

核技术利用建设项目

南昌大学小动物分子影像

PET/SPECT/CT 设备应用项目

环境影响报告表

(公示稿)

南昌大学 (盖章)

二〇二五年五月

环境保护部监制

核技术利用建设项目

南昌大学小动物分子影像

PET/SPECT/CT 设备应用项目

环境影响报告表

建设单位名称：南昌大学

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：江西省南昌市红谷滩新区学府大道 999 号

邮政编码：330031

联系人：

电子邮箱：

联系电话：

目 录

表 1	项目基本情况	1
表 2	放射源	12
表 3	非密封放射性物质	12
表 4	射线装置	13
表 5	废弃物（重点是放射性废弃物）	14
表 6	评价依据	15
表 7	保护目标与评价标准	17
表 8	环境质量和辐射现状	32
表 9	项目工程分析与源项	39
表 10	辐射安全与防护	48
表 11	环境影响分析	68
表 12	辐射安全管理	79
表 13	结论与建议	91
表 14	审批	93
附件 1	委托书	93
附件 2	辐射安全许可证	93
附件 3	学校现有辐射相关规章制度	93
附件 4	本项目场所辐射环境监测报告	93
附件 5	类比监测报告	93
附件 6	个人剂量监测报告	93
附件 7	辐射工作人员培训资料	93
附件 8	学校 2024 年度评估报告	93
附件 9	南昌大学 2023 年环评批复	93
附件 10	宇宙射线响应监测报告	93
附件 11	监测资质和仪器检定证书	93
附件 12	专家审查意见	93
附件 13	专家意见及修改内容	93
附件 14	专家复核确认函	93

表 1 项目基本情况

建设项目名称		南昌大学小动物分子影像 PET/SPECT/CT 设备应用项目			
建设单位		南昌大学			
法人代表		■■■■■	联系人	■■■■■	联系电话
注册地址		江西省南昌市红谷滩新区学府大道 999 号			
项目建设地点		南昌大学生物医学测试中心动物平台一楼东北角			
立项审批部门		/		批准文号	/
建设项目总投资 (万元)		5000	项目环保投资 (万元)	160	投资比例 (环保投资/总投资)
项目性质		☒ 新建 ☐ 改建 ☐ 扩建 ☐ 其它			占地面积 (m ²)
应用 类型	放射源	☐ 销售	☐ I 类 ☐ II 类 ☐ III 类 ☐ IV 类 ☐ V 类		
		☐ 使用	☐ I 类 (医疗使用) ☐ II 类 ☐ III 类 ☐ IV 类 ☐ V 类		
	非密封 放射性 物质	☐ 生产	☐ 制备 PET 用放射性药物		
		☐ 销售	/		
		☒ 使用	☐ 乙 ☒ 丙		
	射线 装置	☐ 生产	☐ II 类 ☐ III 类		
		☐ 销售	☐ II 类 ☐ III 类		
		☒ 使用	☐ II 类 ☒ III 类		
	其他	/			
	1.1 核技术利用项目情况 1.1.1 建设单位情况简述 南昌大学是国家“双一流”建设高校、教育部与江西省部省合建高校、江西省一流大学整体建设高校。学校拥有前湖、青山湖、东湖 3 个校区。前湖校区位于江西省南昌市红谷滩区学府大道 999 号，地理坐标为东经 115°48'4.687"，北纬 28°39'22.831"；青山湖校区位于南昌市青山湖区南京东路 235 号，地理坐标为东经 115°56'21.822"，北纬 28°41'6.612"；东湖校区位于南昌市东湖区八一大道 461 号，地理坐标为东经 115°54'14.472"，北纬 28°41'0.136"。 学校现有 42 个教学单位，13 个学科门类、91 个本科招生专业，22 个博士学位授权一级学科，3 个博士专业学位授权类别，18 个博士后科研流动站；49 个硕士学位授权一级学科，35 个硕士专业学位授权类别。学校设有 5 所直属附属医院，共有 9 个国家临床重点专科。				

1.1.2 项目目的和任务的由来

为了满足南昌大学相关科研项目的开展及教学工作的需要，学校拟将前湖校区（红谷滩区学府大道 999 号）南昌大学生物医学测试中心动物平台一楼东北角（现有 B102、B104 和 B106 的动物尸体房（无其他遗留环境或生物污染项）、垫料库及控制室）改建为小动物实验室工作场所，建筑面积约为 170m²，改建后场所包括：缓冲间、去污间、注射前小动物暂存间、注射后小动物暂存间、测量间、废物间、操作间、显像机房、生物操作间（给药室）、物品缓冲间、储源间。

学校拟购置的 III 类射线装置为小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统（厂家为 Molecubes），型号为β CUBE（PET）、γ CUBE（SPECT）、X CUBE（CT），该系统为桌面模块化设计，三台设备相互独立，其中 X CUBE(CT)六面均含 3mmPb 铅板自屏蔽，β CUBE（PET）、γ CUBE（SPECT）无自屏蔽。场所内拟使用放射性核素包括 ^{99m}Tc 及 ¹⁸F，均为外购成品药物，放射性核素相关操作在生物操作间（给药室）内的通风橱进行。

由“关于发布《射线装置分类》的公告（环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号）”可知，本项目拟使用的小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统属于 III 类射线装置。由《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 C 可知，本项目小动物实验室工作场所射性核素日等效最大操作量为 3.72×10⁶Bq，为丙级非密封放射性物质工作场所。

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》、《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》可知，本项目属于“五十五、核与辐射”中“172 核技术利用建设项目”，南昌大学小动物分子影像 PET/SPECT/CT 设备应用项目应进行辐射环境影响评价并编制辐射环境影响报告表。为此南昌大学于 2024 年 2 月正式委托江西省地质局实验测试大队进行辐射环境影响评价。江西省地质局实验测试大队则立即组织人员进行了现场踏勘和资料收集等相关工作，在此基础上编制完成了该项目的辐射环境影响报告表。

1.1.3 项目建设内容和规模

学校拟在南昌大学生物医学测试中心动物平台一楼东北角（现有 B102、B104 和 B106 的动物尸体房、垫料库及控制室）建设小动物实验室区域，配套使用小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统，拟使用放射性核素为外购 ^{99m}Tc 及 ¹⁸F。

根据学校提供资料，PET/CT 及 SPECT/CT 显像每周最多各扫描 20 只小动物，每日仅进行一种核素实验（即 PET/CT 和 SPECT/CT 不同在一天使用），故每日每次最多购置 20 只小动物进行同种核素实验。

PET 显像每只小动物 ^{18}F 最大注射量为 $1.85 \times 10^7 \text{Bq}$ (0.5mCi)，日最大注射量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi)。SPECT 显像每只小动物 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 最大注射量为 $1.85 \times 10^8 \text{Bq}$ (5mCi)，日最大注射量为 $3.7 \times 10^9 \text{Bq}$ (100mCi)。因两种核素周显像数量均为 20 只，故上述日最大用量即为该种核素周最大用量，实验周数为 50 周。由于 ^{18}F 半衰期仅 109.8min，考虑药物衰变及损耗，每次拟按实际注射量 4 倍备药，实际日最大注射量为 10mCi，则备药量为 40mCi。

本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统使用放射性药物置于 EP 管中进行设备校准，PET 及 SPECT 每月进行一次校准，使用核素分别为 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，药量均为 $50\mu\text{Ci}$ ，其中 ^{18}F 校准药物量已包含在备药量中。

表 1-1 本项目小动物实验室药物拟使用情况一览表

序号	核素	小动物单次最大注射量	日最大实验动物数	日最大操作量	日等效最大操作量	年最大用量	活动种类
1	^{18}F	$1.85 \times 10^7 \text{Bq}$ (0.5 mCi)	20 只	$3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (显像、扫描)	$4.81 \times 10^5 \text{Bq}$	$7.4 \times 10^{10} \text{Bq}$	使用
				$1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ (源的贮存、设备校准)			
2	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$1.85 \times 10^8 \text{Bq}$ (5 mCi)	20 只	$3.7 \times 10^9 \text{Bq}$ (显像、扫描)	$3.72 \times 10^6 \text{Bq}$	$1.851 \times 10^{11} \text{Bq}$	使用
				$1.85 \times 10^6 \text{Bq}$ (设备校准)			

根据表 1-1 计算可得，本项目核医学科工作场所的日等效最大操作量为 $3.72 \times 10^6 \text{Bq}$ ，为丙级非密封放射性物质工作场所。

表 1-2 本项目拟配置的Ⅲ类 X 射线装置基本参数情况一览表

序号	设备名称	型号	厂家	类别	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	应用目的和任务	设备拟安装位置
1	小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统	β CUBE (PET)、 γ CUBE (SPECT)、X CUBE (CT)	Molecubes	Ⅲ类	50	0.5	显像、扫描	生物医学测试中心动物平台一楼显像机房

1.2 项目周边环境概况

(1) 项目所在院区位置及周边环境概况

南昌大学前湖校区位于江西省南昌市红谷滩新区学府大道 999 号，校区东面为学府大道、慧谷产业园，西面为枫生快速路，南面为南昌大道西、江西省廉政教育中心、绿地学府公馆，北面为西一环路、南一环路。本项目涉及的南昌大学实验动物中心位于校区内医学院西北角，该建筑为地上四层，无地下室。本项目所在位置中心地理坐标为：东经 $115^\circ 47' 32.654''$ ，北纬 $28^\circ 38' 59.971''$ 。地理位置见图 1-1。

(2) 本项目核技术利用项目所在位置及周边环境概况

本项目拟建小动物实验室位于南昌大学生物医学测试中心动物平台一楼东北角（现有 B102、B104 和 B106 的动物尸体房、垫料库及控制室），项目主要包括注射前及注射后小动物暂存间、测量间、废物间、操作间、显像机房等用房。项目用房由原动物尸体房、垫料库及控制室改建而来，现场踏勘时仍维持现状。本项目配套放射性废液衰变池位于实验动物中心东侧地下室，废气排气口位于所在建筑楼顶高于屋面 3m 处。

本次拟建小动物实验工作室北面、东面 50m 范围为校内绿化及道路，南面 50m 范围内为实验动物中心其他用房、校内绿化及道路，西面 50m 范围为实验动物中心其他用房、车位。

本项目小动物实验室相邻北侧、东侧均为室外绿地，西侧邻走廊，南侧邻器械库、半成品间。

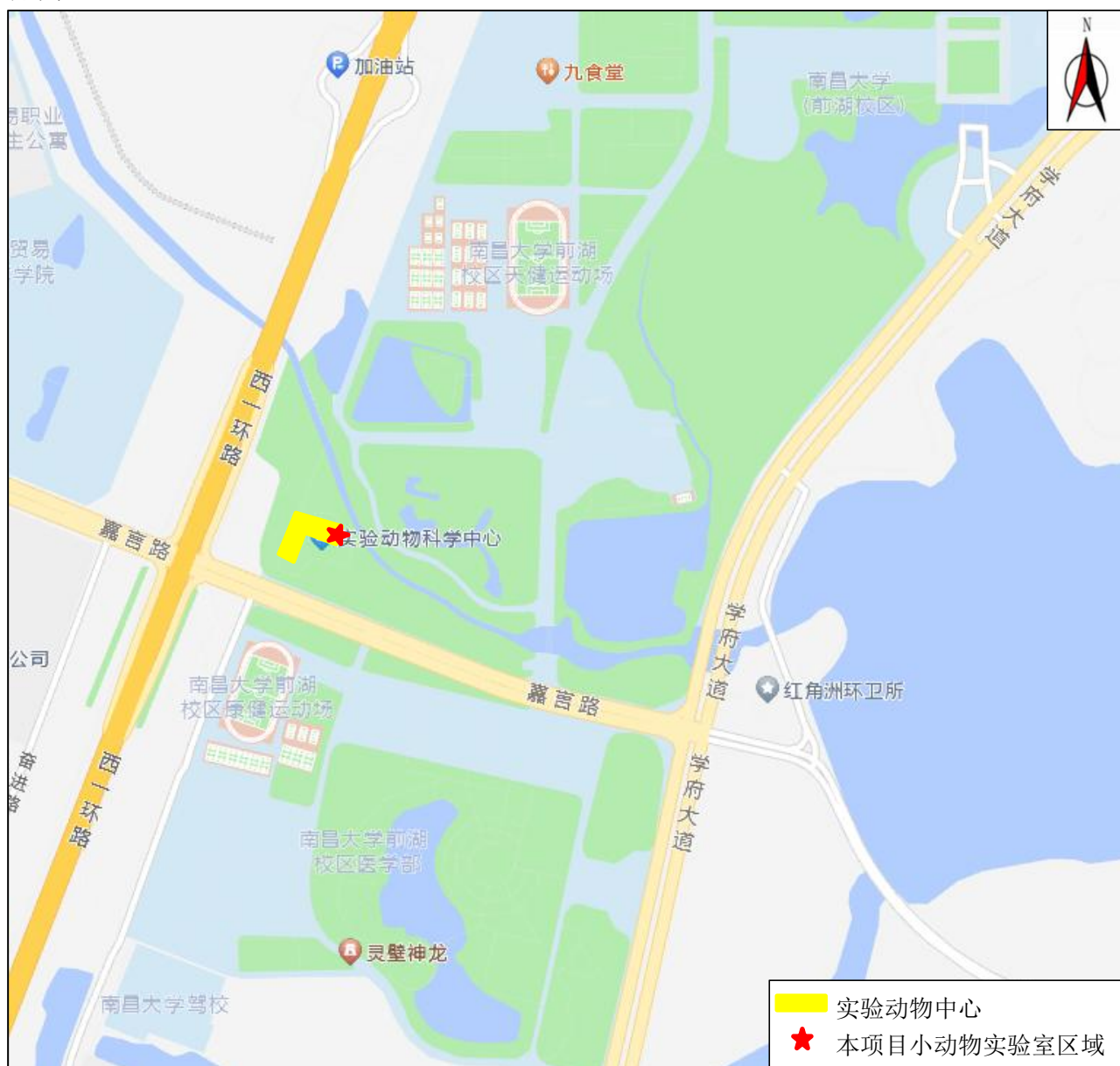


图 1-1 南昌大学前湖校区地理位置及校区周围情况 (局部)

本项目主要环境保护目标为本项目辐射工作人员、评价范围内学校其他工作人员及辐射工作场所周围偶尔路过或停留的其他公众人员。

本项目非密封源工作场所拟建于南昌大学实验动物中心一层，四周为室外绿地、走廊、器械库、半成品间等，上方为设备间、仓库等，无地下室，不邻接食堂、学生宿舍等敏感用房，避开了人群集中区域，辐射工作场所周围相邻及顶棚上方区域设计为公众人员较少居留的场所，项目进行了辐射安全分区管理，限制无关人员进入控制区及限制在监督区逗留，选址满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中相关要求。

小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统机房为显像专用工作场所，机房大小、屏蔽物质厚度等符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中相关要求。拟建非密封源工作场所设置了工作人员、动物、药物专用通道，设置了工作人员专用出入口。排风口位于所在建筑屋顶，并高于屋顶外排，尽可能地远离了周边高层建筑。因此本项目非密封源工作场所选址是合理的。本项目 50m 评价范围示意图见图 1-2。



图 1-2 本项目 50m 评价范围示意图

所在建筑一层现状平面图（局部）见图 1-3，楼上现状平面图（局部）见图 1-4。

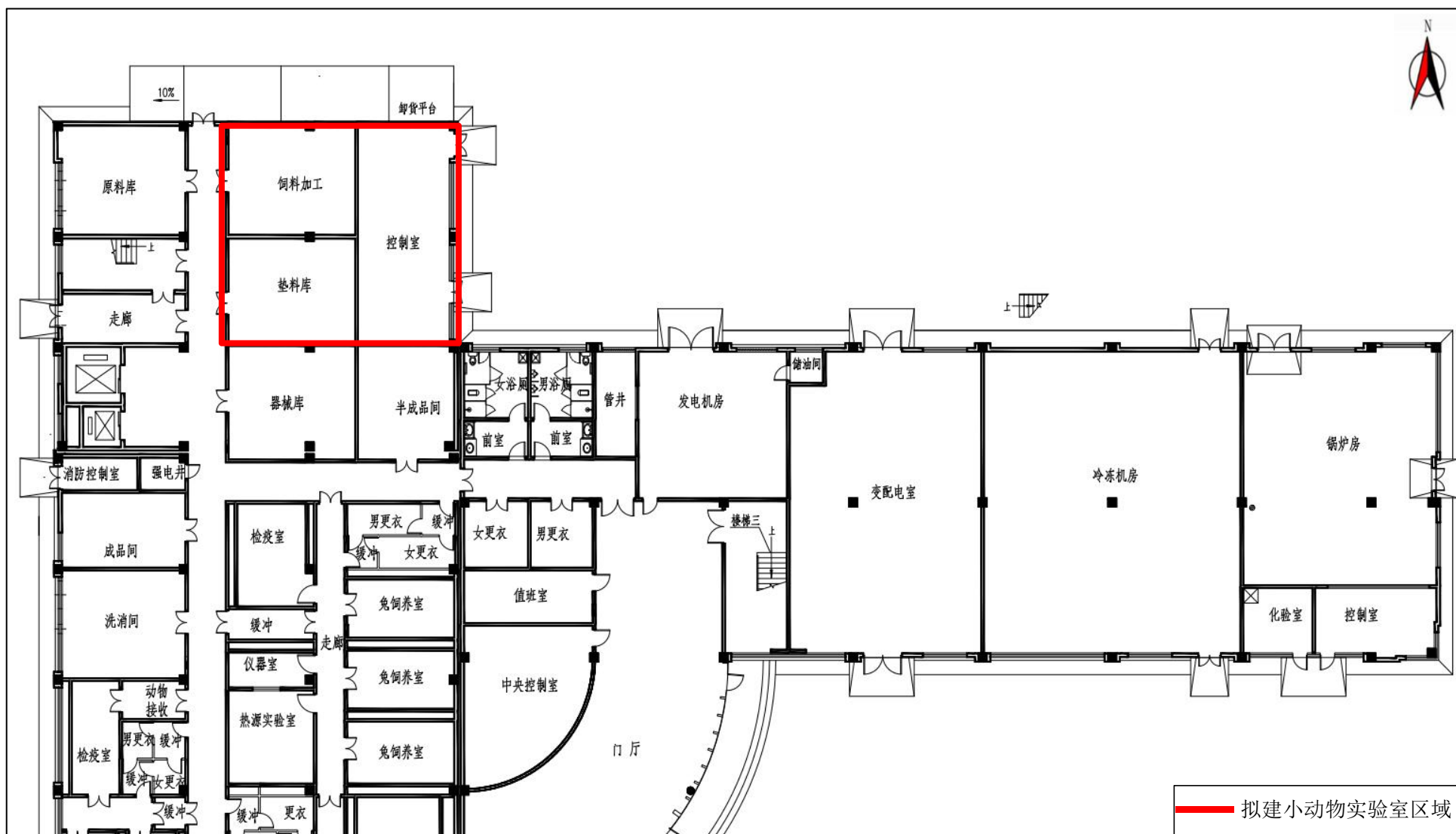


图 1-3 所在建筑一层现状平面图（局部）

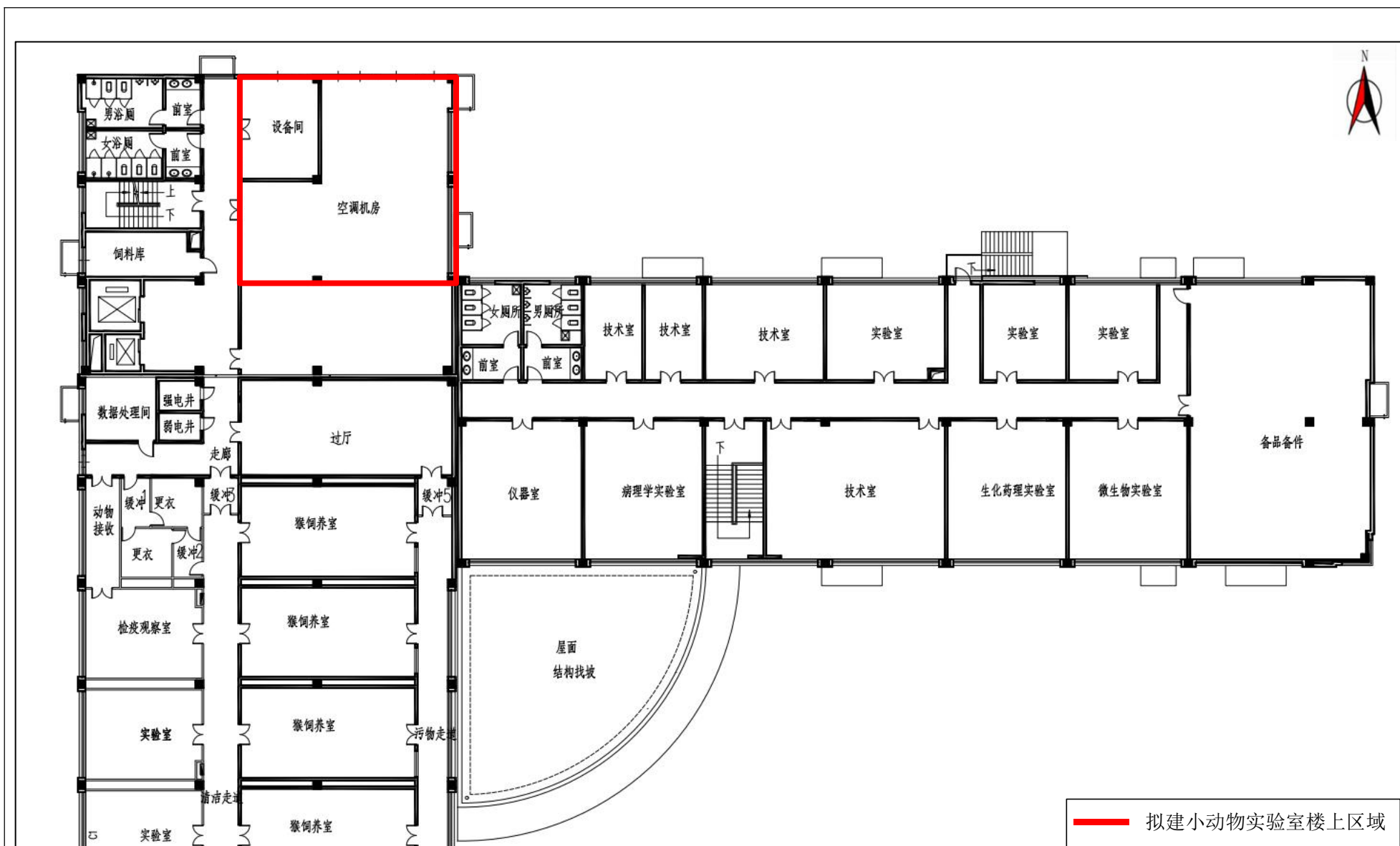


图 1-4 所在建筑二层现状平面图（局部）

1.3 核技术应用项目概况

1.3.1 原有核技术项目回顾

学校已办理《辐射安全许可证》，目前使用 III 类射线装置 2 台，具体见表 1-3。

表 1-3 南昌大学现已使用射线装置一览表

序号	设备名称	型号	工作场所	类别	辐射安全许可证
1	南昌大学球形托卡马克装置	非标定制，最大等离子体电流 100kA，最大脉宽 100ms	基础实验大楼 D101	III 类	国环辐证[00522]
2	MEVVA10A	MEVVA10A		III 类	

学校于 2023 年 2 月完成《南昌大学微纳观原位透视体素成像分析系统应用项目环境影响报告表》，同年 4 月取得《江西省生态环境厅关于南昌大微纳观原位透视体素成像分析系统应用项目环境影响报告表的批复》（批复号：赣环辐射字[2023]169 号），该设备尚未登记于《辐射安全许可证》，学校应按相关要求及时办理相关设备的《辐射安全许可证》登记手续。

1.3.2 辐射安全管理现状

南昌大学根据《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关放射性法律、法规，在辐射防护设施运行、维护、检测工作、辐射安全和防护制度的建立、落实以及档案管理等方面完成了以下工作：

（1）学校成立了辐射安全与防护领导小组，负责学校的辐射防护与安全工作。

（2）学校建立了相应的放射性事件应急处理预案及应急领导小组。制定了《南昌大学实验室安全突发事件应急预案（试行）》，其中明确了组织体系与职责及辐射类安全事件应急处置参考措施。同时，学校制定了《射线装置安全操作规程》《辐射工作人员的岗位职责》《辐射防护和安全保卫制度》《设备检修维护制度》《射线装置使用登记制度》《射线装置台账管理制度》《辐射监测方案》以及《辐射工作人员培训制度》等制度，具体见附件 3。该单位制定的辐射安全管理规章制度满足现有核技术利用项目对辐射安全管理规章制度的需求，满足环保相关管理要求。

（3）现有辐射工作人员情况

①个人剂量监测与健康体检

学校现有辐射工作人员 9 人，均已配备了个人剂量计，定期送有资质部门进行个人剂量监测，建立了个人剂量档案。由学校提供的辐射工作人员 2024 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月

31 日个人剂量检测报告（附件 6）可知，现有辐射工作人员连续四个季度受照剂量均未超过职业人员辐射剂量约束值 5mSv/a。

②辐射安全和防护知识培训

根据学校提供资料，南昌大学现有 9 名辐射工作人员，其中 3 人（陈小昌、肖东华、熊玉珍）于 2021 年进行了核技术利用辐射安全与防护考核。其他 6 人（陈宇、黄富华、江健、万士勇、吴小峰、张旭旭）均进行了自主培训且考核合格，成绩单均在有效期内，满足环保相关管理要求，考核相关资料见附件 7。

③辐射工作人员职业健康检查

学校现有辐射工作人员 9 人，均尚未进行辐射工作人员职业健康检查，学校应按相关要求尽快安排工作人员进行上岗前职业健康体检，合格者方可上岗。

（4）辐射防护情况

根据学校提供的年度评估资料和现场踏勘情况，得出以下结论：

①屏蔽防护：现有核技术利用涉及机房屏蔽防护措施满足要求；射线装置机房周围辐射环境水平符合相关标准规定的要求。

②警示标志：防护门上方设有工作状态指示灯，辐射工作场所设有电离辐射警示标志。

③学校已配备 RD300 型 X-γ辐射剂量率仪 1 台，FS2011 型 X-γ辐射个人剂量当量 Hp(10) 监测仪 1 台。

④每年 1 月 31 日前向相关部门提交《放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告》，2024 年度评估报告见附件 8。

