

核技术利用建设项目

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医
学科改造核技术利用建设项目

环境影响报告表

西安交通大学第一附属医院榆林医院

二〇二五年十二月

环境保护部监制

环境保护部监制

核技术利用建设项目

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医
学科改造核技术利用建设项目

环境影响报告表

建设单位名称：西安交通大学第一附属医院榆林医院

建设单位法人代表：（签字或盖章）

余军军

通讯地址：陕西省榆林市榆阳区康安路、榆阳西路

邮政编码：719000

联系人：霍佳元

电子邮箱：442735400@qq.com

联系电话：19929605383

编制单位和编制人员情况表

项目编号	1u3081		
建设项目名称	西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科改造核技术利用建设项目		
建设项目类别	55—172核技术利用建设项目		
环境影响评价文件类型	报告表		
一、建设单位情况			
单位名称（盖章）	西安交通大学第一附属医院榆林医院		
统一社会信用代码	12610800436675623E		
法定代表人（签章）	余军军		
主要负责人（签字）	郝江锋		
直接负责的主管人员（签字）	霍佳元		
二、编制单位情况			
单位名称（盖章）	核工业二〇三研究所		
统一社会信用代码	12100000435630837Y		
三、编制人员情况			
1. 编制主持人			
姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
边敏娟	201805035610000016	BH 006977	边敏娟
2. 主要编制人员			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
刘宸	项目工程分析及源项、辐射安全与防护、环境影响分析、辐射安全管理、结论与建议	BH 012465	刘宸
边敏娟	项目基本情况、项目内容、评价依据、保护目标及评价标准、环境质量和辐射现状	BH 006977	边敏娟

中华人民共和国
事业单位法人证书

(副本)

统一社会信用代码 12100000435630837Y



有效期自 2024 年 08 月 16 日至 2029 年 08 月 15 日

名称 核工业二〇三研究所

和
唱
宗

國
規
範
業

住所 陕西省西咸新区沣东新城科源三路869号

法定代表人 王乐力

经费来源

开办资金 ¥15000万元

举办单位 中国核工业集团有限公司

登记机关



国家事业单位登记管理局监制



环境影响评价工程师

Environmental Impact Assessment Engineer

本证书由中华人民共和国人力资源
和社会保障部、生态环境部批准颁发，
表明持证人通过国家统一组织的考试，
具有环境影响评价工程师的职业水平和
能力。



中华人民共和国
人力资源和社会保障部



中华人民共和国
生态环境部



姓 名： 边敏娟

证件号码： 610481198512305845

性 别： 女

出生年月： 1985年12月

批准日期： 2018年05月20日

管 理 号： 201805035610000016



机关事业单位职工基本养老保险参保缴费证明

单位编号：321253 单位名称：核工业二0三研究所 个人编号：4002564535 金额单位：元（保留到分）

社会保障号码	610481198512305845		姓名	边敏娟	性别	女	参加工作时间	20130705	个人账户累 计存储额	200,662.99
年份	缴费开始年月	缴费终止年月	缴费月数	单位名称					当年记账金额	
2025	202501	202511	11	核工业二0三研究所					2,540.10	
2025	202501	202502	2	转入					3,647.20	
2024	202401	202412	12	核工业二0三研究所					2,543.56	
2024	202401	202412	12	转入					4,458.44	
2023	202301	202312	12	核工业二0三研究所					20,242.76	
2023	202301	202312	12	转入					4,146.24	
2022	202201	202212	12	核工业二0三研究所					15,330.36	
2021	202101	202112	12	核工业二0三研究所					14,720.28	
2020	202001	202012	12	核工业二0三研究所					14,961.73	
2019	201901	201912	12	核工业二0三研究所					11,909.04	
2018	201801	201812	12	核工业二0三研究所					7,832.34	
2017	201701	201712	12	核工业二0三研究所					12,598.02	
2016	201601	201612	12	核工业二0三研究所					10,357.38	
2015	201501	201512	12	核工业二0三研究所					7,900.68	

社会保险经办机构名称：陕西省机关事业单位社会保险基金管理中心

社会保险经办机构（章）

经办时间：2025年12月03日

目 录

表 1	项目基本情况	1
1.1	核技术应用目的	1
1.2	现有核技术利用项目情况	19
表 2	放射源	24
表 3	非密封放射性物质	24
表 4	射线装置	25
表 5	废弃物（重点是放射性废弃物）	26
表 6	评价依据	27
表 7	保护目标与评价标准	29
7.1	评价范围	29
7.2	环境保护目标	30
7.3	评价标准	31
表 8	环境质量和辐射现状	37
8.1	项目辐射环境质量现状	37
8.2	环境质量现状评价	41
表 9	项目工程分析与源项	44
9.1	^{99m}Tc 放射性核素制备	44
9.2	SPECT 与 PET/CT 显像检查	48
9.3	核医学科源项分析	54
表 10	辐射安全与防护	57
10.1	核医学科辐射工作场所布局	57
10.2	核医学科辐射屏蔽设计	63
10.3	辐射防护与安全措施	65
10.4	三废的治理措施	71
表 11	环境影响分析	81
11.1	建设阶段环境影响分析	81
11.2	运行阶段辐射环境影响分析	83
11.3	事故环境影响分析	106
11.4	辐射环境影响评价	109
表 12	辐射安全管理	110
12.1	辐射安全与环境保护管理机构的设置	110
12.2	辐射安全管理规章制度	112
12.3	辐射监测计划	114
12.4	辐射事故应急	118
12.5	环保投资和环保验收	120
表 13	结论与建议	124

13.1 结论 124

13.2 建议与要求 127

表 14 审批 128

附件

- 附件 1：委托书
- 附件 2：西安交通大学第一附属医院榆林医院现有核技术利用项目环评批复
- 附件 3：西安交通大学第一附属医院榆林医院现有核技术利用项目环评批复竣工环境保护验收材料
- 附件 4：西安交通大学第一附属医院榆林医院辐射安全许可证
- 附件 5：西安交通大学第一附属医院榆林医院辐射防护管理机构设立文件
- 附件 6：西安交通大学第一附属医院榆林医院辐射工作人员培训情况
- 附件 7：西安交通大学第一附属医院榆林医院辐射工作人员职业健康体检结果
- 附件 8：西安交通大学第一附属医院榆林医院个人剂量检测结果
- 附件 9：西安交通大学第一附属医院榆林医院 2024 年度辐射监测报告
- 附件 10：医院现有检测仪器检定校准证书
- 附件 11：医院辐射事故应急预案备案表
- 附件 12：本项目医院核医学科辐射环境现状监测报告
- 附件 13：医院承诺书

表 1 项目基本情况

建设项目名称		西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科改造核技术利用建设项目			
建设单位		西安交通大学第一附属医院榆林医院			
法人代表		余军军	联系人		联系电话
注册地址		陕西省榆林市榆阳区康安路、榆阳西路			
项目建设地点		陕西省榆林市文化南路与康安路十字西安交通大学第一附属医院榆林医院病房综合楼负一层核医学科			
立项审批部门		/		批准文号	/
建设项目总投资（万元）		3000	项目环保投资（万元）	82	投资比例（环保投资/总投资）
项目性质		<input type="checkbox"/> 新建 <input checked="" type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其他			占地面积（m ² ） 约 900m 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 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 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 checked="" type="checkbox"/> 乙 <input 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 核技术应用目的 1.1.1 项目背景 1.1.1.1 医院简介 <p>西安交通大学第一附属医院榆林医院（曾用名：榆林市第二医院）是集医疗、科研、教学、预防、保健于一体的三级甲等医院。医院始建于1931年，是陕西省建院时间最早的公立医院之一，现为第五批国家区域医疗中心建设单位。医院现有建筑面积17.5万m²，编制床位1450张，在职职工2300多人，拥有万元以上医疗设备2889台（件）。国家区域医疗中心项目规划用地分两期建设，一期12.7万m²，建500张床位，二期约12万m²，建500张床位。医院设有临床科室50个，医技科室11个，共有国家临床重点</p>				

专科1个（骨科），省级临床重点专科10个（胃肠外科、消化、肾病科、泌尿、重症、神经外科、血液内科、影像、超声医学科、临床药学）。

2023年，榆林市政府与西安交通大学第一附属医院达成战略合作协议，以西安交通大学第一附属医院（以下简称西交大一附院）为输出医院、榆林市第二医院为依托医院共建国家区域医疗中心，按照“一次规划、分步建设、整体接管、分院模式”原则，在“4+2+N”基础上强化学科群与支撑平台建设，着力构建“四中心二平台”（心脏中心、肿瘤中心、肾病中心、骨病中心，手术平台、诊断平台），提升疑难危重症诊治能力，努力建成国内一流国家区域医疗中心。

1.1.1.2 目的和任务由来

为提高榆林市人民的诊疗需求和医院自身的发展需要，西安交通大学第一附属医院榆林医院计划在现有的核医学科 SPECT 显像检查工作（使用 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物）基础上增加 PET/CT 显像诊断业务，配置 1 台 PET/CT 机，使用 ^{18}F 药物进行 PET/CT 显像诊断。近些年，由于核医学科相关标准已进行了更新，医院现有的核医学科部分工作场所设计和平面布局已不能满足现行标准的要求，因此本项目医院拟按照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）等标准对现有的核医学科部分工作场所进行改造，使其符合现有的国家标准规定并满足本项目的使用需求。医院现有的核医学科工作场所已进行过环境影响评价工作并取得环评批复，已投运的工作场所已通过竣工环境保护验收工作，本项目的性质为改建。

根据原环境保护部和国家卫生和计划生育委员会《关于发布<射线装置分类>的公告》（原国家环境保护总局公告 2017 年第 66 号）相关规定，PET-CT 中 CT 部分为Ⅲ类射线装置。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中附录 C 非密封源工作场所的分级，本项目核医学科属于乙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）》（以下简称名录）中“五十五、核与辐射 172、核技术利用建设项目”中“.....使用Ⅱ类、Ⅲ类放射源的；生产、使用Ⅱ类射线装置的；乙、丙级非密封放射性物质工作场所（医疗机构使用植入治疗用放射性粒子源的除外）.....”应编制环境影响报告表；“.....生产、销售、使用Ⅲ类射线装置的”，应填报环境影响登记表。按照建设内容涉及名录中两个及以上项目类别的建设项目，其环境影响评价类别按照其中单项等级最高的确定要求，本项

目应编制环境影响报告表。

医院委托核工业二〇三研究所（环评单位）承担本项目的环境影响评价工作。接受委托后，环评单位组织技术人员进行现场勘察，收集、整理有关资料，对项目情况进行了初步分析，并根据建设项目的应用类型及所在地周围区域的环境特征，在现场踏勘、资料收集、预测分析的基础上，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）的基本要求，根据《中华人民共和国环境影响评价法》和《建设项目环境保护管理条例》等相关规定，编制了本项目环境影响报告表。

1.1.1.3 医院现有核医学科工作内容与规模

（1）现有核医学科环评情况

2010 年，医院计划在病房综合楼负一层建设核医学科，在核医学科内建设 1 座质子回旋加速器机房及其配套用房，使用 1 台 11MeV 质子回旋加速器用来制备 ^{18}F 药物；建设 1 间 PET/CT 显像诊断机房及配套区域，使用 1 台 PET/CT 机（配备 3 枚 ^{68}Ge 放射源）开展 PET/CT 显像诊断；建设 1 间 SPECT 机房及配套区域，使用 1 台 SPECT 机和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物（医院采购 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物）开展 SPECT 显像检查；使用 ^{125}I 药物进行放免分析，使用 ^{131}I 药物进行吸碘率测定、甲亢治疗；使用 ^{90}Sr 和 ^{32}P 敷贴器进行敷贴治疗。医院委托陕西椿源辐射咨询服务有限公司编制了《榆林第二医院核技术应用项目辐射影响报告表》，并于 2011 年 1 月 30 日取得原陕西省环境保护厅核发的环评批复（陕环批复〔2011〕13 号）。

（2）辐射安全许可证许可情况

2018 年 2 月，医院重新申请了辐射安全许可证（陕环辐证[60008]），其中许可的乙级非密封放射性物质工作场所为病房综合楼核医学科（乙级工作场所），许可使用的核素有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （ ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 显像诊断）和 ^{131}I （吸碘率测定），许可使用的核素用量分别为： $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 日等效最大操作量 $1.85\times 10^{18}\text{Bq}$ 、年最大用量为 $4.625\times 10^{12}\text{Bq}$ ， ^{131}I 日等效最大操作量 $3.7\times 10^6\text{Bq}$ 、年最大用量为 $1.39\times 10^{11}\text{Bq}$ ；2018 年~2024 年期间，因医院基本信息及辐射工作内容发生变化，医院曾多次重新申请或变更并取得辐射安全许可证，2024 年 7 月医院重新申请了辐射安全许可证并持有至今，在此期间核医学科的许可的核素种类、范围、日等效最大操作量、年最大用量未发生变化。

(3) 项目的实际建设和竣工验收情况

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科所在的病房综合楼于 2015 年建成；病房综合楼建成后，由于医院整体规划的调整，未开展核医学科装饰装修、设备安装等工作；2018 年，医院决定开展 ^{99m}Tc 显像诊断和 ^{131}I 吸碘率测定检查业务，开展核医学科进行装饰装修工作，购置 1 台 SPECT 设备，同年 7 月取得原陕西省环境保护厅核发辐射安全许可证；核发辐射安全许可证后，因医院核医学科人事调整，一直到 2023 年，医院未开展 ^{99m}Tc 显像诊断 ^{131}I 吸碘率测定检查业务；2024 年医院核医学科购买了 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗 ^{99m}Tc ，调试 SPECT 设备，使用 ^{99m}Tc 进行显像诊断；该项目于 2025 年 7 月通过了医院组织的竣工环境保护验收。随后医院核医学科正式运行并接诊患者。目前医院核医学科现有工作场所的使用情况为：使用 ^{99m}Tc 药物（采购 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗制备 ^{99m}Tc ）进行 SPECT 显像检查工作，其余核素的诊断治疗活动均未开展，拟建设的质子回旋加速器后期不再开展，已建设但未投入使用的 ^{131}I 治疗工作场所及病房后续均空置并不再使用。

核医学科现有放射性核素用量、接诊患者人数情况见下表所示。

表 1-1 本项目核医学科现有工作场所实际放射性核素用量、接诊病人情况一览表

治疗活动	患者每人每次核素用量 Bq	每日最大接诊患者人次	累计接诊患者人次	核素日最大操作量 Bq
^{99m}Tc 显像诊断 (含淋洗、标记、分装 ^{99m}Tc)	9.25×10^8	16	85 次	1.85×10^{10}

(4) 现有核医学科平面布局及辐射安全设施

根据医院提供的图纸及现场踏勘，本项目西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科位于病房综合楼负一层西北侧，患者走廊北侧自东向西依次为护士站、放射性固废间、质控室、注射室、ECT 注射室、PET 候诊室、PET 机房（预留）、ECT 候诊区、ECT 机房、ECT 留观室；医生走廊北侧自东向西依次为药物标记分装室、更衣室、药物缓冲间、回旋加速器机房（空置）、主任医生办公室、示教室、卫生间等功能房间；核医学科东侧为储源间以及 ^{131}I 治疗工作场所（未投入使用且后续也不再使用，目前为空置状态）。医院核医学科顶部为绿化区域，底部为土层。衰变池位于核医学科北侧，其顶部为绿化区域，底部为土层，医院核医学科现状平面布局图见图 1-1 所示。医院核医学科现有放射性排风管道 2 条，其中 ^{99m}Tc 药物标记分装室手套箱单独使用一条，其余各功能房间共用 1 条通风管道；医院核医学科现有放射性废水管道 1 条，主要涉及到产生放射性废水的房间有质控室、注射室、更衣室、去污清洗

池、PET 卫生间、SPECT 注射后卫生间，废水汇集在降解槽后统一由水泵抽取至衰变池进行贮存衰变。医院现有核医学科放射性排风管道以及放射性废水管道布局示意图见图 1-2 和图 1-3 所示。

1.1.1.4 核医学科的改造方案

(1) 核医学科的改造方案

医院拟在现有核医学科 ^{99m}Tc 显像诊断基础上，增加 ^{18}F 显像诊断，依据《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）标准要求，医院现有的核医学科工作场所平面布局、放射性废气、放射性废水的路径、衰变池设计以及部分场所辐射安全防护设施均不符合现阶段的标准要求，主要有： ^{18}F 受检者给药前与给药后存在交叉，PET/CT 显像检查未设置留观室，整个核医学科未设置抢救室；控制区进出口未设置卫生缓冲区；现有的推流式衰变池未设置污泥池；净化空调设置在进入 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器制备区内部，维修维护空调人员需要通过一更、二更区域；注射室分装 ^{18}F 手套箱未设置单独的放射性排风管道。

针对以上问题，本项目医院对核医学科进行了重新设计并进行改造，本次核医学科工作场所改造区域主要包含现 SPECT 显像检查部分区域、 ^{99m}Tc 药物制备区域以及原 PET/CT 机房及配套等区域。本项目的改造内容主要包括：

①将原药物标记分装室区域进行重新调整布局，拆改部分墙体，设置单独人员、药物及原料进出通道，将配套的净化空调设置移至药物制备区外，解决维修维护空调人员需要通过一更、二更区域的问题。

②将 PET/CT 机房南侧的 SPECT 候诊区改为抢救室，将原 SPECT 留观室拆改部分墙体后改造成 SPECT 候诊室，南侧机房改造成洁具间。将原 PET 候诊室 3 改造成 1 间留观室和 1 间 PET 候诊室 3。将原 SPECT 注射室和男卫生间拆改部分墙体后改造成 SPECT 患者注射区和放射性固废间，将原固废间改为废发生器暂存间。

③在原质控室和注射室北侧中间建设 1 间缓冲间，在质控室东北侧建设 1 间药物提升间和 1 间缓冲间。将原回旋加速器机房西侧的控制室、设备间、卫生淋洗间、机房、库房拆改部分墙体后改造成更衣间、去污间及设备间。

④拆除核医学科原放射性气体排风管道和原部分放射性废水管道后重新铺设，优化了路径走向。对核医学科原衰变池进行改造，设置污泥池，池底设搅拌器用来防止污泥淤积，其他池体设计保持不变。

本项目医院核医学科改造前后对比情况见下表所示。

表 1-1 本项目医院核医学科改造前后对比情况一览表

序号	实际建设内容	本项目改造后情况
1	药物标记分装室 1 间，配套建设一更、二更、药物缓冲间、原料制备间和空调设备间；	将原药物标记分装室区域平面布局进行调整并拆改部分墙体，改造后包含：药物制备间、卫生缓冲区、洁净走廊、清洗间、洁具间、一更、二更、成品通道、原料通道及空调机房等功能房间。
2	1 间注射室、1 间质控室；	将质控室和注射室拆改部分墙体后在北侧中间建设 1 间缓冲间，在原质控室东北侧建设 1 间药物提升间和 1 间缓冲间。
3	1 间 SPECT 留观室、1 间机房、1 间 SPECT 候诊区、1 间 SPECT 注射室、1 间男卫、1 间女卫	将 SPECT 候诊区改为抢救室；将原 SPECT 留观室拆改部分墙体后改造成 SPECT 候诊室，南侧机房改造成洁具间；将 SPECT 注射室和女卫拆改部分墙体后改造成 SPECT 患者注射区和放射性固废间，男卫改为卫生间。
4	1 间 PET 候诊室 3	将原 PET 候诊室 3 拆改部分墙体后改造成 1 间留观室和 1 间 PET 候诊室 3。
5	1 间库房、1 间卫生淋洗间、1 间控制室、1 间设备间、1 间机房；	将原回旋加速器机房西侧的控制室、设备间、卫生淋洗间、机房、库房拆改部分墙体后改造成更衣间、去污间及设备间；原回旋加速器机房空置，暂为预留机房。
6	医生走廊、患者走廊	在医生走廊进入 SPECT 机房和 PET/CT 机房入口建设 1 间卫生缓冲间；拆建部分墙体，分别在药物分装注射室及药物制备区域入口建设卫生缓冲区，在患者入口及离开通道建设卫生缓冲区。
7	放射性气体排风管道、放射性废水管道	拆除核医学科原放射性气体排风管道和原放射性废水管道后重新铺设，优化了路径走向。
8	1 座推流式衰变池，包含衰变池和检测池，衰变池共 12 级串联，总有效使用容积约 594 m ³	对原衰变池的池体进行改造，设置 1 格污泥池，池底设搅拌器用来防止污泥淤积，衰变池内原有导流墙。改造后的衰变池由污泥池、衰变池和检测池组成，连续式衰变池共 11 级串联，污泥池+衰变池的总有效使用容积约 594m ³ 。

本项目医院核医学科改造后的平面布局图、放射性排风管道以及放射性废水管道布局示意图分别见图 1-7、图 10-5 和图 10-7 所示。

（2）原核医学科工作场所的清洁解控水平

由于医院原核医学科仅开展了使用 ^{99m}Tc 药物进行 SPECT 显像检查工作，放射性核素 ^{99m}Tc 为短半衰期核素，半衰期为 6.02h，在经过自身时间衰变后，对核医学科工作场所的辐射影响较低。

根据医院提供的材料，医院最后一次购买 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器的时间为 2025 年 7 月 30 日，购买的发生器活度规格为 300mCi，医院最后一次使用 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器淋洗制备 ^{99m}Tc 药物的时间为 2025 年 8 月 1 日，当日就诊患者 8 人，随后从 8 月 2 日开始至今医院核医学科停诊。据统计，医院核医学科自开始运营以来累计治疗患者

85 人次，使用过的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器为 6 个。根据现场踏勘，目前医院已对核医学科放射性固体废物进行了清理，将所有废发生器返回原厂家。目前核医学科内已无放射性药物或发生器的储存，同时医院已对核医学科各工作场所进行了清洁等措施。

2025 年 9 月 10 日，西安交通大学第一附属医院榆林医院委托核工业二〇三研究所分析测试中心对医院病房综合楼负一层核医学科工作场所、衰变池以及周边环境进行 γ 辐射剂量率和 β 表面污染现状监测并出具了检测报告（见附件 12），检测结果表明：医院核医学科各工作场所、衰变池及周边环境 γ 辐射剂量率检测结果均为本底水平， β 表面污染低于最低检测限，表明本项目所在地目前没有放射性物质的残留，环境质量良好，已经达到清洁解控的水平。

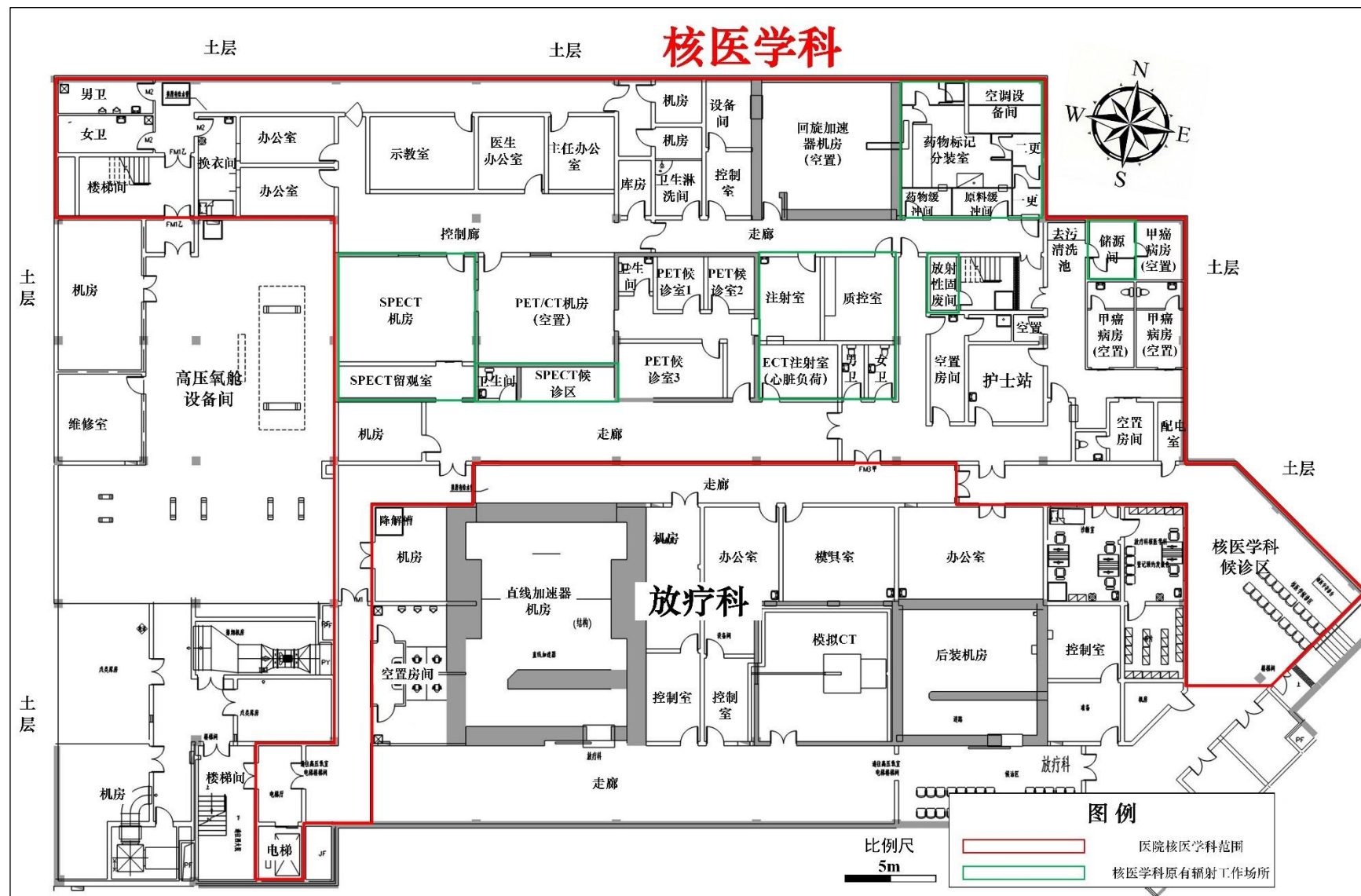


图 1-1 西安交通大学第一附属医院榆林医院现有核医学科平面布局图

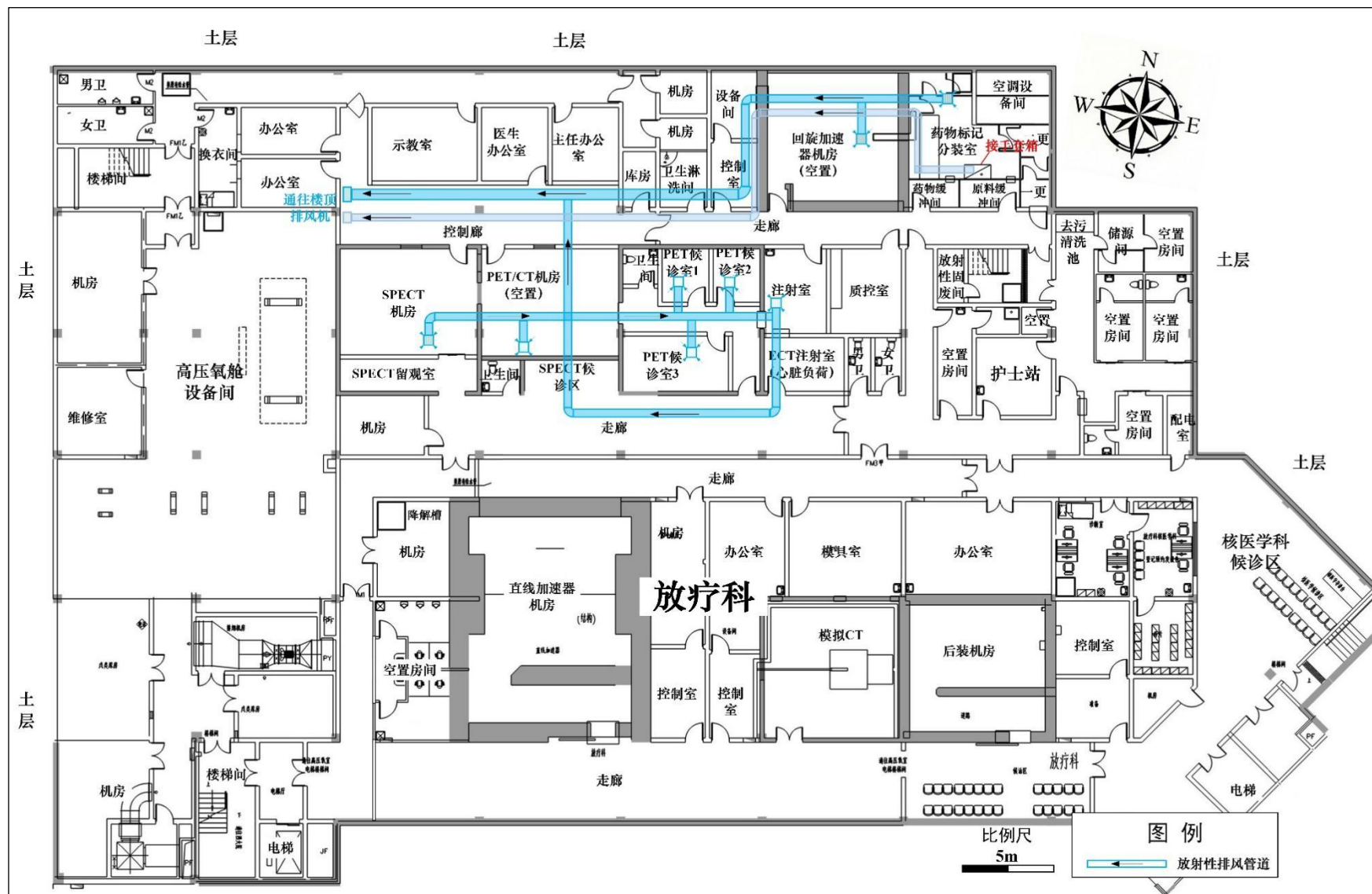


图 1-2 西安交通大学第一附属医院榆林医院现有核医学科放射性排风管道布局示意图

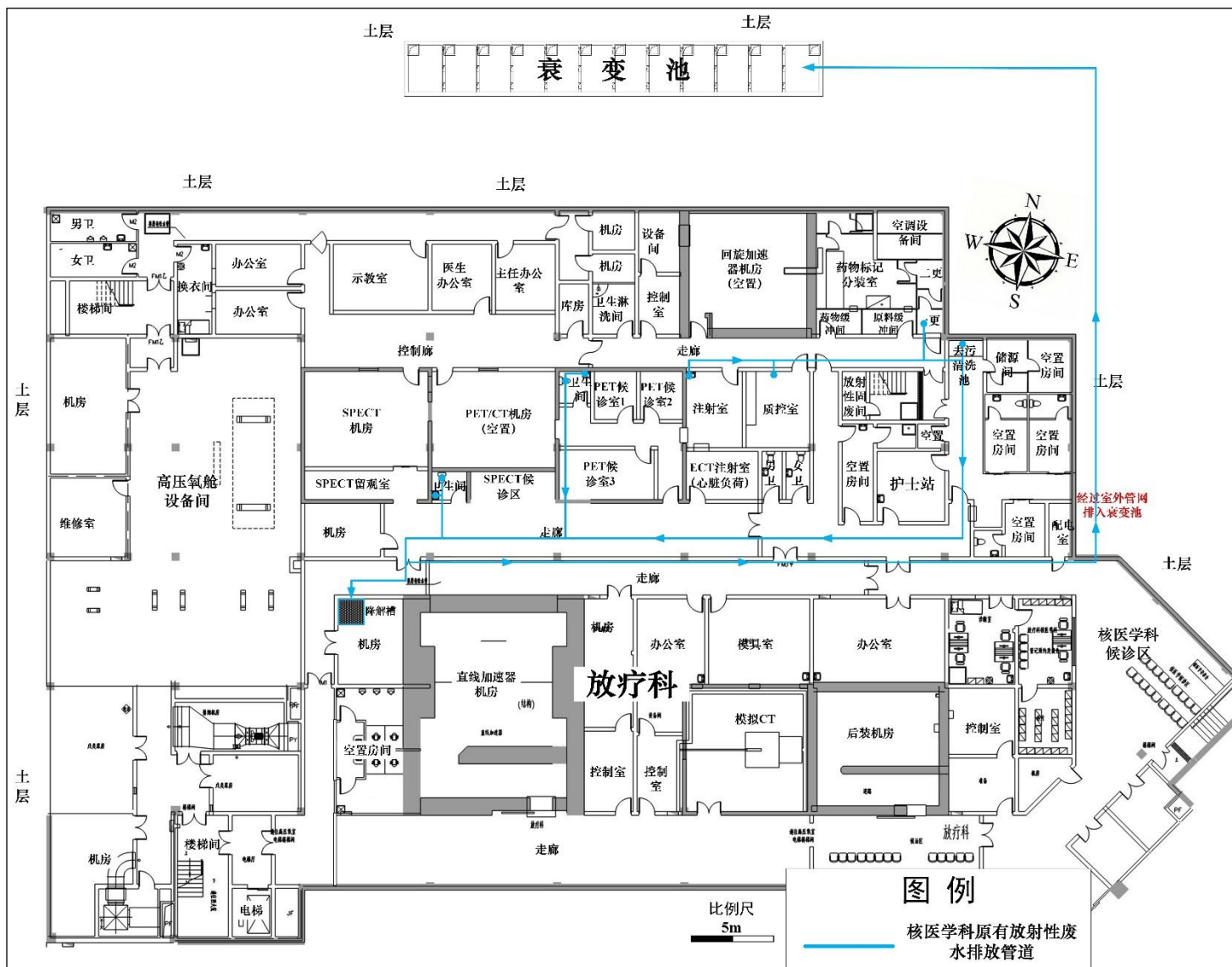


图 1-3 西安交通大学第一附属医院榆林医院现有核医学科放射性废水排放管道布局示意图

1.1.2 本项目改造后项目组成与建设内容

本项目医院核医学科改建项目的具体建设内容见下表所示。

表 1-2 本项目核医学科改建项目组成一览表

组成	项目内容	建设内容	备注
主体工程	药物制备间	1 间,有效面积 11.48m ² ,用于淋洗制备标记分装放射性药物 ^{99m} Tc 场所	改建
	注射室	1 间,有效面积 14.5m ² ,用于 ¹⁸ F 药物的分装注射以及 ^{99m} Tc 药物的注射场所	改建
	SPECT 患者注射区	1 间,有效面积 10.5m ² ,用于患者接受 ^{99m} Tc 药物的注射场所	改建
	质控室	1 间,有效面积 5.9m ² ,用于 ^{99m} Tc 药物的质控场所	改建
	PET/CT 机房	机房 1 间,有效面积 47.6m ² ,安装 1 台 PET-CT,使用放射性核素 ¹⁸ F 药物开展显像检查	改建
	SPECT 机房	机房 1 间,有效面积 46.8m ² ,安装 1 台 SPECT,使用放射性核素 ^{99m} Tc 药物开展显像检查	利旧
	PET/CT 候诊室 1、2	2 间,有效面积均为 7.8m ² ,用于患者注射 ¹⁸ F 药物后等候显像检查场所	利旧
	PET/CT 候诊室 3	1 间,有效面积均为 8.1m ² ,用于患者注射 ¹⁸ F 药物后等候显像检查场所	改建
	留观室	1 间,有效面积 9.6m ² ,用于注射 ¹⁸ F 药物的患者在显像检查后进行留观场所	新增
	急救室	1 间,有效面积 9.0m ² ,给药后患者出现特殊情况进行抢救使用场所	新增
	SPECT 注射后候诊室	1 间,有效面积 24.3m ² ,用于患者注射 ^{99m} Tc 药物后等候显像检查场所	改建
	废发生器暂存间	1 间,有效面积 4.5m ² ,用于废 ⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc 发生器的暂存场所	新增
	药物提升间	1 间,有效面积 1.4m ² ,用于放射性药物的运输	新增
公辅工程	放射性固废间	1 间,有效面积 6.5m ² ,用于暂存核医学科日常放射性固体废物场所	改建
	设置医办、主任办、护士站、会议室、卫生间等	用于核医学科日常办公使用	利旧
	设置一更、二更、洁具、清洗、浴厕、卫生缓冲区	用于医护人员更衣清洁使用	改建
环保工程	废气	药物制备间和注射室内的手套箱设置单独排风系统,并安装有活性炭过滤器;其他区域设置专用排风系统	改建
	废水	本次拟对原衰变池进行改造,改造后的衰变池由污泥池、衰变池和检测池组成,连续式衰变池共 11 级串联,污泥池+衰变池的总有效使用容积约 594m ³ ,污泥池池底设搅拌器用来防止污泥淤积。废水在衰变池内经过贮存衰变后(经核算,放射性废液在衰变池内贮存时间约 3.5a)后排至医院污水处理站,经处理后最终排入市政污水管网	改建
	固废	建设有放射性固废间 1 间,有效面积 6.5m ² ,用于核医学科内产生的放射性固体废物(包括废活性炭)收集暂存,暂存至其低于《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021)中的要求,所有放射性固体废物均经检测合格(即经监测辐射剂量率达到所处环境本底水平,β 表面污染小于 0.8Bq/cm ²)后作为医疗废物,统一交有资质单位进行处置	改建

说明:医院核医学科场所不设置运动负荷室,不开展 ^{99m}Tc 心肌灌注显像检查。

1.1.3 本项目改造后建设规模

本项目主要建设内容为：医院拟对位于病房综合楼负一层核医学科工作场所进行改造，改造后计划使用 ^{99m}Tc 药物（采购 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗制备 ^{99m}Tc ）进行 SPECT 显像检查工作；拟在 PET-CT 机房内安装使用 1 台 PET-CT（属于Ⅲ类射线装置），使用非密封放射性物质 ^{18}F 药物（外购）开展 PET-CT 显像诊断工作。

（1）非密封放射性物质

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科放射性核素用量、接诊患者人数情况见表 1-3 所示。

表 1-3 本项目核医学科工作场所放射性核素用量、接诊病人情况一览表

序号	治疗活动	患者每人每次核素用量 Bq	每天接诊患者人次	年接诊天数	年接诊患者人数	核素日最大操作量 Bq	核素年最大使用量 Bq	显像检查场所
1	^{99m}Tc 显像诊断	9.25×10^8	16	250	4000	1.77×10^{10}	4.425×10^{12}	SPECT 机房
2	^{18}F 显像诊断	3.7×10^8	30	250	7500	2.6×10^{10}	6.5×10^{12}	PET/CT 机房

说明：表中 ^{18}F 核素日最大操作量和年最大使用量已考虑药品的备用量以及药品到医院后至患者给药期间核素的衰变损失； ^{99m}Tc 核素日最大操作量和年最大使用量均已考虑药品制备后至患者给药期间核素的衰变损失，具体计算过程见 9.1.3 和 9.2.3 章节。

本项目使用的非密封放射性物质 ^{99m}Tc 由 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗获得，药物的分装在药物制备间手套箱内进行， ^{99m}Tc 的单次制备量最大为 $1.85 \times 10^{10}\text{Bq}$ ； ^{18}F 药物根据患者情况提前预约登记，向厂家进行定量订购，厂家根据需求将订购的放射性药物送至医院核医学科注射室。在向患者体内注射 ^{18}F 药物前，医院需根据患者所需注射药物活度在注射室手套箱内进行药物分装，因此 ^{18}F 的单次操作量最大为 $1.3 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科涉及 ^{99}Mo 、 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 放射性物质的使用，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 C 中“非密封源工作场所的分级要求”，使用以下公式计算日等效最大操作量，确定其工作场所等级。

$$\text{日等效最大操作量} = \frac{\text{日实际操作量} \times \text{毒性组别修正因子}}{\text{操作方式修正因子}}$$

