

编号：BG-ZFFB25220035

核技术利用建设项目

深圳医学科学院核技术利用扩建项目

环境影响报告表

（报批稿）

深圳医学科学院

2026年1月

环境保护部监制

核技术利用建设项目

深圳医学科学院核技术利用扩建项目 环境影响报告表

建设单位名称：深圳医学科学院

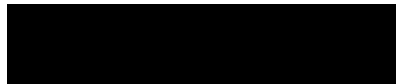
建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：深圳市光明区新湖街道光明生命科学园 A 栋 17 层

邮政编码：518000

联系人：王金生

电子邮箱



联系电话：



编制主持人职业资格证书（复印件）

本证书由中华人民共和国人力资源和社会保障部颁发，以环境保护工程师职业资格，表明持证人通过国家统一组织的考试，取得环境影响评价工程师的从业资格。

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.



Ministry of Human Resources and Social Security
The People's Republic of China



Ministry of Environmental Protection
The People's Republic of China

编号: HP000T3134
No.



苗旺
00013134

持证人签名:

Signature of the Bearer

苗旺

姓名: 苗旺
Full Name _____
性别: 男
Sex _____
出生年月: 1982.07
Date of Birth _____
专业类别: _____
Professional Type _____
批准日期: 2013.05
Approval Date _____

签发单位盖章: 
Issued by _____
签发日期: 2013 年 9 月 27 日
Issued on _____

管理号: 201303541035000003511410246
File No.
证书编号: 00013134

目录

表 1 项目基本情况.....	1
表 2 放射源.....	15
表 3 非密封放射性物质.....	16
表 4 射线装置.....	17
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）.....	18
表 6 评价依据.....	19
表 7 保护目标与评价标准.....	22
表 8 环境质量和辐射现状.....	27
表 9 项目工程分析与源项.....	34
表 10 辐射安全与防护.....	52
表 11 环境影响分析.....	76
表 12 辐射安全管理.....	103
表 13 结论与建议.....	113
表 14 审批.....	117
附件 1 可行性研究报告的批复.....	118
附件 2 辐射安全许可证.....	123
附件 3 本项目辐射环境现状监测报告.....	128
附件 4 辐射工作人员个人剂量检测结果和培训情况统计表.....	140
附件 5 辐射安全防护管理制度.....	145
附件 6 辐射事故应急预案.....	166

表 1 项目基本情况

建设项目名称	深圳医学科学院核技术利用扩建项目				
建设单位	深圳医学科学院				
法人代表	涂欢	联系人	王金生	联系电话	
注册地址	深圳市光明区新湖街道光明生命科学园 A 栋 17 层				
项目建设地点	深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区深圳医科院永久院区实验 A 楼				
立项审批部门	深圳市发展和改革委员会		批准文号	深发改[2024]310 号	
建设项目总投资 (万元)	4000	项目环保投资 (万元)	300	投资比例 (环保投资/总投资)	7.5%
项目性质	<input type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input checked="" type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其他			占地面积(m ²)	/
应用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I类 (医疗使用) <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input checked="" type="checkbox"/> V类		
	非密封放射性物质	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物		
		<input type="checkbox"/> 销售	/		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> 乙 <input checked="" type="checkbox"/> 丙		
	射线装置	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类		
	其他	/			

1.1 建设单位概况

深圳医学科学院(下简称“医科院”)以探索鼓励源头创新的新机制、引进与培养高水平人才为重要使命,组织、开展面向人民生命健康的覆盖生物医学基础研究、临床研究和产业转化的全链条研究及转化工作,履行科技资源管理、医学科学研究、教育与交流、临床研究与成果转化、政策咨询等职能,通过打造深圳生物医药人才高地,建设生物医药的深圳,打造生物医药的东方大湾区。医科院现有院区位于深圳市光明区卫光生命科学园内,院内平台设施包括生物医学实验技术中心、动物实验中心、研发与维护中心、生医药数据中心、临床医学研究中心等五大中心,各中心下设生物医学影像平台、动物实验平台、仪器与技术研发平台、数据存储平台、生物样本资源库等 28 个平台。

根据深圳市发展和改革委员会关于《深圳医学科学院及深圳湾实验室院区永久场地一体化建设（一期）项目可行性研究报告的批复》（深发改[2024]310号，见附件1），深圳市政府拟投资建设深圳医学科学院及深圳湾实验室院区永久场地一体化建设（一期）项目，共分为六块，采取分批分期模式建设，拟在深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区建设深圳医学科学院永久院区，包括实验A楼、实验B楼、实验C楼等公共技术平台，本次拟建核技术利用项目位于实验A楼一层内。

1.2 建设内容及规模

本次核技术利用项目环评为深圳医学科学院与深圳湾实验室永久场地一体化建设（一期）项目所含核技术利用建设项目的辐射环评，建设地点位于深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区拟建深圳医学科学院永久院区实验A楼一层内。在实验A楼一层东北部建设1个实验核医学工作场所，分为同位素实验区和动物实验区。

在同位素实验区建设5间同位素操作间、3间样本检测间、2间高频交叉操作间及配套功能用房，使用 ^{32}P 、 ^{33}P 共2种核素；在动物实验区建设1间小动物PET/CT机房、1间大动物PET/CT机房、1间大动物PET/MR机房及储源间、注射间、放射性动物尸体暂存间及配套功能用房，在小动物PET/CT机房安装使用1台小动物PET/CT（最大管电压100kV，最大管电流0.2mA，属III类射线装置），在大动物PET/CT机房安装使用一台大动物PET/CT（最大管电压140kV，最大管电流420mA，属III类射线装置），在大动物PET/MR机房内安装使用1台大动物PET/MR（非射线装置），使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr 共5种核素，每台设备配备1枚 ^{68}Ge 校准源（均属V类放射源）或使用 ^{18}F 液体源进行校准；在实验A楼东南侧建设一套衰变池和应急池，应急池用于同位素实验区应急冲淋产生的放射性废液的暂存处理，衰变池用于动物实验区放射性废液贮存衰变处理。

综上，本次拟建实验核医学工作场所共计使用7种核素、2台III类射线装置和3枚V类放射源，用于开展磷屏成像检测实验和动物影像实验等分析实验工作，经核算，实验核医学工作场所为1个丙级非密封放射性物质工作场所。

本项目拟使用的非密封放射性物质见表1-1，射线装置技术参数见表1-2，放射源技术参数见表1-3。

序号	核素名称	毒性组别	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	活动种类	用途	使用场所	工作场所等级
1	¹⁸ F	低毒	3.76E+06	9.40E+11	使用	PET 显像诊断	实验 A 楼一层东部实验核医学工作场所	丙级
			4.92E+05	5.90E+09	使用	设备校准		
2	⁶⁸ Ga	低毒	3.75E+06	3.75E+11	使用	PET 显像诊断		
3	⁶⁴ Cu	低毒	5.55E+05	5.55E+10	使用			
4	¹²⁴ I	中毒	9.62E+05	9.62E+09	使用			
5	⁸⁹ Zr	中毒	9.62E+05	9.62E+09	使用	同位素实验		
6	³² P	中毒	3.70E+06	9.25E+09	使用			
7	³³ P	中毒	3.70E+06	9.25E+09	使用			
合计			1.54E+07	/	/	/		

注：①¹⁸F、⁶⁸Ga 等短半衰期核素考虑衰变量；
 ②经建设单位确认，每个实验区每天最多使用 2 种核素，按日等效操作量最大的两种核素判定场所等级。

设备名称	数量	型号	设备参数			类别	工作场所位置
			最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	设备外表面 1m 处发射率 (μGy/mAs)		
小动物 PET/CT	1	待定	100	0.2	水平: <0.219 垂直: <0.0041	Ⅲ类	实验 A 楼一层小动物 PET/CT 机房
大动物 PET/CT	1	待定	140	420	水平: <0.035 垂直: <0.046	Ⅲ类	实验 A 楼一层大动物 PET/CT 机房

注：设备外表面 1m 处发射率参数取值范围由建设单位与设备厂家沟通后提供，报告中取最大值代入计算。

序号	核素名称	总活度 (Bq) / 活度 (Bq) × 枚数	类别	活动种类	用途
1	⁶⁸ Ge	1.11×10 ⁸ /1.11×10 ⁸ ×1 枚	V 类	使用	大动物 PET/CT 校准
2		7.4×10 ⁷ /7.4×10 ⁷ ×1 枚	V 类	使用	小动物 PET/CT 校准
3		7.4×10 ⁷ /7.4×10 ⁷ ×1 枚	V 类	使用	大动物 PET/MR 校准

1.3 目的和任务由来

1.3.1 评价目的

- (1) 对辐射活动场所及周边进行辐射环境现状水平监测和评价；
- (2) 评价拟建设的辐射防护设施及措施的可行性及有效性；
- (3) 分析项目运行过程中产生的辐射影响，预测辐射工作人员和公众所受的年有

效剂量；

(4) 分析本项目是否满足国家和地方生态环境主管部门对核技术利用建设项目环境管理规定的要求，为本项目的建设决策及辐射环境管理提供科学依据。

1.3.2 任务由来

根据《中华人民共和国环境影响评价法》《建设项目环境保护管理条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，项目建设前，应组织编制或者填报环境影响评价文件，并依照国家规定程序报生态环境主管部门审批或登记备案。

由 1.2 **建设内容及规模**可知，本次环评内容包括使用Ⅲ类射线装置、V 类放射源及丙级非密封放射性物质工作场所。根据《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），本项目属于包含“五十五、核与辐射”中“172、核技术利用建设项目—丙级非密封放射性物质工作场所”的情况，环境影响评价类别为编制环境影响报告表。

受建设单位委托，中辐环境科技有限公司环评技术人员在现场勘察、收集有关资料、委托开展辐射环境现状监测的基础上，结合项目特点，按照《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）中环境影响报告表的内容和格式，编制了本项目的环境影响报告表。

1.4 区域环境及保护目标

1.4.1 项目周边环境概述

1.4.1.1 项目地理位置和布局情况

本次核技术利用项目位于深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区拟建的深圳医学科学院永久院区，项目东南侧为规划科研用地（目前空置）；西南侧为科合路，隔路为光明科学城；西北侧为农田；东北侧为新塘山。本项目建设地点位于深圳医学科学院永久院区的实验 A 楼，项目地理位置见图 1-1。



图 1-1 项目地理位置图

1.4.1.2 项目与外部建筑环境关系

本项目实验核医学工作场所拟建于实验 A 楼（部分地下 1 层，地上 7 层，实验核医学工作场所下方无地下层建筑）1 层东北部，应急池和衰变池拟设于主体建筑楼外东南侧，地理式设置，上方为检修井盖。本项目辐射工作场所包含实验 A 楼一层实验核医学场所的工作场所和配套的衰变池和应急池，以下选取周围环境中距辐射工作场所边界较近的距离进行环境关系描述。根据建设单位提供的平面布局图纸测量，实验核医学工作场所距离南侧实验 B 楼最近约 54m，距离西南侧实验 B 楼最近约 55m，距离西北侧农田最近约 30m，距离东北侧新塘山最近约 16m。上述距离数据均为地面投影距离，下同。辐射工作场所周边环境关系及评价范围示意图见图 1-2 至图 1-4。

根据图 1-1~图 1-4 和现场调查，拟建辐射工作场所周围 50 米评价范围内无居民区、学校、行政办公区域等敏感目标。

(1) 项目位置及四至情况

表 1-4 项目周边相邻环境情况表

场所名称	方位	距离	周边情况
实验核医学工作场所	东南侧	紧邻	数据处理室、淋浴、更衣气瓶/耗材间、双光子实验室、手术室、动物准备室
	西南侧	紧邻	动物实验区、控制室、走廊
	西北侧	紧邻	非放污物暂存、过道、更衣室
	东北侧	紧邻	院内道路

场所名称	方位	距离	周边情况
	正上方	/	实验室、操作间、行为学实验室、洁净走道、水迷宫实验室
	正下方	/	岩土层

(2) 50m、200m 范围周边情况

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），本次调查建设项目 50m、200m 范围内情况具体如下表。

表 1-5 建设项目 50m、200m 范围内环境关系一览表

场所名称	项目位置	方向	距离	环境情况
实验核医学工作场所	实验 A 楼一层	东南侧	0-50m	院内绿化、衰变池、院内道路
			50-200m	实验 B 楼、实验 C 楼
		西南侧	0-50m	院内绿化、实验 B 楼
			50-200m	实验 B 楼、光明科学城
		西北侧	0-50m	院内道路、农田
			50-200m	基本农田
		东北侧	0-50m	院内道路、院内绿化、新塘山
			50-200m	新塘山

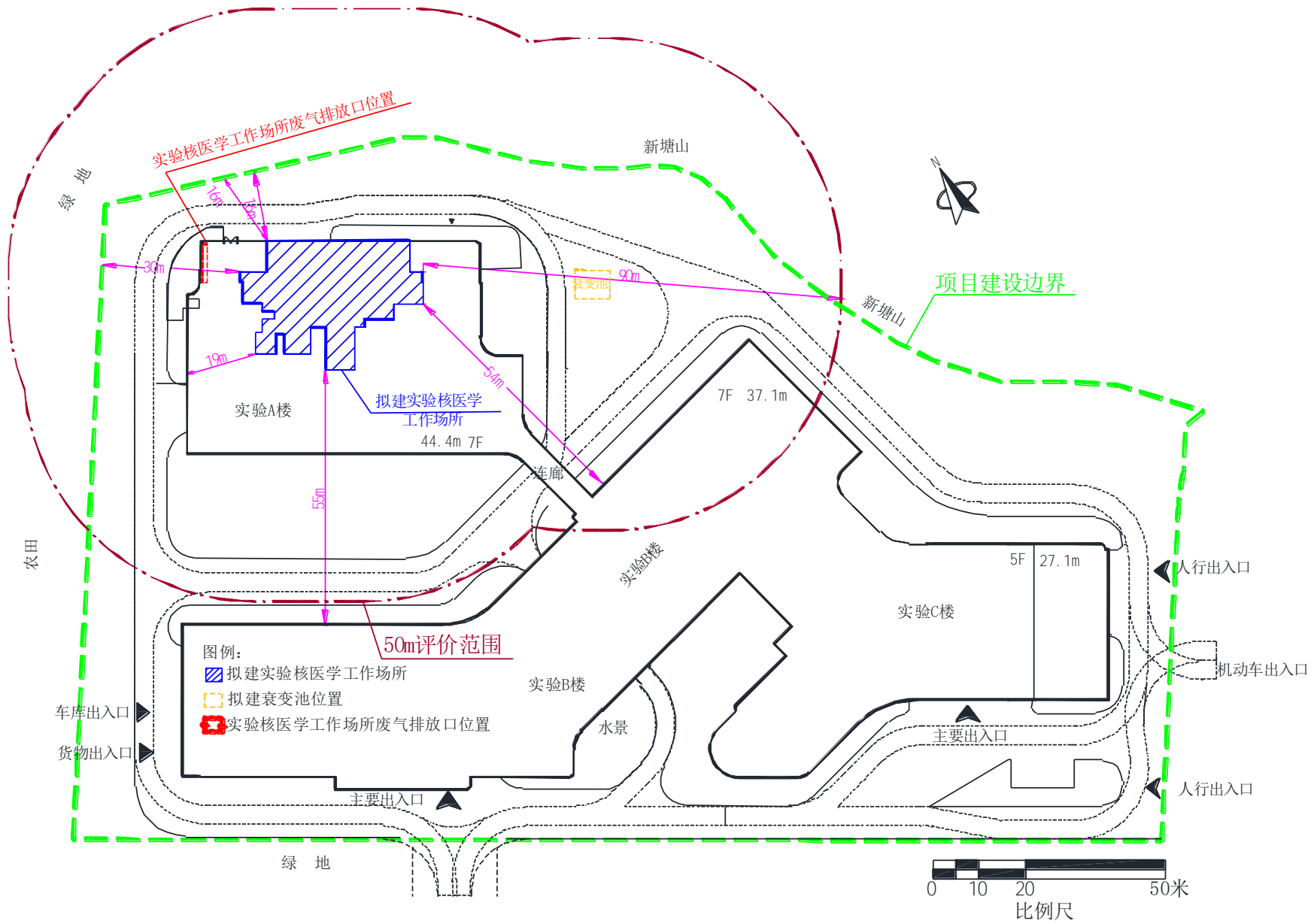


图 1-2 拟建辐射工作场所周边环境关系及评价范围示意图

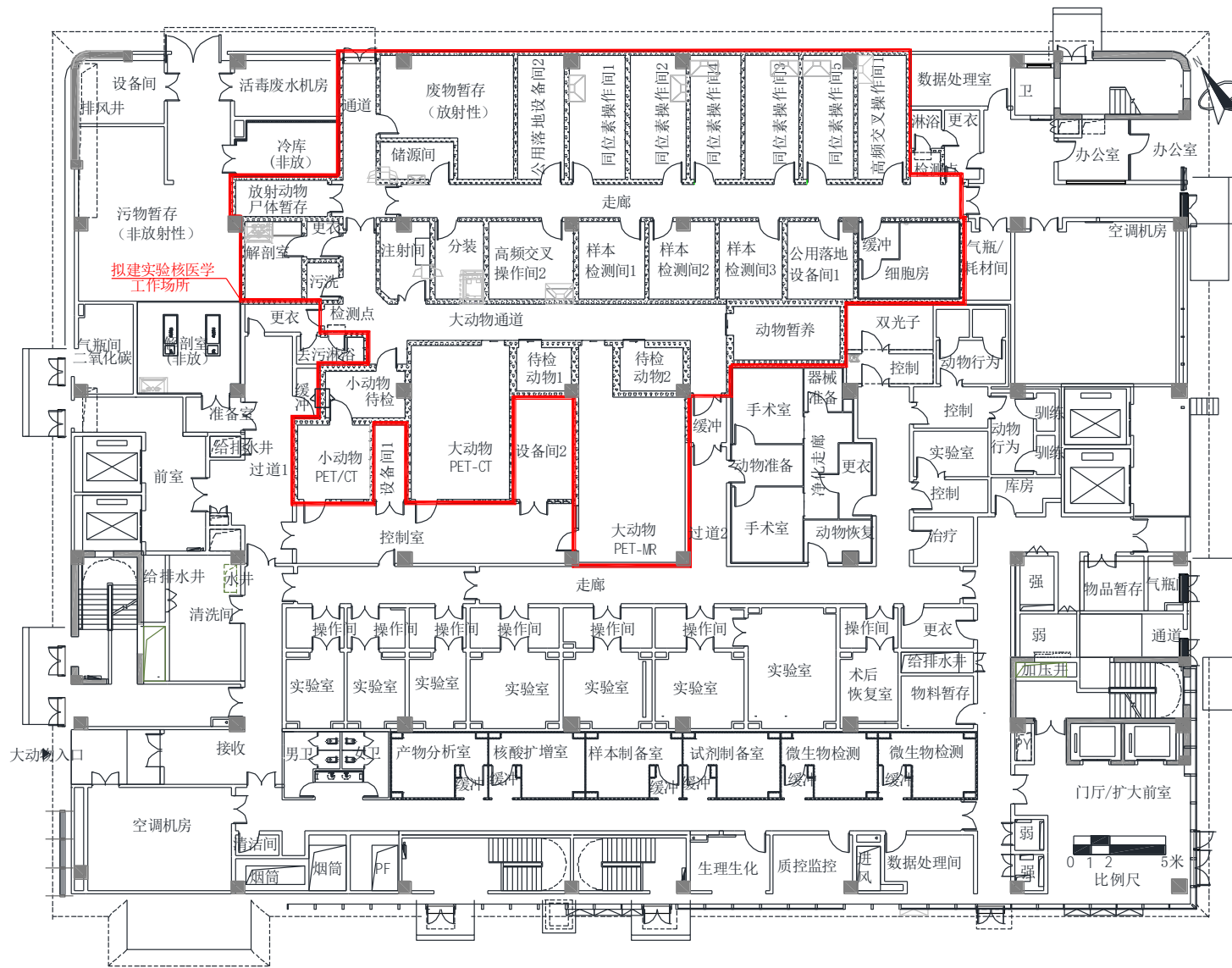


图 1-3 拟建实验 A 楼一层平面布局（实验核医学工作场所所在层）

1.4.2 项目选址合理性分析

本项目选址与标准要求的符合性分析见表 1-6。

表 1-6 与标准要求符合分析表

建设项目	标准	要求	实际情况	评价
实验核医学工作场所	参考《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021)	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。	实验核医学工作场所设置在实验 A 楼 1 层，场所入口设置有门禁及墙体进行物理隔离，并设置单独的人员、物流通道。	符合
		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。	本项目不存在医疗机构的产科、儿科内容，实验核医学工作场所未毗邻食堂等部门及人员密集区，且与非放射性工作场所有明确的分界隔离。	符合
		核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。	实验核医学工作场所排风口设置在实验 A 楼楼顶，已尽量远离周边高层建筑。	符合

拟建实验核医学场所相对独立和集中的布置于新建的实验 A 楼一层东北部，为无人长期居留的建筑物一端，设置单独的人员、物流通道，不毗邻食堂等部门及人员密集区，并且与非辐射工作场所设置墙体和门等实体分界隔离，能够避免无关人员进入实验核医学工作场所；实验 A 楼位于医科院永久院区北角，相对远离院区主出入口，衰变池和应急池设置于实验 A 楼东南侧外部院内绿地下方，位于实验核医学工作场所东南侧，两者距离较近，衰变池和应急池四周及下方均为岩土层，上方为院内绿化，周边无人员长居留场所；实验核医学工作场所排风口设置在实验 A 楼屋顶，排风口 50m 范围内无其它更高建筑。

为了尽量减少实验核医学工作场所对工作人员和公众的辐射影响，项目布局设置了相应的物理隔离和单独的人员和物流通道，功能房的配置能够满足拟开展项目的需求，并遵循核医学辐射防护的要求进行布局，根据相关实验内容，同位素实验区和动物实验区相对独立设置，动物实验区设置专门的动物待检、暂养等限制带核素动物的区域，放射性核素、工作人员、给药前和给药后动物分别设置单独的入口。

本项目充分考虑对周围环境的辐射影响，选址综合考虑了整个院区布置情况，选在人流量相对较小的一角，从根本上减少了人员到达和停留的概率，并采取相应的辐射安全防护措施，避免无关人员任意出入辐射工作场所而受到不必要的辐射照射或扩大污染范围，减少对公众的辐射影响。因此，实验核医学工作场所的选址满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）及《核医学辐射防护与安全要

求》（HJ1188-2021）关于选址的相关要求，本次核技术利用项目选址是合理可行的。

1.4.3 环境保护目标

本项目拟建实验核医学工作场所周边 50m 范围内主要为深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区深圳医学科学院永久院区内部区域、西北侧农田和东北侧新塘山，评价范围内无居民区、学校等敏感目标。因此，本项目环境保护目标主要为本项目辐射工作人员、评价范围内院区的实验人员以及其他公众，具体见表 7-1。

1.5 原有核技术利用项目情况

1.5.1 原有核技术利用项目许可情况

深圳医学科学院现持有辐射安全许可证（见附件 2），证书编号：粤环辐证[B2981]，许可种类和范围：使用Ⅲ类射线装置。发证日期：2025 年 2 月 20 日，有效期至：2029 年 12 月 30 日。目前已许可使用的内容包括 10 台Ⅲ类射线装置，均位于深圳市光明区新湖街道圳美社区卫光生命科学园。根据深圳市生态环境局关于印发《深圳市建设项目环境影响评价审批和备案管理名录（2021 年版）》的通知（深环规[2020]3 号），使用Ⅲ类射线装置的项目可不进行环境影响登记表的备案。

已许可登记的射线装置见下表。

表 1-7 已许可登记的射线装置一览表

序号	使用场所	装置名称	规格型号	类别	数量 (台)
1	多模态动物成像室 219	小动物活体 CT 多模态融合成像系统	Sky View100	Ⅲ	1
2	冷冻电镜实验室	电子显微镜	Krios G4	Ⅲ	1
3		电子显微镜	Glacios2	Ⅲ	1
4		电子显微镜	Talos L120C G2	Ⅲ	1
5		电子显微镜	Aquilos	Ⅲ	1
6		电子显微镜	Krios G4	Ⅲ	1
7		电子显微镜	Helios 5 Hydra CX	Ⅲ	1
8	仪器间 1740	全光谱动物活体成像系统	Aniview 100 Phoenix DXA Pro	Ⅲ	1
9		小动物活体 Micro-CT 成像系统	SKYSCAN1276	Ⅲ	1
10	仪器间 1741	生物学 X 射线辐照仪	RS2000C	Ⅲ	1

1.5.2 原有核技术利用项目回顾

医科院遵守《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，配合各级生态环境部门监督和指导，辐射防护设施运行、维护、检测工作良好，在辐射安全和防护制度的建立、落实以及档案管理等方面运行良好，医科院运行过程中未曾发生辐射事故。

（1）辐射安全与环境保护管理机构

医科院在原有核技术利用项目运行时已成立辐射安全与环境保护管理机构，并根据人员变动情况及时调整管理机构组成人员，明确了相关工作内容和职责，能够满足原有核技术利用项目运行过程中辐射防护管理和监督的需要。

（2）辐射安全管理相关规章制度

医科院依照《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》，已制定了一套辐射安全管理制度，在原有核技术利用项目运行过程中进行了落实和执行，原有核技术利用项目多年来运行状况较好，未曾发生过辐射事故。

（3）辐射工作人员培训情况

医科院现有 5 名辐射工作人员（见附件 4），从事Ⅲ类射线装置使用的辐射工作人员有 5 人，医科院已组织自主培训，并全部考核合格，考核成绩均在有效期内。

若有新增辐射工作人员，将按其计划从事的辐射工作类别组织培训和考核，考核合格后方可上岗；核技术利用项目运行过程中，将根据辐射工作人员考核合格成绩单日期，及时进行再培训（考核合格后，成绩有效期为 5 年）。建设单位应加强辐射安全管理，严格执行人员培训制度，要求各平台或者中心积极配合落实相关培训。

（4）开展辐射监测工作的情况

①个人剂量监测情况

医科院原有辐射工作人员已配置有个人剂量计，已按时进行个人剂量监测，并建立个人剂量监护档案。建设单位涉及使用射线装置或放射源的部门为动物实验中心和冷冻电镜平台，均委托深圳市瑞达检测技术有限公司（CMA 证书编号：202319120948）进行个人剂量监测，根据建设单位提供的各部门个人剂量监测报告（见附件 4，监测周期为 2025 年 1 月 3 日~2025 年 4 月 2 日），所有辐射工作人员年累积受照剂量均不超过职业年照射剂量约束值 5mSv，截至 2025 年 4 月，建设单位辐射工作开展不足六个月，个人剂量监测工作符合要求。

②工作场所辐射环境监测

截止目前，建设单位已许可使用的均为Ⅲ类射线装置，医科院利用配备的辐射剂

量率检测仪定期进行自主监测，监测因子为 X-γ 周围计量当量率，同时每年委托有资质的单位对辐射工作场所进行年度环境辐射监测，并将年度监测数据作为本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况年度评估报告的一部分，于每年 1 月 31 日前上报生态环境主管部门。

(5) 年度评估报告情况

医科院按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的要求，每年对本单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况进行评估，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度评估报告。

2024 年度建设单位完成了各项辐射安全防护工作，依据法律法规对本单位射线装置的安全和防护状况进行了年度评估，并按时向深圳市生态环境局上报了年度评估报告。



图 1-5 建设单位年度评估报告提交情况

1.6 本项目与原有核技术利用项目依托情况

医科院原已开展的核技术利用项目均位于深圳市光明区新湖街道圳美社区深圳市光明区卫光生命科学园，本次项目位于深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区深圳医学科学院永久院区，直线距离约 1400m，主体建筑、辐射安全防护和放射性“三废”处理设施（措施）不存在依托关系；管理机构拟在现有基础上根据本次项目人员配备情况进行调整，统一由医科院管理。本项目与原有项目的依托关系见表 1-8。

表 1-8 本项目与原有项目依托情况			
类别	本项目情况		依托/新增
辐射工作人员	本项目辐射工作人员均拟新招聘，因此不涉及剂量叠加。		新增
辐射监测设备	拟新配备 1 台满足标准要求的 X-γ 辐射巡测仪、4 台 β 表面污染检测仪用于开展本项目的辐射日常监测。		新增
辐射安全装置和防护用品	个人防护用品	个人剂量计、有机玻璃眼睛、面罩、长柄操作工具、立式注射防护车、铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套、铅眼镜等	新增
	场所防护设施	电离辐射警告标志、工作状态指示灯等辐射安全装置	新增
	放射性废物收集暂存设施	有机玻璃废物桶、铅防护废物桶、1 套衰变池和应急池、手套箱、通风橱等	新增
辐射安全管理制度和应急预案	针对本项目，建设单位将根据本次核技术利用项目内容补充制定针对性的设备操作规程等制度，并将本项目的相关内容纳入原有管理制度体系中。		依托现有进行完善
辐射监测计划	建设单位已建立辐射监测计划，拟在本项目建成后，在原有监测计划的基础上增加本次扩建项目的相关内容。		/

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	⁶⁸ Ge	1.11×10 ⁸ /1.11×10 ⁸ ×1 枚	V类	使用	大动物 PET/CT 校准	实验 A 楼一层实验核医学场 所大动物 PET/CT 机房	储源室中的源屏蔽 箱内	拟购，与 ¹⁸ F 校准二者选一
2	⁶⁸ Ge	7.4×10 ⁷ /7.4×10 ⁷ ×1 枚	V类	使用	小动物 PET/CT 校准	实验 A 楼一层实验核医学场 所小动物 PET/CT 机房	储源室中的源屏蔽 箱内	
3	⁶⁸ Ge	7.4×10 ⁷ /7.4×10 ⁷ ×1 枚	V类	使用	大动物 PET/MR 校准	实验 A 楼一层实验核医学场 所大动物 PET/MR 机房	储源室中的源屏蔽 箱内	
	以下空白							

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	贮存方式与地点	使用场所
1	¹⁸ F	液态，低毒，半衰期 109.8min	使用	3.76E+09	3.76E+06	9.40E+11	显像诊断	很简单操作	外购，放置于分装室手套箱中待用	实验 A 楼 实验核医学 场所小动物 PET/CT 机 房、大动物 PET/CT 机 房、大动物 PET/MR 机 房
				4.92E+08	4.92E+05	5.90E+09	PET/CT 校准	很简单操作	外购，暂存于储源室中	
2	⁶⁸ Ga	液态，低毒，半衰期 68.3min	使用	3.75E+09	3.75E+06	3.75E+11	显像诊断	很简单操作	外购，放置于分装室手套箱中待用	
3	⁶⁴ Cu	液态，低毒，半衰期 12.7h	使用	5.55E+08	5.55E+05	5.55E+10	显像诊断	很简单操作	外购，暂存于储源室中	
4	¹²⁴ I	液态，中毒，半衰期 4.18d	使用	9.62E+07	9.62E+05	9.62E+09	显像诊断	很简单操作	外购，暂存于储源室中	
5	⁸⁹ Zr	液态，中毒，半衰期 78.41h	使用	9.62E+07	9.62E+05	9.62E+09	显像诊断	很简单操作	外购，暂存于储源室中	
6	³² P	液态，中毒，半衰期 14.26d	使用	3.70E+07	3.70E+06	9.25E+09	核素实验	简单操作	外购，暂存于储源室中	
7	³³ P	液态，中毒，半衰期 25.38d	使用	3.70E+07	3.70E+06	9.25E+09	核素实验	简单操作	外购，暂存于储源室中	