综上所述，学校基本遵守了《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关放射性法律、法规，辐射防护设施运行、维护、检测工作良好，规章制度建立、相关措施落实、执行情况在不断完善中，辐射安全管理现状较为良好，采取的日常安全管理措施基本可行。学校在日常工作中应进一步加强辐射安全管理，关注国家法律、法规等现行要求的修改或修订，及时更新并完善各项规章制度。

1.4 利益代价分析

1.4.1 利益分析

（1）经济效益

同位素药物诊断技术具有安全、简便等优点，近些年在国内外发展迅速。随着核技术应用的发展，放射性核素及其药物已大量应用于疾病的诊断，推动了医学诊断水平。被广泛应

用于医学的各个学科和专业，为现代医学的发展做出了巨大贡献。其市场潜力极为广阔。本项目的建设，有助于学校对肿瘤学、神经系统疾病、心血管系统疾病、基因治疗成像、细胞示踪技术、骨骼疾病及肺部疾病的研究，相关研究成果将大大推动医院核医学临床应用的开展。

（2）社会效益

项目建成后，有利于推动区域放射性药物技术和临床应用的发展，能满足周边地区群众就诊需求，提高区域医疗水平，对保障健康、拯救生命起了十分重要的作用，具有显著的社会效益。

（3）环境代价

本项目小动物实验室工作场所，使用同位素药物及射线装置开展教学及科研工作，项目运行将产生放射性废物。学校配套建设了放射性“三废”处理设施，项目非密封放射性物质工作场所均设计采取辐射安全与环境保护措施，在实现安全运行的同时，避免对公众造成危害。

综上所述，项目在落实辐射安全与环境保护措施后，可以实现社会效益、经济效益、环境代价的协调发展。

1.4.2 代价分析

项目总投资为 5000 万元，环保投资 160 万元，环保投资占比为 3.2%。

表 1-14 环保投资表

环保投资项目		投资内容	投资金额（万元）
辐射安全与环境保护措施	辐射防护	工作场所实体防护、防护门、观察窗、操作位局部防护措施等（一次投入，定期检查维护）	100
	放射性“三废”处理	放射性“三废”处理设施（一次投入，定期检查维护）	15
	辐射安全措施	电离辐射警告标志及指示灯、视频监控和语音对讲系统、门禁系统、门灯联动装置、紧急停束装置及其他安全措施（一次投入，定期检查维护）	8
	个人防护	工作人员个人防护用品（定期更换）	10
辐射环境监测	监测设备	区域辐射剂量监测系统、剂量报警装置、X-γ辐射监测仪、表面污染测量仪、个人剂量计（一次投入，定期检查维护）	20
	场所防护检测	每年委托有资质的单位对项目工作场所进行辐射环境检测（长期投入）	2
工作人员	工作人员健康检查	开展工作人员个人剂量监测、健康体检（长期投入）	5
合计			160

1.4.3 辐射实践的正当性分析

项目运行过程中，工作人员将按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中第 7.2 要求，在使用放射性核素实施小动物实验及研究之前经过充分论证，编写实验方案并权衡利弊，证明该实验研究给社会所带来的利益大于可能引起的辐射危害时，该照射才是正当的。

使用放射性核素进行小动物实验在疾病机制研究、药物研发等方面具有明确且不可替代的作用，能够为医学科研突破和社会经济发展带来巨大的潜在利益。尽管辐射实践存在一定的危害，但通过科学合理的实验设计、全面有效的防护措施以及严格规范的管理监督，能够将辐射危害降低到可接受的最低水平，实现科研利益与辐射安全的良好平衡。因此，在严格遵循国家相关法律法规和标准的前提下，小动物实验符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于辐射防护“实践正当性”要求。

1.4.4 利益代价分析

项目的建设具有较好的经济效益和社会效益。在采取辐射安全与环境保护措施后，可以大大减轻项目对环境造成的不利影响。从利益代价角度分析，项目的建设是可行的。

1.5 产业政策符合性

该项目属于高端医疗器械创新发展，对照《产业结构调整指导目录》（2024 年本）的规定其属于国家鼓励类的项目，故该项目符合国家产业政策。

1.6 评价目的

（1）对学校此次环评的射线装置、非密封源工作场所周边的辐射环境现状进行现场调查和监测，以掌握该场址的辐射水平和辐射环境质量现状。

（2）通过环境影响评价，预测建设项目对其周围环境影响的程度和范围，提出环境污染控制对策，为建设项目环境管理提供科学依据。

（3）对不利影响和存在的问题提出防治措施，把辐射环境影响减少到“可合理达到的尽量低水平”。

（4）提出环境管理和环境监测计划，使该项目满足国家和地方生态环境部门对建设项目环境管理规定的要求，为辐射环境管理提供科学依据。

1.7 评价因子及评价重点

本项目的污染因子为放射性同位素与射线装置应用过程中产生的电离辐射。本次评价采用年有效剂量、环境 γ 辐射剂量率、表面污染水平及含放射性废水中总 β 放射性作为评价因子，重点评价其产生的电离辐射对周边环境的影响。

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	/	/	/	/	/	/	/	/
2	/	/	/	/	/	/	/	/

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	¹⁸ F	液态，半衰期 109.8min，低毒	使用	3.70×10 ⁸	3.70×10 ⁵	4.81×10 ⁵	7.4×10 ¹⁰	小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统显像	简单操作	南昌大学前湖校区生物医学测试中心动物平台一楼小动物实验室显像机房	南昌大学前湖校区生物医学测试中心动物平台一楼小动物实验室生物操作间（给药室）铅防护通风橱内及储源间
				1.11×10 ⁹	1.11×10 ⁵				源的贮存、设备校准		
2	^{99m} Tc	液态，半衰期 6.02h，低毒	使用	3.7×10 ⁹	3.70×10 ⁶	3.72×10 ⁶	1.851×10 ¹¹	小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统显像	简单操作		
				1.85×10 ⁶	1.85×10 ⁴				设备校准		

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》（GB18871-2002）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）及“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”。

表 4 射线装置

(一) 加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

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

(二) 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	
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(三) 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	小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像 系统	III类	1	β CUBE (PET)、 γ CUBE (SPECT)、X CUBE (CT)	50	0.5	显像、扫描	南昌大学前湖校区生物医学 测试中心动物平台一楼小动 物实验室显像机房	/

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	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
实验过程中产生的少量操作手套、口罩、棉签、试管、吸水纸、注射器、废活性炭及注射后小动物暂存间饲养笼内垫料等	固态	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	25kg	/	分类、分期收集于放射性废物桶中，转移至废物间贮存衰变。	放射性固体废物暂存时间超过 30 天，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，清洁解控并作为实验废物处理。
含同位素的小动物尸体	固态	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	500kg	/	小动物尸体及组织等拟装入专用尸体袋暂存于废物间冰箱内。	放射性固体废物暂存时间超过 30 天，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，清洁解控并作为实验废物处理。
放射性废水（相关容器、器皿等冲洗、人员清洗产生废水）	液态	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	20m^3	总 α 放射性 $\leq 1\text{Bq}/\text{L}$ 、总 β 放射性 $\leq 10\text{Bq}/\text{L}$	置于专用放射性废液衰变池内贮存	在槽式衰变池中暂存衰变至少 30 天后，排入学校污水处理站处理，然后排入城市污水管网

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、年排放总量分别用比活度（ Bq/L 或 Bq/kg ，或 Bq/m^3 ）和活度（ Bq ）。

表 6 评价依据

法规文件	(1) 《中华人民共和国环境保护法》（中华人民共和国主席令第九号，2014 年修订，2015 年 1 月 1 日起施行）； (2) 《中华人民共和国环境影响评价法》（中华人民共和国主席令第四十八号，2018 年修改，2018 年 12 月 29 日起施行）； (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（中华人民共和国主席令第六号，2003 年，2003 年 10 月 1 日起施行）； (4) 《建设项目环境保护管理条例》（中华人民共和国国务院令第 682 号，2017 年修改，2017 年 10 月 1 日起施行）； (5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 449 号，2019 年 3 月 2 日修订）； (6) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（国家环境保护部第 3 号令，2021 年修正版）； (7) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令部令第 18 号，2011 年，2011 年 5 月 1 日起施行）； (8) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（生态环境部 部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日起施行）； (9) 《关于发布<射线装置分类>的公告》（环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告，公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 6 日起实施）； (10) 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（中华人民共和国环境保护部办公厅，环办辐射函[2016]430 号，2016 年 3 月 7 日）； (11) 《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，公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月日起实施）； (12) 《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》（国家环境保护总局文件，环发[2006]145 号，2006 年 9 月 26 日）。 (13) 《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》（生态环境部令 第 9 号，自 2019 年 11 月 1 日起实施）；
------	---

法规文件	(14) 《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评[2017]4号）； (15) 关于发布《建设项目竣工环境保护验收技术指南 污染影响类》的公告（生态环境部公告 2018 年第 9 号，2018 年 5 月 16 日印发）； (16) 《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 2019 年 第 57 号公告）； (17) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》（生态环境部 2021 年 第 9 号公告）； (18) 《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（国家核安全局，辐射函[2023]20号）； (19) 《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，自 2024 年 2 月 1 日起施行。
技术标准	(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）； (2) 《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）； (3) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）； (4) 《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》（HJ 10.1-2016）； (5) 《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）； (6) 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）； (7) 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）； (8) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ 1326-2023）； (9) 《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ380-1989）； (10) 《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）； (11) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）； (12) 《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）。
其他	(1) 委托书； (2) 《中国环境天然放射性水平》（中国原子能出版社，2015 年 7 月第 1 版）； (3) 《辐射安全手册》，潘自强主编，北京：科学出版社，2011； (4) AAPM Task Group 108: PET and PET-CT Shielding Requirements; (5) 建设单位提供的其他材料。

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

本项目为使用III类射线装置，使用丙级非密封放射性物质工作场所，依据《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》（HJ 10.1-2016）中“放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目的评价范围，甲级取半径 500m 的范围，乙、丙级取半径 50m 的范围。放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围）”，考虑到该项目的实际情况，本项目评价范围为非密封放射性物质工作场所实体屏蔽物外 50m 范围。

7.2 保护目标

根据设计资料以及对本项目辐射工作场所及周围环境的现场踏勘和调查，本项目的保护范围内的环境保护目标主要是学校内部工作人员、学生和其他出入学校的公众人员。本项目的环境保护目标见表 7-1。

表 7-1 环境保护目标一览表

场所	方位	距离（m）	保护目标	人员类别	规模
南昌大学前湖校区实验动物科学中心小动物实验室	场所内	/	显像机房、操作间、生物操作间（给药室）、注射前、后小动物暂存间、缓冲间、去污间、测量间、废物间	职业工作人员	4 人
	北侧	相邻	室外绿地	公众	流动人员
	西侧	相邻	走廊	公众	20 人
	南侧	相邻	器械库、半成品间等	公众	2 人
	东侧	相邻	室外绿地	公众	流动人员
	正上方	相邻	设备间、仓库等	公众	流动人员
50m 评价范围		0-50	南昌大学动物实验中心	公众	50 人
		0-50	校内绿化及道路	公众	流动人员

7.3 评价标准

1. 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）

本标准适用于实践和干预中人员所受电离辐射照射的防护和实践中源的安全。

（1）剂量限制

第 4.3.2.1 款 应对个人受到的正常照射加以限制，以保证本标准 6.2.2 规定的特殊情况外，由来自各项获准实践的综合照射所致的个人总有效剂量当量和有关器官或组织的总当

量剂量不超过附录 B（标准的附录）中规定的相应剂量限值。不应将剂量限值应用于获准实践中的医疗照射。

B1.1 职业照射

B1.1.1 剂量限值

B1.1.1.1 应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

a) 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；

B1.2 公众照射

B1.2.1 剂量限值

实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

a) 年有效剂量，1mSv；

（2）表面放射性污染的控制

工作人员体表、内衣、工作服、以及工作场所的设备和地面等表面放射性污染的控制应遵循附录 B（标准的附录 B）B2 所规定的限制要求。

B2 表面污染控制水平

B2.1 工作场所的表面污染控制水平如表 7-2 所列。

表 7-2 工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型		β放射性物质 (Bq/cm ²)
工作台、设备、墙壁、地面	控制区 ¹⁾	4×10
	监督区	4
工作服、手套、工作鞋	控制区 监督区	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 ⁻¹
1) 该区内的污染子区除外。		

（3）非密封放射性物质工作场所的分级

非密封放射性物质工作场所的分级应按附录 C（标准的附录）的规定进行。

C1 应按表 7-3 将非密封放射性物质工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级。

表 7-3 非密封放射性物质工作场所的分级

级别	日等效最大操作量/Bq
甲	>4×10 ⁹
乙	2×10 ⁷ -4×10 ⁹
丙	豁免活度值以上-2×10 ⁷

C2 放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量 (Bq) 与核素毒性组别修正因子的乘积除以与操作方式有关的修正因子所得的商。放射性核素的毒性组别修正因子及操作方式有关的修正因子分别见表 7-4 和表 7-5。

表 7-4 放射性核素毒性组别修正因子

毒性组别	毒性组别修正因子
极毒	10
高毒	1
中毒	0.1
低毒	0.01

表 7-5 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
很简单的操作	100	10	1	0.1
简单操作	10	1	0.1	0.01
特别危险的操作	1	0.1	0.01	0.001

2. 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）

4.4.2 剂量约束值

4.4.2.1 一般情况下，职业照射的剂量约束值不超过 5mSv/a；

4.4.2.2 公众照射的剂量约束值不超过 0.1 mSv/a。

5.1 选址

5.1.1 核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层，设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。

5.1.2 核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并应与非放射性工作场所有明确的分界隔离。

5.1.3 核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。

5.2 布局

5.2.1 核医学工作场所应合理布局，住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置；同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局，控制区应相对集中，高活室集中在一端，防止交叉污染。尽量减小放射性药物、放射性废物的存放范围，限制给药后患

者的活动空间。

5.2.2 核医学工作场所应设立相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开，减少给药后患者对其他人员的照射。注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉，人员与放射性药物通道不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷。

5.2.3 核医学工作场所宜采取合适的措施，控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动，避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲区，为工作人员和患者提供必要的可更换衣物、防护用品、冲洗设施和表面污染监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。

6.1 屏蔽要求

6.1.5 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 30 cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，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 10 $\mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.6 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 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，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 25 $\mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.7 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应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。

7.2 固体放射性废物的管理

7.2.3 固体放射性废物处理

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 0.08 Bq/cm²、 β 表面污染小于 0.8 Bq/cm² 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；

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/cm²、其他 α 发射体应小于 0.4 Bq/cm²。

7.3 液态放射性废物的管理

7.3.1 放射性废液收集

7.3.1.1 核医学工作场所应设置有槽式或推流式放射性废液衰变池或专用容器，收集放射性药物操作间、核素治疗病房、给药后患者卫生间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液。

7.3.1.2 核医学工作场所放射性药物标记、分装、注射后的残留液和含放射性核素的其他废液应收集在专用容器中。含有长半衰期核素的放射性废液应单独收集存放。盛放放射性废液的容器表面应张贴电离辐射标志。

7.3.1.3 核医学工作场所的上水需配备洗消处理设备（包括洗消液）。控制区和卫生通过间内的淋浴间、盥洗水盆、清洗池等应选用脚踏式或自动感应式的开关，以减少场所内的设备放射性污染。头、眼和面部宜采用向上冲淋的流动水。

7.3.1.4 放射性废液收集的管道走向、阀门和管道的连接应设计成尽可能少的死区，下水道宜短，大水流管道应有标记，避免放射性废液集聚，便于检测和维修。

7.3.2 放射性废液贮存

7.3.2.1 经衰变池和专用容器收集的放射性废液，应贮存至满足排放要求。衰变池或专用容器的容积应充分考虑场所内操作的放射性药物的半衰期、日常核医学诊疗及研究中预期产生贮存的废液量以及事故应急时的清洗需要；衰变池池体应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施。

7.3.3 放射性废液排放

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 1 Bq/L、总 β 不大于 10 Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10 Bq/L。

7.3.3.2 对于推流式衰变池贮存方式，所含核素半衰期大于 24 小时的，每年应对衰变池中的放射性废液进行监测，碘-131 和最长半衰期核素的放射性活度浓度应满足 GB18871 附录 A 表 A1 的要求。

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。

3. 《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（国家核安全局，辐射函[2023]20号）

二、关于控制区剂量率

《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021，以下称核医学标准）第 6.1.5 节规定，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 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，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 $10\mu\text{Sv/h}$ 。本条规定的具体含义为：

1.控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子 $\geq 1/2$ ），周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

2.控制区内工作人员较少停留或无需到达的场所（人员居留因子 $< 1/2$ ），如给药/注射室防护门外、给药后患者候诊室防护门外、核素治疗住院病房防护门外以及核医学科患者走廊等位置，周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv/h}$ 。

7.4 参照标准

1. 《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）

5 工作场所的放射防护要求

5.1 工作场所平面布局和分区

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；
- 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。

5.1.7 应通过工作场所平面布局的设计和屏蔽手段，避免附近的辐射源对诊断区设备成像、功能检测的影响。

5.2 放射防护措施要求

5.2.1 核医学的工作场所应按照非密封放射性物质工作场所分级规定进行分级，并采取相应防护措施。

5.2.2 应依据计划操作最大量放射性核素的加权活度对开放性放射性核素工作场所进行分类管理，把工作场所分为 I、II、III 三类。不同类别核医学工作场所用房室内表面及

装备结构的基本放射防护要求见表 1（表 7-6），核医学工作场所分类的加权活度计算方法见附录 G。

表 7-6 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求

种类	分类		
	I	II	III
结构屏蔽	需要	需要	不需要
地面	与墙壁接缝无缝隙	与墙壁接缝无缝隙	易清洗
表面	易清洗	易清洗	易清洗
分装柜	需要	需要	不必须
通风	特殊的强制通风	良好通风	一般自然通风
管道	特殊的管道 ^a	普通管道	普通管道
盥洗与去污	洗手盆 ^b 和去污设备	洗手盆 ^b 和去污设备	洗手盆 ^b
a 下水道宜短，大水流管道应有标记以便维修检测。			
b 洗手盆应为感应式或脚踏式等手部非接触开关控制。			

5.2.3 核医学工作场所的通风按表 1（表 7-11）要求，通风系统独立设置，应保持核医学工作场所良好的通风条件，合理设置工作场所的气流组织，遵循自非放射区向监督区再向控制区的流向设计，保持含放射性核素场所负压以防止放射性气体交叉污染，保证工作场所的空气质量。合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。

5.2.5 放射性废液衰变池的设置按环境主管部门规定执行。暴露的污水管道应做好防护设计。

5.2.6 控制区的入口应设置电离辐射警告标志。

5.2.9 应为放射性物质内部运输配备有足够屏蔽的储存、转运等容器。容器表面应设置电离辐射标志。

5.2.10 扫描室外防护门上方应设置工作状态指示灯。

5.3 工作场所的防护水平要求

5.3.1 核医学工作场所控制区的用房，应根据使用的核素种类、能量和最大使用量，给予足够的屏蔽防护。

5.3.2 应根据使用核素的特点、操作方式以及潜在照射的可能性和严重程度，做好工作场所监测，包括场所周围剂量当量率水平、表面污染水平或空气中放射性核素浓度等内容，工作场所放射防护检测方法见附录 J。核医学工作场所的放射性表面污染控制水平见表 2（表 7-2）。

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（见附录 K），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附录 K；对操作 ^{18}F 等正电子放射性药物场所，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。防护通风柜的典型屏蔽厚度参见附录 I。

6.2 放射性药物操作的放射防护要求

6.2.1 操作放射性药物应有专门场所。放射性药物使用前应适当屏蔽。

6.2.2 装有放射性药物的给药注射器，应有适当屏蔽。

6.2.3 操作放射性药物时，应根据实际情况，熟练操作技能、缩短工作时间并正确使用个人防护用品。

6.2.5 控制区内不应进食、饮水、吸烟、化妆，也不应进行无关工作及存放无关物品。

6.2.6 操作放射性核素的工作人员，在离开放射性工作场所前应洗手和进行表面污染检测，如其污染水平超过表 2 规定值，应采取相应去污措施。

6.2.7 从控制区取出物品应进行表面污染检测，以杜绝超过表 2 规定的表面污染控制水平的物品被带出控制区。

6.2.9 放射性物质的贮存容器或保险箱应有适当屏蔽。放射性物质的放置应合理有序、易于取放，每次取放的放射性物质应只限于需用的部分。

6.2.10 放射性物质贮存室应定期进行放射防护监测，无关人员不应入内。

6.2.11 贮存和运输放射性物质时应使用专门容器，取放容器中内容物时，不应污染容器。容器在运输时应有适当的固定措施。

6.2.12 贮存的放射性物质应及时登记建档，登记内容包括生产单位、到货日期、核素种类、理化性质、活度和容器表面放射性污染擦拭试验结果等。

6.2.13 所有放射性物质不再使用时，应立即送回原地安全储存。

6.2.14 当发生放射性物质溢出、散漏事故时，应根据单位制定的放射事故处置应急预案

案，参照使用 6.1.2 和附录 K 所列用品，及时控制、消除放射性污染；当人员皮肤、伤口被污染时，应迅速去污并给予医学处理。

6.2.15 核医学放射工作人员应按 GBZ 128 的要求进行外照射个人监测，同时对于近距离操作放射性药物的工作人员，宜进行手部剂量和眼晶状体剂量监测，保证眼晶状体连续 5 年期间，年平均当量剂量不超过 20mSv，任何 1 年中的当量剂量不超过 50mSv。

8 医用放射性废物的放射防护管理要求

8.1 放射性废物分类，应根据医学实践中产生废物的形态及其中的放射性核素种类、半衰期、活度水平和理化性质等，将放射性废物进行分类收集和分别处理。核医学常用放射性核素的物理特性参见附录 H。

8.2 设废物储存登记表，记录废物主要特性和处理过程，并存档备案。

8.3 放射性废液衰变池应合理布局，池底和池壁应坚固、耐酸碱腐蚀和无渗透性，并有防泄漏措施。

8.6 污物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物，装满后的废物袋应密封，不破漏，及时转送存储室，放入专用容器中存储。

8.7 对注射器和碎玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入利器盒中，然后再装入专用塑料袋内。

8.8 每袋废物的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，质量不超过 20kg。

8.9 储存场所应具有通风设施，出入口设电离辐射警告标志。

8.10 废物袋、废物桶及其他存放废物的容器应安全可靠，并在显著位置标有废物类型、核素种类、存放日期等说明。

8.11 废物包装体外表面的污染控制水平： $\beta < 0.4\text{Bq/cm}^2$ 。

附录 G

G.1 核医学工作场所分类见表 G.1（表 7-7）。

表 7-7 核医学工作场所分类一览表

分类	日操作最大量放射性核素的加权活度 MBq
I	> 50000
II	$50 \sim 50000$
III	< 50

G.2 加权活度计算方法见式（G.1）：

$$\text{加权活度} = \frac{\text{计划的日操作最大活度} \times \text{核素的毒性权重因子}}{\text{操作性质修正因子}} \dots\dots (G.1)$$

G.3 核医学常用放射性核素的毒性权重因子相关参数见表 G.2（表 7-8），不同操作性质的修正因子取值见表 G.3（表 7-9）。

表 7-8 核医学常用放射性核素的毒性权重因子

类别	放射性核素	核素的毒性权重因子
A	⁷⁵ Se、 ⁸⁹ Sr、 ¹²⁵ I、 ¹³¹ I、 ³² P、 ⁹⁰ Y、 ⁹⁹ Mo、 ¹⁵³ Sm	100
B	¹¹ C、 ¹³ N、 ¹⁵ O、 ¹⁸ F、 ⁵¹ Cr、 ⁶⁷ Ga、 ⁹⁹ Tc ^m 、 ¹²³ I、 ¹¹¹ In、 ¹¹³ In ^m 、 ²⁰¹ Tl	1
C	¹⁴ C、 ³ H、 ⁸¹ Kr ^m 、 ¹²⁷ Xe、 ¹³³ Xe	0.01

表 7-9 不同操作性质的修正因子

操作方式和地区	操作性质修正因子
贮存	100
废物处理 闪烁法计数和显像 候诊区及诊断病床区	10
配药、分装以及施给药 简单放射性药物制备 治疗病床区	1
复杂放射性药物制备	0.1

附录 K（规范性附录）

个人防护用品和应急及去污用品

K.1 个人防护用品

个人防护用品见表 K.1（表 7-10）。

表 7-10 个人防护用品

场所类型	工作人员		患者或受检者
	必备	选备	
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	—
注：“—”表示不要求，宜使用非铅防护用品。			

2. 《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）

6 X 射线设备机房防护设施的技术要求

6.1 X 射线设备机房布局

6.1.1 应合理设置 X 射线设备、机房的门、窗和管线口位置，应尽量避免有用线束直接照射门、窗、管线口和工作人员操作位。

6.1.2 X 射线设备机房（照射室）的设置应充分考虑邻室（含楼上和楼下）及周围场所的人员防护与安全。

6.1.5 除床旁摄影设备、便携式 X 射线设备和车载式诊断 X 射线设备外，对新建、改建和扩建项目和技术改造、技术引进项目的 X 射线设备机房，其最小有效使用面积、最小单边长度应符合表 2（表 7-11，由于本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统 CT 部分最大管电压 50kV，最大管电流 0.5mA，远小于普通医用 CT 的能量，其参数与口腔 CBCT（一般管电压为 50~90kV，管电流 2~10mA）相当，故本次评价显像机房按口腔 CBCT 卧位机房进行符合性分析。）的规定。

表 7-11 X 射线设备机房（照射室）使用面积、单边长度的要求

设备类型	机房内最小有效使用面积 m^2	机房内最小单边长度 m
口腔 CBCT 卧位扫描	15	3.0
a 双管头或多管头 X 射线设备的所有管球安装在同一间机房内。 b 单管头、双管头或多管头 X 射线设备的每个管球各安装在 1 个房间内。 c 透视专用机指无诊断床、标称管电流小于 5mA 的 X 射线设备。 d 机房内有效使用面积指机房内可划出的最大矩形的面积。 e 机房内单边长度指机房内有效使用面积的最小边长。		

6.2 X 射线设备机房屏蔽

6.2.1 不同类型 X 射线设备（不含床旁摄影设备和便携式 X 射线设备）机房的屏蔽防护应不低于表 3 的规定。

6.2.2 医用诊断 X 射线防护中不同铅当量屏蔽物质厚度的典型值参见附录 C 中表 C.4~表 C.7。

表 7-12 不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向铅当量 mmPb	非有用线束方向铅当量 mmPb
口腔 CBCT	2.0	1.0

