\dot{K}=\frac{2A\Gamma_K}{Lr}tg^{-1}\frac{L}{2r} \qquad ....（11\text{-}13）$$

式中：$\dot{K}$—比释动能率，$Gy\cdot s^{-1}$；

L—线源长度，m，本项目取 7m；

r—参考点至线源的垂直距离，m，本项目管道埋地深度约为取 0.5m，因此 r 值取 0.8m；

A—线源活度，Bq；

Γ_K—距源 1m 处的周围剂量当量率常数，单位为 $Gy\cdot m^2\cdot Bq^{-1}\cdot s^{-1}$；

表 11-36 核医学科放射性废水排放管道外辐射水平估算结果

核素	源强（Bq）	线源长度(m)	屏蔽材料及厚度	η	Γ_K ($Gy\cdot m^2\cdot Bq^{-1}\cdot s^{-1}$)	参考点至线源的距离（m）	参考点辐射水平（μSv/h）

1(
（
包

由表 11-36 可知，在本次预测条件下，本项目核医学中心放射性废水管道外周围辐射剂量率最大约为 1.734μSv/h，满足不大于 2.5μSv/h 的剂量约束值要求。

7 放射性“三废”影响分析

7.1 放射性废水影响分析

7.1.1 动物影像实验室项目放射性废水

本项目无放射性废水产生，动物实验过程中，发生泼洒等意外事故时，对于污染场所将采用干法去污，去污过程中产生的擦拭用吸水纸、酒精棉球作为放射性固

废处置；对于动物饲养笼具清洗，采用消毒水喷洒后，用吸水纸、干/湿纸巾进行擦拭清洗，擦拭后产生的带有放射性核素的吸水纸、干/湿纸巾作为放射性固废处置。

7.1.2 核医学中心核素显像区及核素治疗区放射性废水影响分析

医院于医疗综合楼南侧地下建有 1 座衰变系统，由 4 个小池串联，包含 1 个沉淀池和 3 个衰变池，3 个衰变池尺寸均为 5.0m（长）×4.6m（宽）×3.4m（高），有效容积均约为 60m^3，总有效容积约 180m^3。衰变池为槽式结构。衰变池四周墙体、底部采用四周池壁采用 300mm 混凝土、顶部采用 500mm 混凝土浇筑，池底和池壁坚固采用耐腐蚀、防渗漏措施。

该衰变池原为核医学中心核素显像区及核素治疗区共用衰变池，现医院计划于医疗综合楼南侧负一层地面新建一座放射性废水衰变间，衰变间内配备 1 套槽式放射性废水衰变系统，用于储存核医学中心核素显像区产生的放射性废水。该衰变系统由碳钢制作，并做防腐处理。拟建衰变间尺寸为 10.0m（长）×4.4m（宽）×3.9m（高），衰变间四周墙体及顶部屏蔽体均拟采用 8mmPb+1mm 铅当量硫酸钡板屏蔽，防护门拟采用 9mmPb 屏蔽。衰变间内设有 3 个衰变罐，衰变罐为槽式结构，衰变间外地下设有 2 个化粪池。3 个衰变罐尺寸均为 3.0m（长）×2.0m（宽）×2.0m（高），有效容积均约为 9m^3，总有效容积约 27m^3。医院拟对核医学中心核素显像区内的排水管道进行改动，改动后核医学中心核素显像区内的放射性排水均排至新建衰变池内，原衰变池单独由核医学中心核素治疗区使用。

本项目核医学中心核素显像区内产生的放射性废水均排入新建衰变池内。医院拟在衰变罐排放口设置废液取样测量系统，放射性废水在每次排放前，均拟对废水进行采样监测，以确保排放口废水放射性浓度满足总α≤1Bq/L、总 β≤10Bq/L 的要求，该医院放射性废水处置措施符合相关环保要求。医院将安排专人负责放射性废水的暂存和处理，并将建立废水暂存和处理台账，详细记录放射性废水所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间等信息。综上所述，本项目核医学中心核素显像区产生的放射性废水均可以得到有效处理，对周围环境影响较小。

7.1.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目放射性废水影响分析

患者在注入 ^{90}Y 树脂微球后，尿液中会有少量的 ^{90}Y 核素排出。本项目患者最大注射活度为 2.5×10^{9}Bq，留观时间最长为 6h，留观期间排泄 2 次，单次排泄量一般为 200~400mL，则单名留观患者住院留观期间总排泄量不超过 800mL。根据生态

环境部核与辐射安全中心出具的《钇-90 树脂微球使用过程辐射安全风险研究报告》“患者在接受 ^{90}Y 树脂微球核素治疗后，0~24h 每例患者尿液中 ^{90}Y 核素总活度最大为 $3.11\times10^{5}Bq$”。医院计划在留观病房内配备接尿袋，用于留观患者排泄接尿使用。尿液经酸化处理后，将尿袋口密封，然后同放射性固废统一转移至核医学中心核素显像区废物间 1 内贮存，贮存 45 天（17 个半衰期）后，活度浓度将低于 10Bq/L，作为普通医疗废水处理。

7.2 放射性废气影响分析

7.2.1 动物影像实验室项目放射性废气

为减少放射性气载废物对环境造成影响，本项目动物影像实验室场所安装有通风系统，主要由送风系统、回风（排风）系统及空调机组组成，动物影像实验室内设备排风和场所排风拟分开设置，设备排风及控制区内场所排风的排风口均由净化空调机房外西北侧接至屋面排放，场所排放口及设备排放口设置均高于本建筑屋顶。本项目动物影像实验室场所排风管道平面布置示意见附图 9。

本项目动物影像实验室内热室及注射后饲养间内的生物安全柜均拟设计单独的排风系统，设计风速不小于 0.5m/s，并在热室及生物安全柜的顶壁安装活性炭过滤装置。动物影像实验室内气压设计为清洁区气压>监督区气压>控制区气压，使气体由清洁区流向监督区，再流向控制区。本项目动物影像实验室内排风系统，排风机组布设在楼顶管道末端，运行时不断将场所内空气抽出，排风管道内压力相对于连通的房间、热室或生物安全柜为负压，可确保废气不会倒流入房间、热室或生物安全柜；各房间送、排风口均设置止回阀，确保废气不会由房间通过送风口排出，或由排风管道通过排风口排入房间。排风机组入口处设常闭电动阀并与机组同时启闭，确保不同管路废气不会发生串气，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。放射性废气由单独的管道延伸至楼顶排放。

医院应定期更换活性炭过滤装置，医院计划每半年更换一次，确保活性炭过滤装置的吸附效率，通风系统内更换下来的含放射性核素的废活性炭将作为放射性固体废物进行收集、处理。

在采取以上措施后，本项目排风设计能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中关于场所通风的相关要求。

7.2.2 核医学中心项目放射性废气

本项目核医学中心核素显像区分装注射室内设有 1 个 45mmPb 的手套箱和 1 个

10mmPb 的手套箱，分装和测试操作均在手套箱中进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s），风管道的排放口最终从核素治疗区病房 6 西北侧引致屋面排放，排放口设置高于本建筑屋顶。

核医学中心核素治疗区分装室内设置了 1 个 40mmPb 的手套箱，放射性核素的操作均在手套箱内进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s），能够有效减少放射性废气对工作人员的影响。手套箱及服药后患者主要活动区域设有独立排风系统，风管道的排放口最终从核素治疗区病房 6 西北侧引致屋面排放，排放口设置高于本建筑屋顶。

