

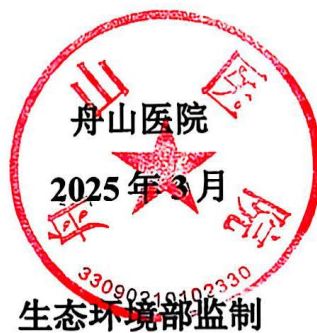
编号：ZFFB24220076

核技术利用建设项目

舟山医院肿瘤综合治疗中心
(下册 核技术利用建设项目)

环境影响报告表

(报批稿)



核技术利用建设项目

舟山医院肿瘤综合治疗中心

核技术利用建设项目

环境影响报告表



建设单位名称：舟山医院

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：浙江省舟山市定海区定沈路 739 号

邮政编码：316021

联系人：***

电子邮箱：***

联系电话：***

目 录

表 1 项目基本情况.....	1
表 2 放射源.....	16
表 3 非密封放射性物质.....	16
表 4 射线装置.....	18
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）	19
表 6 评价依据.....	20
表 7 保护目标与评价标准.....	24
表 8 环境质量和辐射现状.....	32
表 9 项目工程分析与源项.....	41
表 10 辐射安全与防护.....	67
表 11 环境影响分析.....	98
表 12 辐射安全管理.....	153
表 13 结论与建议.....	160
表 14 审批.....	165

表 1 项目基本情况

建设项目名称		舟山医院肿瘤综合治疗中心核技术利用建设项目			
建设单位		舟山医院			
法人代表	乐涵波	联系人	***	联系电话	***
注册地址		浙江省舟山市定海区定沈路 739 号			
项目建设地点		浙江省舟山市定海区定沈路 739 号 舟山医院肿瘤综合治疗中心一层和地下一层			
立项审批部门		/		批准文号	/
建设项目总投资（万元）		12000	项目环保投资（万元）	1000	投资比例（环保投资/总投资） 8.33%
项目性质		☐ 新建 ☐ 改建 ☒ 扩建 ☐ 其他			占地面积（m ² ） /
应用类型	放射源	☐ 销售	☐ I类 ☐ II类 ☐ III类 ☐ IV类 ☐ V类		
		☐ 使用	☐ I类（医疗使用） ☐ II类 ☐ III类 ☐ IV类 ☒ V类		
	非密封放射性物质	☐ 生产	☐ 制备 PET 用放射性药物		
		☐ 销售	/		
		☒ 使用	☒ 乙 ☐ 丙		
	射线装置	☐ 生产	☐ II类 ☐ III类		
		☐ 销售	☐ II类 ☐ III类		
		☒ 使用	☒ II类 ☒ III类		
	其他	/			

1.1 项目概述

1.1.1 建设目的和任务由来

近年来，随着医疗服务对象的扩大及人民群众对医疗服务质量要求的提高，为促进舟山市城市建设和经济发展的需要，进一步改善当地医疗环境，提高医院知名度，舟山医院计划在肿瘤综合治疗中心（地上共 16 层，地下共 1 层）一层建设核医学科，核医学科分为核素诊断场所和核素治疗场所。

在核医学核素诊断场所内新增 1 台 PET/CT 和 1 台 PET/MR，使用 ¹⁸F、⁶⁸Ga 核

素进行显像诊断，本项目 PET/CT 和 PET/MR 拟配置 2 枚 ^{68}Ge 校准源；新增 1 台 SPECT/CT，使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 核素进行显像诊断；使用 ^{90}Sr 放射源进行敷贴治疗。本项目核医学核素诊断场所非密封放射性物质日等效最大操作量为 $3.19\times 10^8\text{Bq}$ 。

核医学核素治疗场所使用 ^{89}Sr 核素进行骨癌治疗；使用 ^{131}I 核素进行甲状腺吸碘率测定、甲亢治疗和甲癌治疗；使用 ^{177}Lu 核素进行肿瘤治疗；设置 5 间单人核素治疗病房。本项目核医学核素治疗场所非密封放射性物质日等效最大操作量为 $3.93\times 10^9\text{Bq}$ 。

在肿瘤综合治疗中心地下一层建设放疗科，放疗科内新建 2 间医用电子直线加速器机房及其配套用房，机房内各新增 1 台 15MV 医用电子直线加速器（以下简称“直线加速器”）；新建 1 间模拟定位 CT 机房及其配套用房，机房内新增使用 1 台模拟定位 CT。

根据《关于发布放射源分类办法的公告》（原国家环保总局公告，公告 2005 年第 62 号），本项目核医学科 PET/CT 和 PET/MR 拟配置 2 枚 ^{68}Ge 校准源，1 枚活度为 $1.11\times 10^8\text{Bq}$ ，1 枚活度为 $5.5\times 10^7\text{Bq}$ ，均为 V 类放射源；拟使用 1 枚 ^{90}Sr 放射源进行敷贴治疗，单枚活度为 $1.85\times 10^9\text{Bq}$ ，为 V 类放射源。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于非密封源工作场所的分级原则，本项目核医学核素诊断场所和核医学核素治疗场所非密封放射性核素日等效最大操作量分别为 $3.19\times 10^8\text{Bq}$ 和 $3.93\times 10^9\text{Bq}$ ，属于“ $2\times 10^7\text{Bq}\sim 4\times 10^9\text{Bq}$ ”的范围，为 2 个乙级非密封放射性物质工作场所。

根据《关于发布〈射线装置分类〉的公告》（原环境保护部，国家卫生和计划生育委员会公告，公告 2017 年第 66 号），本项目 SPECT/CT 和 PET/CT 和模拟定位 CT 属于医用 X 射线计算机断层扫描（CT）装置的分类范围，均为 III 类射线装置；医用电子直线加速器属于粒子能量小于 100 兆电子伏的医用加速器的分类范围，为 II 类射线装置。

对照《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版），本项目属于“五十五、核与辐射”中“172、核技术利用建设项目—乙级非密封放射性物质工作场所；使用 II 类射线装置的”，环境影响评价类别为编制环境影响报告表。

为此，舟山医院委托中辐环境科技有限公司开展“舟山医院肿瘤综合治疗中心

核技术利用建设项目（以下简称“本项目”）”的环境影响评价工作。评价单位组织相关技术人员进行了现场踏勘、资料收集和辐射环境现状委托监测等工作，并结合项目特点，按照《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）等规定要求编制了本项目环境影响报告表。

1.1.2 项目建设内容和规模

（1）核医学科

本项目核医学科位于肿瘤综合治疗中心一层，核医学科分为核素诊断场所和核素治疗场所。根据《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函〔2016〕430号，2016年3月7日施行），满足以下特点的放射性药品生产、使用场所，应当作为一个单独场所进行日等效最大操作量核算：

- 1）有相对独立、明确的监督区和控制区划分；
- 2）工艺流程连续完整；
- 3）有相对独立的辐射防护措施。

核医学核素诊断场所和核素治疗场所均位于肿瘤综合治疗中心一层，核素诊断场所和核素治疗场所各自满足相对独立、具有明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，有相对独立的辐射防护措施，除此以外，两个工作场所布局各自独立、人员独立、路线独立，诊疗患者不交叉，因此将核医学核素诊断场所和核素治疗场所作为两个单独场所进行日等效最大操作量核算。

①核素诊断场所

在核医学核素诊断场所内新增1台PET/CT和1台PET/MR，使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 核素进行显像诊断，本项目PET/CT和PET/MR拟配置2枚 ^{68}Ge 校准源；新增1台SPECT/CT，使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 核素进行显像诊断；使用 ^{90}Sr 放射源进行敷贴治疗。本项目核医学核素诊断场所非密封放射性物质日等效最大操作量为 $3.19\times 10^8\text{Bq}$ ，为1个乙级非密封放射性物质工作场所。

②核素治疗场所

核医学核素治疗场所使用 ^{89}Sr 核素进行骨癌治疗；使用 ^{131}I 核素进行甲状腺吸碘率测定、甲亢治疗和甲癌治疗；使用 ^{177}Lu 核素进行肿瘤治疗；设置5间单人核素治疗病房。本项目核医学核素治疗场所非密封放射性物质日等效最大操作量为 $3.93\times 10^9\text{Bq}$ ，为1个乙级非密封放射性物质工作场所。

③核医学科放射源、核素和射线装置使用情况

本项目核医学科放射源使用情况见表 1.1.2-1。

表 1.1.2-1 核医学科放射源使用情况

核素名称	单枚源活度	枚数	类别	活动种类	用途
^{68}Ge	$1.11 \times 10^8 \text{Bq}$	1	V	使用	PET 校准
^{68}Ge	$5.5 \times 10^7 \text{Bq}$	1	V	使用	PET 校准
^{90}Sr	$1.85 \times 10^9 \text{Bq}$	1	V	使用	敷贴治疗

本项目核医学科非密封放射性物质使用情况见下表 1.1.3-2。

表 1.1.2-2 核医学科非密封放射性物质使用情况

核素名称	物理状态	日最大诊断量	年最大诊断量	单次最大使用量	给药方式	用途
核医学核素诊断场所						
¹⁸ F	液态	30 人	7500 人	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	静脉注射	PET 显像 诊断
⁶⁸ Ga	液态	10 人	2500 人	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	静脉注射	
^{99m} Tc	液态	30 人	7500 人	9.25×10 ⁸ Bq (25mCi)	静脉注射	SPECT 显 像诊断
²⁰¹ Tl	液态	5 人	1250 人	1.85×10 ⁸ Bq (5mCi)	静脉注射	
⁶⁷ Ga	液态	5 人	1250 人	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	静脉注射	
核医学核素治疗场所						
⁸⁹ Sr	液态	3 人	150 人	1.48×10 ⁸ Bq (4mCi)	静脉注射	骨癌治疗
¹³¹ I 甲测	液态	20 人	5000 人	1.85×10 ⁵ Bq (5μCi)	口服	甲功测定
¹³¹ I 甲亢	液态	5 人	1250 人	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	口服	甲亢治疗
¹³¹ I 甲癌	液态	5 人（每周一 安排住院）	250 人	7.4×10 ⁹ Bq (200mCi)	口服	甲癌治疗
¹⁷⁷ Lu	液态	5 人（每周六 安排住院）	250 人	7.4×10 ⁹ Bq (200mCi)	静脉滴注	肿瘤治疗
注：核医学科患者采用预约制，由医院严格控制日最大诊疗人数。						