西安交通大学第一附属医院榆林医院本项目核医学科工作场所等级计算结果见表 1-4 所示。

表 1-4 本项目核医学科工作场所分级计算结果

序号	核素	日实际最大操作量 (Bq)	毒性分组	操作方式	日等效最大操作量 (Bq)	工作场所等级	备注
1	^{99}Mo	1.85×10^{10}	中毒	源的贮存	1.85×10^7	乙级	发生器淋洗
2	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1.85×10^{10}	低毒	简单操作	1.85×10^8		
3	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1.77×10^{10}	低毒	很简单的操作	1.77×10^7		SPECT 显像检查
4	^{18}F	2.6×10^{10}	低毒	很简单的操作	2.6×10^7		PET-CT 显像诊断

说明：1、依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），低毒、中毒性核素毒性组别修正因子分别取 0.01、0.1；

2、依据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）附录 A， ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器中 ^{99}Mo 的操作视为液体“源的贮存”，操作方式修正因子取 100，淋洗得到 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的操作视为“简单操作”，操作方式修正因子取 1； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{18}F 显像检查视为“很简单的操作”，操作方式修正因子取 10；

由上表计算结果可知，该项目核医学科工作场所使用非密封放射性物质最大日等效操作量为 $2.472 \times 10^8 \text{Bq}$ ，处于 $2 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9 \text{Bq}$ 之间，属于乙级工作场所。

（2）射线装置

西安交通大学第一附属医院榆林医院本项目新增射线装置，其技术参数见下表所示。

表 1-5 本项目拟新增射线装置参数情况

射线装置名称	厂家、型号	最大管电压 kV	最大管电流 mA	数量	使用场所	类别	备注
PET/CT	上海联影医疗科技股份有限公司，uMI Panorama 28C	140	833	1 台	核医学科 PET-CT 机房	III类	新增

说明：本项目新增的 PET-CT 设备不包含校准源，校准源另行评价。

1.1.4 项目劳动定员

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科现有辐射工作人员 7 人，本项目不新增人员，项目建成后医院核医学科分别有 1 名药物制备间工作人员（从事 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 淋洗分装）、1 名注射室工作人员（从事 ^{18}F 分装注射以及 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 注射）、1 名质控室工作人员（从事 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的质控）、1 名运输人员（专职从事 ^{18}F 及 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器的运输、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的转移、放射性废物的转移收集等）、1 名 SPECT 显像检查操作人员、2 名 PET/CT 显像检查操作人员。以上辐射工作人员仅在各自岗位工作，不兼职参与科室以及医院内其他辐射工作。

1.1.5 项目选址及周边环境概况

1.1.5.1 医院地理位置及周边环境关系

西安交通大学第一附属医院榆林医院位于陕西省榆林市文化南路与康安路十

字处（108.729230°E，38.272161°N），医院南侧为康安路，隔路为玉景园小区、千巨大厦和开元驾校，东侧为文化南路，隔路为西港锦天城小区，北侧为林河路，隔路为榆溪圣境小区和空地，西侧为建榆路，隔路为领航君宸小区。医院地理位置见图 1-4，医院周边环境见图 1-5。



图 1-4 西安交通大学第一附属医院榆林医院交通地理位置图



图 1-5 西安交通大学第一附属医院榆林医院周边环境位置关系图

1.1.5.2 医院总平面布置

西安交通大学第一附属医院榆林医院现有门诊综合楼、病房综合楼、后勤综合楼、高压氧舱室等主要建筑，本项目所在的核医学科位于病房综合楼负一层西北侧，医院总平面布置图见图 1-6 所示。

1.1.5.3 本项目所在位置

根据设计单位提供的图纸，本项目对核医学科进行改造后的平面布局主要为：患者走廊北侧自东向西依次为：药物提升间、质控室、注射室、放射性固废间、SPECT 患者注射区、PET 候诊室 1、PET 候诊室 2、PET 候诊室 3、卫生间、留观室、PET/CT 机房、急救室、SPECT 机房、SPECT 候诊室、污水间；医生走廊北侧自东向西依次为：药物制备间、缓冲间、洁净走廊、一更、二更、原料通道、成品通道、预留房间（原回旋加速器机房，现空置）、更衣间、去污间、设备间、医生主任办公室以及控制廊；废发生器暂存间位于核医学科东侧位置。改造后核医学科平面布局见图 1-7 所示，医院核医学科顶部平面布局见图 1-8 所示。

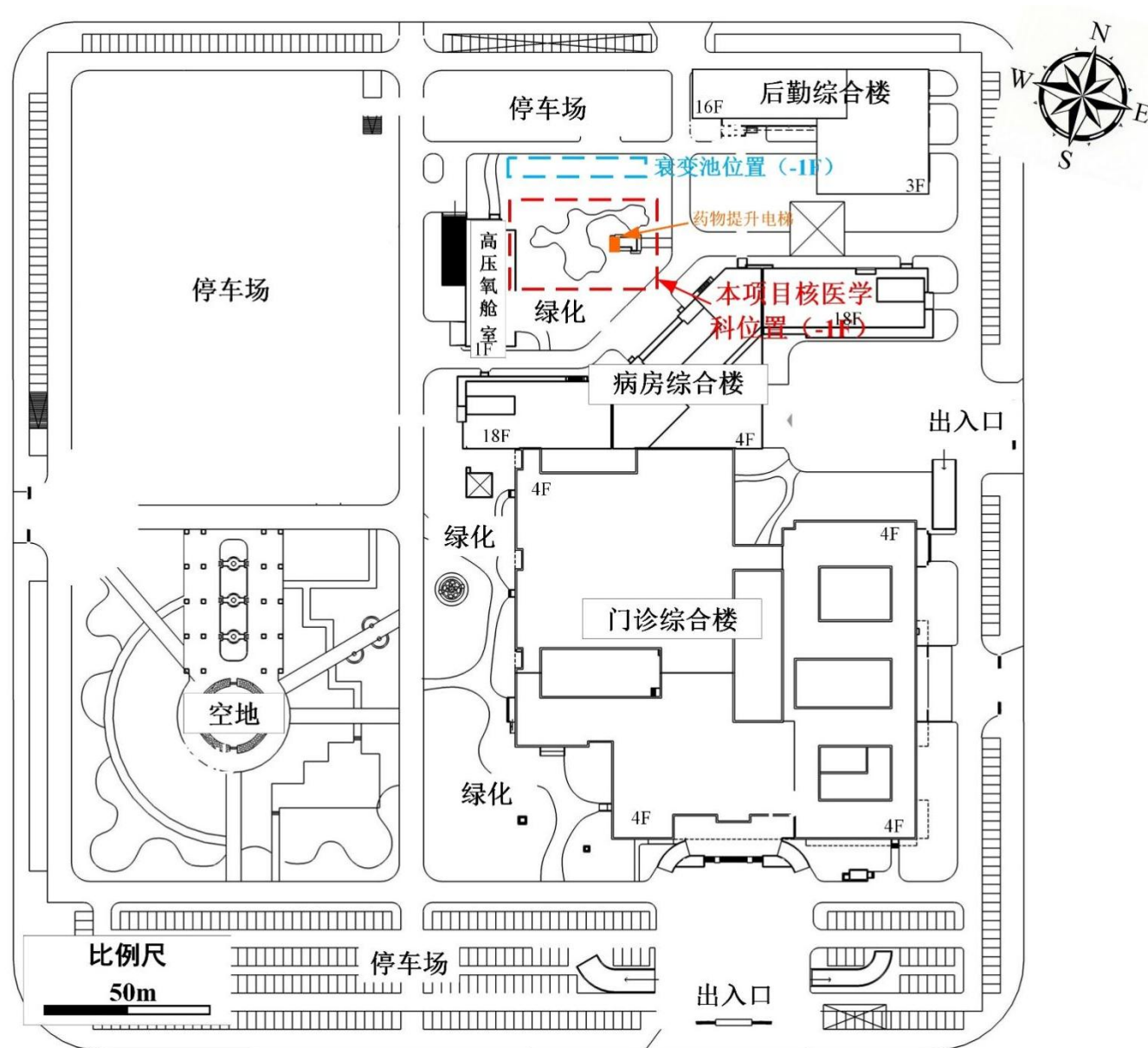


图 1-6 西安交通大学第一附属医院榆林医院总平面布置示意图

[illegible]

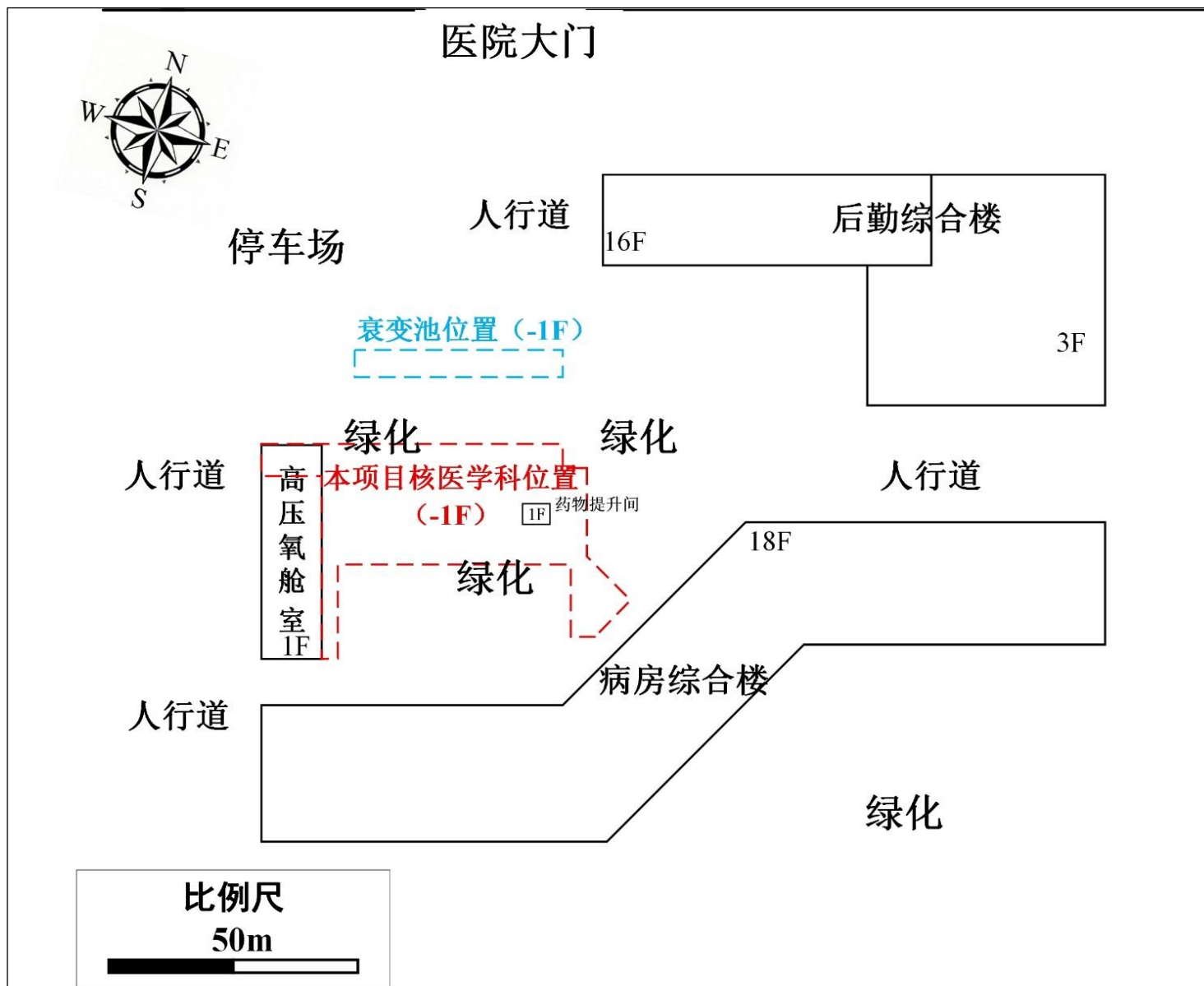


图 1-8 西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科顶部平面布局图

1.1.5.4 项目位置合理性

(1) 核医学科位置合理性

根据《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)中相关选址要求,核医学科现址具体情况分析见下表所示。

表 1-6 核医学科位置合理性分析一览表

法规标准	相关要求	设计情况	是否符合要求
《核医学辐射防护与安全要求》 (HJ1188-2021)	5.1.1 核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内,或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层,设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。	本项目医院核医学科工作场所集中布设于病房综合楼负一层西北侧。通过门禁设计及合适的时间、交通模式来控制辐射源的活动,可实现工作人员、患者、放射性药物、放射性废物路径相对独立。	符合
	5.1.2 核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区,并应与非放射性工作场所有明确的分界隔离。	核医学科顶部为绿化区域,底部为土层,工作场所不毗邻产科、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。	符合
	5.1.3 核医学工作场所排风口的的位置尽可能远离周边高层建筑。	核医学科放射性废气通过独立的排风管道经排风立管引至高压氧舱室楼顶排放,废气排放前经活性炭吸附处理;排风口位置距周边高层建筑较远,排风口方向向上。	符合
《核医学放射防护要求》 (GBZ120-2020)	5.1.1 在医疗机构内部区域选择核医学场址,应充分考虑周围场所的安全,不应邻接产科、儿科、食堂等部门,这些部门选址时也应避开核医学场所。尽可能做到相对独立布置或集中设置,宜有单独出、入口,出口不宜设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。	核医学工作场所功能用房相对集中,不邻接产科、儿科、食堂等部门;核医学科设计有单独的出入口,出口位于高压氧舱室一层东南侧,为单独出口,未设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。	符合

因此,本项目核医学科位置满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)及《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)中选址相关要求。

(2) 衰变池位置合理性

本次评价的衰变池现位于核医学科北侧地下负一层,与核医学科之间隔土层,其顶部为绿化区域,底部为土层。衰变池顶部地面周围为医院绿化和道路,无建筑物,人流量较小。衰变池位置距核医学科较近,核医学科排水管道铺设于地下,距离较短,有利于降低放射性废水对周边环境的影响。排水管道的转弯处较少,也有利于避免管道积水或堵塞。因此,目前医院核医学科衰变池位置布设合理。

1.1.6 实践正当性分析

本项目医院核医学科使用 PET-CT 和 SPECT 对受检者进行核素显像诊断，功能检查与形态学检查能有机地结合，使显像具有更高的灵敏度和更清晰的分辨率，可以同时反映病灶的病理生理变化及形态结构，对提高诊断的准确性具有重要作用，项目建设所带来的个人和社会利益远大于可能引起的辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）“实践的正当性”要求。

1.1.7 相关政策符合性

本项目属于中华人民共和国国家发展和改革委员会《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（2023 年第 7 号令修改）鼓励类中“十三、医药，4.高端医疗器械创新发展：新型医用诊断设备和试剂，高性能医学影像设备，高端放射治疗设备……”，故本项目符合国家产业政策。

1.2 现有核技术利用项目情况

1.2.1 环保手续履行情况

医院现有核技术利用项目均履行了环保审批手续，见下表所示。

表 1-7 医院现有核技术利用项目环保手续履行情况

序号	项目内容	环保手续履行情况	竣工验收内容
1	^{192}Ir 放射源×1 枚 (后装机用)	2011 年 1 月 20 日，原陕西省环境保护厅进行了审批（陕环批复〔2011〕13 号）；	2025 年 7 月进行了部分自主验收（验收内容：后装机和使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行显像诊断）；
2	乙级工作场所（使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{125}I 、 ^{131}I 、 ^{32}P 等密封放射性物质）		
3	Integrisallura12 型数字减影血管造影机		
4	Sensation 64 型 64 排 CT	2017 年 7 月 10 日，原陕西省环境保护厅进行了审批（陕环批复〔2017〕308 号）；	2017 年 11 月，陕西省辐射环境监督管理站进行了验收（验收文件编号：陕辐环验字〔2017〕第 042 号）；
5	DigitalDignost2.0 型单板 DR		
6	Lunar iDXA 型骨密度仪		
7	DiagitalDignost2.0 型双板 DR		
8	Brilliance iCT 型 256 排 CT		
9	Artis Zeego 型数字减影血管造影机		
10	Mobilett Mira 型移动 DR		
11	Ysio 型双板 DR		
12	Siremobil Compact L 型移动式 C 臂机		

续表 1-7 医院现有核技术利用项目环保手续履行情况

序号	项目内容	环保手续履行情况	竣工验收内容
13	ARCADIS Varic 型移动式 C 臂机	2017 年 7 月 10 日, 原陕西省环境保护厅进行了审批 (陕环批复 (2017) 308 号);	2017 年 11 月, 陕西省辐射环境监督管理站进行了验收 (验收文件编号: 陕辐环验字 (2017) 第 042 号);
14	ARCADIS Varic 型移动式 C 臂机		
15	Promax 3D 型口腔 CT		
16	DigiEye280T 型单板 DR		
17	Clinac iX 型电子直线加速器	2011 年 1 月 20 日, 原陕西省环境保护厅进行了审批 (陕环批复 (2011) 13 号);	
18	SL-ID 型模拟定位机		
19	HB-ESWL-VG 型碎石定位机	2018 年 11 月 30 日进行了环境影响登记表备案, 备案文号: 201861080200000341	
20	YKY-G 型牙片机		
21	Discovey CT590 RT 型 16 排大孔径 CT 机		
22	SOMATOM Perspective 型 64 排 128 层 CT	2022 年 9 月 27 日进行了环境影响登记表备案, 备案文号: 202261080200000258;	
23	SOMATOM Force 型 X 射线计算机体层摄影设备		
24	Optima XR240amx 型移动 DR	2020 年 10 月 26 日进行了环境影响登记表备案, 备案文号: 202061080200000481;	
25	EXAVISTA 型数字胃肠机		
26	Brivo OEC 785 型移动式 C 臂机		
27	Senographe Pristina 型数字化乳腺 X 射线机	2020 年 11 月 16 日进行了环境影响登记表备案, 备案文号: 202061080200000457;	
28	Discovery IGS 7 OR 型数字减影血管造影机	2022 年 7 月 15 日, 榆林市行政审批服务局进行了审批 (榆政审批生态发 (2022) 72 号);	2022 年 10 月进行了自主验收;
29	Azurion 7 M20 型数字减影血管造影机	2024 年 3 月 13 日, 榆林市生态环境局进行了审批 (榆政环辐批复 (2024) 19 号);	2024 年 6 月 22 日进行了自主验收;
30	Cios spin 型移动式 C 臂机	2024 年 4 月 11 日进行了环境影响登记表备案, 备案文号: 202461080200000057;	
31	Revolution ACE 型 CT 机	2024 年 5 月 15 日进行了环境影响登记表备案, 备案文号: 202461080200000074;	

1.2.2 核技术利用现状及现有辐射安全许可证

医院现持有陕西省生态环境厅 2024 年 7 月 24 日核发的辐射安全许可证（陕环辐证[60008]），有效期至 2029 年 03 月 08 日，许可种类和范围为：使用Ⅲ类放射源；使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所。辐射安全许可证详细许可内容详见下表所示。

表 1-8 陕环辐证[60008]核准的种类和范围

(一) 放射源							
序号	核素	类别	总活度(贝克)/活度(贝克)×枚数	活动种类	工作场所		
1	Ir-192	III 类	3.7×10 ¹¹ ×1	使用	病房综合楼后装治疗室		
(二) 非密封放射性物质							
序号	工作场所	场所等级	核素	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	活动种类	
1	病房综合楼核医学科	乙级	Tc-99m	1.85×10 ⁸	4.625×10 ¹²	使用	
2			I-131	3.7×10 ⁶	1.39×10 ¹¹	使用	
(三) 射线装置							
序号	装置名称		型号规格	类别	装置数量	场所	活动种类
1	16 排大孔径 CT 机		Discovey CT590 RT	III类	1	CT 定位室	使用
2	64 排 128 层 CT		SOMATOM Perspective	III类	1	CT 检查室	
3	64 排 CT		Sensation 64	III类	1	CT 检查室 1	
4	256 排 CT		Brilliance iCT	III类	1	CT 检查室 2	
5	X 射线计算机体层摄影设备		SOMATOM Force	III类	1	CT 检查室 3	
6	X 射线计算机体层摄影设备		Revolution ACE	III类	1	CT 检查室 4	
7	数字减影血管造影机		Discovery IGS 7 OR	II类	1	复合手术室	
8	骨密度仪		Lunar iDXA	III类	1	骨密度室	
9	电子直线加速器		Clinac iX	II类	1	加速器治疗室	
10	数字减影血管造影机		Azurion 7 M20	II类	1	介入手术室 1	
11	数字减影血管造影机		Artis Zeego	II类	1	介入手术室 2	
12	数字减影血管造影机		Integrisallura12	II类	1	介入手术室 3	
13	口腔 CT		Promax 3D	III类	1	口腔 CT 室	
14	模拟定位机		SL-ID	III类	1	模拟机房	
15	双板 DR		DiagitalDignost 2.0	III类	1	拍片 1 室	
16	双板 DR		Ysio	III类	1	拍片 2 室	
17	单板 DR		DiagitalDignost 2.0	III类	1	拍片 3 室	
18	数字化乳腺 X 射线机		Senographe Pristina	III类	1	乳腺检查室	

续表 1-8 陕环辐证[60008]核准的种类和范围

(三) 射线装置						
序号	装置名称	型号规格	类别	装置数量	场所	活动种类
19	移动式 C 型臂 X 射线机	Brivo OEC 785	III类	1	手术室 12	使用
20	移动式 C 型臂 X 射线机	Cios spin	III类	1	手术室 12	
21	移动式 C 型臂 X 射线机	Siremobil Compact L	III类	1	手术室 13	
22	移动式 C 型臂 X 射线机	ARCADIS Varic	III类	1	手术室 14	
23	移动式 C 型臂 X 射线机	ARCADIS Varic	III类	1	手术室 15	
24	碎石定位机	HB-ESWL-VG	III类	1	碎石室	
25	单板 DR	DigiEye280T	III类	1	透视拍片室	
26	牙片机	YKY-G	III类	1	牙片室	
27	移动 DR	Optima XR240amx	III类	1	病房	
28	移动 DR	Mobilett Mira	III类	1	病房	
29	数字化 X 射线透视摄影系统	EXAVISTA	III类	1	造影室 2	

说明：医院核医学科从未开展过 ^{131}I 核素诊断治疗工作，后续会在辐射安全许可证上删除该核素。

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
/	/	/	/	/	/	/	/	

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。

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）	年最大操作量（Bq）	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	⁹⁹ Mo	液体	使用	1.85×10 ¹⁰	1.85×10 ⁷	4.625×10 ¹²	制备 ^{99m} Tc	源的贮存	医院病房综合楼核医学科	自带铅屏蔽，药物制备间手套箱
2	^{99m} Tc	液体	使用	1.85×10 ¹⁰	1.85×10 ⁸	4.625×10 ¹²	发生器淋洗、标记、分装	简单操作		药物制备间手套箱
3	^{99m} Tc	液体	使用	1.77×10 ¹⁰	1.77×10 ⁷	4.425×10 ¹²	显像诊断	很简单的操作		注射室
4	¹⁸ F	液体	使用	2.6×10 ¹⁰	2.6×10 ⁷	6.5×10 ¹²	显像诊断			铅罐暂存，注射室手套箱

表 4 射线装置

(1) 加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量 (MeV)	剂量率	用途	工作场所	备注
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(2) X 射线机：包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途	工作场所	备注
1	PET/CT 机	III	1	uMI Panorama 28C	140	833	显像检查	病房综合楼负一层核医学科 PET-CT 机房	
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(3) 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 (mA)	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	
/	本项目不涉及中子发生器	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放总量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
废 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器	固态	^{99}Mo 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	约 100 个	/	废发生器暂存间暂存	交厂家回收处理
含放射性核素的废针头、注射器、棉签、口杯、滤纸、吸水纸、手套等	固态	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	约 580 kg	/	分类收集于放射性废物桶中，转移至放射性固废间贮存衰变	在放射性固废间存放，存放时间超过 30 天，经监测放射性废物活度低于清洁解控水平后作为医疗废物处理
注射药物后诊断患者排泄物及冲洗废水、工作人员洗手废水、工作场所清洁废水等	液态	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	约 170m ³	/	在衰变池衰变贮存，存放时间超过 30 天并达到最大容积后排入医院污水处理设施	经医院污水处理设施处理后排入市政污水管网
放射性废气	气态	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	/	/	/	经活性炭吸附后，通过专用管道排入大气，排放口高出所在建筑物屋顶约 3m
废活性炭	固态	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	约 50kg	/	送放射性固废间暂存	在放射性固废间存放，存放时间超过 30 天，经监测放射性废物活度低于清洁解控水平后作为医疗废物处理
/	/	/	/	/	/	/	/	/

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；年排放总量用 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

法律法规	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》，2015 年 1 月 1 日；</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》（修订），2018 年 12 月 29 日；</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月 1 日；</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》（修订），国务院第 682 号令，2017 年 10 月 1 日；</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（修订），国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日；</p> <p>(6) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部令第 20 号第四次修订，2021 年 1 月 4 日；</p> <p>(7) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，原环保部 18 号令，2011 年 5 月 1 日；</p> <p>(8) 《放射性废物安全管理条例》（中华人民共和国国务院令第 612 号，2012 年 3 月 1 日起施行；</p> <p>(9) 《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评〔2017〕 4 号）；</p> <p>(10) 关于发布《射线装置分类》的公告，国家环保部、国家卫生和计划生育委员会总局 2017 年第 66 号公告，2017 年 12 月 6 日；</p> <p>(11) 关于发布《放射性废物分类》的公告，环境保护部、工业和信息化部、国防科工局 2017 年第 65 号公告，2018 年 1 月 1 日；</p> <p>(12) 《建设项目环境影响评价分类管理目录（2021 年版）》，生态环保部第 16 号令，2021 年 1 月 1 日；</p> <p>(13) 《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（国家发展和改革委员会令第 7 号，2023 年 12 月 27 日）；</p> <p>(14) 《陕西省放射性污染防治条例》，陕西省第十三届人民代表大会常务委员会第十二次会议《关于修改〈陕西省产品质量监督管理条例〉等二十七部地方性法规的决定》第二次修正，2019 年 7 月 31 日；</p> <p>(15) 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》环办辐射函〔2016〕430 号；</p> <p>(16) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》，生态环境部 2019 年第 57 号公告，2020 年 1 月 1 日实施；</p>
------	---

续表 6 评价依据

法律 法规	<p>(17) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》，生态环境部公告 2021 第 9 号，2021 年 3 月 15 日起实施；</p> <p>(18) 《辐射工作人员职业健康管理暂行办法》，中华人民共和国卫生部令第 55 号，2007 年 11 月 1 日施行；</p> <p>(19) 《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函〔2023〕20 号）。</p>
技术 标准	<p>(1) 《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）；</p> <p>(2) 《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>(3) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；</p> <p>(4) 《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）；</p> <p>(5) 《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；</p> <p>(6) 《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）；</p> <p>(7) 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）；</p> <p>(8) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；</p> <p>(9) 《医疗废物专用包装袋、容器和警示标志标准》（HJ421-2008）；</p> <p>(10) 《职业性外照射个人检测规范》（GBZ128-2019）；</p> <p>(11) 《辐射事故应急监测技术规范》（HJ1155-2020）；</p> <p>(12) 《电离辐射监测质量保证通用要求》（GB8999-2021）；</p> <p>(13) 《裂变钼 99-锝 99m 色层发生器》（GB/T13172-2009）；</p> <p>(14) 《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）；</p> <p>(15) 《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>
其他	<p>(1) 项目委托书（见附件 1）；</p> <p>(2) 建设单位提供医院核医学科设计图纸；</p> <p>(3) 《辐射防护手册》，李德平、潘自强；</p> <p>(4) 《中国环境天然放射性水平》（中国原子能出版社，2015 年）；</p> <p>(5) 《γ 射线屏蔽参数手册》，中国科学院工程力学研究所。</p>

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

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）要求，结合本项目核医学乙级非密封放射性物质工作场所和使用Ⅲ类射线装置，确定本项目的评价范围为：医院核医学科乙级非密封放射性物质工作场所以及衰变池实体边界外 50m 范围内区域。

根据上述要求并结合项目所涉及的工作场所布局和边界，给出本项目环境影响评价范围示意图，如图 7-1 所示。

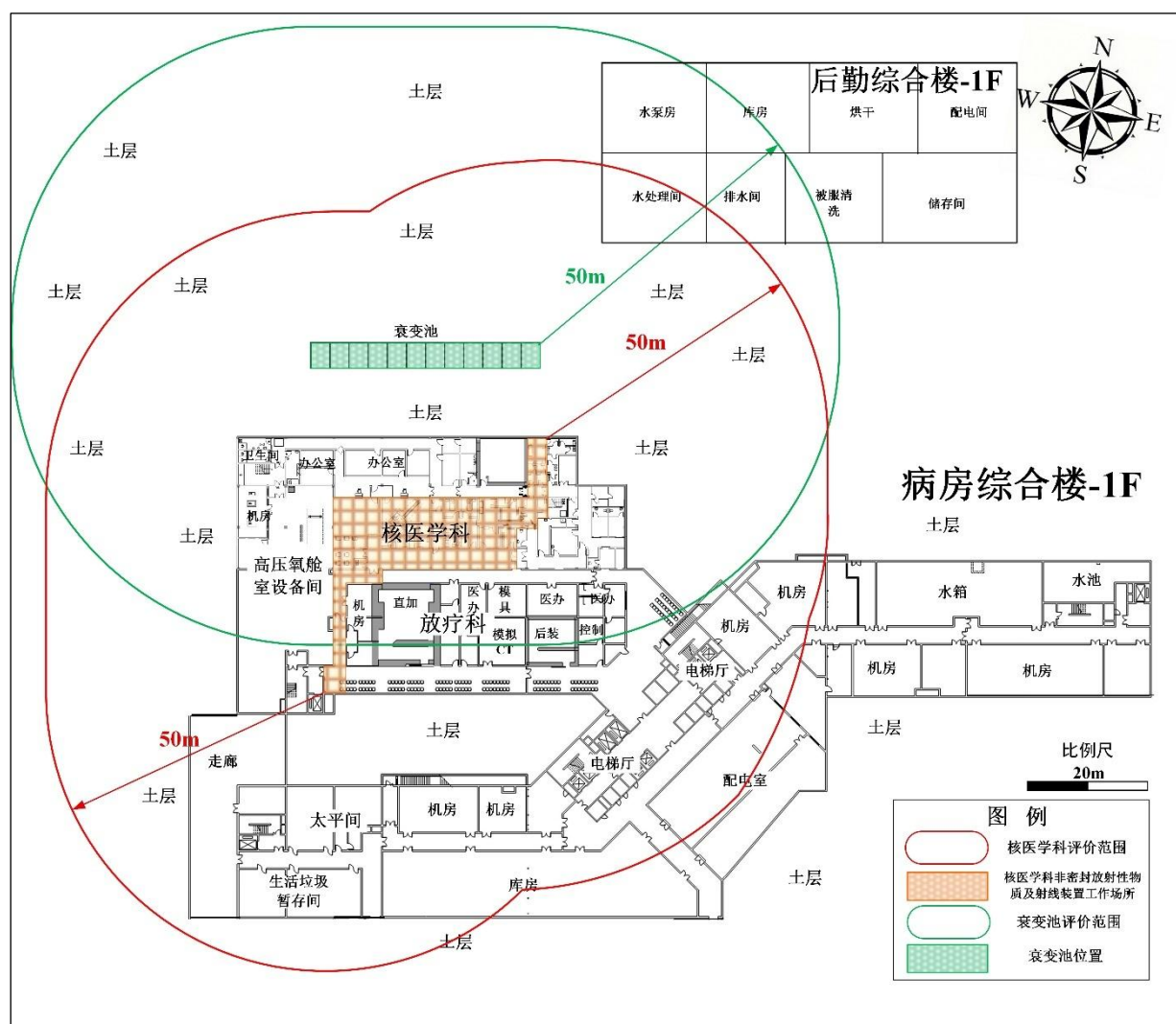


图 7-1 本项目核医学科评价范围示意图

7.2 环境保护目标

根据西安交通大学第一附属医院榆林医院本项目非密封放射性物质及射线装置分布情况，本项目非密封放射性物质及射线装置均位于病房综合楼负一层核医学科，核医学科周围主要为放疗科、高压氧舱室设备间、机房及库房。本项目环境保护目标为核医学科各工作场所的职业工作人员和周围公众人员，使其所接受有效剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的剂量限值和本次评价提出的剂量约束值。西安交通大学第一附属医院榆林医院本项目环境保护目标见下表所示。

表 7-1 西安交通大学第一附属医院榆林医院本项目环境保护目标一览表

工作场所	保护对象		类型	人员规模	方位	最近距离(m)	年有效剂量约束值
核医学科	药物制备间工作人员		本项目职业人员	1 人	工作场所内部	0.5*	5mSv
	注射室工作人员			1 人			
	质控室工作人员			1 人			
	运输人员			1 人			
	SPECT、PET/CT 工作人员（扫描、摆位）			3 人	北	0.3	
	病房综合楼负一层放疗科	直线加速器、模拟CT、后装机控制室工作人员	其他项目职业人员	6 人	南	14.5	0.1mSv
		办公室、机房停留人员及候诊人员	公众	约 10 人	南	5.5	0.1mSv
	高压氧舱室设备间、机房停留人员		公众	约 3 人	西	3.5	
	后勤综合楼负一层水处理间及库房停留人员		公众	约 3 人	东北	25~50	
	核医学科顶部绿化区域		公众	流动人员	顶部	1.0	
核医学科边界外周边其他医务人员、患者及其家属（除医院放射性工作人员外）		公众	流动人员	南、东	0.3~50		
核医学科投影至地面	后勤综合楼停留人员		公众	约 10 人	东北	43	0.1mSv
	病房综合楼停留人员		公众	约 35 人	南	20	
	高压氧舱室停留人员		公众	约 15 人	西	5	
	周边其他医务人员、患者及其家属		公众	流动人员	东、南、西、北	1.0~50	
衰变池投影至地面	后勤综合楼停留人员		公众	约 30 人	东北	27	0.1mSv
	病房综合楼停留人员		公众	约 25 人	南	45	
	高压氧舱室停留人员		公众	约 10 人	南	18	
	顶部地面绿化及道路		公众	流动人员	东、南、西、北	1.0~50	

说明：1、表中*表示距非密封放射性物质药物或射线装置距离，其余距离为距射线装置、含源设备（或非密封放射性物质药物）所在机房或工作场所屏蔽体表面距离；

2、本项目评价范围内其他辐射工作人员剂量约束值为 5mSv/a，本项目对其附加剂量按 0.1mSv/a 控制。

7.3 评价标准

根据《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）等标准，本项目的剂量要求、屏蔽体表面剂量率控制值、场所分区、通风要求、放射性废物管理要求、辐射安全防护措施和设施等要求见表 7-2 所示。

表 7-2 本项目评价标准一览表

剂量要求			执行标准
执行对象	辐射工作人员	公众	
剂量限值（mSv/a）	20	1	GB18871-2002
剂量约束值（mSv/a）	≤5	≤0.1	HJ1188-2021
表面污染控制水平			执行标准
表面类型		β 放射性物质 （Bq/cm ² ）	GB18871-2002 GBZ120-2020
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	4×10	
	监督区	4	
工作服、手套、工作鞋	控制区、监督区	4	
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 ⁻¹	
屏蔽体表面剂量率控制值			执行标准
核医学科 工作场所	本项目核医学科工作场所剂量控制应符合以下要求： 1、工作场所控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子≥1/2）房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h； 2、控制区内工作人员较少停留或无需到达的场所（人员居留因子<1/2），如给药/注射室防护门外、给药后患者候诊室门外以及核医学科患者走廊等位置，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h； 3、放射性药物分装箱体、注射窗外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h； 4、放射性药物分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率应小于 25μSv/h； 5、PET-CT 机房：距机房屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 2.5μSv/h。		HJ1188-2021 GBZ120-2020 GBZ130-2020 辐射函〔2023〕20号
非密封放射性物质工作场所分级			执行标准
级别	日等效最大操作量/Bq		GB18871-2002
甲	>4×10 ⁹		
乙	2×10 ⁷ ～4×10 ⁹		
丙	豁免活度值以上～2×10 ⁷		
场所分区管理			执行标准
控制区	把需要或可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射		GB18871-2002 HJ1188-2021

		或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。	
监督区		未被定为控制区，在其中通常不需要专门的防护手段或安全措施，但要经常对职业照射条件进行监督和评价。	
选址和布局			执行标准
核医学科	选址	<p>1.核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层，设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。</p> <p>2.核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并应与非放射性工作场所有明确的分解隔离。</p> <p>3.核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。</p>	HJ1188-2021 GBZ120-2020
	布局	<p>1.核医学科工作场所应合理布局，住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置；同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局，控制区应相对集中，高活室集中在一端，防止交叉污染。尽量减小放射性药物、放射性废物的存放范围，限制给药后患者的活动空间。</p> <p>2.核医学工作场所应设立相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开，减少给药后患者对其他人员的照射。注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉，人员与放射性药物通道不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷。</p> <p>3.核医学工作场所宜采取合适的措施，控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动，避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲区，为工作人员和患者提供必要的可更换衣物、防护用品、冲洗设施和表面污染监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。</p>	
核医学场所屏蔽要求			执行标准
<p>6.1.1 核医学场所屏蔽层设计应适当保守，按照可能使用的最大放射性活度、最长时间和最短距离进行计算。</p> <p>6.1.2 设计核医学工作场所墙壁、地板及顶面的屏蔽层时，除应考虑室内的辐射源外，还要考虑相邻区域存在的辐射源影响以及散射辐射带来的照射。</p> <p>6.1.5 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 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 $10\mu\text{Sv/h}$。</p> <p>6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 $25\mu\text{Sv/h}$。</p> <p>6.1.7 固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$。</p> <p>6.1.8 放射性物质贮存在专门场所内，并应有适当屏蔽。</p>			HJ1188-2021
核医学科场所安全措施要求			执行标准

<p>6.2.1 核医学工作场所的放射性核素操作设备的表面、工作台台面等平整光滑，室内地面与墙壁衔接处应无接缝，易于清洗、去污。</p> <p>6.2.2 操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。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。</p> <p>6.2.3 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。</p> <p>6.2.4 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。</p> <p>6.2.5 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。</p>		HJ1188-2021
<p>6.4.1 机房应设有观察窗或摄像监控装置，其设置的位置应便于观察到受检者状态及防护门开闭情况；</p> <p>6.4.2 机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。</p> <p>6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。</p> <p>6.4.4 机房门外应有电离辐射警告标志；机房门上方应有醒目的工作状态指示灯，灯箱上应设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句；候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。</p> <p>6.4.5 平开机房门应有自动闭门装置；推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施；工作状态指示灯能与机房门有效关联。</p> <p>6.4.6 电动推拉门宜设置防夹装置。</p> <p>6.4.7 受检者不应在机房内候诊；非特殊情况，检查过程中陪检者不应滞留在机房内。</p> <p>6.4.10 机房出入口宜处于散射辐射相对低的位置</p>		GBZ 130-2020
核医学科工作场所通风要求		执行标准
<p>6.3.1 核医学工作场所应保持良好的通风，工作场所的气流流向应遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。</p> <p>6.3.3 碘-131 治疗病房应设有单独的通风系统，病房的门窗应有封闭措施，保持治疗区域内的负压，治疗区域内的空气应经单独的排气管道有组织排放。</p> <p>6.3.4 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、手套箱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱、手套箱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。</p> <p>6.3.5 手套箱应有足够的通风能力。制备放射性药物的回旋加速器工作区域、碘-131 治疗病房以及设有手套箱、手套箱等场所的通风系统排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。</p>		HJ1188-2021
核医学工作场所通风系统独立设置，应保持核医学工作场所良好的通风条件，合理设置工作场所的气流组织，遵循自非放射区向监督区再向控制区的流向设计，保持含放射性核素场所负压以防止放射性气体交叉污染，保证工作场所的空气质量。合成和操作放射性药物所用的手套箱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。		GBZ120-2020
核医学工作场所放射性废物管理		执行标准
固体放射性废物	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	HJ1188-2021