注：日等效最大操作量的计算方法和核素操作方式依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的相关要求。

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 (台)	型号	加速 粒子	最大能量	活动 种类	额定电流 (mA) /最大输出 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 (台)	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/CT	III	1	待定	100	0.2	显像诊断	实验 A 楼一层实验核医学动物实验区	新购
2	大动物 PET/CT	III	1	待定	140	420	显像诊断	实验 A 楼一层实验核医学动物实验区	新购
3	以下空白								

(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	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
实验核医学场所放射性废液	液态	^{32}P 、 ^{33}P	/	/	/	/	废液桶中暂存 应急池（如产生应急冲淋）中暂存	暂存大于 254 天监测满足审管部门要求后，按照实验室废物每月交有资质单位处理
		^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr	/	/	/	/	衰变池暂存超过 42 天	
实验核医学场所放射性固废	废活性炭	^{32}P 、 ^{33}P 、 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I	/	/	/	/	放射性废物暂存间暂存	定期交由有资质的单位处理
	固态 （移液枪枪头、离心管、一次性注射器、棉签、滤纸、安瓿瓶）	^{32}P 、 ^{33}P	/	/	<150kg	/		暂存大于 254 天监测满足审管部门要求后，按实验室废物处理
		^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I	/	/	<125kg	/	放射性废物暂存间暂存	暂存大于 42 天监测满足审管部门要求后，按实验室废物处理
	固态	注射过放射性药物的动物尸体（ ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I ）	/	/	<2358.8kg	/	放射性动物尸体暂存间暂存	暂存大于 42 天监测满足审管部门要求后，交有资质单位按实验动物尸体做无害化处理
废旧放射源	固态	^{68}Ge	/	/	/	/	/	由放射源供应单位回收或送交广东省城市放射性废物库处置
实验核医学场所放射性废气	气态	^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I 、 ^{32}P 、 ^{33}P	/	/	/	/	/	专用排风管道引至屋顶，由活性炭过滤后排放

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/m³；年排放总量 kg。

2.含有放射性的废物要注明，其排放浓度、年排放总量分别用比活度（Bq/L 或 Bq/kg 或 Bq/m³）和活度（Bq）。

表 6 评价依据

法规文件	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》（1989 年 12 月 26 日第七届全国人民代表大会常务委员会第十一次会议通过；2014 年 4 月 24 日第十二届全国人民代表大会常务委员会第八次会议修订），2015 年 1 月 1 日施行；</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》（2002 年 10 月 28 日通过，自 2003 年 9 月 1 日起施行；2016 年 7 月 2 日第一次修正；2018 年 12 月 29 日第二次修正）；</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（2003 年 6 月 28 日第十届全国人民代表大会常务委员会第三次会议通过），2003 年 10 月 1 日施行；</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》（1998 年 11 月 29 日中华人民共和国国务院令 253 号发布；2017 年 7 月 16 日中华人民共和国国务院令 682 号修订，自 2017 年 10 月 1 日起施行）；</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，（2005 年 9 月 14 日经国务院令 449 号公布，2014 年 7 月 29 日经国务院令 653 号修改，2019 年 3 月 2 日经国务院令 709 号修改）；</p> <p>(6) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2006 年 1 月 18 日，国家环境保护总局令 31 号公布，2008 年 12 月 6 日经环境保护部令 3 号修改，2017 年 12 月 20 日经环境保护部令 47 号修改，2019 年 8 月 22 日经生态环境部令 7 号修改，2021 年 1 月 4 日经生态环境部令 20 号修改）；</p> <p>(7) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令 18 号），自 2011 年 5 月 1 日起施行；</p> <p>(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</p>
------	---

	<p>2005年第62号),自2005年12月23日起施行;</p> <p>(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2017年第66号),自2017年12月5日起施行;</p> <p>(10)《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),自2018年1月1日施行;</p> <p>(11)《建设项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)》(中华人民共和国生态环境部令第16号),自2021年1月1日起施行;</p> <p>(12)《深圳市生态环境局关于印发〈深圳市建设项目环境影响评价审批和备案管理名录(2021年版)〉的通知》(深环规[2020]3号);</p> <p>(13)《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日发布;</p> <p>(14)《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》(公告2019年第57号);</p> <p>(15)《关于进一步优化辐射安全考核的公告》(生态环境部公告2021年第9号);</p> <p>(16)《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);</p> <p>(17)《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),2019年11月1日施行;</p> <p>(18)《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》</p> <p>(19)《生态环境监测条例》(中华人民共和国国务院令第820号)</p> <p>(20)《关于印发〈核技术利用建设项目重大变动清单(试行)〉的通知》,中华人民共和国环境保护部办公厅,环办辐射函[2016]313号,2016年8月29日发布。</p>
--	--

<p style="text-align: center;">技 术 标 准</p>	<p>(1) 《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)；</p> <p>(2) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)；</p> <p>(3) 《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)；</p> <p>(4) 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)；</p> <p>(5) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》(HJ1326-2023)；</p> <p>(6) 《电离辐射监测质量保证通用要求》(GB8999-2021)；</p> <p>(7) 《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)；</p> <p>(8) 《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)；</p> <p>(9) 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2019)；</p> <p>(10) 《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》(DB4403/T586—2025)；</p> <p>(11) 《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)；</p> <p>(12) 《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010)；</p> <p>(13) 《医疗、工业、农业、研究和教学中产生的放射性废物管理》(HAD401/16-2023)；</p> <p>(14) 《危险废物贮存污染控制标准》(GB18597-2023)。</p>
<p style="text-align: center;">其 他</p>	<p>(1) 建设单位辐射安全许可证；</p> <p>(2) 建设单位原有核技术利用项目环保相关手续文件；</p> <p>(3) 《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)；</p> <p>(4) 《辐射防护手册》(李德平、潘自强)；</p> <p>(5) 《放射防护实用手册》(赵兰才、张丹枫)；</p> <p>(6) 建设单位提供的其它相关技术资料。</p> <p>(7) 《关于核医学标准相关条款咨询的复函》(中华人民共和国生态环境部辐射源安全监管司, 辐射函[2023]20号, 2023年9月11日发布)。</p>

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

参考《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）中对于报告书项目的评价范围规定“乙、丙级非密封放射性物质工作场所项目的评价范围取半径 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”，本项目为丙级非密封放射性物质工作场所，取实验核医学场所实体边界（考虑衰变池）外 50m 范围作为评价范围，评价范围示意图见图 1-2。

7.2 保护目标

本项目环境保护目标为项目辐射工作人员及评价范围内的公众，保护目标情况见表 7-1。

表 7-1 本项目评价范围内的环境保护目标一览表

项目	区域名称	方位	最近距离 (m)	保护目标	规模 (人)
实验核医学工作场所	实验核医学工作场所	内部	/	辐射工作人员	14
	数据处理室、淋浴	东南侧	5.4	公众	3
	气瓶/耗材间		2.5	公众	1
	双光子实验室、手术室		4.7	公众	2
	过道 2		2	流动人员	/
	控制室	西南侧	3.1	公众	3
	走廊		2	公众	2
	过道 1	西北侧	2.6	流动人员	/
	更衣间		4	公众	1
	污物暂存（非放射性）		8.7	公众	1
	冷库（非放射性）、活毒废水机房		5	公众	1
	院内道路	东北侧	12	公众	10
	实验室 1-19、检疫室	正上方	紧邻	公众	50
	操作间、一更、二更、清洁走道		紧邻	公众	5
	行为学实验室、水迷宫实验室		紧邻	公众	6
	岩土层	正下方	/	/	/
	衰变池、院内道路、实验 B 楼、新塘山	东南侧	5.4-90	公众	10
实验室、操作间、样本制备室、楼梯间、院内绿化	西南侧	3.1-50	公众	10	

项目	区域名称	方位	最近距离 (m)	保护目标	规模 (人)
	院内绿化、农田	西北侧	8.7-50	公众	2
	新塘山	东北侧	12-50	公众	10
	实验 A 楼	正上方	0-44.4	公众	300

7.3 评价标准

7.3.1 剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)：

表 7-2 剂量限值的相关内容

相关条款	具体内容
B1.1 职业照射	B1.1.1.1 应对任何工作人员的照射水平进行控制，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 实践使公众中有关关键人群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

参考《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)：

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 0.1mSv/a。

本项目取不超过 5mSv 作为辐射工作人员的年有效剂量约束值，取不超过 0.1mSv 作为公众的年有效剂量约束值。

7.3.2 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) 中表 B11 的规定，对于工作场所的放射性表面污染，应满足表 B11 的控制水平，见下表 7-3。

表 7-3 实验核医学场所工作场所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	4
	监督区	
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 ⁻¹

¹⁾ 该区内的高污染子区除外。

7.3.3 辐射剂量率控制水平

参考《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）及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函（2023）20号）中相关规定，本项目实验核医学工作场所辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平见表 7-4。

表 7-4 实验核医学辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

场所	位置	剂量率控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	
实验核医学工作场所	控制区外人员可到达处，距屏蔽体外 30cm 处	2.5	
	控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处	控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子 $\geq 1/2$ ）	2.5
		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 $< 1/2$ ）	10
	放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备外表面 30cm 处人员操作位	2.5	
	放射性药物合成和分装的箱体等设备外表面 30cm 处非正对人员操作位	25	
	固体放射性废物收集桶、暴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 30cm 处	2.5	

7.3.4 放射性废物排放控制水平

本项目放射性三废排放控制水平执行参考《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）和《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中的相关规定，具体内容见表 7-5。

表 7-5 放射性三废排放控制水平

名称	参考标准	章节	具体内容
放射性废液	《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）	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《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总 β 不大于 10Bq/L。
放射性固体废物	《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）	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 10 倍。

	《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)	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
放射性废气	《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)	5.2.3	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。

根据《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函[2023]20号）：

三、关于独立通风要求

核医学标准第 6.3.4 节规定，手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统。单独的排风系统意为手套箱、通风橱等设备的排风管在汇入“主排风管道前”的部分，应独立设置，防止发生气体回流和交叉污染。经过滤后的气体汇入到一个主管道中排放不违反标准要求。

7.3.5 X 射线设备机房防护要求

根据《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586—2025）：

6.4 动物诊断 X 射线装置机房最小有效使用面积及最小单边长度要求应满足以下要求：

a)动物诊断 CT（计算机断层扫描）设备机房有效使用面积不小于 10m²，单边长度不小于 2.5m；

6.5 动物诊断 X 射线装置机房、门、窗、墙体等应采取适当的防护措施，使得动物诊断 X 射线装置机房外 30cm 处周围剂量当量率满足：

a)动物诊断 X 射线装置在透视条件下周围剂量当量率不大于 2.5μSv/h；

b)动物诊断 CT、动物骨密度仪周围剂量当量率不大于 2.5μSv/h

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）：

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（见表 7-6）的规定。

表 7-6 X 射线设备机房（照射室）使用面积及单边长度

设备类型	机房内最小有效使用面积 ^d m ²	机房内最小单边长度 ^e m
CT 机（不含头颅移动 CT）	30	4.5
乳腺机、全身骨密度仪	10	2.5

^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（见表 7-）的规定。

表 7-7 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
CT 机房（不含头颅移动 CT） CT 模拟定位机房	2.5	
透视机房、骨密度仪机房、口内牙片机房、牙科全景机房（无头颅摄影）、碎石机房、模拟定位机房乳腺摄影机房、乳腺 CBCT 机房	1.0	1.0

6.2.3 机房的门和窗关闭时应满足表 3（见表 7-7）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 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理和场所位置

本项目位于深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区，项目地理位置图见图 1-1。本次拟建实验核医学工作场所位于实验 A 楼一层，工作场所位置见图 1-2。项目现场照片见图 8-1



图 8-1 项目现状照片

8.2 监测依据

《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）

《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）

8.3 监测因子和监测方案

8.3.1 环境现状评价的对象及监测因子

本项目环境现状监测及评价对象为辐射工作场所及周围环境。该辐射工作场所使用非密封放射性物质和 X 射线机开展工作，根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）的要求，X 射线机（包括 CT 机）在运行前对屏蔽墙或自屏蔽体外 30cm 处的 X- γ 辐射空气吸收剂量率进行一次监测；应用非密封放射性物质启用前需监测 γ 辐射、土壤、地表水和底泥。本项目所在的实验核医学场所尚处于建设阶段，尚未启用，故本次监测属于应用非密封放射性物质启用前的监测，需监测 γ 辐射、土壤、地表水和底泥。根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）：如应用核素难以分析，

可用总放替代。因暂未发布土壤中本项目使用核素的相关推荐监测方法和评价标准，且本项目无 α 衰变核素，因此对土壤中总 β 放射性进行检测分析。本项目监测因子见表 8-1。

表 8-1 本项目监测因子

应用类型	《辐射环境监测技术规范》 (HJ61-2021)	监测因子	备注
非密封放射性物质	γ 辐射空气吸收剂量率、土壤、地表水和底泥（废水不对外排放且无泄漏的，则不需监测地表水和底泥）	γ 辐射空气吸收剂量率、土壤	废水由污水管道排至污水处理站，不外排且无泄漏，不需要监测地表水和底泥
射线装置（X 射线机）	γ 辐射空气吸收剂量率	γ 辐射空气吸收剂量率	/

8.3.2 监测方案

表 8-2 监测信息表

监测因子	γ 辐射空气吸收剂量率	土壤中总 β 放射性
监测单位	浙江建安检测研究院有限公司	核工业二三〇研究所 (CMA: 231820182527)
监测日期	2025 年 4 月 23 日	2025 年 4 月 24 日
监测条件	温度: 30°C, 湿度: 53%RH, 晴	/
监测仪器	便携式 X、 γ 辐射周围剂量当量率仪	流气正比计数器总 α 总 β 测量仪 检定装置

表 8-3 监测仪器相关信息

仪器名称: 便携式 X、 γ 辐射周围剂量当量率仪	
仪器型号	6150AD6/H+6150AD-b/H
生产厂家	automess
仪器编号	05038417
能量范围	38keV-7MeV
量程	模拟量程: 10nSv/h-100 μ Sv/h; 数字量程: 1nSv/h-99.9 μ Sv/h
检定单位	上海市计量测试技术研究院 华东国家计量测试中心
检定证书	2024H21-20-5396818001、2024H21-20-5396818002
检定有效期	2024 年 07 月 30 日-2025 年 07 月 29 日
仪器名称: 流气低本底 α 、 β 测量仪	
仪器型号	MPC-9604
测量范围	>0.60cpm
检定证书编号	hnjln2024347-1041
检定有效期	2024 年 9 月 14 日-2026 年 9 月 13 日
检出限	17.8Bq/kg

8.3.3 质量保证措施

(1) γ 辐射空气吸收剂量率

- 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。
- 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监测仪器每年经有资质的计量部门检定合格或校准确认后方可使用。
- 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，最后由技术总负责人审定。

(2) 土壤采样和监测

- ①建立质量管理体系，保证其检测活动独立、公正、科学、诚信。
- ②健全的各项管理制度，包括检测质量考核制度、制样人员奖惩制度、安全管理制度、档案管理制度、防止弄虚作假管理制度等。
- ③按照相关标准质控规范作为工作依据，实施各项内部质控措施。
- ④按照《合格评定化学分析方法确认和验证指南》（GB/T27417-2017）和《环境监测分析方法标准制订技术导则》（HJ168-2020）等相关标准方法要求，完成对所选用分析测试方法的检出限、测定下限、精密度、准确度、线性范围等方法特性指标的确认工作，且选用方法已获得资质认定。
- ⑤严格按照《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）中土壤样品采集与处理相关要求对土壤样品的采集和处理。

⑥加强样品检测过程的质量管理工作。对检测人员依据分析测试方法技术规定，进行技术培训，讲解检测的方法选择、确认、检测步骤、注意事项、试剂和设备保证等，培训后进行考核。实验室严格按照相关质量保证与质量控制技术规定的要求开展样品检测和质量控制。严格执行三级检查制度，并做好质量记录。检测质量管理小组根据情况及时组织各检测小组质量检查与质量分析会，分析样品检测过程中存在的问题，制定出整改措施，并在样品检测工作中认真贯彻执行。制定从项目负责人、技术负责人、质量负责人、各项目主检人到检测人员的岗位质量责任制，明确管生产必须管质量，具体执行实验室的质量考核制度。

⑦成立数据审核、报告编制和数据上报的质量管理小组，加强数据审核、报告编制和数据上报过程的质量管理工作。

⑧在完成对所中标样品进行分析测试时，将分别按平行样不少于 10%和质样（含标准样品、加标回收和统一监控样）不少于 2%的比例对检测样品进行精密度与准确度的内部质量控制，确保检测质量满足相关规范和文件的要求。

⑨按照相关质量保证与质量控制技术规定制定单位内部质量控制措施，做好空白实验、定量校准、精密度控制和准确度控制等工作，并做好异常样品的复检工作。在完成每项样品分析测试合同任务时，还将对其最终报出的所有样品分析测试结果的可靠性和合理性进行全面、综合的质量评估，按相关文件要求提交质量评估总结报告。

8.4 监测点位和监测结果

8.4.1 监测点位

本次监测目的主要是了解项目拟建场所环境辐射现状水平。根据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）的辐射环境质量监测布点原则和要求进行监测布点，本项目的环境辐射现状监测点位主要位于本项目辐射工作场所及周边环境室外空地和道路，开展道路测量时，点位应设置在道路中心线。测量时，仪器探头中心距离地面 1m。根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）5.3 核技术利用辐射环境监测的布点要求，结合本评价项目的评价范围、平面布局情况和检测点的可到达性进行布点。本次监测以本项目工作场所为中心，半径 50m 范围内布点，分别在拟建场址及周边相邻区域、评价范围内人员流动较大的关注区域等位置共布设 27 个监测点位。土壤采样点根据深圳市常年主导风向和放射性废气排放情况进行选择。具体监测点位布置情况详见图 8-2。

根据深圳国家基本气象站 1999-2018 年共 20 年气候资料统计风频玫瑰图可知，深圳市常年主导风向为东北风，本项目土壤采样点位于本项目实验核医学场所东北侧（上风向）和西南侧（下风向）。本项目土壤采样点位布置图见图 8-2。

表 8-4 本项目监测点位布置情况

监测因子	监测点位
γ 辐射空气吸收剂量率	室外点位共 27 个
土壤	本项目实验核医学工作场所东北侧绿化带（上风向）、本项目实验核医学工作场所西南侧绿化带（下风向）。

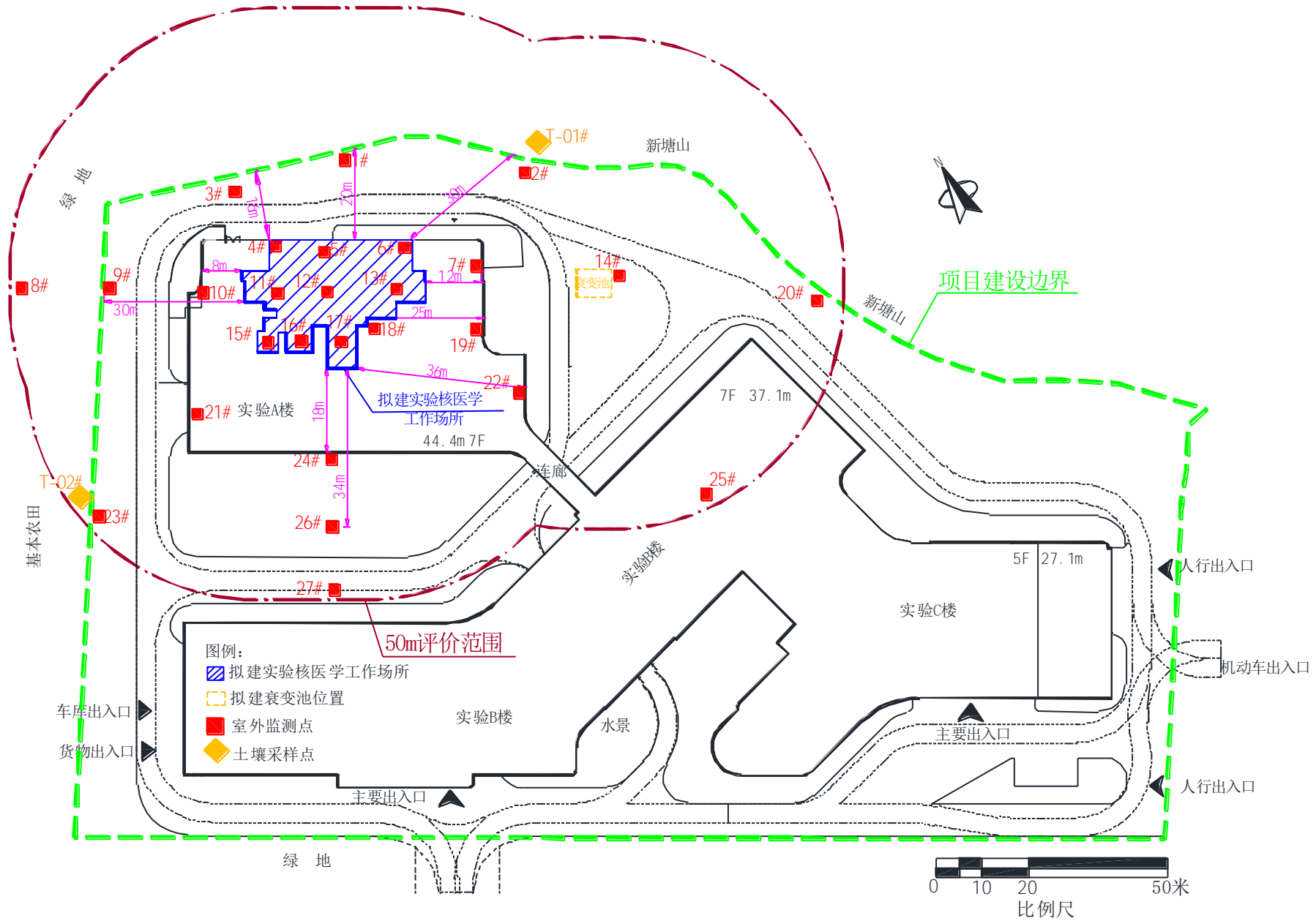


图 8-2 本项目实验核医学工作场所及周围环境监测点位示意图

8.4.2 监测结果

(1) γ 辐射空气吸收剂量率

本项目辐射工作场所及周围环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果详见表 8-4。

表 8-4 拟建辐射工作场所周围 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果一览表

监测点 编号	监测点位置	监测结果 (nGy/h)	地面介 质	备注
		平均值		
1#	拟建实验核医学工作场所东北侧约 20m	115±2	水泥	室外道路
2#	拟建实验核医学工作场所东侧约 16m	116±2	水泥	室外道路
3#	拟建实验核医学工作场所北侧约 30m	107±3	水泥	室外道路
4#	拟建实验核医学工作场所北部	113±3	水泥	室外道路
5#	拟建实验核医学工作场所东北部	116±3	水泥	室外道路
6#	拟建实验核医学工作场所东部	114±2	水泥	室外道路
7#	拟建实验核医学工作场所东南侧约 12m	118±2	水泥	室外道路
8#	拟建实验核医学工作场所西北侧约 50m	113±3	泥土	室外道路
9#	拟建实验核医学工作场所西北侧约 30m	122±2	水泥	室外道路
10#	拟建实验核医学工作场所西北侧约 8m	119±3	水泥	室外道路
11#	拟建实验核医学工作场所西北部	109±3	水泥	室外道路
12#	拟建实验核医学工作场所中部	115±3	水泥	室外道路
13#	拟建实验核医学工作场所东南部	111±3	水泥	室外道路
14#	拟建衰变池位置	118±2	水泥	室外道路
15#	拟建实验核医学工作场所西部	113±3	水泥	室外道路
16#	拟建实验核医学工作场所中部偏西南	108±3	水泥	室外道路
17#	拟建实验核医学工作场所西南部	112±3	水泥	室外道路
18#	拟建实验核医学工作场所中部偏南	118±3	水泥	室外道路
19#	拟建实验核医学工作场所东南侧约 25m	112±3	水泥	室外道路
20#	拟建实验核医学工作场所东南侧约 50m	118±3	水泥	室外道路
21#	拟建实验核医学工作场所西侧约 19m	115±3	水泥	室外道路
22#	实验核医学工作场所东南侧约 36m	109±3	水泥	室外道路
23#	拟建实验核医学工作场所西侧约 50m	115±3	水泥	室外道路
24#	拟建实验核医学工作场所西南侧约 18m	118±3	水泥	室外道路
25#	拟建实验核医学工作场所东南侧约 50m	110±3	水泥	室外道路
26#	拟建实验核医学工作场所西南侧约 34m	117±3	水泥	室外道路
27#	拟建实验核医学工作场所西南侧约 50m	118±2	水泥	室外道路

注：1、测量时探头垂直距离地面 1m。

2、每个监测点测量 10 个数据取平均值，以上监测结果均已扣除仪器对宇宙射线的响应值。

3、在测量环境 γ 辐射空气吸收剂量率时，监测结果 \dot{D} 按公式进行宇宙射线响应的扣除：

$$\dot{D} = C_f (E_f \dot{X} - \mu_c \dot{X}_c)$$

式中： \dot{D} ——环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果；

C_f ——仪器量程检定/校准因子，由法定计量部门检定或校准时给出，本次使用仪器校准因子为 0.99；

E_f ——仪器检验源效率因子。 $E_f=A_0/A$ ，其中 A_0 、 A 分别是检定时和测量当天检验源的净计数，如仪器无检验源，则该值取 1，本次监测使用仪器效率因子取 1；

\bar{X} ——现场监测时仪器 n 次读数的平均值， $n \geq 10$ ；仪器使用 ^{137}Cs 进行校准，空气比释动能和周围剂量当量的换算系数为 1.20Sv/Gy；

μ_c ——建筑物对宇宙射线带电粒子和光子的屏蔽因子，楼房取值为 0.8，平房取值为 0.9，原野、道路取值为 1；

λ_c ——测点处仪器对宇宙射线的响应值，检测结果为 23nSvh（换算系数取 1.20Sv/Gy，已根据海拔高度和经纬度进行修正），（监测地址：宁波东钱湖湖心水面，监测时间：2024 年 9 月 11 日）。

（2）土壤中总 β 放射性

本项目土壤样品为拟建辐射工作场所西南侧约 30 米处绿化带 0~10cm 表层土壤。采样方法采用梅花形布点法设置 5 个采样点，每个点位取样 2kg，去除石块、草根等杂物混匀后取其中 2kg 使用双层塑料带密封作为土壤样品送至核工业二三〇研究所检测。

本项目土壤样品中总 β 放射性检测结果见表 8-5。

表 8-5 本项目土壤放射性活度监测结果

分析编号	样品名称	送/采样编号	检测项目	计量单位	检测结果
250520-0001	拟建实验核医学工作场所东北侧（上风向）	T-01#	总 β	Bq/kg	1276.5
250520-0002	拟建实验核医学工作场所西南侧（下风向）	T-02#	总 β	Bq/kg	2156.4

8.5 环境现状调查结果评价

由表 8-4 的监测结果可知，本项目拟建辐射工作场所及周围环境的室外 γ 辐射剂量率为 107nGy/h~122nGy/h。根据《2024 年深圳市生态环境状况公报》（深圳市人民政府公报，2025 年 6 月 25 日发布），深圳市扣除仪器对宇宙射线响应值后：环境 γ 辐射剂量率为 59.8nGy/h~153nGy/h。本项目拟建地点及评价范围内其它区域辐射水平处于当地天然环境辐射水平范围内。

根据《环境科学》（1987 年第 2 期，深圳市土壤中总 β 、总 α 放射性水平，刘祖森，汤凌全）深圳市土壤中总 β 放射性为 $(2.02 \pm 1.14) \times 10^{-8} \text{Ci/kg}$ （即 $747.4 \pm 421.8 \text{Bq/kg}$ ），本项目土壤中总 β 放射性检测结果为 1276.5Bq/kg 和 2156.4Bq/kg，略高于调查水平，这可能是地下矿物质差异，生物残骸残留以及土壤生物钾含量高原因引起的。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 工艺设备和工艺分析

9.1.1 磷屏成像检测实验工作原理

利用放射性核素标记的化合物的两个特点：第一是与被示踪的物质有同一性，即放射性核素与其同种元素的非放射性核素在化学和生物学行为上具有高度一致性，不致扰乱和破坏体内外生理过程的平衡状态；第二是与被示踪的物质有可区别性，放射性核素的原子核不断衰减，发出能被放射性探测器所探测的射线，从而实现对标记物的定量及定位结果，结合研究目的作出客观评价。

磷屏成像检测实验，通过使用放射性核素作为示踪剂，利用一种可重复使用的特殊磷屏，记录由含放射性核素标记的样品所发出的射线，再通过专用仪器扫描成像。该技术灵敏度极高，常被用于生物、化学等研究领域的痕量分析。

9.1.2 PET 诊断设备组成及工作原理

PET (Positron Emission Tomography, 正电子发射断层扫描) 的工作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，借此诊断疾病，又称为代谢显像，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。

PET 扫描系统主要由扫描仪、显像、电子橱、操作工作站、分析工作站和影像硬拷贝等组成。PET 扫描仪的外形为一个柱状的支架，扫描视野位于支架的中央，由探测器、射线屏蔽装置等组成。

近年来，为减少诊断时间、获得更清晰的图像和更多有价值的影像信息，发展了融合应用高档多排 CT 技术进行精确定位的 PET/CT，使两种成像技术优势互补，使用同一个检查床和同一个图像处理工作站，PET 图像提供功能和代谢等分子信息，CT 提供精细的解剖和病理信息，通过融合技术，一次诊断即可获得疾病的病理生理变化和形态学改变，明显提高诊断的准确性。

PET/MR 是将 PET 与核磁共振成像术 (Magnetic Resonance Imaging) MR 结合一体化的大型功能代谢与分子影像诊断设备，同时具有 PET 和 MR 的检查功能，可同时获取全身 MR 和 PET 数据，达到意义上的优势互补。PET 显示人体器官和组织的代谢

活动情况，而 MRI 利用磁场和无线电波，可显示人体内部器官、软组织、骨骼的结构图像，常见 PET/MR 设备外观示意图如图 9-3。

使用 ^{68}Ge 校准源是一种测量校准。由于 γ 光子穿透动物体时因为光电效应或康普顿散射等效应而被衰减，影响 PET 图像的质量。为了让重组的断面影像更加接近原始真实的情形，采用可收放式 ^{68}Ge 校准源作为穿透放射源进行穿透式扫描及空白扫描，利用截断式衰变校正法进行衰减校正。

^{68}Ge 校准源一般由源芯、外管、套管和磁性手柄组成。源芯是放射源的核心部分，要求具有稳定的化学形式和合适的物理状态。国内大多采用化学吸附工艺制备源芯材料，其组成有以陶瓷微球为源芯或者以硅胶为源芯。