医院在手套箱管道内及屋顶排放口处设有活性炭过滤吸附装置，对放射性气溶胶进行吸附，降低放射性气溶胶外排浓度。医院每半年更换一次活性炭过滤装置，废活性炭过滤装置作为放射性固废处理。整个核医学中心工作场所均设有新风系统及独立的排风系统，保证工作场所内空气循环。

采取上述措施后，本项目的放射性废物处置方式能够满足当前环保管理的要求。

7.2.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目放射性废气

^{90}Y 树脂微球药品中，绝大多数 ^{90}Y 核素附着在“大孔型结构”的树脂微球表面和内部孔道内，以不溶性固体形式存在，极少量（0.04~0.4%）^{90}Y 核素以游离状态出现在液体中，游离的 ^{90}Y 核素以氯化钇（$^{90}YCl_3$）形式存在，氯化钇不具备挥发性，故不考虑放射性气体或气溶胶的辐射影响。

7.3 放射性固废影响分析

7.3.1 动物影像实验室项目放射性固废影响分析

本项目动物影像实验室内涉及放射性工作的场所均拟设置放射性废物收集桶，分别用于收集放射性物质操作过程中各场所产生的放射性固废。

（1）动物影像实验室控制区内各房间内均拟配备 1 个 5mm 铅当量放射性废物收集铅桶，铅桶内放置专用垃圾袋，用于收集放射性核素操作过程中各场所产生的放射性固体废物。放射性固废经分类收集后进行密封并在垃圾袋表面贴上标签（注明核素种类、存放日期等信息），送至动物尸体/废物间内暂存。本项目放射性固体废物本身沾染的放射性核素活度浓度很低，经过 5mmPb 的废物铅桶屏蔽后，废物铅桶表面 30cm 处的辐射剂量率能够满足标准要求。

（2）本项目动物实验产生的体内带有放射性核素的动物尸体、组织集中收集于

密封袋内，贴上标签（标明核素种类、存放日期等信息）后送至动物尸体/废物间的冰箱中衰变，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍，经监测辐射剂量率处于环境本底水平，α表面沾污小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 后，交由有资质单位处理。

（3）本项目动物影像实验室控制区地面每次拖洗产生的沾有放射性核素的干湿纸巾及动物饲养笼具清洗产生的带有放射性核素的吸水纸、干/湿纸巾等集中收集于专用塑料袋内，贴上标签（标明存放日期等信息）后暂存于动物尸体/废物间内，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍，经监测辐射剂量率处于环境本底水平、α表面沾污小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 后，作为医疗废物处理。

（4）核素标记实验室内产生的退役 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器将暂存于动物尸体/废物间内，由供货商定期上门回收。

（5）本项目动物影像实验室通风系统中置换下的含放射性核素的废活性炭集中收集于专用塑料袋内，贴上标签（标明存放日期等信息）后放置在动物尸体/废物间内，暂存时间超过核素最长半衰期 10 倍后，经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 后委托有资质的单位处理

（6）放射性固废在收集、临时贮存、处理过程中以及在管理过程中，公司应注意严格按照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中 7.2 条要求落实，确保放射性固废收集、临时贮存、处理及管理措施安全有效可行，避免放射性固废对工作人员和公众造成不必要的照射。

以上措施认真落实后，本项目放射性固废处置措施符合相关环保要求。

7.3.2 核医学中心项目放射性固废影响分析

本项目核医学中心项目在使用过程中产生的放射性固体废物为：各放射性核素操作过程中产生的如注射器、一次性手套、一次性纸杯、棉签、滤纸等带微量放射性核素的医疗固体废弃物，通风管道内更换下来的废活性炭，^{32}P 敷贴时产生的废弃的 ^{32}P 敷贴器等，平均每天排放量约 2.4kg，每月排放量约 50kg，排放年总量约 600kg。

核医学中心核素显像区内设有废物库 1，核素治疗区设有废物库 2，废物库 1 的

容积约为 20m^3，废物库 2 的容积约为 10m^3，医院拟将核医学中心内产生的放射性固体废物收集于各工作场所铅污物桶内（5mmPb）的专用塑料包装袋内，包装袋标明收贮时间、种类及数量等内容。核医学中心核素显像区内放射性废物收集后最终送至废物库 1 内暂存，核医学中心核素治疗区内放射性废物收集后最终送至废物库 2 内暂存。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的要求，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍、含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天，并经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理，在定期对满足储存时间要求的废物进行监测及清洁解控后，本项目废物间 1、废物间 2 的容量能够满足贮存要求。本项目放射性固体废物本身沾染的放射性核素活度浓度很低，经过 5mmPb 的废物铅桶屏蔽后，废物铅桶表面 30cm 处的辐射剂量率能够满足标准要求。

7.3.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目放射性固废影响分析

^{90}Y 树脂微球抽取过程中产生会产生转移用的一次性手套、注射器、含剩余药物的西林瓶等放射性固体废物约 200g/例，注射 ^{99m}Tc、^{90}Y 放射性药物会产生一次性手套、输液管、患者体内导管、V 瓶及有机玻璃防护罐等放射性固体废物合计约 450g。综上，开展一次 ^{90}Y 树脂微球介入治疗产生放射性固体废物约 0.65kg。^{90}Y 树脂微球介入治疗一年最多开展 100 次，则 ^{90}Y 树脂微球治疗项目每年产生的固体废物量约 65kg。

本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗产生的放射性固废统一收集于铅污物桶（5mmPb）内的专用塑料包装袋内，包装袋标明收贮时间、种类及数量等内容，最终送至核医学中心核素显像区废物库 1 内暂存，废物库 1 的容积约为 20m^3。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的要求，含 ^{99m}Tc 核素的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、含 ^{90}Y 核素的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍（26.7 天），并经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理，在定期对满足储存时间要求的废物进行监测及清洁解控后，本项目废物间 1 的容量能够满足贮存要求。本项目放射性固体废物本身沾染的放射性核素活度浓度很低，经过 5mmPb 的废物铅桶屏蔽后，废物铅桶表面 30cm 处的辐射剂量率能够满足标准要求。

8 非放射性“三废”影响分析

本项目产生的普通三废主要为动物影像实验室内的小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统、核医学中心 PET/CT 及 SPECT/CT 运行时产生的少量臭氧及氮氧化物。少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排出机房，弥散在大气环境中，对环境影响较小。

本项目辐射工作人员在工作过程中产生的生活污水拟排入城市污水管网，一般生活垃圾收集后将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