	<p>废物清洁解控并作为医疗废物处理；</p> <p>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；</p> <p>能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 4Bq/cm²、其他 α 发射体应小于 0.4Bq/cm²；</p> <p>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。</p>	
气态放射性废物	<p>7.4.1 产生气态放射性废物的核医学场所应设置独立的通风系统，合理组织工作场所的气流，对排出工作场所的气体进行过滤净化，避免污染工作场所和环境。</p> <p>7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理。</p>	HJ1188-2021
	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道在汇入“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。	辐射函（2023）20 号
衰变池要求		执行标准
放射性废液收集	<p>7.3.1.1 核医学工作场所应设置有槽式或推流式放射性废液衰变池或专用容器，收集放射性药物操作间、核素治疗病房、给药后患者卫生间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液。</p> <p>7.3.1.2 核医学工作场所放射性药物标记、分装、注射后的残留液和含放射性核素的其他废液应收集在专用容器中。盛放放射性废液的容器表面应张贴电离辐射标志。</p> <p>7.3.1.3 核医学工作场所的上水需配备洗消处理设备（包括洗消液）。控制区和卫生通过间内的淋浴间、盥洗水盆、清洗池等应选用脚踏式或自动感应式的开关，以减少场所内的设备放射性污染。头、眼和面部宜采用向上冲淋的流动水。</p> <p>7.3.1.4 放射性废液收集的管道走向、阀门和管道的连接应设计成尽可能少的死区，下水道宜短，大水流管道应有标记，避免放射性废液集聚，便于检测和维修。</p>	HJ1188-2021
放射性废液贮存	7.3.2.1 经衰变池和专用容器收集的放射性废液，应贮存至满足排放要求。衰变池或专用容器的容积应充分考虑场所内操作的放射性药物的半衰期、日常核医学诊疗及研究中预期产生贮存的废液量以及事	

	故应急时的清洗需要；衰变池池体应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施。 7.3.2.3 核医学诊断和门诊碘-131 治疗场所，可设置推流式放射性废液衰变池。推流式衰变池应包括污泥池、衰变池和检测池。应采用有效措施确保放射性废液经污泥池过滤沉淀固形物，推流至衰变池，衰变池本体分为 3-5 级分隔连续式衰变池，池内设导流墙。污泥池池底有防止和去除污泥硬化淤积的措施。				
放射性废液排放	7.3.3.2 对于推流式衰变池贮存方式，所含核素半衰期大于 24 小时的，每年应对衰变池中的放射性废液进行监测，碘-131 和最长半衰期核素的放射性活度浓度应满足 GB 18871 附 A 表 A1 的要求。 7.3.3.3 放射性废液的暂存和处理应安排专人负责，并建立废物暂存和处理台账，详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。				
辐射监测				执行标准	
工作场所	监测内容	监测点位	监测频次		
核医学科工作场所	辐射水平（X-γ 辐射剂量率）	控制区和监督区所有工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的装置/设备的表面	不少于 1 次/月	HJ1188-2021	
	放射性表面污染	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，核素治疗场所的设施、墙壁和地面等，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等。	每次工作结束（出现放射性药物洒漏应及时进行监测）		
防护用品				执行标准	
场所	辐射工作人员		患者或受检者		
	必配	选配	必配		选配
普通核医学和 SPECT 场所	铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖	铅橡胶帽子、铅玻璃眼镜	—	—	GBZ 120-2020
正电子放射性药物和 ¹³¹ I 的场所	放射性污染防护服	—	—	—	
CT 体层扫描（隔室）	—	—	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套	铅橡胶帽子	GBZ 130-2020

屏蔽体表面剂量率控制值			执行标准
核医学科 工作场所	剂量控制应符合以下要求： 1、工作场所控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子≥1/2）房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h； 2、控制区内工作人员较少停留或无需到达的场所（人员居留因子＜1/2），如给药/注射室防护门外、给药后患者候诊室门外、核素治疗住院病房门外以及核医学科患者走廊等位置，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h； 3、放射性药物分装箱体、注射窗外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h； 4、放射性药物分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率应小于 25μSv/h。		HJ1188-2021 GBZ120-2020 辐射函（2023）20号
放射性废物管理			执行标准
固体放射性 废物	放射性固体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，β 表面污染小于 0.8Bq/cm² 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理： a）所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；		HJ1188-2021
放射性废气	7.4.1 产生气态放射性废物的核医学场所应设置独立的通风系统，合理组织工作场所的气流，对排出工作场所的气体进行过滤净化，避免污染工作场所和环境。 7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理；		
放射性废水	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。		
辐射监测			执行标准
监测内容	监测点位	监测频次	HJ1188-2021
辐射水平	控制区和监督区所有工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的装置/设备的表面	不少于 1 次/月	
表面放射性 污染	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，核素治疗场所的设施、墙壁和地面等，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等。	每次工作结束（出现放射性药物撒漏应及时进行监测）	

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目辐射环境质量现状

根据现场调查以及建设单位提供的情况,西安交通大学第一附属医院榆林医院最后一次购买 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器的时间为 2025 年 7 月 30 日,购买的发生器活度规格为 300mCi,最后一次使用 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物的时间为 2025 年 8 月 1 日,当日淋洗出的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物的量为 $8.02\times 10^9\text{Bq}$,当日就诊患者 8 人,随后从 8 月 2 日开始至今医院核医学科停诊。医院已于 8 月 2 日将所有废发生器返回原厂家,核医学科内已无放射性药物或发生器的储存。

为了掌握项目所在地的辐射水平现状,本次选择在项目所在地核医学科、衰变池及周边环境布设监测点位,以反映医院核医学科目前的辐射水平及区域辐射环境质量状况。根据《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021)及项目产污分析,本项目主要监测因子为: γ 辐射剂量率、 β 表面污染。

2025 年 9 月 10 日,西安交通大学第一附属医院榆林医院委托核工业二 0 三研究所分析测试中心对医院病房综合楼负一层核医学科工作场所、衰变池以及周边环境进行 γ 辐射剂量率和 β 表面污染现状监测,监测内容如下:

(1) 监测方法

监测项目: γ 辐射剂量率、 β 表面污染

监测点位布点原则:为检验本项目医院核医学科原有工作场所是否达到了清洁解控水平,按照《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021)、《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)以及《表面污染测定第一部分: β 发射体($E_{\beta\text{max}}>0.15\text{MeV}$)和 α 发射体》(GB/T14056.1-2008)中有关布点原则和方法,并结合本项目核医学科原工作场所的实际布局情况,对医院病房综合楼负一层核医学科工作场所、衰变池以及周边环境分别进行布点,得到了本项目所在地的辐射水平现状值,用于证明核医学科原工作场所是否还存在放射性污染。

监测布点图:本项目监测点位布设情况见图 8-1 和图 8-2。

本项目使用的监测仪器基本参数见表 8-1。

表 8-1 使用的监测仪器相关参数一览表					
项目	仪器名称及型号，仪器编号	测量范围	检定单位	检定证书编号	检定有效期
γ 辐射剂量率	便携式 X- γ 剂量率仪 (FH40G-X 主机 +FHZ672E-10 探头), 主机:FHP003-2018 探头:FHP004-2018	1nSv/h~100 μ Sv/h	中国计量科学研究院	DLjl2024-13943	2024.9.13~2025.9.12
β 表面污染	LB124 型表面污染测量仪 设备编号: FHP012-2018	α : 0~5000CPS β : 0~50000CPS	中国计量科学研究院	DLhd2025-01189	2025.4.10~2026.4.9

(2) 质量保证

①根据核医学科原有工作场所的分布，结合本项目的实际情况，在核医学科原项目可能存在污染的各工作场所、本项目拟开展工作的新增场所、环境敏感目标以及周边环境布设监测点位，充分考虑监测点位的代表性和可重复性，以保证监测结果的科学性和可比性；

②严格按照《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）以及《表面污染测定第一部分： β 发射体（ $E_{\beta\text{max}} > 0.15\text{MeV}$ ）和 α 发射体》（GB/T14056.1-2008）进行监测；

- ③监测仪器每年定期送有资质计量部门检定或校准，合格后方可使用；
- ④监测人员持证上岗；
- ⑤监测报告经三级审核后签发，保证监测结果的准确性。

(3) 监测结果

西安交通大学第一附属医院榆林医院病房综合楼内外环境 γ 辐射剂量率监测结果见表 8-2，病房综合楼负一层核医学科各工作场所、衰变池及周边环境 γ 辐射剂量率监测结果见表 8-3，医院核医学科各工作场所及周边环境 β 表面污染监测结果见表 8-4 所示。

表 8-2 医院病房综合楼内外环境 γ 辐射剂量率监测结果

序号	监测点位描述	γ 辐射剂量率（nGy/h）		备注
		均 值	标准偏差	
A1	病房综合楼室外环境（绿化带）	53.5	0.6	室外
A2	病房综合楼室外环境（院区道路）	52.1	0.3	室外
A3	病房综合楼核医学科候诊大厅	56.4	0.5	室内

说明：1、表中结果已扣除仪器对宇宙射线响应值,此处宇宙射线响应值为 20.08nGy/h；

2、按照《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），使用 ^{137}Cs 作为检定/校准参考辐射源时，换算系数为 1.20 Sv/Gy；

3、监测时，仪器探头距离地面高度 1m；

4、本报告仅对本次监测点位及监测结果负责。

表 8-3 医院病房综合楼负一层核医学科各工作场所、衰变池及周边环境 γ 辐射剂量率监测结果

序号	监测点位描述 (监测时医院核医学科已停诊)	γ 辐射剂量率 (nGy/h)		备注
		均 值	标准偏差	
1	一更	103	2.1	
2	二更	107	1.8	
3	药物分装标记室	104	3.0	
4	药物缓冲间	107	1.7	
5	原料缓冲间	106	3.3	
6	质控室	103	2.5	
7	注射室	101	3.6	
8	SPECT 注射室	105	4.1	
9	SPECT 机房	101	2.3	
10	SPECT 留观室	95.0	2.6	
11	SPECT 专用卫生间	129	4.5	
12	SPECT 候诊区	108	2.7	
13	固废间	130	2.6	
14	储源室	96.0	2.3	
15	PET 候诊室 1	93.1	2.0	
16	PET 候诊室 2	92.1	3.0	
17	PET 候诊室 3	84.5	2.3	
18	PET 专用卫生间	87.3	2.8	
19	PET 机房	86.4	2.3	
20	卫生淋洗间	83.5	1.9	
21	控制室	89.3	3.0	
22	核医学科入口卫生间	86.4	2.5	
23	控制廊	81.6	1.5	
24	患者通道走廊	95.0	3.9	
25	患者出口区走廊	85.4	2.2	
26	SPECT 注射窗口外表面	83.5	1.8	外表面 30cm 处
27	PET 注射窗口外表面	82.6	1.8	
28	药物分装标记室手套箱表面	81.6	2.2	
29	药物分装标记室铅废物桶表面	82.6	1.8	
30	质控室手套箱表面	85.4	2.3	
31	注射室手套箱表面	88.3	1.5	
32	注射室铅废物桶表面	83.5	2.4	
33	固废间铅废物桶表面	82.6	3.1	
34	放疗科办公室 1	83.5	1.9	
35	放疗科办公室 2	81.6	2.0	
36	放疗科电子直线加速器控制室	90.2	2.6	
37	放疗科后装机控制室	88.3	2.4	

说明：1、表中结果已扣除仪器对宇宙射线响应值，此处宇宙射线响应值为 20.08 nGy/h；

2、按照《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），使用 ^{137}Cs 作为检定/校准参考辐射源时，换算系数为 1.20 Sv/Gy；

3、监测时，仪器探头距离地面高度 1m；

4、本报告仅对本次监测点位及监测结果负责。

续表 8-3 医院病房综合楼负一层核医学科各工作场所、衰变池及周边环境 γ 辐射剂量率监测结果

序号	监测点位描述 (监测时医院核医学科已停诊)	γ 辐射剂量率 (nGy/h)		备注
		均 值	标准偏差	
38	高压氧舱设备间	86.5	2.2	
39	核医学科顶部绿化草坪	54.1	0.3	
40	后勤综合楼	68.8	0.7	
41	病房综合楼	73.4	0.7	
42	高压氧舱室	74.0	0.9	
43	衰变池顶部西侧	67.0	0.9	
44	衰变池顶部东侧	68.7	0.7	

- 说明：1、表中结果已扣除仪器对宇宙射线响应值，此处宇宙射线响应值为 20.08 nGy/h；
 2、按照《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），使用 ^{137}Cs 作为检定/校准参考辐射源时，换算系数为 1.20 Sv/Gy；
 3、监测时，仪器探头距离地面高度 1m；
 4、本报告仅对本次监测点位及监测结果负责。

表 8-4 医院病房综合楼负一层核医学科各工作场所表面污染监测结果

序号	监测点位描述	β 表面污染 (Bq/cm ²)	备注
1	一更地面及墙面	<MDL	
2	二更地面及墙面	<MDL	
3	药物分装标记室地面及墙面	<MDL	
4	药物分装标记室手套箱表面	<MDL	
5	药物分装标记室工作台面	<MDL	
6	药物分装标记室门把手	<MDL	
7	药物分装标记室铅废物桶表面	<MDL	
8	药物缓冲间地面及墙面	<MDL	
9	原料缓冲间地面及墙面	<MDL	
10	注射室地面及墙面	<MDL	
11	注射室手套箱表面	<MDL	
12	注射室工作台面	<MDL	
13	注射室门把手	<MDL	
14	质控室地面及墙面	<MDL	
15	质控室工作台面	<MDL	
16	质控室门把手	<MDL	
17	SPECT 注射室地面及墙面	<MDL	
18	SPECT 机房地面及墙面	<MDL	
19	SPECT 机房床面	<MDL	
20	SPECT 留观室地面及墙面	<MDL	
21	SPECT 专用卫生间地面及墙面	<MDL	
22	SPECT 候诊区地面及墙面	<MDL	
23	固废间地面及墙面	<MDL	
24	固废间铅废物桶表面	<MDL	
25	患者通道走廊地面	<MDL	
26	患者出口区走廊地面	<MDL	
27	衰变池井盖表面	<MDL	

- 说明：1、表中监测结果已扣除本底值；
 2、监测仪器的最低检测限 MDL 为 0.05 Bq/cm²；
 3、本报告仅对本次监测点位及监测结果负责。

8.2 环境质量现状评价

由表 8-2 可知，西安交通大学第一附属医院榆林医院病房综合楼内外环境中室内 γ 辐射剂量率监测值为 56.4 nGy/h，室外 γ 辐射剂量率监测值为 52.1~53.5nGy/h。监测结果表明：本项目所在地室内外 γ 辐射剂量率监测值与榆林市 γ 辐射剂量率调查结果（见表 8-3，数据来源：《中国环境天然放射性水平》（中国原子能出版社，2015 年）中“榆林市 γ 辐射剂量率调查结果（室内：56~129nGy/h，室外：33~87nGy/h）”相当，处于正常环境本底水平，辐射环境质量现状无异常，项目所在区域辐射环境质量现状良好。由表 8-3 和表 8-4 监测结果可得出，本项目医院核医学科各工作场所、衰变池及周边环境 γ 辐射剂量率检测结果均为天然本底水平， β 表面污染均低于最低检测限，表明本项目所在地目前没有放射性物质的残留。

表 8-6 榆林市原野、道路及室内 γ 辐射剂量率调查结果 单位：nGy/h

项目	原野	道路	室内
范围	33~87	33~82	56~129
按点平均均值	55	56	91
标准差	11	10	14

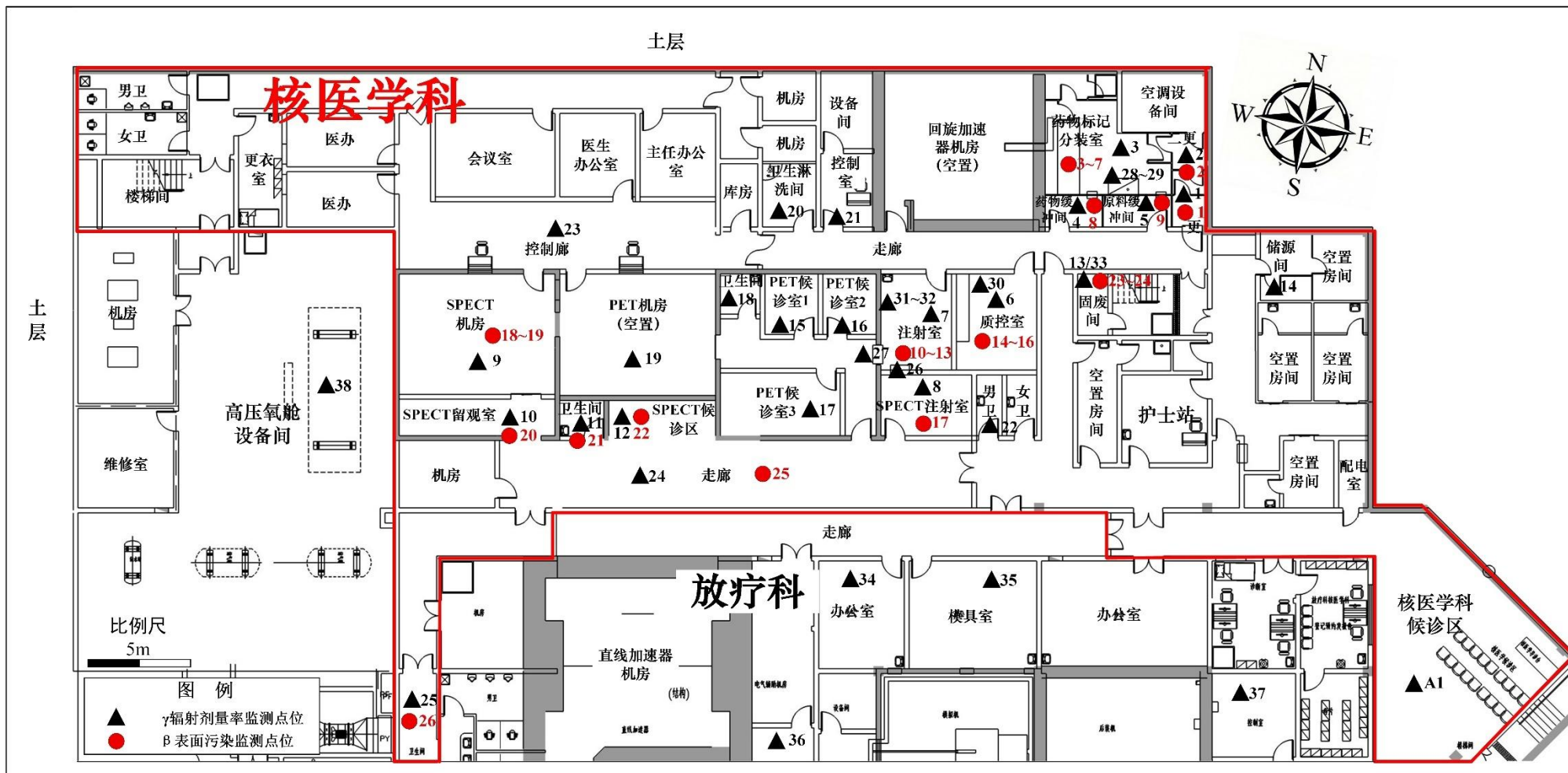


图 8-1 西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科各工作场所及周边环境 γ 辐射剂量率及 β 表面污染监测点位示意图 1

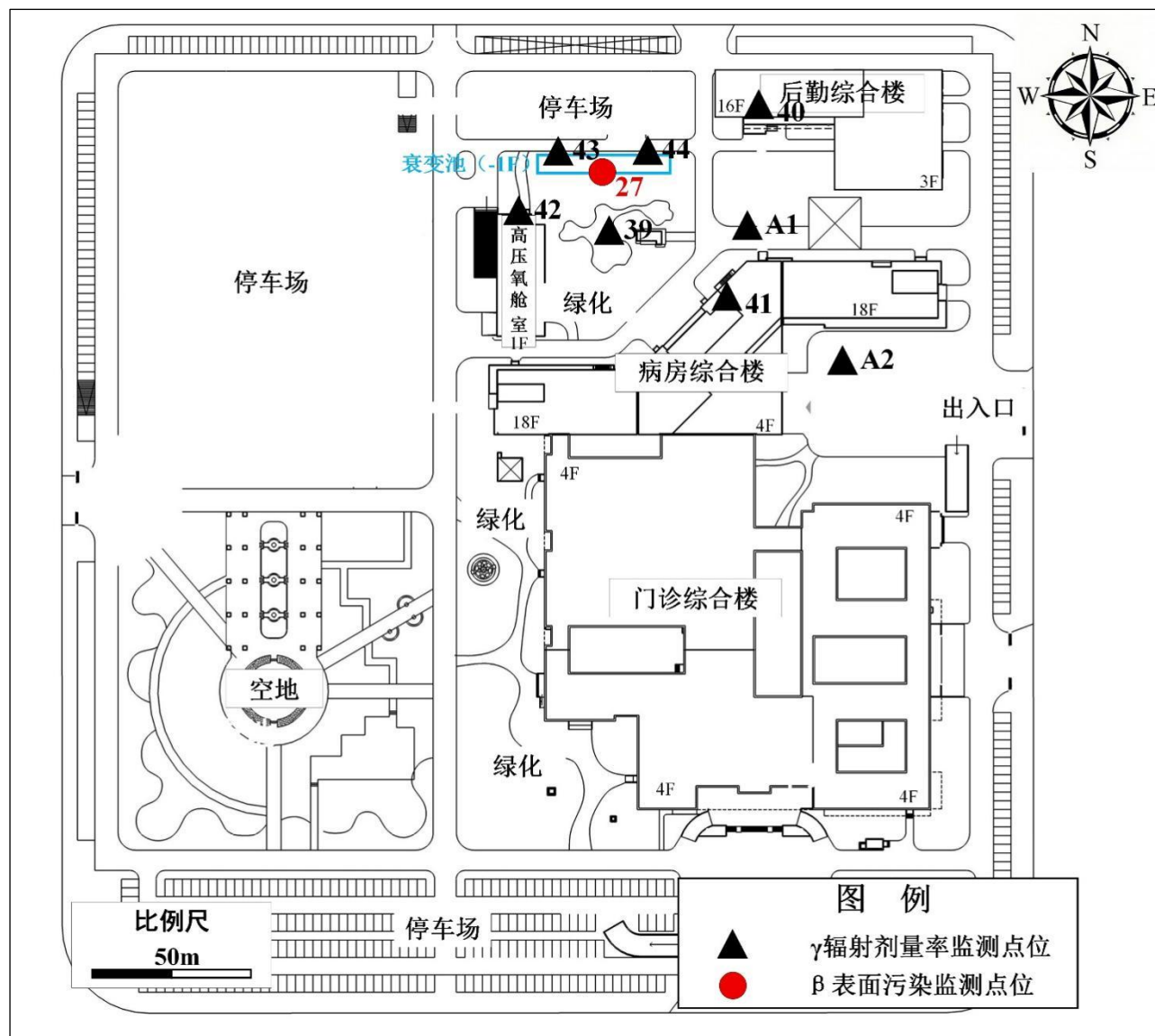

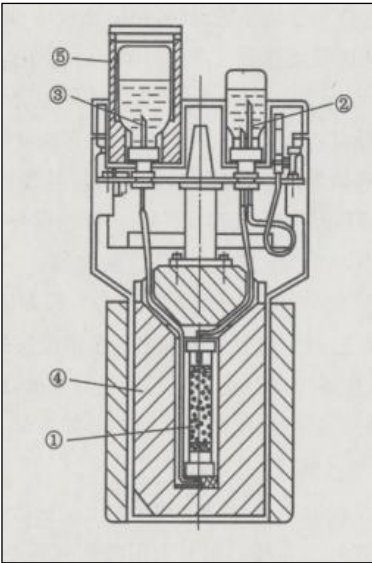


图 8-2 西安交通大学第一附属医院榆林医院病房综合楼核医学科周边环境 γ 辐射剂量率及 β 表面污染监测点位示意图 2

表 9 项目工程分析与源项

<p>西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科改造核技术利用建设项目可分为两部分：（1）使用 ^{99m}Tc 药物（采购 ^{99}Mo-^{99m}Tc 发生器淋洗制备 ^{99m}Tc）进行 SPECT 显像检查工作；（2）在 PET-CT 机房内安装使用 1 台 PET-CT（属于Ⅲ类射线装置），使用非密封放射性物质 ^{18}F 药物（外购）开展 PET-CT 显像诊断工作。</p> <p>9.1 ^{99m}Tc 放射性核素制备</p> <p>9.1.1 ^{99}Mo-^{99m}Tc 发生器工作原理</p> <p>本项目拟使用购置的钼锝（^{99}Mo-^{99m}Tc）发生器进行淋洗、分装、标记得到的 ^{99m}Tc 药物。^{99m}Tc 核素一般用于 SPECT 进行功能代谢显像，通过病灶部位对药物的摄取了解病灶功能代谢状态，从而对疾病正确诊断。^{99m}Tc 为 γ 光子发射体，可用于人体各重要脏器的形态和功能显像。</p> <p>钼锝（^{99}Mo-^{99m}Tc）发生器内含母体核素 ^{99}Mo，能产生子体核素 ^{99m}Tc。其具体工作原理为：^{99}Mo 以钼酸铵的形式溶解于氨水中，再转至 0.01mol/L 盐酸体系，pH=3~3.5 条件下，^{99}Mo 以 $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ 吸附在 Al_2O_3 色层柱上，$^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ 衰变时产生 ^{99m}Tc，^{99m}Tc 以 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 的形式存在，由于两者电荷不同，可利用 Al_2O_3 对其吸附能力差异，通过生理盐水将 ^{99m}Tc 淋洗下来，而母体仍留在发生器内。本项目使用的 ^{99}Mo-^{99m}Tc 发生器见图 9-1。</p> <div><div></div><div></div></div> <p>左 ^{99}Mo—^{99m}Tc 发生器实物图 右 ^{99}Mo—^{99m}Tc 发生器内部结构图</p> <p>1.（吸附 ^{99}Mo 的）色谱柱 2. 双针插座（插盐水瓶）3. 单针插座（插真空瓶）4. 铅屏蔽体 5. 铅防护容器</p> <p>图 9-1 ^{99}Mo-^{99m}Tc 发生器</p>

9.1.2 淋洗、分装操作流程及产污环节图

放射性工作人员根据患者的人数、诊疗内容和药物注射量向有资质的厂家订购 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器，厂家将 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器运至医院后，由医院核医学科药品管理人员与送货人员办理“点对点”交接手续，并对发生器数量、活度进行核对后进行登记，将钼铯发生器经药物提升电梯送至医院核医学科后经过原料通道传递窗送进药物制备间手套箱储存。核医学科工作人员根据每批次患者使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的药物量，在药物制备间手套箱内进行 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 注射液淋洗、制备、标记、分装，在质控室内进行质控，然后将包装制成的针剂，在注射室 SPECT 注射窗口给患者进行静脉注射。本项目 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 生产和分装工艺流程如下：

(1) 原料的采购及入库暂存

本项目 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器拟从有资质的厂家订购并由该公司负责运输到医院。医院根据订单量采购发生器，本项目计划每周购买两批，每批购买一个发生器，发生器自带 10mmPb 铅防护。采购的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器铅罐由供应商于早上 7:00 前经药物提升间送至医院核医学科，经过原料通道送至药物制备间手套箱内暂存。

(2) 淋洗、分装前准备

放射性工作人员汇总 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 注射所需剂量（使用时间与活度），制作标签（载明时间与活度），逐一贴在外包装防护套上。

(3) 淋洗、标记、分装工作

淋洗：在药物制备间手套箱（正面底面屏蔽为 10mmPb，其余四面为 5mmPb）内用 0.9%的生理盐水对发生器吸附柱进行淋洗，准备生理盐水及负压瓶，打开钼铯发生器，生理盐水瓶插入钼铯发生器的生理盐水插头，负压收集瓶掺入钼铯发生器 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 插头（注意负压瓶事先用 6mmPb 的淋洗罐装好），洗出子体核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 装入专用的密封药瓶（6mmPb）内。

活度测量：上一步制得的淋洗液在药物制备间内用活度计进行测量，辐射工作人员用注射器吸取少量淋洗液，垂直放入活度计井中，测量其放射性活度，得出该瓶淋洗液的比活度。

标记：经过活度测量的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 装在 10mmPb 的标记罐内在操作台进行标记操作，将淋洗液转移至冻干药盒，并充分摇匀，稀释到预设体积，室温放置约 5min。

分装：分装方式采用注射器抽取的方式，根据不同病例的核素需求量在超净台内分装至一次性无菌注射器内，分装好的针剂置于专用外包装防护套（5mmPb）内。

（4）质控

在批量生产结束时，会保留一部分样品做强制性的质控测试。经过标记、分装的注射液（约 1mCi 左右），使用 10mmPb 厚的防护铅罐依次经过成品通道和走廊后通过传递窗送至质控室，在质控室操作台上按照质控项目依次对淋洗液进行质量检验。其关键质控项目和方法包括：①放射性活度测定：使用活度计测量样品的放射性强度，确保剂量准确；②放射化学纯度分析：通过纸层析法、薄层层析法（TLC）或高压液相色谱法（HPLC）等方法，测定目标化学形态的放射性占比；③外观检查：目测药物的澄明度、均匀度和颜色，确保无可见杂质或沉淀；④pH 值测定：采用精密 pH 试纸快速检测，确保药物酸碱度在安全范围内，避免对患者造成刺激；⑤其他项目：如化学纯度、颗粒物等。质控时打开铅罐，蘸取少量药品点板，再将涂有少量放射性药品的测试板放入设备中自动检测。由于测试板上涂有的放射性药物极少，质控时间较短，因此对工作人员的辐射影响基本可以忽略。

（5）转移

质控合格后，采用专用外包装防护套（5mmPb）包装的针剂放入注射器转运盒内（6mmPb），每个转运盒最多存放 8 支注射器，依次经过成品通道和走廊后送入注射室。

（6）给药

患者给药采用静脉注射方式进行，工作人员（作好防护措施，穿铅衣、戴铅眼镜等）从注射器转运盒内取出带包装防护套的注射器，在注射室注射窗口（10mmPb 当量）进行注射给药。

本项目 ^{99m}Tc 药物淋洗、分装等操作流程以及产污环节示意图见图 9-2。

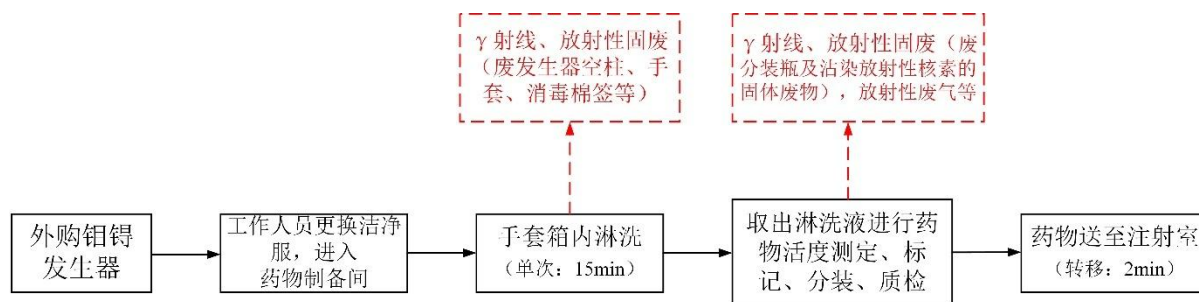


图 9-2 ^{99m}Tc 淋洗、分装操作流程以及产污环节图

9.1.3 ^{99m}Tc 用量情况

本项目 SPECT 使用非密封放射性物质 ^{99m}Tc 进行显像检查，^{99m}Tc 半衰期为 6.02h，医院根据临床诊断所需药物的使用量在核医学科药物制备间手套箱内通过 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器淋洗制备得到 ^{99m}Tc 药物。医院拟购置的 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器规格为 500mCi（即 1.85×10^{10} Bq），⁹⁹Mo、^{99m}Tc 半衰期短，故 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器有效使用时间短，每周需使用 2 个发生器。根据医院计划，本项目 SPECT 每日最多接诊患者 16 人，每天工作 8 小时，每周工作 5 天，每年工作 50 周，每人最大药物注射量 25mCi。本项目 ^{99m}Tc 在药物制备间淋洗制备分装，然后根据治疗计划将分装好的药物通过缓冲间传递窗送出后依次经过成品通道和走廊后向西送进注射室，由注射室工作人员在注射窗口对病人给药。因 ^{99m}Tc 半衰期较短，医院计划每天上午 8 点开始最多分 4 批注射，每批注射 4 人（每次注射 1 人，依次注射），每批注射间隔时间约 60 分钟。考虑到放射性药物自身的衰变，为保证每批次最后一位患者注射 ^{99m}Tc 药物量为 25mCi，拟采取增加放射性药物制备活度的方式确保活度满足使用要求，即要考虑放射性药物的使用量也要考虑药物的衰变因素。根据半衰期衰减公式和医院注射计划，估算出医院 ^{99m}Tc 的日实际用量至少为： $4 \times 25\text{mCi} \times (1 + 2^{(1/6.02)} + 2^{(2/6.02)} + 2^{(3/6.02)}) = 479.35\text{mCi}$ （ 1.77×10^{10} Bq）。

因此本项目 SPECT/CT 拟使用放射性核素相关情况见下表所示。

表 9-1 项目 SPECT/CT 使用放射性核素相关情况及参数一览表

核素名称	状态	半衰期	衰变方式	患者每人每次核素用量（Bq）	核素日最大操作活度（Bq/d）	核素年最大使用量（Bq/a）	周围剂量当量率常数 $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{h} \cdot \text{MBq})$		用途
							裸源	患者或受检者体内	
^{99m} Tc	液体	6.02h	同质异能跃迁（IT）	9.25×10^8 （25mCi）	1.77×10^{10}	4.425×10^{12}	0.0303	0.0207	SPECT 显像

说明：^{99m}Tc 核素日最大用量和年最大使用量均已考虑药品制备后至患者给药期间核素的衰变损失。

9.1.4 污染物以及源项分析

一、正常工况

①辐射：本项目 ^{99m}Tc 淋洗、分装及质控过程中，^{99m}Tc 会发生同质异能跃迁，产生能量为 140keV 的 γ 射线，可能会对工作人员以及周边环境产生辐射影响。

②放射性固体废物：淋洗过程中产生废的 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器，年产生量约 50 个；淋洗、分装过程中，产生的 ^{99m}Tc 的废淋洗真空瓶、手套、消毒棉签、废分装瓶、工作人员废操作手套、吸附放射性废气产生的废活性炭等。

③放射性废水：^{99m}Tc 制备过程中使用的淋洗真空瓶为一次性使用，无容器的清洗

操作，制备过程中无放射性废水产生；工作人员淋洗、分装完成后，使用的一次性手套和沾染放射性药物的纸巾、酒精棉球等作为放射性固废处理。

④放射性废气： ^{99m}Tc 药物淋洗、分装在手套箱内进行，手套箱、钼锝发生器均负压条件下工作，此过程可能产生极少量放射性废气，放射性废气经手套箱排风管道排出，经活性炭吸附后，废气经专用管道引至楼顶排放。

二、事故工况

^{99m}Tc 淋洗、分装过程中，工作人员因操作不当，可能会出现放射性药品洒漏情况，进而可能对工作台面、地面、墙面造成表面污染；一般采取干法去污措施，首先使用吸水纸擦拭，然后用酒精棉球反复擦拭直至检测合格，擦拭用的吸水纸、酒精棉球等作为放射性固废处理。

9.2 SPECT 与 PET/CT 显像检查

9.2.1 工作原理

(1) SPECT

SPECT即单光子发射计算机断层扫描，通过 γ 探测器来探测病人体内组织发出的 γ 射线强度，并对探测到的 γ 光子进行计算处理，从而形成人体内部器官组织图像。人体自然发出的 γ 射线不能用来做诊断，要想获得人体内部病区情况，需要医疗人员向受检者体内注射一定活度的放射性核素，探测核素发出的 γ 射线，可知人体内器官、组织和影像的变化，从而获得病灶信息。常用发射单光子的核素药物如 ^{99m}Tc 、 ^{201}Tl 、 ^{131}I 等。

SPECT基本结构包括：旋转探头装置、电子线路、数据处理和图像重建的计算机系统。SPECT探头绕人体一周，在旋转时每隔一定角度（ 3° 或 6° ）采集一帧图片，然后经滤波反向投影法或迭代重叠法或傅里叶变化法等方法，用电子计算机自动处理，将图像叠加，重建为该脏器的横断面、冠状面、矢状面或任何需要的不同方位的断层、切面图像，最后极大提高了诊断的灵敏度和正确性。SPECT机主要用于探测人体内放射性核素发射出的 γ 射线并成像，用于详细分析病灶区的厚度和形态等病征信息。SPECT即可得出功能代谢显像，又可得出解剖学显像，对于病灶定位、病症诊断极具特殊优势，帮助医生降低误诊率，使医疗机构整体诊疗水平获得提高。

本项目SPECT机利用发射单光子的核素药物如 ^{99m}Tc 注射入体内，在体内参与特定生理或生化过程，从而进行显像检查。本项目SPECT机主要使用放射性核素为 ^{99m}Tc 作为显像剂，将放射性药物注入人体，经代谢后在脏器内外或病变部位和正常组织之间形成放

射性浓度差异，通过计算机处理进行成像，该设备仅为SPECT机不具备CT功能。

本项目使用的显像核素 ^{99m}Tc 半衰期为 6.02h，主要通过 IT 衰变时产生的能量为 140keV 的 γ 射线进行疾病的诊断。当 ^{99m}Tc 通过注射方式进入体内后，随血液进入某些特定的组织器官，参与人体内的生理代谢过程。由于正常组织、病变组织在代谢过程中放射性浓度具有一定的差异，因此可以利用 SPECT 及探测 ^{99m}Tc 发射的 γ 射线，从而构建出图像，显示脏器和病变组织位置、形态、大小等。



图 9-3 本项目使用的 SPECT 设备示意图

(2) PET/CT

PET 是以代谢显像和定量分析为基础，通过使用人体主要元素的短寿命核素如 ^{18}F 作为示踪剂，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，由体外探测示踪剂引发正电子湮灭产生的一对 0.511MeV 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，用于诊断疾病。PET/CT 则是将 PET 和 CT（计算机体层显像）有机结合在一起，使用同一个检查床和同一个图像处理工作站，将 PET 图像和 CT 图像融合，可精确地提供靶器官的解剖和功能双重信息，同时反映病灶的病理生理变化和形态结构，提高诊断的准确性。

本项目核医学科拟新增的 PET-CT 设备参数见下表所示。

表 9-2 本项目拟新增射线装置参数情况

射线装置名称	厂家、型号	最大管电压 kV	最大管电流 mA	数量	使用场所	类别
PET/CT	上海联影医疗科技股份有限公司，uMI Panorama 28C	140	833	1 台	核医学科 PET-CT 机房	III类