临床上，传统的 PET 质量检查方法为对固体放射源进行扫描从而评估系统状态，质量检查的效率和效果还依赖于放射源的活度，而固体放射源的活度随时间有所衰减。因此，随着 PET 显像诊断的发展，实际应用中出现了较多使用 ^{18}F 液体源进行校准的情况，使用 ^{18}F 校准源对系统参数进行检测，可及时发现某些过度偏离“基准水平”的参数，来确保设备具有稳定的性能及优质的图像。液体源可以随用随取，活度较准，避免固体放射源随时间衰减进而影响有源质控效率的问题；另外，水模可以方便的收纳在附件柜中，无需配备专门的屏蔽防护装置；而且，装配有 PET 的单位一般都具备使用 ^{18}F 的资质，如果使用液体源进行有源质控，就无需另行申请 ^{68}Ge 或其他固体放射源使用许可等。可见， ^{18}F 在质控检测方面与 ^{68}Ge 拥有同样的效果，且比 ^{68}Ge 拥有更为稳定的优势，但同时存在需要人工制作模体、产生一定废液的缺点。

由于本项目 PET/CT 和 PET/MR 设备暂未定设备厂家，而使用校准源的类型不同厂家不一样，根据目前市面主流设备厂家校准方式，大部分厂家使用 ^{68}Ge 校准（V 类源），也有个别厂家使用非密封放射性物质 ^{18}F 校准的方式，本次评价将对两种情况均进行简要描述和分析。

（1）校准流程（ ^{68}Ge 和 ^{18}F 二选一）

① ^{68}Ge 放射源校准

本项目 PET/CT 的校准放射源拟使用 3 枚 ^{68}Ge 放射源，属于 V 类放射源，购于有资质单位销售厂家，放射源在进场时带有 50mm 铅罐进行屏蔽，放射源购买后的运输由厂家负责，并由厂家承担相应过程中的辐射安全防护责任，放射源在设备校准时的使用有设备操作人员负责，并由建设单位承担相应过程中的辐射安全防护责任。放射源外面有不锈钢包壳，并存放在 50mm 铅当量铅罐，放射源日常存储于储源室内，校

准时由 PET 设备操作员进行存取、转移。校准时，设备操作员将校准源从储源室取出放到 PET/CT 诊断床上，在控制室隔壁进行校准质控操作（CT 不曝光），扫描结果都通过后结束质控，将校准源送回储源室的保险柜双锁存放，工作流程见图 9-1。

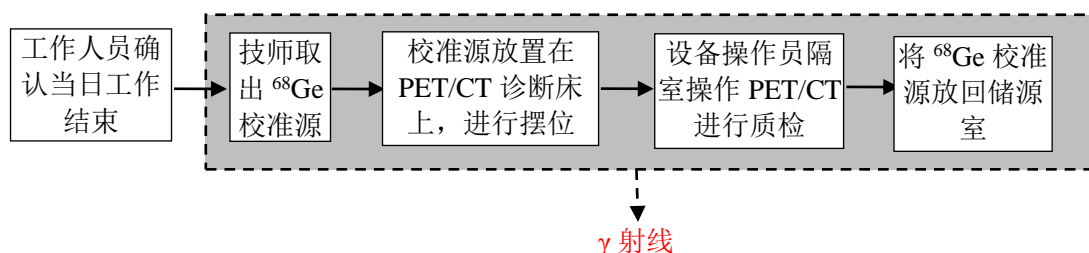


图 9-1 ^{68}Ge 校准源校准流程和产污环节分析示意图

② ^{18}F 核素校准

参考设备厂家提供的资料， ^{18}F 药物校准频次为 1 次/月，校准过程主要分两部分：一是模体准备；二是 PET 扫描。

①模体准备：PET 设备操作员提前在 PET/CT 机房安装模体工装凹槽。辐射工作人员先在手套箱内制作模体（模体使用后，经衰变清洗去污后可重复使用），模体内含有 2mCi 的 ^{18}F 溶液，单次制作时间为 10 分钟。制作完成后，护士将模体从手套箱转移到 PET/CT 机房放入提前安装好的工装凹槽内，单次用时 1.5 分钟。

②PET 扫描：设备操作员在 PET/CT 机房的控制室隔壁进行校准质控操作，整个过程 CT 不曝光，单次校准质控时间为 30 分钟。

③质检结束后模体暂存在放射性固体废物暂存间衰变 24h 后，模具用清水冲洗 2-3 次后重复利用，倒出的 ^{18}F 溶液和模具冲洗废水一起排入衰变池暂存。

^{18}F 核素校准流程和产污环节分析见图 9-2。

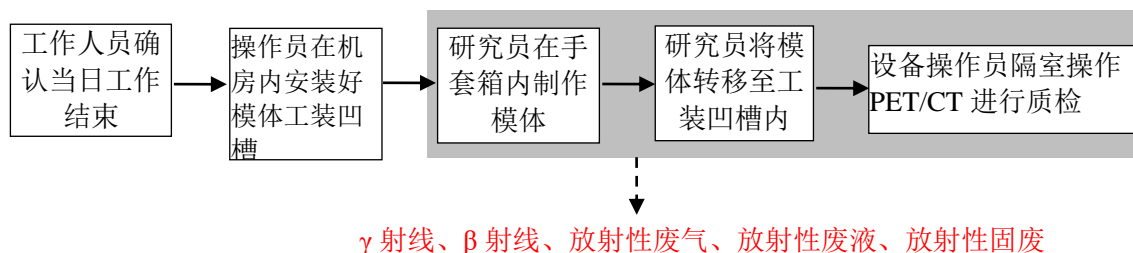


图 9-2 ^{18}F 核素校准流程和产污环节分析示意图

9.1.3 工作流程及产污环节

使用放射性同位素的课题组提出申请后由本项目实验室负责人（属于辐射工作人员）从取得许可符合要求的同位素供应单位订购所需同位素，待同位素到货后由实验室管理员（属于辐射工作人员）签收入库暂存在储源室内， ^{18}F 、 ^{68}Ga 等半衰期较短的

核素登记后转运至分装室的手套箱内。

9.1.3.1 同位素示踪实验工艺流程

本项目同位素实验区使用 ^{32}P 、 ^{33}P 等 2 种非密封放射性物质开展放射性同位素示踪实验，实验的工艺流程如下。

(1) 非密封放射性物质的领取方式

使用同位素人员需要在实验室管理员处登记，领取的同位素只能在本项目同位素实验室内使用，严禁带出同位素实验室。

(2) 非密封放射性物质操作场所

使用同位素人员必须认真阅读学习相关规定，进行辐射安全与防护培训，佩戴个人剂量计，课题组负责人同意并签订承诺书后，才能进入放射性同位素实验室进行科研。

①使用放射性同位素实验室须提前进行预约，只有预约成功后方可正常使用；

②放射性同位素实验室采用门禁磁卡系统进出，并记录持卡人进出的时间。如果发生放射性污染事件，管理人员将根据系统记录追查责任人；

③实验期间，辐射工作人员将私人物品放置更衣室储物柜内，穿着实验室工作服进入同位素实验室。

(3) 实验操作（单次实验的放射性同位素接触时间约为 4h）

①每位进入放射性同位素实验室的操作人员应首先对环境、台面进行检测，若发现污染超标或垃圾桶内还有垃圾的应立即停止实验，并及时报告管理员。管理员将根据门卡记录追查上一个使用者。管理员有权责令造成污染者进行相应处理；

②放射性同位素的操作应在操作区指定的工作台上进行，并铺好防渗垫。操作时应充分利用配备的通风橱、有机玻璃防护板或铅板遮挡，避免和减少直接照射。使用放射性同位素实验室仪器时应确保离心管等密封完好，没有泄漏；

③操作时须将污染的吸头、手套、废弃物及时放入有机玻璃废物桶内，液体倒入有机玻璃废液桶内；

④做完实验后及时清理工作台面和操作间，并将产生的废弃物转移到放射性废物暂存间相应的废物桶中，放射性同位素实验室的清洁用具不得和其它实验用品混用；

⑤放射性同位素实验室工具、设备不得随意带出，确需带出的必须经检测确保没有污染、并报请管理员同意后方可带出；

⑥在实验中遇有操作不当致使放射性物质遗撒，造成局部轻微污染时，按应急处

理预案的处理步骤处理，确保消除污染；

⑦实验结束后应立即进行放射性同位素污染检测，如发现有污染情况及时处理；将产生的废弃物转移到放射性废物暂存间并分类存放，同时自检实验台面是否发生污染，再告知管理员并进行检查确认；清理干净实验台、关闭设备电源、门等。

(4) 实验后应立即进行放射性同位素污染检测，如发现有污染情况及时处理；将接触放射性试剂的吸头、试管、吸水垫、手套、棉签封存于固体废物桶，放射性废液收集于废液桶内，剩余的含放射性核素试剂原液回收，放回冰箱内，待下次实验再用，做好使用记录。同时自检实验台面是否发生污染，再告知管理员并进行检查确认；清理干净实验台、关闭设备电源、门等。

(5) 实验结束后，辐射工作人员身体表面、实验工作服经表面污染检测仪检测正常，使用表面污染检测仪检测实验台面，若无异常则清洗后带私人物品离开实验室。

9.1.3.2 动物影像实验工艺流程

使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr 等 5 种非密封放射性物质开展动物实验，实验工艺流程如下。

将小动物（主要为小鼠）由传递窗口传递至实验核医学工作场所内，接入麻醉系统，在尾静脉预埋注射针头。在注射间通过尾静脉注射，注射结束后取出针头，给药后在合适时间内（根据研究目的时间差别较大，5~30min）转移至小动物 PET/CT 的小动物舱内，关上屏蔽防护罩，辐射工作人员操作成像系统进行扫描，待扫描结束后打开防护罩取出动物。单只小动物最长显像扫描时间不超过 10min。扫描结束后不处死的小动物和大动物使用专用转运箱转运至动物暂养间防护铅笼（10mmPb）内暂养衰变，无需暂养的小动物直接处死，转移至放射性动物尸体暂存间，需要解剖的小动物使用专用转运箱转运至解剖室，解剖完成后处死，转移至放射性动物尸体暂存间。

将大动物（主要为猪、猴、犬等）转运至注射间，通过异氟烷吸入麻醉动物后采用留置针注射放射性药物并实时监测生命体征。注射后在合适时间内（根据实验种类不同静置约 45-60min 待示踪剂分布）转移至大动物 PET/CT 或大动物 PET/MR 机房内，由辐射工作人员操作成像系统进行扫描，期间维持麻醉深度，每只大动物显像时间不超过 30min。扫描结束后使用专用转运箱送至动物暂养间暂养衰变。

负责解剖的辐射工作人员前方 30cm 处放置 20mm 铅当量的，将待解剖动物处死后固定在铅玻璃后的装置内进行解剖，每只小动物解剖时间 5-10min，每只大动物解剖时间约 20-50min。解剖后，收集各器官组织样品，液氮冷冻后放入组织研磨仪，之后加入相应溶

剂，进行萃取、离心（对动物组织取样后获得的细胞等样品，使用适当的转速进行离心操作后进行保存备用）、过滤等操作，最后取上清液注射入放射高效液相色谱以及液闪仪进行分析。

最后将动物剩余组织以及使用过的组织收集装袋，贴上标签，注明实验者姓名、所用核素、总活度和时间等信息，置于放射性动物尸体暂存间的冷冻冰柜内暂存。实验过程中使用后的吸水垫、手套、棉签和注射器等投入固体放射性废物桶内。

实验工作流程及产污环节图见图 9-3~图 9-4。

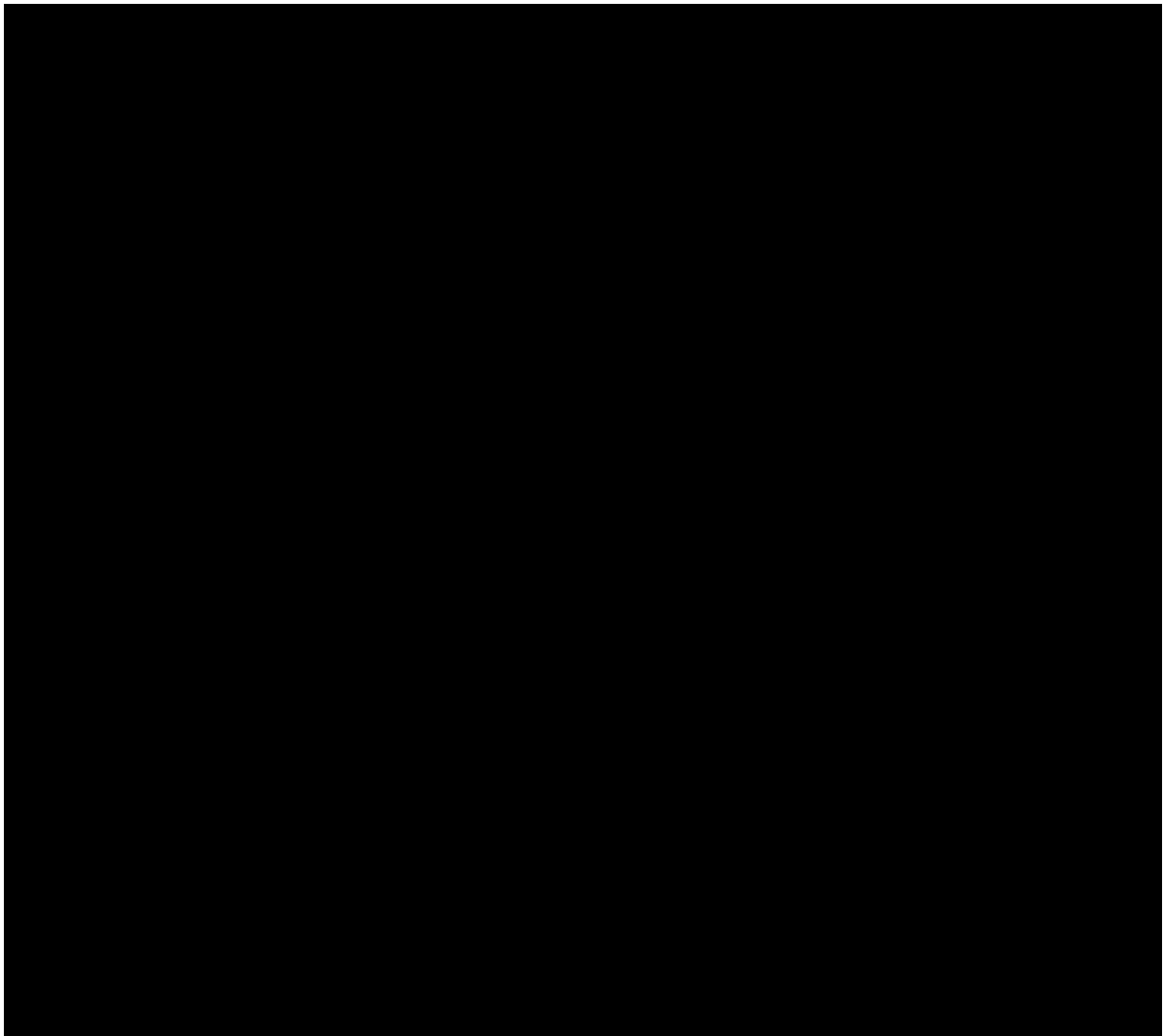


图 9-3 同位素实验区工艺流程及产污环节示意图

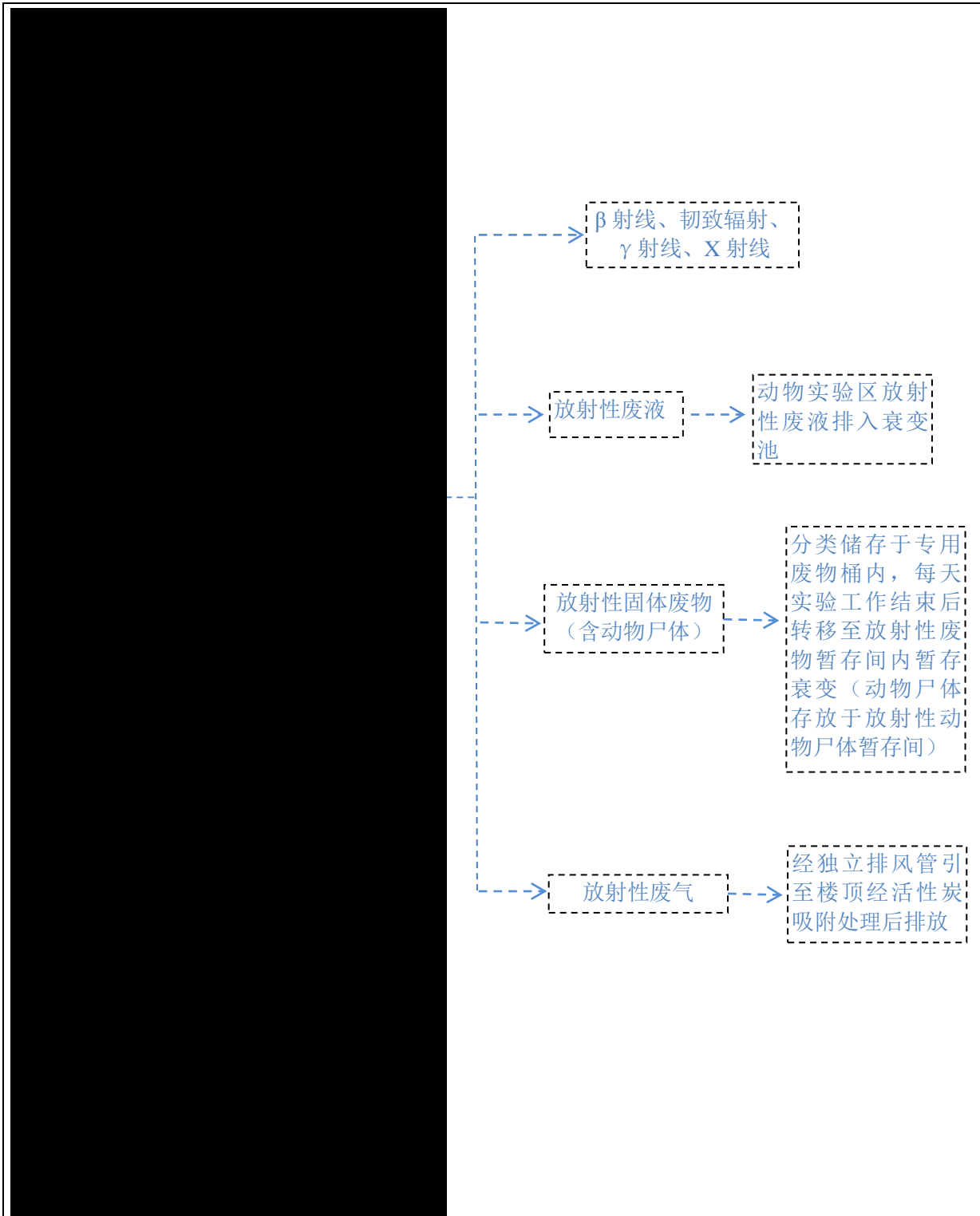


图 9-4 动物实验区工艺流程及产污环节示意图

9.1.4 人员配置及实验规划

(1) 人员配置情况

低剂量实验区域拟配置 5 名实验操作人员及 1 名实验室管理员（属于辐射工作人员，不参与实验操作），5 名实验操作人员轮岗进行同位素实验工作，年实验天数 250

天，辐射工作人员每天工作 8h，保守考虑每日从事同位素实验工作时间为 4h，则工作人员人均年辐射工作时间为 200h。

动物实验区计划新增 4 名设备操作人员和 6 名实验工作人员，其中（小动物 PET/CT、大动物 PET/CT 和大动物 PET/MR 三间机房每间 1 名设备操作员，考虑 1 名备用操作员）操作三台动物影像设备，新增 6 名实验工作人员进行动物实验工作。

辐射工作人员工作负荷见表 9-1~表 9-2。

表 9-1 同位素实验区域辐射工作人员工作负荷

序号	实验用核素	年工作天数 (d)	每次实验操作放射性核素时间 (h)	年受照时间 (h)	配置人数	平均单人年操作时间 (h)
1	³² P	250	4	1000	5	200
2	³³ P	250		1000		200

注：实验室管理员不参与实验操作，仅负责放射性同位素的接收、登记。

表 9-2 动物实验区域辐射工作人员工作负荷

工作场所	工作内容	放射性物质操作		操作时间 (min/次)	年工作量 (次)	年工作时长 (h)	配置人数	平均单人年操作时间 (h)
分装室	药物分装	正电子药物分装	/	1	4250	70.8	2	35.4
注射间	动物注射	注射	小动物	0.5	3150	26.3	4	13.2
			大动物	1	1100	18.3		9.2
解剖室	动物解剖	动物解剖取样	小动物	10	3150	525.0		262.5
			大动物	50	24	20.0		10.0
动物实验区域	动物运送	注射运送	小动物	1	3150	52.5		26.3
			大动物	5	1100	91.7		45.9
		扫描运送	小动物	0.5	3150	26.3		13.2
			大动物	3	1100	55.0		27.5
		暂养运送	小动物	1	3150	52.5		26.3
			大动物	5	1100	91.7		45.9
解剖运送	小动物	2	3150	105.0	52.5			
	大动物	5	24	2.0	1.0			
小动物 PET/CT 机房	动物摆位和解除摆位	动物摆位和解除摆位	小动物	1	3150	52.5	26.3	
大动物 PET/CT 机房、大动物 PET/MR 机房			大动物	2	1100	36.7	18.4	
控制室	扫描	小动物 PET/CT 显像扫描		10	3150	525.0	4	131.3
		大动物 PET/CT 显像扫描		30	1100	550.0		137.5
		大动物 PET/MR 显像扫描		30	1100	550.0		137.5

注：①年工作量取单日实验动物数量最大的情况（使用 ¹⁸F 和 ⁸⁹Zr）；

②大动物 PET/CT 和大动物 PET/MR 显像扫描工作次数保守取日实验大动物的最大数量；

③大动物注射、解剖、运送、摆位和解除摆位需 2 人协作，平均单人年操作时间按 2 倍考虑。

(2) 实验规划

本项目同位素实验区拟使用 ^{32}P 、 ^{33}P 等 2 种非密封放射性物质开展放射性同位素示踪实验，每周工作 5 天，年工作 250 天，每种核素每天使用不超过 $3.7 \times 10^7 \text{Bq}$ 。

动物实验区计划安装使用 1 台小动物 PET/CT、1 台大动物 PET/CT 和 1 台大动物 PET/MR 开展动物影像实验，使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr 等 5 核素进行实验动物的显像诊断，每周工作 5 天，每年工作 250 天，每天使用不超过两种核素开展动物实验，规划实验动物及核素使用量如下。

表 9-3 动物实验区实验规划汇总表

核素名称	小动物核素用量 (Bq/只)	实验小动物量 (只/天)	大动物核素用量 (Bq/只)	实验大动物量 (只/天)	年工作天数 (天)
^{18}F	7.40E+06~3.70E+07	15	7.40E+07~1.85E+08	5	200
^{68}Ga		10		4	100
^{64}Cu					100
^{124}I	1.85E+06~7.40E+06	3	1.85E+07~3.70E+07	2	50
^{89}Zr		3		2	50

注：每天使用核素不超过两种。

9.1.5 非密封放射性物质使用量汇总说明

本项目实验核医学工作场所分为同位素实验区和动物实验区，其中同位素实验区使用的非密封放射性物质包括 ^{32}P 、 ^{33}P 等 2 种核素，每种核素每日用量不超过 1mCi；动物实验区使用的非密封放射性物质包括 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I 等 5 种核素，实验人员每日操作核素不超过两种，大动物显像实验 ^{124}I 和 ^{89}Zr 用量不超过 1mCi/只，其他核素用量不超过 5mCi/只；小动物显像实验 ^{124}I 和 ^{89}Zr 用量不超过 0.2mCi/只，其他核素用量不超过 1mCi/只。所有药物来源均为外购。其中，核素 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I 、 ^{32}P 、 ^{33}P 半衰期较长，不考虑药物衰变量。

由于动物实验区涉及到正电子药物分装、注射，且 ^{18}F 、 ^{68}Ga 等正电子药物半衰期较短，因此实验核医学科工作场所的正电子药物的实际日最大操作量需考虑到药物衰变量。

每日送药 2 次，药物保守考虑提前 1 小时送达，上午送 ^{18}F 药物 5 只大动物药量+15 只小动物药量，下午送 ^{68}Ga 药物 4 只大动物药量+10 只小动物药量，根据放射性核素的衰变规律，即 $N=N_0 \times e^{-\lambda t}$ ，进行药物所需初始活度核算，订购药物所需初始活度核算结果见表 9-4。

表 9-4 本项目 ¹⁸F、⁶⁸Ga 药物所需初始活度核算结果一览表

时段	动物类别	核素	衰变时间 (min)	所需操作量 (Bq)	送达初始量 (Bq)		
上午	大动物	¹⁸ F	60	1.85E+08	2.70E+08		
			90	1.85E+08	3.27E+08		
			...				
			180	1.85E+08	5.76E+08		
			合计			2.05E+09	
	小动物		60	3.7E+07	5.40E+07		
			75	3.7E+07	5.94E+07		
			105	3.7E+07	6.53E+07		
			120	3.7E+07	7.18E+07		
			...				
			270	3.7E+07	2.03E+08		
			合计			1.71E+09	
			实验核医学工作场所 1 天总计所需 ¹⁸ F 药物初始活度				
	下午		大动物	⁶⁸ Ga	60	1.85E+08	3.40E+08
90		1.85E+08			4.61E+08		
120		1.85E+08			6.25E+08		
150		1.85E+08			8.48E+08		
合计					2.27E+09		
小动物		60	3.70E+07		6.80E+07		
		75	3.70E+07		7.92E+07		
		90	3.70E+07		9.22E+07		
		...					
		195	3.70E+07		2.68E+08		
		合计			1.48E+09		
实验核医学工作场所 1 天总计所需 ⁶⁸ Ga 药物初始活度					3.75E+09		
<p>根据上表计算结果，本项目一天所需 ⁶⁸Ga 药物初始活度为 3.75×10⁹Bq，所需 ¹⁸F 药物初始活度为 3.76×10⁹Bq。</p> <p>若使用 ¹⁸F 校准，则 PET 校准常规为每月一次，因此每月的其中一天除了购置诊断用 ¹⁸F，还需要购置校准用的 ¹⁸F 药量 7.40×10⁷Bq，保守考虑医科院在结束当天上午规划实验后进行 PET 校准，衰变时间考虑 5 小时，可计算得校准设备需要的 ¹⁸F 送达量为 4.92×10⁸Bq，每年校准 12 次，则年校准最大操作量为 5.90×10⁹Bq。</p> <p>根据实验核医学场所规划的实验种类和实验次数，核算本项目核素使用量如下：</p>							
<p>表 9-5 本项目同位素实验区核素使用量一览表</p>							
序号	核素名称	用途	实际日最大操作量 (Bq)	年工作天数 (d)	年最大用量 (Bq)		
1	³² P	同位素实验	3.70E+07	250	9.25E+09		

序号	核素名称	用途	实际日最大操作量 (Bq)	年工作天数 (d)	年最大用量 (Bq)
2	³³ P		3.70E+07	250	9.25E+09

表 9-6 本项目动物实验区核素使用量一览表

序号	核素名称	用途	单只/次最大用量 (大动物) (Bq)	日操作大动物数 (只)	单只/次最大用量 (小动物) (Bq)	日操作小动物数 (只)	实际日最大操作量 (Bq)	年工作天数/次数 (d) / (次)	年最大用量 (Bq)
1.	¹⁸ F	动物影像实验	1.85E+08	5	3.70E+07	15	3.76E+09	200	7.52E+11
		PET 校准	7.40E+07	/	/	/	4.92E+08	12	5.90E+09
2	⁶⁸ Ga		1.85E+08	4	3.70E+07	10	3.75E+09	100	3.75E+11
3	⁶⁴ Cu	动物影像实验	1.85E+08	2	3.70E+07	5	5.55E+08	100	5.55E+10
4	¹²⁴ I		3.70E+07	2	7.40E+06	3	9.62E+07	50	4.81E+09
5	⁸⁹ Zr		3.70E+07	2	7.40E+06	3	9.62E+07	50	4.81E+09

注：¹⁸F、⁶⁸Ga 实际日最大操作量包括核素衰变量。

9.1.6 实验核医学工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 C 非密封源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。

参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 C 非密封源工作场所的分级规定以及《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)对常用的放射性药品操作场所日等效操作量核算中操作因子选取规定:医疗机构使用 ¹⁸F (液态) 的操作方式视作“很简单操作”,本项目 ⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、¹²⁴I、⁸⁹Zr 药物 (液态) 同样为外购,操作流程和 ¹⁸F 基本一致,不涉及制备、淋洗等环节,满足《辐射防护手册》关于“很简单操作”的操作类型,本报告 ⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、¹²⁴I、⁸⁹Zr 药物 (液态) 操作参照 ¹⁸F (液态) 视为“很简单操作”。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 C 非密封放射性物质工作场所的分级规定,本评价项目实验核医学工作场所使用的各放射性核素日等效最大操作量计算结果见表 9-7。

表 9-7 实验核医学工作场所日等效最大操作量

核素种类	毒性分组	毒性组别修正因子	操作方式	操作修正因子	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)
¹⁸ F	低毒	0.01	很简单操作	10	4.24E+09	4.24E+06
⁶⁸ Ga	低毒	0.01	很简单操作	10	3.75E+09	3.75E+06
⁶⁴ Cu	低毒	0.01	很简单操作	10	5.55E+08	5.55E+05
¹²⁴ I	中毒	0.1	很简单操作	10	9.62E+07	9.62E+05

核素种类	毒性分组	毒性组别修正因子	操作方式	操作修正因子	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)
⁸⁹ Zr	中毒	0.1	很简单操作	10	9.62E+07	9.62E+05
³² P	中毒	0.1	简单操作	1	3.70E+07	3.70E+06
³³ P	中毒	0.1	简单操作	1	3.70E+07	3.70E+06
合计						1.54E+07

注：①日等效最大操作量=实际日最大操作量×毒性组别修正因子÷操作修正因子；

②¹⁸F、⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、¹²⁴I、⁸⁹Zr 中每天使用不超过两种；

③¹⁸F、⁶⁸Ga 实际日最大操作量考虑核素衰变量。

本项目实验核医学场所的日等效最大操作量为 $1.54 \times 10^7 \text{Bq}$ ，低于 $2 \times 10^7 \text{Bq}$ ，因此，本项目实验核医学工作场所属于**丙级非密封放射性物质工作场所**。

9.1.7 员和物流路径规划分析

本项目实验核医学工作场所规划了工作人员、实验动物、放射性药物和放射性废物的路线，有利于避免和减少放射性物质的污染和对相关人员的辐射影响。

(1) 辐射工作场所出入口设置

辐射工作场所设置 2 个出入口供工作人员使用，场所东侧出入口供同位素实验区辐射工作人员进出，场所西侧出入口供动物实验区辐射工作人员进出，研究人员完成工作后经过卫生通过间进行表面污染检测、去污后才能离开辐射工作场所，因此本项目工作场所进、出口设置合理。

(2) 放射性核素运输路径

实验使用的放射性核素均为外购，药物送达后由北侧入口进入实验核医学工作场所，在储源间西北侧传递窗登记信息后存入储源间或直接放入分装室手套箱中待用，根据实验规划及临时管控措施，确保运输时实验核医学场所入口附近没有无关人员，运输过程中尽量避免与无关人员近距离接触，由工作人员核对放射性药物信息量和给药量，与供药单位办理交接手续并存档，将药物暂存在储源室内。药物送达完成后送药人员原路离开实验核医学场所。