注：核医学科患者采用预约制，由医院严格控制日最大诊疗人数。

由于核医学核素诊断场所使用的 ^{18}F 和 ^{68}Ga 核素半衰期较短，为保证每批次最后一位患者注射的含 ^{18}F 和 ^{68}Ga 核素的放射性药物量为 10mCi，需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，即要考虑放射性药物的实际使用量和购买备药量，也要考虑使用过程中的衰变因素，本项目满负荷情况下计划一天送 2 次药（上午、下午各 1 次），并且根据患者情况，优先使用含 ^{68}Ga 的放射性药物，因此， ^{18}F 和 ^{68}Ga 核素的日最大操作量按照 2 倍考虑，则 ^{18}F 和 ^{68}Ga 核素的日最大操

作量分别为 $2.22 \times 10^{10} \text{Bq}$ 和 $7.4 \times 10^9 \text{Bq}$ 。

本项目放射性核素均通过外购获得，建设单位应做到：在项目建成运行前确定放射性核素的出售单位，签订相关供货协议，确保售出单位有完善的环保手续和生产、销售的相关资质及许可，并且在今后项目投入运行后继续严格执行放射性核素来源的合法、合规管理。

本项目核医学科射线装置使用情况见表 1.1.2-3。

表 1.1.2-3 核医学科射线装置使用情况

序号	名称	型号	类别	数量	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	工作场所	用途
1	PET/CT	待定	III 类	1	140	1300	肿瘤综合治疗中心 一层 PET/CT 机房	PET 显像诊断
2	SPECT/CT	待定	III 类	1	140	1300	肿瘤综合治疗中心 一层 SPECT/CT 机房	SPECT 显像诊断

根据《舟山医院 PET-CT 建设项目环境影响报告表》及批复（舟环辐审[2024]1 号），医院拟对院区急诊综合大楼地下一层进行改造，建设核医学工作场所，新建 1 间 PET-CT 机房以及相关配套功能用房，机房内新增 1 台 PET/CT，使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 核素开展 PET/CT 显像诊断，使用 ^{89}Sr 核素开展骨癌治疗，目前该项目正在建设中。本项目核医学科建成并投入使用后，医院计划将急诊综合大楼地下一层核医学工作场所搬迁至本项目核医学科范围内，原有 PET/CT 同步搬迁于本项目 PET/CT 机房使用。届时医院应及时对急诊综合大楼负一层核医学工作场所进行退役。

④人员配备及工作负荷

本项目核医学科拟配备辐射工作人员共 30 名，均为新增辐射工作人员。其中医生 6 人，技师 12 人，护士 12 人。

1) 核医学核素诊断场所

核医学核素诊断场所拟配备辐射工作人员共 23 名。其中配备医生 4 人，负责接诊和阅片等；技师 12 人，每间机房配备 4 名技师负责设备操作与摆位，进行 2 人一组轮岗操作；护士 7 人，其中 2 人负责 PET 取药、分装、测活和注射，2 人负责 SPECT 取药、测活和注射，1 人负责敷贴给药，2 人分别负责导诊和预约登记。

2) 核医学核素治疗场所

核医学核素诊断场所拟配备辐射工作人员共 7 名。其中配备医生 2 人，负责接诊等；护士 5 人，其中 1 人负责 ^{89}Sr 取药、测活和注射，1 人负责 ^{131}I 自动分装给

药，1 人负责 ^{177}Lu 测活、给药，1 人负责甲测，1 人负责预约登记和协助办理出入院服务。

本项目核医学科拟配备人员情况见表 1.1.2-4。

表 1.1.2-4 核医学科拟配备人员情况

岗位	人数	工作内容	备注
核医学核素诊断场所			
医生	4 人	接诊和阅片等	独立人员且 不与其他诊 疗项目人员 交叉使用
技师	4 人 (2 人一组轮岗操作)	负责 PET/MR 设备操作与摆位	
	4 人 (2 人一组轮岗操作)	负责 PET/CT 设备操作与摆位	
	4 人 (2 人一组轮岗操作)	负责 SPECT/CT 设备操作与摆位	
护士	2 人（轮岗操作）	PET 取药、分装、测活和注射	
	2 人（轮岗操作）	SPECT 取药、测活和注射	
	1 人	敷贴给药	
	2 人	导诊和预约登记等	
核医学核素治疗场所			
医生	2 人	接诊	独立人员且 不与其他诊 疗项目人员 交叉使用
护士	1 人	负责 ⁸⁹ Sr 取药、测活和注射	
	1 人	¹³¹ I 自动分装给药	
	1 人	¹⁷⁷ Lu 测活、给药	
	1 人	甲测	
	1 人	预约登记和协助办理出入院服务	

(2) 放疗科

①建设内容及规模

本项目放疗科位于肿瘤综合治疗中心地下一层，新建 2 间直线加速器机房，机房内各新增 1 台最大 X 射线能量为 15MV 直线加速器用于肿瘤治疗，为 II 类射线装置；新建 1 间模拟定位 CT 机房，机房内新增 1 台模拟定位 CT，型号待定，最大管电压为 140kV，最大管电流为 1300mA，为 III 类射线装置。

本项目放疗科新增的 2 台直线加速器和 1 台模拟定位 CT 情况见表 1.1.2-5 和表 1.1.2-6。

表 1.1.2-5 放疗科新增的 1 台直线加速器情况

装置名称	型号	类别	数量	设备参数			工作场所	用途
				射线种类	最大射线能量	最大剂量率 (Gy/h)		
医用电子 直线加速 器	待定	II类	2 台	X 射线	15MV	600	直线加速 器机房	肿瘤 治疗
				X 射线 (FFF 模式)	10MV	1440		
				X 射线	6MV	840		
				电子射线	22MeV	600		
注：本项目直线加速器尚未确定具体型号，计划使用 6/10/15 中 2 种档位的直线加速器，由于 6MV 的 X 射线能量和最大剂量率均小于 10MV，故本项目在理论预测分析时仅保守以 10MV 进行考虑。								

表 1.1.2-6 放疗科新增的 1 台模拟定位 CT 情况

装置名称	型号	类别	数量	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	工作场所
模拟定位 CT	待定	III 类	1 台	140	1300	模拟定位 CT 机房

②人员配备及工作负荷

本项目放疗科前期拟配备辐射工作人员共 10 名。医生 2 人，技师 6 人，物理师 2 人，均为新聘辐射工作人员。

本项目放疗科拟配备人员情况见表 1.1.2-7。

表 1.1.2-7 放疗科拟配备人员情况

场所名称	岗位	人数
直线加速器机房 (2 间)	医生	2 人
	技师	4 人（每间机房 2 人，轮岗操作）
	物理师	2 人
模拟定位 CT 机房	技师	2 人（轮岗操作）

本项目直线加速器投入使用后，预计每天放射治疗患者最多为 40 人次，平均每名患者治疗照射最大时间为 2.5min，每周工作 5 天，每年工作 250 天，则本项目的周工作时间为 8.33h，年工作时间为 416.67h。

模拟定位 CT 机投入使用后，预计每天诊断患者最多为 50 人次，设备单次曝光时间不超过 30 秒，每周工作 5 天，每年工作 250 天，则设备年出束时间为 104.2h。

(3) 小结

综上所述，本项目建设内容和规模汇总见表 1.1.2-8~1.1.2-10。

表 1.1.2-8 新增放射源使用情况汇总

序号	核素名称	单枚源活度	枚数	类别	活动种类	用途
1	^{68}Ge	$1.11 \times 10^8 \text{Bq}$	1	V	使用	PET 校准
2	^{68}Ge	$5.5 \times 10^7 \text{Bq}$	1	V	使用	PET 校准
3	^{90}Sr	$1.85 \times 10^9 \text{Bq}$	1	V	使用	敷贴治疗

表 1.1.2-9 新增非密封放射性物质情况汇总

核素名称	物理状态	日最大诊断量	年最大诊断量	单次最大使用量	给药方式	用途
核医学核素诊断场所						
¹⁸ F	液态	30 人	7500 人	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	静脉注射	PET 显像 诊断
⁶⁸ Ga	液态	10 人	2500 人	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	静脉注射	
^{99m} Tc	液态	30 人	7500 人	9.25×10 ⁸ Bq (25mCi)	静脉注射	SPECT 显 像诊断
²⁰¹ Tl	液态	5 人	1250 人	1.85×10 ⁸ Bq (5mCi)	静脉注射	
⁶⁷ Ga	液态	5 人	1250 人	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	静脉注射	
核医学核素治疗场所						
⁸⁹ Sr	液态	3 人	750 人	1.48×10 ⁸ Bq (4mCi)	静脉注射	骨癌治疗
¹³¹ I 甲测	液态	20 人	5000 人	1.85×10 ⁵ Bq (5μCi)	口服	甲功测定
¹³¹ I 甲亢	液态	5 人	1250 人	3.70×10 ⁸ Bq (10mCi)	口服	甲亢治疗
¹³¹ I 甲癌	液态	5 人（每周一 二安住院）	250 人	7.4×10 ⁹ Bq (150mCi)	口服	甲癌治疗
¹⁷⁷ Lu	液态	5 人（每周六 安排住院）	250 人	7.4×10 ⁹ Bq (200mCi)	静脉滴注	肿瘤治疗
注：核医学科患者采用预约制，由医院严格控制日最大诊疗人数。						

表 1.1.2-10 新增射线装置情况汇总

序号	名称	型号	类别	数量	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	工作场所	用途
1	PET/CT	待定	III 类	1	140	1300	肿瘤综合治疗中心一层 PET/CT 机房	显像 诊断
2	SPECT/CT	待定	III 类	1	140	1300	肿瘤综合治疗中心一层 SPECT/CT 机房	
3	直线加速器	待定	II 类	2	15MV：距靶 1m 处剂量率为 600Gy/h 10MV（FFF 模式）：距靶 1m 处剂量率为 1440Gy/h 6MV（FFF 模式）：距靶 1m 处剂量率为 840Gy/h 22MeV 电子线：距靶 1m 处		肿瘤综合治疗中心地下 一层直线加速器机房	肿瘤 治疗