说明：本项目新增的 PET-CT 设备不包含校准源，校准源另行评价。

(3) 显像核素

西安交通大学第一附属医院榆林医院本项目使用显像核素为 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 两种，各核素特性如下：

① ^{18}F

^{18}F 主要用于医学诊断显像，基于示踪原理来显示体内生物代谢活动。 ^{18}F 半衰期为 109.8min 其发射 β^+ 衰变时产生的正电子，与负电子相结合后，能产生一对 γ 光子辐射（ $E=511\text{keV}$ ），经探测技术符合、图像重建，从而显示脏器或组织的代谢活动，主要应用于 PET/CT 进行诊断。

② $^{99\text{m}}\text{Tc}$

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 半衰期为 6.02h，主要通过 IT 衰变时产生的能量为 140keV 的 γ 射线进行疾病的诊断。

当 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 通过注射方式进入体内后，随血液进入某些特定的组织器官，参与人体内的生理代谢过程。由于正常组织、病变组织在代谢过程中放射性浓度具有一定的差异，利用 SPECT 进行探测 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发射的 γ 射线，并构建出图像，显示脏器和病变组织位置、形态、大小等。

9.2.2 PET/CT、SPECT 显像检查操作流程及产污环节图

本项目采用 ^{18}F 作为 PET/CT 显像剂， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射性药物作为 SPECT 显像剂，进行显像检查，其操作流程如下：

(1) 根据医生指导意见，需要接受全身或脏器显像检查的患者提前预约登记，制定剂量方案，确定用药量。对于 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物，医院自行购置钼铯发生器进行淋洗制备、分装，分装好的药物经质控后在注射室对患者进行注射给药； ^{18}F 药物根据病人用量情况，提前一天向药品厂家进行订购，由厂家将药物按照约定的时间送至医院核医学科，核医学科药物管理人员经核对活度、数量无误，登记入库。医院注射室内设置一个手套箱对 ^{18}F 显像药物进行分装，以满足显像诊断需求。

(2) 患者按约定时间在核医学科候诊区准备和等候，经核医学科入口处单向门禁区域，沿患者专用通道，到达 PET 注射窗口或 SPECT 注射间，工作人员穿戴好个人防护用品按计划取药，分别进行 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 给药，给药方式为静脉注射，同时核医学科采取依次叫号的方式，达到给药前和给药后的患者不交叉的目的。本项目不开展需要运动负荷环节的 SPECT 诊断。

(3) 给药后的 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 患者分别进入PET候诊室和SPECT候诊室等候, 进行检查前准备工作。

(4) 患者候诊完成, 分别按语音叫号进入PET/CT机房或SPECT机房, 工作人员穿戴防护用品, 进入检查室指导病人摆位, 摆位完成后, 工作人员进入控制廊开启设备进行图像摄影操作。

(5) PET/CT检查后的患者检查完成后, 先到留观室进行一段时间观察, 无异常情况经专用通道离开医院; SPECT检查完成后, 患者经过专用通道离开医院。工作人员读片、发报告。

PET/CT显像检查操作流程以及产污环节见图9-4, SPECT显像检查操作流程以及产污环节见图9-5。

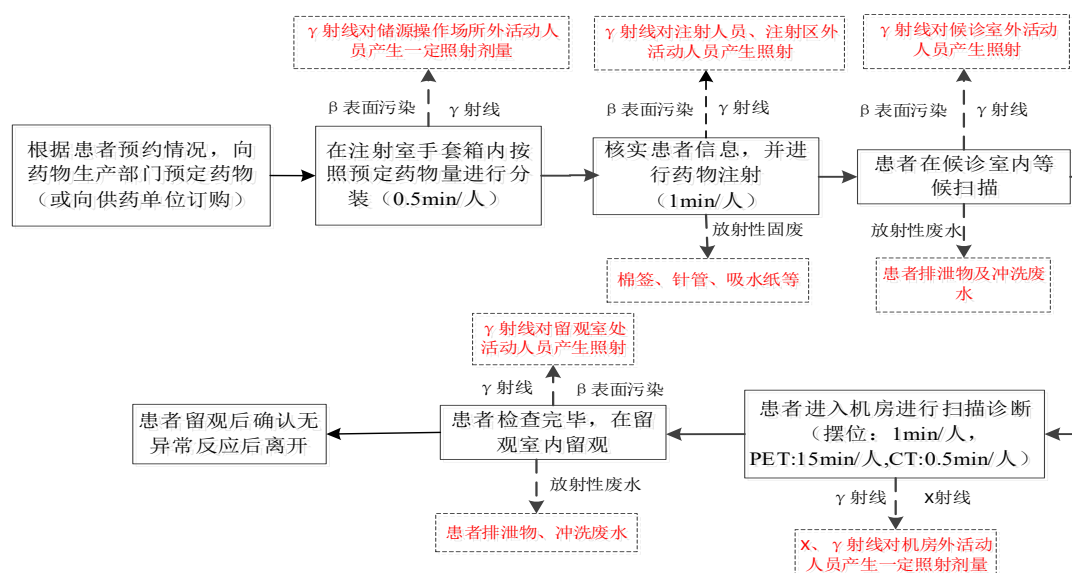


图 9-4 PET/CT 显像检查操作流程以及产污环节图

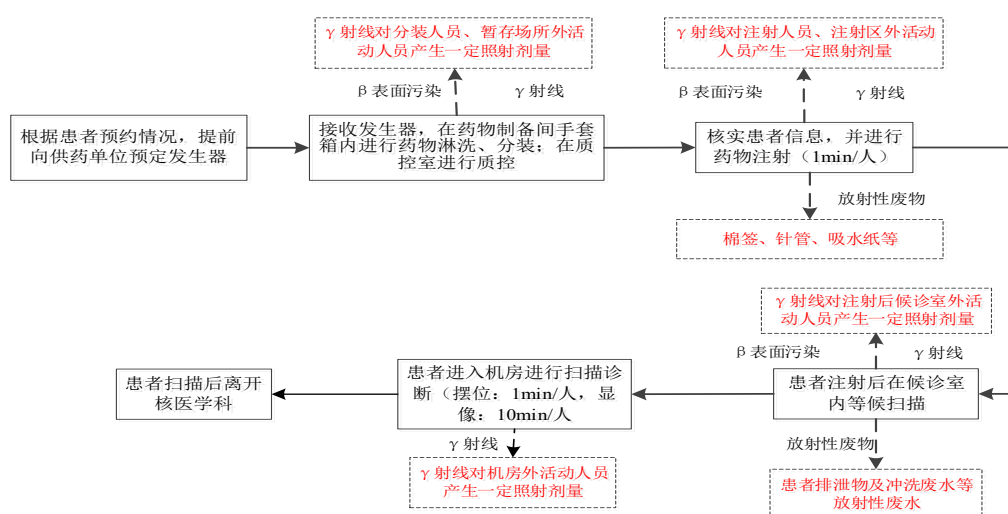


图 9-5 SPECT 显像检查操作流程以及产污环节图

9.2.3 ^{18}F 用量情况

本项目 PET/CT 使用非密封放射性物质 ^{18}F 进行显像诊断，药物来源为外购，半衰期为 109.8min，医院根据临床诊断所需药物的使用量向供药单位订购药物。供药单位在约定时间内，根据提前预定告知的放射性药品种类、活度、剂量和数量生产放射性药物。放射性药物采用 50mm 厚铅罐贮存，经 β 表面污染和外表面辐射剂量率检测合格后，将铅罐置于专用运输包装内，由专用运输车辆进行配送，运送至医院核医学科注射室。

根据医院计划，PET/CT 每天最多检查 30 人次，每周工作 5 天，每年工作 50 周。每人最大药物注射量 10mCi，因 ^{18}F 半衰期较短，计划分两个时段送药（上午 7:45 和下午 13:45），每个时段送 15 人药量。医院计划每个时段分 4 批注射，前 3 批每批注射 4 人，第 4 批注射 3 人，每批注射间隔时间约 45 分钟。考虑到放射性药物自身的衰变，为保证每批次最后一位患者注射 ^{18}F 药物量为 10mCi，拟采取增加放射性药物出厂活度的方式确保活度满足使用要求，即药物日实际最大操作量要考虑放射性药物的使用量和备用量。 ^{18}F 日实际使用量根据半衰期衰减公式和医院注射计划计算，至少为 $2 \times 10 \times (1 \times 4 + 2^{(45/109.8)} \times 4 + 2^{(90/109.8)} \times 4 + 2^{(135/109.8)} \times 3) = 468.2\text{mCi}$ ($1.73 \times 10^{10}\text{Bq}$)。医院药物日实际最大操作量考虑 ^{18}F 日实际用量+日备用量， ^{18}F 日备用量按照日实际用药量的一半考虑，则实际日最大操作量=日最大药使用量+日最大备用操作量，即医院 ^{18}F 的实际日最大操作量为 $468.2\text{mCi} + (468.2 \div 2) \text{mCi} = 702.3\text{mCi}$ ，即 $2.6 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。

因此本项目 PET-CT 拟使用的 ^{18}F 放射性核素相关情况见下表所示。

表 9-3 项目 PET-CT 使用放射性核素相关情况及参数一览表

核素名称	状态	半衰期	衰变方式	患者每人每次核素用量 (Bq)	日最大操作活度 (Bq/d)	核素年最大使用量 (Bq/a)	周围剂量当量率常数 $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{h} \cdot \text{MBq})$		用途
							裸源	患者或受检者体内	
^{18}F	液体	109.8min	EC、 β^+	3.7×10^8 (10mCi)	2.6×10^{10}	6.5×10^{12}	0.143	0.092	PET-CT 显像

说明：表中 ^{18}F 核素日最大操作量和年最大使用量已考虑药品的备用量以及药品到医院后至患者给药期间核素的衰变损失。

9.2.4 污染因子

(1) 正常工况

辐射： ^{18}F 半衰期为 109.8min，衰变方式为 β^+ 衰变，衰变产生的正电子湮没时产生 511keV 的 γ 射线； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物半衰期为 6.02h，通过 IT 衰变发出能量为 140keV 的 γ 射线， γ 射线会对核医学科工作人员以及周边环境产生辐射影响。PET/CT 属于 III 类射线

装置，进行 CT 扫描时，会产生 X 射线，X 射线经透射、漏射和散射，可能对工作场所外环境产生辐射影响。本项目使用的 SPECT 机不具备 CT 功能，因此不产生 X 射线。

放射性固体废物： ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物注射过程中产生放射性固体废物主要有：一次性手套、注射用的棉签、废手套、废注射器以及沾染放射性核素敷料、滤纸及擦拭工作台面地面的酒精棉球或吸水布等。

放射性废水：本项目 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 显像检查过程中产生放射性废水主要来自患者排泄物、冲洗废水以及工作人员清洗受污染衣服、手套及工作场所时可能带有微量放射性的废水。

放射性废气：本项目 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物分装操作在带有排风装置的手套箱内进行，手套箱内保持负压操作，由于 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 挥发性极弱，分装过程中仅有微量的放射性气体排出，经手套箱壁顶的活性炭吸附装置吸附处理后由专用通道通至楼顶排放，排放口高出建筑物屋顶。此外，PET/CT 设备曝光过程产生的 X 射线与空气发生作用，会吸收能量并通过电离作用产生少量的臭氧和氮氧化物气体。

（2）事故工况

放射性核素：因工作人员操作不当或其它因素造成容器破损，可能导致放射性药品洒漏污染地上或工作台面，出现 β 表面污染，甚至造成工作人员手和皮肤的污染及内照射。因保管不善发生放射性药品的被盗和丢失，从而导致潜在照射。

射线装置：摆位人员未撤离 PET/CT 机房，控制室内人员即开启设备进行扫描，将产生 X 射线误照射。

9.3 核医学科的改进情况分析

西安交通大学第一附属医院榆林医院原有核医学科工作场所仅涉及使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物（采购 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）进行 SPECT 显像检查工作，本项目要增加使用非密封放射性物质 ^{18}F 药物（外购）开展 PET-CT 显像诊断工作。依据《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）中相关要求，医院现有的核医学科工作场所平面布局、放射性废气废水的路径以及部分辐射安全防护措施均不符合现阶段的标准要求，如：药物标记分装室及配套房间布局不合理、放射性药物及废物的存放范围较大、核医学科工作场所的人员路径与放射性药物路径规划不合理、放射性药物运送路径设计不合理、未设置卫生缓冲区以及针对 PET 显像检查未设置留观室、急救室等必要的功能场所等问题。针对以上问题，本项目医院对核医

学科进行了重新设计，重新调整了平面布局，增加了相应的功能房间，进一步优化人员路径，达到各路径相对独立，医生与患者通道分开，人员与放射性药物通道不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷的目的，同时优化了放射性废气废水的路径，工作场所的气流流向应遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，控制区的出入口已设立卫生缓冲区等。本项目在修改调整了以上的问题后，医院核医学科的工艺流程、平面布局及人流物流的路径规划等方面均已满足核医学科的辐射安全管理要求。

9.4 核医学科源项分析

本项目 SPECT 使用的放射性药物 ^{99m}Tc 是由 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗制备得到的， ^{99m}Tc 衰变主要产生 γ 射线。本项目 PET/CT 使用的放射性药物 ^{18}F 主要产生 γ 射线，PET/CT 扫描时会产生 X 射线。此外，项目正常运行期间还会产生一定量的放射性“三废”及臭氧、氮氧化物等非放射性废气。本项目核医学科正常运行状态下可能产生的污染途径如下：

① γ 射线

由于 γ 射线具有较强的穿透性，放射性药物 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 分别在药物制备间和注射室手套箱暂存，在注射室给药过程中，对其周围环境和工作人员会产生一定辐射影响；经注射进入患者体内后，患者本身短时间内成为“辐射体”，在衰变过程产生的 γ 射线造成患者周围辐射水平升高；患者在候诊、显像诊断、留观过程中，短期内对近距离接触的人员造成影响，部分 γ 射线穿透候诊室、机房、留观室的实体屏蔽对屏蔽体外活动人员产生一定辐射影响，污染途径为 γ 射线外照射。

② X 射线

PET/CT 开机扫描时产生的 X 射线。X 射线穿透机房的实体屏蔽造成机房周围环境辐射水平升高，人员在此区域活动时受到一定的照射剂量影响，污染途径为 X 射线外照射。

③ β 表面污染

由于放射性药物 ^{18}F 为液体药物，在存放、给药和注射过程中出现撒漏，会造成工作场所的 β 表面污染； ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器在淋洗制备的过程中会产生 β 表面污染；患者注射或口服放射性药物后，其分泌汗液、排泄物等可能造成候诊、诊断工作场所的 β 表面污染。放射性药物所释放出的 β 射线在受到屏蔽体的阻挡时，会产生韧致辐射（本质为 X 射线），其会对工作场所内外环境产生一定的辐射影响。

④ 放射性废水

本项目核医学科辐射工作场所产生的放射性废水主要为患者的排泄物及冲洗废水和工作人员清洗受污染衣服、手套及工作场所时可能带有微量放射性的废水等。

根据医院提供的资料，核医学科每天接受 ^{99m}Tc 显像检查人数为 16 人，接受 ^{18}F 显像检查人数为 30 人，从保守角度考虑每名受检者均入厕，每次排泄物（排尿）排出量为 300mL，每人排泄 2 次，参考《节水型卫生洁具》（GB/T31436-2015），节水型坐便器平均用水量应不大于 5L，患者洗手用水量按 1L·次计，则患者每人废水排放量总计约为 12.6L（已包含留观时患者产生放射性的废水量），每天废水产生量 0.580 m^3 ；工作人员在完成淋洗、分装、质控及注射药物等工作后，一般将沾染药物的手套、医用器皿和擦拭台面的废抹布吸水纸及酒精棉球等均作固体放射性废物处理，暂存于放射性固废间，但少数情况下会有少量的清洗废水，预计每天产生量为 $0.1\text{ m}^3/\text{d}$ ，则医院核医学科每天放射性废水产生量为 0.680 m^3 ，保守估算年废水产生量为 170 m^3 。

⑤ 放射性废气

项目使用的放射性药物 ^{99m}Tc 淋洗制备和分装过程在药物制备间内的手套箱内进行，手套箱与钼锝发生器均在负压条件下工作，此过程无溶液挥发，基本不会产生放射性废气；项目使用的放射性药物 ^{18}F 分装过程在注射室内的手套箱内进行，手套箱在负压条件下工作，可能产生极少量的放射性废气，放射性废气进入专用通风管道引至楼顶经活性炭吸附后排放，可以避免核素进入空气从而产生辐射影响。

核医学科辐射工作场所药物制备间与注射室的手套箱均设置负压排风系统（与核医学科清洁区分开），在各功能房间内设分支风管，将室内可能含放射性核素的废气汇至排风主管，经活性炭吸附过滤后高出建筑物屋顶排放。

⑥ 放射性固体废物

^{99m}Tc 和 ^{18}F 的显像检查过程主要产生一次性注射器、针头、棉签、注射台上的吸水纸、废酒精棉球、口罩、乳胶手套等医疗废物、废气处理产生的废活性炭等，以及核医学科清洁用的废抹布及拖布等清洁用品。医院药物制备过程中产生的废 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器暂存于废发生器暂存间，根据数量每半年或一年由供货商回收处置。医院每天显像检查共约 46 人，按照患者每人每次平均产生 0.05 kg 放射性废物进行初步估算，年检查 250 天，其年产生放射性固体废物约为 575 kg ；清洁时用过的抹布及拖布产生量约为 5 kg/a 。年产生量总计 580 kg 。

核医学科排风系统的活性炭预计每年更换一次，每次填装量为 50kg，则废活性炭产生量为 50kg/a。因此医院核医学科每年产生的放射性固体废物总量为 630kg。

医院在核医学科南侧设置了放射性固废间，核医学科产生的含 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的放射性废物在放射性固废间暂存时间超过 30 天后，由核医学科工作人员使用辐射剂量率仪和 α 、 β 表面污染监测仪对其表面进行监测，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 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 后，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。

表 10 辐射安全与防护

10.1 核医学科辐射工作场所布局

10.1.1 平面布局

本项目核医学科设置于西安交通大学第一附属医院榆林医院病房综合楼负一层西北侧，改建后的平面布局图见图1-5。项目核医学科平面布局与《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）的符合性分析见表10-1。

表 10-1 核医学科平面布局合理性分析

标准名称	具体要求	本项目情况
《核医学辐射防护与安全要求》 （HJ1188-2021）	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。	本项目核医学科设置于病房综合楼负一层，楼上为室外绿化、楼下无建筑，东侧和北侧为土层、西侧为高压氧舱设备间，南侧为放疗科，核医学科位于无人长期居留的建筑物的一端，位置相对独立，有单独出入口，出口为专用电梯，出口外为院内道路及绿化，非人群稠密区；本项目核医学科远离产科、儿科及食堂，核医学科放射性工作区域与周围非放射性工作场所设单向门隔离。
	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。	本项目放射性废气通过排风管道引至高压氧舱室楼顶经活性炭吸附处理后排放，排风口高出屋顶 3m（高压氧舱室楼高 5m），排风口朝上，排风口已尽量远离周边高层建筑。
	核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。	本项目核医学科药物制备间、注射室、药物提升间、放射性固废间等区域设置较为集中，布局紧凑，减少了放射性物质的存放范围；给药后患者主要在候诊室、留观室活动，设置有单向门限制其路径；给药后患者与工作人员路径不交叉。
	核医学工作场所应合理布局，住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置；同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局，控制区应相对集中，药物制备间集中在一端，防止交叉污染。尽量减小放射性药物、放射性废物的存放范围，限制给药后患者的活动空间。	本项目已设计相对独立的放射性药物、工作人员、患者、放射性废物路线；患者通道与工作人员通道分离，患者与放射性药物通道不交叉。本项目核医学科采取依次叫号的方式，达到给药前和给药后的患者不交叉的目的。
	核医学工作场所应设立相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开，减少给药后患者对其他人员的照射。注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉，人员与放射性药物通道不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷。	

续表 10-1 核医学科平面布局合理性分析

标准名称	具体要求	本项目情况
《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）	核医学工作场所宜采取合适的措施，控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动，避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲区，为工作人员和患者提供必要的可更换衣物、防护用品、冲洗设施和表面污染监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。	本项目核医学科设置有单向门禁限制无关人员不得进入给药区及药物制备工作区，通过导向标识、单向门等措施限制给药后患者在给药后留观室活动，通过专用通道离开，给药后留观室旁设有患者专用卫生间；工作人员进入控制区的出入口设有卫生缓冲间，配备可更换衣物、防护用品、冲洗设施、表面污染监测仪器等。
《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）要求	不应邻接产科、儿科、食堂等部门，相对独立布置或集中设置，宜有单独出、入口，出口不宜设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。	本项目核医学科远离产科、儿科及食堂，独立布置于负一层，设有单独出入口，患者经专用电梯至高压氧舱室一层出口直接离开，出口外为院内道路及绿化，非人群稠密区。
	控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门等安全措施，限制患者或受检者的随意流动。	进入注射室等设置门禁及单向门，注射后通过专用通道从出口离开，限制患者随意流动。
	在分装和给药室的出口处应设计卫生通过间，进行污染检测。	药物制备间和注射室出入口位置均设置卫生缓冲间或去污间。
	对于单一的诊断工作场所应设置给药前患者或受检者候诊区、放射性药物贮存室、分装给药室（可含质控室）、给药后患者或受检者候诊室（根据放射性核素防护特性分别设置）、质控（样品测量）室、控制室、机房、给药后患者或受检者卫生间和放射性废物储藏室等功能用房。	拟设置核医学候诊区、药物制备间、注射室、质控室、SPECT 和 PET/CT 注射窗口、SPECT 和 PET/CT 候诊室及专用卫生间、留观室，SPECT 和 PET/CT 显像检查机房、放射性固废间等功能用房。
	诊断工作场所和治疗工作场所都需要设置清洁用品储存场所、员工休息室、护士站、更衣室、卫生间、去污淋浴间、抢救室或抢救功能区等辅助用房。对于综合性的核医学工作场所，部分功能用房和辅助用房可以共同利用。	本项目核医学科设有核医学等候区、护士站、洁具间、主任办公室、医生办公室（兼休息室）、更衣室、卫生间、淋浴间、急救室等。
	核医学工作场所的布局应有助于开展工作，避免无关人员通过。治疗区域和诊断区域应相对分开布置。根据使用放射性药物的种类、形态、特性和活度，确定核医学治疗区(病房)的位置及其放射防护要求，给药室应靠近病房，尽量减少放射性药物和给药后患者或受检者通过非放射性区域。	本项目核医学工作场所的设计布局有助于开展工作，避免无关人员通过，显像检查区域布置紧凑合理。

综上所述，本项目核医学科改建后的平面布局符合《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）相关要求，布局较为合理。

10.1.2 非密封放射性物质工作场所分类

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中非密封放射性物质工作场所的分类原则，本项目核医学科工作场所分类见表 10-2。

表 10-2 核医学科各工作场所核素权重活度计算结果

区域	核素	日最大操作活度 (Bq)	毒性权重因子	操作修正因子	操作加权活度 (MBq)		类别
药物制备间	⁹⁹ Mo	1.85×10^{10}	100	100	18500	37000	II
	^{99m} Tc	1.85×10^{10}	1	1	18500		
注射室	¹⁸ F	2.6×10^{10}	1	1	26000	43700	II
	^{99m} Tc	1.77×10^{10}	1	1	17700		
质控室	^{99m} Tc	7.4×10^7	1	1	74		II
PET/CT注射后候诊室	¹⁸ F	2.96×10^9	1	10	296		II
PET/CT机房	¹⁸ F	1.11×10^{10}	1	10	1110		II
SPECT注射后候诊室	^{99m} Tc	1.48×10^{10}	1	10	1480		II
SPECT机房	^{99m} Tc	1.48×10^{10}	1	10	1480		II
留观室	¹⁸ F	1.11×10^{10}	1	10	1110		II
抢救室	¹⁸ F	3.7×10^8	1	10	37		III
放射性固废间	¹⁸ F	$2.6 \times 10^{10} \times 10\%$	1	10	260	437	II
	^{99m} Tc	$1.77 \times 10^{10} \times 10\%$	1	10	177		

说明：保守估算，放射性固废间的药物活度按收集废物所涉及的核素日最大操作量的 10%考虑。

对照《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020），本项目各放射性场所涉及I类、II类、III类工作场所，各类场所室内表面和装备结构要求见表 10-3。

表 10-3 各类工作场所室内表面和装备的要求

分类	结构屏蔽	地面	表面	分装柜	通风	管道	盥洗与去污
I类	需要	与墙壁接缝无缝隙	易清洗	易清洗	特殊的强制通风	特殊的管道 ^a	洗手盆 ^b 和去污设备
II类	需要	与墙壁接缝无缝隙	易清洗	易清洗	良好通风	普通管道	洗手盆 ^b 和去污设备
III类	不需要	易清洗	易清洗	不必须	一般自然通风	普通管道	洗手盆 ^b

a.下水道宜短，大水流管道应有标记以便维修检测；b.洗手盆应为感应式或脚踏式等手部非接触开关控制

根据医院提供的资料，本项目核医学科地面拟采用塑料地坪或涂刷塑料油漆，保证地面的平整、光滑，易于清洗；墙面与地面连接处采用弧形设计，避免缝隙产生，1m 以下部位拟采用浅色无光耐酸油漆或其他易于清洗的涂料、瓷质面砖等；除注射、给药外其余涉及放射性药物的所有操作均在手套箱内进行，手套箱操作台面光滑、平整，易于清洗去污，手套箱专设一路排风管道（管道内设有过滤吸附装置，风速不小于 0.5m/s，保证手套箱的负压状态），经活性炭吸附过滤后排放，排放口高出楼顶；

注射室、药物制备间、质控室工作台面材料拟采用磨光花岗岩板材或不锈钢材料；核医学科控制区洗手盆和患者厕所拟采用感应式或脚踏式开关控制，避免污染水龙头；核医学科控制区各功能房间设置通风管道，采用机械通风方式。

本项目建议医院应做到：①放射性废水收集的管道走向、阀门和管道的连接设计应尽可能减少死区，下水道宜短，避免放射性废水集聚，便于检测和维修。②当核医学工作场所的给水管道与放射性废水管道平行敷设时，它们之间应保证足够的距离，给水管道标高应高于放射性废水管道。当交叉敷设时，给水管道应设在放射性废水管道的上方，且交叉处应避开放射性废水管道焊缝并给废水管道加套管隔离。

10.1.3 工作场所分区

根据《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），辐射工作场所应分为控制区及监督区，以便于辐射防护管理和职业照射控制。

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中 4.3.2 的要求：“核医学工作场所的控制区主要包括……、放射性药物合成和分装室、放射性药物贮存室、给药室、给药后候诊室、扫描室、核素治疗病房、给药后患者的专用卫生间、放射性废物暂存库、衰变池等区域”。4.3.3 的要求“核医学工作场所的监督区主要包括……和显像设备控制室、卫生通过间以及与控制区相连的其他场所或区域”对核医学科场所进行控制区和监督区的划分。控制区的出入口应设置电离辐射警告标志，并采取管理措施和实体屏蔽结合的措施限制控制区人员流动。监督区应划定边界，并设置监督区标识，定期监测并评价是否需要采取措施或更改监督区边界。

控制区：将药物制备间、注射室、质控室、药物提升间、放射性固废间、SPECT 患者注射区、SPECT 机房、SPECT 候诊室、患者专用卫生间、PET/CT 机房、PET 候诊室、留观室、急救室、医生部分走廊、患者走廊、药物通道、原料通道、废发生器暂存间、降解槽及衰变池划为控制区，控制区入口处应设置规范的电离辐射警告标志及标明控制区的标志。

监督区：将控制廊、卫生缓冲区、更衣间、去污间、药物制备间配套的缓冲间、一更、二更、洁净走廊、洁具清洗间、降解槽上方的污水间和楼梯间以及衰变池上方操作间划为监督区，监督区入口处应设置标明监督区的标志，定期进行监测。

根据医院提供的材料，本项目核医学科南侧放疗科辐射工作场所已进行了分区划

分，放疗科的控制区为直线加速器机房、模拟 CT 机房以及后装机房内部区域，监督区为控制室和各机房外相邻区域。本项目核医学科的分区分与放疗科的分区分有部分监督区重合（放疗科北侧的走廊、西侧的污水间和卫生间），核医学科污水间北侧患者走廊原属于放疗科的监督区，现划分为核医学科的控制区。本项目核医学科各工作场所分区分划情况见图 10-1~图 10-2 所示。

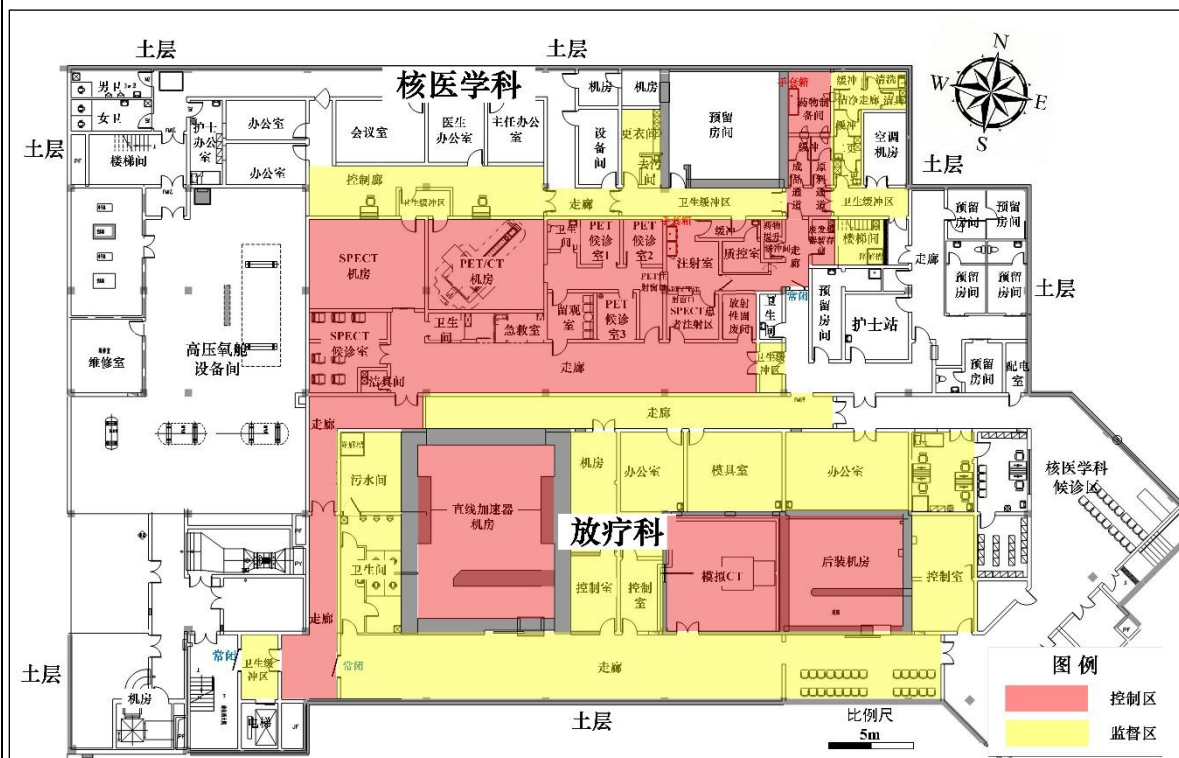


图 10-1 核医学科工作场所分区分划示意图（负一层）

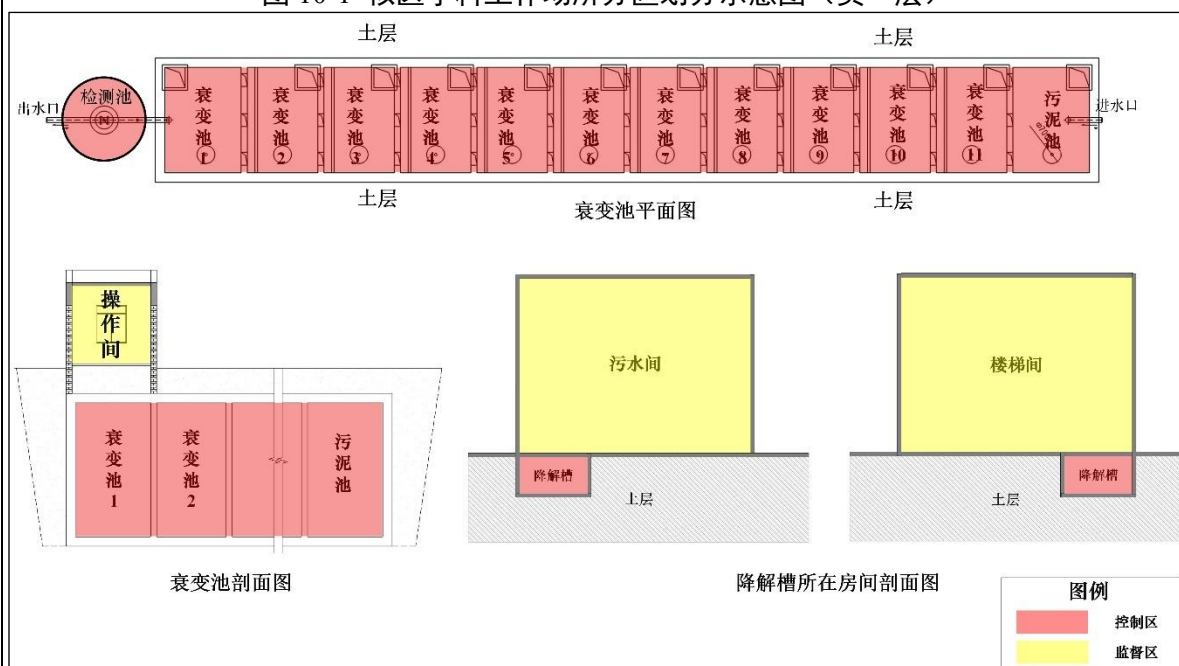


图 10-2 核医学科工作场所分区分划示意图（衰变池及降解槽区域）

10.1.4 人流、物流路径规划

本项目核医学科改建后的人流、物流路径规划如下所示：

(1) 工作人员路径

核医学科药物制备间工作人员由东侧楼梯间进入，随后通过卫生缓冲区后依次经过一更、二更、缓冲间后进入药物制备间，在手套箱内进行 ^{99m}Tc 药物的淋洗、分装、标记等工作；其他辐射工作人员由核医学科西侧楼梯间进入核医学科，显像检查工作人员通过南侧走廊进入控制廊（SPECT、PET/CT 显像），注射室和质控室工作人员依次经过会议室北侧走廊、设备间西侧走廊后进入卫生缓冲区更衣间更衣后，向南通过缓冲间进入注射室和质控室，完成药物分装、质控和注射等操作后沿原路返回，并进入更衣室和去污间清洗更衣，经表面污染检测合格后才能离开。卫生缓冲区配置有表面污染监测设备，去污间设置有感应洗手池和淋浴设施。显像诊断摆位人员经卫生缓冲区后进入 SPECT、PET/CT 机房对患者进行摆位操作，操作完后原路返回。特殊情况下显像患者需要进行急救时，工作人员穿戴防护用品穿过 PET/CT 机房防护门经患者走廊到达急救室对患者进行急救，急救结束后原路返回。核医学区域所有工作人员完成工作后均沿原路返回。

(2) 患者路径

SPECT或PET/CT患者预约和登记后在核医学等候区进行等候，通过语音叫号，依次由显像诊断患者单向专用入口（单向门，只进不出）进入核医学控制区，在注射窗口进行药物静脉注射后（采取依次叫号的方式，保证注射后患者与注射前患者不交叉），在对应的候诊室休息、候诊，然后进入相应机房扫描检查。PET/CT患者在完成扫描后需要进行留观，无异常的患者可经由西南侧大门经走廊到达南侧电梯患者专用通道离开核医学科；医院拟在给药前明确告知相关事项，并设置醒目的路线标识，配合语音系统，引导病人按照拟定路线行进。本项目辐射工作人员与受检者路径无交叉。

(3) 放射性药物路径

按照医院与送药单位的协定， ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器药物配送人员于每周一和周三上午 7:00 将 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器通过药物提升电梯送进核医学科药物提升间，交由核医学科运输人员后经走廊、原料通道、缓冲间后送至药物制备间手套箱内等待淋洗。每天上午 7:30，运输人员在成品通道缓冲间传递窗取出淋洗制备得到的 ^{99m}Tc 药物后经成品通道及南侧走廊后向西分别送至质控室和注射室，依次进行质控操作和注射准

备。 ^{18}F 药物配送人员在每天上班前（上午 7:45，下午 13:45）将预定的显像检查放射性药物（ ^{18}F ）运至位于地面的专用药物提升间，通过药物提升专用电梯运输至医院核医学科药物提升间，运输人员领取药物后经过走廊向西送至注射室，放置于注射室手套箱内等待分装；本项目核医学科运输人员只从事药物及放射性废物的运输操作，不从事其他辐射工作，其主要的工作时间在上午 7:00~8:00，下午 13:30~13:50 和 19:00~20:00，放射性药物及放射性废物的运输均选取在上班前或下班后无人时段进行，保证放射性药物路径及放射性废物路径与人员路径不交叉，防止了交叉污染。本项目医院指派专人进行药物的交接工作，药物交接过程均在监控下进行，医院拟制定放射性药物管理制度，做好放射性药物的台账管理。

（4）放射性废物路径

医院核医学科放射性废物经各功能房间废物桶收集后送至放射性固废间内进行暂存，在放射性固废间内采取分类收集和存放的方法，待放射性废物衰变至符合清洁解控水平后，选择在下班后 19:00~20:00 无患者时段，沿患者专用通道运出核医学科，按照医疗废物处置；废 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器先在废发生器暂存间进行暂存，定期经药物提升间运出核医学科，交回厂家进行处置。放射性固废运输时均采取密闭措施，尽可能的降低泄漏风险。西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科人流、物流路径规划见图 10-3（附本章后）。

综上所述，本项目患者或受检者通道与工作人员、放射性药物通道相对独立，避免了交叉污染，患者或受检者通道与放射性废物通道通过严格限制运输时间的方式，做到相互独立控制，工作人员、患者、放射性药物、放射性废物均有各自相对独立的路径和走向，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）相关要求。

10.2 核医学科辐射屏蔽设计

根据建设单位提供的资料，本项目拟对核医学科部分工作场所屏蔽墙体进行改建，改建后的工作场所已进行辐射屏蔽设计以减少对周边环境的辐射影响，改建后的核医学科主要工作场所的辐射屏蔽设计相关参数见下表所示。

表 10-4 核医学科各工作场所改建后辐射屏蔽设计参数

工作场所	项目	具体设计参数
药物制备间	尺寸参数	长 4.1m×宽 2.8m，面积约 11.48m ²
	四侧墙体	东、南侧墙体为 240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆（新增），北侧为 400mm 混凝土墙体（利旧），西侧墙体为 600mm 混凝土墙体（利旧）
	防护门窗	原料通道传递窗为 10mmPb（新增），走廊传递窗为 10mmPb