事故影响分析

1 主要辐射事故

动物影像实验室项目可能产生的辐射事故主要有：

（1）辐射工作人员误操作，导致放射性核素漏洒造成操作台面、地面或仪器设备等受到表面沾污；

（2）辐射工作人员未按要求穿戴个人防护用品或设置屏蔽措施等，造成不必要的附加照射剂量；

（3）由于保管或管理工作不到位导致放射性核素丢失或被盗，造成放射性事故，会对人员和环境造成危害；

（4）小动物 PET/SPECT/CT 正常工作时，人员误留、误入扫描机房，导致发生误照射；

（5）放射性固废、放射性废水未按要求处理，使排放超出规定的限值，可能对环境或人体造成一定的危害；

核医学中心项目可能产生的辐射事故主要有：

（1）辐射工作人员违反操作规程或误操作，造成意外照射和辐射污染；

（2）由于保管或管理工作不到位导致放射性药物丢失、被盗等情况对公众造成的外照射；

（3）注射器排气时挤出放射性药物、注射器有损漏以及注射针头没有装牢固，导致放射性药物漏洒；

（4）用药后病人脱离控制区，导致公众遭受较大外照射；

（5）排风管道故障导致人员吸入挥发性放射性药物引起内照射。

^{90}Y 树脂微球治疗项目可能产生的辐射事故主要有：

（1）操作人员违反操作规程或误操作导致操作台面、地面或仪器设备受到表面沾污；

（2）辐射工作人员未按要求穿戴个人防护用品等，造成额外附加照射剂量；

（3）放射性药物被盗、丢失等；

（4）用药后病人未经允许脱离控制区，尤其是在用药初期离开候诊室或病房，可能对接近患者的人员造成额外照射；

（5）治疗期间人员误入核医学科及介入科控制区内受到误照射；

（6）SPECT/CT 和 DSA 设备控制系统出现故障，照射不能停止，患者受到的计划外照射。

2 辐射事故处置方法及预防措施

（1）建立辐射安全管理机构，制定完善的规章制度，并在实际工作过程中严格执行。

（2）加强辐射安全管理，加强辐射工作人员技能培训和辐射安全与防护知识的培训，提高个人的技能和辐射安全防范意识。

（3）定期检查各辐射工作场所的辐射安全措施运行情况，确保各项安全措施始终保持良好的工作状态。

（4）发生误照射，应立即切断电源，确保射线装置停止工作。

（5）制定放射性药物安全管理制度，在日常工作中，设置专人负责放射性药物的管理，做好日常检查，防止放射性药物丢失、被盗。如发现放射性药物丢失、被盗，应立即启动本单位辐射事故应急措施，及时向管理部门报告。

（6）发生非密封放射性物质污染，封闭工作场所，控制人员走动，以避免放射性污染扩散，并进行场所和人员的去污。

（7）发生辐射事故立即向单位领导汇报，并控制现场区域，防止无关人员进入。

（8）对可能受到大剂量照射的人员，应及时送医院检查和治疗。

（9）加强放射性废物的管理，对放射性废物制定放射性三废的处理制度，设置放射性废物管理员，对放射性废物单独收集，按照国家规定处理，并做好相应的记录。

医院应依据《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》及《江苏省辐射污染防治条例》的要求完善辐射事故应急预案，明确建立应急机构和人员职责分工，应急人员的组织、培训以及应急，辐射事故分类与应急响应的措施。并在今后工作中定期组织应急人员进行应急演练。

发生辐射事故时，应立即启动本单位的事故应急方案，采取必要防范措施，在

1 小时内向所在地生态环境部门和公安部门报告，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，造成或者可能造成人员超剂量照射的，同时向卫生健康部门报告。事故发生后医院应积极配合生态环境部门、公安部门及卫生健康部门调查事故原因，并做好后续工作。

表 12 辐射安全管理

辐射安全与环境保护管理机构的设置

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，使用放射性同位素和射线装置的单位，应设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作，并以文件形式明确管理人员职责。从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。

南京同仁医院有限公司按规定已成立专门的辐射安全管理小组，并设立了辐射防护负责人。医院以文件形式明确了管理人员职责作，同时也明确规定了辐射安全管理小组的职责。本项目动物影像试验室拟配备 2 名辐射工作人员，2 名辐射工作人员均为新增人员；核医学中心配备 8 名辐射工作人员，8 名辐射工作人员均为核医学科现有辐射工作人员；^{90}Y 树脂微球治疗项目拟配备 5 名辐射工作人员，其中 3 人为介入科现有辐射工作人员，2 人为核医学中心现有辐射工作人员。现有辐射工作人员其均已参加并通过了辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训，辐射工作人员熟悉专业技术，而且对安全防护与相关法规知识也有所了解，实际操作中能够按照操作规程行事，自觉遵守规章制度，努力做好各项安全工作；新增 2 名辐射工作人员应参加并通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台的线上考核后方可上岗。医院应根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》的要求，辐射工作人员辐射安全培训证书到期前，应安排其通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台报名学习辐射安全和防护专业知识，在其通过考核后方能再次开展辐射工作。

辐射安全管理规章制度

南京同仁医院有限公司已根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》中的有关要求，建立了一系列的辐射安全管理制度，主要包括操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案、事故应急制度等，医院还应针对本项目对其进行补充和完善，使其具有较强的针对性和可操作性。本报告对各项管理制度制定要点提出如下建议：

辐射防护和安全保卫制度：根据射线装置及放射性药物操作的具体情况制定相应的辐射防护和安全保卫制度。重点是：①定期检查相关的辐射安全装置及检测仪器，发现问题及时修理或更换，确保辐射安全装置、个人剂量报警仪、环境辐射剂量监测

仪和表面沾污仪保持良好工作状态；②辐射工作人员定期开展个人剂量检测和职业健康监护。

操作规程：制定动物影像试验室操作规程、SPECT/CT 放射诊断操作规程、PET/CT 放射诊断操作规程、心脏 ECT 放射诊断操作规程、DSA 操作规程等，明确辐射工作人员的资质条件要求、操作过程中采取的具体防护措施及步骤。重点是：①提高辐射工作人员对放射性药物操作的熟练程度，尽量减少辐射工作人员与放射性药物的近距离接触时间；②确保开展辐射工作时所有辐射屏蔽措施均已到位，严格按照规定操作流程操作，防止发生辐射事故；③从事辐射工作时必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪；④在非密封开放性工作场所严禁吸烟、进食；⑤放射性“三废”的处理需严格按照操作规程执行。

设备维修制度：明确辐射安全与防护设施以及辐射监测设备维修计划、维修的记录和在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施，确保辐射安全与防护设施以及剂量报警仪等仪器设备保持良好工作状态。

放射性同位素、射线装置使用登记制度：针对本项目放射性药物及射线装置，制定使用登记制度，规范放射性药物及射线装置台帐和使用登记记录，对购入的放射性药物及射线装置的使用情况进行登记和跟踪记录。

岗位职责：明确管理人员、辐射工作人员、维修人员的岗位责任，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任，并层层落实。

人员培训计划：明确培训对象、内容、周期、方式以及考核的办法等内容，并强调对培训档案的管理，做到有据可查。

监测方案：明确监测频次和监测项目，主要包括个人剂量监测和工作场所监测，其中工作场所监测方式由企业自主监测与有资质单位开展的年度监测，监测结果妥善保存，定期上报环境保护行政主管部门。此外，根据 18 号令，使用射线装置的单位，应当对本单位的射线装置的安全和防护状态进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前提交上一年度的评估报告。

事故应急预案：针对本项目可能产生的辐射事故完善辐射事故应急预案或应急措施，预案或措施中要明确应急机构和职责分工、应急人员的组织、培训、事故报告制度、辐射防护措施及事故处理程序等。当发生辐射事故时，医院应当立即启动辐射事故应急方案，采取有效的事故处理措施，防止事故恶化，并在 1 小时内向当地生态环境部门和公安部门报告，造成或可能造成人员超剂量照射时，还应同时报告当地卫生

健康部门。

综上所述，医院在落实上述制度后，能够确保本项目满足国家相关的管理及技术层面要求。

辐射监测

1 监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，使用非密封放射性物质和II类射线装置的单位应配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。