					剂量率为 600Gy/h			
4	模拟定位 CT	待 定	III 类	1	140	1300	肿瘤综合治疗中心地下 一层模拟定位 CT 机房	显像 诊断

医院原有辐射工作人员是否调岗情况暂未确定，故本项目辐射工作人员均按新增人员考虑。本项目所有辐射工作人员均实行 8h 单班工作制度，且均不存在兼职其他辐射工作场所岗位情况。

根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号）和《关于进一步优化辐射安全考核公告》（生态环境部公告第 2021 年第 9 号），本项目新增辐射工作人员应参加国家核技术利用辐射安全与防护平台相应类别的培训学习，并报名参加集中考核，考核合格后方可上岗，工作过程中需按时接受再培训。

1.2 项目选址及周边环境保护目标

1.2.1 项目地理位置

舟山医院位于舟山市定海区定沈路 739 号，项目地理位置见附图 1。医院东临怡岛路，隔路为中央花城小区、舟山第二小学和舟山第一初级中学；南临定沈路，隔路为邦泰城小区、华润万家和领域故事花园小区；西临体育路，隔路为宝龙广场和海上明月府小区；北侧为舟山市行政中心楼、舟山市疾病预防控制中心、舟山市中心血站和翁山路。周边环境关系见附图 2。

1.2.2 项目辐射工作场所及周围环境关系

（1）核医学科及衰变池

本项目核医学科位于医院肿瘤综合治疗中心一层。东侧为教学楼和行政楼，距离本项目场所实体边界最近均约 27m；南侧为住院楼，距离本项目场所实体边界最近约 46m；西侧为感染病楼和发热门诊；北侧为高压氧仓和宿舍楼，距离本项目场所实体边界最近约 37m 和 40m。上方为日间化疗用房，下方为地下停车场区域和放疗科用房。

本项目衰变池位于肿瘤综合治疗中心北侧绿地下方，距本项目核医学科直线距离约 40m。衰变池东侧为高压氧仓和宿舍楼，距离衰变池实体边界最近约 3m 和 36m；南侧为肿瘤综合治疗中心，距离衰变池实体边界最近约 23m；西侧为发热门诊；北侧为舟山市中心血站，距离衰变池实体边界最近约 31m。

(2) 放疗科直线加速器机房和模拟定位 CT 机房

本项目 2 间直线加速器机房位于医院肿瘤综合治疗中心地下一层。东侧为教学楼和宿舍楼，距离本项目机房实体屏蔽物边界最近约 44m 和 35m；南侧为住院楼；西侧为感染病楼和发热门诊；北侧为高压氧仓，距离本项目机房实体屏蔽物边界最近约 12m。上方为电梯厅、柴发室、卫生间、院内道路和绿地，下方为土层。

本项目模拟定位 CT 机房位于医院肿瘤综合治疗中心地下一层。东侧为教学楼、宿舍楼和行政楼；南侧为住院楼；西侧为感染病楼和发热门诊，感染病楼距离本项目机房实体屏蔽物边界最近约 41m；北侧为高压氧仓。上方为读片室、库房、走廊、变配电间，下方为土层。

综上，本项目各辐射工作场所实体（屏蔽物）边界外 50m 范围内主要为医院内部建筑物、院内道路和绿地以及舟山市中心血站，无居民区、自然保护区、文物保护单位、风景名胜区、水源保护区等环境敏感点。医院总平面见附图 3。

1.2.3 项目选址合理性分析

(1) 核医学科选址合理性分析

本项目核医学科核素诊断场所和核素治疗场所位于肿瘤综合治疗中心一层，不毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，与非放射性工作场所有明确的分界隔离。核医学科产生的放射性废气由风机抽排至肿瘤综合治疗中心楼顶高出屋脊排放，排放口尽可能远离周围高层建筑，排风管内设置止回阀，防止气流倒灌，排放口设置一级活性炭过滤装置。根据后文环境影响分析可知，经采取相应防护治理措施后，电离辐射对周围环境与公众的影响是可接受的。放射性废液衰变池设置于北侧地下，周围活动人员较少，其选址便于核医学科放射性废液的收集衰变。

综合上述，核医学科选址符合《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）和《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）关于核医学工作场所选址的相关要求，项目选址合理。

(2) 放疗科选址合理性分析

本项目放疗科 2 间直线加速器机房位于肿瘤综合治疗中心地下一层。放疗科机房选址不在居民、写字楼和商住两用楼内，位于多层建筑物的底层的一端，选址避开了儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域，符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）和《放射治疗放射防护

要求》（GBZ 121-2020）关于放射治疗场所选址的相关要求，项目选址合理。

本项目模拟定位 CT 机房周边设置了控制室等辅助用房，且避开了人群较多的办公场所，选址靠近放射治疗场所，便于诊疗流程的开展。

综合以上分析，整个核技术利用项目布置在满足医疗流程完整、顺畅运行的前提下，充分考虑了周围环境的影响和辐射类项目尽量集中设置的原则，因此，医院的整体布局及主要辐射工作场所的位置选择较为合理。

1.3 产业政策符合性分析

根据国家发展和改革委员会制订的《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，本项目核医学科属于第一类“鼓励类”第六项“核能”中第 4 条“……同位素、加速器及辐照应用技术开发……”；SPECT/CT、PET/CT、放疗科直线加速器和模拟定位 CT 属于第一类“鼓励类”第十三项“医药”中第 4 条“……高性能医学影像设备，高端放射治疗设备……”，均符合国家产业政策。

1.4 实践正当性分析

本项目的建设可以更好地满足患者就诊需求，提高对疾病的诊治能力。核技术应用项目的开展，对保障人民群众身体健康、拯救生命起了十分重要的作用，因此，本项目的实践是必要的。

医院在放射诊疗和放射治疗过程中，对放射性核素和射线装置的使用场所采取满足相关标准要求的辐射安全防护措施，对放射性核素和射线装置的安全管理将建立相应的操作规程和辐射安全规章制度。因此，在正确使用和管理放射性核素和射线装置的情况下，可以将该项目辐射产生的影响降至尽可能小。本项目产生的辐射给职业人员、公众及社会带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害，该核技术应用实践具有正当性，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中“实践的正当性”原则。

1.5 原有核技术利用项目情况

1.5.1 原有核技术利用项目许可情况

舟山医院现持有舟山市生态环境局颁发的辐射安全许可证（见附件 3），证书编号为：浙环辐证[L2156]；发证日期：2024 年 03 月 28 日，有效期至：2029 年 03 月 27 日；许可的辐射工作种类和范围为：使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置；使用非密封放射性物质，丙级非密封放射性物质工作场所。

医院已许可核技术利用项目环保手续履行情况统计于表 1.5.1-1 和表 1.5.1-2。

表 1.5.1-1 医院已许可核技术利用项目环保手续履行情况

序号	核素名称	活动种类	用途	日操作最大量	年最大用量	工作场所	环评手续履行情况
1	¹²⁵ I (粒子源)	使用	放射性药物治疗	3.7×10 ⁹ Bq	9.25×10 ¹¹ Bq	放射诊断中心 1 号 DSA 机房	备案号: 202433090200000022
2	¹²⁵ I (粒子源)	使用	放射性药物治疗	3.7×10 ⁹ Bq	9.25×10 ¹¹ Bq	放射诊断中心 2 号 CT1 机房	

表 1.5.1-2 医院已许可核技术利用项目环保手续履行情况

序号	装置名称	规格型号	类别	工作场所	环评手续履行情况
1	DSA	Allura Xper FD20	II	放射诊断中心 1 号 DSA 机房	舟环辐审[2014]3 号; 舟环辐验[2016]3 号
2	DSA	INAINIX	II	放射诊断中心 2 号 DSA 机房	舟环辐审[2014]3 号; 正在组织竣工验收
3	车载 X 射线计算机体层摄影设备	Insitum64S	III	核酸基地 CT 车	备案号: 202333090200000050
4	X 射线计算机体层摄影设备	uCT528	III	方舱 CT 机房	备案号: 202333090200000050
5	医用直线加速器	PVINUIS-M	II	妇女儿童医院 放疗科	设备于 2000 年 12 月投入使用, 已申领辐射安全许可证, 设备使用地点、场所均未改变
6	模拟定位机	kxo-50N	III	妇女儿童医院 放疗科	
7	肠胃机	D-VISION PLUS 80S	III	放射诊断中心 4 号机房	备案号: 202133090200000028
8	肠胃机	Winscope plessart EX8	III	放射诊断中心 5 号机房	备案号: 202133090200000028
9	碎石机	HK.ESWL-V	III	放射诊断中心 碎石机房	备案号: 202133090200000028
10	摄影 X 射线机	GFS802-4	III	放射诊断中心 1 号机房	备案号: 202333090200000109
11	双能 X 射线骨密度仪	PROMUS	III	放射诊断中心机房	备案号: 202433090200000014
12	G 型臂 X 线机	D-VISION 9000	III	手术室	备案号: 202133090200000028
13	C 臂机	OEC Fluorostar	III	住院三楼手术室 9 号手术间	备案号: 202133090200000028
14	C 臂机	BV Libra	III	移动使用 (放手术室)	备案号: 202133090200000028
15	移动 DR	SPS-HF4.0-D	III	移动使用 (放手术室)	备案号: 202133090200000028
16	移动 X 线机	Mux-10J	III	移动使用 (放射科)	备案号: 202133090200000028
17	移动 DR	Mux-200D	III	移动使用 (放射科)	备案号: 202133090200000028
18	移动式数字化医用 X 射线摄影系	uDR 370i	III	放射诊断中心	备案号: 202433090200000014