6.2.3 机房的门和窗关闭时应满足表 3（表 7-12）的要求。

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 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；

6.3.2 机房的辐射屏蔽防护检测方法按第 8 章和附录 B 的要求。

6.3.3 宜使用能够测量短时间出束和脉冲辐射场的设备进行测量，若测量仪器达不到响应时间要求，则应对其读数进行响应时间修正，修正方法参见附录 D。

6.4 X 射线设备工作场所防护

6.4.1 机房应设有观察窗或摄像监控装置，其设置的位置应便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

6.4.2 机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。

6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。

6.4.4 机房门外应有电离辐射警告标志；机房门上方应有醒目的工作状态指示灯，灯箱上应设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句；候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。

6.4.5 平开机房门应有自动闭门装置；推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施；工作状态指示灯能与机房门有效关联。

6.4.6 电动推拉门宜设置防夹装置。

6.4.7 受检者不应在机房内候诊；非特殊情况，检查过程中陪检者不应滞留在机房内。

6.4.10 机房出入门宜处于散射辐射相对低的位置。

6.5 X 射线设备工作场所防护用品及防护设施配置要求

6.5.5 个人防护用品不使用时，应妥善存放，不应折叠放置，以防止断裂。

8 X 射线设备机房防护检测要求

8.1 X 射线设备机房防护设施和机房周围辐射剂量检测应满足下列要求：

b) X 射线设备机房的防护检测应在巡测的基础上，对关注点的局部屏蔽和缝隙进行重点检测。关注点应包括：四面墙体、地板、顶棚、机房门、操作室门、观察窗、采光窗/窗体、传片箱、管线洞口、工作人员操作位等，点位选取应具有代表性；

8.2 X 射线设备机房放射防护安全设施应进行竣工验收，在使用过程中，应进行定期检查和检测，定期检测的周期为一年。

8.3 在正常使用中，医疗机构应每日对门外工作状态指示灯、机房门的闭门装置进行检查，对其余防护设施应进行定期检查。

7.5 本项目相关控制指标

7.5.1 剂量限值及剂量约束值

(1) 剂量限值

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的辐射工作人员及公众的年照射剂量限值，见表 7-13。

表 7-13 辐射工作人员及公众年剂量限值

关注人群	GB18871-2002 剂量限值
辐射工作人员	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	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。

（2）剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871 -2002）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中相关要求，本项目辐射工作人员以年有效剂量不超过 5 mSv 作为剂量约束值；公众以年有效剂量不超过 0.1mSv 作为公众照射剂量约束值。

7.5.2 工作场所表面污染控制水平

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.2.3 条要求，工作人员体表、内衣、工作服、以及工作场所的设备和地面等表面放射性污染的控制应遵循附录 B（标准的附录 B）B2 所规定的限制要求，工作场所的表面污染控制水平如表 7-2。

7.5.3 工作场所剂量率控制水平

依照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）并结合本项目实际情况，本项目辐射工作场所及设施的剂量率控制水平如下：

（1）小动物实验室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 2.5 μ Sv/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 10 μ Sv/h。

（2）通风橱外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5 μ Sv/h，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25 μ Sv/h。

（3）固体放射性废物收集桶外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 2.5 μ Sv/h。

（5）III类射线装置

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）第 6.3.1 条要求：“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 2.5 μ Sv/h。”

本次评价采用辐射剂量率不大于 2.5 μ Sv/h，作为显像机房外表面 30cm 处剂量率参考控

制水平。

7.5.4 工作场所放射性“三废”控制要求

(1) 放射性废水排放控制要求

本项目小动物实验室放射性废液采用槽式衰变池贮存方式，根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）第 7.3.3 条要求，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。

(2) 放射性固体废物排放要求

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021），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 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的、 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：

本项目为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。

(3) 操作放射性同位素通风系统及排放口设置要求

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）第 7.4.1 款：产生气态放射性废物的核医学场所应设置独立通风系统，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。

根据上述相关标准中取其中相对较严格的控制水平或限值作为本项目限值。本项目非密封放射性物质工作场所相关限值要求汇总详见表 7-14。

表 7-14 本项目非密封放射性物质工作场所限值要求汇总

工作场所	人员年受照剂量	射线装置机房要求	辐射剂量率控制水平	工作场所的放射性表面污染	放射性废水	放射性废气	放射性固废
小动物实验室	剂量限值： 辐射工作人员连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均） $\leq 20\text{mSv}$ ；公众人员 $\leq 1\text{mSv/a}$	小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统机房面积 $\geq 15\text{m}^2$ ，机房单边长度 $\geq 3.0\text{m}$ 。机房有用线束方向铅当量 $\geq 2.0\text{mmPb}$ ，非有用线束方向铅当量 $\geq 1.0\text{mmPb}^*$ 。	控制区外人员可达处，距屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ；控制区内房间屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ；如控制区内屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，则其屏蔽体外 30cm 处的周围剂量当量率 $\leq 10\mu\text{Sv/h}$ ；通风橱、注射窗等屏蔽结构体外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ，通风橱非正对人员操作位表面的周围剂量当量率 $\leq 25\mu\text{Sv/h}$ 。 小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统机房屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ 。废物桶表面周围剂量当量率 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$	工作台、设备、墙壁、地面： 控制区： $\beta \leq 40\text{Bq/cm}^2$ ； 监督区： $\beta \leq 4\text{Bq/cm}^2$ ；	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 天后直接解控排放。	实验场所保持良好的通风，工作场所的气流流向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。 放射性物质的分装应在通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏。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。通风橱应有足够的通风能力。通风橱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。	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。
	剂量约束值： 辐射工作人员 $\leq 5\text{mSv/a}$ ； 公众人员 $\leq 0.1\text{mSv/a}$			手、皮肤、内衣、工作袜： 控制区和监督区： $\beta \leq 0.4\text{Bq/cm}^2$			
标准依据	《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）与《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）	《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）	《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）	《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）与《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（国家核安全局，辐射函[2023]20 号）		

注：上表中标*小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统设备管电压和管电流与口腔 CBCT 相当，本次评价机房要求参照口腔 CBCT 卧位机房的相关标准要求。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理和场所位置

本项目地理位置位于江西省南昌市红谷滩新区学府大道 999 号南昌大学前湖校区实验动物科学中心一层，详见图 1-1。

为了调查评价项目及周边环境质量现状，环评单位技术人员于 2024 年 7 月 16 日到评价项目现场进行了资料收集、环境现状调查。

评价项目所在场所环境现状照片见图 8-1。



环评工程师踏勘



垫料库（现状）



动物尸体房（现状）



拟建场所南侧器械库



拟建场所南侧半成品间



拟建场所楼上设备间



拟建场所西侧走廊



控制室（现状）



拟建场所楼上仓库



实验动物科学中心



实验动物科学中心东侧道路



实验动物科学中心北侧道路



实验动物科学中心南侧道路



实验动物科学中心西侧道路

图 8-1 项目拟建的辐射工作场所及周边用房现状照片

8.2 环境质量和辐射现状

为掌握项目所在地的辐射环境现状，学校委托江西省地质局实验测试大队于 2024 年 7 月 16 日对拟建项目所在位置周边可达区域进行了辐射环境现状监测，监测报告见附件 4。

8.3 监测方案与监测因子

由于本项目为核技术利用建设项目，本项目拟使用的核素半衰期很短，拟建核技术利用场所周围 50m 范围内无本项目以外的其他非密封放射性物质应用，故本项目不对实验动物科学中心及周围环境的大气、地表水、底泥、土壤等环境介质中与本项目相关的放射性核素进行取样检测，不对 β 表面污染进行监测，本次评价环境现状监测因子为环境 γ 辐射剂量率。

8.4 监测布点原则及监测点布置

本项目建设内容为：使用Ⅲ类射线装置，使用丙级非密封放射性物质工作场所，属于放射性同位素与射线装置应用项目。根据学校提供资料以及现场踏勘可知，学校目前仅开展了Ⅲ类射线装置应用项目，未使用非密封放射性物质，本次评价环境现状监测因子为环境 γ 辐射剂量率。

根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）、《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）中的相关要求，对拟建辐射工作场所中已存在的辐射水平进行环境 γ 辐射剂量率本底监测。监测点位布设满足《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）、《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）相关要求，监测点位具有代表性、布设较为合理。

监测布点图见图 8-2 和图 8-3 所示。

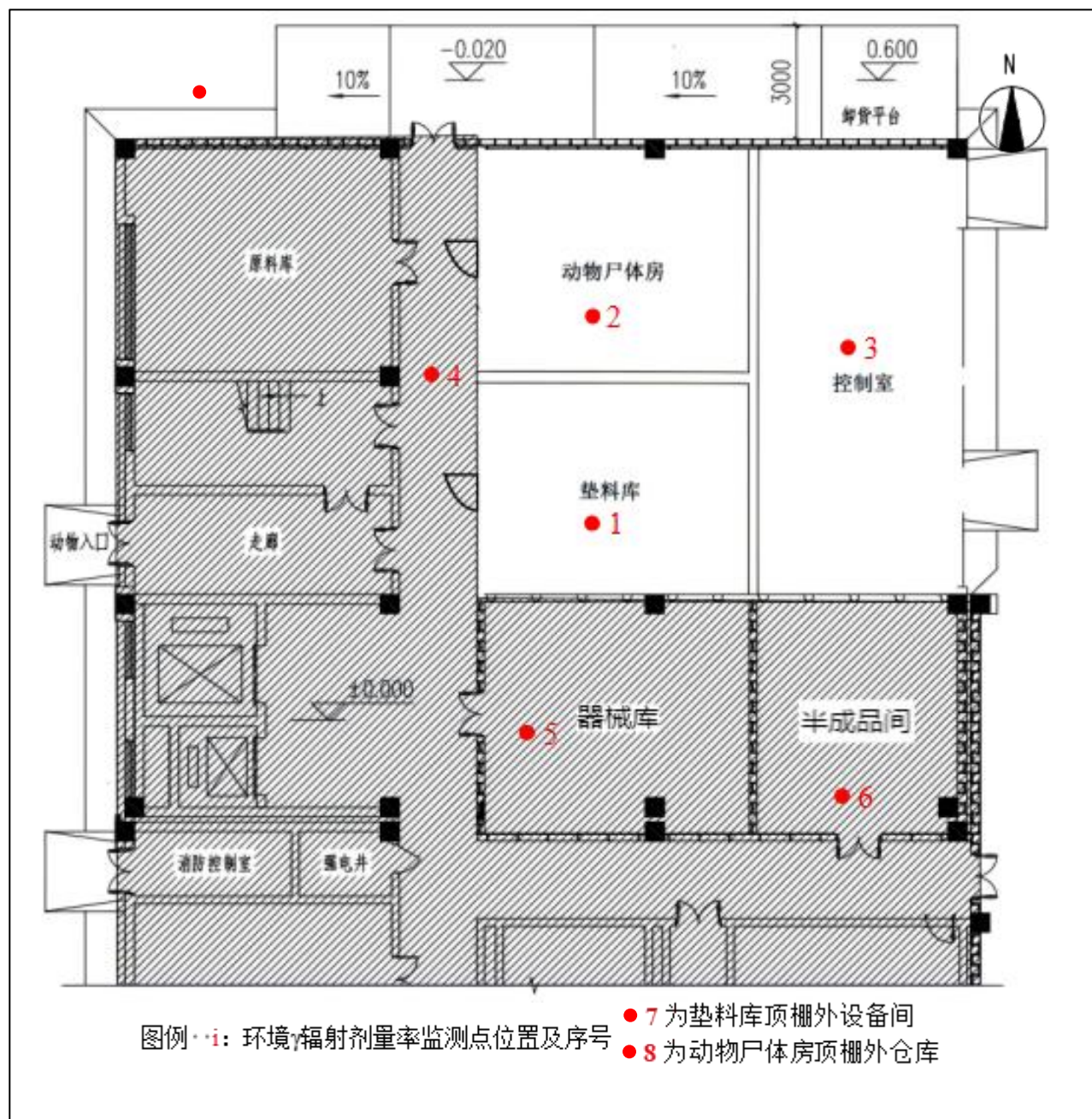


图 8-2 本项目拟建场址周边环境 γ 辐射剂量率监测布点示意图



图例 ●i: 环境γ辐射剂量率监测点位置及序号

图 8-3 本项目拟建场址周边环境 γ 辐射剂量率监测布点示意图

8.5 监测仪器与规范

本项目电离辐射监测仪器的参数与规范见表 8-1。

表 8-1 γ辐射剂量率监测仪器与监测规范表

仪器名称	便携式 X、γ辐射周围剂量当量率仪
仪器型号及编号	FH40G（主机）+FHZ 672 E-10（探头），F117
生产厂家	Thermo SCIENTIFIC
测量范围	1nSv/h-100μSv/h
能量响应范围	40keV-4.4MeV（探头）
监测规范	《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021） 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）
监测单位	江西省地质局实验测试大队
监测时间	2024 年 7 月 16 日
校准证书编号/校准日期	2024H21-10-5242823001 / 2024 年 05 月 14 日
校准单位	上海市计量测试技术研究院/华东国家计量测试中心

8.6 质量保证措施

- (1) 合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性，同时满足标准要求。
- (2) 监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗。
- (3) 监测仪器每年定期经计量部门检定/校准，检定/校准合格后方可使用。
- (4) 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常。
- (5) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录。
- (6) 监测报告严格实行三级审核制度，经过校对、校核，最后由授权签字人审定。

8.7 工作场所周围环境辐射环境质量现状监测结果

本项目拟建辐射工作场所周围辐射环境现状监测结果见表 8-2，监测报告见附件 4。

表 8-2 本项目拟建辐射工作场所周围环境 γ 辐射剂量率监测结果

序号	设备名称	监测位置	γ 辐射空气吸收剂量率 (nGy/h)			备注
			开/关机	测量结果	标准偏差	
1	小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统	垫料库	/	88.4	0.7	室内（楼房）
2		动物尸体房	/	99.1	1.9	室内（楼房）
3		控制室	/	115	2	室内（楼房）
4		拟建场所西侧走廊	/	115	2	室内（楼房）
5		拟建场所南侧器械库	/	96.3	1.2	室内（楼房）
6		拟建场所南侧半成品间	/	99.9	1.3	室内（楼房）
7		垫料库顶棚外设备间	/	109	2	室内（楼房）
8		动物尸体房顶棚外仓库	/	134	1	室内（楼房）
9		拟建场所北侧空地	/	92.9	0.7	室外
10		拟建场所东侧空地	/	83.8	0.9	室外
11		拟建场所南侧空地	/	103	1	室外
12		拟建场所西侧实验楼	/	112	1	室内（楼房）

注：①表中监测结果已根据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）扣除仪器对宇宙射线的响应值11.3nGy/h。②根据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021），空气比释动能和周围剂量当量的换算系的转换因子是1.2Sv/Gy。仪器校准因子是1.13。③现场监测为室内（楼房）和室外空地，建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子分别取0.8和1。④仪器宇宙射线测量地为庐山西海中心水面上（东经115.8°，北纬28.9°，海拔70m），依据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）修正后宇宙射线响应值为11.3nGy/h，修正前宇宙射线响应值11.3nGy/h，具体见监测报告见附件10。

8.8 环境现状调查结果的评价

表 8-2 监测结果表明，本项目拟建场址及周边用房室外的环境 γ 辐射剂量率在 83.8nGy/h~103nGy/h 之间，略高于南昌市辐射环境本底范围值，但处于江西省辐射环境本底范围值内，拟建核技术利用场所周围 50m 范围内无本项目以外的其他非密封放射性物质应用。室内的环境 γ 辐射剂量率在 88.4nGy/h-134nGy/h 之间，处于南昌市辐射环境本底范围值内。（注：江西省室外辐射环境本底范围值 12.6~369.4nGy/h，室内辐射环境本底范围值 33.4~365.8nGy/h；南昌市室外道路 γ 辐射环境本底范围值 27.9~78.1nGy/h，室内辐射环境本底范围值 58.1~134.3nGy/h，来源于《中国环境天然放射性水平》（中国原子能出版社，2015 年 7 月第 1 版））

因此，可知拟建场址及周围辐射环境质量现状较好，未见异常。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 工程设备和工艺分析

9.1.1 设备组成

本项目小动物实验室拟使用的射线装置为小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统(厂家为 Molecubes)，该系统为桌面模块化设计，包括 β CUBE (PET)、 γ CUBE (SPECT)、X CUBE (CT) 及 PMOD 软件(图像处理及分析)，三台设备相互独立，这种分体式的结构设计大大提高了整个成像系统的设备使用率，各个成像模块可以同时运行，不会相互影响；高精度的小动物载物床设计使得成像物体能够方便地不同成像模块间转移，并实现自动高精度(mm)的配准。

其中 β CUBE(PET)、 γ CUBE(SPECT)尺寸均为 $54 \times 54 \times 54 \text{ cm}^3$ ，设备无自屏蔽。X CUBE (CT) 尺寸为 $54 \times 54 \times 56.7 \text{ cm}^3$ ，设备六面均为 3mm 铅板自屏蔽，机架环绕铅挡块。三台设备正面均设有进样口，用于载物床进出，底部均设有检修口。设备宣传展示图见图 9-1。



图 9-1 本项目 Molecubes 小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统宣传展示图

β CUBE (PET)：PET 由机架、载物床、操作工作站、分析工作站及打印设备等组成，这些部件协同工作，完成从数据采集到图像生成的全过程。其中机架是 PET 的核心部件，由探测器环、棒源、射线屏蔽装置、事件探测系统、符合线路和激光定位器组成，主要负责数据采集。PET 探头由多个探测器阵列排列成环形结构，采用高密度晶体，这些晶体被切割成微小方块，与光电倍增管组成探测器组块。探测器环数越多，轴向视野越大，一次采集获得的断层面也越多。

γ CUBE (SPECT)：SPECT 基本构造由探头、旋转运动机架、计算机及其辅助设备等三大部分构成。探头包括准直器、晶体、光电倍增管及模拟定位计算电路。准直器是由具有单孔或多孔的铅或铅合金块构成，位于探头的最外层，起到空间定位选择器的作用。晶体的作用是将 γ 射线转化为荧光光子，位于准直器和光电倍增管之间。光电倍增管的作用是

将微弱的光信号按比例转换成电子并倍增放大成易于测量的电信号，主要由光阴极、多级倍增极、电子收集极(阳极)组成。模拟定位计算电路与光电倍增管相连接。其主要作用是将光电倍增管输出的电脉冲信号转换为确定晶体闪烁点位置的 X、Y 信号和确定入射 γ 射线的能量信号。

X CUBE (CT) : CT 主要包括扫描架（装有 X 线球管、滤线器、准直器、参考探测器、探测器及各种电子线路等）、载物床、X 线高压发生器等组成。其中产生 X 射线的装置主要由 X 射线管和高压电源组成。X 射线管由安装在真空玻璃壳中的阴极和阳极组成（详见图 9.1-9），阴极是钨制灯丝，它装在聚焦杯中，当灯丝通电加热时，电子就“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚集成束，直接向嵌在金属阳极中的靶体射击。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成。高电压加在 X 射线管的两极之间，使电子在射到靶体之前被加速达到很高的速度，这些高速电子到达靶面为靶所突然阻挡从而产生 X 射线。

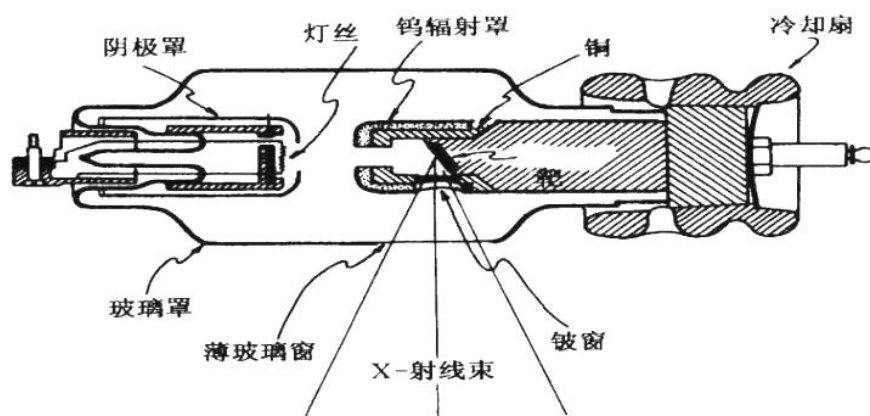


图 9-2 典型 X 射线管结构图

本项目拟使用的放射性核素为 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 均为外购药物。由于 ^{18}F 半衰期很短且用药量较大，实验人员订药后在药品缓冲间传递窗处取药并放置于储源间储源箱内，使用时将药物转运至生物操作间通风橱内，需在通风橱中手动进行药物分装。

9.1.2 工作原理

本项目 Molecubes 小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统包括 β CUBE (PET)、 γ CUBE (SPECT)、X CUBE (CT)。

β CUBE (PET) : 与临床用 PET 系统相比，其系统空间分辨率和灵敏度较临床用 PET 更高，以适应小体积动物模型研究的要求。其原理为标记上短衰变周期的放射性核素（本项目为 ^{18}F ）的显像剂（如氟代脱氧葡萄糖，FDG），注入生物体内后，在衰变过程中释放出正电子，一个正电子在行进十分之几毫米到几毫米后遇到一个电子后发生湮灭，从而产生方向相反（180 度）的一对能量为 0.511MeV 的高能 γ 光子。这对光子，通过高度灵敏的

照相机捕捉，并经计算机进行散射和随机信息的校正。经过对不同的正电子进行相同的分析处理，我们可以得到显像剂在生物体内聚集情况的三维图像。PET 是可在活体上显示生物分子代谢、受体及神经介质活动的新型影像技术，现已广泛用于多种疾病的诊断与鉴别诊断、病情判断、疗效评价、脏器功能研究和新药开发等方面。具有灵敏度高、特异性高、全身显像、安全性好等特点。原理示意图见图 9-3。

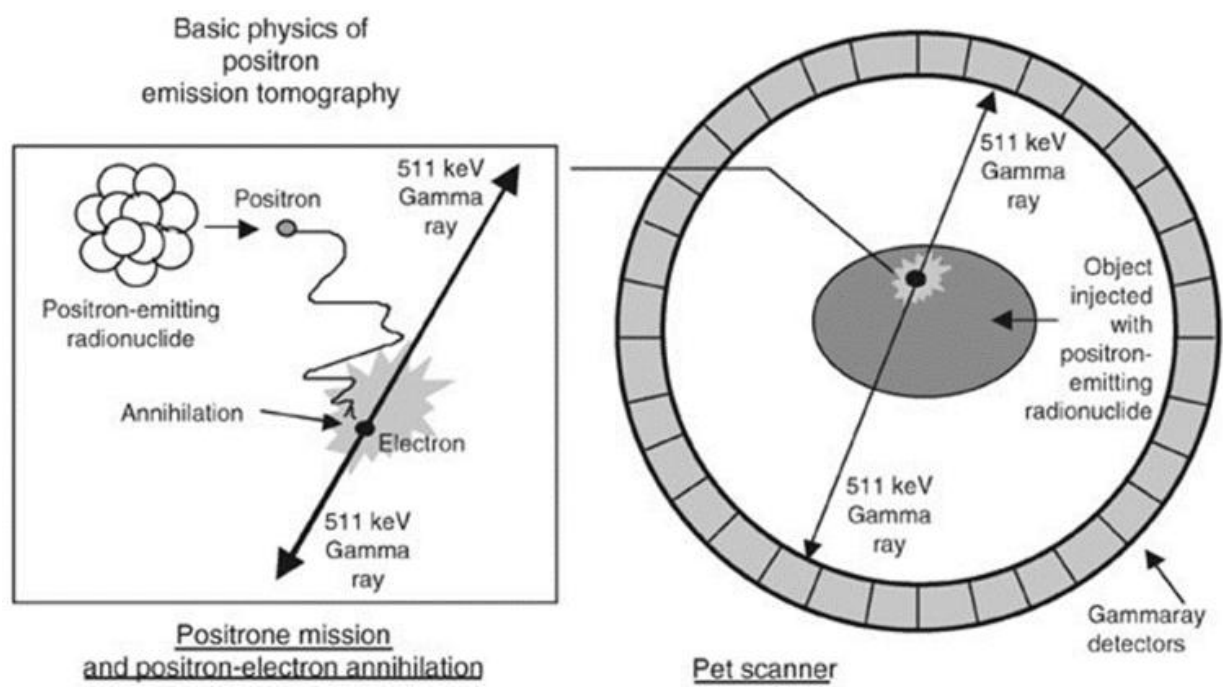


图 9-3 β CUBE (PET) 原理示意图

γ CUBE (SPECT)：首先生物体需要摄入含有半衰期适当的放射性同位素（本项目为 ^{99m}Tc ）显像剂，显像剂到达所需要成像的断层位置后，由于放射性衰变，将从断层处发出 γ 光子，位于外层的 γ 照相机探测到透过准直器的 γ 光子，通过闪烁体将探测到的高能 γ 射线转化为能量较低但数量很大的光信号，通过光电倍增管将光信号转化为电信号并进行放大，再经模拟/数字转换器转为数字，输入计算机处理。就可以得到显像剂在生物体内聚集情况的三维图像。原理示意图见图 9-4。

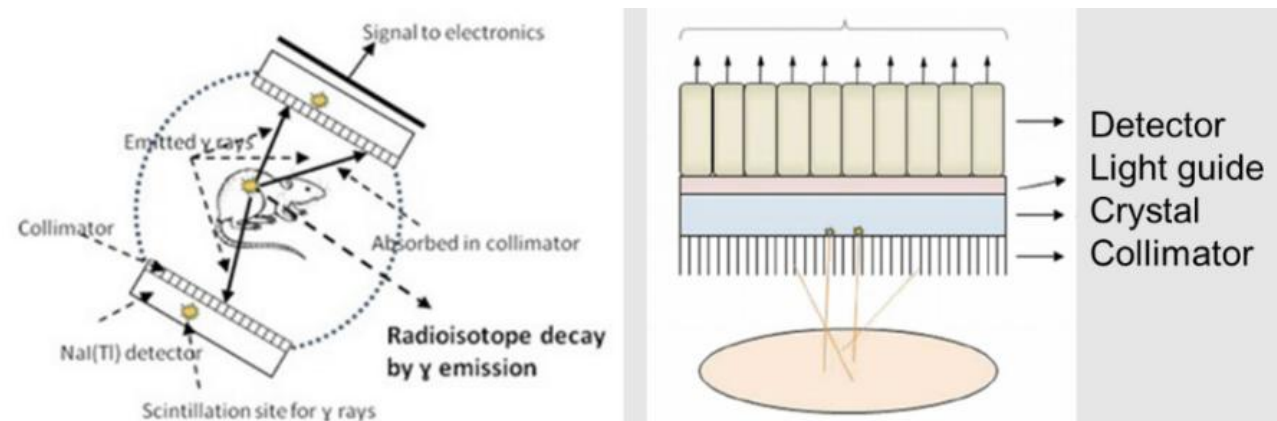


图 9-4 γ CUBE (SPECT) 原理示意图

X CUBE (CT)：小动物 CT 是用 X 射线束对生物体某部位一定厚度的层面进行扫描，根据不同组织对 X 线的吸收与透过率的不同，由探测器接收透过该层面的 X 射线，转变为可见光后，由光电转换为电信号，再经模拟/数字转换器转为数字，输入计算机处理。计算机对数据进行处理后，就可摄下生物体被检查部位的断面或立体的图像，尤其适合于对骨骼等部位进行成像。原理示意图见图 9-5。