(3) 污物路径

放射性药物操作过程中产生的固体废弃物，收集在各产生点（如注射室、分装室、各同位素操作间等）就近设置的放射性废物收集桶，每次实验结束后由研究人员转移至放射性废物暂存间集中暂存，含短半衰期核素的污物满足衰变时间要求后解控清运，作为实验室废物进行处置；含有较长半衰期核素的污物经检测满足解控标准的可以解控清运，作为普通实验室垃圾处理，不满足解控要求的，交由当地有资质的单

位统一处理，在非工作时间从废物暂存间转移出实验核医学工作场所，实验核医学工作场所产生的废物和动物尸体从北侧出口运出。

(3) 实验工作人员路径

同位素实验区实验工作人员路线：由实验核医学工作场所东侧工作人员出入口进入辐射工作场所开展实验工作，实验结束后原路返回，离开前在检测区进行表面污染检测，并进行必要的去污措施，检测达标后离开。

动物实验区药物操作工作人员路线：

①分装室工作人员路线：由实验核医学场所西南侧进入→经过更衣间以及检测区进入分装室→工作完成后原路返回，离开前在检测区进行表面污染检测，并进行必要的去污措施，检测达标后离开。

②动物实验人员路线：由实验核医学场所西侧经过更衣间以及检测区进入辐射工作场所，于动物接收点接收动物后（小动物于实验核医学科西侧传递窗接收，大动物于实验核医学科东侧缓冲区防护门处接收），进入注射间麻醉后进行放射性药物注射，后将动物转移至对应待检间静置结束后将动物转移至对应机房扫描，扫描结束后将需要解剖的小动物转移至解剖室进行解剖实验，将其他小动物和大动物转移至动物暂养间暂养衰变。

③小动物 PET/CT、大动物 PET/CT、PET/MR 控制室工作人员行走路线：由实验核医学场所西南侧工作人员通道进入控制室→必要时进入机房协助大动物摆位→工作完成后原路返回离开。

(4) 实验动物路径

①实验用小动物路径：实验小动物从实验核医学工作场所西侧小动物入口传递窗传递进入辐射工作场所后进入注射室，进行麻醉注射，注射后小动物转移至小动物暂养间静置，静置至规定时间后转移至小动物 PET/CT 机房，由辐射工作人员操作小动物 PET/CT 进行扫描，扫描后小动物转移至解剖室进行解剖作业，解剖及相关实验工作结束后小动物尸体转移至放射性动物尸体暂存间冰柜内暂存衰变。

②实验用大动物路径：实验大动物由实验核医学工作场所东南侧缓冲区进入辐射工作场所后转移至注射间进行麻醉注射，后根据实验规划进入待检动物间 1/2（进行 PET/扫描的动物进入待检动物间 1，进行 PET/MR 扫描的动物进入待检动物间 2）静置至规定时间后转移至对应机房，由辐射工作人员操作 PET/CT 或 PET/MR 进行扫描，扫描后需要解剖的大动物转移至解剖室进行解剖作业，解剖及相关实验工作结束

后大动物尸体转移至放射性动物尸体暂存间冰柜内暂存衰变。无需解剖的大动物转移至动物暂养间暂养衰变，经监测动物体外 30cm 处辐射剂量率满足所处环境本底水平后，转移至普通饲养区按照普通实验动物饲养管控。

实验核医学工作场所的人流和物流路线规划示意图见图 9-10。根据上述实验核医学场所人员、物流路径规划可知，因为实验核医学特殊性，核素实验区工作人员路径和核素路径不能完全独立，动物实验区工作人员与实验动物路径不能完全独立，实验工作人员接触放射性药物和注射后实验动物时应通过穿戴铅衣，使用推车，托盘，有机玻璃防护器皿等方式增强个人防护；实验核医学场所实验工作人员具有独立的出入口和通道，放射性药物和废物运输通过采取时间管控措施，确保放射性药物运输时运输路线无人员通过，可实现放射性药物与人员路线不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道尽可能短捷。综上所述，本项目实验核医学场所的人员、物流路径规划满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中相关的要求，路径设置合理。

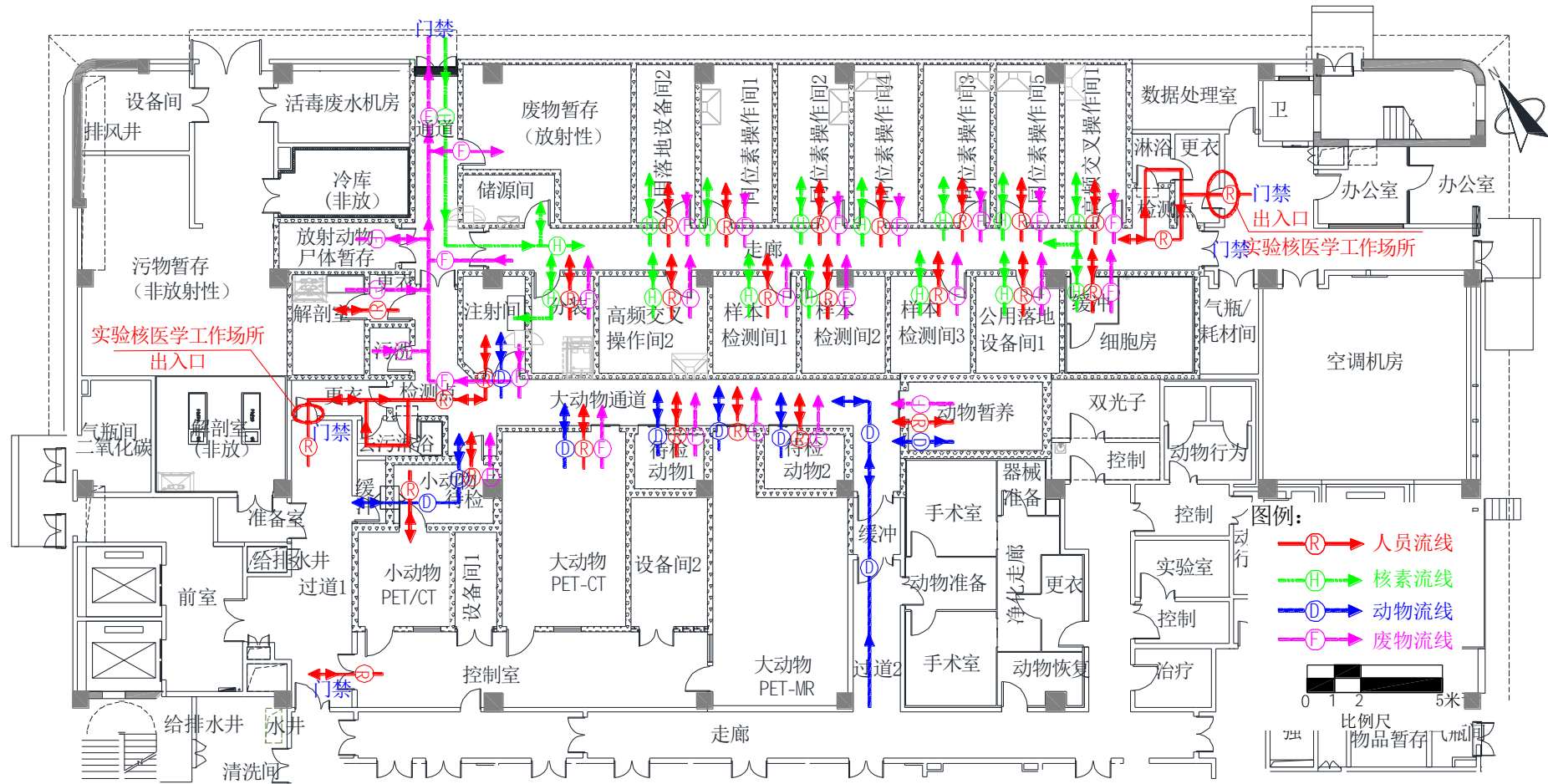


图 9-5 实验核医学工作场所路径规划图

9.2 污染源项分析

9.2.1 放射性同位素与射线装置基本参数

(1) 非密封放射性核素

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 H，本项目拟使用非密封放射性核素的有关参数见表 9-8

表 9-8 非密封放射性核素的相关放射性属性

核素名称	状态	半衰期	毒性分组	衰变模式	β 最大能量	光子能量 (MeV)	日实际最大操作量 (Bq)	活动种类及用途
^{18}F	液态	109.8 min	低毒	β^+ , EC	688.3keV	0.511	1.48E+09	使用, 显像诊断
^{68}Ga	液态	68.3min	低毒	β^+ , EC	1.9MeV	0.511	1.11E+09	使用, 显像诊断
^{64}Cu	液态	12.7h	低毒	β^+ , EC	653keV	0.511	5.55E+08	使用, 显像诊断
^{124}I	液态	4.18d	中毒	β^+ , EC	2.14MeV	0.511	9.62E+07	使用, 显像诊断
^{89}Zr	液态	78.41h	中毒	β^+ , EC	0.902MeV	0.909	9.62E+07	使用, 显像诊断
^{32}P	液态	14.3d	中毒	β^-	1.71MeV	/	3.70E+07	使用, 核素实验
^{33}P	液态	25.38d	中毒	β^-	0.2485MeV	/	3.70E+07	使用, 核素实验

注：衰变方式栏中 EC 表示轨道电子俘获。

(2) 射线装置

根据《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），本项目实验核医学诊断项目拟使用的 1 台 PET/CT 包含在医用 X 射线计算机断层扫描（CT）装置类型中，医用 X 射线计算机断层扫描（CT）装置属于 III 类射线装置，配置情况见表 9-9。

表 9-9 射线装置的配置情况

射线装置	数量 (台)	类别	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	活动种类及用途
小动物 PET/CT	1	III	100	0.2	使用, 显像诊断
大动物 PET/CT	1	III	140	420	使用, 显像诊断

(3) 放射源

校准源：若使用 ^{68}Ge 校准，则放射源的污染因子包括 γ 射线辐射、源活性物质。

根据《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），本项目 PET 拟配置的校准源属于V类放射源。PET 设备配套放射源的主要相关参数见表 9-10。

表 9-10 T 装置使用的密封源的相关核素属性

放射源	活度及数量 (Bq)	分类	主要射线和能量 (MeV)	半衰期 (d)	用途
⁶⁸ Ge	1.11×10 ⁸ /1.11×10 ⁸ ×1 枚	V类	γ0.51	288	大动物 PET/CT 校准
⁶⁸ Ge	7.4×10 ⁷ /7.4×10 ⁷ ×1 枚	V类	γ0.51	288	大动物 PET/MR 校准
⁶⁸ Ge	7.4×10 ⁷ /7.4×10 ⁷ ×1 枚	V类	γ0.51	288	小动物 PET/CT 校准

9.2.2 环境影响因子分析

在核素使用过程中，射线外照射将伴随整个实验流程，包括供药、注射等过程，并随后进入受检动物体内。受检动物注射放射性药物后，本身短时间内也成为一个“辐射体”，不但对周围环境有外照射影响，排泄物也成为放射性污染物。供药、注射操作过程产生的固体废物也可能受放射性污染而成为放射性固体废物，正常工况下主要辐射影响和污染源项如下：

(1) γ 射线贯穿辐射

①本项目使用的核素在发生衰变、湮灭辐射时会产生 γ 射线，在进行药物交接、分装、实验观察、注射操作时，在周围停留的操作人员和实验动物可能受到核素释放出的 γ 射线外照射影响。

②实验动物注射放射性药物后，本身短时间内是一个辐射体（源），对周围的环境可能造成外照射影响。

③进行 PET 扫描时，受检动物体内的放射性核素产生的 γ 射线将对机房外操作人员造成外照射影响。经过机房的屏蔽，射线可能仍有一定的泄漏，环境影响途径为外照射。

(2) β 射线

本项目使用的核素衰变会产生 β 射线，β 射线穿透力很弱，在组织内穿透距离很短。

(3) X 射线（韧致辐射）

使用 PET/CT 开机扫描时会产生 X 射线，β 核素衰变产生的韧致辐射，对操作人员及周围环境造成辐射影响。

(4) 放射性表面污染

放射性药物使用活动过程中，不可避免地会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾污，造成放射性表面污染。

(5) 放射性空气污染

在核素实验过程中由于空气扰动会产生微量放射性核素的放射性气溶胶，造成放射性空气污染。

9.2.3 放射性三废源项情况

表 9-11 放射性三废源项汇总表

辐射源项	产生的污染因子	源强		
		同位素实验区	动物实验区	
实验核医学工作场所	放射性废液	含有 ^{32}P 、 ^{33}P 等核素的放射性废液暂存满 10 个半衰期经检测达清洁解控水平后按照实验室废物委托有资质单位处理。废液年产生量：1.42m ³ ；	排入衰变池废液含有 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 和 ^{89}Zr ，废液年产生量：158m ³ 。	
	放射性废气	各种放射性药物操作过程中产生放射性废气，经活性炭吸附处理设施处理后高空排放。	各种放射性药物操作过程中、实验动物给药后呼出产生的少量放射性废气，经活性炭吸附处理设施处理后高空排放。	
	放射性固体废弃物	放射性固体废物含有 ^{32}P 、 ^{33}P 。年产生量为：150kg。	实验过程中产生的放射性固体废物含有 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 和 ^{89}Zr ，年产量：125kg。	动物尸体年产生量：2358.8kg
			废旧活性炭过滤装置也需暂存满相应天数后，作为实验室固体废物处理；废旧 ^{68}Ge 校准源按 2 年产生 3 枚考虑，3 枚总活度不超过 $4.47 \times 10^7 \text{Bq}$ 。	

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全设施

10.1.1 工作场所布局合理性分析

本项目实验核医学布局场所按照生态环境部相关标准和核医学放射卫生防护标准设计，根据不同的功能设置“非限制区、监督区、控制区”，非限制区设置值班室、诊室、办公室等。

实验核医学场所设置在实验 A 楼一层，实验核医学工作场所按照实验活动类型划分为同位素实验区域和动物实验区域，北部为同位素实验区，布局从西到东依次包括放射性废物暂存间、储源间、注射间、分装室、高频交叉操作间 1~2（用于混合同位素操作）、公共落地设备间 1~2（包括细菌摇床、落地离心机等设备，用于检测前的样品准备）、同位素操作间 1~5、样本检测间 1~3（用于液闪检测、激光成像检测和伽马计数检测等）、实验室和细胞房等；实验核医学场所南部为动物实验区域，布局从西向东依次包括解剖室、小动物 PET/CT 机房、小动物待检间、大动物 PET/CT 机房、待检动物 1 室、大动物 PET/MR 机房、待检动物 2 室和动物暂养间。辐射工作场所正上方为实验室 4~19、操作间、检疫室、行为学实验室、水迷宫实验室和洁净走道，正下方为岩土层。

辐射工作场所内部设置 1 间储源间用于含放射性核素试剂的暂存、1 间废物暂存间用于放射性固体废物的暂存，2 间功能房间外部均设置物理锁。放射性动物尸体暂存间内部设置储物冰柜，用于实验后动物尸体的暂存。

本项目实验核医学工作场所在出入口各设置 1 间更衣室，辐射工作人员进入实验室前必须先进入更衣缓冲室穿戴实验工作服、工作鞋后经由缓冲间进入实验操作区，入口更衣缓冲室外设置单向人脸识别门禁，仅允许授权人员进入，实验操作结束，辐射工作人员在出口处进行表面污染检测，并进行必要的去污措施，检测达标后经由更衣室离开。

实验核医学布局总体分析：实验核医学工作场所选址充分考虑了邻室（含楼上）及周围场所的人员防护与安全，与非放射性工作场所有明确的分界隔离，不毗邻食堂及其他人员密集区域，符合核技术利用项目尽量集中分布、位于建筑物内人员较少停留的区域等使用非密封放射性物质工作场所的选址原则。

大动物、小动物从不同入口进入实验核医学场所，动物进入实验场所需要由人员

携带笼具才能进入，因此在大小动物入口设置专用的运输动物缓冲区，用于动物的交接，资料记录，对辐射工作场所起到缓冲作用。

总体上各项实验各自实施相应的实验流程，各自具有完备的路径和功能场所，路径基本不交叉，考虑到动物实验区域主要开展动物实验，因此所有实验动物必须由人员携带进场和退场，本项目设置有人员运输动物进场时的缓冲区，注射药物后的动物在机房附近另外设置有扫描前等待间，便于快速将注射药物的动物放入到等待间内集中管理，尽可能减少运送动物的人员与注射药物后动物的接触时间。扫描前等待间设置铅防护门，动物笼架设置铅防护笼架，减轻人员存取动物时其他待检动物对人体的影响。因此该设计方案考虑了注射人员、实验动物、运送动物人员各自的功能场所，以尽量减少互相影响。

实验核医学工作场所的三废处理处置都是独立进行，放射性废气通过专用排放管道排入排风井，放射性废液通过专用管道收集至衰变池，放射性固废由专用的废物暂存间暂存，因此放射性三废不会流入其他场所。

根据《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586—2025）对于 X 射线机房的布局要求，对本项目设计情况进行对照分析表见表 10-1。

表 10-1 射线装置机房与《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586—2025）对照

项目	《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586—2025）要求	设置情况	是否满足要求
机房布局	5.1 固定使用的动物诊断 X 射线装置机房应独立设置，并位于人流量较小的角落区域。	本项目主要为实验室用房，与相邻的非放射性工作场所有明确的分界隔离，机房均采取了相应的屏蔽防护措施，考虑了邻室（含楼上）及周围场所的人员防护与安全，机房位于实验 A 楼一层，人流量较少，	
	5.3 应按照 GB18871—2002 有关要求将动物 X 射线诊断工作场所划分为控制区和监督区，并按相应要求进行管理	本项目小动物 PET/CT 机房和大动物 PET/CT 机房已根据 GB18871—2002 有关要求划分控制区和监督区，并按相应要求进行管理	满足
	5.4 控制区主要包括固定式动物诊断 X 射线装置机房、移动式 and 便携式动物诊断 X 射线装置开展诊断操作时实施 X 射线曝光的区域。	本项目小动物 PET/CT 和大动物 PET/CT 均为固定设备，设有单独机房，并已将设备机房划为控制区管理。	满足
	6.1 使用动物诊断 X 射线装置宜优先选择隔室操作的方式。无法实现隔室操作的，应采取适当的辐射防护措施	本项目小动物 PET/CT 和大动物 PET/CT 装置均采用隔室操作的方式。	满足

项目	《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586—2025）要求	设置情况	是否满足要求
	6.3 应合理安装动物诊断 X 射线装置，避免有用线束直接照射门、窗、管线口和工作人员操作位	本项目新增III类射线装置有用线束始终直接照射向实验动物拟诊断部位和影像接收器，不会直接照射门、窗、管线口和工作人员操作位。	满足
	6.4 a) 动物诊断 CT（计算机断层扫描）设备机房有效使用面积不小于 10m ² ，单边长不小于 2.5m	大动物 PET/CT 机房为： 5.3m×8.3m=43.99m ² 小动物 PET/CT 机房为： 4.0m×4.0m=16.0m ²	满足

实验核医学工作场所布局遵循活性区和非活性区分开、通过时间管控保证人员路线独立的原则，相关配套功能房间齐全，能够保证工作程序沿相关功能房间单向展开，能够满足医务人员及实验动物均具有独立的出入口和流动路线，能够有效防止交叉污染，避免公众、工作人员受到不必要的外照射，布局满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586—2025）的要求。

10.1.2 辐射防护分区管理

为了便于加强管理，切实做好辐射安全防护工作，按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，在辐射工作场所内划出控制区和监督区，在项目运营期间采取分区管理措施。

控制区划分原则：在正常工作情况下控制正常照射或防止污染扩散，以及在一定程度上预防或限制潜在照射，要求或可能要求专门防护手段和安全措施的限定区域。在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平指示。运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可证）和实体屏蔽（包括门锁和联锁装置）限制进出控制区，放射性操作区应与非放射性工作区隔开。

监督区划分原则：未被确定为控制区，正常情况下不需要采取专门防护手段或安全措施，但要不断检查其职业照射状况的区域。在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌；并定期检查工作状况，确认是否需要防护措施和安全条件，或是否需要更改监督区的边界。对于卫生通过间分区要求，《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）要求划为监督区。

本项目具体分区情况如下：

将放射性废物暂存间、储源间、注射间、分装室、高频交叉操作间 1~2、公共落

地设备间 1~2、同位素操作间 1~5、样本检测间 1~3、实验室和细胞房、解剖室、小动物 PET/CT 机房、小动物待检间、大动物 PET/CT 机房、待检动物 1 室、大动物 PET/MR 机房、待检动物 2 室和动物暂养间等区域划为控制区，控制区入口设置规范的电离辐射警告标志，严格限制人员进出控制区。将活毒废水机房、冷库（非放）、设备间 1~2，控制室、缓冲区、手术室、器械准备室双光子实验室、气瓶/耗材间、数据处理室等控制区相邻房间和走廊、过道等无合适实体边界作为管控边界的区域，将控制区屏蔽体外 30cm 区域划分为监督区，建议在监督区边界对应地面划警示线并在监督区各个房间门口和区域的墙上张贴监督区的文字说明或设立表明监督区的标牌，并定期检查其辐射剂量率水平。

实验核医学场所场所分区示意图 10-1。

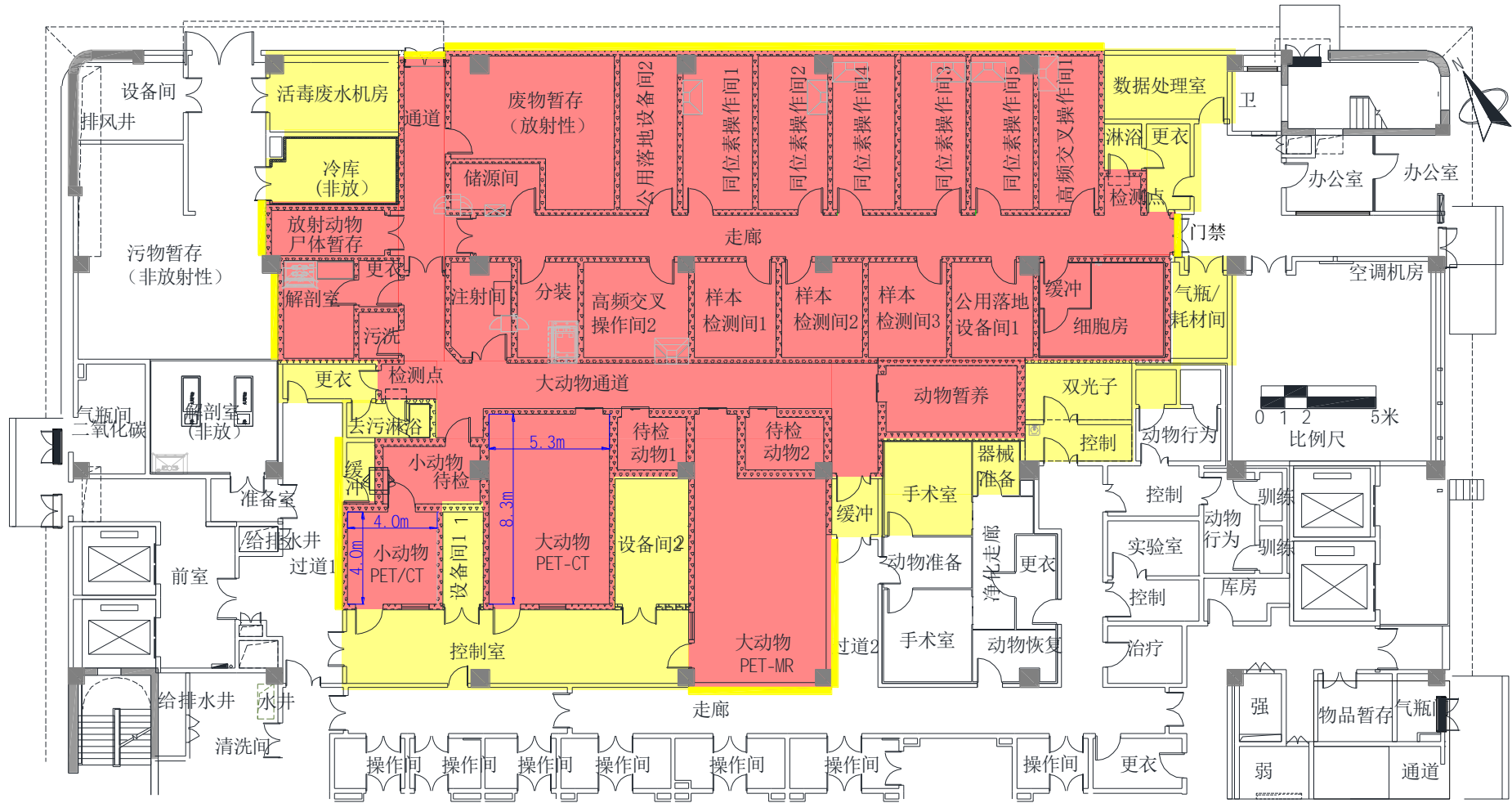


图 10-1 实验核医学场所分区管理图

10.1.3 辐射屏蔽设计

实验核医学辐射工作场所采用的辐射防护屏蔽设计方案如表 10-2 和表 10-4 所示。

表 10-2 各功能用房辐射防护屏蔽设计方案

功能用房	屏蔽体	屏蔽材料及厚度
放射性废物暂存间	墙体	240mm 实心砖+15mm 硫酸钡水泥
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 4mm 铅板
储源间	墙体	240mm 实心砖+15mm 硫酸钡水泥
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 4mm 铅板
分装室	墙体	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 10mm 铅板
	传递窗	10mmPb
注射间	墙体	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 10mm 铅板
高频交叉操作间 1~2	墙体	240mm 实心砖
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 3mm 铅板
公共落地设备间 1~2	墙体	240mm 实心砖
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 3mm 铅板
同位素操作间 1~5	墙体	240mm 实心砖
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 3mm 铅板
样本检测间 1~3	墙体	240mm 实心砖
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 3mm 铅板
细胞房	墙体	240mm 实心砖
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 3mm 铅板
实验室	墙体	240mm 实心砖
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 3mm 铅板
解剖室	墙体	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土
	防护门	1 扇, 内衬 6mm 铅板
小动物待检	墙体	370mm 实心砖+40mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土
	传递窗	15mmPb
	防护门	1 扇, 内衬 15mm 铅板
待检动物 1~2	墙体	370mm 实心砖+40mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土

功能用房	屏蔽体	屏蔽材料及厚度
	防护门	1扇, 内衬 15mm 铅板
动物暂养间	墙体	370mm 实心砖+40mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土
	防护门	1扇, 内衬 15mm 铅板
大动物 PET/CT 机房	墙体	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土
	防护门	2扇, 内衬 10mm 铅板
	观察窗	10mmPb
大动物 PET/MR 机房	墙体	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡水泥
	顶棚	300mm 混凝土
	防护门	2扇, 内衬 10mm 铅板
	观察窗	10mmPb
小动物 PET/CT 机房	墙体	240mm 实心砖+15mm 硫酸钡水泥
	顶棚	250mm 混凝土
	防护门	2扇、内衬 4mm 铅板
	观察窗	4mmPb

注: 1、根据建设单位提供的资料, 混凝土密度为 2.35g/cm³; 实心砖密度不小于 1.65g/cm³, 硫酸钡水泥密度不小于 2.79g/cm³; 铅密度不小于 11.34g/cm³。

2、有相邻功能房间共用屏蔽墙体时, 按屏蔽厚度较厚的方案进行施工。

3、防护门应尽量减小门墙间隙, 采取搭接措施, 搭接宽度不小于门墙间隙的 10 倍。

对于大/小动物 PET/CT 机房, 还需考虑设备运行时产生的 X 射线的辐射屏蔽。PET/CT 相当于放射诊断的 X 射线 CT 机, 属于 III 类射线装置, 因此对于 PET/CT 机房的 X 射线屏蔽要求按照 CT 要求。

参考《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020) 附录 C 的 C.1.2 中 (式 C.1) 及 (式 C.2) 进行等效铅当量厚度的计算。

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (\text{式 10-1})$$

式中:

B ——给定混凝土厚度的屏蔽透射因子;

α ——混凝土对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数, 见表 10-3;

β ——混凝土对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数, 见表 10-3;

γ ——混凝土对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数, 见表 10-3;

X ——铅厚度。

$$X = \frac{1}{\alpha \gamma} \ln \left[\frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 - \frac{\beta}{\alpha}} \right] \quad (\text{式 10-2})$$

式中:

X ——不同屏蔽物质的铅当量厚度;

α ——铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数，见表 10-3；
 β ——铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数，见表 10-3；
 γ ——铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数，见表 10-3；
 B ——给定混凝土厚度的屏蔽透射因子。

表 10-3 铅、混凝土对射线装置不同管电压的 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

管电压 (kV)	铅			混凝土			砖		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
100 (主束)	2.5	15.28	0.7557	0.03925	0.08567	0.4273	0.0352	0.088	1.149
140 (CT)	2.009	3.990	0.3420	0.03360	0.01220	0.5190	-	-	-

本项目小动物 PET/CT 机房安装使用的 CT 机的最大管电压为 100kV，大动物 PET/CT 机房安装使用的 CT 机的最大管电压为 140kV，根据式 10-1 和式 10-2，计算得 100kV 管电压条件下，240mm 实心砖折算为 2.8mmPb，250mm 混凝土折算为 3.9mmPb，140kV 管电压条件下 250mm 混凝土折算为 3.0mmPb。由于《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）标准中没有硫酸钡水泥和 CT 140kV 管电压下砖的拟合参数，参考《放射防护实用手册》（主编赵兰才张丹枫），本项目 140kV 管电压保守采用 150kV 管电压的资料，150kV 管电压条件下的黏土砖（密度为 1.6g/cm³）240mm 厚相当于 2.0mmPb，100kV 管电压下 8.5mm 硫酸钡水泥折算 1.0mmPb，17mm 硫酸钡水泥折算 2.0mmPb，150kV 管电压条件下，19mm 硫酸钡水泥折算 1.0mmPb，38mm 硫酸钡水泥折算 2.0mmPb。本项目实心砖密度不小于 1.65g/cm³，硫酸钡水泥密度不小于 2.79g/cm³，100kV 管电压条件下保守 15mm 硫酸钡水泥折算 1.8mmPb；150kV 管电压条件下，240mm 实心砖保守折算为 2mmPb，20mm 硫酸钡水泥折算 1.0mmPb，30mm 硫酸钡水泥折算 1.5mmPb。

《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T 586-2025）中未对机房防护铅当量厚度做出要求，本评价项目的 PET/CT 机房设计参数参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）的要求，见表 10-4。

表 10-4 机房设计参数与标准对照

项目	屏蔽体	设计方案	设计总铅当量	标准要求	是否满足
小动物 PET/CT 机房（针对 X	四周墙体	240mm 实心砖（2.8mmPb） +15mm 硫酸钡水泥（1.8mmPb）	4.3mmPb	3.0mmPb	满足
	顶棚	250mm 混凝土	3.9mmPb		满足

项目	屏蔽体	设计方案	设计总铅当量	标准要求	是否满足
射线)	防护门	内衬 4mm 铅板	4.0mmPb		满足
	观察窗	4mmPb 铅玻璃	4.0mmPb		满足
大动物 PET/CT 机房 (针对 X 射线)	四周墙体	240mm 实心砖 (2mmpb) +30mm 硫酸钡水泥 (1.5mmPb)	3.5mmPb	2.5mmPb	满足
	顶棚	250mm 混凝土	3.0mmPb		满足
	防护门	内衬 10mm 铅板	10.0mmPb		满足
	观察窗	10mmPb 铅玻璃	10.0mmPb		满足