		(新增),成品通道传递窗为 6mmPb(新增),防护门为 6mmPb(新增)
	顶层楼板	顶棚为 300mm 混凝土(利旧)
注射室	尺寸参数	长 4.7m(最长)×宽 3.3m(最长),面积约 14.5m ²
	四侧墙体	北侧墙体为 100mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆(利旧),东侧墙体为 240mm 实心砖墙+6mmPb 铅板(利旧),南侧墙体为 240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆(利旧),西侧墙体为 240mm 混凝土墙+4mmPb 铅板(利旧)
	防护门窗	SPECT 注射给药窗为 10mmPb(利旧),PET 注射给药窗为 50mmPb(利旧),防护门均为 8mmPb(新增)
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土(利旧)
SPECT 患者注射区	尺寸参数	长 3.5m×宽 3.0m,面积 10.5m ²
	四侧墙体	北侧墙体为 240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆(利旧),西侧墙体为 240mm 混凝土墙(利旧),南侧墙体为 240mm 实心砖墙(利旧),东侧墙体为 240mm 实心砖墙+20mm 硫酸钡砂浆(新增)
	防护门	防护门为 8mmPb(新增)
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土(利旧)
质控室	尺寸参数	长 2.5m(最长)×宽 2.18m(最长),面积约 5.9m ²
	四侧墙体	西侧墙体为 240mm 实心砖墙+6mmPb 铅板(利旧),南侧墙体为 240mm 实心砖墙(新增),东侧及北侧墙体为 240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆(新增)
	防护门窗	防护门为 8mmPb(新增),传递窗为 10mmPb(新增)
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土(利旧)
放射性固废间	尺寸参数	长 3.0m×宽 2.3m,面积 6.9m ²
	四侧墙体	西侧墙体为 240mm 实心砖墙(新增),北、东、南侧墙体均为 240mm 实心砖墙(利旧)
	防护门	防护门为 8mmPb(新增)
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土(利旧)
PET/CT 机房	尺寸参数	长 6.1×宽 7.8m,面积 47.6m ²
	四侧墙体	北侧、南侧墙体为 240mm 实心砖墙+100mm 硫酸钡砂浆(利旧),西侧墙体为 240mm 混凝土墙(利旧),东侧墙体为 240mm 实心砖墙+4mmPb 铅板(利旧)
	防护门窗	患者防护门为 10mmPb,工作人员防护门为 10mmPb,观察窗为 10mmPb,均为利旧
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土+4mmPb 铅板(利旧)
SPECT 机房	尺寸参数	长 6.0×宽 7.8m,面积 46.8m ²
	四侧墙体	东、北、西侧墙体为 240mm 混凝土墙(利旧),南侧墙体为 5mmPb 铅板隔墙
	防护门窗	患者防护门为 4mmPb,工作人员防护门为 4mmPb,观察窗为 4mmPb,均为利旧
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土(利旧)
PET/CT 候诊室 1、2	尺寸参数	长 2.6m×宽 3.0 m,面积 7.8m ²
	四侧墙体	北侧墙体为 240mm 混凝土墙,西侧及南侧墙体为 240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆,候诊室 1 东侧墙体 240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆,候诊室 2 东侧墙体 240mm 混凝土墙+4mmPb 铅板,均为利旧
	防护门	防护门为 10mmPb(利旧)

	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土（利旧）
PET/CT 候诊室 3	尺寸参数	长 2.6m×宽 3.1 m，面积 8.1m ²
	四侧墙体	北侧、东侧墙体为 240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆（利旧），南侧墙体为 240mm 混凝土墙（利旧）、西侧墙体为 240mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆（新增）
	防护门	防护门为 10mmPb（利旧）
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土（利旧）
留观室	尺寸参数	长 3.1m×宽 3.1 m，面积 9.6m ²
	四侧墙体	北侧墙体为 240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆（利旧），南侧及西侧墙体为 240mm 混凝土墙（利旧），东侧墙体为 240mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆（新增）
	防护门	防护门均为 8mmPb（新增）
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土（利旧）
急救室	尺寸参数	长 5.3m，宽 1.7m，面积约 9.0 m ²
	四侧墙体	北侧墙体为 240mm 实心砖墙+2mmPb 铅板（利旧），东侧及西侧墙体为 240mm 实心砖墙（利旧），西侧墙体为 240mm 实心砖墙（新增）
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土（利旧）
SPECT 候诊室	尺寸参数	长 5.2m×宽 3.7m，面积约 24.3 m ²
	四侧墙体	北侧墙体为 5mmPb 铅板隔墙（利旧），西侧墙体为 240mm 混凝土墙（利旧），南侧及东侧墙体为 240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆（新增）
	防护门窗	防护门为 6mmPb（新增）
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土（利旧）
患者走廊	尺寸参数	长 24.5m×宽 3.3 m，面积 80.85m ²
	四侧墙体	东侧墙体为 240mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆（新增），西侧墙体为 240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆（新增），南侧墙体为 240mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆（利旧）
	防护门	出入口防护门为 15mmPb（新增）
	顶层楼板	顶棚为 150mm 混凝土（利旧）
衰变池	四周墙体、顶部、底部	四周墙体及底部为 370mm 混凝土，中间墙体为 240mm 混凝土，顶部墙体为 200mm 混凝土，均为利旧

说明：建设过程中选用的混凝土密度不低于2.35g/cm³，实心砖密度不低于1.65g/cm³，硫酸钡砂浆密度不低于2.7g/cm³。

10.3 辐射防护与安全措施

10.3.1 辐射安全防护措施

（1）在控制区、放射性固废间等场所入口处设置电离辐射警告标志，在手套箱、铅罐、一体化注射防护装置、放射性废物桶等表面设置电离辐射警告标志。

（2）项目控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门禁等安全措施，限制患者随意流动，保证工作场所内的工作人员免受不必要的照射。严禁药物注射后患者

随意走动，严禁串门，严禁在通道内穿行，以避免与其他患者之间的交叉照射；严禁无关人员滞留或误入；患者通道内的相应位置均设置视频监控系统，以对辐射工作场所的情况进行实时监控，及时发现突发情况并进行处理。工作场所内平开防护门安装自动闭门装置，机房电动推拉防护门安装光幕式防夹装置。

(3) SPECT 及 PET/CT 机房：显像检查机房与控制室之间设置观察窗与对讲装置，控制室工作人员出入门、患者出入门外均张贴电离辐射警告标志。另外 PET/CT 机房患者出入门上方需安装工作状态指示灯，灯箱上设置“射线有害、灯亮勿入”等警示标语，指示灯与患者出入门有效联锁，患者出入门设置防夹装置。机房工作人员进出门为平开门，设置自动闭门装置。SPECT 和 PET/CT 机房内墙壁、设备和控制台均安装紧急停机按钮。

(4) 核医学科药物制备间、分装注射区域、SPECT 和 PET/CT 机房入口均设卫生缓冲区（配套有更衣、去污和监测区域等），为工作人员提供必要的可更换衣物及铅衣、铅围裙、铅围脖、放射性污染防护服等防护用品，冲洗设施、洗消设施和表面污染监测设备；核医学科患者进出口位置均设置卫生缓冲区；注射室应配备铅注射套、铅注射盒、注射窗、铅废物桶等。

(5) 本项目 ^{99m}Tc 的淋洗及分装操作在药物制备间手套箱（手套箱正面底面屏蔽为 10mmPb，其余四面为 5mmPb）内进行，手套箱顶壁安装活性炭或其他过滤装置，本项目配备的手套箱排风风速大于 0.5m/s 并具有单独的排风通道，保证手套箱内为负压条件，管道内设置止回阀，以防有害气体逆向回流。本项目拟在注射室一台手套箱（手套箱正面底面屏蔽大于 40mmPb，其余四面大于 30mmPb）用来对 ^{18}F 药物进行分装等操作，手套箱排风风速均大于 0.5m/s 并具有单独的排风通道，保证手套箱内为负压条件，管道内设置止回阀，以防有害气体逆向回流。

(6) 在 SPECT 及 PET/CT 注射后候诊室分别设置患者专用卫生间，其中洗手台水龙头采取感应式，患者专用卫生间的便池设为感应式节水马桶。上述所有放射性废水均排入衰变池。医院核医学科放射性废水排水管道均在地下土层内穿行，经过土层屏蔽后放射性废水基本不会对周边环境产生影响。

(7) 医院在核医学科内留观室、SPECT 及 PET/CT 显像检查机房、控制廊、SPECT 及 PET/CT 注射后候诊室、SPECT 患者注射区、注射室、质控室、药物制备间、废发生器暂存间、患者走廊、卫生缓冲区、急救室、留观室、放射性固废间及患者进出核

医学科进出口处等位置均设置了视频监控系统；在核医学科候诊区、SPECT 及 PET/CT 注射后候诊室、SPECT 患者注射区、PET 注射窗口设置了叫号系统；在 SPECT 及 PET/CT 显像检查机房内、医生操作位、留观室、急救室均设置了语音对讲系统，便于患者或受检者与相关医务人员进行通话。

（8）核医学科地面或墙壁设置简明易懂的导向标识或导向提示，或通过对讲、导向标识等形式引导患者，限制其流动方向。

（9）核医学科药物制备间和注射室均应配备应急及去污用品，包括一次性防水手套、气溶胶防护罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂或喷雾、小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔、塑料袋、酒精湿巾、胶带、标签、不透水的塑料布、一次性镊子等。

（10）核医学科工作场所控制区设置专门洁具间，该清洁间拖把仅用于核医学科工作场所控制区，不可与其他区域清洁拖把混用；

（11）所有能在屏蔽体内或屏蔽体后进行的操作均设置屏蔽体，项目拟配置移动铅防护屏风、注射器防护套等。在 SPECT 注射后候诊室内配置移动铅防护屏风，可降低注射放射性药物的患者在注射后候诊室中的相互辐射影响。

本项目核医学科改造工作完成后的辐射安全设施布置见图 10-4 所示(附本章后)。

10.3.2 工作场所表面污染防治

根据现场调查，目前医院核医学科已根据相关法律法规及标准要求，对核医学科内相关工作场所墙面及地面等位置进行了表面污染防治设计，本项目改建完成后医院核医学科主要工作场所的表面污染防治要求如下所示：

（1）涉及放射性药物操作的工作场所采用易清洗且不易渗透材料(如 PVC 板等)，拐角使用弧线处理。地面平整光滑，易于清洗，铺设塑料地坪或涂刷塑料油漆。

（2）墙面平整光滑，1 米以下部位采用易于清洗的涂料，瓷质面砖等。

（3）工作台面要求平整、光滑、易于清洗。

（4）墙面与地面、墙面与顶棚、墙面连接转角处以及工作台边沿宜采取弧形设计以尽可能减少表面污染。

（5）放射性药物注射和给药时，放射性药物应放在搪瓷盘内，搪瓷盘下部放置吸水纸或布，防止放射性药物撒漏。

（6）除注射、给药外其余涉及放射性药物的所有操作均在手套箱内进行，手套箱操作台面要求光滑、平整、易于清洗去污。所有涉及放射性物质操作都必须在铺衬有

吸水纸的瓷盘内进行。

10.3.3 操作过程中的防护要求

- (1) 操作放射性药物时，工作人员应穿戴铅衣、铅眼镜等防护用品；
- (2) 放射性工作场所不得进食、饮水、吸烟、化妆，不得进行无关工作及存放无关物品。放射性药物操作在衬有吸水纸的托盘内进行；
- (3) 从控制区取出任何物品，应进行表面污染检测，杜绝超过 GB18871 规定的表面污染控制水平的物品被带出控制区；
- (4) 放射性药物操作完成后，工作人员离开放射性工作场所前应进行洗手，并对表面污染进行监测，确认无放射性污染后，方可进入非放射性工作区域；
- (5) 注射和服药后患者防护管理措施：首先告知患者及家属辐射可能带来的危害性，在语音提示下患者到对应的注射室或服药窗口进行注射或服药，显像检查患者要与陪护人员实行隔离，陪护人员不允许在 SPECT、PET/CT 注射后等候室以及专用病房内驻留，医院需要划定专门的陪护人员等候区并尽量远离核医学工作场所，同时需要要求显像药物注射后的患者在注射后等候区内禁止随意走动。

10.3.4 放射性药物管理

本项目医院核医学科已设置兼职放射性药品管理人员，具体负责放射性药品交接手续的办理。当送药单位将放射性药品经由位于地面的药物提升间通过药物提升电梯运至医院核医学科内，核医学科放射性药品管理人员核对预定的放射性药品数量、活度，进行入库登记。将钼锝发生器送入药物制备间手套箱中，将 ^{18}F 显像药物送入注射室手套箱等待分装，药物制备间和注射室均安装视频监控系统，并设置门锁，防止被盗事件发生。医院已建立了放射性药品台账管理制度，明确放射性药品购置、到货、暂存、使用等环节放射性药物量，定期进行盘点，做到账物相符。位于地面的药物提升间设置门禁系统和监控系统，送药人员经核医学科工作人员引导严格按照流程通过药物提升间中专用运送电梯将药物送至核医学科。

10.3.5 防护用品、去污用品、辅助用品配备情况

根据建设单位提供的材料，为减少不必要的照射，医院已根据相关标准要求为核医学科辐射工作人员及患者配备了个人防护用品。本项目为满足建成后的需求，医院核医学科拟配备的个人防护用品和已有的个人防护用品明细见表 10-5，工作场所防护用品明细见表 10-6，监测仪器明细见表 10-7。

表 10-5 核医学科配备的个人防护用品明细

序号	个人防护用品名称	铅当量	原有数量	本次拟增加的数量	项目建成后总数量	备注
1	铅橡胶防护衣	0.5mmPb	3 件	2 件	5 件	/
2	铅橡胶围裙	0.5mmPb	3 件	2 件	5 件	/
3	铅橡胶围脖	0.5mmPb	3 件	2 件	5 件	/
4	铅玻璃眼镜	0.5mmPb	2 件	2 件	4 件	/
5	铅橡胶帽	0.5mmPb	3 件	2 件	5 件	/
6	放射性污染防护服	/	1 件	/	1 件	/
7	个人剂量计	/	7 枚	/	7 枚	/

表 10-6 核医学科工作场所防护用品配备明细

序号	防护用品名称	铅当量	设置场所	原有数量	本次拟增加的数量	项目建成后总数量
1	手套箱	正面底面屏蔽 10mmPb, 其余四面 5mmPb	药物制备间	1 套	/	1 套
		正面底面屏蔽大于 40mmPb, 其余四面大于 30mmPb	注射室	/	1 套	1 套
2	注射器转运盒	6mmPb	药物制备间、注射室	3 件	/	3 件
3	储源铅防护罐	6mmPb	药物制备间、注射室、质控室	3 件	/	3 件
		50mmPb	注射室	/	1 件	1 件
4	一体化防护注射装置	10mmPb	注射室	1 件	/	1 件
5	一体化防护注射装置	50mmPb	注射室	1 件	/	1 件
6	注射器防护套 (^{99m}Tc)	5mmPb	注射室	1 件	/	1 件
7	注射器防护套 (^{18}F)	10mmPb	注射室	/	1 件	1 件
8	放射性废物暂存桶	10mmPb	药物制备间、质控室、SPECT 候诊室、废发生器暂存间	8 个	2 个	10 个
		20mmPb	留观室、PET 候诊室、注射室、放射性固废间	/	6 个	6 个
10	转运铅防护罐	10mmPb	注射室、质控室	1 个	/	1 个
		50mmPb		/	1 个	1 个
11	移动式铅屏风	4mmPb	SPECT 候诊室	2 扇	/	2 扇
12	去污用品	一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂和/或喷雾（至少为加入清洗洗涤剂 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、一次性镊子等		若干		

按照上表中的防护用品类型及数量进行配备后，本项目建成后医院核医学科工作场所中的个人防护用品数量、防护性能参数均满足《核医学科放射防护要求》（GBZ 120-2020）和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等相关要求，可以满足医院开展的核技术利用项目运行的要求。

表 10-7 医院核医学科配置的监测仪器一览表

名称	已有数量	配备后能否满足项目建成后的需求
α 、 β 表面污染监测仪	2 台	满足
X- γ 辐射监测仪	2 台	满足
活度计	1 台	满足

核医学科运行期间主要污染物为 X 射线、 γ 射线及 β 表面污染等，根据项目特点，医院已配置了足够数量的 α 、 β 表面污染监测仪、便携式 X- γ 辐射监测仪以及活度计，满足本项目的实际需求。本项目配备的 α 、 β 表面污染监测仪放置于药物淋洗制备及分装等工作场所的卫生缓冲区，为经过卫生缓冲区的人员与物品进行表面污染检测。医院已配备的监测仪器符合《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》对监测仪器的配置要求。

10.3.6 放射性废物管理

（1）项目建成后，医院应在药物制备间、注射室等场所设置放射性废物暂存桶，放射性废物暂存桶表面应有电离辐射警示标志，应尽量使用有脚踏式开关的放射性废物暂存桶。

（2）核医学科南侧区域设置有放射性固废间用来暂存产生的固体废物，放射性废物暂存桶内拟放置专用塑料袋直接收纳废物，装满后的废物袋密封，将放射性固体废物转移至放射性废物暂存间的放射性废物暂存桶内。对注射器和玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入硬纸盒或其它包装材料中，然后装入专用塑料袋内。每袋废物的表面剂量率不超过 0.1mSv/h，重量不超过 20kg，并在放射性废物柜上标有废物类型、核素种类、比活度水平和存放日期等内容。放射性固体废物在放射性固废间暂存时间超过 30 天后，由核医学科工作人员使用辐射剂量率仪和 α 、 β 表面污染监测仪对其表面进行监测，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 条件后，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。本项目核医学科日常产生的放射性固体废物较少，核医学科设置了固废暂存场所后待固体废物满足其解控条件及时解控，放射性固体废物暂存间能满足医院实际放射性固体废物暂存要求。

(3) 装满废物的专用塑料袋应密封，及时转送至放射性固废间，放射性固废间入口处设置电离辐射警示标志，放射性固废间内安装通排风装置，内部设置用于贮存固体放射性废物暂存桶，废物存放应合理有序，易于取放。本项目含 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 核素的放射性固体废物暂存时间超过 30 天，经检测其放射性核素活度浓度达到清洁解控水平后，按照医疗废物进行处理。废 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器由生产厂家回收处置。

(4) 放射性废物暂存间不得堆放易燃、易爆、腐蚀性物品以及其它无关物品。固体放射性废物的存储和处理安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的产生量、污染核素名称、重量、入库日期、解控或送贮日期、处置去向、责任人员、监测结果等内容。

(5) 本项目核医学科控制区内产生的放射性废水（包括患者或受检者的排泄和呕吐物废水、医生的少量清洗废水等）经专用管道进入衰变池，贮存一定的时间后（经核算，衰变池贮存 3.5a 后开始排放放射性废水，排放废水中核素浓度远远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中相关核素的豁免浓度），排入医院内污水处理设施。本项目医院放射性废水管道埋于地下部分至少距地面约 50cm，周围均为土层，无裸露在外的管道，经过土层屏蔽后，放射性废水管道中放射性核素对外界的影响较小；

(6) 放射性药物分装在手套箱内进行，其通风管道的通风速率不小于 0.5m/s，设置有独立排风管道，管道内设过滤装置，经活性炭吸附后的放射性废气经所在建筑物楼顶排放。此外，高活区、低活区分别设置独立的负压排风系统，工作场所的气流流向遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染，废气经收集后进行活性炭吸附过滤，然后引至所在建筑物楼顶排放。

10.4 三废的治理措施

10.4.1 放射性废水

本项目核医学科产生的放射性废水主要为患者的排泄物及冲洗废水和工作人员清洗受污染衣服、手套及工作场所时可能带有微量放射性的废水等。医院在 SPECT 注射后候诊室、PET/CT 注射后候诊室设置给药后患者专用卫生间，卫生间内设置专用管道收集患者产生的放射性废水，医院在缓冲间、去污间及洁具间设置放射性污水排放管网，将产生的放射性废水接至废液降解槽（位于核医学科南侧污水间和东侧楼梯

间地面下方，地面上无废水相关设施，具体位置见图 10-5）内初步沉淀降解，槽体另一端设置出水口，废液随后经提升泵经专用管道提升至衰变池。衰变池位于医院核医学科北侧地下一层（为推流式衰变池，改造后包含 1 格污泥池、11 格连续式衰变池以及 1 座检测池，污泥池+连续式衰变池总有效使用容积约 594 m³），主要功能为收集核医学科产生的所有放射性废水。衰变池排水口设置取样测量系统（用于取样分析监测）。医院核医学科产生的放射性废水首先通过管道进入废液降解槽降解沉淀，随后废水进入衰变池内进行依次流入贮存，当废水的量达到衰变池最大容积（贮存时间约 3.5a）后，废水推流至污水检测池，污水检测池废水随后排至医院污水处理站经处理后最终排入市政污水管网。

医院现有的衰变池四周及底部采用 370mm 厚钢筋混凝土浇筑，池体四面墙体、底板进行防渗漏和耐酸碱处理，衰变池仅有 12 格 49.5m³（有效容积）的连续式衰变池和 1 格检测池。因原衰变池未设置污泥池等关键设施，因此本项目拟对衰变池进行改造，改造后的衰变池整体包括 1 格 49.5m³ 的污泥池、11 格 49.5m³（有效容积）的连续式衰变池和 1 格检测池，衰变池顶部距地面约 1.0m，污泥池底设搅拌器用来防止污泥淤积。衰变池内安装极限液位传感器用来测定液面的高度。衰变池内部原有导流墙，池底有防止和去除污泥硬化淤积的措施。根据推流式衰变池的相关定义：“推流式衰变池也称连续式衰变池，主要利用水力学推移流的原理，用于连续接纳和贮存核医学科放射性废水的 3 级或 3 级以上分隔式衰变池，推流式衰变池一般至少由污泥池、3 级~n 级分隔连续式池体、检测池、其他配套及辅助工程组成”，根据该定义本项目改造后的衰变池满足推流式衰变池的相关要求，为推流式衰变池，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的相关要求。

由于医院核医学科的平面布局发生变化，旧有的放射性废水排放管道的路径及辐射屏蔽等不满足相关法律法规及标准的要求，本项目医院对放射性废水排放管道走向及设计进行了优化调整，计划拆除原先的放射性废水排放管道并重新设计建设新的放射性废水排放管道。根据建设单位提供的图纸，本项目拟铺设放射性排水管道总长度约 80m，各排水管道的坡度为 0.026，对专用排水管道设置有拟采用机制铸铁（含铅）管道，管道均敷设在地下土层内，对周边环境的辐射影响较小。

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科放射性废水排水管道走线图见图 10-5（附本章后），衰变池平面设计图见图 10-6。

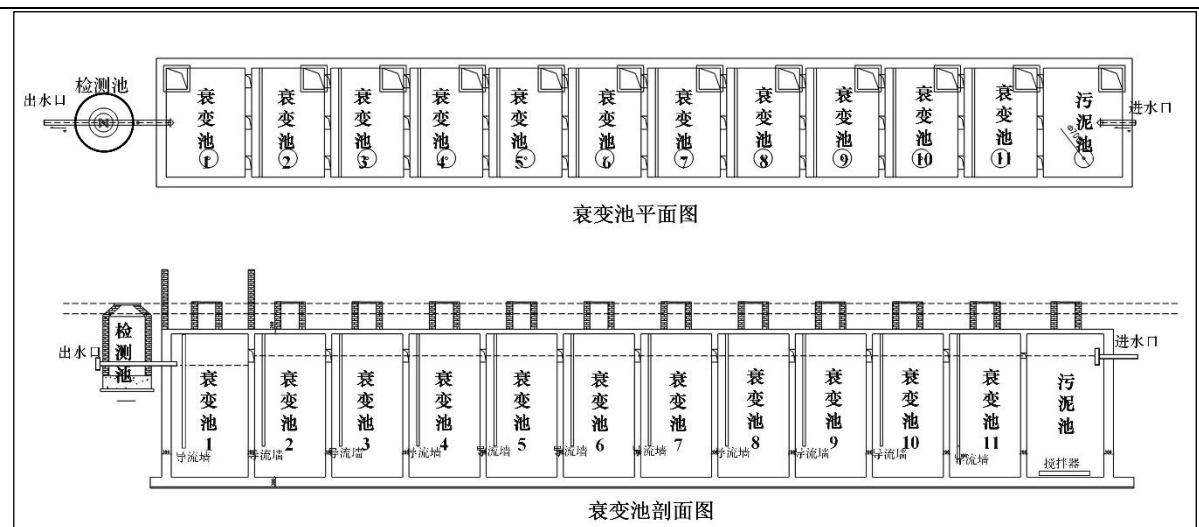


图 10-6 核医学科衰变池平面设计示意图

本项目核医学科衰变池的可依托性分析：因医院核医学科初期规划建设规模较大，使用核素较多，因此建设的衰变池池体规模、数量以及容量均较大，后因医院业务范围进行了调整，实际开展的核医学诊疗所涉及的放射性药物较少，因此该衰变池相比本项目实际需要的冗余量较大。本项目核医学科内主要使用 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 放射性药物，半衰期较短均小于 24h，核医学科预计日产生放射性废水的量为 $0.680\text{m}^3/\text{d}$ ，年产生量为 170m^3 ，根据衰变池全部的容量可算得，医院核医学科在运行后约 3.5 年后衰变池可开始排放放射性废水，其时间长度远远大于本项目使用的放射性药物所需要的衰变时间，因此本项目对衰变池的依托可行。

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的相关规定，本项目应做到：①排水管应采用大功率无堵塞排污泵，有备用可提供随时更换。②安排专人负责放射性废液的暂存和处理，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。

10.4.2 放射性废气

根据相关法律法规、国家标准以及本项目核医学科改造后各功能房间的平面布局变化，本项目建设过程中需将原核医学科内的放射性废气排风管道进行拆除后重新布设，本项目医院核医学科拟设置 3 套专用排风管道对放射性核素操作过程中放射性气体进行排放，其分别为：药物制备间手套箱专用管道、注射室手套箱专用管道以及涉及核素操作与使用的各功能房间的排放管道专用管道。核医学各工作场所保持良好的通风，工作场所的气流流向遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向，保持工作场所的负压和各区之间的压差，防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

医院核医学科放射性药物的分装以及挥发性放射性核素的操作都在手套箱内进行，其均设计单独的排风系统并具有一定的通风能力，通风速率均不小于 0.5m/s，外接管道依次设置止回阀、高效活性炭过滤装置，经过滤废气统一汇集至放射性排气井，通过管道引至高压氧舱室楼顶，其排放口高于楼顶，排出放射性气体浓度不超过有关法规标准规定的限值。核医学科放射性废气排放口位于医院高压氧舱室顶部东侧，排风口已尽量远离周边高层建筑，医院应将楼顶放射性废气排风口区域划为管控区域，并进行封闭管理。本项目拟在高压氧舱室顶部新增一个排风量为 1000m³/h 的排风机，利旧两个排风机（排风量分别为 1000m³/h 和 10000m³/h）。本项目核医学科各功能房间通排风设计参数如下表所示。

表 10-8 医院核医学科各功能房间通排风设计参数一览表

工作场所	通风方式	设计新风量 (m ³ /h)	设计排风量 (m ³ /h)	是否满足负压 状态
楼顶屋面排风机 P-RF-01	排风机总排风量 1000m ³ /h			
注射室手套箱	自然通风+排 风机排风	自然通风	1000	满足
楼顶屋面排风机 PF-2	排风机总排风量 1000m ³ /h			
药物制备间手套箱	自然通风+排 风机排风	自然通风	1000	满足
楼顶屋面排风机 PF-1	排风机总排风量 10000m ³ /h			
药物制备间	空调机送风+ 排风机排风	150	200	满足
注射室		200	280	满足
SPECT 患者注射区		200	250	满足
质控室		200	280	满足
PET/CT 机房		570	850	满足
SPECT 机房		570	850	满足
PET/CT 候诊室 1、2		200	250	满足
PET/CT 候诊室 3		200	250	满足
留观室		200	280	满足
急救室		200	280	满足
SPECT 注射后候诊室		200	280	满足
废发生器暂存间	自然通风+排 风机排风	自然通风	180	满足
放射性固废间		自然通风	200	满足

本项目核医学通风系统为避免各功能房间通风互相串流，该项目在各分支风管及总排风管均设置止回阀，防止气体逆向回流；各功能房间排风口拟设置在天花板上合适位置，以便和新风形成有效对流。核医学科通排风管线路径情况如图 10-7 所示（附本章后）。

为保证核医学科放射性废气处理设置正常安全运行，建设单位还需采取如下措施：①医院需定期对通排风系统管道及过滤系统设施设备进行检修和维护，并建立设施设备维护台账，其中活性炭过滤器需根据设备要求进行过滤效率检定和更换，每半年至少进行一次维护和校正；②更换下的活性炭过滤器应按放射性固体废物进行管理和处置。③为防止公众进入楼顶避免不必要的误照射，要求建设单位将废气排风口楼顶划为管控区域，并进行封闭管理。核医学科各工作场所密闭和通风符合《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中的相关要求。

10.4.3 放射性固体废物

10.4.3.1 放射性废物收集

本项目核医学科在运行过程中产生的放射性固体废物主要有： ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗、分装过程中产生的废钼铯发生器、废淋洗真空瓶、手套、消毒棉签、废分装瓶、工作人员操作时戴的一次性手套等， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{18}F 等药物质检、给药过程中产生的一次性手套、注射用的棉签、废注射器、废试剂瓶、废口杯、擦拭纸巾等；擦拭清理工作台面时使用的吸水纸及酒精棉球等吸附放射性废气产生的废活性炭以及沾染放射性核素敷料、滤纸等；废 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器。对注射器和碎玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入锐器盒或其他包装材料中，然后再装入专用塑料袋内，专用塑料袋装满后应密封，不破漏，及时转送放射性固废间贮存。放射性废物每袋重量不超过 20kg。

10.4.3.2 放射性废物贮存

本项目核医学科拟在南侧位置设置一间放射性固废暂存间，放射性固废间建筑面积约 6.9m^2 ，主要暂存药物淋洗、分装、质控、注射、患者候诊、留观时产生的固废以及清洁工作场所使用的拖布和抹布等环节产生的放射性固废，经核算，此处暂存的短半衰期放射性废物量（含 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）约为 1.72kg/d ，该类放射性固废需暂存超过 30 天，每袋重量不大于 20kg，则需设置至少 3 个放射性废物桶。

核医学科拟在药物制备间、注射室、质控室、PET 候诊室、SPECT 候诊室、废发生器暂存间、留观室、放射性固废间等场所放置放射性废物桶，放射性废物桶内放置专用塑料袋，按照核素类型分类收集，专用塑料袋装满后应密封，不破损漏出，及时转送放射性固废间，放入专用放射性废物柜中存储，容器显著位置设置废物类型、核素种类、存放日期等说明。

10.4.3.3 放射性废物处理

根据医院提供的资料，核医学科产生的废 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器交由生产厂家回收处理；核医学科放射性固废间暂存含 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的放射性固废，暂存时间超过 30 天后，核医学科工作人员使用监测仪器监测塑料袋外表面的表面剂量率为环境本底水平， β 表面污染水平小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 后，作为医疗废物处理。

核医学科手套箱及其他区域通风系统及时检查过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不小于 1a，更换下来的废活性炭装入专用塑料袋中，密封后转移至放射性固废间，暂存 30 天后，监测塑料袋外表面的表面剂量率为环境本底水平， β 表面污染水平小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 后作为非放射性固体废物处理。接触放射性废物的工作人员必须穿放射性污染防护服，并佩戴个人剂量计。