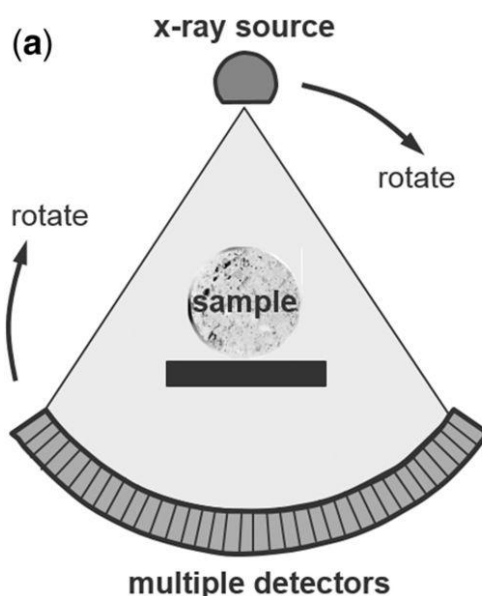


图 9-5 X CUBE (CT) 原理示意图

9.1.3 实验流程

根据学校提供资料可知，本项目小动物实验所用的正电子放射性核素为 ^{18}F ，发射单光子的核素药物为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，实验动物为鼠类。本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统最高通量可满足 4 只小鼠或 1 只大鼠的高分辨率全身成像效果，实验过程如下：

① 药物准备

小动物实验室根据不同的实验分组、实验目的通过预约的方式拟向厂家购买放射性核素 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，实验人员订药后在物品缓冲间传递窗处取药并放置于储源间储源箱内，使用时将药物转运至生物操作间通风橱内。进行实验动物注射时，实验人员需在分装通风橱内中手动进行药物分装。

② 小动物实验

将小鼠放入准备装置上麻醉后，在生物操作间（给药室）通过静脉注射放射性药物： ^{18}F 给药量范围为 0.05~0.5mCi， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 给药量范围为 0.2~5mCi。然后分别于给药后不同时间将小动物在麻醉状态下固定于载物床上，摆位合适后置于 β CUBE (PET) 或 γ CUBE (SPECT) 内，进行显像，采集时间一般为 5~10 分钟，PET 或 SEPCT 为了缩短操作时间，在上一批扫描期间，提前把下一批动物提前准备好，放进麻醉箱。显像完毕后将载物床取出后置于 X

CUBE (CT) 内进行扫描, CT 采集时间一般为 2s 之内。

小鼠处死后解剖取材时间一般为 15 分钟。注射后小动物暂存间饲养笼内垫料及其他放射性固体废物收集及转运时间一般为 10 分钟。

③ 小动物处置

图像采集结束后将小动物直接处死 (或解剖) 或放置于注射后小动物暂存间暂养的鼠笼内, 鼠笼铺设垫料吸附小动物排泄物, 若实验需暂养小鼠进行观察, 则将相关实验小鼠置于注射后小动物暂存间的动物饲养笼内, 实验结束后处死 (或解剖), 无需暂养的小动物则直接处死 (或解剖) 后收集装袋, 贴上标签, 注明实验者姓名、所用核素、总活度和时间等信息, 置于废物间有铅屏风屏蔽的冷冻冰柜暂存。使用后手套、棉签和注射器 (在去除针头后) 等投入固体放射性废物桶内。

实验流程及产污环节见图 9-6。相关人员、药物等路径见图 10-2。本项目动物分子影像中心放射性核素使用流程见表 9-1。

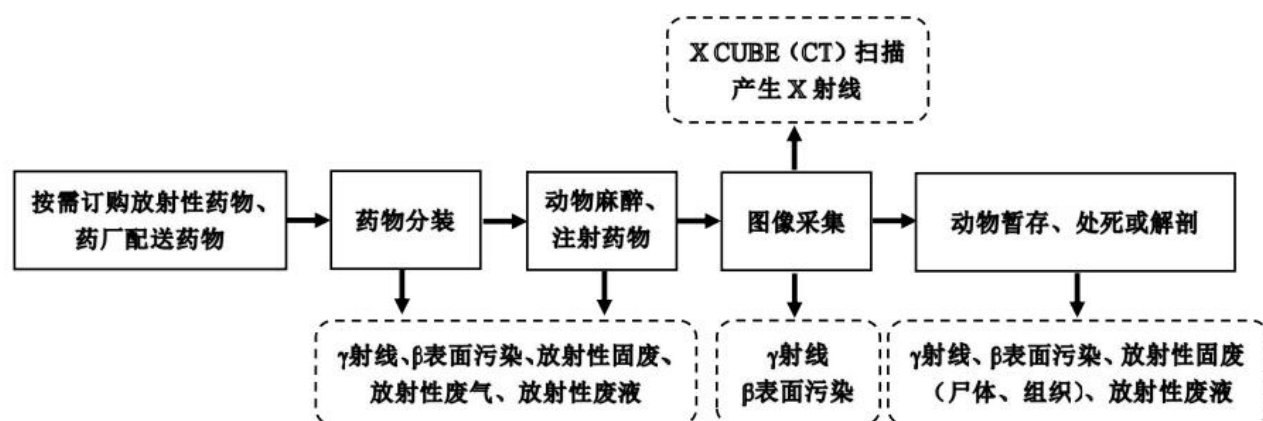


图 9-6 本项目动物 PET/SPECT/CT 显像实验流程及产污环节示意图

表9-1 小动物实验放射性核素使用流程

序号	核素名称	项目	简单流程	γ 射线外照射	表面污染	气体废物及处置	液体废物及处置	放射性固体废物及处置
1	^{18}F	PET/CT 显像	放射性药物分装 ↓ 小动物 PET/CT 显像实验	在放射性药物分装、注射、进行小动物PET/CT显像实验、解剖及放射性废物收集、转运产生的外照射	对解剖器皿、测量器皿、地面、墙壁、实验人员手、皮肤、工作服等污染	少量滴漏 →产生放射性气溶胶→通风橱、排气口活性炭吸附装置吸附→楼顶室外大气	分装操作产生的去污洗涤液，排入衰变池中，在衰变池贮存衰变满足HJ1188 标准要求后，排入学校污水处理站，后进入城市污水管网	①废药瓶连同包装铅罐由供货厂家回收； ②手套、一次性垫纸(注射台上)、注射器、吸水纸、包裹用具的塑料膜、一次性吹气管等放置在放射性废物桶中暂存衰变，满足标准解控水平后，按医疗废物处理； ③注射药物后的解剖、处死的小动物尸体或组织，放置在有铅屏风防护的冰柜内暂存衰变，满足标准解控水平后，按医疗废物处理。 ④注射药物后的小动物排泄物通过吸水垫吸取或擦拭转为放射性固体废物，放置在放射性废物桶中暂存衰变，满足标准解控水平后，按医疗废物处理。
2	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	SPECT/CT 显像	放射性药物准备 ↓ 小动物 SPECT/CT 显像实验	在放射性药物分装、注射、进行小动物SPECT/CT显像实验、解剖及放射性废物收集、转运产生的外照射				

9.1.4 放射性核素用量

根据学校提供资料，本项目小动物实验室拟配备辐射工作人员 4 人，2 名实验员负责小动物实验室动物转运、放射性药物分装、注射、动物处死（或解剖）等辐射工作，2 人负责动物摆位、扫描以及成像实验。上述人员仅从事本项目相关小动物实验，不从事其他放射性核素及射线装置实验内容，故不涉及剂量叠加。

本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统最高通量满足 4 只小鼠或 1 只大鼠的高分辨率全身成像效果，若当日实验为 20 只小鼠，则当日摆位及显像、扫描次数最多为 5 次；若当日实验为 20 只大鼠，则当日摆位及显像、扫描次数为 20 次，故计算时保守按 20 次进行。

本项目小动物实验室每周开展小动物研究最大数量 40 只，其中利用 ^{18}F 进行 PET/CT 显像及扫描研究最大数量 20 只，利用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行 SPECT/CT 显像及扫描最大数量 20 只。小动物日最大注射数量为 20 只且当日仅注射一种核素。故年最大实验小动物数量 2000 只。

药物分装时间约 1min/次（33h/a），每只实验白鼠药物注射时间约 30s/次（16.7h/a），摆位时间约 30s/只（16.7h/a）；

PET 显像时间按 10min/只（167h/a），SPECT 显像时间按 10min/只（167h/a），CT 扫描时间最大约 2s/只（1.1h/a）；

注药后动物转运约 2min/只（66.7h/a）。小鼠处死后解剖取材时间一般为 15min/只（500h/a）。注射后小动物暂存间饲养笼内垫料及其他放射性固体废物收集及转运时间一般为 10 分钟/次（333.3h/a）。

本项目拟使用 ^{18}F 进行 PET 显像单只动物最大给药量为 0.5mCi，拟使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行 SPECT 显像单只动物最大给药量为 5mCi。

本项目小动物实验室拟使用的非密封放射性物质主要为 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，拟使用的核素用量需求见表 9-2。

表 9-2 小动物实验室动物放射性实验核素需求一览表

序号	核素名称	单只小动物最大给药量（MBq）	日最大工作量（只）	周最大工作量（只）	年工作时间（周）	主要用途	来源
1	^{18}F	18.5	20	20	50	PET 显像	外购
2	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	185	20	20	50	SPECT 显像	外购

9.2 污染源项

9.2.1 非密封放射性物质工作场所

本项目使用的各核素的半衰期、衰变方式等情况见表 9-3。

表 9-3 小动物实验室拟使用非密封放射物质相关参数一览表

序号	核素名称	放射性半衰期	毒性分组	衰变方式及(分支比)	主要射线及能量(MeV) (分支比)	周围剂量当量率常数(裸源) ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)
1	^{18}F	109.8min	低毒	β^+ (97%)、EC (3%)	β^+ 0.635	0.143
2	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.02h	低毒	同质异能跃迁	γ 0.14[88.5%]	0.0303

注：上表中各核素相关参数取值来源于《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中表 H.1 和《辐射安全手册》中表 6.2。

(1) 正常工况

本项目非密封放射性物质使用过程中产生的主要放射性污染物和污染途径如下：

- ①放射性药品 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发射的 β 、 γ 射线。
- ②放射性药品使用过程中产生的 β 表面污染。
- ③放射性废水：动物实验药物分装、注射、实验过程以及注药后动物暂养过程清洗去污可产生放射性废液。
- ④放射性固体废物：手套、一次性垫纸(注射台上)、注射器、吸水纸、包裹用具的塑料膜、一次性吹气管，动物实验过程产生动物尸体、垫料（含动物排泄物）、解剖过程产生的固体污染物。
- ⑤放射性药品给药过程中产生的微量放射性气溶胶。
- ⑥辐射工作场所通风系统过滤装置更换下来的废弃的活性炭过滤芯。
- ⑦动物注射放射性药物后，短时间内动物便是一个辐射（源），对周围的环境可能造成 γ 外照射。

(2) 事故工况

该评价项目使用的非密封放射性物质主要发生的放射性污染有：

- ①操作放射性药物时发生容器破碎、药物泼洒等意外事件，可能污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成手和皮肤的污染。泼洒的药物挥发将产生少量放射性废气，擦除污染物将产生少量的放射性固体废物。
- ②密闭通风橱通风失效，造成放射性废气弥散到室内空气中。
- ③保管不善，放射性物品被盗，流失到社会，对局部环境产生污染，并可能使部分公众受到照射。
- ④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。

⑤放射性固废或放射性废水未达到解控水平或排放标准即进行处理。

9.2.2 小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统（CT 部分）

（1）正常工况

本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统 X CUBE（CT）为 III 类射线装置，该设备含自屏蔽设计且在采取隔室操作、设备安全和防护硬件及措施到位的正常情况下，显像机房外的工作人员及公众基本上不会受到 X 射线的照射。同时，射线装置运行过程中，在 X 射线辐射源的照射下，空气吸收辐射能量并通过电离离子的作用可产生臭氧和氮氧化物。臭氧和氮氧化物均属具有刺激性作用的非放射性有害气体。上述射线装置机房均拟设置机械排风装置，可最大限度降低有害气体的浓度。

（2）事故工况

在使用小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统 X CUBE（CT）发射 X 射线进行扫描时，人员误入显像室引起误照射。

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全设施

10.1.1 III类射线装置

(1) 工作场所布局以及分区

本项目III类射线装置为小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统。显像机房位于实验动物科学中心一楼，机房北面为控制区走廊，东面为生物操作间（给药室），南面为器械库，西面为操作间，楼上为设备间，楼下为土层。

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求：应把放射性工作场所分为控制区、监督区以便于辐射防护管理和职业照射控制；需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，对控制区运用行政管理程序（如工作许可证制度）和连锁装置限制进入；监督区通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价。

本项目将小动物实验室注射后小动物暂存间、测量间、废物间、显像机房、生物操作间（给药室）、物品缓冲间、储源间及控制区走廊划为控制区，工作场所北墙及东墙外 30cm 划为监督区，将注射前小动物暂存间、缓冲间、去污间、操作间、器械库、半成品间划为监督区，并在防护门门口设置电离辐射警告标志，在显像机房北侧防护门设置工作状态指示灯等，以防止和避免人员误闯入或误照。小动物实验室区域平面布置及分区见图 10-1。

(2) 辐射安全与防护措施

依据建设单位提供的设计方案，现将显像机房的主要技术参数列表分析，并根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中对 X 射线机房防护设计的技术要求、最小有效使用面积及最小单边长度要求对本次评价项目的实际防护措施对照分析，结果见表 10-1。

表 10-1 III类医用 X 射线装置机房防护措施情况一览表

项目		辐射防护情况	标准要求	评价
显像机房	墙体	东墙：24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡 （相当于 5.70mmPb） 其他墙体：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 （相当于 3.70mmPb）	口腔 CBCT 卧位机房：有用线束方向铅当量 2.0mmPb、非有用线束方向铅当量 1.0mmPb；	符合
	顶棚	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板 （相当于 5.51mmPb）		符合
	防护门、观察窗	防护门 4mmPb 西侧观察窗:4mmPb；东侧观察窗:6mmPb		符合
	机房大小	21.78m ² （5.5m×3.96m）	口腔 CBCT 坐位扫描机房：机房内最小有效使用面积 5m ² ，机房内最小单边长度 2.0m；	符合

(续) 表 10-1 III类医用 X 射线装置机房防护措施情况一览表

项目	辐射防护情况	标准要求	评价
机房通风	机房设计排气装置, 保证通风状况良好	机房应设置动力排风装置, 并保持良好的通风。	符合
X 射线设备机房布局	本项目显像机房四周很少有人停留, 机房屏蔽墙体、门、窗均设计采取符合标准要求的防护措施, 机房(照射室)充分考虑邻室(含楼上)及周围场所的人员防护与安全。射线装置有用线束避免了直接照射门、窗、管线口和作人员操作位。	应合理设置 X 射线设备、机房的门、窗和管线口位置, 应尽量避免有用线束直接照射门、窗、管线口和工作人员操作位。	符合
		X 射线设备机房(照射室)的设置应充分考虑邻室(含楼上和楼下)及周围场所的人员防护与安全。	符合
		每台固定使用的 X 射线设备应设有单独的机房, 机房应满足使用设备的布局要求。	符合
X 射线设备工作场所防护措施	本项目显像机房机房在操作室侧设置观察窗, 观察窗位置便于观察到小动物状态及防护门开闭情况。	机房应设有观察窗或摄像监控装置, 其设置的位置应便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。	符合
	显像机房内不堆放与该设备诊断工作无关的杂物。	机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。	符合
	显像机房防护门门外拟设置电离辐射警告标志; 显像机房出入防护门上方设置醒目的工作状态指示灯, 灯箱上设置“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句。	机房门外应有电离辐射警告标志; 机房门上方应有醒目的工作状态指示灯, 灯箱上应设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句; 候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。	符合
	显像机房平开机房门(西侧)拟设置自动闭门装置, 推拉式机房门(北侧)拟设置曝光时关闭机房门的管理措施; 拟设置门灯联锁, 工作状态指示灯能与机房门有效关联。	平开机房门应有自动闭门装置; 推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施; 工作状态指示灯能与机房门有效关联。	符合
	电动推拉门设置防夹装置。	电动推拉门宜设置防夹装置。	符合
	机房出入门处于散射辐射相对低的位置。	机房出入门宜处于散射辐射相对低的位置。	符合
注: ①混凝土的密度 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$; 砖的密度为 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$; 铅的密度为 $11.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。 ②由于本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统管电压为 50kV , 管电流为 0.5mA , 远小于普通医用 CT 的能量, 设备参数与口腔 CBCT (一般管电压为 $50\sim 90\text{kV}$, 管电流 $2\sim 10\text{mA}$) 相当, 故本次评价显像机房按口腔 CBCT 卧位机房进行符合性分析。 ③上表中屏蔽物质的铅当量均根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 中附录 C 及 NCRP Report No.147《Structural Shielding Design For Medical X-ray Imaging Facilities》附录 A 计算而来。			

本项目显像机房内有效使用面积、最小单边长度均大于标准要求, 机房的屏蔽措施、设施充分考虑邻室(含楼上)及周围场所的人员防护与安全, 且屏蔽厚度均高于有用线束和非有用线束铅当量防护厚度标准规定值, 机房的防护设施的技术要求满足《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 中的相关防护设施的技术要求。

10.1.2 非密封放射性物质工作场所

(1) 工作场所布局

实验动物科学中心一楼小动物实验室开展的项目包括小动物 PET 和 SPECT 显像，周围环境：其北侧为室外空地；东侧为室外空地；南侧为器械库和半成品间；西侧为走廊；楼上为设备间和仓库。

小动物实验室自西向东、由北往南依次为缓冲间、去污间、注射前小动物暂存间、注射后小动物暂存间、测量间、废物间、缓冲间、控制区走廊、操作间、显像机房、生物操作间（给药室）、物品缓冲间、储源间。

小动物实验室衰变池：衰变池拟采用混凝土结构，位于小动物实验室控制区走廊北侧地下。

(2) 辐射工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 C 非密封放射性物质工作场所的分级规定，放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量（Bq）与该核素毒性组别修正因子的积除以与操作方式有关的修正因子所得的商。由《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）附录 A 可知，本评价项目的小动物实验室非密封放射性物质工作场所使用的各放射性核素的毒性组别修正因子、操作方式修正因子、日实际操作量和日等效操作量见表 10-2。

根据学校提供资料，PET 及 SPECT 显像每周最多各扫描 20 只小动物，每日仅进行一种核素实验，即每日每次最多购置 20 只小动物进行同种核素实验。因两种核素周显像数量均为 20 只，故上述日最大用量即为该种核素周最大用量且两种核素操作量不进行叠加。

表 10-2 小动物实验室使用的放射性核素日等效最大操作量一览表

序号	核素名称	日最大操作量（Bq）	毒性组别修正因子	操作方式	操作方式修正因子	日等效最大操作量（Bq）		场所等级
1	¹⁸ F	3.70×10 ⁸	低毒，0.01	很简单操作	10	3.70×10 ⁵	4.81×10 ⁵	丙级
		1.11×10 ⁹		源的贮存	100	1.11×10 ⁵		
2	^{99m} Tc	3.7×10 ⁹	低毒，0.01	很简单操作	10	3.70×10 ⁶	3.72×10 ⁶	
		1.85×10 ⁶		简单操作（设备校准）	1	1.85×10 ⁴		

由表 10-2 可见，本项目小动物实验室核素总的日等效最大操作量为 $3.72 \times 10^6 \text{Bq}$ ，属于丙级非密封放射性物质工作场所。

(3) 辐射工作场所辐射安全与防护分区管理

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求，对于使用非密封放射性物质的辐射工作场所，应进行分区管理。将高辐射和可能发生高污染的区域划定为控制区，将控制区外较低辐射的区域划定为监督区。

本项目将小动物实验室的显像机房、生物操作室（给药室）、物品缓冲间、储源间、控制区走廊、注射后小动物暂存间、测量间、废物间划分为控制区，将缓冲间、去污间、注射前小动物暂存间、操作间、器械库和半成品间、东墙及北墙外 30cm 划为监督区。

本项目小动物实验室工作场所控制区与监督区划分见图 10-1。

(4) 辐射工作场所工作场所各专用通道设置情况

本项目小动物实验室分别设计了工作人员通道、药物通道、废物通道及小动物路径，并规定了通行的路线和方向，各专用通道设置情况如下：

① 工作人员通道：

转运小动物及注射工作人员：小动物实验室工作人员经缓冲间进入控制区走廊，通过铅互锁传递窗取小动物，在生物操作间（给药室）对小动物进行麻醉，工作人员将药物从储源箱取出后置于通风橱内，并按剂量对小动物进行药物分装、注射，注射后小动物经铅互锁传递窗送至显像机房扫描，扫描结束后进入机房取出小动物送至注射后小动物暂存间。实验结束后，工作人员经洗消后由缓冲间检测表面污染合格后离开。

扫描工作人员：工作人员经走廊由西侧通道门直接进入操作间，由操作间进入显像机房给小动物摆位，摆位后原路返回。

② 药物路径：送药厂家经东侧通道门进入物品缓冲间，药物经落地铅防护传递柜存放至储源间内储源箱，实验时按需取出。

③ 小动物路径：小动物由场所西北角缓冲间送至注射前小动物暂存间。

④ 放射性废物路径：生物操作间（给药室）内拟设置放射性废物铅桶，用于注射器、纸巾等放射性固体废物的收集；实验后将放射性固体废物转移至废物间，待放射性废物至少衰变 30 天后，经审管部门确认后按一般医疗废物处理。被处死的小动物尸体及组织等拟装入专用尸体袋先暂存于废物间的铅桶内；待满足 HJ1188 要求的存放周期（30 天）后并经人工检测符合标准要求后，通过东侧门转移出动物实验区按普通医疗废物处理。小动物实验过程中产生的放射性废水（洗消、去污等）统一收集排入放射性废液衰变池，经暂存衰变至少 30 天以上满足相关标准要求后，先排入校区污水管网，再排入城市污水管网。

本项目小动物实验室工作场所各通道设置情况详见图 10-2。

(5) 辐射工作场所布局、分区、专用通道设置合理性分析

本项目辐射工作场所屏蔽体外 50m 范围均为实验动物科学中心内部用房、空地和道路，四周均较少有人员停留。辐射工作场所设计拟将放射性工作区域与非放射性工作区域严格分开，工作人员从非放射性工作区域进出放射性工作区域，需经过缓冲间进行淋浴更衣、去污监测等；工作人员出入口均设置了门禁系统，防止无关人员入内；放射性药物运输路线、废物的运输路线设计较为短捷，能确保药物运输、废物转移过程不对其他人员造成不必要的外照射。从控制区离开的人员和物品均应在缓冲间进行表面污染水平监测，如表面污染水平超出 GB 18871-2002 规定的表面污染控制水平，应采取相应的去污措施。

综上所述，本项目辐射工作场所布局有助于实施工作程序，控制区和监督区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求，各专用通道设置合理，故本项目辐射工作场所布局、分区以及通道设置合理可行。