注：根据建设单位提供的资料，混凝土密度为 2.35g/cm³；实心砖密度不小于 1.65 g/cm³，铅板密度不小于 11.34g/cm³。

实验核医学场所的墙体采用实心砖墙附加硫酸钡水泥的形式，顶棚采用混凝土结构楼板的形式，采用以上形式的防护措施，既做到选材最优亦能够保证满足实验核医学场所核素屏蔽防护的性能需求和射线装置空间利用需求，亦能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中对 CT 机房的屏蔽防护要求。

10.1.4 辐射防护设施及用品

结合实验核医学场所拟开展的项目情况，建设单位拟配置防护设施和防护用品见表 10-5。

表 10-5 本项目拟配置的防护设施和防护用品一览表

序号	种类名称	设置场所	数量	材质及厚度
1	手套箱 (1580mm*1121mm*2400mm)	分装室	1 个	正面：50mmPb，其他面：20mmPb
2	通风橱 (1500mm*850mm*2300mm)	高频交叉操作间 1~2、同位素操作间 1~5	7 个	10mm 有机玻璃，外壁不锈钢
3	小动物饲养铅笼	小动物待检间、动物暂养间	3 个	10mmPb
4	大动物饲养铅笼	待检动物间 1~2、动物暂养间	9 个	10mmPb
5	有机玻璃转运盒	/	12	20mm 有机玻璃
6	转运铅罐	储源室	2 个	50mmPb
			2 个	30mmPb
	⁶⁸ Ge 校准源保险柜 (长 500mm, 宽 400mm, 高 650mm) (PET/CT、PET/MR 设备需要用 ⁶⁸ Ge 校准源时设置)	储源室	1 个	/
7	注射器防护套	注射间	2 个	5mmPb
			2 个	8mmPb
8	防护废物桶	注射间、分装室、解剖室、小	8 个	10mmPb

序号	种类名称	设置场所	数量	材质及厚度
		动物待检、待检动物 1~2、动物暂养间		
		高频交叉操作间 1~2、同位素操作间 1~5、公用落地设备间 1~2、样本检测间 1~3	12 个	内 10mm 有机玻璃、外 2mmPb
9	立式注射防护车	注射间	1 个	5mmPb
10	铅废物衰变桶	放射性废物暂存间	8 个	20mmPb
11	有机玻璃废物桶	放射性废物暂存间	6 个	内 10mm 有机玻璃、外 2mmPb
12	去污工具组	污洗间	1 套	/
13	长柄操作工具	分装室、注射室	1 个	/
14	气溶胶防护口罩、手套、帽子	同位素操作间 1~5、分装室、注射室	若干	/
15	0.5mmPb 铅衣	实验核医学工作场所出入口更衣室	若干	0.5mmPb
16	吸水滤纸、纱布	注射室	若干	/
17	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 and 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	缓冲间	各 1 套	/
	污染物品暂存铅桶	卫生通过间	1 个	10mmPb
18	洗消池	卫生通过间	1 个	/
19	有机玻璃眼镜、面罩	注射室、同位素操作间 1~5	每间 2 套	/
20	活度计	分装室	2 个	/
21	便携式 X-γ 辐射监测仪	实验核医学场所内	1 台	/
22	β 表面污染仪	实验核医学工作场所进出口检测点各 1 台（共 2 台）、同位素实验区 1 台、动物实验区 1 台	4 台	/
23	铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套、铅眼镜等	小动物 PET/CT 机房、大动物 PET/CT 机房、大动物 PET/MR 机房	4 套	/
注：β 表面污染仪的能量相应下限应低于 5keV，或核素实验区应单独购置氡表面污染检测仪。				
本项目拟配置的防护设施和防护用品均满足《核医学辐射防护与安全要求》				

(HJ1188-2021) 和《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 的相关要求, 可以满足医科院拟开展核技术利用项目运行的要求。除此以外, 通过制度规范辐射工作人员的操作, 包括放射性核素的管理、使用, 放射性污染物的处理和实验动物的管理等。

10.1.5 辐射安全防护措施

实验核医学场所工作场所安全措施与标准符合性分析见表 10-6 至表 10-8。

表 10-6 实验核医学场所工作场所与《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 符合性分析

《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)		拟采取的防护措施	结论
第 6.2.1 节	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缝隙, 易于清洗、去污	实验核医学场所的放射性核素操作设备的表面、工作台台面等采用不锈钢, 平整光滑。室内地面做 PVC 材料的光滑塑胶地面, 地面与墙壁的连接处均采用圆弧设计, 保证连接处无缝隙, 可以达到清洗、去污的效果。	符合
第 6.2.2 节	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。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。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。	注射准备间内设置通风橱, 在通风橱内进行放射性药物操作; 已为从事放射性药物操作的工作人员配备个人防护用品、放射性污染防护用品、注射器防护套; 注射后等候室和留观室患者座位间设置铅屏风。	符合
第 6.2.3 节	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	卫浴间设置表面污染监测仪, 并设置淋浴室, 可以在淋浴室进行洗消去污。	符合
第 6.2.4 节	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。本项目使用的放射性核素配置单独的储源罐存放, 定期采用 X-γ 剂量监测仪进行辐射水平监测。放射源拟放置于储源室	本项目使用的放射性核素配置单独的储源罐存放, 定期采用 X-γ 剂量监测仪进行辐射水平监测。放射源拟放置于储源室内, 使用保险柜贮存, 设置双人双锁, 拟安装监控摄像头。实验核医学场所安排专人管理, 建立放射性物质台账, 及时登记, 确保账物相符。储源间设置门锁以及电离辐射警告标志, 无关人员不能进入	符合
第 6.2.5 节	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	配置有防护罐和注射器携带箱运输放射性物质, 防护罐和注射器携带箱设有手提装置, 容器表面拟设置电离辐射标志	
第 6.2.9 节	扫描机房外门框上方应设置工作状态指示灯	小动物 PET/CT 机房和大动物 PET/CT 机房大门上方设置工作状态指示灯。	符合

表 10-7 实验核医学场所工作场所与《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）符合性分析		
标准要求	项目情况	评价
5.1.1 为开展辐射防护管理工作并对职业照射进行控制，非密封源工作场所应实行严格的分区、分级管理，分区、分级管理的措施,应遵循 GB18871-2002 的要求。	本项目为丙级非密封放射性物质工作场所，参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）对分区的具体示例，同时考虑辐射防护要求，将辐射工作场所划分为监督区和控制区	符合
5.1.2 宜在辐射工作场所的醒目位置悬挂（张贴）辐射警告标志，人员通行和放射性物质传递的路线应严格执行相关规定，防止发生交叉污染。应制定严格的辐射防护规程和操作规程。	<p>储源间门外、放射性固体废物暂存室门外、放射性废物暂存间门外、同位素实验区中同位素操作间 1~5 等功能用房门外悬挂（张贴）辐射警告标志；</p> <p>动物实验区动物暂养间等功能用房门外拟设置电离辐射警告标志并附中文说明。</p> <p>在储源间保险柜、放射性固体废物收集桶、放射性废液收集桶外表面张贴规范的电离辐射标志。</p> <p>辐射工作人员和放射性物质传递严格遵循规划路线，建设单位已制定了深圳医学科学院辐射防护和安全保卫制度，设备操作规程和实验核医学工作场所辐射防护制度等。</p>	符合
5.1.3 操作非密封源的单位应制定辐射防护大纲并对其实施和评价负全面责任。单位应设立相应的安全与防护机构（或专、兼职安全与防护人员），并用文件的形式明确规定其职责。	医科院已成立辐射安全与环境保护管理小组，明确辐射安全关键岗位，能够满足本项目丙级非密封放射性物质工作场所的管理要求。	符合
5.1.4 应建立安全与防护培训制度，培植和保持工作人员良好的安全文化素养，自觉遵守规章制度，掌握辐射防护基本原则、防护基本知识及辐射防护技能。	医科院已有一定从事核技术利用项目的相关实践活动的经验，已建立的一些辐射安全管理制度体现了核技术利用项目辐射安全管理的共同点，并结合本次项目制定了深圳医学科学院辐射防护和安全保卫制度，项目建成投运后辐射安全管理工作应结合实际情况进一步完善。	符合
5.2.1 非密封源的操作应根据所操作的放射性物质的量和特性，选择符合安全与防护要求的条件，尽可能在通风柜、工作箱或手套箱内进行。	本项目正电子药物分装工作在铅屏蔽手套箱内进行，同位素实验区对核素的分装、标记等操作在通风橱中进行	符合
7.2.1 操作非密封源的单位，一般应建立放射性废液处理系统，确保产生的废液得到妥善处理。不得将放射性废液排入普通下水道，相关控制应遵循 GB18871-2002 的要求；不允许利用生活污水下水系统洗涤被放射性污染的物品；不允许用渗井排放废液。	同位素实验区内设放射性废液收集桶用于收集暂存实验过程中产生的放射性废液，缓冲区应急淋浴产生的废液排入应急池中暂存，不直接排入普通下水道，动物实验区各功能房间内收集的废液经管道汇集后直接连入衰变池。	符合

标准要求	项目情况	评价
7.2.2 废液应妥善地收集在密闭的容器内。盛装废液的容器，除了其材质应不易吸附放射性物质外，还应采取适当措施保证在容器万一破损时其中的废液仍能收集处理。遇有强外照射时，废液收集地点应有外照射防护措施。	同位素实验区使用的废液收集桶为有机玻璃材质，应急池和衰变池为混凝土，厚度不低于 300mm，具有可靠的防泄漏防破损性能。放射性废液桶暂存在各同位素操作间中，同位素操作间裙脚及地面采取防漏、防渗、防腐措施，基础防渗层用厚度在 2 毫米以上的高密度聚乙烯或其他人工防渗材料组成。	符合
7.2.3 经过处理的废液在向环境排放前，应先送往监测槽逐槽分析，符合排放标准后方可排放。	本项目同位素实验区含长半衰期的核素的放射性废液分类收集暂存委托有资质的单位固化后按放射性固废处理，含有短半衰期核素的废液分类收集暂存满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）相关要求后排放，动物实验区放射性废液经衰变池收集暂存满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）相关要求后排放。	符合
7.3.1 产生放射性固体废物较多的单位应当建立固体废物暂存库，确保储存的废物可回取。	放射性固体废物收集后，存于放射性固体废物暂存室废物桶内。	符合
7.3.2 操作非密封源的单位产生的废物（包括废弃的放射源），应按要求的废物库暂存。送贮的废物应符合送贮条件。	本项目同位素实验区产生的放射性固体废物（含有 ^{32}P 、 ^{33}P 等核素）和动物实验区产生的放射性固体废物（含有 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr ）收集暂存超过十个半衰期经检测达清洁解控水平后按实验室废物定期交有资单位处理	符合
7.4.1 对工作场所放射性废气或气溶胶的排放系统，应经常检查其净化过滤装置的有效性。	建设单位定期维护同位素操作间 1~5、分装室手套箱及实验核医学工作场所废气排放系统，并委托生产厂家定期检修保证设备正常运行，定期监测废气排放口排放相关核素活度浓度，出现异常及时查找原因并进行整改，知道检测结果符合要求。	符合
7.4.2 凡预计会产生大量放射性废气或气溶胶而可能污染环境的一次性操作，亦应采取有效的防护与安全措施和监测手段。	本项目使用核素均不属于易挥发性放射性物质，且用量较少，不存在产生大量放射性废气的情况。	符合

表 10-8 射线装置安全措施与《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T 586-2025）对照

标准要求	本项目拟设置情况	评价
7.1 平开式机房门应设自动闭门装置，推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的措施，电动推拉门宜设防夹装置。	小动物 PET/CT 机房设置 2 扇平开门，均拟设置自动闭门装置，大动物 PET/CT 机房设置	符合
7.2 机房门上方应设置工作状态指示灯，灯箱上应设置“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，工作状态指示灯应与机房门连锁。	拟在各机房实验动物进出防护门上方设置灯箱，灯箱设置“射线有害，灯亮勿入”警示语句，工作状态指示灯与机房门连锁。	符合

标准要求	本项目拟设置情况	评价
7.3 机房门外应设置符合 GB18871—2002 附录 F 要求的电离辐射警告标志	拟在机房各防护门上各设置 1 个电离辐射警告标志；	符合
7.5 受检动物的候诊区应设立辐射防护注意事项告知栏，以提醒受检动物陪同人员。	拟在大小动物 PET/CT 机房外显著位置张贴放射防护注意事项，提醒受检动物的陪同实验人员	符合
7.6 使用动物诊断 X 射线装置的单位应为受检动物陪同人员配备适当的防护用品	拟在 PET 诊断机房配备铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套、铅眼镜等防护用品	符合
7.7 使用动物诊断 X 射线装置的单位应建立射线装置使用台账，并由专人负责。	拟在 PET 诊断机房建立射线装置使用台账，由实验室负责人专人管理	符合
7.10 动物诊断 X 射线装置机房应有合适的动力通风装置	在每间射线装置机房天花板吊顶处均拟安装吸顶式排风口，采取动力通风，能保持良好的通风。	符合

根据上述对照分析结果可知，本项目实验核医学工作场所采取的辐射安全与防护措施基本符合《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T 586-2025）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）的相关要求。

小结：本项目实验核医学场所辐射工作场所布局遵循辐射工作场所与非辐射工作场所有明确的分界隔离、人员路线独立的原则，相关配套功能房间齐全，能够满足医务人员具有独立的出入口和流动路线，尽可能减少工作人员与实验动物的接触时间，能够有效避免公众、工作人员受到不必要的外照射。辐射防护屏蔽设计满足屏蔽防护性能的需求和空间利用需求。防护用品配备满足标准相关要求，也可以满足医科院拟开展核技术利用项目运行的要求。因此，本项目辐射安全与防护设计较合理。

10.2 放射性废物的治理

前文 9.2 节已对项目污染源项进行分析，本章节重点对实验核医学放射性三废的处理方案进行描述和分析，放射性三废预测计算在 11.2.4 节中。

10.2.1 放射性废液

本项目低剂量核素区域实验过程中产生的放射性废液主要包括放射性废液主要为应急去污废水和洗涤容器废液、实验产生的废液。建设单位拟在缓冲区、同位素实验区域内各实验操作间设置洗手池，洗手池接大楼排水管道，也可接废液收集桶，当人员手部经检测发现有放射性污染的情况，先进行擦拭处理后使用缓冲区的洗手池进行

洗消处理，同位素实验区产生的实验废液分类收集暂存，应急冲淋产生的废液排至应急池，含 ^{32}P 和 ^{33}P 的放射性废液暂存超过 254 天，监测结果满足审管部门要求后按实验室废液委托有资单位处理。

动物实验区可能产生的放射性废液包括：实验动物注射/服用放射性药物后产生的排泄物及冲洗水等含有放射性核素的废液，实验核医学场所工作人员完成放射性药物操作后清洗去污的废液，实验核医学工作场所清洗及应急洗消产生的可能含放射性物质的废液。

PET 诊断使用后的模体清洗后重复使用，模体内的少量校准用的核素排入衰变池，模体使用频率为 1 次/月，且每次清洗过程中结合擦拭等操作，控制用水量，其产生的废液量和所含核素量远远小于实验动物暂养时冲洗粪便、尿液的水量；给药后实验动物待检时产生的尿液、粪便、呕吐物均冲入专用管道，纳入至衰变池衰变；

衰变池废液含有 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr ，在麻醉后实验动物产生不可控的排尿或排便情况，该部分废液先通过吸水垫或吸水纸吸取，再用湿巾擦拭等方式去污，去污用品转为固体废物。

(1) 衰变池选址合理性

实验核医学场所衰变池选址邻近实验核医学场所，位于实验核医学工作场所东侧，为钢筋混凝土结构，内设 1 套槽式衰变池和应急池，衰变池四周及正下方均为岩土层，正上方为院内绿化。衰变池 50m 范围内主要为实验室院区内部区域和北侧新塘山，评价范围内无学校等敏感目标。放射性废液管道主要经过实验核医学场所内部区域，不经过实验核医学场所外的区域，不会对实验核医学场所外的其他公众产生影响。放射性废液管道均敷设于预留的降板层内，上方有混凝土回填，没有管道裸露于人员可到达区域的情况，并在管道外包括铅皮以进一步减轻对实验核医学场所内部辐射工作人员产生影响。衰变池邻近实验核医学工作场所，最大可能的缩减了放射性废液管道敷设长度，放射性废液管道的主管长约 32m，减少了维修检修的辐射风险，从辐射防护考虑选址基本合理可行。

(2) 衰变池设计

本项目设置了 1 套衰变池和 1 个应急池，应急池为 1 个有效容积 12.2m^3 （包括前置污泥池有效容积）的池体，衰变池为槽式衰变池，由 3 个有效容积相同的池子并联，单个池子的有效容积为 12.2m^3 （包括前置污泥池有效容积）组成，放射性废液经过前置污泥池沉淀过滤后由过水洞进入衰变池暂存衰变；3 个衰变水池交替贮存、衰

变和排放废液，根据 11.2.4 节核算结果，废水暂存时间为 55 天，衰变池容积可满足废液的贮存衰变需求。

废液处理流程：废液管道控制阀门同时设置电磁阀和手动阀门。衰变池的每个池子均设置液位传感器，可编程控制器采集到每个衰变池的液位情况来控制相应的电磁阀开闭状态。当某一液位到高水位时，触发声光报警装置，并将其信号发送控制中心，控制中心可以显示每个衰变池的液位情况及每个电磁阀的开闭状态。一般情况下用电磁阀自动控制，当需要对衰变池检修和维护时使用手动阀门。废液经顶部开孔的进水管进入第一格衰变水池，当第一格衰变水池废液到达控制液位时关闭第一格进水阀门并打开第二格进水阀门，废液流入第二格衰变水池进行暂存，以此类推，当最后一格衰变水池到达控制液位时，衰变池中废液暂存时间超过 42 天（超过 ^{124}I 半衰期的 10 倍），监测结果经审管部门认可后排入园区污水处理站。放射性废液总排放口总 β 不大于 10Bq/L。

安全措施：衰变池和应急池体为混凝土结构，池体坚固，池体表面做防渗防腐处理且内壁光滑，保证衰变池中的废液不向外泄漏。衰变池和应急池设置了监测取样口，可进行取样监测。衰变池和应急池设置液位感应器，可防止废液溢出以及防止超压。衰变池产生的污泥直接与达标废液同时按规定排放，为防止固体物质堵塞进出水口，拟在衰变池和应急池底设置带切割自动搅匀的潜水泵，将可能存在的少量淤泥残渣打碎搅动后与废液一同排放。衰变池的设计见图 10-2 和图 10-3。

医科院拟安排专人负责放射性废液的暂存和处理事宜，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、废液产生日期、排放时间以及排放前监测结果等信息。

综上所述，本项目放射性废液的收集和贮存基本能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）标准要求。

（3）放射性废液管线设计

实验核医学场所放射性废液管道均铺设在地面以下，废液自流排入衰变池，废液管道不经过办公室等人员长居留场所，无曝露于地面。实验核医学场所废液管线设计走向图见图 10-4。

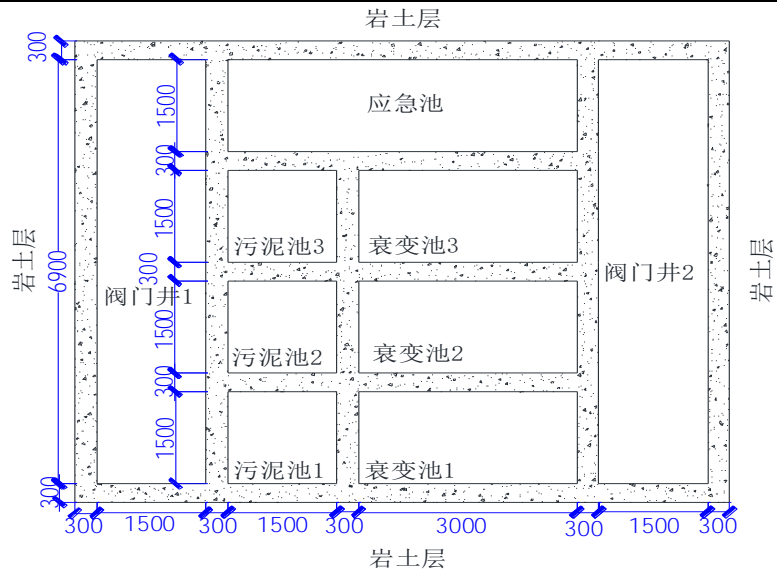


图 10-2 衰变池平面图

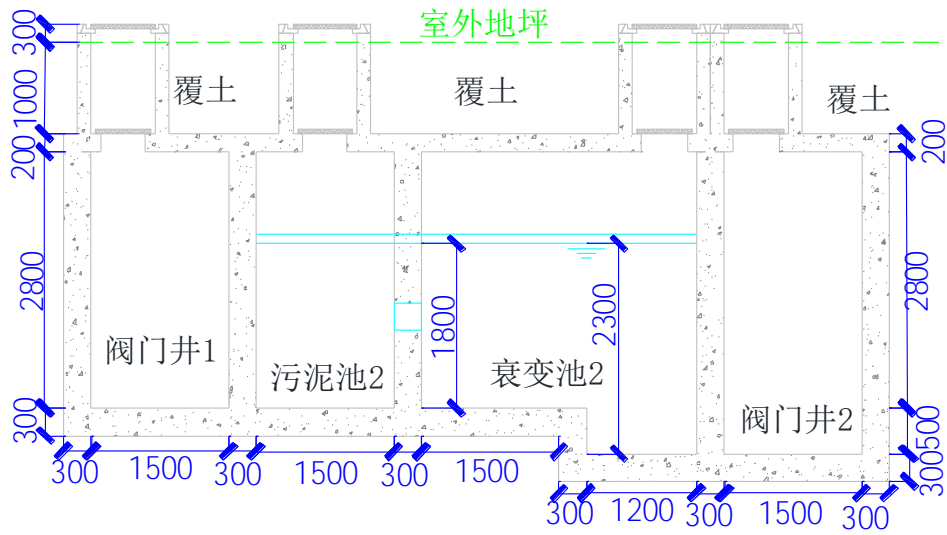


图 10-3 衰变池剖面图

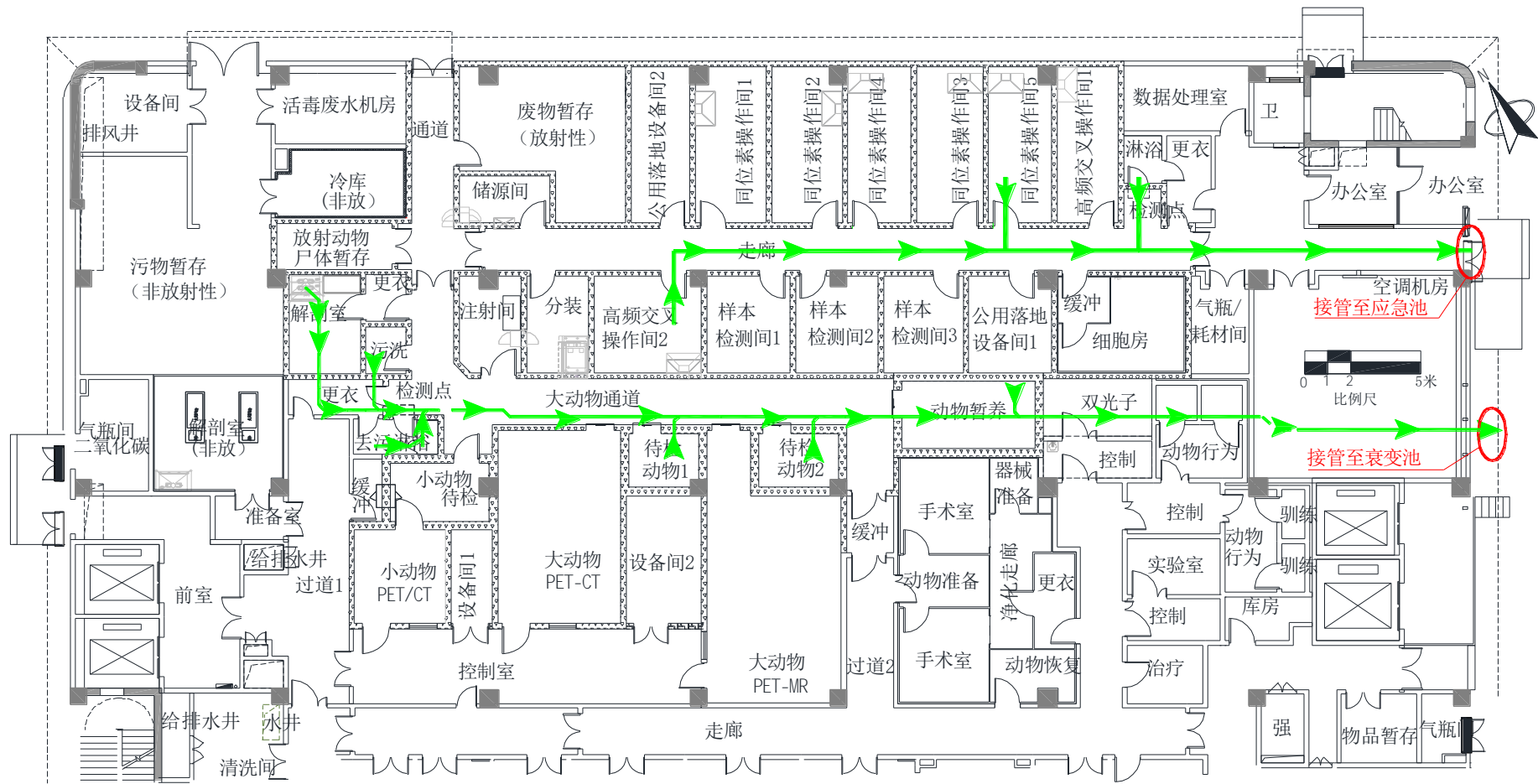


图 10-4 实验核医学场所废液管线走向示意图

10.2.2 放射性废气

实验核医学场所设计了多套排风系统，每套排风系统设有独立风机，管道接口处均设置止回阀，可防止放射性气体逆向回流，且排风量大于进风量，可保持工作场所的负压和各区之间的压差，以防止放射性气体对工作场所造成交叉污染，保证场所内的通风良好。

放射性废气和常规气体排风分开管理，实验核医学内控制廊、设备间等非核素诊疗场所的排风管线不接入放射性废气处理系统。

实验核医学场所共设置6套排风系统，其中1台手套箱和7台通风橱各设有1套独立排风管道，经独立风机后汇总，通风橱和手套箱拟采用隔离式密封洁净圆弧角不锈钢内腔，密封性能良好，可有效防止放射性液体泄漏或放射性气体逸出。顶壁装有放射性气体过滤净化器，并设有止回阀，不存在回流现象。排风管道设置独立风机，保证工作时风速不小于0.5m/s，然后接入实验核医学专用风井向上至屋顶经过滤净化装置净化后排出，排气口高于建筑物屋顶3米。

细胞房及细胞房缓冲间设有一套独立排风系统；分装室、废物暂存间、储源间、高频交叉操作间1~2、公用落地设备间1~2、同位素操作间1~5、样本检测间1~3和实验室由独立排风管道经过独立风机净化后在接入风井前汇入一根主管；小动物PET/CT机房和小动物待检间由独立排风管道经过独立风机净化后在接入风井前汇入一根主管；解剖室、污洗间、注射间、去污淋浴间、大动物PET/CT机房、大动物PET/MR机房、待检动物室1~2和动物暂养间由独立排风管道经过独立风机净化后在接入风井前汇入一根主管。排风管线汇总表见下表，排风管道走向图见图10-5。

表10-9 实验核医学场所排风系统汇总表

排风系统	管线编号
高频交叉操作间1-2通风橱、同位素操作间1-5通风橱	①
分装室手套箱	②
细胞房及细胞房缓冲间	③
分装室、废物暂存间、储源间、高频交叉操作间1~2、公用落地设备间1~2、同位素操作间1~5、样本检测间1~3	④
小动物PET/CT机房和小动物待检间	⑤
解剖室、污洗间、注射间、去污淋浴间、大动物PET/CT机房、大动物PET/MR机房、待检动物室1~2和动物暂养间	⑥

根据《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函[2023]20号），经过滤后的气体汇入到一个主管道中排放不违反标准要求。因此，本项目分装柜和通风橱暂存

间经净化后汇总再接入风井，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）“手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统。”的要求。实验核医学场所排风管道汇集后沿实验核医学场所专用风井走管向上，实验核医学的排放口位于实验A楼屋面（建筑高度44.7m），排放口端口进行了防雨、防鸟、防虫设计，屋面无其他用房，排放口周边属于无人员长时间居留区域。

本项目实验核医学场所废气经排风井引至屋顶后汇至1个排放口排放，总排放口位于实验A楼屋面（建筑高度44.7m），正常情况下无人员停留，50m范围内无更高层建筑。本项目实验核医学场所工作场所的排放口尽可能的远离邻近的高层建筑，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）“核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。”的要求。实验核医学工作场所废气排放口位置示意图见图10-6~图10-7，实验核医学工作场所风管穿墙屏蔽补偿示意图见图10-5。

由于排放口位置较高，应注意日常维修时高空作业的风险，做好防范措施。综上，本项目实验核医学场所放射性废气处理方案满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）关于气态放射性废物管理的要求。