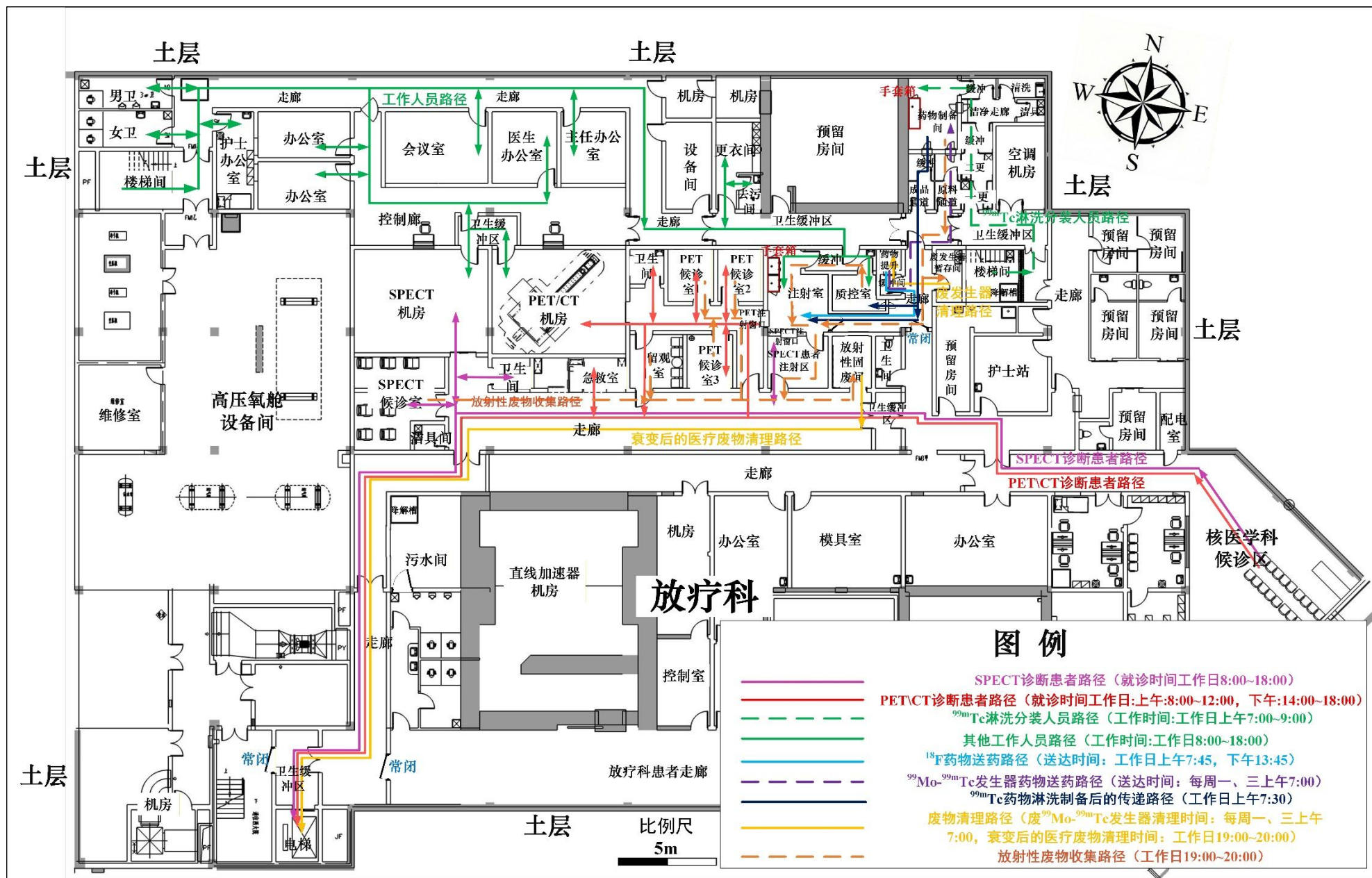


图 10-3 本项目核医学科医护人员、患者、药物和放射性废物路径图

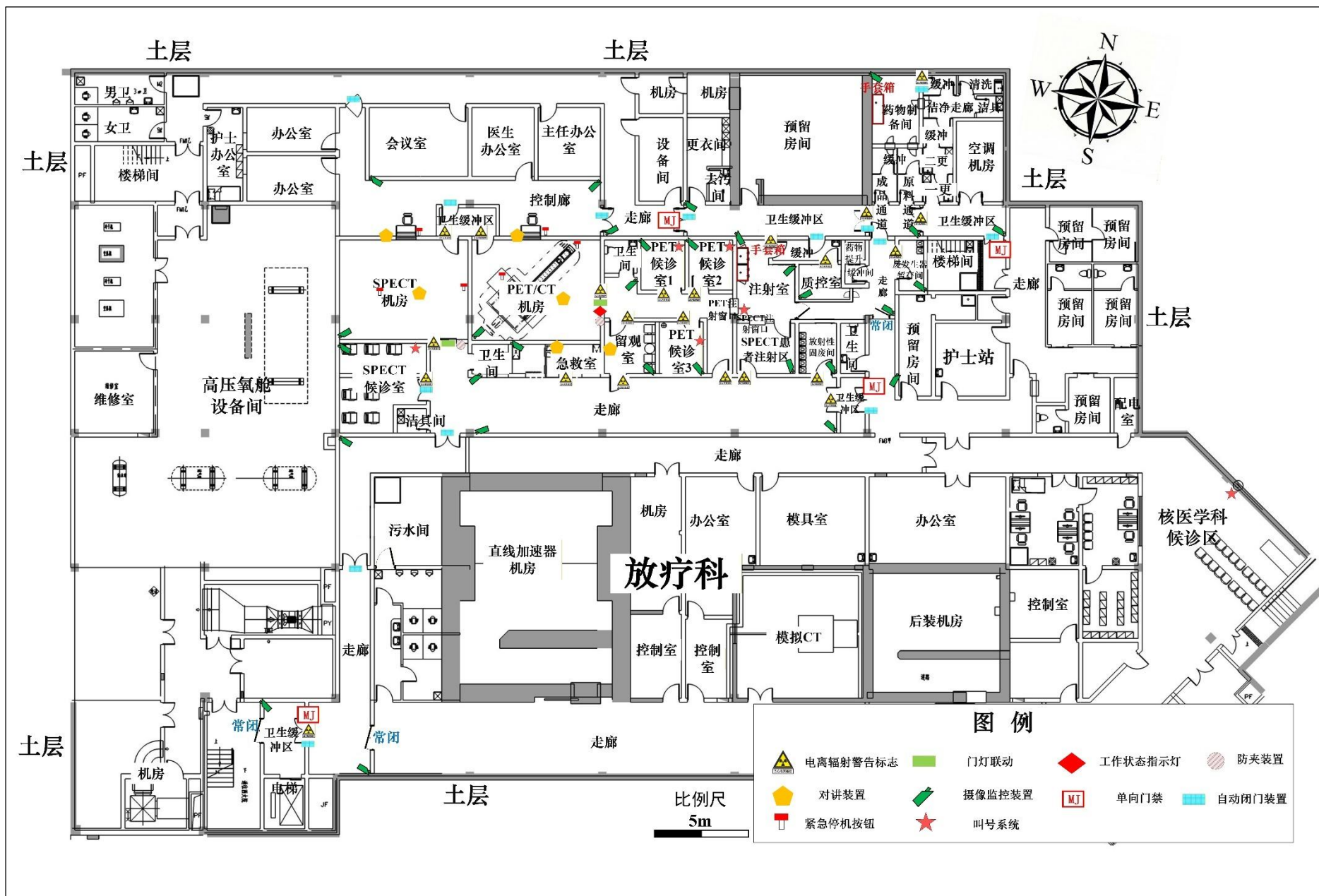


图 10-4 核医学科辐射安全设施布置示意图

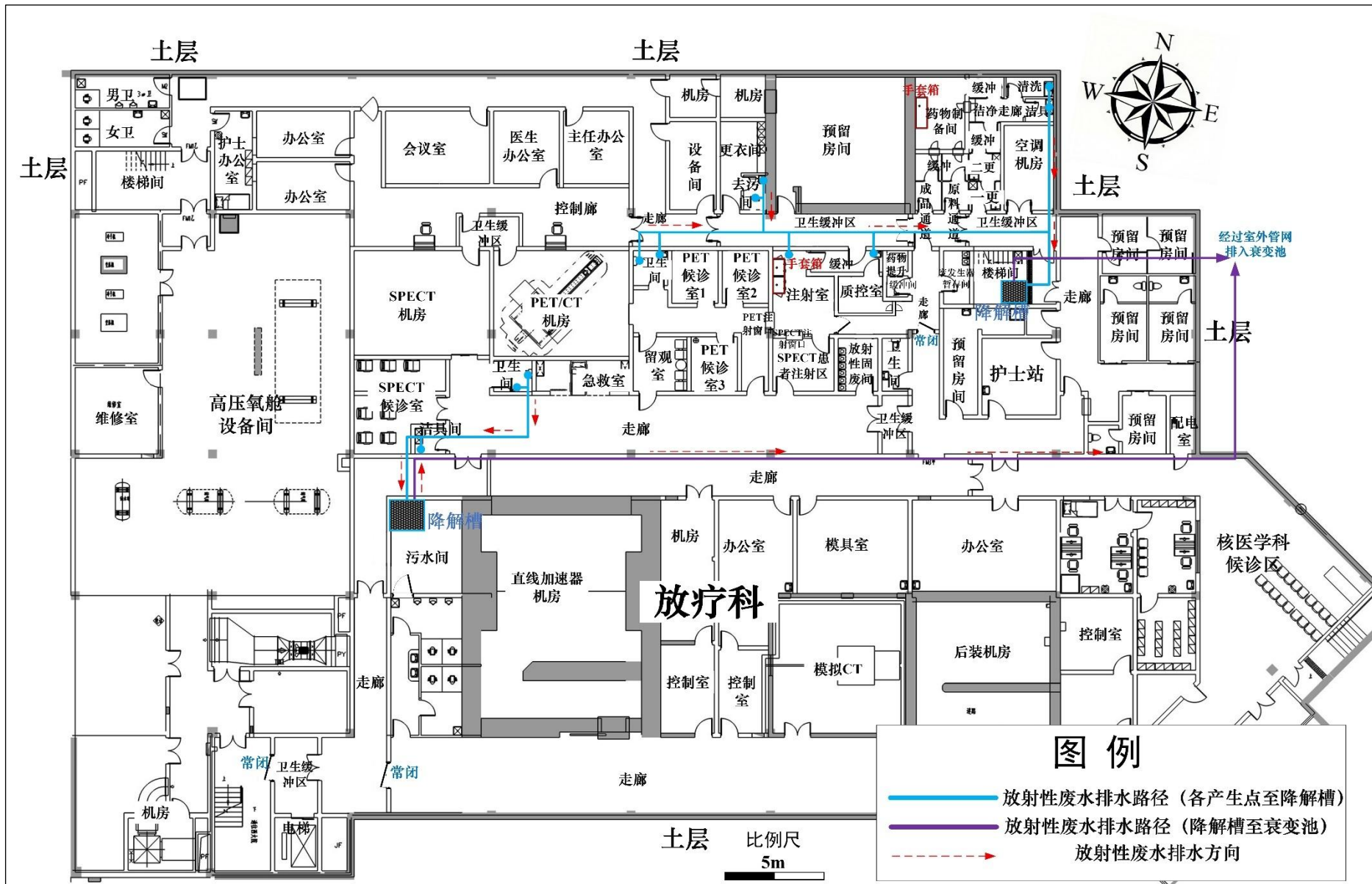


图 10-5 核医学科放射性废水排放管道走线示意图

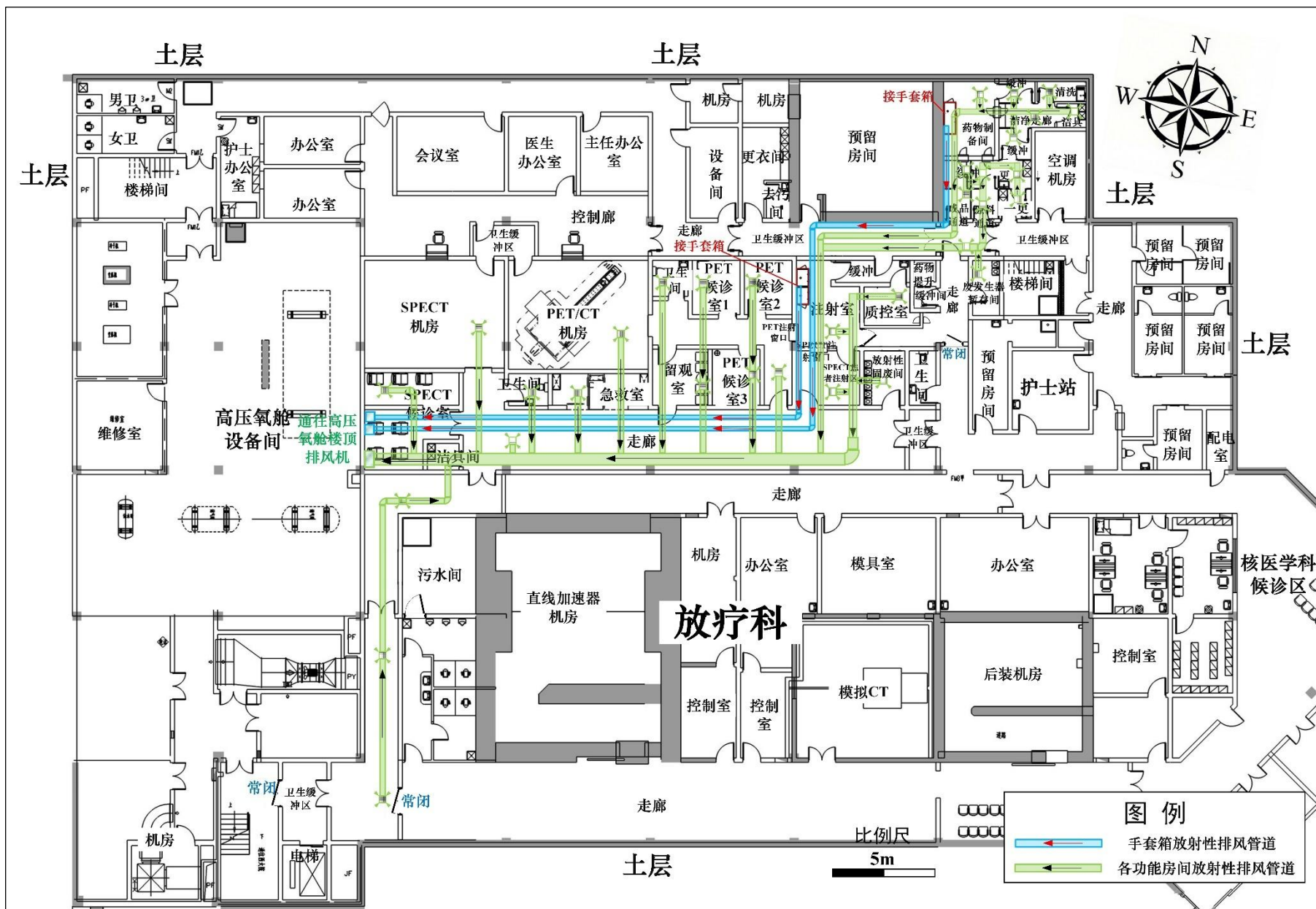


图 10-7 核医学科通排风管线路径示意图

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段环境影响分析

11.1.1 原有核医学科工作场所拆除过程

本项目医院原核医学科工作场所属于非密封放射性物质工作场所，涉及到使用放射性核素的房间主要为药物标记分装室、质控室、注射室、ECT 注射室、ECT 留观室、ECT 候诊区以及 ECT 机房等房间，工作场所内日常使用放射性药物后会产生放射性污染物，包括放射性固体废物、放射性液体和放射性气体，正常操作状态下，工作场所和设备也可能有轻微放射性表面沾污。

①放射性废气

本项目拆除过程前已停止核素使用，现有场所中残留 ^{99m}Tc 核素已超过 30 天，将不会有放射性废气产生。

②放射性废水

拆除过程前已停止核素使用，将不会有新的放射性废水产生。衰变池内的废水采取放置衰变（存放超过 30 天）使其自然衰变后，采用水泵排放。

③放射性固体废物

拆除过程中，涉及的固废主要包括：拆除过程产生废水管道、废气管道、混凝土建筑物、砖块；废抹布、拖布、手套；拆除前运行过程中产生的放射性固废，如注射器、棉球、滤纸、活性炭滤芯等。上述废物进行处置前，由于核医学科已停止使用超过 30 天，其场所内 ^{99m}Tc 已衰变超过 30 天，作为非放射性废物处理。

11.1.2 核医学科新建部分土建施工及辐射防护装修阶段

本项目医院核医学科改建区域在施工阶段的环境影响主要为土建施工、辐射防护等装修以及安装调试产生的环境影响。建设期间土建施工及辐射防护装修阶段的主要环境影响为：

①废气

建设过程中地面基础开挖、装饰装修等施工将产生扬尘，此外机械和运输车辆作业时排放废气，但以上影响仅局限在施工现场附近区域。针对上述大气污染拟采取以下措施：a)施工现场进行围挡；b)及时清扫施工场地，并保持施工场地一定的湿度；c)车辆在运输建筑材料时尽量采取遮盖、密闭措施，以减少沿途抛洒。项目施工期土建工程较少，施工扬尘产生量较少，项目装修采用环保涂料，且基本均在室内进行，扬尘对周围环境

的影响较小。

②噪声

施工期机械设备在运行中将产生不同程度的噪声，对周围环境造成一定的影响。施工噪声主要包括少量运输车辆的噪声以及装修改造使用的小型施工设备产生的噪声，但项目建设工程施工期比较短，且在独立的场地内部进行，通过加强施工期环境管理、合理安排施工时间等各项措施后对周围环境影响较小，随施工期结束而消除，因此，施工期对周围声环境的影响较小。

③固体废物

本项目施工期间固体废物主要为施工人员的生活垃圾和建筑垃圾。施工过程中的建筑垃圾和生活垃圾分别堆放，集中处理，严禁随意堆放和倾倒。生活垃圾置于医院内部垃圾收集箱内由环卫部门统一清运；建筑垃圾运往政府指定的建筑垃圾消纳场妥善处理处置，可以使工程建设产生的固体废物处于可控制状态。运垃圾的专用车每次装完垃圾后，用苫布盖好，避免途中遗洒和运输过程中造成扬尘。

④废水

本项目施工期间产生的废水主要来自施工人员的生活污水，施工人员的生活污水通过现有的生活卫生设施经过医院污水处理站处理后排入市政管网。

综上所述，本工程在施工期的环境影响是短暂的、可逆的，严格按照建设项目常规环评的要求落实相关的措施后，随着施工期的结束而消失。施工单位应严格执行有关规定的污染防治措施，并加强监管，对建设期的声环境、大气环境、水环境和固体废物等进行防治，采取降噪、防尘措施，合理安排工作时间，避免夜间施工，尽可能对周围环境的影响降到最小。

11.1.3 设备安装调试阶段

本项目设备的安装由厂家专业人员进行，医院不得自行拆卸、安装设备，安装调试期间操作人员必须持证上岗并采取足够的个人防护措施。

本项目核医学科使用的设备的安装和调试均在机房内完成，在设备安装调试阶段，应加强辐射防护管理，在此过程中医院应保证各屏蔽体屏蔽到位，关闭防护门，在机房门外设立辐射警示标志，禁止无关人员靠近。人员离开时机房必须上锁并派人看守。由于设备的安装和调试均在机房内进行，经过墙体的屏蔽和距离衰减后对环境的影响较小。

11.2 运行阶段辐射环境影响分析

由于核医学科各区域使用的核素种类、活度不同，其场所辐射屏蔽能力要求也相应不同。本项目主要通过理论估算方法论证核医学科各场所设计参数是否满足辐射屏蔽要求。本项目核医学科 PET/CT 主要利用 ^{18}F 正电子湮没产生的 γ 射线（能量均为 511keV）进行显像，其工作场所防护主要考虑 ^{18}F 产生的 γ 射线及 PET/CT 设备运行产生的 X 射线的防护；SPECT 主要利用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变时产生的 γ 射线（ γ 射线能量：140keV）进行显像，其工作场所主要考虑 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 产生的 γ 射线的防护。

本项目医院核医学科工作场所使用的核素半衰期、核素对应不同屏蔽材料什值层厚度相关计算参数见表11-1。

表 11-1 核医学科使用核素屏蔽计算参数取值

核素	核素日最大用量 MBq	半衰期	γ 射线能量 keV	对于裸源单位放射性活度所致体外 1m 处的周围剂量当量率 $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{h} \cdot \text{MBq})$	患者体内单位放射性活度所致体外 1m 处的周围剂量当量率 $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{h} \cdot \text{MBq})$	什值层 TVL		
						铅 mm	实心砖 cm	混凝土 cm
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	17700	6.02h	140	0.0303	0.0207	1.0	16	11
^{18}F	26000	109.8 min	511	0.1430	0.0920	16.6	26.3	17.6

说明：数据来源《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 H、I、L

11.2.1 核医学科工作场所屏蔽防护效能核算

11.2.1.1 计算公式

为了论证核医学科各工作场所墙体、防护门屏蔽能力，从保守角度，不考虑核素随时间衰变影响，采用如下公式进行计算：

$$X = TVL \times \lg\left(\frac{A \times \Gamma}{\dot{H}_c \times R^2}\right) \quad \text{公式（11-1）}$$

式中， \dot{H}_c —关注点剂量当量率控制水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A— 非密封放射性物质活度，MBq；

R— 非密封放射性物质距关注点距离，m；

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

X—屏蔽体厚度，mm；

TVL— γ 射线什值层厚度，mm。

经屏蔽后关注点处的剂量率：

$$\dot{H} = \frac{A \times \Gamma}{R^2} \times 10^{-\left(\frac{X}{TVL}\right)} \quad \text{公式 (11-2)}$$

式中， \dot{H} —计算点处剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A — 使用的核素活度，MBq；

Γ —核素剂量当量率常数， $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ；

X —屏蔽材料厚度，mm；

TVL — 核素屏蔽材料半值层厚度，mm；

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \text{公式 (11-3)}$$

式中： B —给定材料的屏蔽透射因子；

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 —材料厚度，mm。

$$D = D_0 \times B / R^2 \quad \text{公式 (11-4)}$$

式中： D_0 —设备 1m 处杂散剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

R —关注点距离设备表面的距离，m；

11.2.1.2 周围剂量当量率控制限值

根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中工作场所屏蔽防护要求，本项目中核医学科工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv/h}$ ，控制区内屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率应不大于 $25\mu\text{Sv/h}$ ，宜不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；放射性药物合成分装通风柜、注射窗外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，放射性药物合成分装通风柜非正对人员操作位表面的周围剂量当量率应小于 $25\mu\text{Sv/h}$ 。

11.2.1.3 等效厚度计算依据及距离取值说明

依据建设单位提供的资料，本项目使用的硫酸钡砂浆密度为 2.7g/cm^3 ，对于 γ 射线，由于硫酸钡砂浆的质量衰减系数不小于混凝土，混凝土密度为 2.35g/cm^3 ，为保守起见，将硫酸钡砂浆按混凝土考虑。根据 $10^{-X_1/TVL_1} = 10^{-X_2/TVL_2}$ 进行等效厚度计算。

本次核医学科工作场所各屏蔽体的等效铅当量折算过程及折算结果见下表所示。

表 11-2 本次核医学科工作场所各屏蔽体屏蔽能力计算结果

场所名称	设计值	折算过程 (mmPb)	等效铅当量 (mmPb)
SPECT 区域 (^{99m} Tc)	240mm 实心砖	$240 \div 160 \times 1 = 1.5$	1.5
	150mm 混凝土	$150 \div 110 \times 1 = 1.36$	1.36
	240mm 混凝土	$240 \div 110 \times 1 = 2.18$	2.18
	300mm 混凝土	$300 \div 110 \times 1 = 2.72$	2.72
	400mm 混凝土	$400 \div 110 \times 1 = 3.63$	3.63
	600mm 混凝土	$600 \div 110 \times 1 = 5.45$	5.45
	100mm 实心砖+40mm 硫酸钡砂浆	$(100 \div 160 + 40 \div 110) \times 1 = 0.98$	0.98
	240mm 实心砖+20mm 硫酸钡砂浆	$(240 \div 160 + 20 \div 110) \times 1 = 1.68$	1.68
	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡砂浆	$(240 \div 160 + 40 \div 110) \times 1 = 1.86$	1.86
	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡砂浆	$(240 \div 160 + 60 \div 110) \times 1 = 2.04$	2.04
PET/CT 区域 (¹⁸ F)	240mm 实心砖	$240 \div 263 \times 16.6 = 15.14$	15.14
	150mm 混凝土	$150 \div 176 \times 16.6 = 14.14$	14.14
	240mm 混凝土	$240 \div 176 \times 16.6 = 22.63$	22.63
	100mm 实心砖+40mm 硫酸钡砂浆	$(100 \div 263 + 40 \div 176) \times 16.6 = 10.08$	10.08
	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡砂浆	$(240 \div 263 + 30 \div 176) \times 16.6 = 17.97$	17.97
	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡砂浆	$(240 \div 263 + 40 \div 176) \times 16.6 = 18.92$	18.92
	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡砂浆	$(240 \div 263 + 60 \div 176) \times 16.6 = 20.80$	20.80
	240mm 实心砖+100mm 硫酸钡砂浆	$(240 \div 263 + 100 \div 176) \times 16.6 = 24.58$	24.58

对于 SPECT 显像检查相关工作场所，对注射室考虑实际人员相对于屏蔽墙体的位置；对药物制备间、注射室和质控室，考虑实际操作药物位置对各屏蔽墙体、防护门窗的距离；对注射后候诊室，考虑最多 4 人同时候诊作为 1 个点源和候诊室内座位位置，以最靠近墙体的座位距屏蔽墙体、防护门窗距离近似核算；对 SPECT 机房，以设备摆放位置中心点距四周墙体和防护门的距离近似取值。

对于 PET/CT 显像检查相关工作场所，对注射窗口考虑实际人员相对于屏蔽墙体的位置；急救室和注射后候诊室以病床摆放位置距四周墙体和防护门按保守距离近似取值，注射后候诊室各设置 1 张床位，各候诊室最多有 1 个人同时候诊，患者躺在床上距屏蔽墙外关注点按实际床位位置进行计算。对 PET/CT 机房，以设备摆放位置中心点距四周墙体和防护门的距离近似取值。

本项目核医学科各工作场所内距离取值分布示意图见图 11-1。

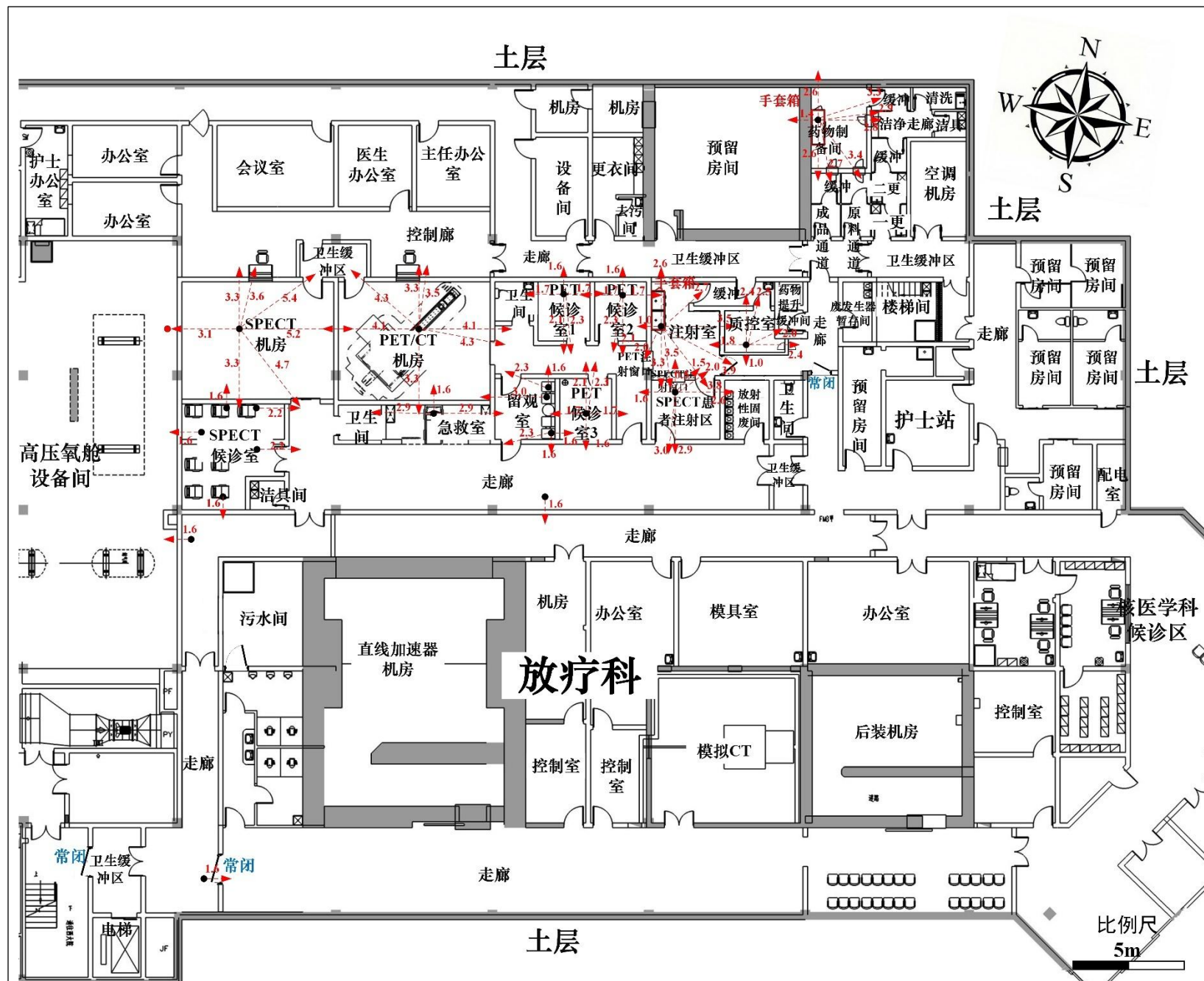


图 11-1 本项目核医学科各工作场所内距离取值分布示意图

11.2.1.4 PET/CT、SPECT 显像检查工作场所屏蔽效能核算

(1) γ 射线屏蔽效能核算结果

本项目核医学科在药物制备间内设置一个正面底面屏蔽 10mmPb，其余四面 5mmPb 的手套箱，在手套箱内用 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备和分装 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ；在注射室设置一个正面底面屏蔽大于 40mmPb，其余四面大于 30mmPb 的手套箱用于分装 PET/CT 药物 ^{18}F 的分装。分装后的药物分别在注射窗口对患者完成给药。在质控室进行质控操作时，仅考虑 1mCi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 作为辐射源进行质控室屏蔽剂量估算。

根据公式 11-1 和公式 11-2 进行计算，医院核医学科药物制备间、注射室、质控室、注射后候诊室、显像检查机房、急救室以及留观室工作场所各屏蔽体、防护门窗屏蔽计算结果见表 11-3。

表 11-3 本项目核医学科各工作场所屏蔽估算结果

场所名称 (核素活度)	计算位置	Γ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2(\text{h}\cdot\text{MBq})^{-1}$	距离 (m)	设计值	设计厚度下 墙体外瞬时 剂量($\mu\text{Sv/h}$)	H_p ($\mu\text{Sv/h}$)	符合 情况
药物制备间手套箱(考虑 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 日最大用量 17700MBq)	操作位方向柜体表面	0.0303 (裸源)	0.5	10mmPb 手套箱正面	2.15×10^{-7}	2.5	符合
	其余面方向柜体表面		0.5	5mmPb 手套箱侧面	0.02	25	符合
注射室手套箱(考虑 ^{18}F 每人每次药物分装用量 370 MBq)	操作位方向柜体表面	0.143 (裸源)	0.5	40mmPb 手套箱正面	0.82	2.5	符合
	其余面方向柜体表面		0.5	30mmPb 手套箱侧面	3.30	25	符合
药物制备间(考虑手套箱内 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 日最大用量 17700MBq)	东侧墙体(洁净走廊)	0.0303 (裸源)	2.8	10mmPb 手套箱正面+240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆(等效 11.86mmPb)	9.44×10^{-11}	2.5	符合
	南侧墙体(缓冲间)		2.6	5mmPb 手套箱侧面+240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆(等效 6.86mmPb)	1.10×10^{-6}	2.5	符合
	西侧墙体(预留房间)		1.4	5mmPb 手套箱侧面+600mm 混凝土墙体(等效 10.45mmPb)	9.71×10^{-9}	2.5	符合
	北侧墙体(土层)		2.6	5mmPb 手套箱侧面+400mm 混凝土墙体(等效 8.63mmPb)	1.86×10^{-7}	2.5	符合
	走廊传递窗(洁净走廊)		2.9	10mmPb 手套箱正面+10mmPb 防护窗	6.38×10^{-19}	2.5	符合
	原料通道传递窗(缓冲间)		3.4	10mmPb 手套箱正面+10mmPb 防	4.64×10^{-19}	2.5	符合

					护窗			
		成品通道传递窗 (缓冲间)		2.7	5mmPb 手套箱侧面+6mmPb	7.36×10^{-10}	2.5	符合
		防护门 (缓冲间)		3.3	10mmPb 手套箱正面 +6mmPb 防护门	4.92×10^{-15}	2.5	符合
		顶棚 (绿化)		4.3	5mmPb 手套箱侧面+300mm 混凝土墙体 (等效 7.72mmPb)	5.53×10^{-7}	2.5	符合
	质控室 (考虑 ^{99m} Tc 每次质控用量 37MBq)	西侧墙体 (注射室)	0.0303 (裸源)	1.8	240mm 实心砖墙+6mmPb 铅板 (等效 7.5mmPb)	1.09×10^{-8}	2.5	符合
		南侧墙体 (走廊)		1.0	240mm 实心砖墙 (等效 1.5mm Pb)	0.04	10	符合
		北侧墙体 (缓冲间)		2.4	240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆 (等效 1.86mm Pb)	2.69×10^{-3}	2.5	符合
		东侧墙体 (缓冲间)		2.0		3.87×10^{-3}	2.5	符合
		防护门 (缓冲间)		2.5	8mmPb 防护门	1.79×10^{-9}	2.5	符合
		传递窗 (走廊)		2.4	10mmPb	1.95×10^{-11}	10	符合
		顶棚 (绿化)		4.3	150mm 混凝土 (等效 1.36mm Pb)	2.65×10^{-3}	2.5	符合
	注射室 (保守考虑所有 ¹⁸ F 药物暂存在手套箱内, 最大用量为 13000MBq)	PET/CT 注射窗 (走廊)	0.143 (裸源)	2.0	30mmPb 手套箱侧面+50mmPb 铅罐	7.05×10^{-3}	10	符合
		SPECT 注射窗 (SPECT 患者注射区)		3.5	30mmPb 手套箱侧面+10mmPb 防护窗+50mmPb 铅罐	5.75×10^{-4}	2.5	符合
		南侧墙体 (SPECT 患者注射区)		3.3	30mmPb 手套箱侧面+240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆+50mmPb 铅罐 (等效 98.92mm Pb)	1.88×10^{-4}	2.5	符合
		西侧墙体 (PET 候诊室 2)		1.0	30mmPb 手套箱侧面+240mm 混凝土墙+4mmPb 铅板+50mmPb 铅罐 (等效 106.63mmPb)	7.01×10^{-4}	2.5	符合
		北侧墙体 (卫生缓冲区)		2.6	30mmPb 手套箱侧面+100mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆+50mmPb 铅罐 (等效 90.08mm Pb)	1.03×10^{-3}	2.5	符合
		东侧墙体 (质控室)		3.5	40mmPb 手套箱正面+240mm 实心砖墙+6mmPb 铅板+50mmPb 铅罐 (等效 111.14	3.06×10^{-5}	2.5	符合

				mmPb)			
	防护门 (缓冲间)		2.3	40mmPb 手套箱	4.39×10^{-4}	2.5	符合
	防护门 (走廊)		3.9	正面+8mmPb 防护门+50mmPb 铅罐	1.53×10^{-4}	10	符合
	防护门 (SPECT 患者注射区)		3.8		1.61×10^{-4}	2.5	符合
	顶棚 (绿化)		4.3	30mmPb 手套箱 侧面+150mm 混凝土+50mmPb 铅罐 (等效 94.14mmPb)	2.14×10^{-4}	2.5	符合
SPECT 患者注射区 (考虑单个注射 ^{99m}Tc 患者用量 925MBq)	东侧墙体 (放射性固废间)	0.0303 (裸源)	2.6	240mm 实心砖墙 +20mm 硫酸钡砂浆 (等效 1.68mm Pb)	0.09	10	符合
	南侧墙体 (走廊)		2.9	240mm 实心砖墙 (等效 1.5mm Pb)	0.11	10	符合
	西侧墙体 (走廊)		1.6	240mm 混凝土墙 (等效 2.18mm Pb)	0.07	10	符合
	北侧墙体 (注射室)		1.5	240mm 实心砖墙 +40mm 硫酸钡砂浆 (等效 1.86mm Pb)	0.17	2.5	符合
	防护门 (注射室)		2.0	8mmPb	7.01×10^{-8}	2.5	符合
	防护门 (走廊)		3.0		3.11×10^{-8}	10	符合
	注射给药窗 (注射室注射位置)		0.5	10mmPb 注射防护窗	1.12×10^{-8}	2.5	符合
	顶棚 (绿化)		4.3	150mm 混凝土 (等效 1.36mm Pb)	0.07	2.5	符合
PET 注射窗口 (考虑 1 位注射 ^{18}F 患者 370MBq)	注射给药窗 (注射室注射位置)	0.143 (裸源)	0.5	50mmPb 注射防护窗	0.21	2.5	符合
SPECT 机房 (考虑 1 位注射 ^{99m}Tc 患者 925MBq)	东侧墙体 (PET/CT 机房)	0.0207 (人体源)	5.2	240mm 混凝土墙 (等效 2.18mm Pb)	4.68×10^{-3}	10	符合
	西侧墙体 (高压氧舱设备间)		3.1		0.01	2.5	符合
	北侧墙体 (控制廊)		3.3		0.01	2.5	符合
	南侧墙体 (SPECT 候诊室)		3.3	5mmPb 铅板隔墙	1.75×10^{-5}	2.5	符合
	防护窗 (控制廊)		3.6	4mmPb	1.48×10^{-4}	2.5	符合
	工作人员防护门 (卫生缓冲区)		5.4	4mmPb	6.57×10^{-5}	2.5	符合
	患者防护门 (走廊)		4.7	4mmPb	8.67×10^{-5}	10	符合
	顶棚 (绿化)		4.3	150mm 混凝土 (等效 1.36mm Pb)	0.05	2.5	符合
SPECT 候诊室 (考虑 4 位注射 ^{99m}Tc 患者作为点源, 共	东侧墙体 (走廊)	0.0207 (人体源)	2.2	240mm 实心砖墙 +40mm 硫酸钡砂浆 (等效 1.86mm Pb)	0.22	10	符合
	南侧墙体 (走廊)		1.6		0.41	10	符合

	3700MBq)	西侧墙体（高压氧舱设备间）		1.6	240mm 混凝土墙（等效 2.18mm Pb）	0.20	2.5	符合
		北侧墙体（SPECT 机房）		1.6	5mmPb 铅板隔墙	2.99×10^{-4}	2.5	符合
		防护门（走廊）		2.2	6mmPb	1.58×10^{-5}	10	符合
		顶棚（绿化）		4.3	150mm 混凝土（等效 1.36mm Pb）	0.18	2.5	符合
	PET/CT 机房（考虑 1 位注射 ^{18}F 患者 370MBq）	东侧墙体（走廊）	0.0920（人体源）	4.1	240mm 实心砖墙+4mmPb 铅板（等效 19.14mmPb）	0.14	10	符合
		北侧墙体（控制廊）		3.5	240mm 实心砖墙+100mm 硫酸钡砂浆（等效 24.58mmPb）	0.09	2.5	符合
		南侧墙体（急救室）		3.3		0.10	2.5	符合
		西侧墙体（SPECT 机房）		4.1	240mm 混凝土墙（等效 22.63mm Pb）	0.09	2.5	符合
		工作人员防护门（卫生缓冲区）		4.3	10mmPb	0.46	2.5	符合
		患者防护门（走廊）		4.3	10mmPb	0.46	10	符合
		防护窗（控制廊）		3.3	10mmPb	0.78	2.5	符合
		顶棚（绿化）		4.3	150mm 混凝土+4mmPb 铅板（等效 18.14mmPb）	0.14	2.5	符合
	PET 候诊室 1、2（考虑 1 位注射 ^{18}F 患者作为点源，为 370MBq）	东侧墙体（PET 候诊室 2 或注射室）	0.0920（人体源）	1.7	240mm 实心砖墙+4mmPb 铅板（等效 19.14mmPb）	0.83	2.5	符合
		南侧墙体（走廊）		2.1	240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆（等效 17.97mm Pb）	0.64	10	符合
		西侧墙体（卫生间或 PET 候诊室 1）		1.7		0.97	2.5	符合
		北侧墙体（走廊、卫生缓冲区）		1.6	240mm 混凝土墙（等效 22.63mm Pb）	0.58	2.5	符合
		防护门（走廊）		2.3	10mmPb	1.61	10	符合
		顶棚（绿化）		4.3	150mm 混凝土（等效 14.14mm Pb）	0.26	2.5	符合
	PET 候诊室 3（考虑 1 位注射 ^{18}F 患者作为点源，为 370MBq）	东侧墙体（走廊）	0.0920（人体源）	1.7	240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆（等效 17.97mmPb）	0.97	10	符合
		南侧墙体（走廊）		1.6	240mm 混凝土墙（等效 22.63mm Pb）	0.58	10	符合
		西侧墙体（留观室）		1.7	240mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆（等效 20.80	0.66	2.5	符合

				mmPb)			
	北侧墙体 (走廊)		2.1	240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆 (等效 17.97 mmPb)	0.64	10	符合
	防护门 (走廊)		2.3	10mmPb	1.61	10	符合
	顶棚 (绿化)		4.3	150mm 混凝土 (等效 14.14mm Pb)	0.26	2.5	符合
留观室(考虑 1 位注射 ¹⁸ F 患者作为点源, 为 370MBq)	东侧墙体 (PET 候诊室 3)	0.0920 (人体源)	1.6	240mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆(等效 20.80mm Pb)	0.74	2.5	符合
	西侧墙体 (PET/CT 机房、急救室)		3.0	240mm 混凝土墙 (等效 22.63mm Pb)	0.16	2.5	符合
	南侧墙体 (走廊)		1.6		0.58	10	符合
	北侧墙体 (走廊)		1.6	240mm 实心砖墙+30mm 硫酸钡砂浆 (等效 17.97mm Pb)	1.10	10	符合
	防护门 (北侧走廊)		2.3	8mmPb	2.12	10	符合
	防护门 (南侧走廊)		2.3	8mmPb	2.12	10	符合
	顶棚 (绿化)		4.3	150mm 混凝土 (等效 14.14mm Pb)	0.26	2.5	符合
急救室(考虑 1 位注射 ¹⁸ F 患者作为点源, 为 370MBq)	东侧墙体 (留观室)	0.0920 (人体源)	2.9	240mm 实心砖墙 (等效 15.14mm Pb)	0.50	2.5	符合
	西侧墙体 (卫生间)		2.9		0.50	10	符合
	北侧墙体 (PET/CT 机房)		1.6	240mm 实心砖墙+100mm 硫酸钡砂浆 (等效 24.58 mmPb)	0.44	2.5	符合
	顶棚 (绿化)		4.3	150mm 混凝土 (等效 14.14mm Pb)	0.26	2.5	符合
患者走廊 (保守考虑 1 位注射 ¹⁸ F 患者 370MBq)	南侧墙体 (放疗科走廊)	0.0920 (人体源)	1.6	240mm 实心砖墙+40mm 硫酸钡砂浆(等效 18.92mm Pb)	0.96	2.5	符合
	西侧墙体 (高压氧舱设备间)		1.6	240mm 实心砖墙+60mm 硫酸钡砂浆 (等效 20.80mm Pb)	0.74	2.5	符合
	核医学科南侧防护门 (放疗科患者走廊)		1.6	15mmPb	1.66	2.5	符合
	顶棚 (绿化)		4.3	150mm 混凝土 (等效 14.14mm Pb)	0.26	2.5	符合

说明:1、计算时选取四面屏蔽体及顶棚外表面 30cm 作为关注点;

2、从保守角度考虑, 计算时不考虑患者体内核素随时间的衰变影响;

3、各核算位置周围剂量当量率控制目标值根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 及 2023 年 9 月 13 日生态环境部《关于核医学标准相关条款咨询的复函》(辐射函(2023) 20 号) 中工作场所屏蔽要求进行选取。

由上表理论估算结果可知，西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科各工作场所四周屏蔽体、防护门窗外剂量率均满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）标准相关限值要求，对周边环境影响较小。

（2）X 射线屏蔽效能核算结果

1、PET/CT 显像检查室面积、防护能力要求

由于本项目 PET/CT 均具备 CT 扫描功能，属于Ⅲ类射线装置。根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）标准，其机房最小单边长度应 $\geq 4.5\text{m}$ ，机房内有效使用面积 $\geq 30\text{m}^2$ 。机房屏蔽墙体、防护门窗应至少具备 2.5mm 铅当量防护能力。西安交通大学第一附属医院榆林医院门诊住院楼核医学科本次拟建设的 PET/CT 显像检查室设计尺寸参数符合性分析见表 11-4。

表 11-4 PET/CT 机房使用面积、最小单边长度符合性分析

对象	参数	设计值	评价标准 ¹	是否符合
PET/CT 机房	使用面积	47.6 m ²	$\geq 30\text{m}^2$	符合
	最小单边长	6.1m	$\geq 4.5\text{m}$	符合

说明：评价标准依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）。

根据上表可知，本项目 PET/CT 机房使用面积及最小单边长度均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求。

2、PET/CT 机房防护屏蔽设计符合性分析

根据 11.2.1.3 章节中对核医学科各工作场所墙体进行等效厚度核算结果，从保守角度，将硫酸钡砂浆按混凝土进行厚度核算。根据《辐射防护手册 第三分册》第 63 页表 3.4，在管电压 150kV 条件下，240mm 砖（ $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）相当于 2mmPb。根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）附录 C 公式 C.1 和 C.2，混凝土的 α 、 β 、 γ 取值自附录 C 表 C.2，计算得出在管电压 140kV（CT）下，100mm 混凝土等效铅当量为 0.95mmPb，150mm 混凝土等效铅当量为 1.57mmPb，240mm 混凝土等效铅当量为 2.86mmPb。

本项目拟配置的 PET/CT 最大管电压为 140kV，根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）表 3 中的要求，机房的 X 射线防护屏蔽措施符合性分析见下表所示。

表 11-5 PET/CT 机房 X 射线防护屏蔽措施符合性分析一览表

对象	屏蔽对象	屏蔽材料及规格	等效屏蔽	标准要求	符合性
PET/CT 机房	北侧、南侧墙体	240mm 实心砖墙+100mm 硫酸钡砂浆	2.95mmPb	$\geq 2.5\text{mmPb}$	符合
	西侧墙体	240mm 混凝土墙	2.86mmPb	$\geq 2.5\text{mmPb}$	符合
	东侧墙体	240mm 实心砖墙+4mmPb 铅板	6mmPb	$\geq 2.5\text{mmPb}$	符合
	顶棚	150mm 混凝土+4mmPb 铅板	5.57mmPb	$\geq 2.5\text{mmPb}$	符合
	患者防护门	10mmPb	10mmPb	$\geq 2.5\text{mmPb}$	符合
	工作人员防护门	10mmPb	10mmPb	$\geq 2.5\text{mmPb}$	符合
	观察窗	10mmPb	10mmPb	$\geq 2.5\text{mmPb}$	符合

说明：本项目CT设备最大管电压为140kV；

由上表结果可知，本项目 PET/CT 机房的屏蔽能力能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）的要求，可以预计 CT 设备部分在运行中对外环境辐射影响较小。