	统				
19	数字乳腺机	AMULETFDR MS-1000	III	放射诊断中心 3 号机房	备案号: 202133090200000028
20	DR	RAD SPEEDM	III	放射诊断中心 2 号机房	备案号: 202133090200000028
21	X 射线计算机体层摄影设备	Optima CT540	III	感染楼 CT	备案号: 202133090200000028
22	后 64 排 CT	RevolutionCT	III	放射诊断中心 CT3 室	备案号: 202133090200000028
23	CT	Aquilion TSX-101A	III	放射诊断中心 2 号 CT 机房	备案号: 202133090200000028
24	口腔 CT	3DeXami	III	放射诊断中心口腔 CT 机房	备案号: 202133090200000028
25	X 射线计算机体层摄影设备	Optima CT540	III	感染楼一楼	备案号: 202133090200000028
26	牙片机	BLUEX (INTRAOS70)	III	门诊三楼口腔科	备案号: 202133090200000028
27	双能 X 射线骨密度仪	DeXa Pro-1	III	体检楼三楼机房	备案号: 202333090200000050
28	DR	Digital Diagnost	III	体检楼 DR 机房	备案号: 202333090200000038
29	X 射线计算机断层摄影设备	16 排 LIGHTSPEED	III	体检楼 CT	备案号: 202133090200000028
30	数字化厢式 X 射线机	AKHX-55H-RAD	III	体检车厢式	备案号: 202133090200000028
31	移动式数字化医用 x 射线摄影系统	Mobieye 700T	III	手术室移动 DR	备案号: 202133090200000028
32	DSA	Artis zee III ceiling	II	住院楼三楼杂交手术室	舟环辐审[2023]2 号; 正在组织竣工验收
33	碎石机	XYS.SUI-6C	III	门诊三楼碎石机房	备案号: 202433090200000023
34	移动 DR	PRIMUS	III	放射科 (移动使用)	备案号: 202433090200000014

1.5.2 原有核技术利用项目管理情况

(1) 辐射安全与环境保护管理机构与辐射安全管理规章制度情况

医院已成立了放射管理委员会，并制定了《放射（辐射）安全管理制度》、《放射（辐射）防护和安全保卫制度》、《放射从业人员检测管理制度》、《放射防护用品管理制度》、《放射防护培训制度》、《个人剂量监测制度》、《放射诊疗场所放射防护检测与评价制度》、《放射诊疗中心仪器设备使用、维护管理制度》、《放射诊断岗位职责》等规章制度。

医院现有管理制度内容较为全面，符合相关要求，现有规章制度基本满足医院现有相关辐射活动辐射安全和防护管理的要求。医院严格落实各项规章制度，在辐

射安全和防护制度的建立、落实及档案管理等方面运行较好。

(2) 辐射安全与防护培训考核情况

医院严格执行辐射工作人员培训制度，现有 206 名辐射工作人员，其中使用Ⅲ类射线装置的辐射工作人员均参加了医院自行组织的培训考核，并考核合格，其余辐射工作人员均参加了国家核技术利用辐射安全与防护培训平台集中考核或由浙江卫生监督协会组织的放射诊疗考核，考核合格且成绩均在有效期内。

(3) 职业健康检查情况

医院已为现有辐射工作人员建有职业健康监护档案，辐射工作人员岗前、在岗期间和离岗前均进行了职业健康检查，在岗期间检查周期不超过 2 年。医院现有辐射工作人员均于 2023 年 1 月~12 月进行了在岗期间的职业健康检查。根据医院提供的职业健康检查报告，现有辐射工作人员均可继续从事放射岗位工作。

(4) 个人剂量检测情况

医院现有辐射工作人员均配备了个人剂量计，并每三个月委托浙江疾病预防控制中心进行个人剂量检测，并建立个人剂量检测档案。根据医院提供的现有辐射工作人员最近连续四个季度个人剂量检测报告（见附件 9），全院辐射工作人员年累计受照剂量检测结果符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中职业人员受照不超过 5mSv 的剂量限值要求。

(5) 辐射工作场所管理情况

医院现有辐射工作场所均采取了符合标准要求的屏蔽防护措施，设置有电离辐射警告标志和工作状态指示灯并与防护门联锁。根据不同项目实际情况划分辐射防护控制区和监督区，采取分区管理，进行积极、有效的管控。

医院每年定期委托浙江疾病预防控制中心对辐射工作场所和设备性能进行年度监测，根据监测报告，医院各辐射工作场所监测结果均满足相关标准要求，医院现已采取的辐射工作场所防护措施能够满足已开展辐射活动的辐射安全防护要求，现有各辐射防护设施运行、维护、检测工作良好。

(6) 辐射事故应急和年度评估情况

医院已制定了《放射事故应急处理预案》，医院每年进行辐射应急演练并及时进行完善和修订应急预案。经核实，自辐射活动开展以来，未发生过辐射事故。

医院严格执行年度评估制度，每年编制辐射安全与防护状况年度评估报告，对

现有辐射工作场所防护状况、人员培训及个人剂量、使用台账、辐射安全与防护制度执行情况等进行年度评估，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。

表 2 放射源

序号	核素名称	总活度 (Bq)/ 活度 (Bq) ×枚数	类别	活动种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
1	⁶⁸ Ge	1.11×10 ⁸ /1.11×10×1	V	使用	PET 校准	PET/MR 机房和 PET/CT 机房	根据实际使用量向有资 质单位购买（现买现 用），购买后的放射源 连同铅罐包装分别放置 于核医学科储源室，设 双人双锁管理。	新购
2	⁶⁸ Ge	5.5×10 ⁷ /5.5×10 ⁷ ×1	V	使用	PET 校准			新购
3	⁹⁰ Sr	1.85×10 ⁹ /1.85×10 ⁹ ×1	V	使用	敷贴治疗	敷贴室		新购

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

表 3 非密封放射性物质

序 号	核素 名称	理化性质	活动 种类	实际日最大 操作量 (Bq)	日等效最大 操作量 (Bq)	年最大用 量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	¹⁸ F	液态/低毒半衰期 109.8min	使用	2.22×10 ¹⁰	2.22×10 ⁷	5.55×10 ¹²	PET 显像诊断	很简单操作	核医学核素诊 断场所	由医院根据实际使 用量订购，派专人 运送，运输来的药 物连同包装放置于 核素显像场所储源 室
2	⁶⁸ Ga	液态/低毒/半衰期 68.3min	使用	7.4×10 ⁹	7.4×10 ⁷	1.85×10 ¹²	PET 显像诊断	简单操作		
3	^{99m} Tc	液态/低毒半衰期 6.02h	使用	2.78×10 ¹⁰	2.78×10 ⁷	6.94×10 ¹²	SPECT 显像诊断	很简单操作		
4	²⁰¹ Tl	液态/低毒/半衰期 72.9h	使用	9.25×10 ⁸	9.25×10 ⁶	2.31×10 ¹¹	SPECT 显像诊断	简单操作		
5	⁶⁷ Ga	液态/中毒/半衰期 78h	使用	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁸	4.63×10 ¹¹	SPECT 显像诊断	简单操作		
6	⁸⁹ Sr	液态/中毒/半衰期 50.53d	使用	4.44×10 ⁸	4.44×10 ⁷	1.11×10 ¹¹	骨癌治疗	简单操作	核医学核素治 疗场所	由医院根据实际使 用量订购，派专人 运送，运输来的药 物连同包装放置于 核素治疗场所储源
7	¹³¹ I 甲测	液态/中毒/半衰期 8.02d	使用	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁵	9.25×10 ⁹	甲功测定	简单操作		
8	¹³¹ I 甲亢	液态/中毒/半衰期 8.02d	使用	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁸	4.63×10 ¹¹	甲亢治疗	简单操作		

9	¹³¹ I 甲癌	液态/中毒/半衰期 8.02d	使用	3.7×10^{10}	3.7×10^9	1.85×10^{12}	甲癌治疗	简单操作		室
10	¹⁷⁷ Lu	液态/中毒/半衰期 6.73d	使用	3.7×10^{10}	3.7×10^9	1.85×10^{12}	肿瘤治疗	简单操作		

注：日等效最大操作量和操作方式见《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）。

表 4 射线装置

（一）加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速 粒子	最大能量（MeV）	额定电流（mA）/ /剂量率（Gy/h）	用途	工作场所	备注
1	医用电子直线加速器	II类	2	待定	电子	X射线：15MV 电子线：22MeV	15MV：距靶 1m 处剂量率为 600Gy/h 10MV（FFF 模式）：距靶 1m 处剂量率为 1440Gy/h 6MV（FFF 模式）：距靶 1m 处剂量率为 840Gy/h 22MeV 电子线：距靶 1m 处剂量率为 600Gy/h	肿瘤 治疗	肿瘤综合治疗中心地下一层 2 间 直线加速器机房	新购

（二）X 射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 （kV）	最大管电流 （mA）	用途	工作场所	备注
1	PET/CT	III类	1	待定	140	1300	PET 显像诊断	肿瘤综合治疗中心一层 PET/CT 机房	搬迁
2	SPECT/CT	III类	1	待定	140	1300	SPECT 显像诊断	肿瘤综合治疗中心一层 SPECT/CT 机房	新购
3	模拟定位 CT	III类	1	待定	140	1300	显像诊断	肿瘤综合治疗中心地下一层模拟定位 CT 机房	新购

（三）中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

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

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
核医学科核素诊断场所放射性废液	液态	^{18}F 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga	/	/	202.5m ³ /a	总 $\alpha\leq 1\text{Bq/L}$ 总 $\beta\leq 10\text{Bq/L}$	暂存于 3 个并联衰变池中，每个衰变池有效容积 13m ³ ，总有效容积为 39m ³	在衰变池暂存时间超 42 天，符合 GB18871-2002 排放条件后，进入医院污水处理站处理后排入城市污水管网
核医学科核素治疗场所放射性废液	液态	^{89}Sr 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	298m ³ /a	总 $\alpha\leq 1\text{Bq/L}$ 总 $\beta\leq 10\text{Bq/L}$ ^{131}I 活度浓度 $\leq 10\text{Bq/L}$	暂存于 4 个并联衰变池中，每个衰变池有效容积 75m ³ ，总有效容积为 300m ³	在衰变池暂存时间超 264 天，符合 GB18871-2002 排放条件后，进入医院污水处理站处理后排入城市污水管网
放射性废气	气态	^{18}F 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	/	/	不暂存	经活性炭过滤后，最终高出肿瘤综合治疗中心楼顶排放
放射性固废	固态	^{18}F 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 、 ^{89}Sr 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	1403kg/a	β 表面污染 $\leq 0.8\text{Bq/cm}^2$	暂存于各工作场所固废间的衰变箱内	符合 HJ 1188-2021 的暂存条件后，后作为医疗废物委托有资质单位处置
废活性炭			/	/	50kg/a			符合 HJ 1188-2021 的暂存条件后，后作为危险废物委托有资质单位处置
废旧 ^{90}Sr 放射源	固态	^{90}Sr	每 5 年产生 1 枚废 ^{90}Sr 放射源				不暂存	按照废旧放射源返回合同规定，将废旧放射源交回生产单位或者返回原出口方
废旧 ^{68}Ge 放射源	固态	^{68}Ge	每 4 年产生 2 枚废 ^{68}Ge 放射源				不暂存	按照废旧放射源返回合同规定，将废旧放射源交回生产单位或者返回原出口方
活化后的废靶	固态	/	/	/	/	/	不暂存	由设备厂家回收最终送交有资质的单位回收处置