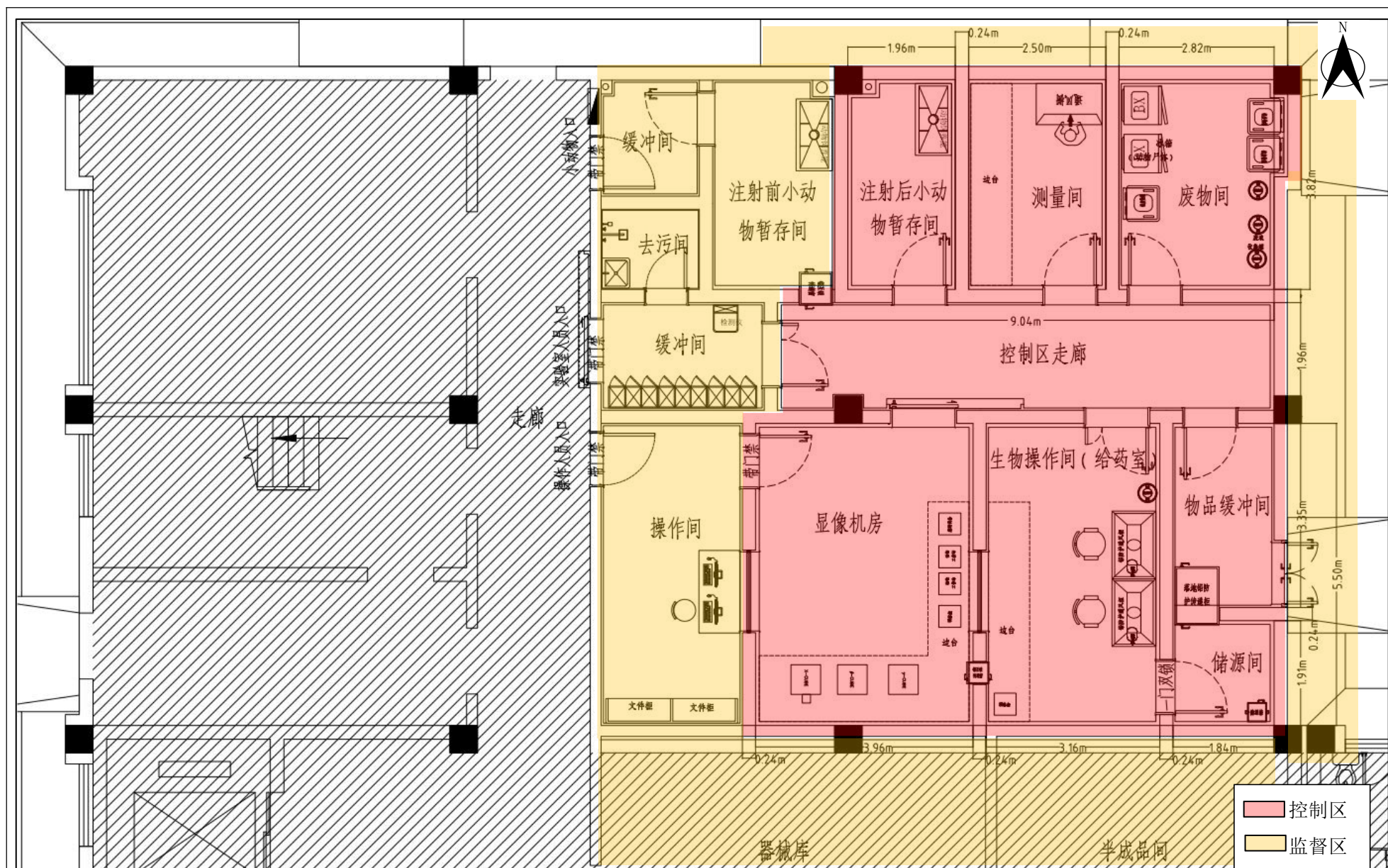
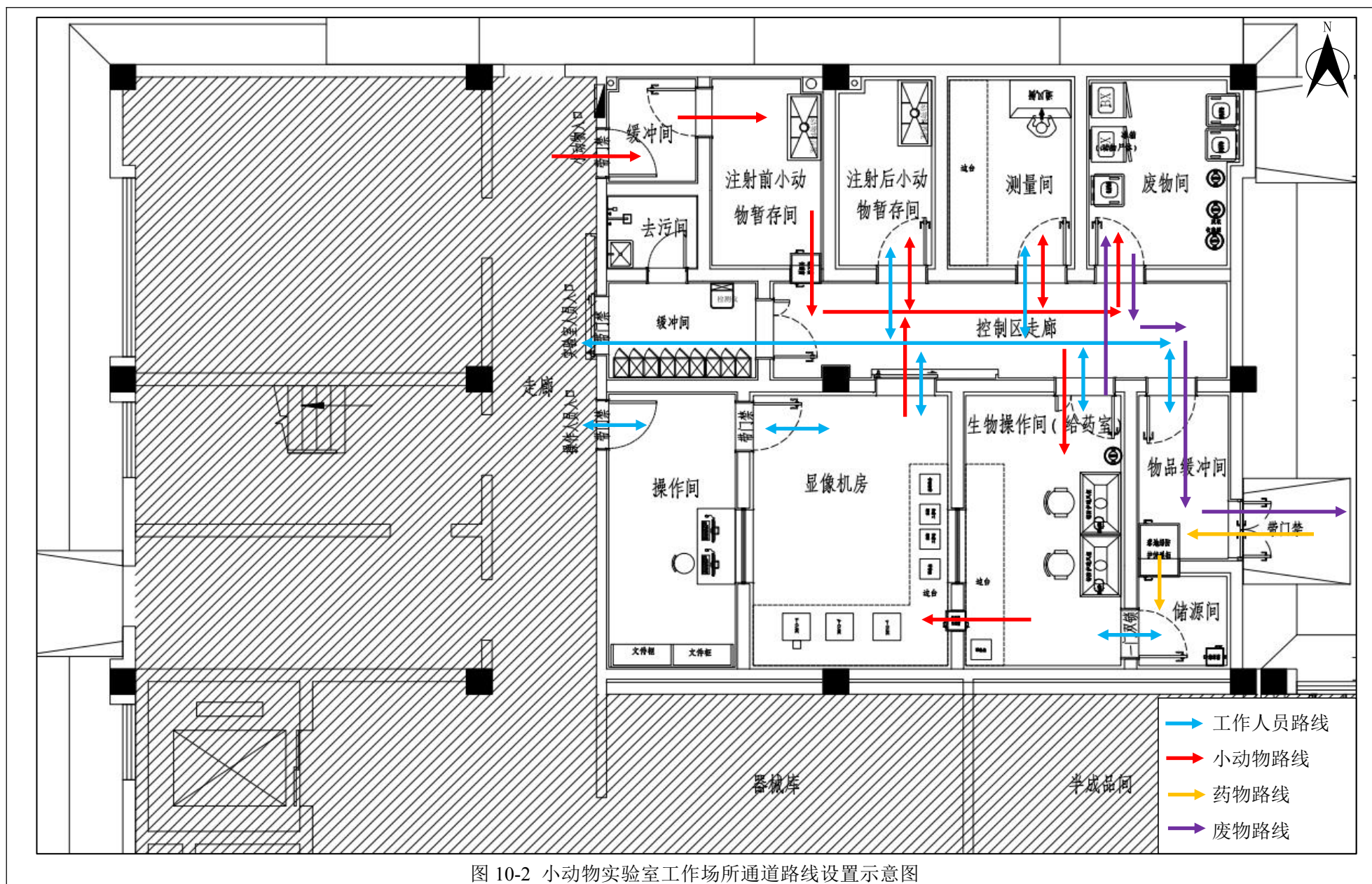


图 10-1 小动物实验室工作场所平面布置与分区示意图



10.1.3 辐射工作场所的辐射安全与防护措施及合理性分析

(1) 辐射工作场所辐射防护屏蔽设计

本项目小动物实验室辐射工作场所的相关墙体、顶板、地板以及观察窗、防护门的设计均采取了辐射屏蔽措施。根据学校提供的设计方案，本项目小动物实验室辐射工作场所拟采取的防护措施见表 10-3。

表 10-3 小动物实验室辐射工作场所防护措施一览表

功能室名称	墙	顶棚	门、窗
显像机房	东墙：24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡 北墙、南墙、西墙：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：4mmPb 西侧观察窗：4mmPb 东侧观察窗：6mmPb 传递柜：6mmPb
注射后小动物暂存间	东墙、西墙、南墙：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 北墙：24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：4mmPb
测量间	东墙、西墙、南墙：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 北墙：24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：4mmPb
废物间	北墙、东墙：24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡 西墙、南墙：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：4mmPb
控制区走廊	北墙、西墙、东墙：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 南墙：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡（显像机房、物品缓冲间部分）/24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡（生物操作间部分）	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：4mmPb
生物操作间（给药室）	东墙：24cm 实心砖墙+3mmPb 西墙、北墙：24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡 南墙：24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：6mmPb 传递柜：6mmPb
储源室	南墙、东墙：24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡 西墙、北墙：24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：6mmPb
物品缓冲间	东墙：24cm 实心砖墙 北墙：24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 西墙、南墙：24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板	防护门：4mmPb

注：楼下无建筑，为实土。

(2) 拟配备辐射防护用品及辐射安全警示设施和监测设备情况

① 辐射防护用品

根据国家标准要求，动物实验过程中相关辐射工作人员应配备防护用品，以减少不必要的照射。本项目小动物实验室拟配备的辐射防护设备及用品详见表 10-4。

表 10-4 小动物实验室辐射防护用品一览表

位置	名称	数量	铅当量	备注
显像机房	防护屏	1 个	20mmPb	/
注射后小动物暂存间	防护鼠笼	10 个	3mmPb	/
废物间	铅废物桶	2 个	10mmPb	直径≥290mm，高度≥490mm；有效容积：≥30L
	防护冰柜	1 个	10mmPb	尺寸≥650*550*1200mm
生物操作间（给药室）	通风橱	1 台	30mmPb	外部尺寸≥1240*1020*2400mm
	铅废物桶	2 个	10mmPb	直径≥290mm，高度≥490mm；有效容积：≥30L
	防护注射器	4 个	≥20mmPb	/
	铅背心、铅帽、铅围脖、铅眼镜	1 套	0.5mmPb	/
	铅手套	1 副	0.025mmPb	/
	铅转运盒	4 个	10mmPb	/
	铅盒	1 个	40mmPb	/
储源室	储源箱	1 个	30mmPb	尺寸≥460*450*600 mm
缓冲间、去污间	去污用品	在缓冲间和去污间设有足够的相关放射性药物的去污用品，包括放射性污染防护服、一次性手套、口罩、胶鞋、去污剂；托盘、镊子、钳子、标记笔、刷子、一次性吸水毛巾或纸巾、塑料袋、标签、胶带、电离辐射警告标志等。		

② 辐射安全警示设施和监测设备

本项目拟在辐射工作场所控制区各功能房间门外设置电离辐射警告标志，警示人员注意安全。在显像机房的防护门上方设置工作状态指示灯，灯箱处设“射线有害、灯亮勿入”的警示语句，并与防护门联锁，设备及操作间操作台拟安装紧急停机按钮，便于操作人员在发生紧急情况时切断系统电源。

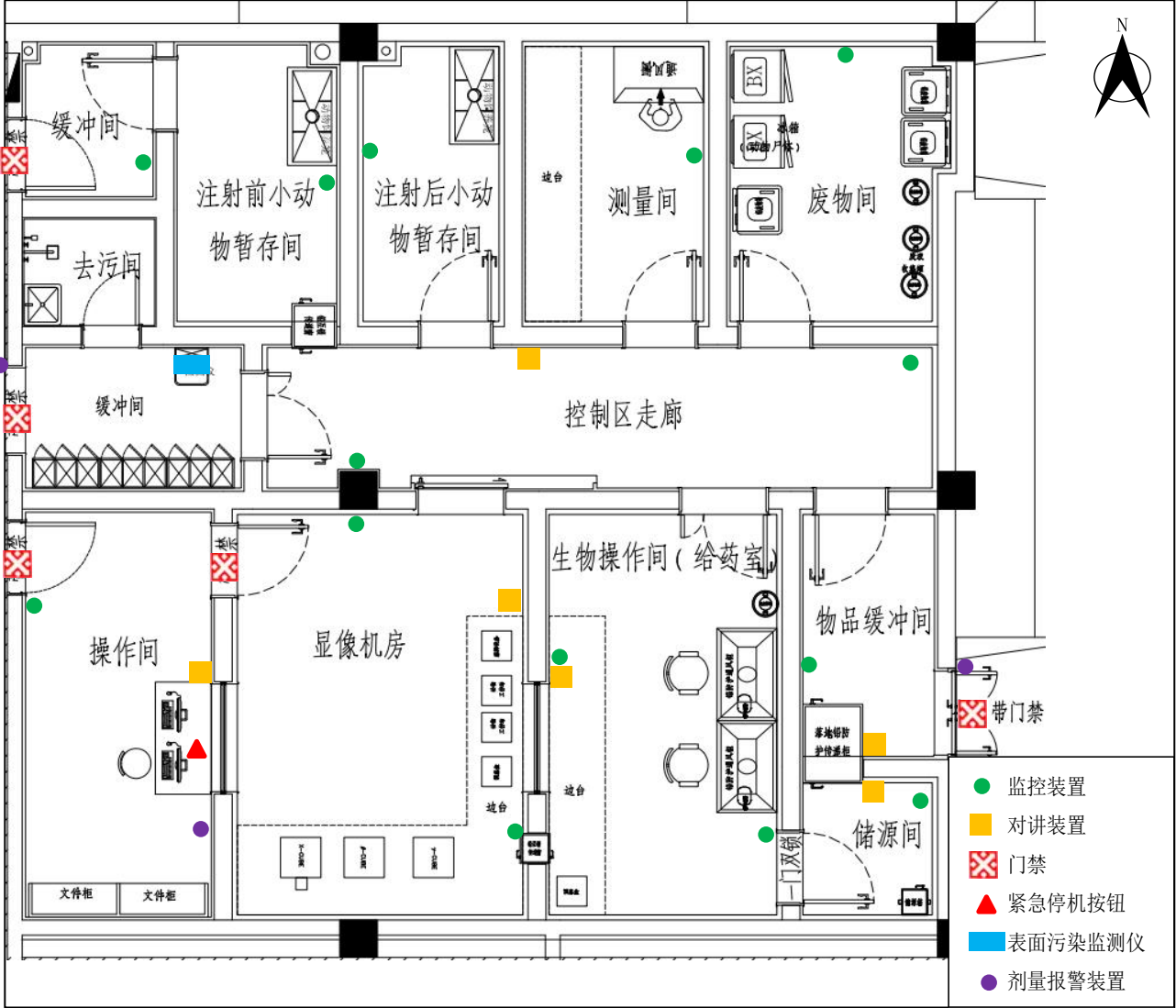
场所内安装监视、对讲装置，监控、对讲装置总机位于操作间，由设备操作人员使用并管理，能够随时监控场所内人员情况并实现对讲。场所内拟设置多个固定式剂量监测报警装置，总机位于操作间。储源场所拟实行一门双锁管理，门口设有监控，防止放射源丢失或被盗。控制区入口设置缓冲间并配备监测设备，辐射工作人员进行监测无异常后才能离开控制区。

本项目辐射工作场所拟配备的辐射安全警示设施和监测设备详见表 10-5。

表 10-5 本项目辐射工作场所辐射安全装置拟安装位置以及监测设备配备情况

序号	项目	设置位置
1	电离辐射警告标志	①缓冲间入口、显像机房、注射后小动物暂存间、测量间、废物间、生物操作间（给药室）和储源间；②通风橱、储源箱醒目位置。
2	监控装置	①小动物缓冲间、注射前小动物暂存间、注射后小动物暂存间、测量间、废物间、显像机房、生物操作间（给药室）、物品缓冲间、储源室内 ②控制区走廊南北两侧。
3	对讲装置	操作间、显像机房、生物操作间（给药室）、控制区走廊、物品缓冲间、储源间。
4	固定式剂量监测报警装置	工作人员缓冲间入口、操作间内、药物通道入口。
5	门禁系统	工作人员缓冲间入口门、操作间入口门、显像机房左侧门、物品缓冲间出入口门。
6	监测设备	缓冲间配备一台手脚表面污染监测仪，另外配备 2 台多功能辐射测量仪（表面沾污仪）、一台辐射巡测仪和一台 α 、 β 表面污染监测仪，用于污染监测和定期自行监测。

工作场所拟设置的辐射防护与安全设施以及辐射防护用品平面布置情况详见图 10-3。



(3) 内照射防护措施

内照射防护的基本原则是：积极采取各种有效措施，切断放射性物质进入体内的各种途径，尽可能的减少或避免放射性核素进入体内的一切机会，以使进入体内的放射性物质不超过国家规定的放射性核素年摄入量限制，减少或防止体内受到内照射危害。为此学校制定以下防护的基本措施：

① 围封隔离：对于工作场所，采取两区划分管理，严密而有效的围封隔离控制区，以限制可能被污染的体积和表面，防止放射性物质向周围环境扩散，防止由于人员或物体的移动而将污染带到相邻房间等措施。内照射以吸入途径可能性最大，本项目工作场所拟设置通风系统，以降低空气中的放射性浓度。小动物实验室工作人员进行放射性药物分装等操作过程均在屏蔽且密封负压的通风橱内进行，基本不会有放射性物质的散布。

② 保洁去污：操作者必须遵守安全操作规定，防止或减少污染的发生，保持工作场所内的清洁卫生，对受到污染的表面应及时去污。

③ 个人卫生防护：操作开放型放射性核素的人员，应根据工作性质正确穿戴相应的防护衣具如工作服、工作帽、靴鞋、手套和口罩，必要时可穿戴隔绝式或活性炭过滤面具或特殊防护口罩。限制暴露于污染环境中的时间。遵守个人卫生规定，不得在开放型放射工作场所或污染区进食或吸烟等。

(4) 小动物实验室拟采取的其他防护措施

① 工作人员出入口和药物出入口均设置门禁系统，防止无关人员入内；

② 在工作人员出入口、各功能用房设置电离辐射警告标志。显像机房门口设置电离辐射警告标志及工作状态指示灯，机房设置观察窗及对讲装置；

③ 在各功能房张贴标识房间用途的门牌；

④ 在辐射工作场所工作人员缓冲区出口设置表面污染及 X- γ 辐射剂量率监测设备，辐射工作人员及物品从控制区出口离开时，使用配备的 X- γ 辐射监测设备及表面沾污等辐射监测设备，对人体体表、衣物等进行监测，监测无异常后才能离开辐射工作场所；

⑤ 辐射工作场所内以及缓冲洗消区的洗手池拟采用脚踏式或感应式，能有效减少场所内设备的污染；

⑥ 本项目洗消设备旁设置香皂、中性肥皂等一般清洗用品，同时也配备生理盐水、专用去污剂，配备软毛刷、毛巾、浴巾、纸巾、隔离布、隔离衣、隔离帽、手套、污染人员更换衣物、伤口处理工具等去污用品供工作人员去污使用。

发现人员被污染时，应尽可能现场就近处理，如在洗手池去污，再进行淋浴。尽快脱去污染的衣物和鞋，并装入污染物品袋；要尽早开始流动水冲洗去污。去污过程中，污染衣物的脱放、去污剂的选取、污染人员的管理等要避免放射性核素进入体内和避免放射性核素播散到他人处。去污产生的一般放射性废物置于废物桶内，污染的衣物等用品装入污染物品袋内，在废物间内暂存超过 30 天，经检测无异常后，可清洗后重复使用；

⑦ 在小动物实验室辐射工作场所拟设置视频监控。

⑧ 本项目小动物实验室的个工作场所墙面均采用白色玻纤树脂板，抗菌、耐腐蚀、无缝隙、易清洗，工作台面采用均为不锈钢材质。地面均拟采取易清洁不易渗透的抗静电 PVC 浅色橡胶地板，地板和墙壁接缝设计采用无缝隙的弧线处理。

(5) 其他

① 学校对外购的放射性药物的供应商资质进行审核，确保放射性药物由符合国家相关要求的供应商提供。如辐射安全许可证、放射性物质运输资质等，供应商应取得销售非密封放射性物质的辐射安全许可证，本项目使用的核素在供应商的辐射安全许可范围内。

② 表面污染监测

本项目小动物实验室各辐射工作场所工作人员离开控制区出口时均按以下方法进行表面污染监测，并将原始记录存档。

测量时，先测量仪器本底，证实仪器正常后再开始测量。探测器表面尽量靠近表面，但不要贴到表面，以免仪器被沾污。测量 β 污染时应不大于 1cm 为宜。

测量应先上后下，先前后背，人体直立，四肢和手指分开，在全面巡测的基础上，再重点监测暴露部位（手、脸等）。

控制好监测仪器探头移动速度，移动速度应与监测仪器读数响应时间相匹配。

实施测量的地点，应避开 γ 辐射场的干扰。

每次测量完后应对污染仪器做本底测量，证实监测仪器未被污染。监测设备应定期（每年至少 1 次）送检。

③ 学校给所有辐射工作人员配备个人剂量计，定期送有资质单位监测，建立监测档案。

④ 学校制定相关规章制度，禁止工作人员在控制区和监督区进食、饮水、吸烟，工作人员工作结束后离开辐射工作场所前洗消检测合格后方可离开。

(6) 小动物实验室工作场所辐射防护措施符合性分析

参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）要求，对本项目小动物实验室工作场所辐射防护措施进行分析，见表 10-6。

表 10-6 工作场所辐射防护措施符合性分析表

项目	设计情况	HJ1188-2021 标准要求	符合性
工作场所用房室内表面及装备结构要求	本项目小动物实验室地面设计采用 PVC 地面，墙面采用玻纤树脂板，墙面与墙面、墙面与地面连接处，采取倒圆角无缝隙设计，且地面光滑，并具有易去污，受辐照后不易老化且防水。通风橱操作台面为不锈钢材质，光滑、平整、易于清洗去污，并配备托盘、吸水纸等物品。	核医学工作场所的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应无接缝，易于清洗、去污。	符合
场所安全措施	1.本项目在缓冲间设置有手脚表面污染监测仪，并配备淋浴或有感应式水龙头等去污措施，从控制区离开的工作人员和物品均进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，采取相应的去污措施； 2.生物操作间（给药室）所用药物储存在储源间储源箱内。学校拟每月自行对小动物实验室辐射工作场所进行一次辐射水平监测。小动物实验室辐射工作场所设有门禁及监控系统，无关人员不能入内。贮存的放射性物质建立台账，及时登记，确保账物相符； 3.铅防护转运盒、转运铅盒及铅废物桶配备情况见表 10-4，容器表面设置电离辐射警示标识； 5.在显像机房防护门上方设置工作状态指示灯。	1.操作放射性药物的控制区出口应配有表面污染监测仪器，从控制区离开的人员和物品均应进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，应采取相应的去污措施； 2.放射性物质应贮存在专门场所的贮存容器或保险箱内，定期进行辐射水平监测，无关人员不应入内。贮存的放射性物质应建立台账，及时登记，确保账物相符； 3.应为核医学工作场所内部放射性物质运送配备有足够屏蔽的贮存、转运等容器，容器表面应张贴电离辐射标志，容器在运送时应有适当的固定措施； 4.扫描机房外门框上方应设置工作状态指示灯。	符合
防护用品	1.小动物实验室拟配备的个人防护用品，详见表 10-4； 2.小动物实验室的生物操作间（给药室）和测量间均拟配备通风橱。生物操作间（给药室）配备防护注射器。通风橱设置单独的动力排风装置。	1.应为从事放射性药物操作的工作人员配备必要的防护用品； 2.操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。放射性药物给药器应有适当的屏蔽，给药后患者候诊室内、核素治疗病房的床位旁应设有铅屏风等屏蔽体，以减少对其他患者和医护人员的照射。	符合

由表 10-6 分析结果可知，本项目小动物实验室非密封放射性物质工作场所拟采取的辐射防护措施符合《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中的相关要求，合理可行。

10.2 “三废”的治理

10.2.1 III类射线装置

本项目III类射线装置为小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统的 CT 部分，其 CT 部分使用过程中不产生放射性废水、放射性废气及放射性固体废物，会产生少量臭氧及氮氧化物。本项目机房内设计了机械新风和排风设施，能保证良好通风，CT 设备使用过程中产生的少量臭氧及氮氧化物经排风管道排出室外。

10.2.2 非密封放射性物质工作场所

本项目小动物实验室非密封源使用过程中产生放射性废水、放射性废气及放射性固体废物，相关产生及处理方案如下：

（1）放射性固废处置措施

本项目所使用核素半衰期分别为 109.8min (^{18}F) 和 6.02h ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)。本项目拟在生物操作间（给药室）设置铅制废物桶，在铅废物桶内放置专用塑料袋直接收纳废物。铅废物桶表面张贴电离辐射警示标志和文字提醒，在显著位置标有废物类型、核素种类、比活度水平和存放日期等说明。本项目在小动物实验室设置废物间，用于放射性固体废物的贮存。

本项目辐射工作场所产生的放射性固体废物（如塑胶手套、注射器、棉签、废药瓶、一次性卫生防护用品、注射后小动物暂存间鼠笼内用于吸附小动物排泄物的垫料等）先按核素类别分别存放在相应铅固废衰变桶垃圾袋内，对于注射器和碎玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入硬纸盒或其他包装材料中，然后再装入专用塑料袋内，收集一定量后包装并编好日期后置于相应铅制固废衰变桶内。

小动物实验室产生的少量操作手套、口罩、棉签、试管、吸水纸、注射器等放射性固体废物，分类收集于铅废物桶内置于废物间内暂存衰变；小动物实验室产生的小动物尸体及组织等拟装入专用尸体收集袋暂存于废物间的尸体冰柜内暂存衰变。上述放射性固体废物暂存衰变至少 30 天后，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。

放射性废物每袋重量不超过 20kg，且固体放射性废物收集桶外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至废物间贮存。

本项目建立放射性废物收集、贮存、排放管理台账，做好记录并存档备案。本项目将安排专人负责小动物实验室固体放射性废物的存储和处理，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。

小动物实验室废气处理产生的废活性炭暂存在废物间内，暂存至少 30 天后，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，方可作为一般固体废物处理。

本项目拟安排辐射工作人员专职负责废物的分类收集、存放和处理。放射性废物间门上显著位置设置电离辐射警告标志，防止无关人员入内；在放射性废物间内设置视频监控、灭火器等防火防盗措施，建立废物档案并记录，防止放射性废物的丢失和被盗。放射性废物间内不得存放易燃、易爆、腐蚀性物品。小动物实验室放射性废物与免管废物不可混同处理，应尽量减少放射性废物产生量。

(2) 通风换气设施

本项目非密封放射性物质的分装和注射操作均在通风橱内进行，通风橱顶部拟连接排风管道，其排风量能保证排风速度不低于 0.5m/s 。通风橱设置独立的排风管道，废气收集后经高效活性炭过滤装置过滤后经排风井排至小动物实验室所在建筑屋顶，排风口高于屋脊 3m 。

根据设计图纸（图 10-4）可知，本项目小动物实验室工作区域拟设置三套相互独立的排风系统，排风系统具体设计如下：

1) 在生物操作间（给药室）的通风橱和测量间的通风柜（橱）顶部设置一套独立的排风系统，设备上方设置高效活性炭过滤装置，废气经过滤后汇集于排风井排至小动物实验室所在建筑屋顶，排风口高于屋脊 3m ，排风量为 $1800\text{m}^3/\text{h}$ ，且通风橱内风速不小于 0.5m/s 。