3、PET/CT机房运行时附加剂量率分析

①关注点的选取

关注点的选取主要考虑距防护墙体、门、窗表面 30cm，顶棚上方（楼上）距顶棚地面 100cm，具体点位分布图见图 11-1。

②各关注点剂量率估算

本项目 PET/CT 设备进行 CT 扫描时，机房周围存在 X 射线与患者释放的 γ 射线的叠加辐射贡献，故单独进行分析。本项目拟安装的 PET/CT 设备中 CT 设备最大管电压 140kV、最大管电流 833mA。

根据设备厂家上海联影医疗科技股份有限公司提供的资料，本次拟采用的设备在 140kV 工况下 CT 周围的剂量率分布曲线，1m 处的杂散辐射为 $0.052\mu\text{Gy/mAs}$ （垂直）和 $0.051\mu\text{Gy/mAs}$ （水平），从保守角度，PET/CT 扫描取 833mA，1m 处的杂散辐射剂量率最高约 155.9mGy/h ，其它型号设备的 CT 杂散辐射水平也在相同量级。 α 、 β 、 γ 为铅对 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数见下表，相应材料的屏蔽透射因子及附加剂量率计算公式见公式 11-3 和公式 11-4。

表 11-6 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

电压	材料	α	β	γ
140kV（CT）	铅	2.009	3.990	0.3420
	混凝土	0.0336	0.0122	0.5190

根据表 11-5 中核算的 PET/CT 机房屏蔽体的等效铅厚度以及公式 11-3 计算得到的透射因子 B，最终通过公式 11-4 计算得出本项目 PET/CT 机房屏蔽体外表面的附加剂量率见下表所示。

表 11-7 CT 运行时 PET/CT 机房屏蔽体外附加剂量率核算结果

对象	屏蔽对象	距离 (m)	屏蔽设计厚度等效铅厚度 (mmPb)	透射因子 B	CT 辐射所致附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	患者辐射所致附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	患者辐射叠加 CT 辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
PET/CT 机房	东侧墙体	4.1	6	2.45×10^{-7}	2.27×10^{-3}	0.14	0.14
	北侧墙体	3.5	2.95	1.42×10^{-4}	1.81	0.09	1.90
	南侧墙体	3.3		1.42×10^{-4}	2.04	0.10	2.14
	西侧墙体	4.1	2.86	1.74×10^{-4}	1.61	0.09	1.70
	工作人员防护门	4.3	10	7.70×10^{-11}	6.50×10^{-7}	0.46	0.46
	患者防护门	4.3	10	7.70×10^{-11}	6.50×10^{-7}	0.46	0.46
	防护窗	3.3	10	7.70×10^{-11}	1.10×10^{-6}	0.78	0.78
	顶棚	4.3	5.57	5.88×10^{-7}	4.96×10^{-3}	0.14	0.15

由上表可知，本项目 PET/CT 机房屏蔽体外同时考虑患者释放的 γ 射线和 CT 扫描散射对周围环境的辐射影响时，PET/CT 各屏蔽体外表面 30cm 处的附加剂量率均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中的相关标准限值要求。

11.2.2 核医学科工作人员和公众剂量估算

本次剂量估算主要依据辐射剂量学原理进行理论剂量估算，预测医院核医学科投入运行后对职业人员和公众辐射影响。

γ 射线或 X 射线外照射所致人员年有效剂量计算公式如下：

$$H_{\gamma} = D_{\gamma} \times t \times T \times 10^{-3} \quad \text{公式 (11-5)}$$

式中： H_{γ} — γ 射线或 X 射线外照射所致人员年有效剂量当量，mSv；

D_{γ} —人员停留位置处剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

t —人员年接触 γ 射线或 X 射线时间，h；

T —居留因子。

11.2.2.1 SPECT 显像检查所致工作人员剂量估算

1、 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备、标记分装 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物

本项目 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，根据医院提供的资料，本项目 SPECT 显像检查年使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的量为 $4.425 \times 10^{12}\text{Bq}$ ，保守考虑每年共约淋洗 500 次，每次淋洗时间约 15min，全年淋洗 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的时间约 125h，发生器淋洗在带有排风装置的手套箱内进行，淋洗过程中操作位处的剂量率为 $2.15 \times 10^{-7}\mu\text{Sv/h}$ （见表 11-3 所示），则可计算得出

^{99m}Tc 淋洗过程中工作人员的年附加有效剂量为 $2.69 \times 10^{-8} \text{mSv/a}$ 。

^{99m}Tc 药物由 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器制备完成后直接在手套箱内进行标记分装，工作人员分装操作位处剂量率为 $2.15 \times 10^{-7} \mu\text{Sv/h}$ ，年检查患者 4000 人次，每人每次标记分装时间按 0.5min 计，年标记分装时间为 33.3h，则标记分装过程所致工作人员的年附加有效剂量为 $7.17 \times 10^{-9} \text{mSv/a}$ 。

综上， ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗制备、标记分装 ^{99m}Tc 药物过程由 1 名工作人员完成，则所致工作人员年附加有效剂量为 $3.41 \times 10^{-8} \text{mSv/a}$ 。

2、放射性药物转移

放射性药物注射前，由运输人员将分装好的药物从药物制备间经成品通道送出后通过走廊进注射室后转移至注射室注射窗，转移过程中采取转运铅防护罐进行防护。本项目 SPECT 使用 ^{99m}Tc 进行显像检查，每天转移 1 批次，药物转移时间按 2min/批次，全年累计约 8.4h，剂量估算按每批次药物最大使用量 17700MBq 考虑。转移过程中药物置于 10mmPb 的转运铅防护罐中，人员操作位处（与放射源距离按 0.5m 考虑）的剂量率为 $2.15 \times 10^{-7} \mu\text{Sv/h}$ （依据公式 11-2 进行计算）。则转移 ^{99m}Tc 药物的运输人员所受年附加有效剂量为 $1.80 \times 10^{-9} \text{mSv/a}$ 。

3、放射性药物注射

本项目 SPECT 使用 ^{99m}Tc 药物进行显像检查，每天检查人数为 16 人次，年检查 4000 人次。注射 ^{99m}Tc 药物时间均按 1min/人计，全年累计约 66.7h。工作人员在 10mmPb 的一体化防护注射装置后给患者注射药物，因此工作人员操作位剂量率为 $1.12 \times 10^{-8} \mu\text{Sv/h}$ （见表 11-3 所示），因此 ^{99m}Tc 给药所致注射室工作人员所受年附加有效剂量为 $7.47 \times 10^{-10} \text{mSv/a}$ 。

4、摆位、显像检查

SPECT 使用 ^{99m}Tc 药物进行显像检查，每天最多检查人数 16 人。患者在检查过程中需要进行摆位，每位患者摆位按 1min 计，全年累计摆位时间 66.7h。摆位时放射性工作人员距离注射药物的患者按 1m 计，注射 925MBq ^{99m}Tc 药物的病人，考虑工作人员穿戴 0.5mmPb 铅衣指导患者摆位，计算得 1m 处摆位位置处的理论剂量率为 $6.05 \mu\text{Sv/h}$ （ $=0.0207 \times 925 \times 10^{-(0.5/1)}$ ），则 SPECT 摆位所致工作人员的年附加有效剂量约为 0.40mSv/a （ $=66.7 \text{h} \times 6.05 \mu\text{Sv/h} \times 10^{-3}$ ）。

SPECT 显像检查过程时工作人员在机房外控制廊进行操作，每人每次 SPECT 扫描时

间约 10min，则全年扫描时间约为 666.7h。SPECT 扫描时，工作人员操作位置处剂量率取服药患者所致控制廊位置的最大剂量率 0.01 μ Sv/h（见表 11-3）进行计算，经过计算，显像检查过程中所致控制廊工作人员年附加有效剂量为 6.67 $\times 10^{-3}$ mSv/a。

综上，本项目 SPECT 显像检查过程中所致工作人员的剂量统计详见下表所示。

表 11-8 SPECT 显像检查过程中所致工作人员的年附加剂量估算表

对象	工作岗位	关注点剂量率 (μ Sv/h)	全年累计 工作时间 (h)	年附加 有效剂量 (mSv/a)	岗位拟配备人 数 (人)	单人年附加 有效剂量 (mSv/a)
SPECT	^{99m} Tc 淋洗	2.15 $\times 10^{-7}$	125	2.69 $\times 10^{-8}$	1（药物制备 间工作人员）	3.41 $\times 10^{-8}$
	^{99m} Tc 标记分装	2.15 $\times 10^{-7}$	33.3	7.17 $\times 10^{-9}$		
	^{99m} Tc 药物转移	2.15 $\times 10^{-7}$	8.4	1.80 $\times 10^{-9}$	1（运输人员）	1.80 $\times 10^{-9}$
	^{99m} Tc 药物注射	1.12 $\times 10^{-8}$	66.7	7.47 $\times 10^{-10}$	1（注射室工 作人员）	7.47 $\times 10^{-10}$
	摆位	6.05	66.7	0.40	1（SPECT 显 像检查操作人 员）	0.41
	显像	0.01	666.7	6.67 $\times 10^{-3}$		

说明：由于质控时操作的放射性药物极少且质控时间较短，对质控人员的辐射影响基本可以忽略，因此本次未对质控人员的年附加有效剂量进行分析。

由上表计算结果可知，本项目 SPECT 显像检查时所致工作人员职业照射的最大年有效剂量值为 0.41mSv/a，符合《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中职业照射的剂量约束限值及本项目提出的剂量约束限值 5mSv/a。

11.2.2.2 PET/CT 显像检查所致工作人员剂量估算

1、分装 ¹⁸F 药物

本项目 ¹⁸F 药物需要在注射室的手套箱内进行分装，本项目注射室工作人员分装操作位处剂量率为 0.82 μ Sv/h，年检查患者 7500 人次，每人分装时间按 0.5min 计，年分装时间 62.5h，则分装过程所致工作人员的年附加有效剂量为 0.05mSv/a。

2、放射性药物转移

放射性药物注射前，注射室工作人员将分装好的药物从注射室手套箱转移至注射室一体化注射装置位置，转移过程中采取注射器转运盒进行防护。本项目 PET/CT 使用 ¹⁸F 进行显像检查，每天注射 30 人，药物转移时间按 20s/人计算，全年累计约 41.7h，¹⁸F 检查每名患者注射最大药物量为 370MBq。转移过程中药物置于 10mmPb 的注射防护套中，将注射防护套置于注射器 6mmPb 的注射器转运盒，人员操作位处（与放射源距离按 0.5m 考虑）的剂量率为 23 μ Sv/h（依据公式 11-2 进行计算）。则转移 ¹⁸F 药物所致注射室工作

人员年附加有效剂量为 0.96mSv/a。

3、放射性药物注射

本项目 PET/CT 使用 ^{18}F 进行显像检查，每天使用 ^{18}F 药物显像检查 30 人次，药物注射时间按 1min/人，则全年 ^{18}F 显像检查药物注射累计时间约 125h， ^{18}F 检查每名患者注射最大药物量为 370MBq。工作人员在 50mmPb 的一体化注射防护装置后给患者注射，因此经计算注射人员操作位处的剂量率为 0.21 $\mu\text{Sv/h}$ （见表 11-3），因此 ^{18}F 给药所致注射室工作人员年附加有效剂量为 0.03mSv/a。

4、放射性药物送药

本项目运输人员于每天上班前（上午 7:45，下午 13:45）在核医学科药物提升间取到药厂配送的 ^{18}F 药物后依次通过缓冲间、走廊后送至注射室手套箱内等待分装，每天运输 2 次，每次运输时间约 1min，全年累计约 8.4h，剂量估算按每批次药物最大使用量 13000MBq 考虑。运输过程中药物置于 50mmPb 的转运铅防护罐中，人员操作位处（与放射源距离按 0.5m 考虑）的剂量率为 7.23 $\mu\text{Sv/h}$ （依据公式 11-2 进行计算）。则 ^{18}F 药物的运输人员所受年附加有效剂量为 0.06mSv/a。

5、摆位、显像检查

PET/CT 使用 ^{18}F 进行显像检查，根据建设单位提供的资料，每天最多检查 30 人次。每名患者摆位时间按 1min 计，则全年 ^{18}F 显像检查累计摆位时间为 125h，摆位时放射性工作人员距离注射药物的患者按 1m 计，经计算注射 ^{18}F 药物 370MBq 患者体表外 1m 处辐射剂量率为 34.04 $\mu\text{Sv/h}$ （ $=0.092 \times 370$ ），则摆位环节放射性工作人员所受的年附加有效剂量约为 4.26mSv/a（ $=125\text{h} \times 34.04\mu\text{Sv/h} \times 10^{-3}$ ）；本项目摆位环节拟安排 2 人轮岗，故每名放射性工作人员摆位时所受的年附加有效剂量约为 2.13mSv/a。

PET/CT 显像检查过程，工作人员在操作间内进行操作，每人每次 PET 扫描时间约 15min，则全年扫描时间为 1875h；每人每次 CT 扫描时间约 0.5min，则全年扫描时间为 62.5h。PET 扫描时，工作人员操作位置处剂量率取服药患者所致观察窗外表面 30cm 处剂量率 0.78 $\mu\text{Sv/h}$ （见表 11-3）进行计算。CT 扫描时考虑到 X 射线叠加影响，工作人员操作位置处剂量率取 1.90 $\mu\text{Sv/h}$ 。通过计算，显像检查过程中所致控制廊工作人员总年附加有效剂量为 1.58mSv/a。

综上，本项目 PET/CT 显像检查过程中所致工作人员的年附加剂量统计详见下表所示。

表 11-9 PET/CT 显像检查过程中所致工作人员的年附加剂量估算表

对象	工作岗位	关注点剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	全年累计 工作时间 (h)	年附加 有效剂量 (mSv/a)	岗位拟配备 人数 (人)	单人年附加有效 剂量 (mSv/a)	
PET/ CT	^{18}F 药物分装	0.82	62.5	0.05	1(注射室工 作人员)	1.04	
	^{18}F 药物转移	23	41.7	0.96			
	^{18}F 药物注射	0.21	125	0.03			
	^{18}F 药物送药	7.23	8.4	0.06	1 (运输人 员)	0.06	
	^{18}F 药物患者摆位	34.04	125	4.26	2 (PET/CT 显像检查操 作人员)	2.13	3.71
	显像	0.78 1.90	1875 62.5	1.46 0.12		1.58	

说明：本项目拟安排 2 位摆位人员轮流进机房摆位操作，故单人年有效剂量为年附加总有效剂量的 1/2，由于显像时两人均在操作位，故单人年有效剂量等于总年附加有效剂量。

由上表计算结果可知，本项目 PET/CT 显像检查所致工作人员职业照射的最大年附加有效剂量值为 3.71mSv/a，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中职业照射的剂量约束限值及本项目提出的 5mSv/a 剂量约束限值要求。

11.2.2.4 显像检查所致工作人员叠加年附加有效剂量估算

考虑本项目在 SPECT 和 PET/CT 显像检查过程中，位于控制廊位置处的工作人员可能受到隔壁机房运行所致辐射的叠加影响，因此对其进行叠加影响分析后如下表所示。

表 11-10 显像检查工作人员所受叠加年附加剂量估算表

对象	叠加影响的来源	关注点叠加剂量率 (μSv/h)	叠加来源全年累计工作时间 (h)	叠加年附加有效剂量 (mSv/a)		所在岗位年附加有效剂量 (mSv/a)	叠加后的总年附加有效剂量 (mSv/a)
SPECT 显像检查操作人员	PET/CT 显像检查	患者所致：0.10	2062.5	0.21	0.21	0.41	0.62
		CT 所致： 1.60×10 ⁻⁷	62.5	1.00×10 ⁻⁸			
PET/CT 显像检查操作人员	SPECT 显像检查	1.99×10 ⁻⁵	733.4	1.46×10 ⁻⁵		3.71	3.71

说明：本项目按照距离平方反比的方法进行计算核医学科工作场所对周边环境的辐射影响，并从保守角度考虑，未考虑其他屏蔽墙体的屏蔽效果；

由上表计算结果可得，若考虑叠加影响，SPECT 和 PET/CT 显像检查工作人员受到的有效剂量最大值为 3.71mSv/a。

根据表 11-8~表 11-10 中对 SPECT 和 PET/CT 显像检查过程中所致工作人员的年附加有效剂量估算结果可得，本项目核医学科运行所致 PET/CT 显像检查操作人员的年附加有效剂量最大，最大年附加有效剂量为 3.71mSv/a，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中职业照射的剂量约束限值及本项目提出的 5mSv/a 剂量约束限值要求。

11.2.2.5 公众人员年附加有效剂量估算

本项目核医学科位于医院病房综合楼负一层西北侧，核医学科设置有相对独立的医护人员、患者、药物、放射性固废等通道，患者出入口均设置有单向门禁系统，除辐射工作人员、患者可进入核医学科工作场所外，其他无关的公众人员难以进入核医学科内部。本项目对周围公众人员的年附加有效剂量估算见下表所示。

表 11-11 公众成员年有效剂量估算结果

工作场所	关注点	居留因子	患者辐射影响			CT 扫描影响			年有效剂量 (mSv/a)
			控制区边界周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射时间 (h)	患者辐射影响 (mSv/a)	控制区边界周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射时间 (h)	CT 辐射影响 (mSv/a)	
药物制备间	楼上绿化	1/40	5.53×10^{-7}	淋洗 125h+分装 33.3h=158.3h	2.19×10^{-9}	/	/	/	2.19×10^{-9}
质控室	楼上绿化	1/40	2.65×10^{-3}	每天约 30min, 年 125h	8.27×10^{-6}	/	/	/	8.27×10^{-6}
注射室	楼上绿化	1/40	2.14×10^{-4}	暂存 ^{18}F 药物, 年 累计约 1500h	8.03×10^{-6}	/		/	8.03×10^{-6}
SPECT 患者注射区	楼上绿化	1/40	0.07	每名 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 患者 1min, 4000 人, 年累计 66.7h	1.17×10^{-4}	/	/	/	1.17×10^{-4}
PET 注射窗位置	楼上绿化	1/40	0.01	每名 ^{18}F 患者 1min, 7500 人, 年累计 125h	3.13×10^{-5}	/	/	/	3.13×10^{-5}
SPECT 机房	楼上绿化	1/40	0.05	每名 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 患者 11min, 4000 人, 年累计 733.3h	9.17×10^{-4}	/	/	/	9.17×10^{-4}
	西侧高压氧舱设备间	1/16	0.01		4.58×10^{-4}	/	/	/	4.58×10^{-4}
SPECT 候诊室	楼上绿化	1/40	0.18	考虑 4 名患者同时候诊, 候诊时间均按 0.5h 计, 年累计时间 500h	2.25×10^{-3}	/	/	/	2.25×10^{-3}
	西侧高压氧舱设备间	1/40	0.20		6.25×10^{-3}	/	/	/	6.25×10^{-3}

续表 11-11 公众成员年有效剂量估算结果

工作场所	关注点	居留因子	患者辐射影响			CT 扫描影响			年有效剂量 (mSv/a)
			控制区边界周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射时间 (h)	患者辐射影响 (mSv/a)	控制区边界周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射时间 (h)	CT 辐射影响 (mSv/a)	
PET/CT 机房	楼上绿化	1/40	0.14	摆位 125h/+显像 1875h =2000h	7.00×10^{-3}	4.96×10^{-3}	62.5h	7.75×10^{-6}	7.01×10^{-3}
PET 候诊室 1、2、3	楼上绿化	1/40	0.26	考虑每个候诊室有 1 名患者候诊，候诊时间均按 0.5h 计，年累计时间 1000h	6.5×10^{-3}	/	/	/	6.5×10^{-3}
留观室	楼上绿化	1/40	0.26	考虑 1 人留观，留观时间按最长时间 10min 计，则年累计留观时间为 1250h	8.13×10^{-3}	/	/	/	8.13×10^{-3}
急救室	楼上绿化	1/40	0.26	考虑每年有 20 名患者需要抢救，抢救时间按 30min，年累积时间 10h	6.50×10^{-5}	/	/	/	6.50×10^{-5}
患者走廊	楼上绿化	1/40	0.26	保守考虑每人停留时间 1min 计，则总停留时间约为 58.3h	3.79×10^{-4}	/	/	/	3.79×10^{-4}
	放疗科患者走廊	1/5	1.66		1.94×10^{-2}	/	/	/	1.94×10^{-2}

由上表可知，核医学科各工作场所控制区边界外的公众成员受到的年附加剂量最大为 0.02mSv/a ，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中公众照射的剂量约束限值及本项目提出的 0.1mSv/a 剂量约束限值要求。根据射线源与距离平方呈衰减关系，本项目医院核医学科评价范围内其他环境保护目标距离核医学科相对较远，其人员停留位置处的剂量率均小于表 11-11 中的控制区边界周围剂量当量率，其人员受到的年附加有效剂量小于 0.02mSv 。此外，本项目医院核医学科是个相对封闭的区域，且公众在控制区边界外停留时间较短，故公众成员受到的附加剂量实际会比环评预测值小。

11.2.3 放射性三废环境影响分析

11.2.3.1 放射性废水环境影响分析

1、放射性废水的收集及排放

本项目核医学科日产生放射性废水量为 0.680m^3 。医院拟将现有的衰变池进行部分改造用来储存本项目产生的放射性废水，衰变池位于在病房综合楼北侧地下一层，为推流式衰变池，改造后的衰变池包含1格污泥池、11格连续式衰变池以及1格检测池，污泥池+连续式衰变池总有效使用容积约 594m^3 ，污泥池底设搅拌器用来防止污泥淤积。本项目核医学科放射性废水主要污染核素为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F ，其中 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 半衰期（6h）较长，但均为短半衰期核素，根据衰变池全部有效使用容量可算得，医院核医学科在运行后约3.5年衰变池可开始排放放射性废水，其时间长度远远大于本项目使用的放射性药物所需要的衰变时间，医院衰变池现有容积可以满足核医学科放射性废水贮存要求。

2、衰变池的衰变能力

本项目使用的核素为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F ，均为短半衰期核素。根据 AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirements，给药 2 小时后，膀胱排出活度约 15%~20%。本评价按照最不利情况考虑，所有显像患者均排出给药量活度的 20%进入衰变池。因使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{18}F 显像的患者需要进行等候、扫描或留观，停留时间较长，期间需要入厕，从保守角度考虑，按使用的核素 20%的量（含患者冲便废水）排入衰变池。本项目 SPECT 诊断 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 日最大用药量为 $1.77\times 10^{10}\text{Bq}$ ，PET 诊断 ^{18}F 日最大用药量为 $2.6\times 10^{10}\text{Bq}$ 。

考虑废水衰变，第 n 天的废水进入衰变池后，衰变池中单一核素的放射性活度用以下公式计算：

$$N = \sum_1^t N_0 \times e^{-0.693(t-n)/T_{1/2}} \quad \text{公式 (11-6)}$$

式中：

N —第 n 天的放射性废水进入衰变池中后，衰变池中某核素的总活度，Bq；

N_0 —每日进入衰变池的废水活度，Bq；

t —衰变池注满所用时间，天；

$T_{1/2}$ —对应核素的半衰期，天。

根据核素衰变规律，衰变计算公式如下：

$$A_{(t)} = A_0 \times e^{-\lambda t} = A_0 \times e^{-\left(\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\right)t} = A_0 \times (e^{\ln 2})^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = A_0 \times 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad \text{公式 (11-7)}$$

$$A_{\text{出水}} = \sum_{t=k}^m A_{(t)} \quad \text{公式 (11-8)}$$

式中：

A_0 ——每天产生的初始放射性活度；

$A_{(t)}$ ——衰变 t 天后的放射性活度；

t ——衰变天数，d；

$T_{1/2}$ ——核素半衰期，d；

m ——单份放射性废水最长衰变时间，d；

k ——单份放射性废水最短衰变时间，d。

因此项目核医学科放射性废水排放活度见下表。

表 11-12 衰变池单个池体住满时池中放射性活度估算结果

核素	日核素最大用量 Bq	日排入衰变池核 素量 Bq	半衰期	住满所需时间 (天)	注满时池中 活度 Bq
^{18}F	2.6×10^{10}	5.2×10^9	109.8min	73	5.21×10^9
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1.77×10^{10}	3.54×10^9	6.02h	73	3.78×10^9

表 11-13 衰变池外排废水中放射性核素估算结果

核素	日核素最大用量 Bq	日排入衰变池核 素量 Bq	半衰期	暂存时间 (天)	衰变后单次 核素排放活 度 Bq
^{18}F	2.6×10^{10}	5.2×10^9	109.8min	1277	$< 4.71 \times 10^{-291}$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1.77×10^{10}	3.54×10^9	6.02h	1277	$< 3.35 \times 10^{-231}$

由上表估算结果可知，本项目核医学科衰变池运行后，产生的放射性废水贮存 3.5a 后开始排放放射性废水，衰变池排放废水中核素浓度远远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中相关核素的豁免浓度，随后排入医院污水处理站经进一步处理后外排至市政污水管网。

本项目建议医院应做到：①衰变池池底和池壁应坚固、耐腐蚀和无渗透性，放射性衰变池应定期检查其密封性，应有防雨、防漏和防渗的措施。

②严格要求核医学科的患者应当使用专用卫生间，专用卫生间应具备使病人排泄物迅速全部冲洗入池的条件，而且随时保持便池周围清洁。

3、衰变池的辐射影响估算

本项目衰变池位于医院核医学科北侧地下一层，四周及下方均为土层无建筑物，顶部为院内绿化及道路，衰变池四周及底部采用 370mm 厚钢筋混凝土浇筑，顶棚采用 200mm 混凝土+1000mm 厚土层进行防护。由于本项目衰变池四周距环境敏感目标较远，且中间间隔有较厚的土层，实际对周边环境敏感目标的影响极小。本次主要计算衰变池对顶部区域的辐射影响，核素浓度保守考虑池子注满时的浓度，计算时视衰变池为点源。估算结果见下表所示。

表 11-14 衰变池外关注点的周围剂量当量率估算结果

核素	关注点	核素活度 /MBq	距离/m	屏蔽材料	剂量率 /μSv/h	H _p (μSv/h)
¹⁸ F	顶部绿化及道路	5210	3.1	200mm 混凝土+1000mm 厚土层	0.13	2.5
^{99m} Tc		3780	3.1		0.01	2.5

说明：从保守角度考虑，将衰变池池体看做点源进行计算，实际衰变池顶部位置剂量率远远小于表中估算值。

表 11-15 衰变池外关注点公众年附加有效剂量估算结果

工作场所	关注点	最大剂量率 /μSv/h	年受照时间/h	居留因子	年附加有效剂量 /mSv/a		约束值/mSv/a
¹⁸ F	顶部绿化流动人员	0.13	8760	1/40	0.03	0.03	0.1
^{99m} Tc		0.01			2.19×10 ⁻³		

由上表计算结果可知，本项目运行后衰变池外关注点位置的周围剂量当量率满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中的限值要求，公众所受年附加有效剂量最大为 0.03mSv/a，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中公众照射的剂量约束限值及本项目提出的 0.1mSv/a 剂量约束限值要求。

11.2.3.2 放射性废气环境影响分析

本项目核医学科控制区设计多套独立的通排风系统。核医学科药物制备间和注射室均设置单独的通风管道连接手套箱，通风速率不小于0.5m/s。手套箱外接专用排风管道，依次设置止回阀、高效活性炭过滤装置，经过滤废气统一汇集至放射性排气井，通过管道引至高压氧舱室楼顶，排放口高于建筑楼顶并尽量远离周边高层建筑。⁹⁹Mo-^{99m}Tc发生器淋洗操作手套箱设置单独的通排风管道，核医学科控制区内各功能工作场所拟设置机械通风系统，通风换气设计次数大于4次/小时，采用负压通风方式，将室内空气由风机抽出，经高效活性炭过滤装置后，废气统一汇集至放射性废气井内，经由管道引至楼顶排放。本项目核医学科产生的放射性废气经活性炭吸附后，其废气排放浓度很低，不会对周边环境产生影响。核医学科工作场所各区域排风系统能够符合《核医学放射防护要求》

（GBZ120-2020）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的相关要求。

医院核医学科活性炭过滤装置应加强维护，建议采用蜂窝状活性炭，其过滤效率在95%以上，活性炭应每一年更换一次，以保证过滤效果。更换废活性炭的工作人员应正确穿戴个人防护用品（放射性污染防护服）并佩戴个人剂量计，将更换下来的废活性炭（含放射性核素）采用专用废物袋密封，并在显著位置标注废物种类、核素种类、活度水平和存放日期等说明。

11.2.3.3 放射性固废环境影响分析

本项目核医学科产生的放射性固体废物主要为：分装、给药过程中废注射器、注射针头、棉签、手套、口罩、废口杯、擦拭纸巾以及可能沾染放射性药物其他固体放射性废物。对于厂家放射性药品配备的注射器，使用后由送药单位交回厂家进行处置。其他废物将其按核素种类进行分类收集，放置专用塑料袋内，置于具有一定防护的废物桶。待专用塑料袋装满后，并标明核素种类和收集日期，转到放射性废物库暂存。含 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 的放射性固体废物需在放射性废物暂存间暂存30天，核医学科工作人员使用监测仪器监测塑料袋外表面的表面剂量率为环境本底水平、 β 表面污染水平小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 后，作为医疗废物处理。

核医学科废气过滤净化系统更换下来的废高效过滤器、废活性炭，将其装入专用塑料袋收集后转移至放射性固废间，暂存30天后，监测塑料袋外表面的表面剂量率为环境本底水平， β 表面污染水平小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 后作为非放射性固体废物处理。按照医疗废物处理。无使用价值的 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器暂存于废发生器暂存间内后交由生产厂家进行回收处理。

项目建议医院应做到：①固体放射性废物应收集在具有防护外层和电离辐射标志的固体废物桶中，固体废物桶应避开辐射工作人员和经常走动的地方，装满后的废物袋应密封，不破漏，并及时转至放射性固废间；

②在放射性固废间出入口设电离辐射标志，存放废物桶必须安全可靠，并在废物桶的显著位置处标有废物类型、核素种类、比活度范围和存放的日期等说明；

③放射性废物的收集、暂存和处置应满足《放射性废物安全管理条例》（国务院令 第 612 号）的相关规定；

④医院应对核医学科的实际就诊人数进行严格控制，实际就诊人数不得超过本次环评提出的人数，从而保证衰变池具有良好的处理衰变效果，杜绝放射性废水的环境风险。

11.3 事故环境影响分析

11.3.1 放射性药物使用场所风险及防范和应急措施

(1) 事故风险识别

①使用放射性核素可能产生的事故为液态放射性药物操作不慎，使放射性药物洒落在手套箱内、操作台面或地面上，使操作台面、地面受污染。

工作人员在分装、注射或给药过程中，由于工作人员未按照操作规程要求或操作失误，可能导致盛装放射性药物的试剂瓶被打翻或者破碎，进而导致放射性药物洒漏在手套箱内、工作台面或地面上。对于发生放射性药品洒漏事故时的辐射影响，本次以衰变产生的射线能量较高的放射性核素 ^{18}F 为例进行理论估算，假设 ^{18}F 放射性药物活度为 $1.3 \times 10^{10}\text{Bq}$ （日实际最大操作量），放射性药物全部洒漏在工作台面上，依据 γ 放射源裸源计算公式，则工作人员所受到的有效剂量随时间和距离关系见下表所示。

表 11-16 ^{18}F 药物洒漏情况下一定时间、距离处个人有效剂量

距源的距离（m）	^{18}F 药物洒漏事故持续时间药物产生的 γ 射线所致人员外照射剂量（mSv）				
	1min	2min	5min	10min	20min
0.3	0.34	0.69	1.72	3.44	6.89
0.5	0.12	0.25	0.62	1.24	2.48
1	0.03	0.06	0.15	0.31	0.62
2	7.75×10^{-3}	1.55×10^{-2}	0.04	0.08	0.15
5	1.24×10^{-3}	2.48×10^{-3}	6.20×10^{-3}	1.24×10^{-2}	2.48×10^{-2}

说明：计算结果未考虑 ^{18}F 随时间的衰变。

由上表可知，假设发生洒漏事故，人员在其附近逗留时间越长，接受的剂量越大，同时距离事故点越近，所接受的剂量越大。对事故洒漏场地进行清污的人员，应加强防护，减少接触时间、尽可能的采取远距离清污操作，以减少辐射影响。

对于发生放射性药品洒漏事故时产生的放射性废气对人员的影响，本项目核医学科手套箱和各工作场所均设置了单独的排风管道对放射性核素操作过程中放射性气体进行排放，各工作场所保持良好的通风和负压状态，从而防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。在保证工作场所通风设施正常运行的前提下，即使发生药物洒漏事故，工作人员在采取了相关防护措施并及时清污处理后，放射性废气对人员所造成的影响也相对较小。

②放射性药品丢失、被盗，散落的放射性药物对周围活动人员产生照射。

本项目选用核医学科使用量较大且放射性较大的 ^{18}F 药物进行理论估算，分析药品丢

失情况下对人员的辐射影响程度。假设丢失 ^{18}F 药物活度为 $1.3 \times 10^{10}\text{Bq}$ （日实际最大操作量），依据 γ 放射源裸源计算公式，可计算一定持续时间、距离处个人照射剂量，理论计算结果见表11-16所示。由计算结果可知，当人员距离放射性药物0.5m，持续接触10min时，人员受照剂量为1.24mSv，超过了本次设定公众剂量约束值（0.1mSv/a）。总体遵循距离越近，时间越长，受照剂量越大。

（2）风险防范措施

本项目拟购的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器贮存于核医学科药物制备间手套箱内，放射性药物 ^{18}F 运至核医学科后暂存于注射室手套箱内等待分装。为了防止放射性药物丢失或被盗、药物洒漏等事故发生，医院拟采取如下防范措施：

①放射性核素抵达使用场所后，应及时进行人员安排，防止放射性核素处于无人监控的状态。

②医院应制定严格的放射性核素管理制度，除专人对放射性核素的管理外，还应加强工作人员对放射性核素的监督管理。

③建立放射性核素使用台账记录，对放射性核素的使用情况进行登记，存档备查。

④应制定事故风险的应急预案，一旦发生事故能及时启动应急预案，使事故能得到及时有效的处理。

⑤放射性核素淋洗、使用、存放场所配备防火器材、安装火灾报警器，加强防火安全管理，防止火灾事故的发生，以避免放射性物质发生泄漏。

⑥加强人员培训，核医学科分装、注射或给药工作人员应严格按照操作规程进行操作，穿戴个人防护用品（铅衣、铅手套等），熟练操作、减少操作时间，以减少辐射影响。

（3）风险应急预案

①当发生放射性核素丢失、被盗事故时，应在第一时间将事故情况通报医院辐射事故应急领导机构及有关主管部门（生态环境管理部门、公安部门、卫生行政部门等）。医院辐射事故应急领导机构接到报告后，立即启动辐射事故应急预案。

②分析确定放射性核素发生丢失、被盗事故的具体时间及发生事故的原因，向有关部门提供相关信息。

③根据有关线索，组织人员协同相关部门查找丢失、被盗放射性核素，在查找过程中应携带辐射监测仪器（X- γ 剂量率监测仪以及 α 、 β 表面污染监测仪），防止事故处理

人员受到照射。

④对放射性核素丢失前存放场所进行监测，根据现场辐射剂量率的大小确定是否受污染。如现场受到污染出现辐射剂量率异常情况，根据辐射剂量率大小划定警戒线，撤离警戒区域内的所有人员，事故处理人员应穿戴防护用品，佩戴个人剂量计进入事故现场。

⑤对受污染场所进行去污处理，被污染的物质进行固化处理，固化处理物应作为放射性废物按有关规定进行安全处置，在处理过程中，应随时进行辐射剂量率和表面沾污监测，保证经处理的现场达到《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）标准限值以内，即事故现场恢复到辐射本底水平。

⑥应对事故影响范围内的人员进行医学检查，确定接触放射源的人员所受到的辐射剂量水平。

⑦对于放射性同位素洒漏造成工作场所表面污染应采取的措施：如果由于操作不慎，致使液态同位素溅洒，发生这种事故应迅速用吸附衬垫吸干溅洒的液体，以防止污染扩散。然后用备用的塑料袋装清洁过程中产生的污染物品和湿的药棉、纸巾等，从溅洒处移去垫子，用药棉或纸巾擦抹，应注意从污染区的边缘向中心擦抹，直到擦干污染区。最后用表面污染监测仪监测污染区，如果 β 表面污染大于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，表明该污染区未达到控制标准，这时应用酒精浸湿药棉或吸附纸巾擦拭，直到该污染区 β 表面污染小于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ 为止。

本项目建议在清污过程中，所有吸附、擦拭物质等均作为放射性固废，装入专用塑料袋中，存放于放射性固废间的专用放射性废物暂存桶内，并详细记录所含核素种类、产生时间等信息，暂存时间超过 30 天后，其活度浓度或总活度低于《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）及《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的清洁解控水平后，再作为一般医疗废物处理。

11.3.2 X 射线装置事故影响分析及防范措施

（1）X 射线装置潜在照射（危险）分析

本项目 PET/CT 为Ⅲ类射线装置，最大额定管电压为 140kV，由于 X 射线的照射剂量率与管电压和管电流有关，一般管电流增加照射量率也将增加。X 射线装置受开机和关机控制，关机时没有射线发出。在意外情况下，可能出现的辐射事故（事件）如下：

①工作人员或患者家属在防护门关闭前尚未撤离机房，X 射线装置运行可能产生误

照射。

②安全装置发生故障状况下，人员误入正在运行的 X 射线装置机房。

③滥用 X 射线对病人进行诊断、治疗，造成病人受到不必要的照射。

(2) X 射线装置风险防范措施

①按操作规程定期对各个联锁装置进行检查，发现故障及时清除，严禁在工作状态指示灯失效的情况下违规操作。

②撤离机房时清点人数，必须按程序对机房进行全视角搜寻，对滞留机房内的无关人员强行劝离。有外来人员进入时，工作人员应根据情况，采取急停或相应措施，阻止外来人员受到误照射。

③辐射工作人员必须加强防护知识培训，提高防护技能，避免犯常识性错误；加强职业道德修养，增强责任感；严格遵守操作规程和规章制度；管理人员应强化管理，落实安全责任制度，经常督促检查。

④医院做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

⑤医院应定期组织辐射工作人员学习专业的业务知识，不断提高业务水平。

⑥定期组织相关人员进行辐射事故应急演练，确保在发生事故能及时启动应急预案。

11.4 辐射环境影响评价

西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科改造核技术利用建设项目正常运行时，工作场所及周边环境辐射环境影响满足相关标准限值要求，项目正常运行所致辐射工作人员、公众年附加有效剂量满足本次评价的剂量约束值和限值要求。项目选址可行、平面布置基本合理。评价认为：西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科改造核技术利用建设项目对周围环境的辐射影响在可接受范围之内。