医院核医学中心目前共配有 1 台 BH3103H 型环境辐射巡测仪，8 台 BG2010-B 型个人剂量报警仪及 2 台 PM 型表面沾污仪；介入科共配有 3 台个人剂量报警仪；医院还拟为动物影像实验室项目配备 1 台环境辐射巡测仪、3 台个人剂量报警仪及 1 台表面沾污仪。医院的仪器配备能满足审管部门的相关要求。

2 监测方案

医院已定期（1 次/年）请有资质的单位对已有辐射工作场所周围的辐射水平进行监测，根据医院 2022 年度检测报告（见附件 6）可知，医院各辐射工作场所周围的辐射水平无异常；医院已定期对已有辐射工作场所及周围的辐射水平进行监测，并做相关记录。

医院已委托有资质的单位对已有辐射工作人员进行个人剂量监测，定期（每 3 个月/次）送有资质部门进行个人剂量测量，并建立了个人剂量档案，根据公司 2022 年 3 月~2023 年 3 月个人剂量检测报告（见附件 7）可知，医院已有辐射工作人员个人剂量均未见异常。同时医院已定期安排已有辐射工作人员进行职业健康体检，并建立职业健康档案。医院每年对辐射安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前在全国核技术利用辐射安全申报系统提交上一年度的评估报告。

医院还应根据辐射管理要求，针对本项目完善已有监测方案：

（1）医院应委托有资质的单位定期对本项目各辐射工作场所周围的辐射水平进行监测，周期为 1 次/年。监测结果连同单位的年度辐射安全评估报告一起，在次年的 1 月 31 日前，在全国核技术利用辐射安全申报系统提交；

（2）医院应定期对本项目辐射工作场所及周围的辐射水平进行监测，每年 1～2 次，并对监测结果进行记录。

（3）本项目新增辐射工作人员均应佩戴个人剂量计，并定期（一般为 1 个月，

最长不得超过 3 个月）送有资质部门进行监测，建立个人累积剂量档案。

（4）医院应定期组织本项目新增辐辐射工作人员进行职业健康体检（体检周期不超过 2 年），并建立职业健康监护档案。

公司本项目辐射工作场所监测计划一览表见表 12-1。

表 12-1 工作场所监测计划一览表

监测对象	监测项目	监测点	监测周期	监测方式
动物影像实验室	α、β表面沾污	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁、地面、辐射工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等	每次工作结束/出现放射性物质污染时	自主监测 α、β表面沾污仪
			1 次/年	委托有资质单位监测
	X-γ辐射剂量率	控制区防护墙外、控制区房间顶棚区域、控制区房间下方人员可达处、防护门缝隙和中央、操作位、热室表面	不超过 3 个月/次	自主监测 便携式辐射剂量率仪
			1 次/年	委托有资质单位监测
核医学中心场所	α、β表面沾污	手套箱表面、墙壁、地面、辐射工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等	每次工作结束/出现放射性物质污染时	自主监测 α、β表面沾污仪
			1 次/年	委托有资质单位监测
	X-γ辐射剂量率	控制区防护墙外、控制区房间顶棚区域、控制区房间下方人员可达处、防护门缝隙和中央、操作位、手套箱表面	不超过 3 个月/次	自主监测 便携式辐射剂量率仪
			1 次/年	委托有资质单位监测
DSA2 室	β表面沾污	DSA2 室墙壁、地面、手术床表面、辐射工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等	每次工作结束/出现放射性物质污染时	自主监测 α、β表面沾污仪
			1 次/年	委托有资质单位监测
	X-γ辐射剂量率	DSA 机房四周、顶部及底部墙体外、防护门缝隙和中央、操作位、通风口外、电缆口外	不超过 3 个月/次	自主监测 便携式辐射剂量率仪
			1 次/年	委托有资质单位监测

落实以上措施后，医院新建放射诊疗项目的管理措施能够满足辐射安全的要求。

辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》中关于应急报告与处理的相关要求，南京同仁医院有限公司已制定《辐射事故应急预案》，该方案明确了以下内容：明确了辐射应急领导小组的组织机构、组成人员和职责；明确了辐射事故应急处理程序；明确了辐射事故应急演习内容、24 小时辐射事故应急联系电话等内容，加强了门机联锁故障和检维修过程中事故情况的预防，医院应在今后工作中严格落实《辐射事故应急预案》制度，并根据实际工作情况进行修订完善。

发生辐射事故时，医院应立即启动本单位的事故应急方案，采取必要防范措施，在事故发生后 1 小时内向所在地环境保护和公安部门报告，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，造成或者可能造成人员超剂量照射的，同时向卫生健康部门报告。事故发生后医院应积极配合生态环境部门、公安部门及卫生健康部门调查事故原因，并做好后续工作。

表 13 结论与建议

结论

1 辐射安全与防护分析结论

1.1 项目位置

南京同仁医院有限公司位于南京市江宁经济开发区吉印大道 2007 号，医院东侧依次为长亭街及彩云居（居民区），南侧为吉印大道，西侧为停车场及空地，西北侧依次为空地及康博花园（居民区），康博花园（居民区）。本项目动物影像实验室拟建于核医学中心核素显像区外北侧，核医学中心位于医院医疗综合楼负一层西南角，^{90}Y 树脂微球治疗项目利用医院门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室开展，^{90}Y 的贮存、质控、分装与扫描依托于医疗综合楼负一层核医学中心核素显像区 SPECT/CT 工作场所。根据现场勘查，本次评价项目所在区域 50m 范围内均无居民区、学校等敏感点，本项目保护目标主要为辐射工作人员及辐射工作场所拟建址周围评价范围内的医务人员、患者及患者家属。

1.2 项目分区及布局

1.2.1 动物影像实验室项目

本项目拟将动物影像实验室的核素标记实验室、理化试验室、QC 室、生物操作间、小动物 PET 机房、注射后饲养间、动物尸体/废物间划为控制区，在入口处粘贴电离辐射警告标志，禁止无关人员进入；将物料间、卫生通过间、洁净走廊、缓冲间（共 3 间）、检测/去污间、二更、一更、研发实验室走廊、控制室、细胞实验室、更衣间、注射前饲养间等区域划为监督区，禁止任何无关人员进入，动物影像实验室能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.4 款中有关辐射工作场所的分区规定。

1.2.2 核医学中心项目

1.2.2.1 核医学中心核素显像区分区

医院拟将核医学中心核素显像区的分装注射室、废物库 1、源库、32P 敷贴室、患者走廊、SPECT/CT 候诊室 1、污洗间、SPECT/CT 候诊室 2、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/CT 候诊室 1、PET/CT 候诊室 2、心脏 ECT 候诊室、心脏 ECT 机房、诊后留观室等区域划为控制区，控制区采用实体屏蔽，除辐射工作人员及用药后病人外的无关人等不得进入；医院拟将缓冲间、淋浴间、卫生通过间、控制室、操作间、设备间、预留 PET/MR 机房等区域划为监督区，无

关人等不得进入，本项目核医学中心核素显像区分区符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.4 款中有关辐射工作场所的分区规定。

1.2.2.2 核医学中心核素治疗区分区

医院拟将核医学中心核素治疗区的病房 1~病房 6、患者走廊、甲亢留观室、甲亢服碘室、分装室、源库、废物库 2、配餐间、治疗室、污洗间、污染被服间、抢救室等区域划为控制区，控制区采用实体屏蔽，除辐射工作人员及用药后病人外的无关人等不得进入；医院拟将卫生通过间、更衣室、卫生间、清洁被服间、配液/配药室、库房、医护走廊等区域划为监督区，无关人等不得进入，本项目核医学中心核素显像区分区符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.4 款中有关辐射工作场所的分区规定。