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

法规文件	(1)《中华人民共和国环境保护法》(1989 年 12 月 26 日第七届全国人民代表大会常务委员会第十一次会议通过;2014 年 4 月 24 日第十二届全国人民代表大会常务委员会第八次会议修订),中华人民共和国主席令第九号,2015 年 1 月 1 日施行修订版; (2)《中华人民共和国环境影响评价法》(2002 年 10 月 28 日第九届全国人民代表大会常务委员会第三十次会议通过,自 2003 年 9 月 1 日起施行;2016 年 7 月 2 日第一次修订;2018 年 12 月 29 日第二次修订),中华人民共和国主席令第四十八号,2018 年 12 月 29 日施行修订版; (3)《中华人民共和国放射性污染防治法》(2003 年 6 月 28 日中华人民共和国第十届全国人民代表大会常务委员会第三次会议通过),中华人民共和国主席令第六号,2003 年 10 月 1 日施行; (4)《建设项目环境保护管理条例》(1998 年 11 月 29 日中华人民共和国国务院令 253 号发布施行;2017 年 7 月 16 日中华人民共和国国务院令 682 号令修订),自 2017 年 10 月 1 日起施行修订版; (5)《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》,(2005 年 9 月 14 日经中华人民共和国国务院令 449 号公布,2014 年 7 月 29 日经中华人民共和国国务院令 653 号修订,2019 年 3 月 2 日经中华人民共和国国务院令 709 号修订),自 2019 年 3 月 2 日起施行修订版; (6)《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》(2006 年 1 月 18 日国家环境保护总局令 31 号公布,2008 年 12 月 6 日经环境保护部令 3 号修正,2017 年 12 月 20 日经环境保护部令 47 号修正,2019 年 7 月 11 日经生态环境部令 7 号修改,2020 年 12 月 25 日经生态环境部令 20 号修改),2021 年 1 月 4 日施行修改版; (7)《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》(2011 年 4 月 18 日环境保护部令 18 号),自 2011 年 5 月 1 日起施行; (8)《放射性废物安全管理条例》(2011 年 12 月 20 日中华人民共和国国务院令 612 号公布),自 2012 年 3 月 1 日起施行; (9)《关于发布放射源分类办法的公告》(原国家环保总局公告,公告
------	--

	2005年第62号),自2005年12月23日起施行; (10)《关于发布〈射线装置分类〉的公告》(环境保护部 国家卫生和计划生育委员会 公告2017年第66号),自2017年12月5日起施行; (11)《关于发布<放射性废物分类>的公告》(环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局 公告2017年第65号),自2018年1月1日起施行; (12)《建设项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)》(中华人民共和国生态环境部令第16号),自2021年1月1日起施行; (13)《产业结构调整指导目录(2024年本)》(2023年12月37日中华人民共和国国家发展和改革委员会令第7号公布,自2024年2月1日起施行; (14)《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》(生态环境部公告2019年第57号),自2020年1月1日起施行; (15)《关于进一步优化辐射安全考核的公告》(生态环境部公告2021年第9号),自2021年3月15日起施行; (16)《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),自2016年3月7日起施行; (17)《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》(国环规环评〔2017〕4号),自2017年11月20日起施行; (18)《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),自2006年9月26日起施行。 (19)《医疗废物管理条例》(2003年6月16日中华人民共和国国务院令第380号公布,根据2011年1月8日中华人民共和国国务院令第588号修订),自2011年1月8日实施修订版; (20)《国家危险废物名录(2021年版)》(2020年11月25日生态环境部、国家发展和改革委员会、公安部、交通运输部、国家卫生健康委员会令第15号公布),2021年1月1日起施行; (21)《浙江省建设项目环境保护管理办法》(2011年10月25日浙江省人民政府令第288号公布,2014年3月13日浙江省人民政府令第321号
--	---

	第一次修正，2018 年 1 月 22 日浙江省人民政府令第 364 号公布第二次修正，2021 年 2 月 10 日浙江省人民政府令第 388 号公布第三次修正），自 2021 年 2 月 10 日起施行修正版； （22）《浙江省辐射环境管理办法》（2011 年 12 月 18 日浙江省人民政府令第 289 号公布，2021 年 2 月 10 日浙江省人民政府令第 388 号修正），自 2021 年 2 月 10 日起施行修正版； （23）《关于印发<舟山市生态环境局市本级审批环境影响评价文件的建设项目清单（2023 年本）>的通知》（舟环发〔2023〕17 号），自 2023 年 9 月 9 日起施行。
技术标准	（1）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）； （2）《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）； （3）《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）； （4）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）； （5）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）； （6）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函〔2023〕20 号）； （7）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）； （8）《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）； （9）《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）； （10）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）； （11）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机》（GBZ/T 201.2-2011）； （13）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）； （14）《放射性废物管理规定》（GB 14500-2002）； （15）《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ 1326-2023）； （16）《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）；

	(17)《医院污水处理技术指南》(环发[2003]197); (18)《医疗、工业、农业、研究和教学中产生的放射性废物管理》(HAD 401/16-2023)。
其他	(1)《辐射防护手册》(第一分册),李德平、潘自强主编; (2)《辐射防护手册》(第三分册),李德平、潘自强主编; (3)《简明放射性同位素应用手册》,卢玉楷主编; (4)《放射防护实用手册》,赵兰才、张丹枫; (5)医院提供的其它与本项目有关的技术资料; (6)环评委托书。

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

根据本项目的实际情况，结合《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）的相关规定，本项目辐射环境影响评价范围取核技术利用工作场所实体屏蔽物边界外 50m 的区域（不同场所区域重合时取最大范围），具体评价范围示意图见附图 2、3。

7.2 保护目标

根据现场踏勘情况，本项目评价范围内主要为医院内部建筑物、院内道路和绿地以及舟山市中心血站，无居民区、自然保护区、文物保护单位、风景名胜区、水源保护区等环境敏感点。

本项目环境保护目标为从事本项目辐射工作的职业人员及评价范围内活动的其他公众。本项目环境保护目标一览见表 7.2-1。

表 7.2-1 环境保护目标一览

环境保护目标		方位	距离本项目实体边界最近距离（m）	规模	人员类别
核医学核素诊断场所	核医学核素诊断场所内辐射工作人员	内部	/	24 人	职业人员
	楼梯间	东侧	紧邻	流动人员	公众
	前室		紧邻	流动人员	公众
	档案室		紧邻	一般无人员居留	公众
	走廊	南侧	紧邻	流动人员	公众
	导诊大厅	西侧	紧邻	10 人	公众
	核医学核素治疗场所	北侧	紧邻	5 人	职业人员
	日间化疗用房	上方	紧邻	15 人	公众
	地下停车场	下方	紧邻	流动人员	公众
	污物暂存间		紧邻	一般无人员居留	公众
	机房		紧邻	一般无人员居留	公众
	设备用房		紧邻	一般无人员居留	公众
	教学楼	东侧	27	80 人	公众
	行政楼		27	100 人	公众

	住院楼	南侧	46	150 人	公众
	高压氧仓	北侧	37	20 人	公众
	宿舍楼		40	200 人	公众
核医学核素治疗场所	核医学核素治疗场所内辐射工作人员	内部	/	5 人	职业人员
	新风机房	东侧	2	一般无人员居留	公众
	院内道路和绿地		紧邻	流动人员	公众
	核医学核素诊断场所	南侧	紧邻	24 人	职业人员
	导诊大厅	西侧	8	10 人	公众
	过道	北侧	紧邻	流动人员	公众
	日间化疗用房	上方	紧邻	15 人	公众
	地下停车场	下方	紧邻	流动人员	公众
	检查室		紧邻	2 人	公众
	医生办公室		紧邻	4 人	公众
	示教室		紧邻	2 人	公众
	卫生间		紧邻	流动人员	公众
	机房		紧邻	一般无人员居留	公众
	教学楼	东侧	27	80 人	公众
	行政楼		27	100 人	公众
	住院楼	南侧	46	150 人	公众
	高压氧仓	北侧	37	20 人	公众
	宿舍楼		40	200 人	公众
衰变池	高压氧仓	东侧	3	20 人	公众
	宿舍楼		36	200 人	公众
	肿瘤治疗综合中心	南侧	23	150 人	公众
	舟山市中心血站	北侧	31	80 人	公众
	院内绿地	上方	紧邻	流动人员	公众
放疗科直线加速器机房	热水机房	东侧	紧邻	一般无人员居留	职业人员
	准备大厅	南侧	紧邻	流动人员	公众
	控制室		紧邻	4 人	公众
	质控室		紧邻	2 人	公众
	更衣间		紧邻	流动人员	公众
	体膜放置间		紧邻	流动人员	公众