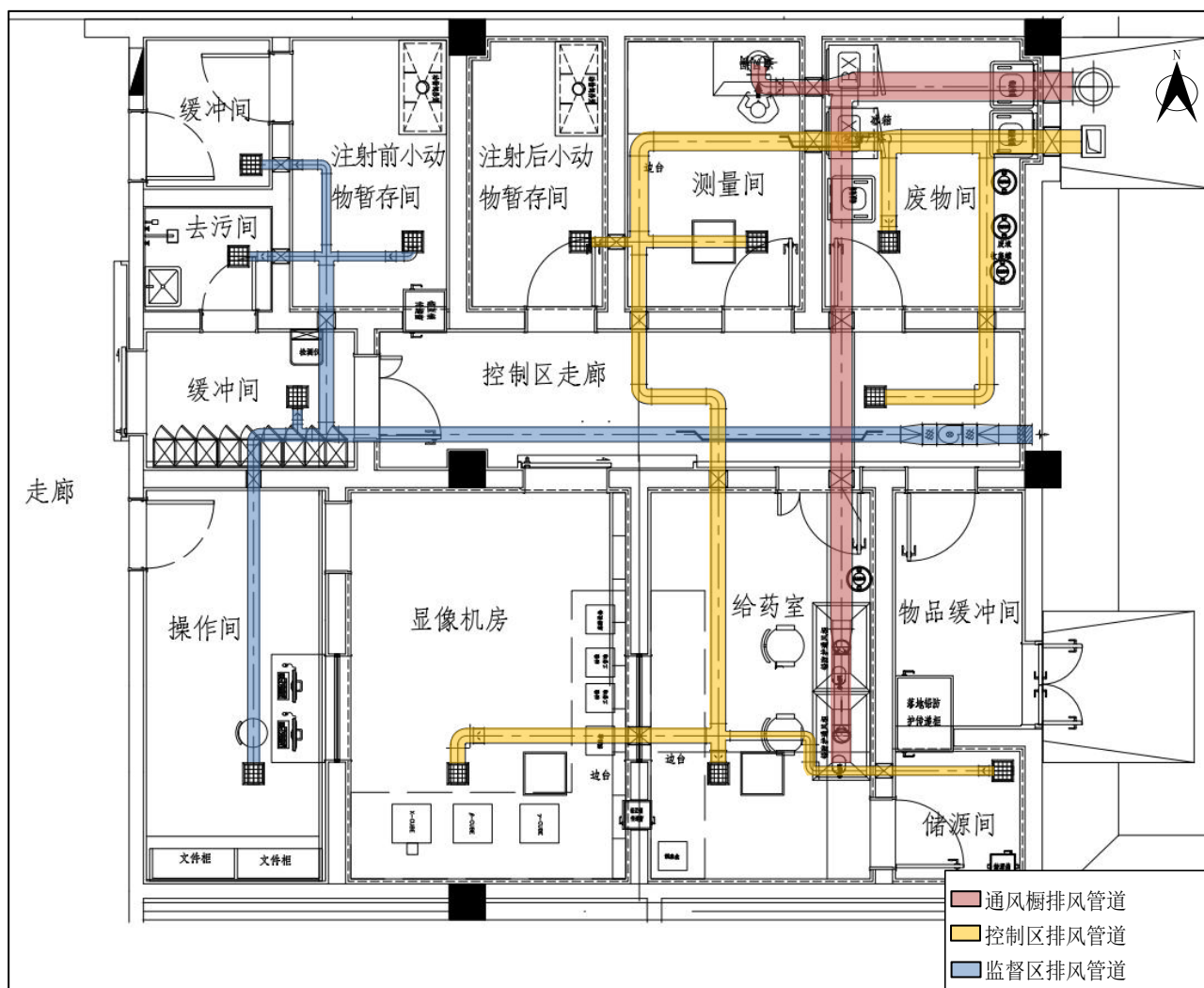
2) 显像机房、注射后小动物暂存间、测量间、废物间、生物操作间（给药室）和储源间设置一套独立的排风系统，该场所产生的废气汇集后经高效活性炭过滤装置过滤后经排风井排至小动物实验室所在建筑屋顶，排风口高于屋脊 3m ，排风量为 $1100\text{m}^3/\text{h}$ 。

3) 在操作间、缓冲间、去污间和注射前小动物暂存间设置一套独立的排风系统。该场所排风经一层排至室外，排风量为 $400\text{m}^3/\text{h}$ 。

综上所述，本项目小动物实验室辐射工作场所的通风橱设置独立的排风系统，并设置负压防止放射性气体交叉污染；其他辐射工作场所按照控制区和监督区分区设计独立的排风系统，各排风系统的气流走向遵循了低浓度向高浓度流动，且设置止回阀，有利于防止放射性废气污染物的扩散，控制区及通风橱废气均经高效活性炭过滤后在小动物实验室所在建筑屋顶高于屋顶 3m 处排放。根据图 10-5 所示，本项目小动物实验室废气排气口位于

所在建筑屋顶东北侧，排放口周边 50m 范围内无居民区、学校等环境敏感目标，故本项目辐射工作场所通风设计能满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中的相关要求。

根据学校提供资料，放射性废气活性炭吸附装置拟安装活性炭过滤芯，正常情况下活性炭过滤芯使用寿命一般为 8~12 个月，本项目需定期对活性炭吸附装置的过滤效率进行校核，如在过滤装置前后安装测压装置，当实测压差等于或大于该过滤装置的终阻力时，应更换活性炭吸附装置滤芯，以防止过滤装置失效，放射性废气外排对大气环境造成辐射污染。更换的活性炭过滤芯在废物间内暂存至少 30 天，经监测其辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，经除尘、清洗、晾干后循环使用。若经多次再生使用后吸附效率无法满足要求或损坏的废活性炭芯按放射性固体废物暂存于废物桶内衰变至少 30 天，经监测其辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，按一般医疗废物处理。



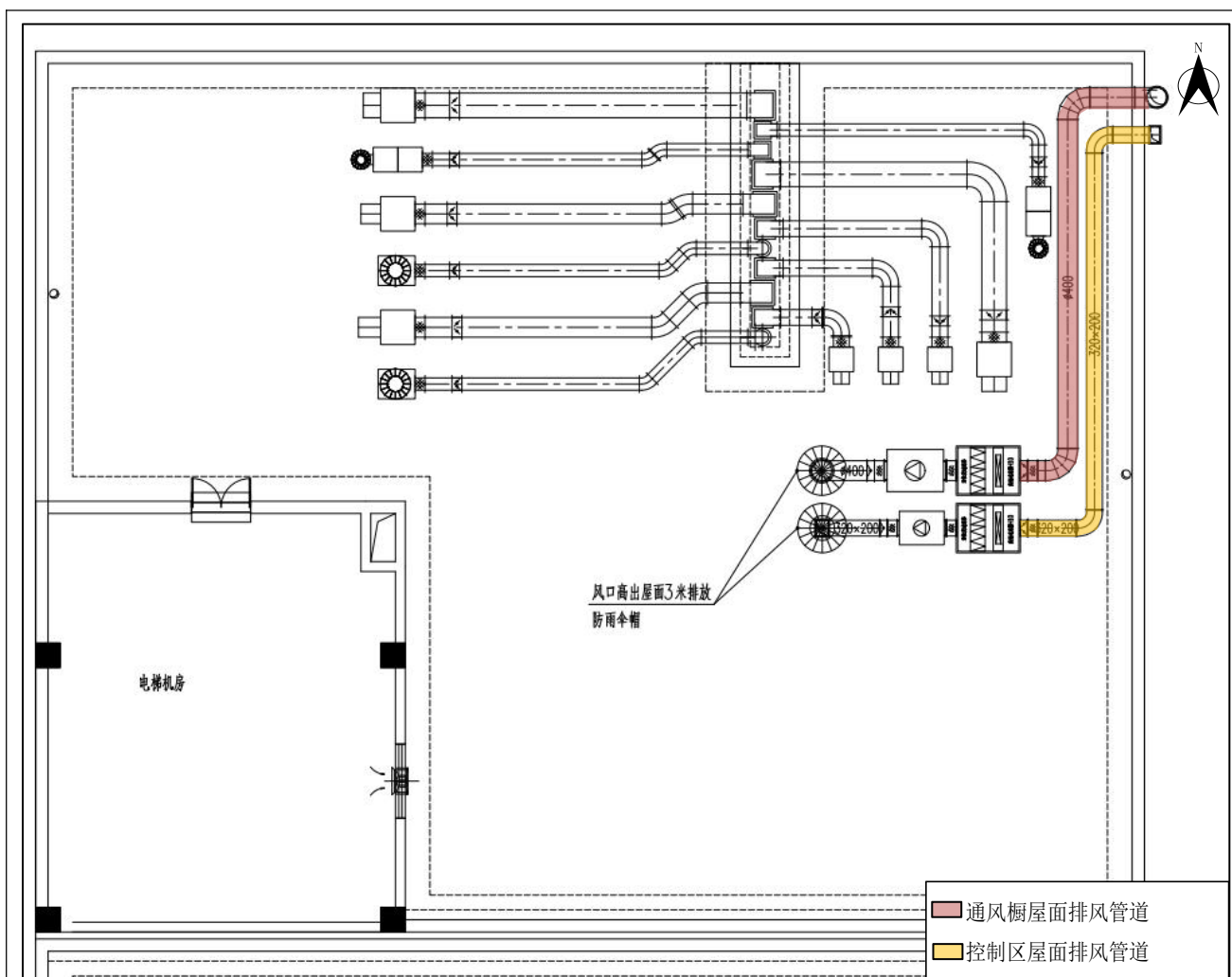


图 10-5 本项目小动物实验室屋面排风机平面图

(3) 放射性废液衰变池

本项目为小动物实验室放射性废水配套设计了放射性废水衰变系统，位于小动物实验室东侧地下室，为槽式衰变池。放射性废水衰变系统由一个沉淀池和 2 个衰变池组成，沉淀池和衰变池的有效容积均为 1m^3 ，总有效容积为 3m^3 。

放射性废水自小动物实验室流入沉淀池内，沉淀池存满后通过提升泵将废水排入 01 衰变池，待 01 衰变池存满后停止抽水，继续衰变。新一轮废水仍先流入沉淀池，沉淀池存满后向 02 衰变池排入。以此类推，当沉淀池第三次存满时，01 衰变池已存满 40 天，直接外排入医院污水管网，如此往复循环。

衰变系统配备电动阀门控制进出水排放，液位传感器实时监测液位，放射性废液活度探头实时监测活度值，确保达标排放。衰变池可切换手动排放模式，同时配置人工取样口，方便监管部门取样分析。同时组件内配有液位传感器、电动阀门及切割潜污泵，可以有效地将污水中的杂质及碎片剪切成小块，从而避免其进入管道后引起堵塞。

本项目小动物实验室衰变池平面、剖面图详见图 10-7、图 10-8，衰变池电气原理图见图 10-9。

本项目拟设置放射性废液衰变池为槽式衰变池，衰变池壁为 200mm 混凝土，上方为 300mm 预制混凝土盖板，底部为 150mm 素混凝土垫层，衰变池进行防腐防渗处理，下水管道埋入地下并做标记，管道使用铅板进行防护。

小动物实验室废水由去污间直接排入衰变池的沉淀池内，排水管走向示意图见图 10-6。

根据项目非密封放射性物质拟使用情况，工作人员每天洗消和清洗产生放射性废水约 $0.05\text{m}^3/\text{天}$ （50L/天）。

根据现设计方案，放射性废水衰变系统由一个沉淀池和 2 个衰变池组成，沉淀池及 01、02 衰变池的有效容积均为 1m^3 ，总有效容积为 3m^3 。废水在沉淀池存满需 20 天，存满后流入 01 衰变池继续衰变，新一轮废水仍先在沉淀池存满 20 天，存满后流入 02 衰变池继续衰变，当沉淀池第三次存满时，01 衰变池内废水已衰变至少 40 天，故满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“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”的要求。

本项目将安排专人负责放射性废液的暂存和处理，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。

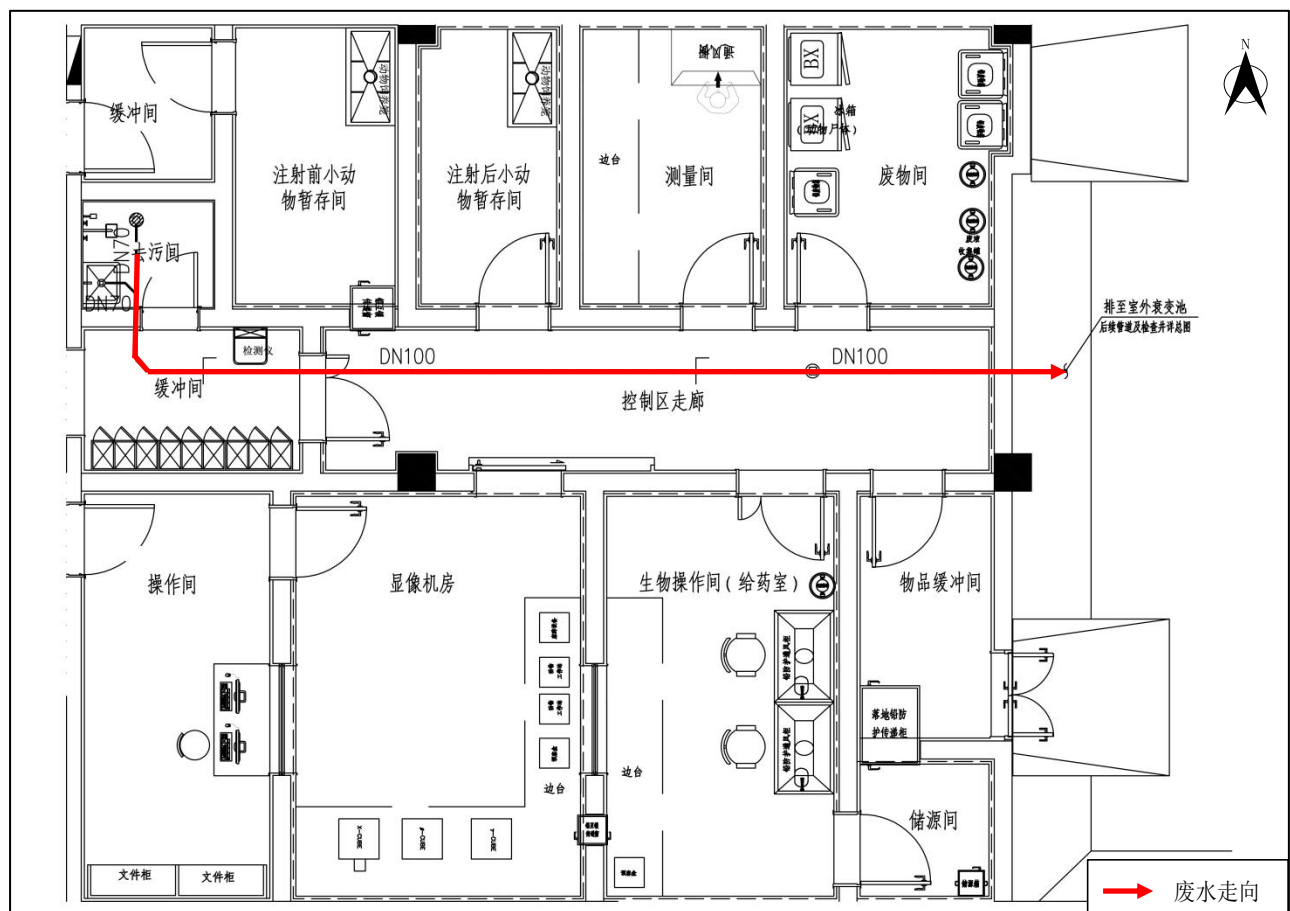


图 10-6 本项目小动物实验室排水水管平面分布及排水走向示意图

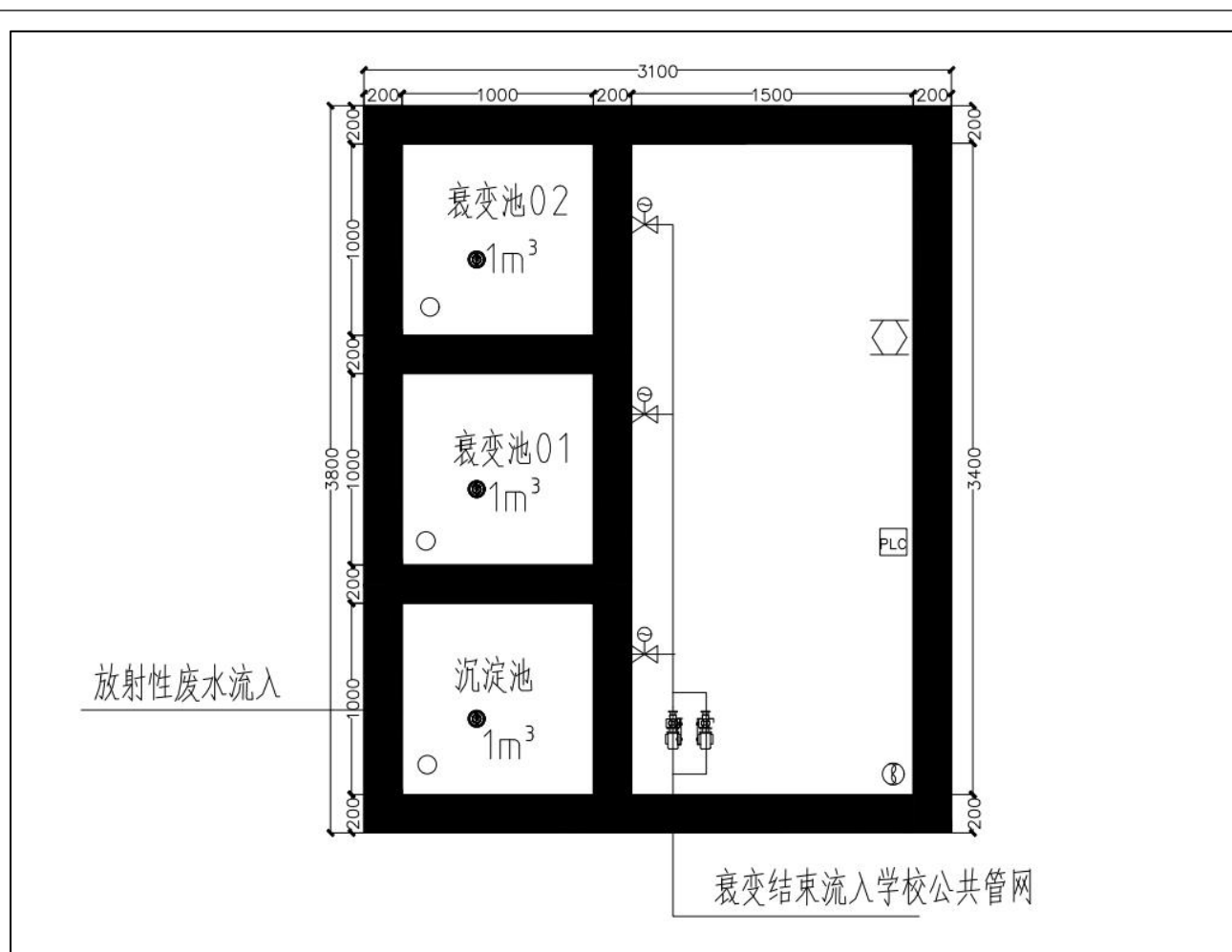


图 10-7 小动物实验室衰变池平面图

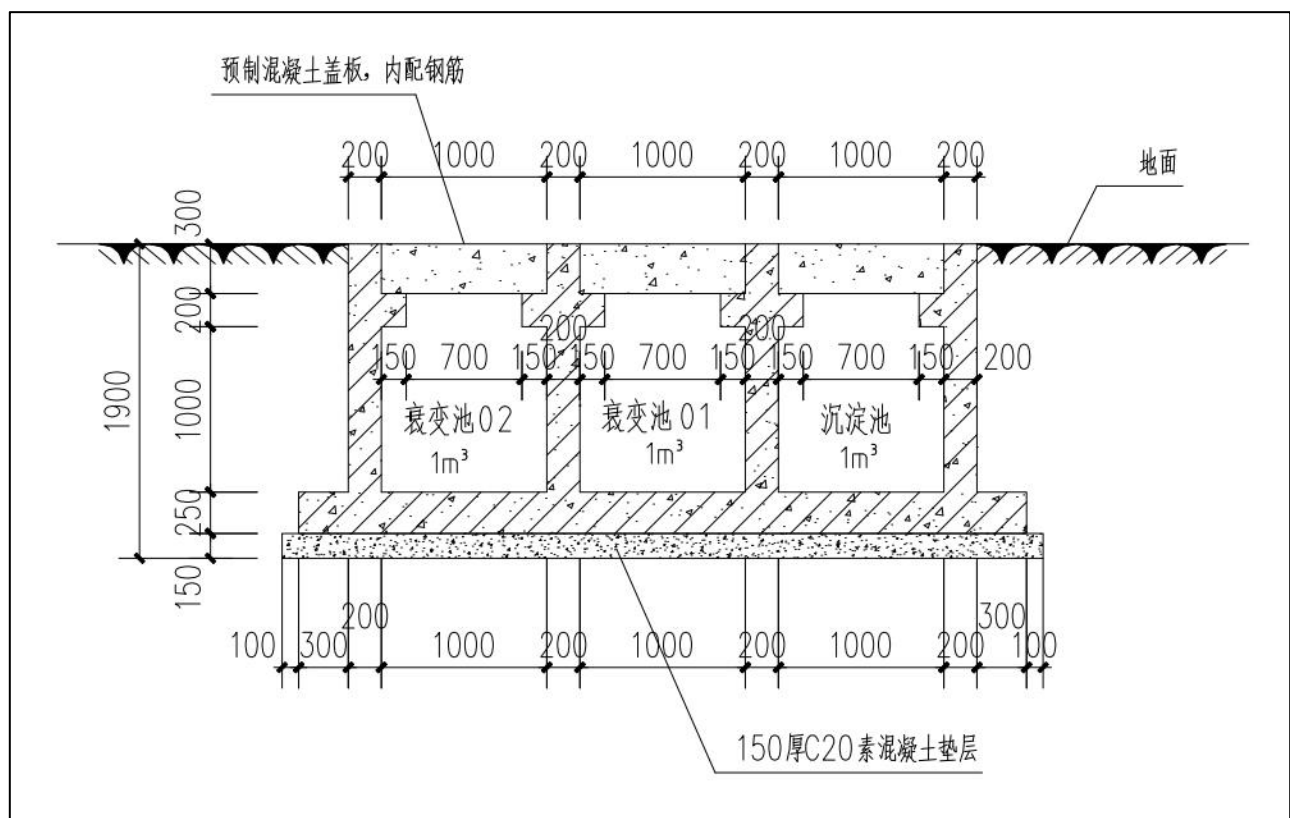


图 10-8 小动物实验室衰变池剖面图

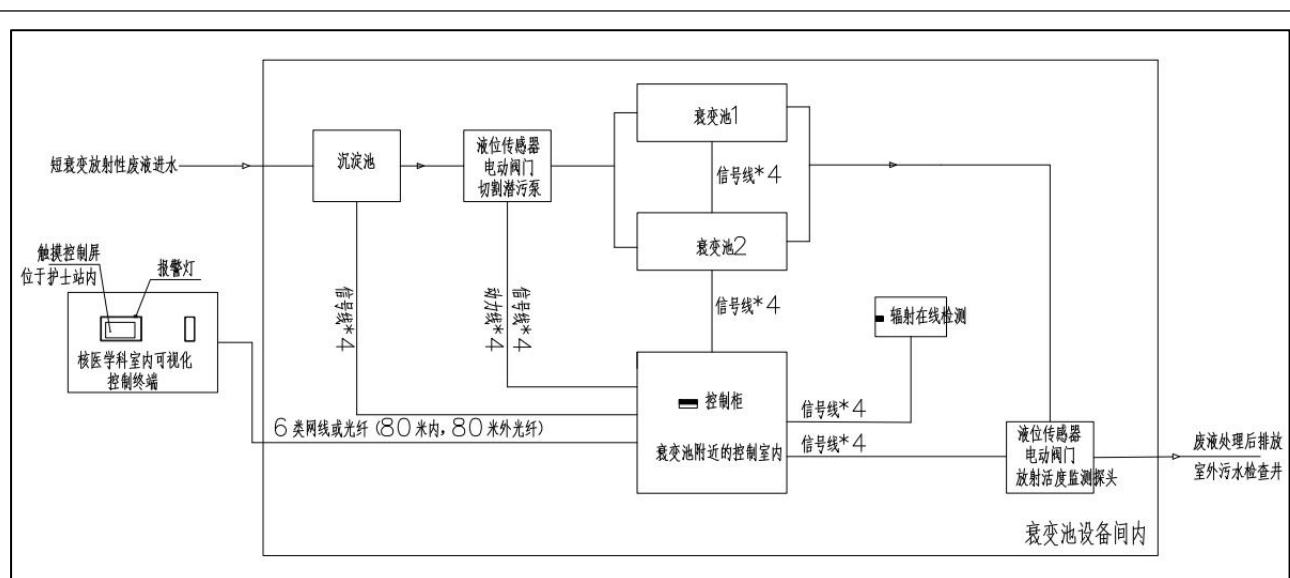


图 10-9 衰变池电气原理图

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

本项目建设期不涉及放射性同位素与射线装置的使用，但在装修及安装调试的过程中，仍存在噪声、粉尘、废水、固体废物等污染。

装修过程中噪声主要为设备运行噪声及物料碰撞噪声，故应选用低噪声设备并定期维护保养、封闭作业环境（关闭门窗）并设置临时隔音屏障、合理安排高噪声设备使用时间；

装修过程中粉尘主要来源于墙体拆除扬尘、木材/瓷砖切割碎屑、涂料打磨颗粒物以及建筑垃圾转运扬尘，故应实施湿法作业、易扬尘材料室内暂存并覆盖防尘网、及时清扫散落物料，装修垃圾袋装化封闭运输；

装修过程中废水主要为设备清洗废水、涂料稀释废水及施工人员生活污水，应禁止随意倾倒含化学溶剂的废水、生活污水经预处理池达标后排入市政管网；

装修过程中固体废物主要来源于废弃建材、包装容器、建筑渣土等，故应实行分类收集、建筑垃圾集中堆放后清运至指定消纳场。

11.2 运行阶段对环境的影响

11.2.1 X CUBE（CT）

（1）类比可行性分析

本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统管电压为 50kV，管电流为 0.5mA，设备参数与口腔 CBCT 相当，故本项目 III 类射线装置采取与口腔 CT 进行类比分析。类比对象为赣州市人民医院北院门诊楼 5 楼口腔科口腔 CT 机房 PaX-i 3D Green 型口腔颌面锥形束计算机体层摄影设备。

类比可行性分析见表 11-1。

表 11-1 类比条件一览表

类比项目	本项目	类比项目	备注
设备名称 型号	小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统 (β CUBE (PET)、 γ CUBE (SPECT)、 X CUBE (CT))	口腔颌面锥形束计算机体 层摄影设备 (PaX-i 3D Green)	/
管电压	50kV	99kV	低于类比对象
管电流	0.5mA	12mA	低于类比对象
设备运行 工况	50kV、0.5mA	94kV、7.3mA	低于类比对象

(续) 表 11-1 类比条件一览表

类比项目	本项目	类比项目	备注
墙体厚度	东墙: 24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡 (相当于 5.70mmPb) 其他墙体: 24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 (相当于 3.70mmPb)	24cm 实心砖+1mmPb 钡水泥 (相当于 3.6mmPb)	优于类比对象
顶棚厚度	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板+3mmPb 铅板 (相当于 5.51mmPb)	12cm 混凝土+1mmPb 钡水泥 (相当于 2.7mmPb)	优于类比对象
防护门 铅当量	4mmPb	2mmPb	优于类比对象
观察窗铅 当量	西侧观察窗: 4mmPb 东侧观察窗: 6mmPb	2mmPb	优于类比对象
机房大小	21.78m ² (5.5m×3.96m)	6.15m ² (2.93m×2.10m)	优于类比对象