1.2.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

本项目利用医院门诊楼三楼介入放射科 DSA2 室开展 ^{90}Y 树脂微球治疗项目，对核医学中心显像区分区见表 10-2，对放射科 DSA2 室，医院拟将 DSA2 室的机房、患者专用留观病房作为辐射防护控制区，严格控制人员进出，在机房、病房入口处设置有“当心电离辐射”警告标志，在机房门上方设置有工作状态指示灯，防止无关人员逗留和误入；拟将控制间、设备间及洽谈室作为辐射防护监督区。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定要求。

1.3 辐射安全措施

1.3.1 动物影像实验室项目

动物影像实验室辐射工作人员出入口及物流出入口拟设置门禁系统；动物影像实验室内小动物 PET 机房门上、核素标记实验室门上、QC 室门上、生物操作间门上、注射后饲养间门上、动物尸体/废物间门上等明显位置处粘贴电离辐射警告标志及中文警示说明；热室表面、放射性废物桶表面等拟按要求设置有放射性标识和中文警示说明；动物影像实验室工作人员出入口及物流出入口处、核素标记实验室、QC 室、生物操作间、注射前动物饲养室、注射后动物饲养室、动物尸体/废物间内均拟安装视频监控探头；小动物 PET 机房拟设置观察窗，同时拟设置视频监控探头；动物影像实验室的动物尸体/废物间拟设置双人双锁管理，确保放射性废物的安全；小动物 PET 机房入口防护门上方拟设置工作状态指示灯，灯箱上设置“射线有害、灯亮勿入”的警示语句，工作状态指示

灯与防护门拟设置门灯联锁装置；小动物 PET 机房及控制室内均拟设置紧急停机按钮，并在醒目处设置标签，标明使用方法；严禁辐射工作人员在控制区内进食、饮水、吸烟、化妆，严禁进行无关工作及存放无关物件，防止含有微量放射性核素的空气被辐射工作人员吸入体内造成内照射；所有放射性药物的标记、分装均在热室内进行，辐射工作人员进入控制区均穿戴工作服、一次性手套、工作鞋，佩戴过滤式口罩，近距离接触放射性核素或给药后动物时还将穿戴铅衣等个人防护用品，并尽可能熟练操作技能、缩短操作时间；实验室控制区内墙面、地面均拟采用易于去污的材料或涂料，并平整光滑；地面与墙面交接做成圆角，且有一定的坡度朝向地漏（如设置地漏）；放射性核素操作设备的表面、工作台台面等平整光滑，室内地面与墙壁衔接处无接缝，易于清洗、去污；检测/去污间配备 1 台α-β表面沾污仪，辐射工作人员操作放射性核素后离开核素标记实验室前进行表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施；从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区；配备至少 2 套 0.5mmPb 防护铅衣、铅帽、铅眼镜、2 块 10mmPb L 防护屏及 2 块 1cm 有机玻璃 L 防护屏等防护用品。

1.3.2 核医学中心项目

医院在核医学中心核素显像区的控制区出入口、分装注射室、废物库 1、源库、^{32}P 敷贴室、SPECT/CT 候诊室 1、SPECT/CT 候诊室 2、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/CT 候诊室 1、PET/CT 候诊室 2、心脏 ECT 候诊室、心脏 ECT 机房、诊后留观室等场所外明显位置粘贴符合 GB18871-2002 规范的电离辐射警告标志；在核素治疗区的控制区出入口、病房 1~病房 6、患者走廊、甲亢留观室、甲亢服碘室、分装室、源库、废物库 2、配餐间、治疗室、配液室、污洗间、污染被服间、抢救室等场所外明显位置粘贴符合 GB18871-2002 规范的电离辐射警告标志，用于提醒无关人员不要靠近和逗留；医院在 SPECT/CT 及 PET/CT 机房门口设有工作状态指示灯，拟在心脏 ECT 机房门口设有工作状态指示灯；SPECT/CT 及 PET/CT 机房防护门安装有闭门装置，医院还拟将心脏 ECT 机房防护门安装闭门装置；医院在核医学中心核素显像区及核素治疗区控制区病患入口及病患出口处设有带门禁系统的单向门，实现“入口只进不出，出口只出不进”的单向路线；医院在医院在核医学中心核素显像区及核素治疗区的控制区内安装有监控及对讲设备；核医学科工作场所内不得安排与放射性无关的工作；本项目

所有放射性药物的操作均在核医学中心核素显像区分装注射室的手套箱及核素治疗区分装室的手套箱内进行；在核医学中心核素显像区及核素治疗区的控制区和监督区内不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物件；辐射工作人员操作后离开工作室前洗手和进行表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施；从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区；使用操作均在指定的工作台或搪瓷盘内进行，操作人员均配戴个人防护用品，避免皮肤直接接触放射性物质；核医学中心核素显像区及核素治疗区的门窗及内部结构简单，墙面、地面均采用易于去污的材料或涂料，并平整光滑；地面与墙面交接处为圆角，且有一定的坡度朝向地漏；医院为 SPECT/CT 及心脏 ECT 辐射工作人员配备铅当量不小于 0.5mm 的铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖、铅橡胶帽、铅玻璃眼镜；为 PET/CT 和核素治疗辐射工作人员配备放射性污染防护服；医院为核医学中心配有应急及去污用品。

1.3.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

拟将放射科 DSA2 室、患者专用留观病房作为辐射防护控制区，在机房、病房入口处设置有“当心电离辐射”警告标志；DSA2 室门口拟设置工作状态指示灯，且工作状态指示灯与机房相通的门设置联锁装置；DSA2 室控制室、机房内的治疗床边操作面板均设置有急停按钮；辐射工作人员离开 DSA2 室前做表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，应采取去污措施；在 DSA2 室内使用 ^{90}Y 治疗前，拟在 DSA 设备及治疗床周边地面铺设防水布；控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区；医院拟在 ^{90}Y 树脂微球输注场所（DSA2 室）内配备应急及去污用品；医院已为本项目辐射工作人员配备个人剂量计，定期送检且需做好个人剂量档案管理工作；在患者身体肝脏部位穿戴 0.25mm 铅当量的铅橡胶围裙，必要时为转移病床设置铅屏风；移动患者时应尽量避开人员较为集中的时段，快速、平稳地将患者送至专用留观病房；^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房门口设置电离辐射警告标志，警示周围人群远离专用病房；提醒患者家属注意与患者保持距离，尽量减少与患者近距离接触的时间；医护人员查房，家属成员如需长时间陪护应与患者保持 1m 以上的距离；在专用留观病房所在楼层值班的护士严密注意患者动向，尽量避免患者在病房外停留；严禁无关人等进入病房。

在落实以上辐射安全措施后，本项目的辐射安全措施能够满足辐射安全要求。

1.3.4 监测设备

南京同仁医院有限公司核医学中心目前共配有 1 台 BH3103H 型环境辐射巡测仪，8 台 BG2010-B 型个人剂量报警仪及 2 台 PM 型表面沾污仪；介入科共配有 3 台个人剂量报警仪；医院还拟为动物影像实验室项目配备 1 台环境辐射巡测仪、3 台个人剂量报警仪及 1 台表面沾污仪。医院的仪器配备能满足审管部门的相关要求。