	设备用房	西侧	紧邻	一般无人员居留	公众
	排烟机房		紧邻	一般无人员居留	公众
	补风机房		紧邻	一般无人员居留	公众
	更衣间		紧邻	流动人员	公众
	走廊		紧邻	流动人员	公众
	水冷机房	北侧	紧邻	一般无人员居留	公众
	电梯厅	上方	紧邻	流动人员	公众
	柴发室		紧邻	一般无人员居留	公众
	卫生间		紧邻	流动人员	公众
	院内道路和绿地		紧邻	流动人员	公众
	教学楼	东侧	44	80 人	公众
	宿舍楼		35	200 人	公众
	高压氧仓	北侧	12	20 人	公众
放疗科模拟定位 CT 机房	控制室	东侧	紧邻	2 人	职业人员
	走廊	南侧	紧邻	流动人员	公众
	走廊	西侧	紧邻	流动人员	公众
	走廊	北侧	紧邻	流动人员	公众
	读片室	上方	紧邻	3 人	公众
	库房		紧邻	一般无人员居留	公众
	走廊		紧邻	流动人员	公众
	变配电间		紧邻	一般无人员居留	公众
	感染病楼	西侧	41	200 人	公众

注：本项目放疗科直线加速器机房和模拟定位 CT 机房位于地下一层，对于外部建筑物“距离本项目实体边界最近距离”的选取均按照水平投影距离保守考虑。

7.3 评价标准

7.3.1 剂量限值

剂量限值执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）规定，工作人员的职业照射和公众照射的剂量限值如下：

（1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

1) 审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv；

2) 任何一年中的有效剂量，50mSv；

(2) 公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

1) 年有效剂量，1mSv；

2) 特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv；

7.3.2 剂量约束值

同时参考《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中相关要求，本次评价采用的年剂量约束值如下：

对于职业人员，取不超过 5mSv 作为年剂量约束值；对于公众，取不超过 0.1mSv 作为年剂量约束值。

7.3.3 核医学工作场所评价标准

(1) 非密封放射性物质工作场所的分级

根据《电离辐射防护与辐射源基本安全标准》（GB 18871-2002）附录 C 中的相关规定，非密封放射性物质工作场所的分级见表 7.3.3-1。

表 7.3.3-1 非密封放射性物质工作场所的分级

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

(2) 辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函〔2023〕20 号）中相关规定，本项目核医学科辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平见表 7.3.3-2。

表 7.3.3-2 核医学科辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

场所	位置	剂量率控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
核医学科	控制区外人员可到达处, 距屏蔽体外 30cm 处	2.5
	控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处	2.5 (人员居留因子 $\geq 1/2$)
		10 (人员居留因子 $< 1/2$)
	放射性药物分装的箱体、通风柜、注射窗等设备外表面 30cm 处人员操作位	2.5
	放射性药物分装的箱体非正对人员操作位表面	25
	固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道外表面 30cm 处	2.5

(3) 表面污染控制水平

根据《电离辐射防护与辐射源基本安全标准》(GB 18871-2002)和《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020)相关规定,核医学科的放射性表面污染控制水平详见表 7.3.3-3。

表 7.3.3-3 核医学科放射性表面污染控制水平

表面类型		α 放射性物质 (Bq/cm^2)		β 放射性物质 (Bq/cm^2)
		极毒性	其他	
工作台、设备、墙壁、地面	控制区 ¹⁾	4	4×10	4×10
	监督区	4×10^{-1}	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4×10^{-1}	4×10^{-1}	4
	监督区			
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-2}	4×10^{-2}	4×10^{-1}

1) 该区内的高污染子区除外

(4) 放射性废液排放

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021)及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》(辐射函〔2023〕20号)中相关规定,结合本项目核素使用情况、衰变池设计情况,放射性废液排放满足以下要求:

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

b) 所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期(含碘-131 核素的暂存超过 180 天),监测结果经审管部门认可后,按照 GB 18871

中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10Bq/L。

含碘-131 放射性废水可按照下列任意一种方式进行排放：

(一) 根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》第 8.6.2 条规定，经监管部门确认单次排入普通下水道的废水中碘-131 活度不超过 $1\text{ALI}_{\min}$ (9E+5 贝可)，每月排放的废水中碘-131 总活度不超过 $10\text{ALI}_{\min}$ (9E+6 贝可)。

(二) 暂存 180 天后，衰变池废水可以直接排放。

(三) 暂存不满 180 天但监测结果表明碘-131 活度浓度已降至不高于 10 贝可/升水平，也可直接排放。

医院应做好相关排放记录。

(5) 放射性固废处理

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 中相关规定，固体放射性废物暂存和处理应满足以下要求：

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

a) 所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；

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

c) 含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天。

(6) 核医学工作场所通风要求

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 中相关规定，核医学工作场所通风要求如下：

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

6.3.3 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。

6.3.4 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风

橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。

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

（7）敷贴治疗辐射防护要求

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中相关规定，敷贴治疗场所安全措施要求如下：

6.2.7 敷贴器治疗场所应设置专门的治疗室，治疗时严禁将敷贴源带出治疗室外。敷贴治疗中，医务人员应采取有效的个人防护措施，对病人的正常组织应采用合适的屏蔽措施。敷贴器使用中应避免锐器损坏源窗面，不得将敷贴器浸入水、酒精等溶剂中，使用后应存放于干燥的贮源箱内。

7.3.4 放射治疗工作场所评价标准

（1）工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

本项目放射治疗工作场所为 1 台医用电子直线加速器机房，根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）相关规定，本项目放射治疗工作场所屏蔽体外剂量率控制水平要求如下。

6.1.4 剂量控制应符合以下要求：

a) 治疗室墙和入口门外表面 30cm 处、邻近治疗室的关注点、治疗室房顶外的地面附近和楼层及在治疗室上方已建、拟建二层建筑物或治疗室旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点治疗室房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗室顶外表面 30cm 处和在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处的周围剂量当量率应同时满足下列 1) 和 2) 所确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ ：

1) 使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子（可依照附录 A 选取），由以下周剂量参考控制水平（ $\dot{H}_c$ ）求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$ （ $\mu\text{Sv/h}$ ）

机房外辐射工作人员： $\dot{H}_c \leq 100 \mu\text{Sv/周}$ ；

机房外非辐射工作人员： $\dot{H}_c \leq 5 \mu\text{Sv/周}$ 。

2) 按照关注点人员居留因子的不同, 分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,max}$ ($\mu\text{Sv/h}$):

人员居留因子 $T>1/2$ 的场所: $\dot{H}_{c,max}\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$;

人员居留因子 $T\leq 1/2$ 的场所: $\dot{H}_{c,max}\leq 10\mu\text{Sv/h}$ 。

b) 穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射, 以年剂量 $250\mu\text{Sv}$ 加以控制。

c) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶, 机房顶外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 $100\mu\text{Sv/h}$ 加以控制可在相应位置处设置辐射告示牌)。

(2) 通风要求

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021), 本项目直线加速器气态废物管理要求如下:

8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统, 采取全排全送的通风方式, 换气次数不少于 4次/h , 排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。

(3) 放射性固体废物管理要求

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021), 本项目直线加速器放射性固体废物管理要求如下:

8.2.2.1 质子/重离子直线加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中, 如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件, 在更换或退役时, 应作为放射性固体废物处理, 拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存, 最终送交有资质的单位收贮。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理和场所位置

舟山医院位于舟山市定海区定沈路 739 号，项目地理位置见附图 1。本项目核医学科位于肿瘤综合治疗中心一层，放疗科位于肿瘤综合治疗中心地下一层。各辐射工作场所位置详见附图 3。

8.2 环境电离辐射水平现状

根据《浙江省生态环境状况公报（2023 年）》，全省环境电离辐射水平处于本底涨落范围内。环境 γ 辐射剂量率处于当地天然本底涨落范围内。空气中天然放射性核素活度浓度处于本底水平，人工放射性核素活度浓度未见异常。钱塘江、曹娥江、甬江、椒江、瓯江、飞云江、鳌江、苕溪八大水系以及京杭运河、西湖和新安江水库中天然放射性核素活度浓度处于本底水平，人工放射性核素活度浓度未见异常。地下水中总 α 、总 β 活度浓度符合《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）的 I 类标准。城市集中式饮用水水源地水中总 α 、总 β 活度浓度符合《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）。近岸海域海水、海底沉积物和海洋生物中人工放射性核素活度浓度未见异常，其中海水中锶-90 和铯-137 等相关人工放射性核素活度浓度远低于《海水水质标准》（GB 3097-1997）海洋生物中锶-90 和铯-137 等相关人工放射性核素活度浓度远低于《食品中放射性物质限制浓度标准》（GB 14882-94）。土壤中天然放射性核素活度浓度处于本底水平，人工放射性核素活度浓度未见异常。

8.3 环境现状评价的对象、监测因子和监测点位

8.3.1 环境现状评价的对象

拟建辐射项目区域及周边环境

8.3.2 监测因子

γ 辐射剂量率、 α 、 β 放射性表面污染、中子剂量当量率

8.3.3 监测点位

由于本项目拟建的所有辐射工作场所尚未开始建设，环境状况较为单一。考虑兼顾点位现状可到达性的条件下，在项目拟建区域内均匀布设监测点，并在区域边界、周围环境状况不一致及评价范围内关注的区域布设监测点。