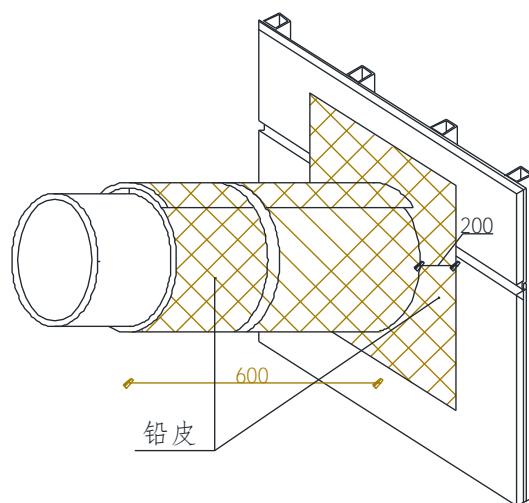


图 10-5 实验核医学场所风管穿墙屏蔽补偿示意图

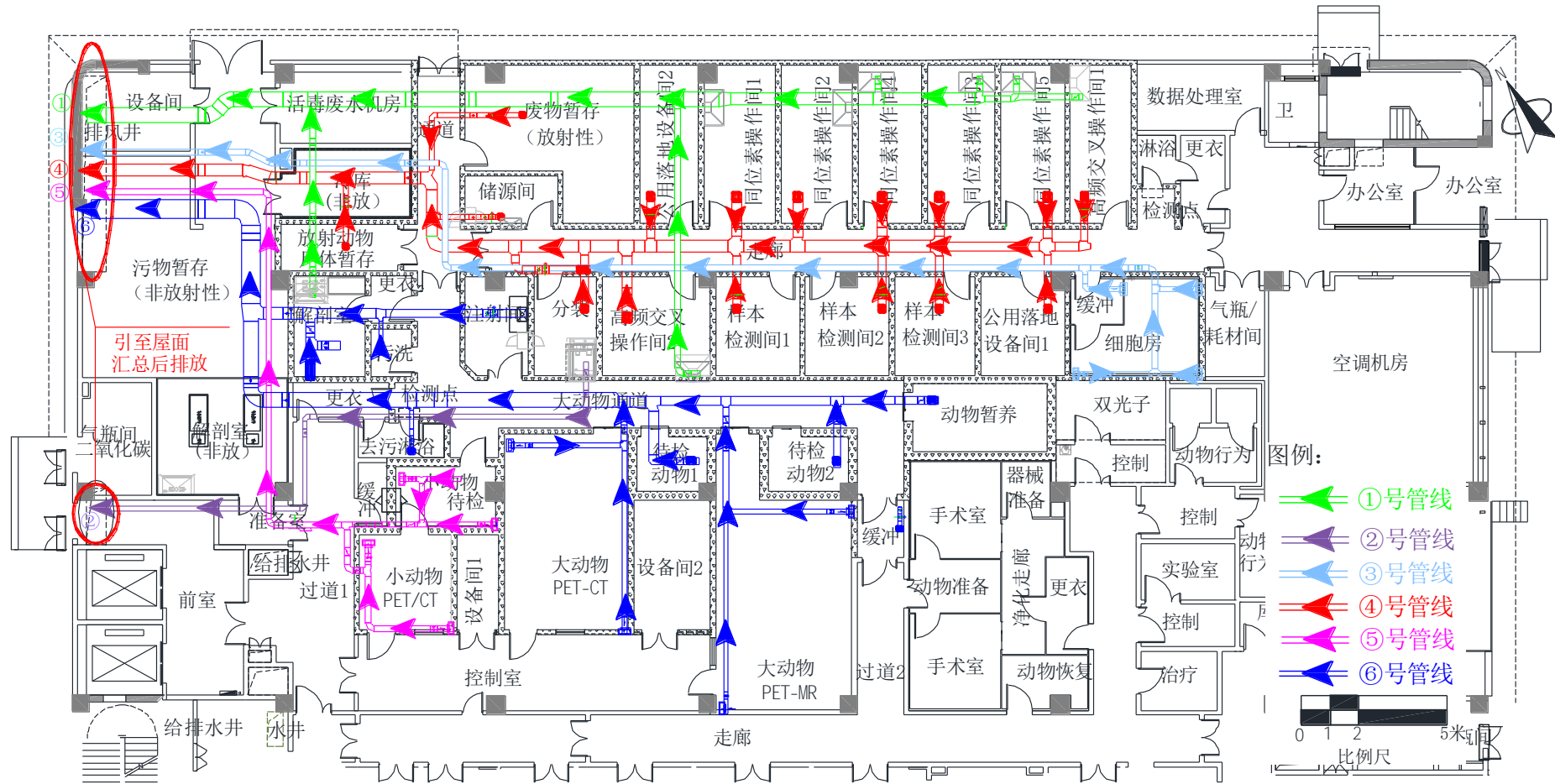


图 10-6 实验核医学场所排风管线走向示意图

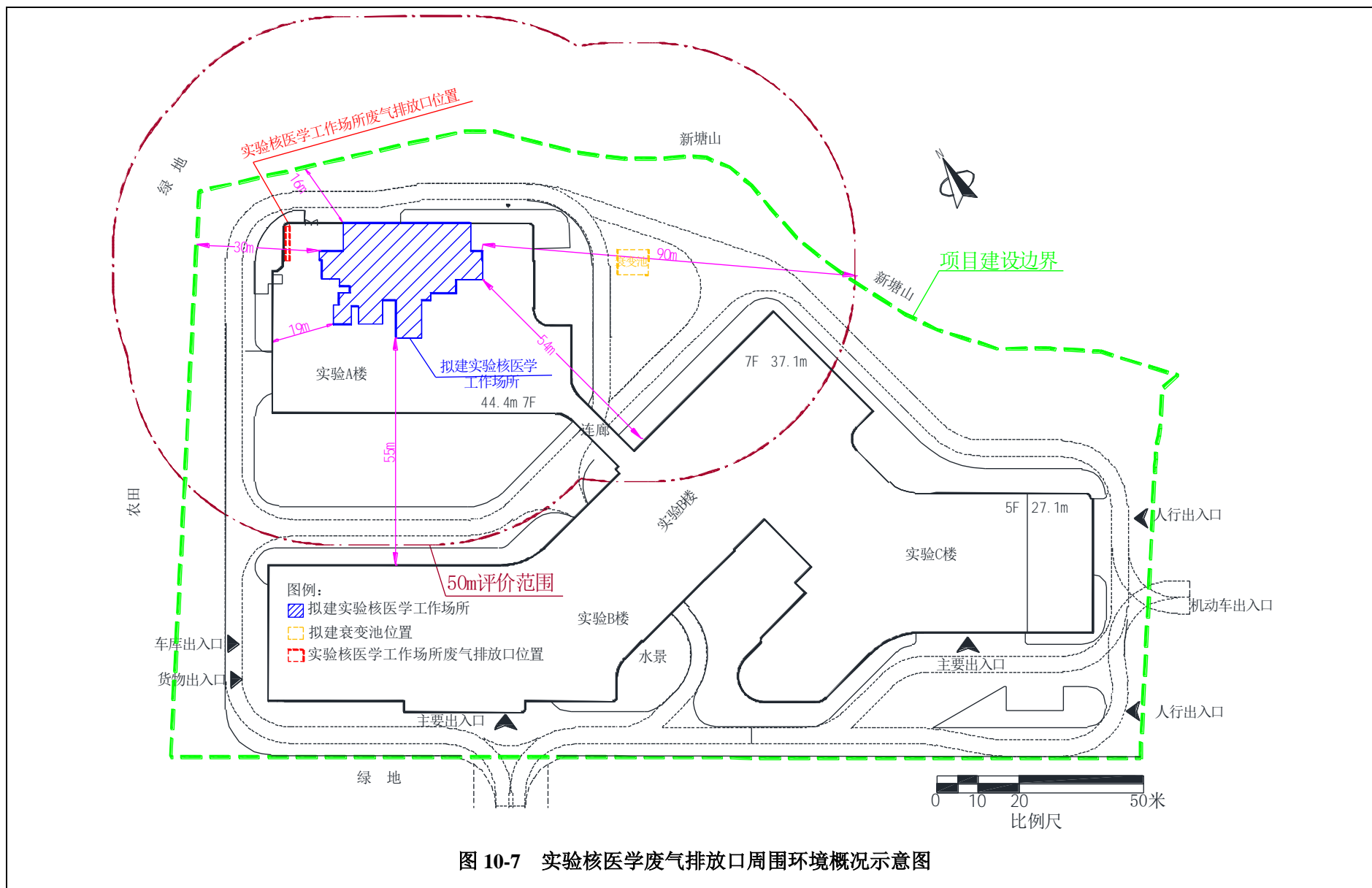


图 10-7 实验核医学废气排放口周围环境概况示意图

10.2.3 放射性固废

根据《关于发布<放射性废物分类>的公告》，原则上，极短寿命放射性废物、极低水平放射性废物、低水平放射性废物、中水平放射性废物和高水平放射性废物对应的处置方式分别为贮存衰变后解控、填埋处置、近地表处置、中等深度处置和深地质处置。

(1) 同位素实验区放射性固废

同位素实验区涉及的放射性固废主要为经实验后产生的实验耗材（枪头、离心管、一次性注射器、棉签、滤纸、安瓿瓶等）等，同时还包括擦拭过废液的纸张等实验用品，当天产生的放射性固废由当天的实验人员转移至放射性废物暂存间。

建设单位计划配备 6 个有机玻璃废物桶，桶内放有专用塑料袋，注射器针头等尖锐和棱角的放射性废物先装入利器盒中，再放入废物铅桶的专用塑料袋中，装满后的废物袋密封、不破漏，并贴上标签（标明核素种类、存放日期等信息），每袋废物的表面剂量率不超过 0.1mSv/h，重量不超过 20kg。工作场所通风系统更换的废活性炭也放置在放射性废物暂存间的废物桶内。放射性废物暂存间实行专人管理，门上显著位置设置电离辐射警告标识。

建设单位对放射性固体废物根据核素种类不同进行分类收集至有机玻璃废物桶或铅废物桶中，含 ^{32}P 核素放射性固体废物单独收集贮存 143 天，含 ^{33}P 核素放射性固体废物单独收集贮存 254 天，经监测其表面辐射剂量率和表面污染符合清洁解控水平（辐射剂量率满足所处环境本底水平、 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ）后按照实验室废物委托有资质单位处置。

(2) 动物实验区放射性固废

动物实验区产生的放射性固体废物主要包括实验使用的一次性器具（一次性注射器、棉签、滤纸、安瓿瓶等）、手套、吸水纸、吸水垫、其他可能受放射性污染的物品以及大、小动物尸体等。

建设单位应对本项目所产生含 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr 等短半衰期放射性核素的固体废物单独收集后暂存于废物桶中，待一天工作结束后转运至放射性废物暂存间暂存衰变，含有 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr 等核素的动物尸体暂存至放射性动物尸体暂存间的冰柜内暂存衰变，其中含有 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 等半衰期小于 24h 的核素的固体废物暂存满 30 天后可直接解控，含有 ^{124}I 、 ^{89}Zr 等半衰期大于 24h 的核素的固体废物暂存超过 10 个半衰期后，使用实验核医学工作场所配备的便携式 X- γ 辐射监测仪和 β

表面污染监测仪，自行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，解控后的动物尸体作为实验动物尸体做无害化处理，其他固废根据实验类型作为危险废物（废物代码：HW49）处理。

^{68}Ge 校准源属于放射源，放射源报废后拟由放射源供应单位回收或送交广东省城市放射性废物库贮存。

实验核医学工作场所废气排放口、通风橱、分装柜顶部及放射性废物暂存间风机处更换下来的废活性炭过滤器按放射性固体废物处理。

当发生意外状况，如实验试剂泼洒污染台面、地面时，将采用实验核医学场所吸水材料和去污剂进行污染洗消，去污过程产生的废液均吸附固化，根据污染实验核医学场所核素类型，转移至专用废物收集桶进行处理。实验室工作人员将详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台帐实验核医学场所”，内容包括废物所含核素、重量、暂存起始日期，处置人员和处置日期等信息。

综上所述，本项目放射性固体废物收集和贮存措施满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的相关要求。

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

本次评价内容为医科院拟开展的核技术利用项目运行期对环境的辐射影响，本项目涉及的放射源、非密封性放射性物质及射线装置使用的辐射工作场所主体工程建设过程的影响主要为非辐射类影响，项目建设阶段主要的污染因子有：噪声、废水、固体废弃物和扬尘，无辐射影响，亦无放射性废气、废水及固体废弃物产生，项目施工期的影响是短期和暂时的，随着施工的结束而消失，对周边环境影响较小。

11.2 运行阶段对环境的影响

实验核医学场所对外环境的影响主要是使用相关核素产生的 β 、 γ 射线外照射。实验动物注射了放射性药物后成为活动的辐射体，其所在的工作场所均需考虑来自实验动物身体的辐射影响。此外，还应考虑小动物 PET/CT、大动物 PET/CT 的 X 射线外照射影响。

11.2.1 工作场所辐射水平分析—动物实验区

(1) γ 射线剂量率预测

本项目动物实验区使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 和 ^{89}Zr 开展大小动物 PET 诊断项目，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实验动物注射放射性核素，这个过程主要是放射性核素产生的 γ 射线引起的辐射照射。实验动物注射了放射性药物后成为活动的辐射体，其所在的工作场所均需考虑来自实验动物身体的辐射影响。

① 计算依据及公式

将注射后的实验动物视为“点状辐射源”，参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 I 中工作场所的屏蔽计算公式（I.1），进行公式转换可得经防护材料屏蔽后关注点的 γ 辐射剂量率计算公式 11-1。

$$\dot{H}_p = A \cdot \Gamma \cdot r^{-2} \cdot 10^{-(x/\text{TVL})} \quad (\text{式 11-1})$$

式中：

\dot{H}_p ——屏蔽体外关注点剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A ——放射性药物的活度， MBq ；

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

r ——参考点与辐射源间的距离，m；

x ——屏蔽厚度，mm；

TVL —— γ 射线的十分之一值层厚度，mm。

$$H_{r,t} = H_{r0} \times 2^{-t/T} \quad (\text{式 11-2})$$

式中：

H_{r0} ——衰变前核素的量，MBq；

$H_{r,t}$ ——衰变后核素的量，MBq；

t ——经历衰变的时间，min；

T ——核素的半衰期，min。

根据《辐射防护导论》P88，将 γ 射线减弱一定程度所需物质厚度 d 与物质的密度 ρ 成反比，关系见式 11-3，本项目拟使用的硫酸钡水泥密度不小于 2.79g/cm^3 ，混凝土密度不小于 2.35g/cm^3 ，因标准中缺少硫酸钡水泥对应的 γ 射线什值层数据，硫酸钡水泥与混凝土材料形式相近，利用式 11-3，根据混凝土的什值层数据估算硫酸钡水泥的什值层。

$$d_1/d_2 = \rho_2/\rho_1 \quad (\text{式 11-3})$$

②关注点的选取

计算小动物待检间、待检动物室 1~2 和动物暂养间时，取房间中心点为辐射源点，对墙外的瞬时影响；计算大小动物 PET/CT 机房外关注点时，选取设备靶点作为源点；计算其他功能用房外关注点时，按照辐射源常停留位置与关注点的最短距离进行选取；同一功能房间，墙体和顶棚屏蔽相同的情况下，选取关注点距源强最近的点作为代表，门、窗外单独设关注点。此外，关注点设置在药物操作位、控制区内部各房间的屏蔽墙外 30cm 处、顶棚上方距地面 30cm 处，关注点示意图 11-1。

③计算参数

本项目动物实验区涉及非密封放射性物质 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 和 ^{89}Zr ，辐射屏蔽计算参数见表 11-1。

表 11-1 非密封放射性物质辐射屏蔽计算参数

核素	(裸源)周围 剂量当量率常 数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	无屏蔽体 1m 处剂量 率 $\mu\text{Sv/h}$	实验动物体内单 位放射性活度所 致体外 1m 处周 围剂量当量率 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	TVL (mm)			
				铅 11.34g/cm^3	砖 1.65g/cm^3	混凝土 2.35g/cm^3	硫酸钡水 泥 2.79g/cm^3
^{18}F	0.143	2.65E+01	0.092	16.6	263	176	148

核素	(裸源)周围 剂量当量率常 数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	无屏蔽体 1m 处剂量 率 $\mu\text{Sv}/\text{h}$	实验动物体内单 位放射性活度所 致体外 1m 处周 围剂量当量率 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	TVL (mm)			
				铅 $11.34\text{g}/\text{cm}^3$	砖 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$	混凝土 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$	硫酸钡水 泥 $2.79\text{g}/\text{cm}^3$
^{68}Ga	0.134	2.48E+01	0.086	16.6	263	176	148
^{64}Cu	0.029	5.37E+00	-	-	-	-	
^{124}I	0.185	6.85E+00	-	-	-	-	
^{89}Zr	0.1944	7.19E+00	-	35	400	244	206

注：① ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 的(裸源)周围剂量当量率常数参考《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)。
 ② ^{18}F 、的十分之一值层源自《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)； ^{68}Ga 十分之一值层源自 American Association of Physicists in Medicine, AAPM Task Group 108:PET and PET/CT Shielding Requirements Med.Phys.33,1,2006； ^{89}Zr 十分之一值层源自《辐射防护手册第三分册》。
 ③硫酸钡水泥的什值层根据式 11-3 和混凝土什值层换算得出。

根据表 11-1 本项目动物实验区使用非密封放射性物质计算参数，结合表 9-3 动物实验区实验规划内容， ^{18}F 单次用量大于 ^{124}I 和 ^{89}Zr 且无屏蔽体 1m 处剂量当量率最大，考虑 ^{89}Zr 的十分之一值层较大，选取使用 ^{18}F 和 ^{89}Zr 的情况开展计算。

分装室中 ^{18}F 的总活度按上午送到的总活度， ^{89}Zr 的总活度按当天使用核素最大量的总活度；小动物待检间按同时 5 只小动物候诊，待检动物 1~2 按 1 只大动物候诊；动物暂养间 ^{18}F 药物按 5 只大动物和 5 只小动物同时暂养， ^{89}Zr 药物按 2 只大动物和 3 只小动物同时暂养考虑。

^{18}F 药物活度时间衰变：考虑小动物 PET/CT 的实验动物用药后待检 30min 进行扫描，小动物 PET/CT 机房考虑 30min 药物衰变，衰变因子为 $0.5^{30/109.8}=0.827$ ，计算得小动物 PET/CT 机房源强为 30.6MBq；大动物 PET/CT、大动物 PET/MR 机房考虑给药后衰变 50min，衰变因子为 $0.5^{50/109.8}=0.729$ ，计算得大动物 PET/CT、大动物 PET/MR 机房源强为 135MBq；动物暂养间考虑衰变时间为 65min，衰变因子为 $0.5^{65/109.8}=0.729$ ，计算得动物暂养间大动物源强为 123MBq，小动物源强为 24.5MBq；解剖室考虑待解剖动物用药后衰变 90min，衰变因子为 $0.5^{90/109.8}=0.567$ ，计算得解剖室源强为 21MBq；放射性动物尸体暂存间考虑衰变时间为 120min，衰变因子为 $0.5^{120/109.8}=0.469$ ，计算得放射性动物尸体暂存间源强为 17.3MBq，其余关注点不考虑时间衰变；

污洗间和放射性废物暂存间源强参考经验值按日最大给药量 1‰考虑。

动物实验区拟使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 和 ^{89}Zr 共 5 中核素开展日常实验研究工作，其中， ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 最大单次用药量相同， ^{18}F 日最大操作量大于 ^{68}Ga ，根据表 9-10 和表 11-1 中放射性核素的特性、半衰期、 Γ 照射量率常数、使用频次情况，结

合实验室工作规划， ^{18}F 为本项目主要使用核素，年使用量最大， ^{89}Zr 毒性最强，因此，选取 ^{18}F 、 ^{89}Zr 作为本项目的关键核素进行辐射环境影响预测分析。

小动物 PET/CT 机房、大动物 PET/CT、大动物 PET/MR 机房、小动物待检间、待检动物室 1~2、动物暂养间关注点取实验动物体内单位放射性活度所致体外 1m 处周围剂量当量率进行计算，标准中缺少 ^{89}Zr 体内单位放射性活度所致体外 1m 处周围剂量当量率数据，保守取裸源的周围剂量当量率常数。实验核医学工作场所关注点的辐射剂量率估算结果见表 11-2。

表 11-2 动物实验区各关注点的辐射剂量率预测结果

关注点编号	位置描述		活度 (MBq)	屏蔽措施	距离 (m)	预测结果 (μSv/h)	
1	传递窗外		¹⁸ F: 4240	50mmPb 储源箱 +8mmPb 窗	2.6	2.88E-02	8.97E-02
			⁸⁹ Zr: 96.2		2.6	6.09E-02	
2	防护门外 30cm		¹⁸ F: 4240	50mmPb 储源箱 +4mmPb 门	2	8.47E-02	2.19E-01
			⁸⁹ Zr: 96.2		2	1.34E-01	
3	西侧墙外 30cm		¹⁸ F: 4240	50mmPb 储源箱 +240mm 实心砖 +15mm 硫酸钡	2.5	9.14E-03	3.28E-02
			⁸⁹ Zr: 96.2		2.5	2.37E-02	
4	顶棚上方距地面 30cm		¹⁸ F: 4240	50mmPb 储源箱 +250mm 混凝土	6.6	5.14E-04	2.02E-03
			⁸⁹ Zr: 96.2		6.6	1.51E-03	
5	正电子手套箱正对人员操作位		¹⁸ F: 185	50mmPb	0.5	1.03E-01	
			⁸⁹ Zr: 37		0.5	1.07E+00	
			¹⁸ F: 185	20mmPb	0.5	6.60E+00	
			⁸⁹ Zr: 37		0.5	7.72E+00	
6	防护门外 30cm		¹⁸ F: 185	10mmPb	2.4	1.15E+00	
			⁸⁹ Zr: 37		2.4	6.47E-01	
7	北侧墙外 30cm		¹⁸ F: 185	240mm 实心砖 +30mm 硫酸钡	2.6	3.00E-01	
			⁸⁹ Zr: 37		2.6	1.91E-01	
8	顶棚上方距地面 30cm		¹⁸ F: 185	300mm 混凝土	6.6	1.20E-02	
			⁸⁹ Zr: 37		6.6	9.73E-03	
9	传递窗外 30cm		¹⁸ F: 185	10mmPb	2.3	1.25E+00	
			⁸⁹ Zr: 37		2.3	7.04E-01	
	动物注射		¹⁸ F: 185	8mmPb 铅套 +0.5mmPb 铅衣	1	8.14E+00	
			⁸⁹ Zr: 37		1	4.11E+00	
	注射后运送		¹⁸ F: 185, 体内	0.5mmPb	1	5.23E+00	
			⁸⁹ Zr: 37		1	4.11E+00	
10	防护门外 30cm		¹⁸ F: 185	10mmPb	2.5	1.06E+00	
			⁸⁹ Zr: 37		2.5	5.96E-01	
11	西侧墙外 30cm		¹⁸ F: 185	240mm 实心砖 +30mm 硫酸钡	1.9	5.62E-01	
			⁸⁹ Zr: 37		1.9	3.58E-01	
12	顶棚上方距地面 30cm		¹⁸ F: 185	300mm 混凝土	6.6	1.20E-02	
			⁸⁹ Zr: 37		6.6	9.73E-03	

13	小动物待检间	西侧墙外 30cm	¹⁸ F: 37, 体内	10mmPb 笼 +370mm 实心砖 +40mm 硫酸钡	2.8	1.14E-02
			⁸⁹ Zr: 7.4		2.8	3.61E-02
14		南侧墙外 30cm	¹⁸ F: 37, 体内	10mmPb 笼 +370mm 实心砖 +40mm 硫酸钡	2	2.24E-02
			⁸⁹ Zr: 7.4		2	7.08E-02
15		传递窗外	¹⁸ F: 37, 体内	10mmPb 笼 +15mmPb	2.8	6.77E-02
			⁸⁹ Zr: 7.4		2.8	1.77E-01
16		防护门外 30cm	¹⁸ F: 37, 体内	10mmPb 笼 +15mmPb 门	1.9	1.47E-01
			⁸⁹ Zr: 7.4		1.9	3.85E-01
17		顶棚上方距 地面 30cm	¹⁸ F: 37, 体内	10mmPb 笼 +300mm 混凝土	6.6	1.93E-03
			⁸⁹ Zr: 7.4		6.6	5.04E-03
18	小动物 PET/CT 机房	摆位	¹⁸ F: 30.6, 体内	0.5mmPb 铅衣	1	2.63E+00
			⁸⁹ Zr: 7.4		1	1.39E+00
19		西侧墙外 30cm	¹⁸ F: 30.6, 体内	240mm 实心砖 +15mm 硫酸钡	2.5	4.36E-02
			⁸⁹ Zr: 7.4		2.5	4.87E-02
20		南侧防护门 外 30cm	¹⁸ F: 30.6, 体内	4mmPb	2.5	2.59E-01
			⁸⁹ Zr: 7.4		2.5	1.76E-01
21		观察窗外 30cm	¹⁸ F: 30.6, 体内	4mmPb	2.6	2.39E-01
			⁸⁹ Zr: 7.4		2.6	1.63E-01
22		顶棚上方距 地面 30cm	¹⁸ F: 30.6, 体内	250mm 混凝土	6.6	2.45E-03
			⁸⁹ Zr: 7.4		6.6	3.11E-03
23	大动物 PET/CT 机房	摆位	¹⁸ F: 135, 体内	0.5mmPb 铅衣	1	1.16E+01
			⁸⁹ Zr: 37		1	6.90E+00
24		南侧墙外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	240mm 实心砖 +30mm 硫酸钡	4.8	4.13E-02
			⁸⁹ Zr: 37		43.8	5.56E-02
25		东侧墙外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	240mm 实心砖 +30mm 硫酸钡	3.2	9.30E-02
			⁸⁹ Zr: 37		3.2	1.25E-01
26		南侧防护门	¹⁸ F:	10mmPb	4.8	1.35E-01

		外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内			
			⁸⁹ Zr: 37		4.8	1.60E-01
27		北侧防护门外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	10mmPb	4.9	1.29E-01
			⁸⁹ Zr: 37		4.9	1.54E-01
28		南侧防护窗外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	10mmPb	4.7	1.40E-01
			⁸⁹ Zr: 37		4.7	1.67E-01
29		顶棚上方距地面 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	300mm 混凝土	6.6	5.63E-03
			⁸⁹ Zr: 37		6.6	9.66E-03
30	待检动物室 1	南侧墙外 30cm	¹⁸ F: 185, 体内	10mmPb 笼 +370mm 实心砖 +40mm 硫酸钡	1.8	2.76E-02
			⁸⁹ Zr: 37		1.8	8.74E-02
31		防护门外 30cm	¹⁸ F: 185, 体内	10mmPb 笼 +15mmPb 门	1.9	1.47E-01
			⁸⁹ Zr: 37		1.9	3.85E-01
32		顶棚上方距地面 30cm	¹⁸ F: 185, 体内	10mmPb 笼 +300mm 混凝土	6.6	1.93E-03
			⁸⁹ Zr: 37		6.6	5.04E-03
33	大动物 PET/MR 机房	摆位	¹⁸ F: 135, 体内	0.5mmPb 铅衣	1	1.16E+01
			⁸⁹ Zr: 37		1	6.90E+00
34		东侧墙外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	240mm 实心砖 +30mm 硫酸钡	3.5	7.78E-02
			⁸⁹ Zr: 37		3.5	1.05E-01
35		南侧防护墙外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	240mm 实心砖 +30mm 硫酸钡	5.1	3.66E-02
			⁸⁹ Zr: 37		5.1	4.93E-02
36		西侧防护门外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	10mmPb	4.6	1.47E-01
			⁸⁹ Zr: 37		4.6	1.75E-01
37		西侧防护窗外 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	10mmPb	3.8	2.15E-01
			⁸⁹ Zr: 37		3.8	2.56E-01
38		顶棚上方距地面 30cm	¹⁸ F: 135, 体内	300mm 混凝土	6.6	5.63E-03
			⁸⁹ Zr: 37		6.6	9.66E-03
39	待检动物室 2	北侧墙外 30cm	¹⁸ F: 185, 体内	10mmPb 笼 +370mm 实心砖 +40mm 硫酸钡	1.8	2.76E-02
			⁸⁹ Zr: 37		1.8	8.74E-02
40		防护门外 30cm	¹⁸ F: 185, 体内	10mmPb 笼 +15mmPb 门	2	1.33E-01
			⁸⁹ Zr: 37		2	3.47E-01

41		顶棚上方距地面 30cm	^{18}F : 185, 体内	10mmPb+300m m 混凝土	6.6	1.93E-03
			^{89}Zr : 37		6.6	1.65E-01
42		南侧墙外 30cm	^{18}F : 736, 体内	10mmPb 笼 +370mm 实心砖 +40mm 硫酸钡	2.1	8.07E-02
			^{89}Zr : 96.2		2.1	1.65E-01
43	动物暂养间	东侧墙外	^{18}F : 736, 体内	10mmPb 笼 +370mm 实心砖 +40mm 硫酸钡	3.5	2.90E-02
			^{89}Zr : 96.2		3.5	5.95E-02
44		防护门外	^{18}F : 736, 体内	10mmPb 笼 +15mmPb 门	3.6	1.63E-01
			^{89}Zr : 96.2		3.6	2.76E-01
45		顶棚上方距地面 30cm	^{18}F : 736, 体内	10mmPb 笼 +300mm 混凝土	6.6	7.67E-03
			^{89}Zr : 96.2		6.6	1.30E-02
46		近距离解剖	^{18}F : 21, 体内	0.5mmPb 铅衣	1	1.12E-01
			^{89}Zr : 7.4		1	3.68E-01
47	解剖室	西墙外 30cm	^{18}F : 21, 体内	240mm 实心砖 +30mm 硫酸钡	2.1	3.36E-02
			^{89}Zr : 7.4		2.1	5.78E-02
48		东侧防护门外	^{18}F : 21, 体内	6mmPb	4	5.25E-02
			^{89}Zr : 7.4		4	5.98E-02
49		顶棚上方距地面 30cm	^{18}F : 21, 体内	300mm 混凝土	6.6	8.76E-04
			^{89}Zr : 7.4		6.6	1.92E-03
50	放射性动物尸体暂存间	西侧墙外 30cm	^{18}F : 260, 体内	240mm 实心砖 +15mm 硫酸钡	3	2.57E-01
			^{89}Zr : 21.8		3	1.00E-01
51		防护门外 30cm	^{18}F : 260, 体内	4mmPb	2.9	1.63E+00
			^{89}Zr : 21.8		2.9	3.87E-01
52		顶棚上方距地面 30cm	^{18}F : 260, 体内	250mm 混凝土	6.6	2.09E-02
			^{89}Zr : 21.8		6.6	9.19E-03
53	放射性废物暂存间	东侧墙外 30cm	^{18}F : 1.48	240mm 实心砖 +15mm 硫酸钡	5.7	6.31E-04
			^{89}Zr : 0.096		5.7	1.22E-04
54		北侧墙外 30cm	^{18}F : 1.48	240mm 实心砖 +15mm 硫酸钡	2.8	2.61E-03
			^{89}Zr : 0.096		2.8	5.07E-04
55		防护门外	^{18}F : 1.48	4mmPb	2.7	1.67E-02

		30cm	⁸⁹ Zr: 0.096		2.7	1.97E-03
56		顶棚上方距 地面 30cm	¹⁸ F: 1.48	250mm 混凝土	6.6	1.85E-04
			⁸⁹ Zr: 0.096		6.6	4.06E-05
57		东墙外 30cm	¹⁸ F: 1.48	240mm 实心砖 +15mm 硫酸钡	1.6	8.01E-03
			⁸⁹ Zr: 0.096		1.6	1.55E-03
58	污洗间	防护门外 30cm	¹⁸ F: 1.48	4mmPb	1.3	7.19E-02
			⁸⁹ Zr: 0.096		1.3	8.51E-03
59		顶棚上方距 地面 30cm	¹⁸ F: 1.48	300mm 混凝土	6.6	9.59E-05
			⁸⁹ Zr: 0.096		6.6	2.53E-05

由上表估算结果可知，实验核医学工作场所动物实验区控制区外关注点剂量率最大值为 $2.75 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ （位于放射性动物尸体暂存间西侧墙外 30cm，非放射性污物暂存间），满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）“在核医学控制区外人员可达处，距屏蔽体外表面 0.3m 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。”的要求。

实验核医学工作场所动物实验区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 $< 1/2$ ）的实体屏蔽体外关注点剂量率最大值为 $1.63 \mu\text{Sv/h}$ （位于放射性动物尸体暂存间防护门外 30cm 处，实验动物通道），控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子 $\geq 1/2$ ）的剂量率最大值为 $1.25 \mu\text{Sv/h}$ （分装室传递窗外 30cm，注射间），均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）标准的“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 $10 \mu\text{Sv/h}$ ”的要求。