1.4 辐射安全管理

医院已按要求成立专门的辐射安全与环境保护管理机构，并以文件形式明确管理人员职责。本项目动物影像试验室拟配备 2 名辐射工作人员，2 名辐射工作人员均为新增人员；核医学中心配备 8 名辐射工作人员，8 名辐射工作人员均为核医学科现有辐射工作人员；^{90}Y 树脂微球治疗项目拟配备 5 名辐射工作人员，其中 3 人为介入科现有辐射工作人员，2 人为核医学中心现有辐射工作人员。现有辐射工作人员其均已参加并通过了辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训；新增 2 名辐射工作人员应参加并通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台的线上考核后方可上岗。

医院已根据相关法律条例制定辐射安全管理制度，主要包括操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案、事故应急制度等。医院计划针对本项目对现有辐射安全管理制度进行补充和完善，使其具有较强的针对性和可操作性。

医院拟定期（不少于 1 次/年）请有资质的单位对本项目各辐射工作场所和周围环境的辐射水平进行监测；医院已委托有资质单位定期（每 3 个月/次）对现有辐射工作人员开展个人剂量检测，并拟组织其进行职业健康体检，按相关要求建立了辐射工作人员个人剂量监测档案和职业健康监护档案，医院还应对本项目新增辐射工作人员定期（每 3 个月/次）开展个人剂量检测，并拟组织其进行职业健康体检，按相关要求建立辐射工作人员个人剂量监测档案和职业健康监护档案。医院还应注意关注辐射工作人员每一次的累积剂量监测结果，发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查；同时应建立并终生保存个人剂量监测档案，以备辐射工作人员查看和管理部门检查。此外辐射工作人员两次职业健康检查的时间间隔不应超过 2 年，必要时可增加临时性检查。

2 环境影响分析结论

2.1 辐射防护影响预测

根据理论预测可知，本项目动物影像实验室合成/分装热室表面 30cm 处人员操作位的辐射剂量率最大为 0.366μSv/h，非正对人员操作位表面的辐射剂量率最大为 0.775μSv/h，注射、解剖人员操作位处辐射剂量率最大为 0.782μSv/h，动物影像实验室控制区内房间四周墙体、观察窗、防护门、顶部、底部外表面 30cm 处辐射剂量率最大为 0.824μSv/h，满足合成/分装热室外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求，核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h 的要求。

根据理论预测可知，本项目核医学中心核素显像区内手套箱外表面 30cm 处的最大剂量当量率约为 0.985μSv/h，核素显像区控制区内各房间防护门、观察窗、墙体外表面 30cm 处人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处最大剂量当量率约为 1.797μSv/h；核素治疗区控制区内房间四周墙体、观察窗、防护门、顶部、底部外表面 30cm 处辐射剂量率最大为 1.766μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“手套箱外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h，距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求。

本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗工作开展过程中手套箱表面辐射工作人员分装工作位处剂量当量率为 0.251μSv/h；分装室、DSA 手术室、留观病房及 SPECT/CT 机房外表面 30cm 处剂量当量率最大为 0.372μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.2 保护目标剂量

2.2.1 动物影像实验室项目

本项目动物影像实验室辐射工作人员和公众年有效剂量最大分别为 1.009mSv 和 0.045mSv，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目剂量约束值要求（辐射工作人员不超过 5mSv/a，公众不超过 0.1mSv/a）。

2.2.2 核医学中心项目

根据理论预测可知，核医学中心核素显像区辐射工作人员所受最大年有效剂量约为3.136mSv，核素治疗区辐射工作人员所受最大年有效剂量约为1.272mSv，核医学中心周围公众所受最大年有效剂量约为0.089mSv，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目剂量约束值要求（辐射工作人员不超过5mSv/a，公众不超过0.1mSv/a）。

2.2.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

根据分析预测，本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗核医学中心辐射工作人员所受年有效剂量约为3.155mSv/a，介入科辐射工作人员所受最大年有效剂量约为1.708mSv，公众的年有效剂量最大为0.043mSv，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目剂量约束值要求（辐射工作人员不超过5mSv/a，公众不超过0.1mSv/a）。

2.3 放射性“三废”处理处置

2.3.1 放射性废水处理措施

2.3.1.1 动物影像实验室项目

本项目无放射性废水产生。

2.3.1.2 核医学中心项目

医院于医疗综合楼南侧地下建有1座衰变系统，该衰变池原为核医学中心核素显像区及核素治疗区共用衰变池，现医院计划于医疗综合楼南侧负一层地面新建一座放射性废水衰变间，医院拟对核医学中心核素显像区内的排水管道进行改动，改动后核医学中心核素显像区内的放射性排水均排至新建衰变池内，原衰变池单独由核医学中心核素治疗区使用。

本项目投入运行后，核医学中心核素显像区内产生的放射性废水通过埋地的专用管道排入新建衰变间的衰变罐内，核素治疗区内产生的放射性废水通过埋地的专用管道排入原有衰变池内，每次排放前确保新建衰变池内的放射性废水已至少衰变30天，原有衰变池内的放射性废水已至少衰变180天，并取样监测，监测结果满足总α不大于1Bq/L、总β不大于10Bq/L、^{131}I 的放射性活度浓度不大于10Bq/L 的要求，监测结果经审管部门认可后，方可排放至医院的污水处理系统，作为医疗废水进行处理，满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中有关放射性废水处理的要

求，对周围环境辐射影响很小。

2.3.1.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

患者在注入 ^{90}Y 树脂微球后，尿液中会有少量的 ^{90}Y 核素排出。根据生态环境部核与辐射安全中心出具的《钇-90 树脂微球使用过程辐射安全风险研究报告》“患者在接受 ^{90}Y 树脂微球核素治疗后，0~24h 每例患者尿液中 ^{90}Y 核素总活度最大为 3.11×10^{5}Bq”。医院计划在留观病房内配备接尿袋，用于留观患者排泄接尿使用。尿液经酸化处理后，将尿袋口密封，然后同放射性固废统一转移至核医学中心核素显像区废物间 1 内贮存，贮存 45 天（17 个半衰期）后，活度浓度将低于 10Bq/L，作为普通医疗废水处理。

2.3.2 放射性废气处理措施

2.3.2.1 动物影像实验室项目

本项目动物影像实验室场所安装有通风系统，主要由送风系统、回风（排风）系统及空调机组组成，动物影像实验室内设备排风和场所排风拟分开设置，设备排风及控制区内场所排风的排风口均由净化空调机房外西北侧接至屋面排放，场所排放口及设备排放口设置均高于本建筑屋顶。

本项目动物影像实验室内热室及注射后饲养间内的生物安全柜均拟设计单独的排风系统，设计风速不小于 0.5m/s，并在热室及生物安全柜的顶壁安装活性炭过滤装置。动物影像实验室内气压设计为清洁区气压>监督区气压>控制区气压，使气体由清洁区流向监督区，再流向控制区。本项目动物影像实验室内排风系统，排风机组布设在楼顶管道末端，运行时不断将场所内空气抽出，排风管道内压力相对于连通的房间、热室或生物安全柜为负压，可确保废气不会倒流入房间、热室或生物安全柜；各房间送、排风口均设置止回阀，确保废气不会由房间通过送风口排出，或由排风管道通过排风口排入房间。排风机组入口处设常闭电动阀并与机组同时启闭，确保不同管路废气不会发生串气，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。放射性废气由单独的管道延伸至楼顶排放。