具体监测点位示意图 8.3.3-1。

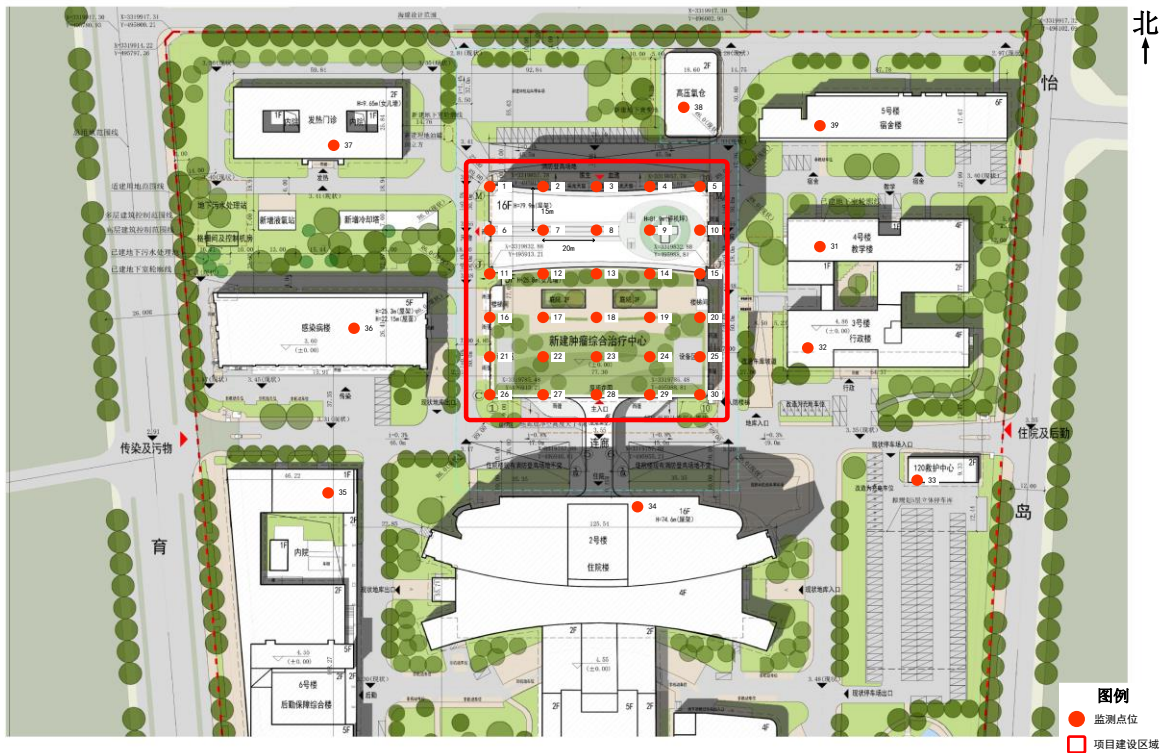


图 8.3.3-1 监测点位示意图

8.4 监测方案、质量保证措施和监测结果

8.4.1 监测方案

(1) 监测单位：浙江建安检测研究院有限公司

(2) 监测日期：2024 年 5 月 21 日

(3) 监测条件：温度 25℃，相对湿度 56%，晴

(4) 监测依据：

《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)

《表面污染测定 第 1 部分： β 发射体 ($E_{\beta\max} > 0.15\text{MeV}$) 和 α 发射体》(GB/T 14056.1-2008)

(5) 监测频次：依据相关标准予以确定

(6) 监测仪器：见下表

表 8.4.1-1 便携式 X、 γ 辐射周围剂量当量率仪相关参数

仪器型号	FH40G-L10+FHZ672E-10
仪器名称	便携式 X、 γ 辐射周围剂量当量率仪

生产厂家	Thermo SCIENTIFIC
仪器编号	05035404
能量范围	40KeV~4.4MeV
测量范围	主机：10nSv/h~100mSv/h；探头：1nSv/h~100μSv/h
检定单位	上海市计量测试技术研究院 华东国家计量测试中心
检定证书	2023H21-10- 5119258001
校准有效期	2024 年 3 月 5 日~2025 年 3 月 4 日

表 8.4.1-2 α、β 表面污染仪相关参数

仪器型号	CoMo 170
仪器名称	α、β 表面污染仪
生产厂家	S.E.A
仪器编号	05034889
探测器灵敏窗面积	170cm ²
探测器本底	a: 0.1CPS；β: 15~25CPS
检定单位	上海市计量测试技术研究院 华东国家计量测试中心
检定证书	2023H21-20-5074969001
检定有效期	2024 年 1 月 30 日~2025 年 1 月 29 日

表 8.4.1-3 中子剂量当量仪相关参数

仪器型号	LB 134
仪器名称	中子周围剂量当量仪
生产厂家	BERTHOLD
仪器编号	05038076
能量范围	热中子~20MeV
量 程	30nSv/h~100mSv/h
检定单位	中国计量科学研究院
检定证书	DLjs2023-02607
检定有效期	2023 年 09 月 13 日~2024 年 09 月 12 日

8.4.2 质量保证措施

(1) 本项目辐射环境监测单位为浙江建安检测研究院有限公司，具有浙江省市场监督管理局颁发的资质认定证书，并在允许范围内开展工作和出具有效的监测报告，保证了监测工作的合法性和有效性。

(2) 采用国家有关部门颁布的监测标准方法，每次测量前、后均检查仪器的工

作状态是否正常。

(3) 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用。

(4) 监测实行全过程的质量控制，严格按照浙江建安检测研究院有限公司《质量手册》、《程序文件》及仪器作业指导书的有关规定执行，监测人员经培训、考核合格后上岗。

(5) 报告严格实行三级审核制度，经校核、审核，最后由授权签字人审定。

8.4.3 监测结果

本项目辐射环境现状各监测点位的监测结果见表 8.4.3-4~表 8.4.3-7。

表 8.4.3-4 本项目 γ 辐射剂量率现状监测结果

监测点编号	监测点位置	监测结果 (nGy/h)	备注
1#	项目所在区域点位 1	109 $\pm$ 2	室外
2#	项目所在区域点位 2	110 $\pm$ 3	室外
3#	项目所在区域点位 3	104 $\pm$ 2	室外
4#	项目所在区域点位 4	103 $\pm$ 2	室外
5#	项目所在区域点位 5	108 $\pm$ 3	室外
6#	项目所在区域点位 6	118 $\pm$ 3	室外
7#	项目所在区域点位 7	124 $\pm$ 3	室外
8#	项目所在区域点位 8	110 $\pm$ 2	室外
9#	项目所在区域点位 9	110 $\pm$ 2	室外
10#	项目所在区域点位 10	108 $\pm$ 2	室外
11#	项目所在区域点位 11	117 $\pm$ 1	室外
12#	项目所在区域点位 12	116 $\pm$ 3	室外
13#	项目所在区域点位 13	117 $\pm$ 2	室外
14#	项目所在区域点位 14	112 $\pm$ 1	室外
15#	项目所在区域点位 15	115 $\pm$ 2	室外
16#	项目所在区域点位 16	111 $\pm$ 2	室外
17#	项目所在区域点位 17	116 $\pm$ 2	室外
18#	项目所在区域点位 18	121 $\pm$ 2	室外
19#	项目所在区域点位 19	109 $\pm$ 1	室外
20#	项目所在区域点位 20	110 $\pm$ 3	室外
21#	项目所在区域点位 21	116 $\pm$ 2	室外
22#	项目所在区域点位 22	112 $\pm$ 1	室外

23#	项目所在区域点位 23	113±3	室外
24#	项目所在区域点位 24	120±2	室外
25#	项目所在区域点位 25	121±3	室外
26#	项目所在区域点位 26	112±2	室外
27#	项目所在区域点位 27	115±2	室外
28#	项目所在区域点位 28	117±1	室外
29#	项目所在区域点位 29	115±2	室外
30#	项目所在区域点位 30	111±2	室外
31#	教学楼	139±3	室内
32#	行政楼	130±2	室内
33#	120 救护中心	149±2	室内
34#	住院楼	122±2	室内
35#	后勤保障综合楼	137±2	室内
36#	感染病楼	134±3	室内
37#	发热门诊	139±3	室内
38#	高压氧仓	131±2	室内
39#	宿舍楼	133±2	室内
注：1、测量时探头距离地面约 1m； 2、每个监测点测量 10 个数据取平均值，以上监测结果均已扣除仪器对宇宙射线的响应值； 3、环境 γ 辐射空气吸收剂量率=读数平均值×校准因子 k_1 ×仪器检验源效率因子 k_2 ÷空气比释动能和周围剂量当量的换算系数-屏蔽修正因子 k_3 ×测量点宇宙射线响应值 D_c ，校准因子 k_1 为 1.23，仪器使用 ^{137}Cs 进行校准，效率因子 k_2 取 1，换算系数为 1.20Sv/Gy， k_3 楼房取 0.8、平房取 0.9、原野和道路取 1，仪器对宇宙射线的响应值为 10nGy/h。			

表 8.4.3-5 本项目 β 表面污染现状监测结果

监测点编号	监测点位置	监测结果 (Bq/cm ²)	备注
1#	项目所在区域点位 1	<0.08	室外
2#	项目所在区域点位 2	<0.08	室外
3#	项目所在区域点位 3	<0.08	室外
4#	项目所在区域点位 4	<0.08	室外
5#	项目所在区域点位 5	<0.08	室外
6#	项目所在区域点位 6	<0.08	室外
7#	项目所在区域点位 7	<0.08	室外
8#	项目所在区域点位 8	<0.08	室外
9#	项目所在区域点位 9	<0.08	室外
10#	项目所在区域点位 10	<0.08	室外

11#	项目所在区域点位 11	<0.08	室外
12#	项目所在区域点位 12	<0.08	室外
13#	项目所在区域点位 13	<0.08	室外
14#	项目所在区域点位 14	<0.08	室外
15#	项目所在区域点位 15	<0.08	室外
16#	项目所在区域点位 16	<0.08	室外
17#	项目所在区域点位 17	<0.08	室外
18#	项目所在区域点位 18	<0.08	室外
19#	项目所在区域点位 19	<0.08	室外
20#	项目所在区域点位 20	<0.08	室外
21#	项目所在区域点位 21	<0.08	室外
22#	项目所在区域点位 22	<0.08	室外
23#	项目所在区域点位 23	<0.08	室外
24#	项目所在区域点位 24	<0.08	室外
25#	项目所在区域点位 25	<0.08	室外
26#	项目所在区域点位 26	<0.08	室外
27#	项目所在区域点位 27	<0.08	室外
28#	项目所在区域点位 28	<0.08	室外
29#	项目所在区域点位 29	<0.08	室外
30#	项目所在区域点位 30	<0.08	室外
31#	教学楼	<0.08	室内
32#	行政楼	<0.08	室内
33#	120 救护中心	<0.08	室内
34#	住院楼	<0.08	室内
35#	后勤保障综合楼	<0.08	室内
36#	感染病楼	<0.08	室内
37#	发热门诊	<0.08	室内
38#	高压氧仓	<0.08	室内
39#	宿舍楼	<0.08	室内
注：0.08Bq/cm ² 为 CoMo 170α、β 表面污染仪/05034889 探测下限。			
表 8.4.3-6 本项目 α 表面污染现状监测结果			
监测点编号	监测点位置	监测结果 (Bq/cm ²)	备注
1#	项目所在区域点位 1	<0.01	室外