本项目对手套箱正面、手套箱非正对面、传递窗分别进行预测，设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率最大值为 $1.07 \mu\text{Sv/h}$ ，非正对人员操作位表面的周围剂量当量率最大值为 $7.72 \mu\text{Sv/h}$ ，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“放射性药物分装柜、通风柜、注射窗等设备外表面 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 $25 \mu\text{Sv/h}$ ”的要求。

（3）大/小动物 PET/CT 机房剂量率叠加分析

对于大/小动物 PET/CT 机房，还需考虑 PET/CT 运行时产生的 X 射线的辐射屏

蔽。根据设备厂家提供的参数，小动物 PET/CT 在管电压 100kV 工况下，1m 处杂散辐射为 0.219 μ Gy/mAs（水平）和 0.0041 μ Gy/mAs（垂直），CT 扫描不超过 0.2mA，故 1m 处杂散辐射剂量率为 157.7 μ Sv/h（水平）和 2.952（垂直）；大动物 PET/CT 在管电压 140kV 工况下，1m 处的杂散辐射为 0.046 μ Gy/mAs（垂直）和 0.035 μ Gy/mAs（水平），CT 扫描不超过 420mA，故 1m 处的杂散辐射剂量率为 69552 μ Sv/h（垂直）和 52920 μ Sv/h（水平）。

机房外关注点计算公式根据李德平、潘自强主编《辐射防护手册》（第一分册——辐射源与屏蔽）中公式（10.8）、（10.9）、（10.10）等公式演化而来。

$$H = \frac{H_0 \cdot B}{d^2} \quad (\text{式 11-3})$$

式中：

H ——预测点处的透射辐射剂量率， μ Sv/h；

H_0 ——距靶 1m 处初级 X 射线束造成的空气比释动能率， μ Sv/h；

d ——靶点距关注点的距离，m；

B ——屏蔽透射因子，参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）附录C的 C.1.2中式（C.1）及表C.2的相关参数进行计算。

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{-\alpha \gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (\text{式 11-4})$$

式中：

B ——给定铅厚度的屏蔽透射因子；

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；

X ——屏蔽厚度。

查《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）附录 C 表 C.2，可知铅对管电压为 140kV（CT）X 射线辐射衰减的有关的拟合参数 $\alpha=2.009$ 、 $\beta=3.990$ 、 $\gamma=0.3420$ 。剂量率叠加预测结果为屏蔽体外 30cm 的 γ 射线剂量率与 X 射线剂量率之和，计算结果见表 11-3。

表 11-3 大/小动物 PET/CT 机房剂量率叠加预测结果

关注点	H ₀	机房屏蔽体折算为铅当量 (mmPb)	减弱因子	距离 (m)	X 射线剂量率 (μSv/h)	γ 射线剂量率 (μSv/h)	叠加剂量率
	(μSv/h)						(μSv/h)
小动物 PET/CT 机房							
墙外 30cm	157.7	4.3	1.60E-06	2.5	4.04E-05	4.87E-02	4.87E-02
防护门外 30cm	157.7	4	3.39E-06	2.5	8.55E-05	2.59E-01	2.59E-01
观察窗外 30cm	157.7	4	3.39E-06	2.6	7.91E-05	2.39E-01	2.39E-01
顶棚上方距地面 30cm	2.952	3.9	4.35E-06	6.6	2.95E-07	3.11E-03	3.11E-03
大动物 PET/CT 机房							
墙外 30cm	52920	3.5	4.32E-05	4.8	9.92E-02	1.25E-01	2.24E-01
防护门外 30cm	52920	10	7.70E-11	4.8	1.77E-07	1.61E-01	1.61E-01
观察窗外 30cm	52920	10	7.70E-11	4.7	1.85E-07	1.67E-01	1.67E-01
顶棚上方距地面 30cm	69552	3	1.28E-04	6.6	2.04E-01	5.04E-03	2.09E-01

根据上述预测结果可见，大小动物 PET/CT 机房防护门、观察窗、墙壁外 30cm、楼上关注点处叠加剂量率均小于 2.5μSv/h，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）和《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586—2025）的要求。摆位时设备不开机，故摆位过程中无 X 射线的影响。

11.2.2 工作场所辐射水平分析—同位素实验区

同位素实验区域使用非密封放射性同位素 ³²P、³³P 开展核素实验。³²P、³³P 均为纯 β 衰变放射性核素，β 粒子穿过周围物质时产生轭致辐射，其穿透能力比 β 粒子强得多，因此应用 β 源时不能忽视对轭致辐射的防护。

取同位素实验区内同一侧面积相对较小的同位素操作间 5、样本检测间 3 和实验核医学工作场所控制区边界紧邻数据处理室的实验室、紧邻气瓶/耗材间的细胞房作为代表房间设置关注点，计算样本检测间、同位素操作间及实验室等功能房间关注点时，按照辐射源常停留位置与关注点的最短距离进行选取；同一功能房间，墙体和顶棚屏蔽相同的情况下，选取关注点距源强最近的点作为代表，门、窗外单独设关注点。此外，关注点设置在药物操作位、控制区内房间的屏蔽墙外 30cm 处、顶棚上方距地面 30cm 处，关注点示意图 11-1。

由表 9-4 和表 9-8 可知， ^{32}P 和 ^{33}P 核素的单次实验最大用量均为 3.7×10^7 ； ^{33}P 释放出的 β 射线最大能量为 0.2485MeV， ^{32}P 释放出的 β 射线最大能量为 1.71MeV，故工作场所满足 ^{32}P 的屏蔽要求即可满足 ^{33}P 的屏蔽要求。

β 射线与物质作用会产生韧致辐射，根据《辐射防护导论》第 133 页中的公式计算韧致辐射，Gy/Sv 转换按 1。见下式 11-1，结合 ^{33}P 、 ^{32}P 的日最大操作量、 β 射线最大能量，可以得出工作场所屏蔽计算主要考虑 ^{32}P 产生的韧致辐射影响， ^{32}P 产生的韧致辐射未经屏蔽的辐射剂量率情况见表 11-4。

$$H_r \equiv 4.50 \times 10^{-11} A Z_e \left(\frac{E_{\beta}}{r}\right)^2 \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) \quad (\text{式 11-5})$$

式中：

H_r ——距离屏蔽层源 r 米处的辐射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A ——源活度，Bq；

Z_e ——屏蔽材料的有效原子序数，取自《辐射防护导论》表 4.4，药物位于通风橱内时选取有机玻璃的有效原子序数 5.85，药物从通风橱取出后选取空气的有效原子序数 7.36；

E_b ——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 $E_b = E_{\max}/3$ ， E_{\max} 取自《辐射防护导论》表 4.1， ^{32}P 为 1.711MeV，则 $E_b = 0.570$ ；

r ——参考点与屏蔽层的距离，m；

μ_{en}/ρ ——平均能量为 E_b 的韧致辐射在空气中的质量能量吸收系数， m^2/kg ，取自《辐射防护导论》附表 1；

表 11-4 核素所致韧致辐射剂量率

关注点编号	位置描述		A (Bq)	Z_e	E_b (MeV)	距离 r (m)	μ_{en}/ρ (m ² /kg)	辐射剂量率 (μSv/h)
/	/	裸源 30cm 处	3.70E+07	7.36	5.70E-01	0.3	2.95E-03	1.33E-01
/	/	裸源 1m 处	3.70E+07	7.36	5.70E-01	1.0	2.95E-03	1.20E-02
1	储源间	传递窗外 30cm (通道)	3.70E+07	5.85	5.70E-01	2.6	2.95E-03	1.41E-03
2		防护门外 30cm (走廊)	3.70E+07	5.85	5.70E-01	2.0	2.95E-03	2.38E-03
3		东侧墙外 30cm (放射性废物暂存间)	3.70E+07	5.85	5.70E-01	2.5	2.95E-03	1.52E-03
4		顶棚上方距地面 30cm (实验室 4~5、洁净走道)	3.70E+07	5.85	5.70E-01	6.6	2.95E-03	2.18E-04
53	放射性废物暂存间	东侧墙外 30cm (公用落地设备间 2)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	5.7	2.95E-03	3.68E-04
54		北侧墙外 30cm (院内绿化)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	2.8	2.95E-03	1.52E-03
55		防护门外 30cm (通道)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	2.7	2.95E-03	1.64E-03
56		顶棚上方距地面 30cm (实验室 4~5)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	6.6	2.95E-03	2.74E-04
60	样本监测间 3	北侧墙外 30cm (走廊)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	2.6	2.95E-03	1.77E-03
61		防护门外 30cm (走廊)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	2.5	2.95E-03	1.91E-03
62		顶棚上方距地面 30cm (操作间)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	6.6	2.95E-03	2.74E-04
63	细胞房	东侧墙外 30cm (气瓶/耗材间)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	3.3	2.95E-03	1.10E-03
64		北侧墙外 30cm (走廊)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	2.6	2.95E-03	1.77E-03
65		防护门外 30cm (走廊)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	3.1	2.95E-03	1.24E-03
66		顶棚上方距地面 30cm (一更 1~2、二更 1~2)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	6.6	2.95E-03	2.74E-04
67	同位素操作间 5	通风橱正对人员操作位	3.70E+07	5.85	5.70E-01	0.6	2.95E-03	2.64E-02
68		北侧墙外 30cm (院内绿化)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	3.9	2.95E-03	7.86E-04
69		防护门外 30cm (走廊)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	3.8	2.95E-03	8.28E-04
70		顶棚上方距地面 30cm (实验室 13)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	6.6	2.95E-03	2.74E-04
71	高频交叉操作间 1	北侧墙外 30cm (院内绿化)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	3.9	2.95E-03	7.86E-04
72		东侧墙外 30cm (数据处理室)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	1.8	2.95E-03	3.69E-03
73		防护门外 30cm (走廊)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	3.8	2.95E-03	8.28E-04
74		顶棚上方距地面 30cm (检疫室)	3.70E+07	7.36	5.70E-01	6.6	2.95E-03	2.74E-04

由估算结果可知，在不考虑屏蔽情况效果下，同位素实验区核素实验时所致控制区外轫致辐射剂量率最大为 $3.69 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/h}$ （高频交叉操作间 1 东侧墙外 30cm，数据处理室），满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）“在核医学控制区外人员可达处，距屏蔽体外表面 0.3m 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。”的要求。

同位素实验区核素实验时所致通风橱正对人员操作位轫致辐射剂量率最大为 $2.64 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ ，非正面处距离辐射源的距离更远，因此满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“射性药物分装柜、通风柜、注射窗等设备外表面 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 $25 \mu\text{Sv/h}$ ”的标准要求。

同位素实验区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 $< 1/2$ ）的实体屏蔽体外关注点剂量率最大值为 $1.34 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ （位于储源间防护门外 30cm 处，走廊），控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子 $\geq 1/2$ ）的剂量率最大值为 $3.68 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ （放射性废物暂存间东侧墙外 30cm 处，公用落地设备间 2），均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）标准的“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 $10 \mu\text{Sv/h}$ ”的要求。

11.2.3 辐射工作人员及公众个人剂量估算

(1) 计算公式

根据对各辐射工作场所关注点的剂量估算结果，结合本项目工作人员配备及工作负荷介绍，按照下式对本项目辐射工作人员及公众的年受照剂量进行估算。

$$H = H_r \times t \times T \times 10^{-3} \quad (\text{式 11-7})$$

式中：

H_r ——辐射外照射人均年有效剂量，mSv；

H ——辐射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

t ——年工作时间，h；

T ——居留因子，职业人员取 1。

(2) 辐射工作人员受照剂量估算

实验核医学项目低剂量实验区域拟配置 5 名实验操作人员及 1 名实验室管理员，实验室管理员属于辐射工作人员但不参与实验操作，仅负责放射性同位素的接收和登记，放射性同位素接收、登记时在屏蔽容器内储存，对实验室管理员产生的辐射影响可忽略不计。

动物实验区计划新增 4 名设备操作员和 6 名实验工作人员，其中（小动物 PET/CT、大动物 PET/CT 和大动物 PET/MR 三间机房每间 1 名操作员，1 名备选操作员）操作三台动物影像设备，新增 6 名实验工作人员进行动物实验工作。

结合表 9-1 和表 9-2 本项目辐射工作人员年有效剂量估算结果见表 11-6 和表 11-7。

表 11-6 同位素实验区辐射工作人员年有效剂量估算

序号	实验用核素	年实验天数(d)	每次实验操作放射性核素时间(h)	年受照时间(h)	辐射剂量率(μSv/h)	年有效剂量(mSv)	
						岗位年有效剂量	单人年有效剂量
1	³² P	250	4	1000	2.64E-02	2.64E-02	1.06E-02
2	³³ P	250		1000	2.64E-02	2.64E-02	

表 11-7 动物实验区辐射工作人员年有效剂量估算

放射性物质操作	操作时间(min/次)	年工作 量(次)	年工作 时长(h)	辐射剂量率(μSv/h)	年有效剂量(mSv)		
					各岗位年有效剂量	合计	单人年有效剂量
药物分装	1	4250	70.8	1.07E+00	7.58E-02	7.58E-02 (2人轮岗)	3.79E-02
注射	0.5	3150	26.3	1.63E+00	4.29E-02	3.95E+00 (4人轮岗, 2人一组)	1.98E+00
	1	1100	18.3	8.14E+00	1.49E-01		
动物解剖	10	3150	525.0	3.68E-01	1.93E-01		
	50	24	20.0	1.84E+00	3.68E-02		
注射运送	1	3150	52.5	5.23E+00	2.75E-01		
	5	1100	91.7	5.23E+00	4.80E-01		
扫描运送	0.5	3150	26.3	2.63E+00	6.92E-02		
	3	1100	55.0	1.16E+01	6.38E-01		
暂养运送	1	3150	52.5	2.63E+00	1.38E-01		
	5	1100	91.7	1.16E+01	1.06E+00		
解剖运送	2	3150	105.0	2.63E+00	2.76E-01		
	5	24	2.0	1.16E+01	2.32E-02		
动物摆位和解除摆位	1	3150	52.5	2.63E+00	1.38E-01		
	2	1100	36.7	1.16E+01	4.26E-01		
小动物 PET/CT 显像扫描	10	3150	525.0	2.39E-01	1.25E-01		

大动物 PET/CT 显像扫描	30	1100	550.0	1.67E-01	9.19E-02
大动物 PET/MR 显像扫描	30	1100	550.0	2.56E-01	1.41E-01

注：年工作量取单日实验动物数量最大的情况（使用 ^{18}F 和 ^{89}Zr ）。

由上表估计结果可知，正常情况下本项目实验核医学场所工作人员在运行期的年有效剂量能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业人员年当量剂量不超过 20mSv 的要求，也满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中工作人员职业照射剂量约束值不超过 5mSv/a 的要求。

（3）公众受照剂量估算

根据实验核医学场所周围用房功能情况，结合表 11-2~表 11-5 对相应功能用房的辐射剂量率预测结果对实验核医学场所周围公众受照剂量进行估算，计算公式见式 11-7，计算结果见表 11-8。

表 11-8 公众年有效剂量估算

方位	关注点	辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年受照 时间 (h)	居留因 子	年有效剂量 (mSv/a)	
北侧	院内绿化	4.18E-03	2000	1/16	5.23E-04	
西侧	活毒废水机房、冷库 (非放射性)	7.76E-02	2000	1/16	9.70E-03	
	污物暂存(非放射性)	3.15E-01	2000	1/16	3.94E-02	
	过道 1	4.87E-02	525 ^④	1/5	5.11E-03	
南侧	走廊	4.93E-02	2000	1/5	1.97E-02	
	手术室、器械准备	1.65E-01	800 ^⑥	1/4	3.30E-02	7.34E-02
		8.07E-02	2000	1/4	4.04E-02	
	设备间 1	7.08E-02	2000	1/16	8.85E-03	2.51E-02
		2.59E-01	525 ^④	1/16	8.50E-03	
		2.24E-01	550 ^⑤	1/16	7.70E-03	
	设备间 2	1.60E-01	550 ^⑤	1/16	5.50E-03	1.99E-02
		1.05E-01	525 ^④	1/16	3.45E-03	
8.74E-02		2000	1/16	1.09E-02		
东侧	过道 2	1.05E-01	2000	1/5	4.20E-02	
	双光子	5.95E-02	800 ^⑥	1/4	1.19E-02	6.47E-02
		2.90E-02	2000	1/4	1.45E-02	
		1.53E-01	1000	1/4	3.83E-02	
	气瓶/耗材间	1.18E-01	1000	1/16	7.38E-03	7.38E-03
	数据处理室、淋浴间	2.53E-01	1000	1/4	6.33E-02	6.33E-02

注：①院内绿化关注点年有效取放射性废物暂存间、高频交叉操作间（同位素操作间 5 为代表）墙外 30cm 剂量率加和计算得出；

②活毒废水机房、冷库（非放射性）关注点年有效剂量取放射性废物暂存间西侧防护门外 30cm 和储源间西侧墙外 30cm 处剂量率加和计算得出；

③污物暂存（非放射性）关注点年有效剂量取放射性动物尸体暂存间和解剖室西侧墙外 30cm 处剂量率加和计算得出；

- ④小动物 PET/CT 年最大工作时长；
- ⑤大动物 PET/CT、大动物 PET/MR 年最大工作时长；
- ⑥⁸⁹Zr 年最大使用时长。

根据估算结果可知，实验核医学项目投入使用后，公众年受照剂量最大值为 $7.34 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）关于公众照射年当量剂量不超过 1mSv 限值要求，同时满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）关于公众照射剂量约束值不超过 0.1mSv/a 的要求。根据剂量率与关注点和源距离平方成反比的关系，距离实验核医学场所越远，辐射剂量率越低，距离实验核医学场所更远处的医科院内部其他建筑、医科院外部居民楼的公众人员受照剂量远小于 $7.34 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ 。

11.2.4 放射性废物影响分析

本项目实验过程中产生的放射性“三废”包括：

（1）放射性固废：主要包括：低剂量核素实验中使用的一次性个人防护用品（手套、隔离实验服等）、滤纸、试管；动物实验中使用的一次性注射器、吸水垫纸、小动物尸体等；废旧 ⁶⁸Ge 校准源按 2 年产生 3 枚考虑。

（2）放射性废液：低剂量核素实验过程中产生的放射性废液主要包括实验中放射性核素标记溶液以及含放射性核素的闪烁液、电泳液；动物实验区可能产生的放射性废液包括：实验动物注射/服用放射性药物后产生的排泄物及冲洗水等含有放射性核素的废液，实验核医学场所工作人员完成放射性药物操作后清洗去污的废液，实验核医学工作场所清洗及应急洗消产生的可能含放射性物质的废液。

（3）放射性废气：在放射性核素的分装、转移操作过程中会发生极微量挥发而产生微量放射性核素的放射性气溶胶。另外动物实验过程中可能产生微量动物代谢产生的含放射性核素的废气。

11.2.4.1 放射性固体废物

（1）同位素实验区放射性固体废物

根据建设单位实验规划，本项目同位素实验区产生的放射性固体废物汇总如下表。

表 11-9 低剂量实验区产生的放射性固体废物汇总表

核素	年实验天数	实际日最大操作量 (Bq)	单次实验固废量 (g/d)	年产生量 (kg)	放射性固体废物		废物解控水平	
					活度 (Bq)	活度浓度 (Bq/g)	活度 (Bq)	活度浓度 (Bq/g)
³² P	100	3.70E+07	300	75	9.25E+06	3.08E+04	1.00E+05	1.00E+03

³³ P	150	3.70E+07		75	9.25E+06	3.08E+04	1.00E+08	1.00E+05
合计				150	/	/	/	/

注：①保守取核素日最大操作量的四分之一对放射性固体废物的活度进行估算；

②废物解控水平数据取自《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）表 A1 放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度。

建设单位拟为含 ³²P 的放射性废物设置 4 个有机玻璃废物衰变桶轮流贮存，每个有机玻璃废物桶贮存量为 20kg，保守按一个废物桶存满后开始衰变，则含有 ³²P 的固体废物可暂存时间为 $20 \times 1000 \times 3 / 300 = 200$ 天，能满足含 ³²P 核素放射性固体废物贮存 143 天的要求。

拟为含 ³³P 的放射性废物设置 5 个有机玻璃废物衰变桶轮流贮存，每个有机玻璃废物桶贮存量为 20kg，保守按一个废物桶存满后开始衰变，则含有 ³³P 的固体废物可暂存时间为 $20 \times 1000 \times 4 / 300 = 266$ 天，能满足含 ³³P 核素放射性固体废物贮存 254 天的要求。

实际开展实验过程中，放射性固体废物产生量具有不确定性，建设单位应根据废物产生量及时配置有机玻璃废物桶，确保放射性固体废物暂存时间满足暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍的要求，并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/cm²，对废物清洁解控并按照危险废物委托有资质单位处置。

经分析，上述措施能够满足相关标准要求 and 项目运行期放射性废物的处理需求。

(2) 动物实验区放射性固体废物

①实验核医学动物实验动物尸体暂存时间可行性分析

建设单位开展小动物 PET/CT 实验时，使用放射性核素 ¹⁸F、⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、¹²⁴I 和 ⁸⁹Zr 开展，每天使用不超过两种核素，实验结束后将小动物处死，将其装入塑料袋中，外贴日期标签，转入放射性动物尸体暂存间的冰柜内暂存。根据建设单位提供资料，动物实验区每天做实验小动物最多 15 只（根据建设单位提供信息，单只小动物体重约 20~75g），保守按照所有小动物全部处死计算小动物尸体产生量。

建设单位计划配置 2 个冰柜用于贮存小动物尸体，每台冰柜含 3 个分隔，每个分隔约能存储 70 只小动物尸体。其中 1 个冰柜用于存放注射 ¹⁸F、⁶⁸Ga 的小动物尸体（¹⁸F 两格，⁶⁸Ga 一格），1 个用于存放注射 ⁶⁴Cu、¹²⁴I、⁸⁹Zr 的小动物尸体，尸体存放时间符合性分析详见表 11-10。

表 11-10 小动物尸体产生量及停留时间分析

核素	半衰期	每天实验产生动物尸	周实验天数	产生固体量（只/周）	冰柜每个分隔最短装满时间（周）	最长暂存时间（天）	年产生动物尸体量（kg）

		体数量					
¹⁸ F	109.8min	15	4	60	1.2	17	281.3
⁶⁸ Ga	68.3min	10	2	20	3.5	25	75
⁶⁴ Cu	12.7h	5	2	10	7.0	49	37.5
¹²⁴ I	4.18d	3	1	3	23.3	163.1	22.5
⁸⁹ Zr	3.27d	3	1	3	23.3	163	22.5
合计							438.8

注：计算年产生动物尸体量时小动物尸体取最大 75g/只。

从上表分析可以看出，建设单位现配置的冰柜，能够满足存放小动物尸体暂存最长超过 42 天的要求。

考虑每月解剖大动物 2 只（根据建设单位提供信息，大动物：猪单只体重约 30~80kg，猴单只体重约 3~15kg，犬单只体重约 8~20kg，保守每次解剖动物重量取 80kg/只），建设单位计划配置 3 个冰柜用于贮存大动物尸体，单个冰柜约能存储 2 只大动物尸体（以猪的体重为 80kg 计），则大动物最长暂存时间约 60 天，能够满足大动物尸体暂存最长超过 42 天的要求，年产生大动物尸体最大约：

$$80\text{kg}/\text{只} \times 2 \text{ 只}/\text{月} \times 12 \text{ 月}/\text{年} = 1920\text{kg}。$$

实验核医学场所设置有放射性动物尸体暂存间，用于专门暂存动物尸体。动物尸体废物按使用核素种类和时间分类暂存在专用的冰柜分隔内，满足解控水平经审管部门确认或批准，以普通医疗动物尸体交有资质的单位进行无害化处理。

②其他放射性固体废物处置分析

本项目设有放射性废物暂存间，用于专门收集产生的放射性固体废物。对放射性固废分类存放，并标记产生的时间。

对于一次性物品，每天实验后将这些放射性固体废物收集转入塑料袋中，转入放射性废物暂存间的废物桶内暂存，待其活度浓度低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的清洁解控水平后，以危险废物（废物代码：HW49）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。

根据建设单位实验规划，每天实验产生的放射性固体废物约为 0.5kg，年产生量约 125kg，建设单位拟设置 4 个 20mmPb 废物桶用于暂存放射性废物，每个废物储存桶的贮存量为 20kg，2 个废物桶装满需要 80 天，能够满足放射性固体废物暂存时间超过 42 天的要求。实际开展实验过程中，放射性固体废物产生量具有不确定性，建设单位应根据废物产生量及时配置铅废物桶，确保放射性固体废物暂存时间超过 42 天，并经

监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，对废物清洁解控并作为危险废物（废物代码：HW49）处理。

另外，实验核医学项目使用的 ^{68}Ge 校准源属于放射源，报废后由放射源供应单位回收或送交广东省城市放射性废物库处置，建设单位应做好废旧放射源处置的申报和记录。经咨询市面主流 PET/CT 设备厂家，其供应的 ^{68}Ge 校准源一般有效期为 2 年，达到有效期后需对原有校准源进行报废处理，并购置新源，根据核素衰变规律及半衰期（288 天）计算报废时候的活度， ^{68}Ge 初始活度为 1 枚 $1.11\times 10^8\text{Bq}$ 和 2 枚 $7.4\times 10^7\text{Bq}$ ，算得报废时，3 枚放射源总活度为 $4.47\times 10^7\text{Bq}$ 。

实验核医学废气排放口更换下的废活性炭也属于放射性固体废物，更换下的活性炭将存放于衰变桶中，标注活性炭存放日期、存放量等，满足清洁解控水平后作为危险废物（废物代码：HW49）处理。

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。

综上，本项目实验核医学设有专用的放射性废物暂存间，含放射性的废物未达到清洁解控水平不会流出场所，项目运行期放射性废物按要求进行收集、暂存和处理后不会对环境造成影响。

11.2.4.2 放射性废气

放射性核素在分装、转移操作过程中会发生极微量挥发而产生微量放射性核素的放射性气溶胶。另外动物实验过程中动物代谢可能产生的微量含放射性核素的废气。

在同位素实验区安装通风柜，通风速度不小于 $0.5\text{m}/\text{s}$ ，通风橱排风管道连接至独立排风管道引至楼顶经活性炭吸附处理箱处理后排放；动物实验区的放射性废气将设置专用排风管道汇集后引至屋顶经活性炭过滤后排放，通风管道与其他区域的通风管道分离，排放口周围 50m 范围内无更高建筑，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）相关要求。

11.2.4.3 放射性废液

本项目实验核医学工作场所涉及 ^{32}P 、 ^{33}P （仅在同位素实验区使用） ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr （仅在动物实验区使用），针对核素的实际使用情况设置有专门的废液收集桶和衰变池，衰变池设计已在第 10 章节进行分析。本项目产生的放射性废液处置分析如下。

(1) 同位素实验区：

同位素实验区域的放射性废液主要为应急去污废水和洗涤容器废液、实验产生的废液（放射性核素标记溶液、闪烁液、电泳液等）。

①辐射工作人员操作实验过程均穿有实验工作服、工作鞋和乳胶手套，离开工作场所前对工作服、工作鞋及手部表面污染监测后脱掉防护手套，若手套存在污染，将污染的手套等作为放射性固体废物进行收集暂存。辐射工作人员均须经表面污染检查，确认无污染后方可离开，实验结束脱除一次性用品后仍发现有放射性污染的情况按照每周发生 2 次计算，每次洗手用水约 2L，应急冲淋用水约 60L，应急冲淋考虑每月发生一次。应急洗手废水收集至废液桶，应急冲淋去污废水收集至应急池。

②实验过程中的玻璃容器需重复利用，首先玻璃容器倒扣在铺垫吸水纸（足够厚）的塑料盆中，即利用吸水纸吸干残余在容器器皿的残留废液，最后用少量水冲洗器皿，直至检测无污染，洗涤废水倒入专用收集桶收集。洗涤容器废液及其他实验过程产生的废液量约为 1L/d。

表 11-11 同位素实验区放射性废液汇总表

废液种类	产生量 (L/天)	年产生次数 (天)	年产生量 (L)
应急洗手去污废液	2	100	200
应急冲淋废液	60	12	720
含 ^{32}P 的放射性废液	1	250	250
含 ^{33}P 的放射性废液	1	250	250
合计			1420

结合前文影响分析，应急洗手废水含核素按 ^{32}P 考虑，建设单位拟为含 ^{32}P 的放射性废液设置 4 个有机玻璃废液桶轮流贮存，每个有机玻璃废液桶贮存量为 50L，则每个有机玻璃废液桶可暂存时间为 $50/450*365\approx 40.5$ 天，当最后一个有机玻璃废液桶存满时，则第一个有机玻璃废液桶中含 ^{32}P 的放射性废液已暂存 162 天，满足含 ^{32}P 核素放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（143 天）的要求。

为含有 ^{33}P 的放射性废液设置 4 个有机玻璃废液桶轮流贮存，每个有机玻璃废液桶贮存量为 50L，则每个有机玻璃废液桶可暂存时间为 $50/250*365\approx 73$ 天，当最后一个有机玻璃废液桶存满时，则第一个有机玻璃废液桶中含 ^{33}P 的放射性废液已暂存约 292 天，满足含 ^{33}P 核素放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（254 天）的要求。放射性废液暂存时间满足要求后，经监测符合清洁解控水平按实验室废物委托有资质单位处置。

(2) 动物实验区：

①小动物实验产生的放射性废水主要采用吸水纸擦拭作为放射性固体废物处置，

大动物产生的放射性废水按 300L/天进行核算，每周实验 5 日，则废水产生量为 1.5m³/周；

②辐射工作人员用水量：

1) 辐射工作人员去污清洗：辐射工作人员去污清洗用水按 60L/人次考虑，动物实验区每天最多 4 人开展实验，每周开展实验 5 天，则动物实验区每周工作人员去污清洗产生废水 1.2m³/周；

2) 场所清洁用水按 0.1L/（m²·次），实验核医学场所涉及核素使用区域总面积约 721m²，每周清洗 5 次，则每周诊断区产生清洗废水 0.36m³/周。

3) 应急洗消废水量：应急洗消废水按 100L/周，即 0.1m³/周。

放射性废液使用特定的下水管道汇集至衰变池，衰变池废液将停留至符合排放要求经审管部门核准排入市政管网，接诊受检者/动物统计如下：

表 11-13 动物实验区放射性废液产生量汇总

实验量		日产生量 (L)	周产生废液量 (m ³)	产生废液量 (m ³ /周)
动物实验	¹⁸ F、 ⁶⁸ Ga、 ⁶⁴ Cu、 ⁸⁹ Zr、 ¹²⁴ I	300	1.5	3.16
辐射工作人员去污清洗		240	1.2	
场所清洁		0.072	0.36	
应急洗消		/	0.1	

注：建设单位拟采取节水措施，实验动物排泄物采用吸水纸擦拭作为放射性固体废物处置，以减少放射性废液的产生量

③暂存时间

根据衰变池的容积和 workflows 可推算出每个衰变池最短装满时间和装满后在该池内的停留时间，详见表 11-14。

表 11-14 衰变池暂存时间

衰变池组	单个容积 (m ³)	单个池最短装满时间 (周)	装满后存储时间 (天)
衰变池	12.2	3.9	55

动物实验的特殊性，是注射药物后的动物可能会在实验场所内出现排尿、排便的情况，因此场所的清污工作较大，动物产生的废液采用试纸、吸水纸等进行收集，转为固体废物，通过废物间的暂存衰变进行处理。