医院应定期更换活性炭过滤装置，医院计划每半年更换一次，确保活性炭过滤装置的吸附效率，通风系统内更换下来的含放射性核素的废活性炭将作为放射性固体废物进行收集、处理。

在采取以上措施后，本项目排风设计能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中关于场所通风的相关要

求。

2.3.2.2 核医学中心项目

本项目核医学中心核素显像区分装注射室内设有 2 个手套箱，分装和测试操作均在手套箱中进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s），风管道的排放口最终从核素治疗区病房 6 西北侧引致屋面排放，排放口设置高于本建筑屋顶。

核医学中心核素治疗区分装室内设置了 1 个手套箱，放射性核素的操作均在手套箱内进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s），能够有效减少放射性废气对工作人员的影响。手套箱及服药后患者主要活动区域设有独立排风系统，风管道的排放口最终从核素治疗区病房 6 西北侧引致屋面排放，排放口设置高于本建筑屋顶。

医院在手套箱管道内及屋顶排放口处设有活性炭过滤吸附装置，对放射性气溶胶进行吸附，降低放射性气溶胶外排浓度。医院每半年更换一次活性炭过滤装置，废活性炭过滤装置作为放射性固废处理。整个核医学中心工作场所均设有新风系统及独立的排风系统，保证工作场所内空气循环。

本项目核医学中心核素显像区及核素治疗区排风设计能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中关于场所通风的相关要求。

2.3.2.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

^{90}Y 树脂微球药品中，绝大多数 ^{90}Y 核素附着在“大孔型结构”的树脂微球表面和内部孔道内，以不溶性固体形式存在，极少量（0.04~0.4%）^{90}Y 核素以游离状态出现在液体中，游离的 ^{90}Y 核素以氯化钇（$^{90}YCl_3$）形式存在，氯化钇不具备挥发性，故不考虑放射性气体或气溶胶的辐射影响。

2.3.3 放射性固废处理措施

2.3.3.1 动物影像实验室项目

本项目动物影像实验室产生的放射性固体废物分类收集密封并贴上标签放置在动物尸体/废物间内衰变；体内带有放射性核素的动物尸体、组织在每次实验后集中收集于密封袋内，贴上标签后送至动物尸体/废物间的冰箱中衰变；所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍，经监测辐射剂量率处

于环境本底水平，α表面沾污小于 0.08Bq/cm^2、β表面沾污小于 0.8Bq/cm^2 后，沾有放射性核素的滴管、试管、擦拭废纸、手套和口罩、一次性注射器、吸水纸等实验器材以及给药后动物饲养过程中产生的含有动物排泄物的废弃垫料、拖地后的干湿纸巾作为医疗废物处理，动物尸体、组织交由有资质单位处理，废活性炭作为非放射性固体废物处理，满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中有关放射性固体废物处理的要求，对周围环境辐射影响很小。

2.3.3.2 核医学中心项目

核医学中心核素显像区内设有废物库 1，核素治疗区设有废物库 2，废物库 1 的容积约为 20m^3，废物库 2 的容积约为 10m^3，医院拟将核医学中心内产生的放射性固体废物收集于各工作场所铅污物桶（5mmPb）内的专用塑料包装袋内，包装袋标明收贮时间、种类及数量等内容。核医学中心核素显像区内放射性废物收集后最终送至废物库 1 内暂存，核医学中心核素治疗区内放射性废物收集后最终送至废物库 2 内暂存。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的要求，所含核素半衰期小于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h 的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍、含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天，并经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理，在定期对满足储存时间要求的废物进行监测及清洁解控后，本项目废物间 1、废物间 2 的容量能够满足贮存要求。

2.3.3.3 ^{90}Y 树脂微球治疗项目

本项目 ^{90}Y 树脂微球治疗产生的放射性固废统一收集于铅污物桶（5mmPb）内的专用塑料包装袋内，包装袋标明收贮时间、种类及数量等内容，最终送至核医学中心核素显像区废物库 1 内暂存，废物库 1 的容积约为 20m^3。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的要求，含 ^{99m}Tc 核素的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、含 ^{90}Y 核素的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍（26.7 天），并经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理，在定期对满足储存时间要求的废物进行监测及清洁解控后，本项目废物间 1 的容量能够满足贮存要求。

2.4 非放射性“三废”处理处置

本项目产生的普通三废主要为动物影像实验室内的小动物 PET/SPECT/CT 三模态成像系统、核医学中心 PET/CT 及 SPECT/CT 运行时产生的少量臭氧及氮氧化物。少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排出机房，弥散在大气环境中，对环境影响较小。

本项目辐射工作人员在工作过程中产生的生活污水拟排入城市污水管网，一般生活垃圾收集后将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

3 可行性分析结论

综上所述，南京同仁医院有限公司扩建动物影像实验室及放射诊疗项目在落实本报告提出的各项污染防治措施和管理措施后，该医院将具有与其所从事的辐射活动相适应的技术能力和具备相应的辐射安全防护措施，其运行对周围环境产生的影响能够符合辐射环境保护的要求，从辐射环境保护角度论证，该项目的建设和运行是可行的。

建议与承诺

（1）所有设备资料、放射性同位素台帐、射线装置台账和监测资料等妥善保管，存档备案。

（2）该项目运行中，应严格遵循操作规程，加强对医务人员的培训，杜绝麻痹大意思想，以避免意外事故造成对公众和职业人员的附加影响，使对环境的影响降到最低。

（3）项目建成后，应根据有关规定及时办理竣工环保验收手续。

（4）针对放射性同位素的转让活动，应根据有关规定办理放射性同位素转让审批手续。

本项目“三同时”措施一览表

项目	“三同时”措施	预期效果	投资（万元）
辐射安全管理机构	医院已成立专门的放射防护与辐射安全管理委员会，并指定专人负责辐射安全与环境保护管理工作，且以文件形式明确管理委员会具体责任分工职责。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，使用放射性同位素及II类射线装置的单位，应设有专门的辐射安全与环境保护管理机构的要求。	/
动物影像实验室项目辐射安全和防护措施	本项目动物影像实验室拟按照表 10-4 中的参数进行屏蔽设计。	满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域,其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求。	80
	动物影像实验室辐射工作人员出入口及物流出入口拟设置门禁系统；动物影像实验室内小动物 PET 机房门上、核素标记实验室门上、QC 室门上、生物操作间门上、注射后饲养间门上、动物尸体/废物间门上等明显位置处粘贴电离辐射警告标志及中文警示说明；热室表面、放射性废物桶表面等拟按要求设置有放射性标识和中文警示说明；动物影像实验室工作人员出入口及物流出入口处、核素标记实验室、QC 室、生物操作间、注射前动物饲养室、注射后动物饲养室、动物尸体/废物间内均拟安装视频监控探头；小动物 PET 机房拟设置观察窗，同时拟设置视频监控探头；动物影像实验室的动物尸体/废物间拟设置双人双锁管理，确保放射性废物的安全；小动物 PET 机房入口防护门上方拟设置工作状态指示灯，灯箱上设置“射线有害、灯亮勿入”的警示语句，工作状态指示灯与防护门拟设置门灯联锁装置；小动物 PET 机房及控制室内均拟设置紧急停机按钮，并在醒目处设置标签，标明使用方法；严禁辐射工作人员在控制区内进食、饮水、吸烟、化妆，严禁进行无关工作及存放无关物件，防止含有微量放射性核素的空气被辐射工作人员吸入体内造成内照射；所有放射性药物的标记、分装均在热室内进行，辐射工作人员进入控制区	满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）及《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 3 部分：γ射线源放射治疗机房》中的相关要求。	