由表 11-1 可知, 本项目 III 类射线装置的管电压、管电流均低于类比对象, 仪器运行工况小于类比对象, 项目的屏蔽措施、机房面积优于类比项目, 故类比条件充分。

(2) 类比监测结果

类比机房周边环境辐射水平采用江西省核工业地质局测试研究中心 2021 年 8 月 20 日监测报告结果, 见表 11-2, 类比监测报告见附件 5。

表 11-2 类比机房及周边环境辐射水平类比监测结果表

检测点 编号	检测点位置	检测点数	X 射线周围剂量当量率 (μSv/h)		
			最大值	最小值	平均值
#1	观察窗外 30cm 处	5	0.16	0.11	0.13
#2	操作位	5	0.12*	0.10	0.11
#3	管线口	5	0.14	0.12	0.13
#4	机房防护门外 30cm 处	5	0.11	0.11	0.11
#5	机房南墙外 30cm 处	5	0.14	0.12	0.12
#6	机房西墙外 30cm 处	5	0.22*	0.17	0.20
#7	机房东墙外 30cm 处	5	0.14	0.12	0.13
#8	机房楼上距地 100cm 处	5	0.17	0.15	0.16
#9	机房楼下距地 170cm 处	5	0.17	0.14	0.16
#10	控制室 (关机状态下本底值)	5	0.13	0.12	0.12
检测条件: 94kV、7.3mA					

由类比监测结果可知, 曝光条件下机房屏蔽体外关注点处的周围剂量当量率在 (0.10~0.22) μSv/h 之间, 符合《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 的相关要求, 即满足“周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h”。

本项目射线装置的管电压、管电流低于类比对象，正常使用工况低于类比设备的检测工况。本项目机房屏蔽措施、机房面积均优于类比项目，故本项目射线装置运行后对周边环境的影响也符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中“周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h”的要求。

（3）有效剂量估算

为确定本项目射线装置运行过程中对操作人员和公众产生的辐射剂量及其辐射环境影响，对其进行辐射剂量估算评价。

由《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）可知，受照人员的有效剂量的计算公式如下：

$$E = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \dots\dots\dots \text{式 (11-1)}$$

w_R ——辐射 R 的辐射权重因子；由 GB18871-2002 附录 J 可知，光子（所有能量）的辐射权重因子为 1；

w_T ——组织或器官 T 的组织权重因数；由 GB18871-2002 附录 J 可知，人体整体的组织权重因数为 1；

$D_{T,R}$ ——辐射 R 在器官或组织 T 内产生的平均吸收剂量，Gy；数值上约等于空气比释动能，空气比释动能=空气比释动能率×受照时间；

操作间操作人员的辐射剂量率为设备曝光状态下操作间内操作位的监测数值（表 11-2 中带*号的数值），公众成员的辐射剂量率为设备曝光状态下机房周围（除操作间外）监测数值中最大辐射剂量率（表 11-2 中带*号的数值）。显像机房四周公众成员（南侧器械库及楼上设备间）很少停留，参照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）附录 A 的表 A.1，公众成员居留因子取 1/20。

由学校提供实验负荷可知：本项目小动物实验室每周开展小动物研究最大数量 40 只，其中利用 ^{18}F 进行 PET/CT 显像及扫描研究最大数量 20 只，利用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行 SPECT/CT 显像及扫描最大数量 20 只，故年最大实验小动物数量 2000 只。

CT 扫描时间最大约 2s/只，年扫描时间为 1.1h。本项目拟配备摆位及扫描辐射工作人员 2 人，轮流进行操作。

小鼠处死后解剖取材时间一般为 15 分钟/只，年解剖时间 500h。注射后小动物暂存间饲养笼内垫料及其他放射性固体废物收集及转运时间一般为 10 分钟，年转运时间 333.3h。

工作人员和公众成员的最大年有效剂量见表 11-3。

表 11-3 小动物实验室区域工作人员及公众年有效剂量估算结果表

场所	操作类型	人数（人）	剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）	年受照时间（h）	年有效剂量（mSv）
小动物实验室	职业人员	2	0.12	1.1	6.60×10^{-5}
	公众成员	/	0.22	$1.1 \times (1/20) = 0.055$	1.21×10^{-5}

注：未扣除本底影响，估算结果偏保守。

由表 11-3 偏保守估算结果可知，本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统在 CT 扫描状态下机房周围工作人员最大附加年受照剂量为 $6.60 \times 10^{-5} \text{mSv/a}$ ，公众人员年最大附加受照剂量为 $1.21 \times 10^{-5} \text{mSv/a}$ ，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中工作人员和公众的照射剂量限值 20mSv/a 和 1mSv/a 的要求，也低于剂量约束值 5mSv/a 和 0.1mSv/a 。

11.2.2 非密封放射性物质工作场所

（1）工作场所的辐射水平分析

① 理论计算公式

辐射工作人员在放射性药物操作区进行相关放射性药物的分装和给小动物注射放射性核素的过程主要的辐射影响为放射性核素产生的 γ 射线引起的辐射照射。小动物注射放射性药物后，又成为一个活动的辐射体，其所在的场所要考虑来自注药后的小动物的辐射影响。本次评价时将操作的药物以及注射后的小动物均视为 γ 点源。根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 I，放射性工作场所的 γ 点源发出的 γ 射线经屏蔽体屏蔽材料屏蔽后，评价关注点处的 γ 辐射剂量率计算公式如下：

$$H_r = A \cdot \Gamma \cdot r^{-2} \cdot 10^{-(x/\text{TVL})} \dots\dots\dots \text{式 (11-2)}$$

式中： H_r —屏蔽体外关注点的剂量当量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A —单个实验动物所用放射源的最大活度，MBq；

Γ —距源 1m 处的周围剂量当量率常数， $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{MBq} \cdot \text{h})$ ；

r —参考点与放射源间的距离，m。

x —屏蔽厚度，mm；

TVL— γ 射线的十分之一值层厚度，cm。

② 小动物实验室辐射工作场所辐射环境影响分析

本项目小动物实验室仅使用 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。小动物实验室涉及放射性核素小动物实验室辐射屏蔽计算涉及核素相关参数一览表见表 11-4。

表 11-4 小动物实验室辐射屏蔽计算涉及核素相关参数一览表

核素	裸源周围剂量当量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	患者体内单位放射性活度所致体外 1m 处周围剂量当量率 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	TVL (mm)		
			铅	砖	混凝土
^{18}F	0.143	0.092	16.6	263	176
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	0.0303	0.0207	1	160	110

注： ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的裸源周围剂量当量率常数、患者体内单位放射性活度所致体外 1m 处周围剂量当量率和什值层源自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）

③ 辐射源活度（A）等相关参数取值

由于本项目使用 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药量及射线能量等因素不同，故屏蔽估算时对两者分别进行，计算结果见表 11-5、表 11-6，关注点距离图见图 11-1。

1) 使用 ^{18}F 显像时屏蔽估算

每周最多订购 20 只小动物进行 ^{18}F 显像实验，故日最大注射小动物数量为 20 只， ^{18}F 单只动物最大注射量为 0.5mCi。工作人员操作时均穿戴 0.5mmPb 防护服，药物运送时药物置于 10mmPb 转运铅盒内，注射时使用 20mmPb 注射防护套；

注射后摆位单次操作时按 4 只小动物共 2mCi（74MBq）进行屏蔽计算；

储源间按最大药量 40mCi（1480MBq，含贮存衰变量）置于 30mmPb 储源箱进行计算；生物操作间（给药室）通风橱按最大药量 40mCi（1480MBq，含贮存衰变量）置于 30mmPb 铅防护通风橱中，同时使用 40mmPb 铅盒防护进行计算；

本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统最高通量可满足 4 只小鼠或 1 只大鼠的高分辨率全身成像效果，生物操作间内每次最多从通风橱内拿取 4 只小动物进行传递，故显像机房、测量间、生物操作间（给药室）均按 4 只小动物共 2mCi（74MBq）进行屏蔽计算；

控制区走廊按 4 只小动物共 2mCi（74MBq）置于 10mmPb 铅防护转运盒进行计算；

本项目注射后小动物暂存间按每次最大暂养 20 只小动物共 10mCi（370MBq）进行屏蔽计算。

小动物解剖时已至少经过一个半衰期，故解剖时按 0.25mCi（9.25MBq）计算；考虑药物衰变因素，垫料等放射性固废转运保守按注射药物总活度的 10%（37MBq）计算。

表 11-5 小动物实验室工作场所剂量率估算结果 (^{18}F)

场所名称及尺寸 (长×宽×高)	核算位置	屏蔽物质及厚度	源活度 MBq	剂量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距离 m	屏蔽后 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$
储源间 (1.84×1.91×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱	1480	0.143	0.84	0.249
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱			2.08	0.062
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱			0.74	0.321
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱			2.25	0.053
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板+30mmPb 储源箱			3.75	0.019
	北侧传递窗 外 30cm	6mmPb+30mmPb 储源箱			2.30	0.271
	西侧防护门 外 30cm	6mmPb+30mmPb 储源箱			1.86	0.415
生物操作间 (3.16×5.50×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡	74	0.143	2.12	0.190
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			2.12	0.165
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡			3.35	0.050
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			3.29	0.069
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			4.25	0.047
	北侧防护门 外 30cm	6mmPb			3.29	0.425
	西侧观察窗 外 30cm	6mmPb			2.12	1.024
	东侧防护门 外 30cm	6mmPb			2.12	1.024
通风橱 (1.24×1.02×2.40)	正面 30cm	30mmPb+40mmPb 铅盒	1480	0.143	0.81	0.020
	背面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			0.56	0.041
	左面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			0.67	0.029
	右面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			0.67	0.029
	上面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			1.25	8.22×10^{-3}
	下面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			1.25	8.22×10^{-3}

(续) 表 11-5 小动物实验室工作场所剂量率估算结果 (^{18}F)

场所名称及尺寸 (长×宽×高)	核算位置	屏蔽物质及厚度	源活度 MBq	剂量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距离 m	屏蔽后剂 量率 $\mu\text{Sv/h}$
注射后小动物 暂存间 (1.96×3.82×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡	370	0.092	1.52	1.365
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			1.52	1.365
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			2.45	0.526
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			2.45	0.398
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			4.25	0.152
	南侧防护门 外 30cm	6mmPb			2.45	2.467
显像机房 (3.96×5.50×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡	74	0.092	2.52	0.075
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			2.52	0.099
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			1.40	0.322
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			5.24	0.023
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			3.75	0.039
	东侧观察窗 外 30cm	6mmPb			2.77	0.386
	西侧观察窗 外 30cm	4mmPb			2.77	0.509
	西侧防护门 外 30cm	4mmPb			4.62	0.183
	北侧防护门 外 30cm	4mmPb			5.40	0.134
测量间 (2.50×3.82×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡	74	0.092	1.24	0.410
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			2.34	0.115
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			3.86	0.042
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			1.04	0.442
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			4.25	0.030
	南侧防护门 外 30cm	4mmPb			3.86	0.262

(续) 表 11-5 小动物实验室工作场所剂量率估算结果 (^{18}F)

场所名称及尺寸 (长×宽×高)	核算位置	屏蔽物质及厚度	源活度 MBq	剂量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距离 m	屏蔽后 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$
控制区走廊 (12.25×1.96×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒	74	0.092	4.76	6.96×10^{-3}
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			4.76	6.96×10^{-3}
	南墙外 30cm (显像机房、物品缓冲间部分)	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			1.52	0.068
	南墙外 30cm (生物操作间部分)	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			1.52	0.052
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			1.52	0.068
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板+10mmPb 转运盒			4.25	7.60×10^{-3}
	西侧防护门外 30cm	4mmPb+10mmPb 转运盒			4.76	4.31×10^{-2}
药物分装		30mmPb 通风橱+0.5mmPb 铅衣	18.5	0.143	0.54	0.132
药物注射		30mmPb 通风橱+20mmPb 铅注射器+0.5mmPb 铅衣	18.5	0.143	0.54	8.23×10^{-3}
小动物转运		20mmPb 铅转运盒+0.5mmPb 铅衣	74	0.143	0.50	2.464
小动物摆位		20mmPb 铅屏风+0.5mmPb 铅衣	74	0.143	0.50	2.464
小动物解剖		0.5mmPb 铅衣	9.25	0.143	0.50	4.936
垫料等放射性废物转运		0.5mmPb 铅衣	37	0.143	1.00	4.936
注：①储源箱位于储源间东南角，储源箱中点距东墙 0.3m，距南墙 0.2m，距地 0.5m； ②显像机房中，小动物分子影像设备位于南侧边台上，设备中点距南墙 0.8m，距东西 2.52m，距地 0.5m； ③储源间、生物操作间、显像机房南墙为 200mm 原有墙体，材质未明确，保守计算时未将其纳入铅当量折算，原有墙体南侧重新垒砌 240mm 实心砖，两种墙体之间 60mm； ④研究人员在测量间进行相关操作时，小动物位于东北角无铅屏蔽通风橱内，操作时小动物距东墙 0.7m，距北墙 0.5m； ⑤保守计算时，未将设备自屏蔽纳入计算，未将硫酸钡厚度纳入距离核算。						

2) 使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 显像时屏蔽估算

每周最多订购 20 只小动物进行 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 显像实验，故日最大注射小动物数量为 20 只， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 单只动物最大注射量为 5mCi。工作人员操作时均穿戴 0.5mmPb 防护服，药物运送时药物置于 10mmPb 转运铅盒内，注射时使用 20mmPb 注射防护套；

注射后摆位单次操作时按 4 只小动物共 20mCi (740MBq) 进行屏蔽计算；

储源间按最大药量 100mCi (3700MBq) 置于 30mmPb 储源箱进行计算；生物操作间（给

药室) 通风橱按最大药量 100mCi (3700MBq) 置于 30mmPb 铅防护通风橱中, 同时使用 40mmPb 铅盒防护进行计算;

本项目小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统最高通量可满足 4 只小鼠或 1 只大鼠的高分辨率全身成像效果, 生物操作间内每次最多从通风橱内拿取 4 只小动物进行传递, 故显像机房、测量间、生物操作间均按 4 只小动物共 20mCi (740MBq) 进行屏蔽计算;

控制区走廊按 4 只小动物共 20mCi (740MBq) 置于 10mmPb 铅防护转运盒进行计算;

注射后小动物暂存间按每次最大暂养 20 只小动物共 100mCi (3700MBq) 进行屏蔽计算。

小动物解剖时已至少经过一个半衰期, 故解剖时按 2.5mCi (92.5MBq) 计算; 考虑药物衰变因素, 垫料等放射性固废转运保守按注射药物总活度的 10% (370MBq) 计算。

表 11-6 小动物实验室工作场所剂量率估算结果 (^{99m}Tc)

场所名称及尺寸 (长×宽×高)	核算位置	屏蔽物质及厚度	源活度 MBq	剂量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距离 m	屏蔽后 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$
储源间 (1.84×1.91×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱	3700	0.0303	0.84	5.02×10^{-36}
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱			2.08	8.19×10^{-34}
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱			0.74	6.47×10^{-36}
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡 +30mmPb 储源箱			2.25	7.00×10^{-34}
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板+30mmPb 储源箱			3.75	3.45×10^{-35}
	北侧传递窗 外 30cm	6mmPb+30mmPb 储源箱			2.30	2.12×10^{-35}
	西侧防护门 外 30cm	6mmPb+30mmPb 储源箱			1.86	3.24×10^{-35}
生物操作间 (3.16×5.50×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+3mmPb 硫酸钡	740	0.0303	2.12	1.58×10^{-4}
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			2.12	1.58×10^{-5}
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+6mmPb 硫酸钡			3.35	6.32×10^{-8}
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			3.29	6.55×10^{-6}
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			4.25	5.37×10^{-6}
	北侧防护门 外 30cm	6mmPb			3.29	2.07×10^{-6}
	西侧观察窗 外 30cm	6mmPb			2.12	4.99×10^{-6}
	东侧防护门 外 30cm	6mmPb			2.12	4.99×10^{-6}

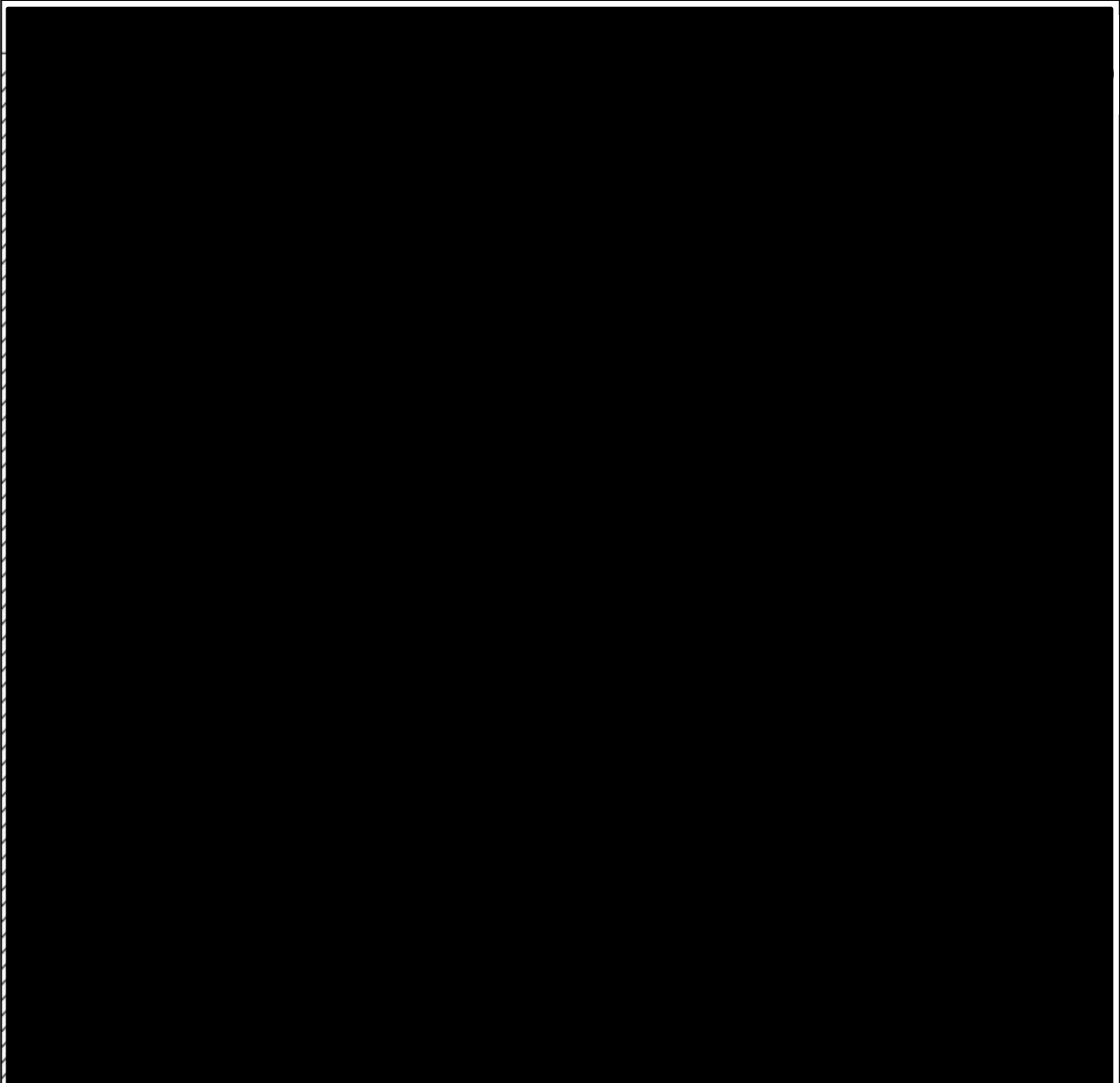
(续) 表 11-6 小动物实验室工作场所剂量率估算结果 (^{99m}Tc)

场所名称及尺寸 (长×宽×高)	核算位置	屏蔽物质及厚度	源活度 MBq	剂量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距离 m	屏蔽后 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$
通风橱 (1.24×1.02×2.40)	正面 30cm	30mmPb+40mmPb 铅盒	3700	0.0303	0.81	1.71×10^{-68}
	背面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			0.56	3.57×10^{-68}
	左面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			0.67	2.50×10^{-68}
	右面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			0.67	2.50×10^{-68}
	上面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			1.25	7.18×10^{-69}
	下面 5cm	30mmPb+40mmPb 铅盒			1.25	7.18×10^{-69}
注射后小动物 暂存间 (1.96×3.82×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡	3700	0.0207	1.52	1.05×10^{-2}
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			1.52	1.05×10^{-2}
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			2.45	4.03×10^{-3}
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			2.45	4.03×10^{-5}
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			4.25	1.84×10^{-5}
	南侧防护门 外 30cm	6mmPb			2.45	1.28×10^{-5}
显像机房 (3.96×5.50×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡	740	0.0207	2.52	7.63×10^{-6}
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			2.52	7.63×10^{-4}
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			1.40	2.47×10^{-3}
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			5.24	1.76×10^{-4}
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			3.75	4.72×10^{-6}
	东侧观察窗 外 30cm	6mmPb			2.77	2.00×10^{-6}
	西侧观察窗 外 30cm	4mmPb			2.77	2.00×10^{-4}
	西侧防护门 外 30cm	4mmPb			4.62	7.18×10^{-5}
	北侧防护门 外 30cm	4mmPb			5.40	5.25×10^{-5}
测量间 (2.50×3.82×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡	740	0.0207	1.24	3.15×10^{-3}
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			2.34	8.85×10^{-4}
	南墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡			3.86	3.25×10^{-4}
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡			1.04	4.48×10^{-5}
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板			4.25	3.67×10^{-6}
	南侧防护门 外 30cm	4mmPb			3.86	1.03×10^{-4}

(续) 表 11-6 小动物实验室工作场所剂量率估算结果 (^{99m}Tc)

场所名称及尺寸 (长×宽×高)	核算位置	屏蔽物质及厚度	源活度 MBq	剂量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距离 m	屏蔽后 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$
控制区走廊 (12.25×1.96×3.80)	东墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒	740	0.0207	4.76	2.14×10^{-14}
	西墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			4.76	2.14×10^{-14}
	南墙外 30cm (显像机房、物品缓冲间部分)	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			1.52	2.10×10^{-13}
	南墙外 30cm (生物操作间部分)	24cm 实心砖墙+4mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			1.52	2.10×10^{-15}
	北墙外 30cm	24cm 实心砖墙+2mmPb 硫酸钡 +10mmPb 转运盒			1.52	2.10×10^{-13}
	顶棚外 30cm	15cm 混凝土+1mmPb 硫酸钡板 +3mmPb 铅板+10mmPb 转运盒			4.25	3.67×10^{-16}
	西侧防护门外 30cm	4mmPb+10mmPb 转运盒			4.76	6.76×10^{-15}
药物分装		30mmPb 通风橱+0.5mmPb 铅衣	185	0.0303	0.54	6.08×10^{-30}
药物注射		30mmPb 通风橱+20mmPb 铅注射器+0.5mmPb 铅衣	185	0.0303	0.54	6.08×10^{-50}
小动物转运		20mmPb 铅转运盒+0.5mmPb 铅衣	740	0.0303	0.50	2.84×10^{-19}
小动物摆位		20mmPb 铅屏风+0.5mmPb 铅衣	740	0.0303	0.50	2.84×10^{-19}
小动物解剖		0.5mmPb 铅衣	92.5	0.0303	0.50	3.55
垫料等放射性废物转运		0.5mmPb 铅衣	370	0.0303	1.00	3.55
注：①储源箱位于储源间东南角，储源箱中点距东墙 0.3m，距南墙 0.2m，距地 0.5m； ②显像机房中，小动物分子影像设备位于南侧边台上，设备中点距南墙 0.8m，距东西 2.52m，距地 0.5m； ③储源间、生物操作间、显像机房南墙为 200mm 原有墙体，材质未明确，保守计算时未将其纳入铅当量折算，原有墙体南侧重新垒砌 240mm 实心砖，两种墙体之间 60mm； ④研究人员在测量间进行相关操作时，小动物位于东北角无铅屏蔽通风橱内，操作时小动物距东墙 0.7m，距北墙 0.5m； ⑤保守计算时，未将设备自屏蔽纳入计算，未将硫酸钡厚度纳入距离核算。						

由表 11-5、表 11-6 可知，本项目小动物实验室工作场所各功能用房屏蔽体外关注点的辐射剂量率均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，符合《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 中的相关要求，本项目小动物实验室工作场所辐射防护措施合理可行



储源间、显像机房顶棚外 30cm 距离为 3.75m;

生物操作间、注射后小动物暂存间、显像机房、测量间及控制区走廊顶棚外 30cm 距离为 4.25m。

图 11-1 关注点距离图

(2) 有效剂量估算

本项目非密封放射性物质 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 不易挥发，日操作量较小，分装、注射操作均在通风橱内进行，本项目 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 对辐射工作人员及公众产生的内照射辐射影响可忽略。

本项目小动物实验室拟配备辐射工作人员 4 人，年工作 50 周，2 名实验员负责小动物实验室放射性药物分装、注射、动物处死（或解剖）、注射后动物转运等辐射工作，2 人负责动物摆位、扫描以及成像实验。通过上述计算结果可知， ^{18}F 对工作人员和公众产生的附加照射剂量率更大，年有效剂量估算时考虑最大化，故辐射工作人员和公众人员受照剂量

率均按 ^{18}F 考虑，非密封源操作时间则取 SPECT 操作及 PET 操作时间之和。小动物实验室四周公众成员很少停留，公众成员居留因子参照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）附录 A 的表 A.1 进行取值。

本项目小动物实验室辐射工作人员及公众受照有效剂量情况如下：

表 11-7 小动物实验室区域工作人员年有效剂量估算结果表

场所	操作类型	人数（人）	剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）	年受照时间（h）	年有效剂量（mSv）	
小动物实验室	分装	2	0.132	33	4.36×10^{-3}	2.141
	注射		8.23×10^{-3}	16.7	1.37×10^{-4}	
	小动物转运		2.464	66.7	0.164	
	小动物解剖		4.936	500	2.468	
	垫料等放射性废物转运		4.936	333.3	1.645	
	摆位	2	1.585	16.7	0.026	0.098
	扫描检查		0.509	334	0.170	