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		
<p>根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条规定：使用I类、II类、III类放射源，使用I类、II类射线装置的工作单位，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具有 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和环境保护管理工作。</p> <p>目前，西安交通大学第一附属医院榆林医院已按照国家、省市有关法律法规相关规定，成立了辐射安全与防护领导小组，负责辐射安全管理工作，余军军与赵文玉为组长，张哲、李明军、白万祥、和水祥为副组长，郭永华为辐射安全防护管理员，常娜、贾喆、鱼永卫等为领导小组成员。领导小组职责：负责我院辐射安全防护管理工作，切实履行辐射安全防护领导职责，建立完善辐射安全防护管理制度并监督执行，对存在问题及时提出改进措施，确保辐射安全，同时以正式文件形式（西交一院榆医发〔2024〕34 号，见附件 5）明确了辐射安全与防护领导小组、辐射事故应急领导小组及工作小组成员，并规定相关职责。医院已制定了《放射防护管理委员会职责》和《放射性同位素与射线装置岗位职责及操作规程》等相关制度，明确管理机构以及放射工作人员职责，医院已安排 1 名具有本科学历的技术人员专职负责医院辐射安全和环境保护管理工作。医院已按照“陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化”相关规定，制定了辐射安全管理标准化文件。</p> <p>本项目建议医院应做到：应根据原陕西省环境保护厅发布的《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》（陕环办发〔2018〕29 号）文件并结合本项目的具体情况，不断细化、完善辐射安全管理标准化文件，明确医院决策层、辐射防护负责人、辐射工作人员职责，并落实相关管理要求。</p>		
表 12-1 陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化相关内容		
管理内容		管理要求
		有/无
机构建设		设立辐射环境安全管理机构和专（兼）职人员，以正式文件明确辐射安全与环境保护管理机构和负责人。
人员管理	决策层	就确保辐射安全目标做出明确的文字承诺，并指派有决策层级的负责人分管辐射安全工作。
		年初工作安排的年终工作总结时，应包含辐射环境安全管理工作内容。
		明确辐射安全管理部门和岗位的辐射安全职责。
		提供确保辐射安全所需的人力资源及物质保障。

	辐射防护负责人	参加辐射安全与防护培训并通过考核取得合格证,持证上岗;熟知辐射安全法律法规及相关标准的具体要求并向员工和公众宣传辐射安全相关知识。	有
		负责编制辐射安全年度评估报告,并于每年1月31日前向发证机关提交上一年度评估报告。	有
		建立健全辐射安全管理制度,跟踪落实各岗位辐射安全职责。	有
		建立辐射环境安全管理档案。	有
		对辐射工作场所定期巡查,发现安全隐患及时整改,并有完善的巡查及整改记录。	有
	直接从事放射工作的人员	岗前进行职业健康体检,结果无异常。	有
		参加辐射安全与防护培训并通过考核取得合格证,持证上岗。	有
		了解本岗位工作性质,熟悉本岗位辐射安全职责,并对确保岗位辐射安全作出承诺。	有
		熟悉辐射事故应急预案的内容,发生异常情况后,能够有效处理。	有
	*制度执行	建立全国核技术利用辐射安全申报系统运行管理制度,指定专人负责系统使用和维护,确保业务申报、信息更新真实、准确、及时、完整。	有
		建立射线装置管理制度,严格执行进出口、转让、转移、收贮等相关规定,并建立射线装置台账。	有
		建立射线装置的岗位职责、操作规程,严格按照规程进行操作,并对规程执行情况进行检查考核,建立检查记录档案。	有
		建立辐射工作人员培训管理制度及培训计划,并对制度的执行情况及培训的有效性进行检查考核,建立相关检查考核资料档案。	有
建立辐射工作人员个人剂量管理制度,每季度对辐射工作人员进行个人剂量监测,对剂量超标人员分析原因并及时报告相关部门,保证个人剂量检测档案的连续有效性。		有	
建立辐射工作人员职业健康体检管理制度,定期进行辐射工作人员的职业健康体检,对体检异常人员及时复查,保证职业人员健康监护档案的连续有效性。		有	
建立辐射安全防护设施的维护与维修制度,包括维护维修内容与频次、重大问题管理措施、重新运行审批级别等内容,并建立维护、维修记录档案。		有	
建立辐射环境监测制度,定期对场所及周围环境进行监测,并建立有效的监测记录或监测报告档案。		有	
*应急管理	建立辐射环境监测设备使用与检定管理制度,定期对监测仪器设备进行检定,并建立检定档案。	有	
	结合本单位实际,制定可操作性的辐射事故应急预案,定期进行应急演练。	有	
	辐射事故应急预案应报所在地县级环境保护行政主管部门备案。应急预案应当包括下列内容:①可能发生的辐射事故及危害程度分析;②应急组织指挥体系和职责分工;③应急人员培训和应急物资准备;④辐射事故应急响应措施;⑤辐射事故报告和处理程序。	有	
注:表中标注有“*”内容为关键项,为强制性规范要求。			

12.2 辐射安全管理规章制度

12.2.1 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》中第十六条第六款的要求，生产、销售和使用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。第七款的要求，使用射线装置的单位有完善的辐射事故应急措施。

医院目前已制定以下规章管理制度：《全国核技术利用辐射安全申报系统运行管理制度》、《放射性同位素与射线装置管理制度》、《放射性同位素与射线装置岗位职责及操作规程》、《辐射工作人员培训管理制度和培训计划》、《辐射工作人员个人剂量管理制度》、《关于放射工作人员个人剂量仪管理规定的通知》、《辐射工作人员职业健康体检管理制度》、《辐射安全防护设施的维护与维修制度》、《辐射环境监测制度》、《辐射环境监测设备使用与检定管理制度》、《放射性同位素与射线装置购买及处理程序》、《DSA 操作规程》、《防护用品管理制度》、《放射性药品采购、登记、使用核对、保管登记、注销制度》、《放射性废物处理管理办法》、《放射性药品采购使用及废物处理流程图》、《放疗科后装铱 192 放射源购置、处理和安全管理规章制度》、《放射源转移、转让及收贮制度》、《ECT 操作规程》、《ECT 维护保养制度》等辐射安全管理制度。

根据建设单位提供的材料，医院已按照原陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》的通知（陕环办发〔2018〕29 号）中对辐射安全管理规章制度的相关规定要求制定了各项规章制度并逐项落实完善并贯彻执行，同时在日常工作中结合实际工作情况逐项完善规章制度以保证其的可操作性。另外，医院还应针对本项目制定《PET/CT 操作规程》和《PET/CT 设备维护保养制度》等制度并及时修订《辐射事故应急预案》。

12.2.2 人员管理

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2017 年修正）第十六条规定：“使用放射性同位素或射线装置的单位，从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。”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》（公告 2019 年第 57 号），有辐射安全与防护培训需求的人员可通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台（网址：<http://www.hns.gov.cn>）

//fushe.mee.gov.cn) 免费学习相关知识;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单到期的人员,应当通过生态环境部培训平台报名并参加考核。

根据医院提供的材料,医院目前共有 269 名辐射工作人员,其中 167 名参加了国家核技术利用辐射安全与防护培训平台的考核,并取得了成绩合格单;其余 102 名仅涉及 III 类射线装置操作的工作人员参加了医院组织的自主培训并取得合格证书。

本项目建议:医院应及时对本项目辐射工作人员进行辐射安全和防护专业知识以及相关法规的培训和考核,确保其持证上岗,未取得辐射安全与防护培训成绩合格单的人员,不得进行放射性操作。医院应及时对本项目辐射工作人员应按照相应类别进行岗前、岗中或离岗职业健康检查,符合辐射工作人员健康标准的,方可参加相应的放射工作;两次检查的时间间隔不应超过 2 年,必要时可增加临时性检查。

12.2.3 档案管理

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》(2011 年 5 月 1 日实行)第二十三条规定:生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位,应当安排专人负责个人剂量监测管理,建立辐射工作人员个人剂量档案。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。

医院已定期对辐射工作人员进行个人剂量监测并负责建立个人剂量档案,个人剂量监测档案应包括:①历年常规监测的方法和结果等相关资料;②应急或者事故中受到照射的剂量和调查报告等相关资料。辐射工作人员调动时,个人剂量档案将随其转给调入单位,个人剂量档案终身保存;个人剂量计的监测周期一般为 1 个月,最长不得超过 3 个月;工作人员个人剂量监测工作应委托具有相关资质的个人剂量监测技术服务机构进行;

同时,医院应建立健全辐射工作人员培训档案和职业健康监护档案,其中培训档案应包括每次培训的课程名称、培训时间、考试或考核成绩等资料;职业健康监护档案应包括:①职业史、既往病史和职业照射接触史;②历次职业健康检查结果及评价处理意见;③职业性放射性疾病诊疗、医学随访观察等健康资料。

12.2.4 年度评估

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》(2011 年 5 月 1 日实行)第十二条规定:生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位,应当对本单位的放射

性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估，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。

目前，医院已定期对本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度的评估报告，年度评估报告包括医用 X 射线装置台账、密封放射源台账、非密封放射性物质台账、辐射安全和防护设施的运行与维护、辐射安全和防护制度及措施的建立和落实、事故和应急以及档案管理等方面的内容。

12.3 辐射监测

12.3.1 医院现有核技术利用项目辐射工作场所环境监测情况

根据医院提供的材料，医院已定期委托有资质单位对医院现有射线装置及密封放射源辐射工作场所进行了环境辐射水平年度检测，并出具了检测报告（报告编号：西安华辐检（ZT）字 2024 第 0057 号（G1）、西安华辐检（ZT）字 2024 第 1567 号）（见附件 9），相关辐射水平年度检测结果见下表所示。

表 12-2 医院现有辐射工作场所年度检测情况一览表

序号	射线装置名称	型号规格	最大周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	标准限值 ($\mu\text{Sv/h}$)
1	64 排 128 层 CT	SOMATOM Perspective	1.34	2.5
2	256 排 CT	Brilliance iCT	1.82	2.5
3	X 射线计算机体层摄影设备	SOMATOM Force	0.99	2.5
4	X 射线计算机体层摄影设备	Revolution ACE	1.73	2.5
5	数字减影血管造影机	Discovery IGS 7 OR	0.36	2.5
6	骨密度仪	Lunar iDXA	0.20	2.5
7	数字减影血管造影机	Azurion 7 M20	0.40	2.5
8	数字减影血管造影机	Artis Zeego	0.29	2.5
9	数字减影血管造影机	Integrisallura12	2.1	2.5
10	口腔 CT	Promax 3D	0.18	2.5
11	模拟定位机	SL-ID	0.22	2.5
12	双板 DR	DiagitalDignost2.0	0.35	25
13	双板 DR	Ysio	1.23	25
14	单板 DR	DiagitalDignost2.0	0.35	25
15	数字化乳腺 X 射线机	Senographe Pristina	0.28	2.5
16	移动式 C 型臂 X 射线机	Brivo OEC 785	0.20	2.5
17	移动式 C 型臂 X 射线机	Cios spin	0.20	2.5
18	移动式 C 型臂 X 射线机	Siremobil Compact L	0.19	2.5
19	移动式 C 型臂 X 射线机	ARCADIS Varic	0.20	2.5

续表 12-2 医院现有辐射工作场所年度检测情况一览表

序号	射线装置名称	型号规格	最大周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	标准限值 ($\mu\text{Sv/h}$)
20	移动式 C 型臂 X 射线机	ARCADIS Varic	0.39	2.5
21	单板 DR	DigiEye280T	1.76	25
22	牙片机	YKY-G	0.17	2.5
23	移动 DR	Optima XR240amx	4.72	25
24	移动 DR	Mobilett Mira	2.12	25
25	数字化 X 射线透视摄影系统	EXAVISTA	4.18	25
26	16 排大孔径 CT 机	Discovey CT590 RT	0.28	2.5
27	电子直线加速器	Clinac iX	0.15	2.5
			0.16	10
28	后装机（使用 1 枚 ^{192}Ir 放射源）	/	0.22	2.5

说明：因 Sensation 64 型 64 排 CT 机和 HB-ESWL-VG 型碎石定位机于 2024 年发生设备故障，后期医院计划报废，目前已停止使用，因此未对该射线装置进行监测；根据医院提供的 2023 年度监测报告，该两台射线装置辐射防护监测结果均满足相关标准要求。

监测结论：

医院放疗科电子直线加速器和后装机在正常工作条件下，人员操作位、防护门及四周墙体外及机房楼上的环境辐射水平均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）及《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中的相关标准限值要求。医院现有使用的 26 台射线装置在额定工作条件下，各射线装置工作场所的人员操作处、观察窗、人员门、四周墙体外及机房楼上、楼下关注点剂量当量率均符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关标准限值要求。

医院已委托有资质单位对核医学科现有辐射工作场所进行了周围剂量当量率和表面污染监测，并出具了检测报告（报告编号：西安华辐检（ZT）字 2024 第 1433 号）（见附件 9），检测结果显示，核医学科 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 工作场所在正常工作条件下，SPECT 机房和其它工作场所的人员注射窗口、防护门以及四周屏蔽墙体外的环境辐射水平符合《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，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 $10\mu\text{Sv/h}$ ”；核医学科各场所的表面污染检测结果均符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中“控制区工作场所的放射性表面污染控制水平应不大于 40Bq/cm^2 ；监督区工作场所的放射性表面污染控制水平应不大于 4Bq/cm^2 ”的要求。

12.3.2 验收监测

本项目正式投运前，医院应委托有资质的监测单位对其工作场所以及周边环境进行竣工环境保护验收监测，并检查各项辐射安全设施的有效性，确保其处于正常的工作状态。验收通过后，方可投入正常使用。

12.3.3 日常监测

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条第五款，“配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。”、“使用放射性同位素和射线装置开展诊断和治疗的单位，还应当配备质量控制检测设备，制定相应的质量保证大纲和质量控制检测计划，至少有一名医用物理人员负责质量保证与质量控制检测工作”。

本项目建成后，医院应安排人员利用监测仪器定期对项目所在地以及周边环境日常监测，制定日常监测方案，监测数据存档备查。针对本项目建设内容，医院已配备以下监测仪器。

表 12-3 监测仪器配备表

序号	仪器名称	数量	使用场所
1	α 、 β 表面污染监测仪	2 台	核医学科
2	X- γ 辐射剂量率仪	2 台	核医学科
3	个人剂量计	若干	根据核医学科辐射工作人员进行配备
4	活度计	1 台	核医学科

(1) 监测因子：X- γ 辐射剂量率、 α 、 β 表面污染

(2) 监测点位：本项目日常监测可参考环评提出的监测计划建议（表 12-3）或竣工验收监测布点方案进行日常监测。

根据医院提供的材料，医院现有的 2 台 X- γ 辐射监测仪和 2 台 α 、 β 表面污染监测仪已每年送检定机构进行检定或校准。医院已制定了工作场所监测计划，定期进行自主监测并建立了辐射环境监测档案。医院每年委托有资质单位对放射性场所及周围环境进行一次辐射监测，建立监测技术档案，并向相关部门提交了年度评估报告。

本项目建议：医院应保证对 X- γ 辐射剂量率仪、表面污染监测仪器每年进行检定，确保仪器处于有效的范围之内。按照监测计划定期对项目所在地及周边环境进行日常监测，将监测结果与标准规定值进行比较，做好日常监测记录，存档备查。当测量值高于

标准规定值时，应立即查明原因并采取相应的整改措施，确保其剂量率、表面污染控制水平满足标准限值要求。

表 12-4 放射性工作场所以及外环境监测计划建议

工作场所	监测因子	监测点位	监测频次
核医学科	X- γ 辐射剂量率	核医学科各工作场所四周墙体、防护门（缝隙和中央）、观察窗外30cm处、操作位、管线洞口/通风口，工作场所顶棚外30cm处，核医学科工作场所控制区边界外30cm处	竣工验收监测；医院自主监测每月1次；委托有资质单位每年进行一次管理监测
		SPECT机房和PET/CT机房：机房屏蔽墙体外表面30cm处、防护门及缝隙外表面30cm处、观察窗外表面30cm处、机房顶棚外30cm处，工作人员操作位（含摆位位置），管线洞口位置处；	
		注射室、质控室和药物制备间：各手套箱观察窗、手孔位及侧面外表面30cm处；一体化注射窗外表面30cm处； 放射性废物桶：外表面30cm处；	
	α 、 β 表面污染	放射性药物淋洗、分装、给药等场所：工作台面、设备表面、墙壁、地面、座椅、洗手池、患者卫生间地面、床面以及可能受到污染位置。	竣工验收监测；医院自主监测：每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）；放射性废物桶每次处置前进行监测
		核医学科工作人员手、皮肤暴露部分以及工作服、手套、鞋、帽等	
		放射性废物桶表面5cm及1m处。	

12.3.4 年度监测

医院每年应委托有资质的监测单位对放射性工作场所以及周边环境进行年度监测，每年至少监测一次。

根据医院提供的材料，医院已定期委托有资质单位对医院现有射线装置及密封放射源辐射工作场所进行了环境辐射水平年度检测，并出具了检测报告（报告编号：西安华辐检（ZT）字 2024 第 0057 号（G1）、西安华辐检（ZT）字 2024 第 1567 号）。2024 年医院现有辐射工作场所环境辐射水平检测结果表明医院各辐射工作场所的辐射监测结果均满足相关标准限值要求，未发现有辐射安全风险的发生。

12.3.5 个人剂量监测

西安交通大学第一附属医院榆林医院已为本项目辐射工作人员配备个人剂量计，辐射工作人员按照相关要求进行佩戴，个人剂量计每 3 个月送有资质单位检测 1 次个人外照射累计剂量，并建立起个人剂量档案，个人剂量档案终身保存。

西安交通大学第一附属医院榆林医院已委托陕西新高科辐射技术有限公司对医院辐射工作人员进行个人剂量检测，根据榆林市第二医院提供的辐射工作人员连续 12 个月（2024.4-2025.3）的个人剂量检测结果一览表（见附件 8），医院辐射工作人员年度职业外照射个人剂量最大为 0.47mSv，小于辐射工作人员年附加有效剂量基本限值 20mSv 及剂量管理目标值 5mSv；医院已根据国家相关法律规定，每季度对辐射工作人员进行个人剂量检测，并建立完整的个人剂量档案。

12.3.6 职业健康检查

按照《放射工作人员健康要求及监护规范》（GBZ98-2020）第 5.1.4 条要求，放射工作人员在岗期间职业健康检查周期按照卫生行政部门的有关规定执行，一般为 1a~2a，不得超过 2a，必要时，可适当增加检查次数。按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）第 8.2.2 条要求，职业照射个人剂量档案终生保存。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。

根据医院提供的现有的辐射工作人员最近一次的职业健康体检结果，医院对现有的辐射工作人员（包括岗前 62 人/在岗 202 人/离岗 5 人）于 2024 年 1 月 17 日-2025 年 7 月 18 日期间在兵器工业五二一医院进行了职业健康体检，建立了职业健康体检报告档案并存档。根据医院体检报告单（ZJ-2023-228、ZJ-2024-063、ZJ-2024-245、ZJ-2025-14、ZJ-2025-93），本次体检发现需要复查 12 人次，经复查后可继续从事原放射性工作岗位；其余 257 人体检结果为“可以从事放射工作”、“可继续从事原放射工作”或“可以离岗”。

12.4 辐射事故应急

为有效防护、及时控制辐射事故所致的伤害，加强射线装置安全监测和控制等管理工作，保障放射相关工作人员以及射线装置周围人员的健康安全，避免环境辐射污染，根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 449 号）及其它有关法律、法规和职能部门要求，建设单位应建立辐射事故应急预案。应急预案应包括以下内容：

- （1）可能发生的辐射事故及危害程度分析；

- (2) 应急组织指挥体系和职责分工;
- (3) 应急人员培训和应急物资准备;
- (4) 辐射事故应急响应措施;
- (5) 辐射事故报告和处理程序。

依照《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》(环发〔2006〕145号)有关要求,针对可能发生的风险事故,根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围,执行辐射事故应急预案。

本次评价针对项目的辐射事故应急提出以下要求:

- (1) 严格落实放射工作各项规章制度和放射性同位素安全防护管理制度。

(2) 当发生辐射事故时,应立即启动辐射事故应急预案,采取必要防护措施,并于2小时内填写《辐射事故初始报告表》上报生态环境主管部门、公安部门及卫生部门。建设单位辐射安全管理机构要初步判断事件等级,发生较大辐射以上事故,在上级环保部门未到场时,要设立临时现场指挥,迅速控制事态和现场,配合环保部门进行事故应急监测核实事故情况,监测并估算受照剂量。

- (3) 辐射事故应急预案的执行

①当射线装置发生超剂量辐射事故时,应立即切断电源,封锁事故现场,禁止任何人进入检查室,启动应急预案并通知设备生产厂家,立即报告环保部门、卫生行政部门,并密切配合这些部门进行应急处理。

②由于误操作,导致较大放射性药物注射时,应立即启动应急预案,上报主管领导,专业医师估算患者注射剂量可能导致的医疗后果,如有需要送专业医疗机构救治。

③如果发生放射性药物被盗,立即启动应急预案,通知本单位主管领导、地方卫生、公安部门,协助查找放射性药物下落。应加强放射性药物安全管理,落实放射性药物安保措施。

④辐射事故中对受辐射人员,要通过个人剂量计等途径迅速估算人员的受照剂量,及时就地治疗或立即转移到有关医院救治。

⑤当发生地震、洪水等不可预知的灾害时,应封锁事故区域并设立警示标志,并通知环保部门等落实放射源泄漏程度,避免放射性事故发生。

⑥当发生辐射事故的射线装置或场所修复后,必须监测安全合格后方可解除封锁,未监测前仍要封锁事故场所。

（4）事故报告和管理

①严格执行事故报告和管理制度。做好各类事故的预防、调查、分析及处理工作，并负责事故的上报。

②发生辐射事故及时按要求填报事故报告表，要对事故报告的及时性、全面性和真实性负责，对于隐瞒不报、虚报、漏报和无故拖延报告的，要追究责任。

③建立全面系统和完整的事故档案，认真总结教训，防止事故发生。

根据医院提供的材料，西安交通大学第一附属医院榆林医院于 2024 年编制并发布了《西安交通大学第一附属医院榆林医院辐射事故应急预案》，并报送榆林市生态环境局榆阳分局进行了备案（备案编号 610802-2024-007）。医院辐射工作场所自运行以来，医院未发生射线装置失控、辐射工作人员、公众超过年剂量限值事故，医院核医学科自运行以来，未发生过辐射安全事故。

医院制定的辐射事故应急预案已明确了辐射事故应急响应组织体系与职责、医院现有的放射源和射线装置、可能发生的辐射事故以及危害程度分析、辐射事故概念与分类、辐射事故报告制度、辐射事故应急响应和应急处理程序、应急终止和恢复以及培训演习应急物质装备等内容，相较于《陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的<陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设工作项目表>的通知》对于辐射事故应急预案的内容要求，医院在制定并履行辐射事故应急预案的相关应急措施后，已具备一定的辐射事故应急处置能力，能够基本满足辐射安全管理要求。医院应针对性对可能发生的事故提出有效应急措施，对医院辐射事故应急预案不断进行完善修订。并根据今后工作实际不断完善，并加强应急演练，做到有备无患。

本项目建议：医院应定期开展应急预案演练，确保在辐射事故发生时，能准确地掌握情况、分析评价并决策，按事故等级及时采取必要和适当的响应行动，尽可能降低和减轻辐射事故造成的损害和影响。

12.5 环保投资和环保验收

12.5.1 环保投资

西安交通大学第一附属医院榆林医院本项目总投资 3000 万元，环保投资 82 万元，为项目投资额的 2.73%，环保投资比例适宜。环保投资主要为辐射安全设施购置费、“三废”污染防治措施费、个人防护用品配置费、人员培训费、个人剂量及职业健康检查费、辐射环境监测费等。本项目环保投资一览表见表 12-5。

表 12-5 环保投资估算表

实施时段	类别	措施或设施		费用
施工期	废气	施工扬尘等	设立围挡，定期洒水降尘	2.0
	废水	生活污水、施工废水	依托医院现有的污水处理设施，施工废水回用不外排	/
	固体废物	生活垃圾	统一纳入医院生活垃圾清运系统	3.0
		施工垃圾	送至指定的建筑垃圾消纳场	
运营期	固体废物	废 ⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc 发生器	交由厂家回收	2.0
		含 ^{99m} Tc、 ¹⁸ F 非密封放射性物质的废针头、注射器、棉签、口杯、口罩、废试剂瓶以及被服等	含 ^{99m} Tc 和 ¹⁸ F 废物存储满 30 天经检测满足清洁解控水平后按照医疗废物处理	4.0
		废活性炭	存放满 30 天经检测满足清洁解控水平后作为一般固体废物交有资质单位处理	1.0
运营期	废气	核医学科放射性气溶胶，其中主要为 ^{99m} Tc 和 ¹⁸ F	3 套动力通风系统，经活性炭吸附后，经专用管道排入大气	12.0
	废水	含 ^{99m} Tc 和 ¹⁸ F 的患者排泄物及冲洗废水等	改建放射性废水排放管道，废水在衰变池贮存一定时间后，排入医院污水处理设施	10.0
	辐射安全防护设施	X 射线、γ 射线、β 表面污染	①个人防护用品：放射性污染防治服、铅橡胶衣、铅橡胶围裙、铅橡胶围脖、铅玻璃眼镜、铅橡胶帽等；②辅助防护设施：手套箱、注射器转运盒、储源铅防护罐、转运铅防护罐、一体化防护注射装置、放射性废物暂存桶、注射器防护套、贮源箱等；③PET/CT 机房：门灯联锁装置、红外防夹装置、自动闭门装置、工作状态指示灯、电离辐射警示标志、对讲装置、急停按钮等；④SPECT 机房：电离辐射警示标志、对讲装置、急停按钮等；⑤核医学科各工作场所：电离辐射警示标志、摄像装置、门禁系统、自动闭门装置、叫号系统等；	30.0
环境监测	辐射环境检测仪器（包括 X-γ 辐射剂量率监测仪，α、β 表面污染监测仪、放射性活度计）至少每年检定或校准一次			3.0
人员管理	辐射工作人员配备个人剂量计，至少每季度检测一次；			2.0
	辐射工作人员至少每 2 年进行放射性职业健康体检			3.0
环境管理	环境影响评价及竣工环境保护验收费用			10.0
总投资（万元）				82.0

12.5.2 环保验收

为规范项目竣工环境保护验收的程序和标准，强化医院环境保护主体责任，根据《建设项目环境保护管理条例》（国务院第 682 号令，2017 年 10 月 1 日起实施）以及《建设项目竣工环境保护验收管理办法》的规定，项目竣工后应及时进行自主验收，编制验收监测报告。验收合格，并取得新的辐射安全许可证后，方可投入生产或使用。本项目环保验收清单建议见表 12-6。

表 12-6 环境保护竣工验收清单（建议）

项目			标准以及相关文件验收要求内容
辐射安全与环境保护管理机构			成立辐射安全与环境保护管理机构、安排专职辐射管理人员负责辐射安全与环境保护管理工作，以文件形式明确辐射防护管理机构职责。
年有效剂量	根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和环评报告，公众、职业照射剂量约束值分别执行 0.1mSv/a、5mSv/a。		
剂量率限值	屏蔽体外剂量率控制	PET/CT 机房屏蔽体外 0.3m 处辐射剂量率满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中规定的屏蔽体外表面 0.3m 处周围剂量当量率不大 2.5μSv/h 的标准限值；核医学科工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 0.3m 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h。放射性药物合成和分装的箱体、手套箱外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h。固体放射性废物收集桶外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。	
	表面污染	①工作台、设备、墙壁、地面：控制区：β≤4×10Bq/cm ² ；监督区：β≤4Bq/cm ² ；②工作服、手套、工作鞋：控制区/监督区：β≤4Bq/cm ² ；③手、皮肤、内衣、工作袜：β≤4×10 ⁻¹ Bq/cm ² 。	
辐射安全和防护措施	屏蔽措施		核医学科工作场所建设和布局与环评报告表描述一致。屏蔽墙体、防护门窗屏蔽能力满足辐射防护要求。
	安全设施		①项目核医学科工作场所设置电离辐射警告标志，划分控制区和监督区，在地面设置患者、医生的行走箭头标识，规定各类人员的活动路径。核医学科场所出入口、SPECT 机房、PET/CT 机房、SPECT 及 PET/CT 候诊室、注射室、药物制备间等涉及放射性核素或射线装置的场所，门外张贴电离辐射警示标识和中文警告说明，核医学科放射性核素诊疗工作区出入口安装门禁系统；②PET/CT 机房防护门上方安装工作状态指示灯，工作状态指示灯与防护门有效联动，机房、候诊室及注射室等相关位置安装对讲通话、监控装置；SPECT 机房和 PET/CT 机房内及控制台安装急停按钮；③配备足够的铅防护罐、铅注射器防护套、注射器转运盒、一体化防护注射装置、放射性废物桶等防护器械；④设置卫生缓冲区，工作人员每次离开时进行表面污染或剂量率监测，放射性废物暂存间设防盗铅防护门；⑤配备足够的应急及去污用品；为工作人员、患者配备足够数量的铅衣、铅眼镜、铅围脖等防护用品，项目核医学科工作场所至少配置 2 台表面污染监测仪、2 台 X-γ 剂量率仪、1 台放射性活度计以及个人防护用品。
	“三废”处置设施	放射性废气	①核医学科药物制备间和注射室手套箱均设置有单独的排风系统，核医学科控制区其它区域设置有机房排风系统，放射性废气经活性炭吸附后，通过楼顶排气管排放，排风速率≥0.5m/s；②定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过 1a。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理。
		放射性废水	本项目核医学科产生的放射性废水（含 ¹⁸ F和 ^{99m} Tc核素）暂存超过30天后可直接解控排放，排入医院污水处理设施，核医学科衰变池容积满足项目产生的放射性废水暂存要求。
		放射性固废	项目设置有放射性固废间，有放射性废物处理台账。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，β表面污染小于 0.8 Bq/cm ² 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理；要求：所含核素半衰期小于24小时（主要为含 ¹⁸ F和 ^{99m} Tc核素）的放射性固体废物暂存时间超过30天。
人员培训	辐射防护与安全培训和考核		辐射管理人员和辐射工作人员上岗前均应参加辐射安全和防护专业知识的培训，经考核合格上岗。
个人剂量与健康检查	个人剂量检测		辐射工作人员应佩戴个人剂量计，每季度送有资质单位检测，建立个人剂量档案
	职业健康检查		安排辐射工作人员定期进行职业病健康检查，并建立职业健康监护档案
监测仪器和防护用品	监测仪器		X-γ 辐射剂量率仪≥2 台、表面污染仪≥2 台、放射性活度计≥1 台
	防护用品		为核医学科工作人员配备放射性污染防护服、铅橡胶衣、铅橡胶围裙、铅橡胶围脖、铅玻璃眼镜、铅橡胶帽等防护用品

续表 12-6 环境保护竣工验收清单（建议）

项目		标准以及相关文件验收要求内容
辐射安全管理 制度	制定操作规程, 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, 辐射事故应急措施等规章制度	根据环评要求以及陕环办发〔2018〕29号文件要求, 按照项目的实际情况, 建立完善、内容全面、具有可操作性的辐射安全规章制度。针对使用的放射性核素和射线装置使用过程中可能存在的风险, 完善应急预案相关内容, 落实必要的应急物质。定期进行辐射事故应急演练。
辐射安全管理 标准化	按照原陕西省环境保护厅关于印发新修订的《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》的通知（陕环办发〔2018〕29号）文件进行验收。	

表 13 结论与建议

<div><div>13.1 结论</div><div><div>13.1.1 项目概况以及实践正当性分析</div><p>西安交通大学第一附属医院榆林医院拟开展西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科改造核技术利用建设项目，对现有核医学科部分区域进行改造工作，使其满足核医学科未来的诊疗工作需要。本项目的主要建设内容为：在病房综合楼负一层核医学科工作场所使用 ^{99m}Tc 药物（采购 ^{99}Mo-^{99m}Tc 发生器淋洗制备 ^{99m}Tc）进行 SPECT 显像检查工作；拟在 PET-CT 机房内安装使用 1 台 PET-CT（属于Ⅲ类射线装置），使用非密封放射性物质 ^{18}F 药物（外购）开展 PET-CT 显像诊断工作。该项目有助于提高榆林及周边地区医学诊疗水平，符合辐射防护“实践正当性”原则。</p><p>该项目属于《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（2023 年第 7 号令修改）鼓励类中“十三、医药，4.高端医疗器械创新发展：新型医用诊断设备和试剂，高性能医学影像设备，高端放射治疗设备……”，故符合国家产业政策。</p></div><div><div>13.1.2 选址合理性分析</div><p>本项目核医学科工作场所位于病房综合楼负一层西北侧，设置有相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径，通过门禁设计及合适的顺序、交通模式来控制辐射源的活动，可实现工作人员、患者、放射性药物、放射性废物路径相对独立，人员与放射性药物通道不交叉，且核医学科工作场所不毗邻产科、儿科、食堂等部门以及人员密集区，并与非放射性工作场所有明确的分界墙隔离，故拟建项目核医学科在布局上最大限度地考虑就医方便及辐射防护与环境安全。核医学科放射性废气引至高压氧舱室的楼顶排放，排风立管高出楼顶一定距离并尽量远离周边高层建筑，同时废气经高效活性炭过滤吸附装置处理后再排放，故项目产生的放射性废气在采取上述措施后对环境影响较小。从环境保护角度分析，本项目选址及平面布局符合《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）要求，选址较合理。</p></div><div><div>13.1.3 辐射环境质量现状</div><p>西安交通大学第一附属医院榆林医院病房综合楼内外环境中室内 γ 辐射剂量率监测值为 56.4 nGy/h，室外 γ 辐射剂量率监测值为 52.1~53.5nGy/h。监测结果表明：本项目所在地室内外 γ 辐射剂量率监测值与榆林市 γ 辐射剂量率调查结果中“榆林市 γ 辐射剂量率调查结果（室内：56~129nGy/h，室外：33~87nGy/h）”相当，处于正常环境本</p></div></div>

底水平，辐射环境质量现状无异常，项目所在区域辐射环境质量现状良好。本项目医院核医学科各工作场所、衰变池及周边环境 γ 辐射剂量率检测结果均为天然本底水平， β 表面污染均低于最低检测限，表明本项目所在地目前没有放射性物质的残留，辐射环境质量现状无异常，项目所在区域辐射环境质量现状良好。

13.1.4 辐射安全设施

(1) 医院核医学科在控制区、放射性固废间等场所入口处设置电离辐射警告标志，在手套箱、铅罐、一体化注射防护装置、放射性废物桶等表面设置电离辐射警告标志；

(2) 控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门禁等安全措施；患者通道内的相应位置均设置视频监控系统，工作场所内手动防护门安装自动闭门装置，机房电动防护门安装防夹装置；

(3) SPECT 及 PET/CT 机房与控制室之间设置观察窗与对讲装置，控制室工作人员出入口、患者出入口外均张贴电离辐射警告标志；PET/CT 机房患者出入口上方安装工作状态指示灯，灯箱上设置“射线有害、灯亮勿入”等警示标语；核医学科地面或墙壁设置简明易懂的导向标识或导向提示，或通过对讲、导向标识等形式引导患者，限制其流动方向。SPECT 和 PET/CT 机房内墙壁、设备和控制台均安装紧急停机按钮；

(4) 核医学科控制区内应配备应急及去污用品，核医学科工作场所控制区设置专门洁具间；应根据诊疗工作需要，为辐射工作人员、患者配备相应数量的个人防护用品；

(5) 核医学科应配备满足需要的放射性废物贮存设施（放射性固废间、放射性废物暂存桶）、放射性废水衰变池、专用排风管道及活性炭过滤设施等，核医学科各项辐射安全设施设计均满足《核医学辐射防护与安全要求》（H1188-2021）和《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）相关要求。

13.1.5 辐射环境影响分析

(1) 屏蔽能力分析

经估算，本项目核医学科 PET/CT 机房面积和单边尺寸满足标准要求，核医学科各工作场所四周屏蔽体、顶棚、防护门窗外表面 30cm 处剂量率均满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）标准相关限值要求，对周边环境影响较小。

(2) 放射性“三废”影响分析

本项目运行后，核医学科产生的放射性废水（含 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）经收集、暂存于放射

性废水衰变池内，经过推流式衰变池的贮存衰变后进行排放。

项目核医学科控制区设计多套独立的通排风系统。核医学科药物制备间和注射室均设置单独的通风管道连接手套箱，通风速率不小于 0.5m/s。手套箱外接专用排风管道，依次设置止回阀、高效活性炭过滤装置，经过滤废气统一汇集至放射性排气井，通过管道引至高压氧舱室楼顶，排放口高于本建筑楼顶并尽量远离周边高层建筑。核医学科控制区内各功能工作场所保持良好的通排风，保持工作场所的负压和各区之间的压差，核医学科工作场所的排风系统排放方式和设计参数均能满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的相关要求。

本项目产生放射性固体废弃物分类收集在专用放射性废物暂存桶内，再将放射性废物暂存桶内的固体废弃物连同垃圾袋存放到放射性固废间内暂存。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）标准要求，含 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的放射性固废暂存时间超过 30 天后，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 表面污染小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可将其作为医疗废物处理。废 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器交厂家处理。

（3）项目所致职业人员、公众年附加有效剂量

经估算，本项目核医学科运行所致放射工作人员最大年附加剂量为 3.71mSv/a ，所致公众成员受到的最大年附加剂量为 0.02mSv/a ，衰变池所致附近公众所受年附加有效剂量最大为 0.03mSv/a ，其分别满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中的年有效剂量限值及本项目提出的年剂量约束值要求（放射工作人员 5mSv/a ，公众成员 0.1mSv/a ）。此外，本项目医院核医学科是个相对封闭的区域，公众人员一般不会到达控制区，且公众在控制区边界外停留时间较短，故公众成员受到的附加剂量实际会比环评预测值小。

13.1.6 辐射安全管理

西安交通大学第一附属医院榆林医院已成立了辐射安全和防护管理机构，并明确了相关成员职责。医院已制定了一系列辐射安全管理制度，用于指导和规范从事放射活动的人员做好辐射安全和辐射防护工作。医院应根据实际使用情况不断完善操作规程、岗位职责、辐射安全和防护制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案等，使其具有更强的针对性和可操作。项目开展后将其纳入医院现有辐射安全管理体系，并根据人事变动情况及时调整人员名单，明确相关人员职责，可满足项目对辐射安全管理的要

求。

13.1.7 项目可行性分析结论

综上所述，西安交通大学第一附属医院榆林医院核医学科改造核技术利用建设项目符合国家产业政策以及辐射防护实践正当性原则，选址合理，项目在严格落实本报告提出的各项污染防治措施、辐射安全防护措施和辐射安全管理制度后，具备辐射活动相适应的核技术应用能力。项目运行期对周围环境的辐射影响可控制在尽可能低的水平，满足辐射防护基本原则，运行所致辐射工作人员和公众年附加有效剂量均满足国家相关标准限值要求，符合剂量限值约束原则。因此，从辐射安全和环境保护角度分析，项目建设可行。

13.2 建议与要求

（1）严格按照本报告表中设计参数以及相关要求进行建设，保证施工质量，确保工程辐射防护效果满足相关标准要求。

（2）严格按照报告表中相关要求配备辐射安全设施，定期对辐射安全设施进行维护、维修，确保其正常使用。

（3）对照原陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》的通知（陕环办发〔2018〕29号）相关要求，规范管理与操作，建立健全核技术利用项目各项档案管理，认真开展自查自评工作，发现问题及时整改。

（4）核医学科辐射工作人员应提高熟练程度，必要时增加人员，通过分摊剂量方式减少辐射工作人员年附加有效剂量。

（5）应按要求配备 X- γ 剂量率监测仪、表面污染监测仪等监测仪器及相关个人防护用品，按照监测计划定期对放射性工作场所以及周边环境进行监测，将原始监测记录存档备查。

（6）加强放射性药品与放射源的管理，建立台帐制度，存档备查。

（7）建立完善辐射事故应急预案，使之具有针对性、可操作性，加强日常演练，做到有备无患，确保发生事故时，能够及时有效启动辐射事故应急预案。

（8）严格执行辐射环境监测制度，每年应对医院核技术应用的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向辐射安全许可证颁发部门报送上一年度辐射安全年度评估报告。

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