综上所述，衰变池设置废液暂存超过 42 天，满足 HJ1188-2021 中“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”的要求，监测结果经审管部门认可后排入园区污水处理站。放射性废液总排放口总 β 不大于 10Bq/L。

本项目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。满足上述规定后可由工作人员控制设备直接进行排放，废水排入污水处理站进一步处理后纳入市政污水管网排放。

本项目衰变池正上方为院内道路，衰变池正下方和四周均为岩土层。将衰变池区域划为控制区管理，禁止无关人员进入，仅在必要的检查、检修时专业人员可进入。因此，本项目衰变池在采取上述辐射防护屏蔽措施和安全管理措施后，本项目放射性废水贮存衰变过程不会对周边环境造成大的影响。

11.3 事故影响分析

11.3.1 事故分级

根据《放射源同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 第 449 号）第四十条：根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级，详见表 11-14。

表 11-14 辐射事故等级划分表

事故等级	危害结果
特别重大辐射事故	I类、II类放射源丢失、被盗、失控造成大范围严重辐射污染后果，或者放射性同位素和射线装置失控导致 3 人以上（含 3 人）急性死亡。
重大辐射事故	I类、II类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致 2 人以下（含 2 人）急性死亡或者 10 人以上（含 10 人）急性重度放射病、局部器官残疾。
较大辐射事故	III类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致 9 人以下（含 9 人）急性重度放射病、局部器官残疾。
一般辐射事故	IV类、V类放射源丢失、被盗、失控，或放射性同位素和射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射。

本项目可能发生的辐射事故为一般辐射事故。

11.3.2 实验核医学场所辐射事故分析与防范措施

①操作人员违反操作规程或误操作引起的意外泄漏，造成台面、地面辐射污染，工作人员受到核素释放出的 γ/β 射线外照射或核素经由空气吸入、食品食入，或经皮肤、伤口吸收并沉积在工作人员体内，在体内释放出 β 粒子对周围组织或器官造成内照射。

②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放射性药物保管不当，放射性药物被盗、丢失，造成公众受到核素释放出的 γ/β 射线外照射或核素经由空气吸入、食品食入，或经皮肤、伤口吸收并沉积在公众体内，在体内释放出 β 粒子对周围组织或器官造成内照射。

④放射性废液或放射性固体废物未达到解控水平或排放标准即进行处理，造成公众受到核素释放出的 γ 射线外照射或核素经由空气吸入、食品食入，或经皮肤、伤口吸收并沉积在公众体内，在体内释放出 β 粒子对周围组织或器官造成内照射。

⑤给药后小动物管理不善，小动物走失，造成公众受到核素释放出的 γ/β 射线外照射。

⑥射线装置机房安全联锁失效或者闭门装置失效，在机房内检查时防护门处于打开状态，人员误入机房，人员受到 CT 部分曝光产生的 X 射线外照射。

⑦射线装置曝光控制装置异常或工作人员误操作，造成工作人员和周围公众在检查、设备维修、调试等过程受到 X 射线外照射。

(2) 事故防范措施

前述辐射事故可综合为人员误入射线装置机房、联锁故障、人员误操造成的误照射；放射性药物洒漏；放射性药物被盗、丢失和给药后小动物走失三种类型，通过管理制度来进行事故的预防：

①辐射工作人员平时必须严格执行各项管理制度，严格遵守设备的操作规程，进行辐射工作前检查是否已按要求做好各种相应的辐射防护措施。

②定期检查辐射屏蔽和各项辐射安全措施的性能，及有关的安全警示标志是否正常工作，以此来避免发生辐射事故。

③实验核医学区域拟在配备事故应急处理设备，包括：脱脂棉、长柄镊子、棉纱绷带、密封袋、一次性橡胶手套、一次性抹布等。

本项目辐射事故减缓及预防措施汇总见下表。

表 11-15 辐射事故减缓及预防措施汇总表

事故（事件）描述	减缓措施	预防措施
人员误入射线装置机房、联锁故障、人员误操	①立即停止出束； ②启动辐射事故应急预案； ③划出警戒线，疏散非事故处理人员； ④进行现场辐射环境监测； ⑤对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施	①加大分区管理和巡察力度； ②定期对安全联锁的有效性进行检查； ③加强工作人员的技能培训与考核； ④严格按照安全操作规程进行操作。
放射性药物洒漏	①立即停止操作； ②迅速清洁受污染人员的皮肤； ③启动辐射事故应急预案； ④进行现场辐射环境监测； ⑤对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施	①加强药品及使用工具质量管理力度； ②加强工作人员的技能培训与考核； ③严格按照安全操作规程进行操作； ④辐射工作人员采用专用的防

		护器材、长柄工具，利用防护材料进行去污。
放射性药物被盗、丢失和给药后小动物走失	①启动辐射事故应急预案； ②使用辐射监测仪器寻找被盗丢失的放射性药物或给药后的小动物	①加强放射性药品和给药后小动物的管理； ②加强工作人员的技能培训与考核； ③严格按照安全操作规程进行操作； ④加强辐射工作场所安全巡视。

11.3.3 实验核医学场所辐射事故应急措施

(1) 放射性核素分装和使用

①发生放射性核素撒漏等事故后，工作人员需穿上铅衣，戴上铅手套，口罩，迅速将未渗出的液体连同防护罐放置到铅防护废物桶，使用长柄镊子夹取吸水纸或棉花收集撒漏的放射性液体，然后放入铅防护废物桶内进行安全存贮（包括被污染的容器碎片）。

②当排风系统出现故障，压差由负值变为零时，需立即停止操作，人员撤离，并保持分装室房间的持续排风，紧急联系厂房维护保养单位进行排风设备检修更换。

(2) 放射性污染控制

当实验核医学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确认引起放射性污染事件的发生及当事人。

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，并采取下列相应的放射性污染处理方法进行去污处理：

a.手、脚等人体部位的污染：在实验操作中不能直接用手接触放射性物品，手（皮肤）等一旦被放射性物质污染，应尽快清除，清洗液可用肥皂、EDTA 或 1%的柠檬酸反复清洗。

b.衣、裤、工作服装的去污：可根据污染的性质、程度进行放置或清洁。清洗剂可用 1%的盐酸。

c.仪器和器械的去污：先用水反复冲洗，如不能除去可将污染小部件浸于 3%盐酸或 1%的柠檬酸一小时后用水冲洗，然后再浸入重铬酸钾溶液中 15 分钟，最后用清水清洗。

d.工作室表面去污：如遇到少量放射性液体溅在工作台面等地方，应立即用吸水材料将其吸干，再用湿布、洗涤剂由外向里反复擦洗，直到污染降低至规定控制水平。

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。

(3) 放射性核素或放射源被盗、丢失事件的处理

①确认放射性核素、放射源被偷盗、丢失事件的发生。

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

③及时向生态环境主管部门、公安、卫生健康主管部门报告，在 2 小时内填写《辐射事故初始报告单》；协助公安、生态环境和卫生主管部门对丢失显像剂（或放射源）进行侦查和追缴，力争在最短时间内将放射性物品找回。

④事故处理后应收集资料，及时总结报告。医科院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；为防止类似事件再次发生所采取的措施。

(4) 射线装置意外出束情况的处理

发生射线装置意外出束的情况，辐射工作人员应立即按下设备急停按钮，或者切断设备电源，停止设备出束。

11.3.4 应急预案的启动

(1) 一旦发生辐射事故，立即启动辐射事故处理应急预案。发生辐射事故时，当事人应即刻切断辐射源，并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) 各类应急救助物资应准备充分、调配及时。

(4) 发生事故后应在 2 小时内上报生态环境主管部门、卫生、公安等相关部门，减少和控制事故的危害影响，并接受和配合监督部门的处理。

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

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条第一款：使用I类、II类、III类放射源，使用I类、II类射线装置的，应当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；其他辐射工作单位应当有 1 名具有大专以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作。

根据相关管理要求，医科院已成立辐射安全与环境保护管理机构——辐射安全管理小组，并根据人事变动情况及时更新人员组成，最新成立文件见附件 5，机构组成如下：

组 长：胡晓军

副组长：辛胜昌

成 员：黄健、李美静、王晓波

领导小组主要职责是严格遵守和执行本单位辐射防护管理制度，领导并共同做好辐射防护各项工作。

12.2 辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，使用放射性同位素和射线装置的单位应有健全的操作规程、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、监测方案等；有完善的辐射事故应急措施。

为了加强对医科院辐射工作的管理，有效预防辐射事故，建设单位针对核技术利用建设项目制定了辐射安全管理规章制度（见附件 5~附件 6），包括：《操作规程》《辐射工作人员岗位职责》《辐射防护和安全保卫制度》《设备检修维护制度》《辐射工作人员培训计划》《辐射监测制度》和《辐射事故应急预案》等。

针对本项目，建设单位补充制定了《实验核医学场所辐射防护制度》，并将在设备型号确定后进一步细化和补充设备操作规程，针对实验核医学场所特点完善《辐射事故应急预案》，将本项目的相关内容纳入原有管理制度体系中。只要在日常工作中严格落实，能够满足核技术利用项目的管理需求。

12.3 辐射工作人员管理

(1) 人员培训

根据生态环境部《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》（2019年，第57号）的相关要求，自2020年1月1日起，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台报名并参加相应类别的考核。

根据生态环境部《关于进一步优化辐射安全考核的公告》（生态环境部公告2021年第9号）的相关要求，仅从事Ⅲ类射线装置使用活动的辐射工作人员无需参加集中考核，由核技术利用单位自行组织考核。已参加集中考核并取得成绩报告单的，原成绩报告单继续有效。自行考核结果有效期五年，有效期届满的，应当由核技术利用单位组织再培训和考核。

本项目辐射工作人员均应通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台报名并参加相应类别的考核，考核合格后方可上岗。在项目运行过程中按要求定期组织辐射工作人员进行再培训和考核，确保所有辐射工作人员培训考核合格后上岗。

（2）人员管理措施

为确保人员安全，医科院已在辐射安全管理制度中规定，凡申请使用或借用同位素实验室进行实验的人员，应同时满足以下四个条件：

1、申请人必须在进入实验室前取得国家核技术利用辐射安全与防护培训平台的辐射安全与防护考核成绩单；

2、申请人持所取得的专业证书，向实验室辐射安全与防护管理领导小组提交申请；

3、申请人须参加辐射安全实验室准入考试，并成绩合格；

4、申请人具有独立进行辐射实验操作的能力。符合条件并获批准者，方可进入同位素实验室。

12.4 年度评估情况

本次评价的核技术利用项目正式运行后，建设单位将会把本项目相关监测内容纳入原有核技术利用项目监测体系中，每年委托有相关监测资质的单位对辐射工作场所进行监测，对本单位核技术利用项目的安全防护状况进行评估，同时按要求每年编制辐射安全与防护状况年度评估报告，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。

12.5 辐射监测

根据《中华人民共和国放射性污染防治法》及《放射性同位素与射线装置安全和

防护条例》要求，医科院须对使用射线装置、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。

12.5.1 环保措施竣工验收

根据《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评[2017]4号），建设单位是建设项目环境保护验收的责任主体，本项目竣工后，建设单位应按照《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》和《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）规定的程序和标准，组织对配套建设的环境保护设施进行验收。验收的工作程序主要包括：验收自查、验收监测工作和后续工作。

建设单位应先进行验收自查，包括环保手续履行情况、项目情况以及辐射安全与防护设施建设情况。通过全面自查，发现环境保护审批手续不全的、发生重大变动且未重新报批环境影响报告书（表）或环境影响报告书（表）未经批准的、未按照环境影响报告书（表）及其审批部门审批决定要求建成辐射安全与防护设施、落实辐射安全与防护措施，应办理相关手续或整改完成后再继续开展验收工作。

验收监测工作可分为验收监测、验收监测报告编制两个阶段。建设单位应如实查验、监测、记载建设项目环境保护设施的建设和调试情况，并且编制验收监测（调查）报告。建设单位不具备编制验收监测（调查）报告能力的，可以委托有能力的技术机构编制。

后续工作包括提出验收意见、编制“其他需要说明的事项”、形成验收报告、公开相关信息并建立档案四个阶段。验收监测（调查）报告编制完成后，建设单位应当根据验收监测（调查）报告结论，逐一检查是否存在验收不合格的情形，提出验收意见。存在问题的，建设单位应当进行整改，整改完成后方可提出验收意见。为提高验收的有效性，在提出验收意见的过程中，建设单位可以组织成立验收工作组，采取现场检查、资料查阅、召开验收会议等方式，协助开展验收工作。验收工作组可以由设计单位、施工单位、环境影响报告书（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组成，代表范围和人数自定。环保设施的验收期限一般不超过3个月。验收报告应通过全国建设项目竣工环境保护验收信息系统平台向社会公开，并形成验收档案。

本项目污染防治措施“三同时”验收一览表见下表。

表 12-1 污染防治措施“三同时”验收一览表

项目	设施（措施）	验收要求
屏蔽措施	辐射工作场所墙体采用实心砖加硫酸钡水泥，各防护门均采用铅防护门，观察窗采用铅玻璃进行辐射防护，具体防护参数见表 10-2。	周围剂量当量率满足《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）及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函（2023）20 号）中相关规定；根据监测结果计算辐射工作人员和公众年有效剂量满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中对职业人员和公众受照剂量限值要求以及本项目的剂量约束值要求。
通风系统	机房内设置动力通风装置。	2 间机房均应设置动力通风装置，并保持良好的通风，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）要求。
安全措施	2 间射线装置机房的防护门均张贴电离辐射警告标志，设置工作状态指示灯，门灯能有效联动；实验核医学工作场所进出口设置卫生通过间，包括更衣、淋浴去污等必要功能，具体设置见表 10-6 和表 10-7。	按要求落实。
人员配备	辐射安全管理人员和辐射工作人员参加辐射安全与防护培训，考核合格后上岗。同时本项目新聘工作人员需考试合格后上岗。	本项目所有辐射工作人员拟参加辐射安全与防护培训并取得合格证书。
	辐射工作人员定期进行健康检查，医院建立个人职业健康监护档案。	本项目所有辐射工作人员需按时体检，两次体检的时间间隔不应超过两年。
	辐射工作人员在上岗前佩戴个人剂量计，并定期送检，加强个人剂量监测，建立个人剂量档案。	按要求佩戴/送检，医院建立个人剂量档案。
监测仪器及个人防护用品	配备便携式辐射监测仪 1 台，β 表面污染监测仪 4 台。为工作人员配备铅围裙、铅颈套、铅眼镜、铅帽等个人防护用品，详见表 10-5。	监测仪器按要求送检，并确保运行正常。个人防护用品按要求配置。
管理措施	管理机构	建立辐射安全防护管理领导小组，并以文件形式下发。
	管理制度	按照项目的实际情况更新操作规程、辐射事故应急预案等规章制度。操作规程和辐射应急预案等工作制度在控制室合适位置张贴上墙。
<p>12.5.2 辐射工作人员个人剂量监测</p> <p>建设单位已要求从事辐射工作的工作人员均佩戴个人剂量计上岗，并定期送相应资质单位检测。根据建设单位提供的个人剂量报告，辐射工作人员职业照射年有效剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的辐射工作人员职业照射剂量限值的相关要求，也满足职业照射剂量约束值不超过 5mSv/a 的要</p>		

求。

本项目将为全部辐射工作人员配备个人剂量计，并规定其必须佩戴个人剂量计上岗。按照 GBZ128-2019 中个人剂量计佩戴的相关要求，建议实验核医学工作场所放射性药物分装和注射人员佩戴双剂量计，1 枚佩戴于铅围裙外锁骨对应的领口位置，1 枚佩戴于铅围裙内躯干上，有条件的情况下宜佩戴腕部剂量计或指环剂量计，其他辐射工作人员在左胸前或锁骨对应的领口位置佩戴 1 枚个人剂量计。同时建设单位将组织所有辐射工作人员加强相关辐射安全与防护方面的学习，加强辐射工作人员的安全意识，保证所有辐射工作人员均能够严格执行个人剂量监测的相关规定和方法，正确使用个人剂量计。定期（最长不得超过 3 个月）送检，建立个人剂量监测档案。个人剂量档案应当包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。个人剂量监测档案应终生保存，辐射工作人员可查看和复制本人个人剂量监测档案。

12.5.3 辐射工作场所监测

(1) 委托监测

委托有资质单位定期对核技术利用区域及其周围环境进行辐射环境监测，并建立监测技术档案，以确保辐射工作人员和公众的辐射安全。

X- γ 周围剂量当量率、 β 表面污染水平、放射性废液相关核素活度浓度^①

a.监测频率：每年常规监测一次。

b.监测范围：实验核医学场所工作区域及其周围环境。

c.监测项目：X- γ 周围剂量当量率、 β 表面污染水平、放射性废液相关核素活度浓度^①。

d.监测记录应清晰、准确、完整并纳入档案进行保存。

注：①只关注可能对环境有影响的应用核素，监测应有针对性，如应用核素难以分析，可用总放替代。

(2) 医科院自行监测

设施正常运行后，医科院定期或有必要时对工作场所周围进行自测，并建立监测技术档案。实验核医学工作场所每次操作完成后均应检测放射性污染情况，如存在污染则应及时清除。监测范围及监测项目同委托监测

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》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，可以委托有相应资质和监测能力的环境监测机构进行监测。

12.5.4 本项目配备监测仪器

本项目拟新增便携式 X- γ 辐射监测仪、个人剂量报警仪、活度、 β 表面污染仪及固定式剂量率仪等监测仪器，见表 12-2。

表 12-2 本项目拟配备的监测仪器一览表

项目	监测仪器名称	数量	功能	使用位置
实验核医学	β 表面污染仪	2 台	检测表面沾污	在进出实验核医学场所的缓冲区、实验核医学工作场所的控制区和监督区
	活度计	1 台	放射性药物活度测量	正电子药物分装手套箱
	便携式 X- γ 辐射监测仪	1 台	实验核医学工作场所周围剂量当量率水平自行监测	实验核医学工作场所
	固定式剂量率仪	1 台 (多通道)	实验核医学工作场所周围剂量当量率水平实时监测	实验核医学工作场所出入口
个人剂量计	本项目辐射工作人员均需配置	个人剂量监测	实验核医学工作场所药品分装与注射的工作人员，在左胸前或锁骨对应的领口位置和铅围裙外锁骨对应的领口位置各佩戴 1 枚； 其他辐射工作人员佩戴 1 枚，在左胸前或锁骨对应的领口位置佩戴	

注：使用 H^3 的工作场所使用的 β 表面污染仪的能量响应下限应低于 5keV。

上述监测设备配置计划基本能够满足运行时的监测需求，建设单位应积极落实设备型号，保证在项目运行前将各类监测设备配置到位，并根据项目投运后的实际需求和便利情况进行增配。

12.5.5 辐射监测方案

本报告从监测类别、项目、频次、范围、剂量控制水平以及超过控制水平时应采取的处理方案等方面给出措施，具体监测计划见表 12-3。

表 12-3 辐射监测计划表

辐射工作场所	监测类别	监测项目	监测频次	监测设备	监测布点	控制水平	超过控制水平后处理方案		
实验核医学工作场所	年度监测	周围剂量当量率	1 次/年	便携式 X- γ 辐射监测仪 (需按国家规定进行检定)	控制区外：控制区四面墙体外、控制区顶棚上方、各机房防护门缝隙和中央、控制室操作位、控制室观察窗外、管线洞口处及周围需要关注的监督区； 控制区内：手套箱、通风橱外表面、废物衰变箱外表面、注射位，控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处。同时覆盖非密封放射性物质工作场所周围环境及敏感点	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； 放射性核素合成和分装的箱体、通风橱等屏蔽结构外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5 μ Sv/h，放射性核素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 μ Sv/h	及时查找原因，进行整改直至监测符合要求		
	验收监测		竣工验收时监测 1 次						
	自主监测		不少于 1 次/月	便携式 X- γ 辐射监测仪					
	年度监测	β 表面污染水平	1 次/年	β 表面污染监测仪		工作场所（工作台、设备、墙壁、地面），涉及非密封放射性物质操作的区域，以及操作人员的工作服、手套、工作鞋等		参考工作场所的放射性表面沾污控制水平	进行擦拭、清洗等方法直至符合标准
	自行监测		每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）						
	验收监测		竣工验收时监测 1 次						

辐射工作场所	监测类别	监测项目	监测频次	监测设备	监测布点	控制水平	超过控制水平后处理方案
	废液监测	总 β	衰变池废液暂存时间满足超过 42 天，每次排放前应委托有资质单位进行一次排放前的监测。	/	衰变池取样口	制定排放记录台账，登记每格池子封存的起始日期，封存时间满足 42 天，监测结果经监管部门认可后排入园区污水处理站。放射性废液总排放口总 β 不大于 10Bq/L	/
	固废监测	周围剂量当量率， β 表面污染	每次处置前	便携式 X- γ 辐射监测仪、 β 表面污染监测仪	固废收集袋外表面	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、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，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	将放射性废物转移至废物暂存间继续衰变，直至符合解控水平
	废气监测	相关核素的活度浓度 ^①	1 次/年		实验核医学工作场所废气排放口	排放废气中所含相关核素活度浓度 ^① 不大于公众核素导出浓度限值	及时查找原因，进行整改直至监测符合要求
个人剂量检测	个人剂量当量	1 次/不超过 3 个月	个人剂量计	所有辐射工作人员	不超过 5mSv/a	调查原因，及时整改，规范管理	
注：①只关注可能对环境有影响的应用核素，监测应有针对性，如应用核素难以分析，可用总放替代。							

12.6 辐射事故应急

为了避免避免辐射事故，在发生辐射事故后能做出快速反应、减少危害程度、保护辐射工作人员和公众人员的身心健康，建设单位制定了《辐射事故应急处理预案》（见附件 6），该《预案》包括：辐射事故应急处理机构与职责、辐射事故等级划分、事故应急处理程序、辐射事故的调查和报告等，具有一定的可操作性，保证在发生辐射事故时，做到责任和分工明确，能够迅速、有序处理。

医科院成立辐射事故应急处理领导小组，确定了领导小组职责。最新人员组成及职责分工如下：

组 长：胡晓军

副组长：辛胜昌

成 员：黄健、李美静、王晓波

组长/副组长：全面负责小组管理和辐射事故现场指挥工作。

组员：

（1）定期组织对辐射工作场所、设备和人员等辐射防护情况进行自查和检测，发现事件隐患及时上报至应急小组，并由应急小组相关负责人督促落实整改措施；

（2）负责辐射事件应急处理可行性方案的研究制定和组织实施工作；

（3）发生人员超剂量照射事件或者设备出现故障时，立即启动本预案；

（4）事件发生后立即组织有关部门人员进行辐射性事件应急处理；

（5）发生辐射安全事件 2 小时内报告当地生态环境主管部门、公安部门、卫生健康主管部门；

（6）迅速组织超剂量照射人员就医，撤离控制区内相关人员，控制事件的影响，防止事件的扩大蔓延，并及时对故障射线设备进行维护检修，合格后方可使用。

本项目辐射事故应急预案包括了辐射事故应急处理的组织机构组成与职责分工、应急处置程序、事故报告、应急处置措施等基本内容，并且计划每年进行一次培训演习，满足《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关法律法规的基本要求。建设单位原有项目运行过程中未曾发生辐射事故，在本次项目投入使用前，建设单位应根据相关法律法规要求和审批后的环评报告更新辐射事故应急预案内容，将实验核医学场所辐射事故应急的相关内容纳入应急预案后重新发布，并在运行过程中根据实际工作经验、相关标准规范要求 and 更新情况不断完善，确保应急预案的适用性和可操作性。

12.7 环保投资一览表

本项目总投资 4000 万元，主要用于实验室设备购置、辐射防护屏蔽和设施搭建，其中用于环保方面的投资为 300 万元，占项目总投资的 7.5%。本项目环保投资估算详见下表。

表 12-4 本项目环保投资一览表

序号	环保措施	环保投资（万元）
1	辐射防护材料的购买及辐射工作场所的屏蔽防护建设等	200
2	个人防护用品和辅助防护设施的购置	18
3	辐射监测仪器购买和维护	14
4	工作指示灯及警示标志、剂量报警仪等辐射安全设施和措施	10
5	个人剂量监测、场所监测和年度监测	20
6	辐射安全培训、职业健康检查	10
7	事故风险应急投资及应急演练	10
8	环境影响评价及竣工环境保护验收	18
合计		300

表 13 结论与建议

13.1 结论

13.1.1 项目概况

本次核技术利用项目环评为深圳医学科学院与深圳湾实验室永久场地一体化建设（一期）项目所含核技术利用建设项目的辐射环评，建设地点位于深圳市光明区新湖街道光明科学城科教融合集群东北侧片区拟建深圳医学科学院永久院区实验 A 楼一层内。在实验 A 楼一层东北部建设 1 个实验核医学工作场所，分为同位素实验区和动物实验区。

在同位素实验区建设 5 间同位素操作间、3 间样本检测间、2 间高频交叉操作间及配套功能用房，使用 ^{32}P 、 ^{33}P 共 2 种核素；在动物实验区建设 1 间小动物 PET/CT 机房、1 间大动物 PET/CT 机房、1 间大动物 PET/MR 机房及储源间、注射间、放射性动物尸体暂存间及配套功能用房，在小动物 PET/CT 机房安装使用 1 台小动物 PET/CT（最大管电压 100kV，最大管电流 0.2mA，属 III 类射线装置），在大动物 PET/CT 机房安装使用一台大动物 PET/CT（最大管电压 140kV，最大管电流 420mA，属 III 类射线装置），在大动物 PET/MR 机房内安装使用 1 台大动物 PET/MR（非射线装置），使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr 共 5 种核素，每台设备配备 1 枚 ^{68}Ge 校准源（均属 V 类放射源）或使用 ^{18}F 液体源进行校准；在实验 A 楼东南侧建设一套衰变池和应急池，应急池用于同位素实验区应急冲淋产生的放射性废液的暂存处理，衰变池用于动物实验区放射性废液贮存衰变处理。

本次拟建实验核医学工作场所共计使用 7 种核素、2 台 III 类射线装置和 3 枚 V 类放射源，用于开展磷屏成像检测实验和动物影像实验等分析实验工作，经核算，实验核医学工作场所为 1 个丙级非密封放射性物质工作场所。

13.1.2 辐射安全与防护分析结论

13.1.2.1 辐射防护结论

本项目实验核医学场所的屏蔽防护设计、室内表面及装备结构设计均满足《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）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）的相关要求，实验核医学场所大小动物 PET/CT 机房屏蔽防护设计方案均能满足《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T586-2025）等标准的相关要求；本项目各辐射工作场所拟采取的

屏蔽措施均能够满足辐射防护的要求，控制区和监督区划分合理，并符合机房的辐射屏蔽规范。

13.1.2.2 放射性三废的治理和控制结论

(1) 放射性固体废物

本项目实验核医学场所废气排放系统产生的活性炭以及实验核医学场所产生的其他受放射性污染的物品作为放射性固体废物，在放射性废物暂存间存储，放射性固体废物暂存一定时间，经监测满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）要求后，作为实验废物处理，不会对周围环境产生污染。

废旧校准源由放射源供应单位回收或送交广东省城市放射性废物库处置，不会在建设单位存储，因此不会对周围环境产生污染。

(2) 放射性废液

拟建实验核医学场所东南侧设置一套 3 格并联槽式衰变池和 1 个应急池，衰变池的设计方案及容积能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）对放射性废液收集、贮存处理和排放的要求，放射性废液暂存时间大于 42 天后，监测结果经审管部门认可后排放。放射性废液总排放口总 β 不大于 10Bq/L。同位素实验区的放射性废液使用有机玻璃废液桶分别收集暂存时间大于 254 天，经监测满足审管部门要求后按实验室废物委托有资质单位处理。

(3) 放射性废气

实验核医学场所产生的放射性废气采取独立的排放管道引至楼顶，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；操作放射性核素所用的手套箱、通风橱设置有单独的排风系统，并在手套箱的顶壁安装过滤装置；排气管出口高度高于所在建筑物屋顶，在排放前设有活性炭过滤装置。

13.1.3 辐射环境影响分析结论

根据核技术利用项目运行期对周边环境及人员的辐射影响分析可知，在正常情况下，辐射工作场所周围辐射剂量率水平满足相关标准的要求，在运行过程中对周围环境中的工作人员和公众的辐射影响能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的限值要求，同时满足本项目的剂量约束值要求：职业照射的剂量约束值不超过 5mSv/a，公众照射剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

13.1.4 辐射安全管理结论

管理机构：成立辐射安全与防护领导小组、辐射事故应急处理工作领导小组，明

确各成员的职责，并将加强监督管理。

管理制度：医科院已制定了包括《辐射事故应急预案》在内的一系列管理制度。医科院应根据本单位核技术利用项目开展的情况，不断对各项管理制度进行调整、补充和完善，并在以后的实际工作中落实执行。

人员培训和剂量监测：项目开展前实验核医学场所新增辐射工作人员应在国家核技术利用辐射安全与防护培训平台参加培训并考核合格后方可上岗。辐射工作人员将按要求佩戴个人剂量计上岗，个人剂量计不超过3个月送检1次。

综上所述，医科院管理机构、规章制度及辐射工作人员的管理满足相关辐射防护标准的要求和本单位核技术利用建设项目开展的需求。

13.1.5 可行性分析结论

(1) 代价利益分析

本项目的建设目的是为开展科研实验和大小动物显像检查研究，在揭示生命物质在体内和细胞内的代谢研究，对探索生命和健康具有十分重要的科研价值。实践过程中采取了符合标准要求的安全防护措施，在实验动物得到诊疗预期效果的同时，对周围环境、工作人员、公众的辐射影响满足国家辐射防护安全标准的要求，项目的建设和社会经济效益远大于建设项目的投入，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”的要求。

(2) 产业政策符合性

本项目利用放射性同位素开展科学研究，属于《产业结构调整指导目录（2024年本）》中“六、核能 4. 核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”，为鼓励类产业，因此项目符合国家产业政策

综上所述，深圳医学科学院核技术利用扩建项目在落实本报告提出的各项污染防治、辐射安全防护措施和辐射安全管理制度后，运营期对周围环境产生的辐射影响符合环境保护的要求，对辐射工作人员及周围公众造成的影响满足国家辐射防护标准的要求。因此，从辐射安全和环境保护角度分析，该项目的建设是可行的。

13.2 建议和承诺

(1) 建议

加强核与辐射安全知识宣传，不断提高遵守法律的自觉性和安全文化素养、辐射防护意识，切实做好辐射安全管理工作。

(2) 承诺

(1) 严格落实辐射工作场所各项辐射防护措施，并严格执行已制定的各项辐射安全管理制度；

(2) 定期检查门锁控制系统、语音系统、门灯联锁、电离辐射警告标志等，发现问题及时解决，杜绝在没有启动安全防护措施的情况下开展诊断工作，以防止辐射事故发生；

(3) 尽快落实辐射工作人员和辐射监测设备，在项目投运前配置到位；

(4) 严格按本次核技术利用项目设计内容进行建设，若发生重大变动应按法律法规要求向有关生态环境主管部门进行申报，办理相关手续，并采取相应的污染治理措施，主动接受生态环境主管部门的监督管理。项目建成后，按要求及时组织竣工环境保护验收工作。

表 14 审批

下一级环保部门预审意见:

经办人:

公 章

年 月 日

审批意见:

经办人:

公 章

年 月 日