	均穿戴工作服、一次性手套、工作鞋，佩戴过滤式口罩，近距离接触放射性核素或给药后动物时还将穿戴铅衣等个人防护用品，并尽可能熟练操作技能、缩短操作时间；实验室控制区内墙面、地面均拟采用易于去污的材料或涂料，并平整光滑；地面与墙面交接做成圆角，且有一定的坡度朝向地漏（如设置地漏）；放射性核素操作设备的表面、工作台台面等平整光滑，室内地面与墙壁衔接处无接缝，易于清洗、去污；检测/去污间配备 1 台α-β表面沾污仪，辐射工作人员操作放射性核素后离开核素标记实验室前进行表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施；从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区；配备至少 2 套 0.5mmPb 防护铅衣、铅帽、铅眼镜、2 块 10mmPb L 防护屏及 2 块 1cm 厚有机玻璃 L 防护屏等防护用品。		
核医学中心辐射安全和防护措施	本项目核医学中心拟按照表 10-5 中的参数屏进行蔽设计。	满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域,其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求。	15
	医院在核医学中心核素显像区的控制区出入口、分装注射室、废物库 1、源库、^{32}P 敷贴室、SPECT/CT 候诊室 1、SPECT/CT 候诊室 2、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/CT 候诊室 1、PET/CT 候诊室 2、心脏 ECT 候诊室、心脏 ECT 机房、诊后留观室等场所外明显位置粘贴符合 GB18871-2002 规范的电离辐射警告标志；在核素治疗区的控制区出入口、病房 1~病房 6、甲亢留观室、甲亢服碘室、分装室、源库、废物库 2、配餐间、治疗室、配液室、污洗间、污染被服间、抢救室等场所外明显位置粘贴符合 GB18871-2002 规范的电离辐射警告标志，用于提醒无关人员不要靠近和逗留；医院在 SPECT/CT 及 PET/CT 机房门口设有工作状态指示灯，拟在心脏 ECT 机房门口设有工作状态指示灯；SPECT/CT 及 PET/CT 机房防护门安装有闭	满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）以及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）标准中相关要求。	

	门装置，医院还拟将心脏 ECT 机房防护门安装闭门装置；医院在核医学中心核素显像区及核素治疗区控制区病患入口及病患出口处设有带门禁系统的单向门，实现“入口只进不出，出口只出不进”的单向路线；医院在医院在核医学中心核素显像区及核素治疗区的控制区内安装有监控及对讲设备；核医学科工作场所内不得安排与放射性无关的工作；本项目所有放射性药物的操作均在核医学中心核素显像区分装注射室的手套箱及核素治疗区分装室的手套箱内进行；在核医学中心核素显像区及核素治疗区的控制区和监督区内不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物件；辐射工作人员操作后离开工作室前洗手和进行表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施；从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区；使用操作均在指定的工作台或搪瓷盘内进行，操作人员均配戴个人防护用品，避免皮肤直接接触放射性物质；核医学中心核素显像区及核素治疗区的门窗及内部结构简单，墙面、地面均采用易于去污的材料或涂料，并平整光滑；地面与墙面交接处为圆角，且有一定的坡度朝向地漏；医院为 SPECT/CT 及心脏 ECT 辐射工作人员配备铅当量不小于 0.5mm 的铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖、铅橡胶帽、铅玻璃眼镜；为 PET/CT 和核素治疗辐射工作人员配备放射性污染防护服；医院为核医学中心配有应急及去污用品。		
^{90}Y 树脂微球治疗辐射安全和防护措施	本项目涉及核医学中心核素显像区的场所屏蔽见表 10-5，涉及 DSA2 室及 ^{90}Y 留观室的屏蔽参数见表 10-6。	满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h”的要求。	3
	拟将放射科 DSA2 室、患者专用留观病房作为辐射防护控制区，在机房、病房入口处设置有“当心电离辐射”警告标志；DSA2 室门口拟设置工作状态指示灯，且工作状态指示灯与机房相通的门设置联锁装置；DSA2 室控制室、机房内的治疗床边操作面板均设置有急停按钮；	满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的要求。	

	在 DSA2 室内使用 90Y 治疗前，拟在 DSA 设备及治疗床周边地面铺设防水布；辐射工作人员离开 DSA2 室前做表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，应采取去污措施；控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区；医院拟在 ^{90}Y 树脂微球输注场所（DSA2 室）内配备应急及去污用品；医院已为本项目辐射工作人员配备个人剂量计，定期送检且需做好个人剂量档案管理工作；在患者身体肝脏部位穿戴 0.25mm 铅当量的铅橡胶围裙，必要时为转移病床设置铅屏风；移动患者时应尽量避开人员较为集中的时段，快速、平稳地将患者送至专用留观病房；^{90}Y 树脂微球患者专用留观病房门口设置电离辐射警告标志，警示周围人群远离专用病房；提醒患者家属注意与患者保持距离，尽量减少与患者近距离接触的时间；医护人员查房，家属成员如需长时间陪护应与患者保持 1m 以上的距离；在专用留观病房所在楼层值班的护士严密注意患者动向，尽量避免患者在病房外停留；严禁无关人等进入病房。		
人员配备	本项目动物影像试验室拟配备 2 名辐射工作人员，2 名辐射工作人员均为新增人员；核医学中心配备 8 名辐射工作人员，8 名辐射工作人员均为核医学科现有辐射工作人员；^{90}Y 树脂微球治疗项目拟配备 5 名辐射工作人员，其中 3 人为介入科现有辐射工作人员，2 人为核医学中心现有辐射工作人员。现有辐射工作人员均已通过生态环境部培训平台上的线上考核，新增辐射工作人员应参加并通过生态环境部培训平台上的线上考核后方可上岗。 本项目拟配备的辐射工作人员均应开展个人剂量监测，送检周期为 3 个月，并建立辐射工作人员个人剂量监测档案。 本项目拟新配备的辐射工作人员均应定期进行职业健康体检，体检周期为两年，并拟建立职业健康监护档案。	满足《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》中关于人员培训、个人剂量监测及职业健康体检的相关要求。	定期投入
监测仪器和防护用品	医院核医学中心目前共配有 1 台 BH3103H 型环境辐射巡测仪，8 台 BG2010-B 型个人剂量报警仪及 2 台 PM 型表面沾污仪；介入科共配有 3 台个人剂量报警仪；医院还拟为动物影像实验室项目配备 1 台环境辐射巡测仪、3 台个人剂量报警仪及 1 台表面沾污仪。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中使用放射源及类射线装置的单位应配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器要求。	2

辐射安全管理制度	医院已根据相关标准要求，制定一系列辐射安全管理制度，包括操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案、射线装置使用登记、台账管理制度以及辐射事故应急方案等制度，医院还应根据相关条例、办法以及本报告的要求对制度的内容进行补充，并在今后运行中结合实际工作不断完善，使其具有较强的针对性和可操作性	满足《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规要求。	/

以上措施必须在项目试运行前落实。

表 14 审批

下一级环保部门预审意见   经办人签字　　公章 年　月　日
审批意见：   经办人签字　　公章 年　月　日