表 11-8 小动物实验室区域公众年有效剂量估算结果表

场所	场所	位置	剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）	年受照时间（h）	居留因子	年有效剂量（mSv）
小动物实验室	储源间	东侧室外空地	0.249	800	1/40	4.98×10^{-3}
		南侧半成品间	0.321	800	1/20	1.28×10^{-2}
	生物操作间（给药室）	南侧半成品间	0.052	49.7	1/20	1.29×10^{-4}
	显像机房	南侧器械库	0.322	334	1/20	5.38×10^{-3}
	注射后小动物暂存间	北侧室外空地	0.398	800	1/40	7.96×10^{-3}
	测量间	北侧室外空地	0.442	800	1/40	8.84×10^{-3}

注：①储源间年受照时间为：一周内 ^{18}F 送药储存 8（小时） $\times$ 50（周/年）=400 小时，一周内 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 送药储存 8（小时） $\times$ 50（周/年）=400 小时，共计 800 小时。②生物操作间（给药室）年受照时间为药物分装及注射时间之和。③注射后小动物暂存间、测量间年受照时间保守按 800 小时/年进行核算。

由估算结果表明，本项目运行后，非密封放射性物质使用过程中所致工作人员职业照射的最大附加年有效剂量值为 2.141mSv/a ，叠加 CT 扫描所致剂量（ $6.60 \times 10^{-5}\text{mSv/a}$ ）后总剂量为 2.141mSv/a ，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业照射剂量限值 20mSv/a 的要求，也低于剂量约束值 5mSv/a 。

公众照射的最大附加年有效剂量值为 $1.28 \times 10^{-2}\text{mSv/a}$ ，叠加 CT 扫描所致剂量（ $1.21 \times 10^{-5}\text{mSv/a}$ ）后总剂量为 $1.28 \times 10^{-2}\text{mSv/a}$ ，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）公众照射剂量限值 1mSv/a 的要求，也低于剂量约束值 0.1mSv/a 。

11.3 放射性废物分析

本项目非密封放射性物质工作场所产生的放射性废物主要为放射性废液、固体废物以及少量的挥发放射性气体。

11.3.1 放射性固体废物

小动物实验室产生的少量操作手套、口罩、棉签、试管、吸水纸（用于擦拭小动物尿液等）、注射器等放射性固体废物，分类收集于铅废物桶内置于废物间内暂存衰变；小动物实验室产生的小动物粪便、尸体及组织等拟装入专用尸体收集袋暂存于废物间的尸体冰柜内暂存衰变。上述放射性固体废物暂存衰变至少 30 天后，经监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 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。

放射性废物每袋重量不超过 25kg，且固体放射性废物收集桶外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至放射性废物间贮存。

本项目建立放射性废物收集、贮存、排放管理台账，做好记录并存档备案。本项目将安排专人负责小动物实验室固体放射性废物的存储和处理，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。放射性固体废物经过不少于 30 天衰变，经检测满足清洁解控水平后，按一般医疗废物处理。小动物实验室产生固废量约为 520kg/a 。

废活性炭过滤芯暂存于废物间，待其放射性比活度低于国家放射性固体废物豁免标准以后，按一般医疗废物处理。

11.3.2 放射性废液

本项目运行过程产生的废水主要为场所内清洗产生的废水。工作人员每天洗消和清洗产生放射性废水约 $0.05\text{m}^3/\text{天}$ （50L/天），则清洗废水年产生废水量为 $20\text{m}^3/\text{年}$ ，废水中核素为 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，统一收集排入衰变池。本项目衰变池为槽式衰变池贮存方式，配套设计了放射性废水衰变系统，位于小动物实验室东侧地下室。放射性废水衰变系统由一个沉淀池和 2 个衰变池组成，有效容积为 1m^3 ，总有效容积为 3m^3 。

本项目衰变池工作机制为：放射性废水自小动物实验室流入沉淀池内，经过 20 天沉淀池存满后将废水排入衰变池 01 内继续衰变。新一轮废水仍先流入沉淀池，经过 20 天沉淀池存满后废水排入 02 衰变池，当沉淀池第三次存满时，01 衰变池已至少衰变 40 天，满足暂存 30 天排放的要求。满足排放要求的废水首先排入学校公共管网，再排入城市污水管网。

衰变池并联运行，互为备用。配备电动阀门控制进出水排放，超声波液位计实时监测液位，放射性废液活度探头实时监测活度值，确保达标排放。

综上所述，采取上述废水衰变处理等辐射防护措施后，从管理角度本项目放射性废液衰变池设计合理可行。

11.3.3 放射性废气

本项目放射性核素分装及使用过程中会产生少量放射性气体。生物操作间（给药室）设置通风橱，测量间设置通风柜（无铅屏蔽）。通风橱及通风柜顶部均设置活性炭吸附并连接排风管道，其排风量能保证排风速度不低于 0.5m/s。2 个场所的通风橱及通风柜均分别设置独立的排风管道，废气汇集后拟经高效活性炭过滤装置（过滤效率 $\geq 99\%$ ）过滤后经排风井排至所在建筑屋顶，排风口高于屋脊 3m。

其他辐射工作场所按照高污染区、低污染区分区设计独立的排风系统，各排风系统的气流走向遵循了低浓度向高浓度流动，且设置止回阀，有利于防止放射性废气污染物的扩散，各股废气均经高效活性炭过滤后排至所在建筑屋顶高于屋脊 3m 处排放，故本项目辐射工作场所通风设计能满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中的相关要求。

排风口四周一般无人员停留，50m 范围内主要为本项目所在建筑及空地，无其他用房，因此本项目非密封放射性物质工作场所排气口位置远离了临近的高层建筑，因此能有效减少非密封放射性物质工作场所含放射性气体对周边环境的影响。同时废气排放口处外环境较为空旷，有利于废气自然扩散，经大气环境稀释后，对外环境人员以及大气环境影响较小。

11.5 事故影响分析

11.5.1 III类射线装置

本项目III类射线装置为小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统的 X CUBE（CT），III类射线装置运行过程中可能发生的辐射事故及风险的发生主要为管理问题，工作人员日常工作应严格执行各项管理制度，严格遵守设备的操作规程，进行辐射工作前应按要求穿戴好各种辐射防护用品，并定期检查设备的性能及场所内有关的安全警示装置，避免无关人员误入正在使用的射线装置机房内。

发生辐射事故处理原则如下：

（1）立即消除事故源，防止事故继续蔓延和扩大，即第一时间断开电源，停止 X 射线的产生。

（2）及时检查、估算受照人员的受照剂量，如果受照剂量较高，应及时安置受照人员就医检查。

（3）及时处理，出现事故后，应尽快集中人力、物力，有组织、有计划的进行处理。这样，可缩小事故影响，减少事故损失。

（4）在事故处理过程中，要在可合理做到的条件下，尽可能减少人员照射。

（5）事故处理后应累计资料，及时总结报告。学校对于辐射事故进行记录：包括事故

发生的时间和地点，所有涉及的事故责任人和受害者名单；对任何可能受到照射的人员所做的辐射剂量估算结果；所做的任何医学检查及结果；采取的任何纠正措施；事故的可能原因；为防止类似事故再次发生所采取的措施。

对可能发生的放射事故，应及时采取措施，妥善处理，以减少和控制事故的危害影响，并接受监督部门的处理。同时上报生态环境部门和卫健委部门。

11.5.2 非密封放射性物质

(1) 放射性污染控制

当使用放射性核素进行科研及实验项目发生放射性污染时，应当及时采取得当的应急措施，使放射性污染得到及时有效地控制。具体的处理方法如下。

①确认放射性污染事故的发生及引起当事人。

②确定发生污染的核素名称、数量、剂量和放射性污染的具体位置、范围、放射性强度等和发生的时间。

③做好警示标识，及时隔离及限制污染现场，穿戴好铅衣等防护用品对污染部位采用肥皂等清洗剂反复清洗，至污染控制水平以下为止。

④评价去污处理效果：污染部位或污染物进行去污处理后应进行处理效果的评价，如用辐射监测仪进行表面污染放射性检测，同时用于去污处理的材料去污处理后应按放射性废物处置，以防放射性污染的扩大和二次污染的发生。被污染过的仪器和器械应暂停使用。

(2) 放射性核素偷盗、丢失事故的处理

①确认放射性核素、密封源被偷盗、丢失事故的发生。

②查证放射性核素、密封源的核素名称、数量、活度，被偷盗、丢失的可能时间、地点和嫌疑人等。

③及时向生态环境报告，积极配合公安部门的调查。

④写出事故处理结果报告，查找事故发生的原因及可能的环节，评估事故影响。

(3) 应急预案的启动

①一旦发生辐射事故，即时启动《辐射事故应急预案》。发生辐射事故时，当事人应即刻报告辐射事故应急处理小组组长，组长随即通知辐射事故应急处理小组有关成员采取应急相应救助措施。

②发生辐射事故时，应急处理小组各成员应认真履行各职责，各相关部门应积极协调配合，以便能妥善处理所发生的辐射事故。

③各应急救助物质应准备充分、调配及时。

④发生事故后应在及时上报生态环境和公安等部门。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

为认真落实《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的规定，切实加强学校辐射安全与防护的监督管理，预防、控制和消除辐射危害，保障放射工作人员和公众的健康权益，成立辐射安全与防护领导小组，组长由校长担任，副组长为分管综合治理的校领导、分管实验室与设备管理处校领导，成员为党政办公室、发展规划与学科建设处、科学技术处、实验室与设备管理处、保卫处、研究生院、学生工作处、计划财务处、后勤管理处、基本建设处、校医院主要负责人，办公室挂靠实验室与设备管理处。

12.2 辐射安全管理规章制度

学校制定了《南昌大学实验室安全突发事件应急预案（试行）》，其中明确了组织体系与职责及辐射类安全事件应急处置参考措施；制定了《关于对学校议事协调机构进行优化调的通知》，明确了辐射安全与防护领导小组；同时制定《射线装置安全操作规程》《辐射工作人员的岗位职责》《辐射防护和安全保卫制度》《设备检修维护制度》《射线装置使用登记制度》《射线装置台账管理制度》《辐射监测方案》以及《辐射工作人员培训制度》等相关制度。

《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中第十六条第六款至第九款的要求，“使用放射性同位素、射线装置的单位应当具备有健全的操作规程、岗位职责、辐射安全和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案、确保放射性废气、废液、固体废物达标排放可行的处理方案、质量保证大纲、质量控制检测计划以及完善的辐射事故应急措施”。

综上，学校应在项目建成投入运行前应结合学校实验室实际情况补充制定：《放射性废物处理方案及措施》《放射性药品查对制度》《放射性药品安全管理制度》《放射源贮存制度》《质量保证方案》《放射性同位素使用登记制度》、《操作规程》等制度。

本项目运行后，学校应严格落实各项规章制度，定期修改和完善各项规章制度，确保放射性同位素与射线装置的安全运行。

12.3 辐射监测

（1）已有辐射监测情况

①常规监测：每年委托有资质的单位对辐射工作场所进行辐射环境的监测，包括射线装置机房的各面屏蔽墙、观察窗和防护门等工作场所，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提

交上一年度的评估报告。

②辐射工作人员佩戴个人剂量计上岗，并每季度定期送检，并建立完善的个人剂量检测档案。

（2）本项目辐射监测计划

学校使用的放射性同位素与射线装置，对周围环境及人员产生电离辐射影响。根据《放射性污染防治法》及《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》要求，学校须对放射性同位素使用场所、射线装置辐射工作场所及辐射从业人员开展辐射监测工作，以确保辐射从业人员的职业健康，控制放射性物质的照射，保障环境安全，规范辐射工作防护管理。为保护环境和辐射工作人员及公众健康，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）、《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）、《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）、《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）、《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）等的要求，学校项目建成投入使用前应针对本项目制定了相应的辐射监测计划，包括：

（1）辐射工作人员个人剂量监测

学校应定期委托有资质单位对辐射工作人员个人剂量计进行监测（常规监测周期一般为1个月，最长不应超过3个月），并按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》和《职业性外照射个人监测规范》的要求建立个人剂量记录及监测档案管理制度，并对职业照射个人监测档案终生保存。

本项目运行后，将委托有资质的单位开展辐射工作人员个人剂量计进行监测。同时按照《放射工作人员健康标准》的相关规定，为辐射工作人员建立个人健康档案，对新上岗工作人员，做好上岗前的健康体检，合格者方能上岗；对从事辐射工作的工作人员建立职业健康监护档案，档案要终生保存，工作人员调动工作单位时，个人剂量、个人健康档案应随其转给调入单位。职业健康检查周期为1~2年，但不得超过2年，必要时可适当增加检查次数；在本单位从事过辐射工作的人员在离开该工作岗位时也应进行健康体检。

（2）年度常规监测

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令第18号）的相关规定，使用放射性同位素与射线装置的单位应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。

学校将按照辐射监测计划，定期委托有相关资质的第三方辐射监测机构对学校的辐射

工作场所进行年度监测。年度监测数据将作为本单位辐射安全和防护状况年度评估报告的一部分，每年 1 月 31 日前上报环保行政主管部门。

（3）竣工环保验收

学校应根据核技术利用项目的开展情况，按照《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评[2017]4 号）、《建设项目竣工环境保护验收技术指南污染影响类》（生态环境部公告 2018 年第 9 号）的相关要求，对配套建设的环境保护设施进行验收，委托有能力的技术机构编制验收报告，并组织由设计单位、施工单位、环境影响报告表编制机构、验收监测（调查）报告编制机构等单位代表以及专业技术专家等成立的验收工作组，采取现场检查、资料查阅、召开验收会议等方式开展验收工作。建设项目配套建设的环境保护设施经验收合格后，其主体工程方可投入生产或者使用；未经验收或者验收不合格的，不得投入生产或者使用。本项目环保设施验收期限一般不超过 3 个月，需要对该类环保设施进行调试或者整改的，验收期限可适当延期，但最长不超过 12 个月。

（4）工作场所和周围环境监测

监测频率：每年委托有资质的单位监测一次，平时定期进行自主监测，具体监测频率详见表 12-2。核素操作前后均做表面污染监测，应急状况随时监测。

监测位置：

①工作场所：屏蔽体外 30cm 处以及人员经常驻留的位置；工作人员工作服表面、工作台表面、工作场所地面、墙面、相关容器表面；

②射线装置机房：显像机房屏蔽体外 30cm 处，包括墙体、顶棚、地板、观察窗、防护门、管线孔等。

学校拟自行配备 X- γ 剂量率测量仪、 α - β 表面污染仪（定期进行计量检定），对射线装置机房内及机房四周环境、小动物实验室工作场所控制区及监督区进行监测。发现问题及时整改。所有监测记录，存档备查，并编制年度辐射安全防护评估报告上报当地环保部门。

学校辐射监测设备拟配备情况见表 12-1，辐射监测计划见表 12-2。

表 12-1 本项目辐射监测设备配备情况一览表

序号	设备名称	数量	使用位置
1	手脚表面污染监测仪	1 台	实验室人员入口缓冲间
2	多功能辐射测量仪（表面沾污仪）	1 台	/
3	X、 γ 辐射监测仪	1 台	/
4	α 、 β 表面污染监测仪	1 台	/

(续) 表 12-1 本项目辐射监测设备配备情况一览表

序号	设备名称	数量	使用位置
5	个人剂量报警仪	4 台	进入辐射工作场所的工作人员佩戴
6	辐射巡测仪	1 台	/
7	个人剂量计	4 个	进入辐射工作场所的工作人员佩戴

表 12-2 辐射监测计划

监测对象		监测方案	监测项目	监测频率	监测方式
显像机房	防护性能	四周屏蔽墙外 30cm 处、操作位、防护门、观察窗、楼上、管线孔等	周围剂量当量率	每年 1 次	委托有资质单位监测
			周围剂量当量率	每季度 1 次	自行监测
	安全联锁	实测并检查	安全	每次使用前	自行检测
小动物实验室核素使用区域	日常例行监测	对各工作场所的各功能室以及楼上用房进行实测	周围剂量当量率	每 2 周 1 次	自行监测
			β 表面沾污	每月 1 次	自行监测
		人体表面皮肤、衣物等	周围剂量当量率	每次离开控制区前	自行监测
			β 表面污染		
	各功能室	对各工作场所的各功能室以及楼上用房进行实测	周围剂量当量率、 β 表面污染	每年 1 次	委托有资质单位监测、自行监测
			β 表面沾污	每年 1 次	
	专用衰变池排口	实测	排放前废水中放射性活度浓度	排放前	委托有资质单位监测
	放射性固体废物	实测	辐射剂量率、 β 表面污染	排放前	委托有资质单位监测、自行监测
辐射工作人员		佩带个人辐射剂量计	年有效剂量	操作时, 每季度送检 1 次	送有资质单位检测
外环境		实测	周围剂量当量率	每年 1 次	委托有资质单位监测

学校制定的辐射监测计划符合实际情况, 包含了竣工环境保护验收监测与定期监测、辐射工作人员个人剂量监测以及日常自行监测, 内容全面, 符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)、《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021)、《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021)、《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)、《操作非密封源的辐射防护规定》(GB 11930-2010)等的要求。

综上所述, 学校辐射监测计划较为全面, 能够涵盖本次扩建的核技术利用项目的各个环节, 且监测频率较为合理, 辐射监测计划整体可行。

12.4 辐射事故应急

为规范和强化应对突发辐射事故的应急处置能力，提高辐射工作人员对辐射事故应急防范的意识，将辐射事故造成的损失和污染后果降低到最小程度，最大限度地保障放射工作人员与公众的安全，维护正常实验秩序，做到对辐射事故早发现、速报告、快处理，建立快速反应机制。根据相关法律法规，南昌大学制定辐射事故应急预案。

1. 组织机构

组长由分管实验室安全的校领导担任，副组长由实验室与设备管理处、相关二级单位党政负责人和保卫处分管领导担任，工作组办公室挂靠实验室与设备管理处，实验室与设备管理处负责人兼任办公室主任。

工作组主要职责：研究制定实验室安全突发事件应急预案和日常落实；统一领导和指挥实验室安全突发事件的应急处置工作；建设完善实验室安全突发事件应急机制。

实验室建设与设备管理处：负责配合相关部门做好事件的处置与调查取证工作；负责组织专家，为现场指挥救援工作提供技术咨询；按照有关规定，向生态环境、安全监管等部门报送事件情况、请求支援，及时向学校领导和上级有关部门转达生态环境、安监等部门的指示；负责联系有资质的专业单位开展监测、治污、放射性化学废弃物处置等工作；

各二级单位对本单位所属（含依托在本单位的）实验室安全管理负有主体责任，应成立本单位实验室安全突发事件应急处置工作领导小组，负责现场指挥、协调和应急处置工作。负责根据学科特点制定本单位实验室安全突发事件应急预案，组织各实验室制定本实验室安全突发事件应急预案；负责日常安全救护设施的配置和维护、普及应急处置知识、开展应急演练，保证突发事件应急预案有效实施。事件发生后，根据本单位涉及危险源的种类、特性及现场情况，做好应急救援设施和物资及时补充和应急准备工作；负责保护现场，按照预案实施救援及事件处置工作，确保安全事件第一时间得到有效处理，并及时（1小时内）、准确上报信息。

2. 辐射类安全事件应急处置参考措施

（1）放射性核素丢失事件：

①发现放射性核素丢失后应立即报告；

报告基本程序：本单位实验室负责人→所属二级单位→实验室与设备管理处和保卫处→分管实验室安全的校领导→公安机关、生态环境部门、行政主管部门

②学校接到报告后，应根据情况立即启动应急预案，实验室与设备管理处和保卫处等有关部门应迅速到达现场，保护现场，将相关人员撤离至安全区域；

③配合公安机关和环保部门开展调查和侦破工作；

④放射性核素找到及污染被清除后，被污染现场须经检测达到安全水平，方可解除封

锁。

(2) 人员受到意外放射性照射事件：

①发现人员受到意外放射性照射后应立即将受照人员撤离至安全位置，封锁现场并报告（报告程序同上）；

②学校接到报告后，应根据情况立即启动应急预案，实验室与设备管理处、保卫处、校医院等有关部门应迅速到达现场；

③采取措施对受伤人员进行紧急护理，配合卫生部门将其送往相关专业医院进行检查和救治；

④组织有关人员对现场采取封锁现场、撤离人员等紧急安全处理措施，配合卫生、环保等部门处理现场，并进行事件调查；

⑤污染被清除后，被污染现场须经检测达到安全水平，方可解除封锁。

(3) 放射性核素污染事件

①发生放射性核素污染事件时，现场人员应保护现场、示警并立即报告（报告程序同第一条第一款）；

②学校接到报告后应根据情况立即启动应急预案，实验室与设备管理处和保卫处等有关部门迅速到达现场，组织人员封锁现场，疏散人员，配合环保、公安等主管部门切断一切可能扩大污染范围的途径；

③在确保自身安全的情况下，对区域内人员采取紧急防护处理，配合卫生主管部门将其送往相关专业医院进行污染物处理、检查和救治；

④配合环保主管部门迅速确定放射性核素种类、污染程度和污染范围，并采取措施尽快清除污染；

⑤污染被清除后，被污染现场须经检测，达到安全水平方可解除封锁；

⑥配合公安、环保、卫生等部门调查事件原因。

(4) 放射性实验室火灾事件：

①现场人员在确保自身能安全撤离的情况下，迅速切断电源、气源、移走放射源、压力容器等，并通知附近人员撤离；

②同时，立即向保卫处或公安消防部门报警，并逐级向实验室与设备管理处、分管实验室安全与分管安全生产的校领导报告；

③学校接到报告后立即启动应急预案，有关部门人员迅速到达现场，配合灭火和救护工作，采取适当灭火措施，防止出现放射性核素泄漏扩散。若发现已发生泄露，则按放射

性核素污染事故处理。

（5）射线装置失控或屏蔽失效事件：

- ①现场人员应立即切断射线装置电源，阻断射线产生；
- ②抢救受照人员，撤离照射现场，送医疗机构评估损伤程度及救治；
- ③由学校实验室与设备管理处向生态环境主管部门报告；
- ④请专业机构处置射线装置故障并屏蔽装置；
- ⑤经专业机构评估及主管部门批准，解除事故状态。

综上，南昌大学应在本项目建成投入使用前根据具体设备操作情况制定相应《操作规程》等制度并在项目开展后根据实际使用情况及时更新完善相关制度。

表 13 结论与建议

13.1 结论

南昌大学拟在前湖校区（红谷滩区学府大道 999 号）南昌大学实验动物科学中心一层东北角改建小动物实验室工作场所，日等效最大操作量为 $3.72 \times 10^6 \text{Bq}$ ，为丙级非密封放射性物质工作场所，拟使用设备为小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统（厂家为 Molecubes），型号为 β CUBE（PET）、 γ CUBE（SPECT）、X CUBE（CT）。

该项目属于高端医疗器械创新发展，对照《产业结构调整指导目录》（2024 年本）的规定其属于国家鼓励类的项目，故该项目符合国家产业政策。

1. 实践正当性

学校本次改建项目内容为使用 III 类射线装置，使用丙级非密封放射性物质工作场所开展科研及实验项目，该项目的开展有利于推动区域放射性药物技术和临床应用的发展。经分析，本项目放射性同位素与射线装置的工作场所屏蔽措施符合相关标准要求，对人员及周边环境的影响在国家标准范围内，该项目符合实践的正当性。

2. 辐射安全与防护

由场所辐射防护措施分析可知，本项目显像机房辐射防护设施满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求。

使用非密封放射性物质的小动物实验室工作场所，布局及分区、辐射防护与安全措施等均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的相关要求。

3. 环境影响分析

本项目正常运行时，主要环境影响为 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物产生的 γ 射线及小动物分子影像 PET/SPECT/CT 成像系统的 X CUBE（CT）产生的 X 射线。由估算结果可知，工作人员职业照射的最大附加年有效剂量值为 2.141mSv/a ，公众照射的最大附加年有效剂量值为 $1.28 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ ，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，也低于剂量约束值（即职业工作人员的年有效剂量不超过 5mSv ，公众成员的年有效剂量不超过 0.1mSv ）。

4. 辐射安全管理

学校制定了《南昌大学实验室安全突发事件应急预案（试行）》，其中明确了组织体系与职责及辐射类安全事件应急处置参考措施；制定了《关于对学校议事协调机构进行优化调的通知》，明确了辐射安全与防护领导小组；同时制定《射线装置安全操作规程》《辐射工作人员的岗位职责》《辐射防护和安全保卫制度》《设备检修维护制度》

《射线装置使用登记制度》《射线装置台账管理制度》《辐射监测方案》以及《辐射工作人员培训制度》等相关制度。

放射性三废处置

本项目非密封放射性物质工作场所拟设置了独立的放射性废液衰变池、放射性废物衰变桶及通风橱、活性炭过滤装置等，能对非密封放射性物质工作场所使用过程中的放射性废水、放射性固体废物及放射性废气进行有效处置。故本项目放射性废物处置方案可行。

5. 结论

本项目建设方案中已按照环境保护法规和有关辐射防护要求进行设计，建设过程严格按照设计方案进行施工、保证施工质量，同时完善本次评价对该项目提出的各项要求及措施，则项目内容正常运行时，对周围环境的影响符合辐射环境保护的要求，从环境保护和辐射防护角度论证，该评价项目是可行的。

二、建议

(1) 学校应在项目建成投入运行前应结合学校实验室实际情况补充制定：《放射性废物处理方案及措施》《放射性药品查对制度》《放射性药品安全管理制度》《放射源贮存制度》《质量保证方案》《放射性同位素使用登记制度》、《操作规程》等制度。

(2) 学校核技术利用项目运行后，应及时申请竣工环境保护验收。

(3) 学校应根据《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》（生态环境部 2019 年 第 57 号公告）和《关于进一步优化辐射安全考核的公告》（生态环境部 2021 年 第 9 号公告）的要求，新增辐射工作人员并按相关要求培训和考核，辐射工作人员均需通过国家核技术利用辐射安全与防护平台报名免费学习相关知识并参加考核，考核合格后方可上岗，并按相关要求复训。

(4) 学校应按相关要求尽快安排工作人员进行上岗前职业健康体检，合格者方可上岗。

(5) 学校应按相关要求及时办理微纳观原位透视体素成像分析系统的《辐射安全许可证》登记手续。

表 14 审批

下一级生态环境部门预审意见：

经办人：公 章

年 月 日

审批意见：

经办人： 盖章

年 月 日