2#	项目所在区域点位 2	<0.01	室外
3#	项目所在区域点位 3	<0.01	室外
4#	项目所在区域点位 4	<0.01	室外
5#	项目所在区域点位 5	<0.01	室外
6#	项目所在区域点位 6	<0.01	室外
7#	项目所在区域点位 7	<0.01	室外
8#	项目所在区域点位 8	<0.01	室外
9#	项目所在区域点位 9	<0.01	室外
10#	项目所在区域点位 10	<0.01	室外
11#	项目所在区域点位 11	<0.01	室外
12#	项目所在区域点位 12	<0.01	室外
13#	项目所在区域点位 13	<0.01	室外
14#	项目所在区域点位 14	<0.01	室外
15#	项目所在区域点位 15	<0.01	室外
16#	项目所在区域点位 16	<0.01	室外
17#	项目所在区域点位 17	<0.01	室外
18#	项目所在区域点位 18	<0.01	室外
19#	项目所在区域点位 19	<0.01	室外
20#	项目所在区域点位 20	<0.01	室外
21#	项目所在区域点位 21	<0.01	室外
22#	项目所在区域点位 22	<0.01	室外
23#	项目所在区域点位 23	<0.01	室外
24#	项目所在区域点位 24	<0.01	室外
25#	项目所在区域点位 25	<0.01	室外
26#	项目所在区域点位 26	<0.01	室外
27#	项目所在区域点位 27	<0.01	室外
28#	项目所在区域点位 28	<0.01	室外
29#	项目所在区域点位 29	<0.01	室外
30#	项目所在区域点位 30	<0.01	室外
31#	教学楼	<0.01	室内
32#	行政楼	<0.01	室内
33#	120 救护中心	<0.01	室内
34#	住院楼	<0.01	室内

35#	后勤保障综合楼	<0.01	室内
36#	感染病楼	<0.01	室内
37#	发热门诊	<0.01	室内
38#	高压氧仓	<0.01	室内
39#	宿舍楼	<0.01	室内
注：0.01Bq/cm ² 为 CoMo 170α、β 表面污染仪/05034889 探测下限。			

表 8.4.3-7 本项目中子剂量当量率现状监测结果

监测点编号	监测点位置	监测结果 (μSv/h)	备注
1#	项目所在区域点位 1	<0.06	室外
2#	项目所在区域点位 2	<0.06	室外
3#	项目所在区域点位 3	<0.06	室外
4#	项目所在区域点位 4	<0.06	室外
5#	项目所在区域点位 5	<0.06	室外
6#	项目所在区域点位 6	<0.06	室外
7#	项目所在区域点位 7	<0.06	室外
8#	项目所在区域点位 8	<0.06	室外
9#	项目所在区域点位 9	<0.06	室外
10#	项目所在区域点位 10	<0.06	室外
11#	项目所在区域点位 11	<0.06	室外
12#	项目所在区域点位 12	<0.06	室外
13#	项目所在区域点位 13	<0.06	室外
14#	项目所在区域点位 14	<0.06	室外
15#	项目所在区域点位 15	<0.06	室外
16#	项目所在区域点位 16	<0.06	室外
17#	项目所在区域点位 17	<0.06	室外
18#	项目所在区域点位 18	<0.06	室外
19#	项目所在区域点位 19	<0.06	室外
20#	项目所在区域点位 20	<0.06	室外
21#	项目所在区域点位 21	<0.06	室外
22#	项目所在区域点位 22	<0.06	室外
23#	项目所在区域点位 23	<0.06	室外
24#	项目所在区域点位 24	<0.06	室外
25#	项目所在区域点位 25	<0.06	室外

26#	项目所在区域点位 26	<0.06	室外
27#	项目所在区域点位 27	<0.06	室外
28#	项目所在区域点位 28	<0.06	室外
29#	项目所在区域点位 29	<0.06	室外
30#	项目所在区域点位 30	<0.06	室外
31#	教学楼	<0.06	室内
32#	行政楼	<0.06	室内
33#	120 救护中心	<0.06	室内
34#	住院楼	<0.06	室内
35#	后勤保障综合楼	<0.06	室内
36#	感染病楼	<0.06	室内
37#	发热门诊	<0.06	室内
38#	高压氧仓	<0.06	室内
39#	宿舍楼	<0.06	室内

注：0.06Bq/cm² 为 LB134 中子剂量当量仪/05038076 探测下限。

8.5 对环境现状调查结果的评价

根据表 8.4-4 可知，本项目室内 γ 辐射剂量率在 122nGy/h~149nGy/h 之间，即 12.2×10^{-8} Gy/h~ 14.9×10^{-8} Gy/h 之间；室外 γ 辐射剂量率在 103nGy/h~124nGy/h 之间，即 10.3×10^{-8} Gy/h~ 12.4×10^{-8} Gy/h 之间。根据《浙江环境天然贯穿辐射水平调查研究》可知，舟山地区室内 γ 辐射剂量率在 8.0×10^{-8} Gy/h~ 20.3×10^{-8} Gy/h 之间，室外道路 γ 辐射剂量率在 6.4×10^{-8} Gy/h~ 11.6×10^{-8} Gy/h 之间；另外，根据医院委托浙江建安检测研究院有限公司于 2023 年 12 月进行监测的《舟山医院核医学科核技术利用建设项目辐射辐射环境质量现状监测》（GABG-HJ23390043）监测结果，医院急诊综合大楼负一层及周围环境的室内 γ 辐射剂量率在 11.0×10^{-8} Gy/h~ 16.3×10^{-8} Gy/h 之间，室外 γ 辐射剂量率在 9.7×10^{-8} Gy/h~ 10.2×10^{-8} Gy/h 之间。

综上所述，本项目拟建辐射工作场所及周围 X- γ 辐射剂量率基本处于当地本底水平涨落范围。

根据表 8.4-5 和表 8.4-6 可知，本项目拟建场址及周围各监测点位的 α 、 β 放射性表面污染监测值均小于仪器的探测下限，未见异常。

根据表 8.4-7 可知，本项目拟建场址及周围各监测点的中子周围剂量当量率监测值均小于仪器的探测下限，未见异常。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 工程设备和工艺分析 9.1.1 核医学核素诊断场所 (1) PET 显像诊断项目 ①设备组成与工作原理 PET 正电子发射断层扫描（Positron Emission Tomography，PET）的工作原理是通过正电子核素或其标记的示踪剂，示踪人体内特定生物物质的生物活动，采用多层、环形排列于发射体周围的探头，由体外探测正电子示踪剂湮灭辐射所产生的光子，然后将获得的信息，通过计算机处理，以解剖影像的形式及其相应的生理参数，显示靶器官或病变组织的状况，藉此诊断疾病，又称为生化显像或功能因子显像，是目前唯一可以在活体分子水平完成生物学显示的影像技术。PET 的主要部件包括机架、环形探测器、符合电路、检查床及工作站等。探测系统是整个正电子发射显像系统中的主要部分，它采用的块状探测结构有利于消除散射、提高计数率。许多块结构组成一个环，再由数十个环构成整个探测器。 PET/CT 是将 PET 和 X 线计算机断层扫描（Computer Tomography，CT）组合而成的多模式成像系统，是目前全球最高端的医学影像设备，同时也是一种可以在分子水平成像的影像技术。PET/CT 将 PET 与 CT 融为一体，使两种成像技术优势互补，PET 图像提供功能和代谢等分子信息，CT 提供精细的解剖和病理信息，通过融合技术，一次诊断即可获得疾病的病理生理变化和形态学改变。CT 主要由扫描部分、计算机系统、图像显示和存储系统组成，其中扫描部分由 X 线管、探测器和扫描架组成。 PET/MR 是将 PET 与 MR 联合在一起组成的大型功能代谢与分子影像诊断设备，扫描过程中 PET 对进入体内的正电子核素进行扫描并显像，可获得代谢显像，而 MR 可对 PET 图像做放射性的衰减校正，提供解剖学和组织学特征，两者结合可以看到组织功能和新陈代谢，提供比传统成像方式更优质的影像结果。系统还可以分别收集 PET 和 MR 影像。MR 主要由磁体系统、线圈接收、控制柜、操作台部分组成。 ②诊疗计划 PET 显像诊断项目正式开展后，使用 1 台 PET/CT 和 1 台 PET/MR 开展工作，
--

每年工作 250 天，每周工作 5 天，每天工作 8h，共规划使用 2 种放射性核素 ^{18}F 、 ^{68}Ga 进行显像诊断。 ^{18}F 显像诊断每日最多 30 人， ^{68}Ga 显像诊断每日最多 10 人。PET/CT 每日最多扫描 30 人，PET/MR 每日最多扫描 10 人。

表 9.1.1-1 PET 诊断项目诊疗规划

诊疗项目	诊断核素	患者数量	核素用量	给药放射	来源
PET 显像诊断	^{18}F	30 人/天	$3.7 \times 10^8 \text{Bq/人}$	静脉注射	外购药物
	^{68}Ga	10 人/天	$3.7 \times 10^8 \text{Bq/人}$	静脉注射	

③工艺流程与产污环节

PET 显像诊断用的正电子放射性核素均为外购成品药物。工作人员根据临床诊断所需药物的使用量、预约检查的人数，提前一天向供药单位订购放射性药物，供药单位在约定的时间，将预约用量的药物送至核医学核素诊断场所，核医学科安排专人接收放射性核素，经确认无误完成相关交接手续后暂存在储源室。所使用的核素根据病人的需要进行分装，分装后放入带防护套的注射器内。由医务人员在分装注射间的 PET 铅屏蔽注射窗的屏蔽下为病人静脉注射。

病人注射后在 PET 候检室内候检，待药物充分代谢后，通过语音呼叫，进入 PET 机房。工作人员在控制廊内进行语音提示摆位，必要时进入机房指导，摆位完成后离开机房返回控制廊。工作人员隔室操作对患者进行 PET 扫描诊断，每次扫描 15min 或 30min（PET/CT 为 15min，PET/MR 为 30min）。扫描完成后，进入留观室内短暂留观，留观结束后患者将从核医学东侧的患者出口离开核医学核素诊断场所。

PET 显像诊断项目工艺流程与产物环节见图 9.1.1-1。

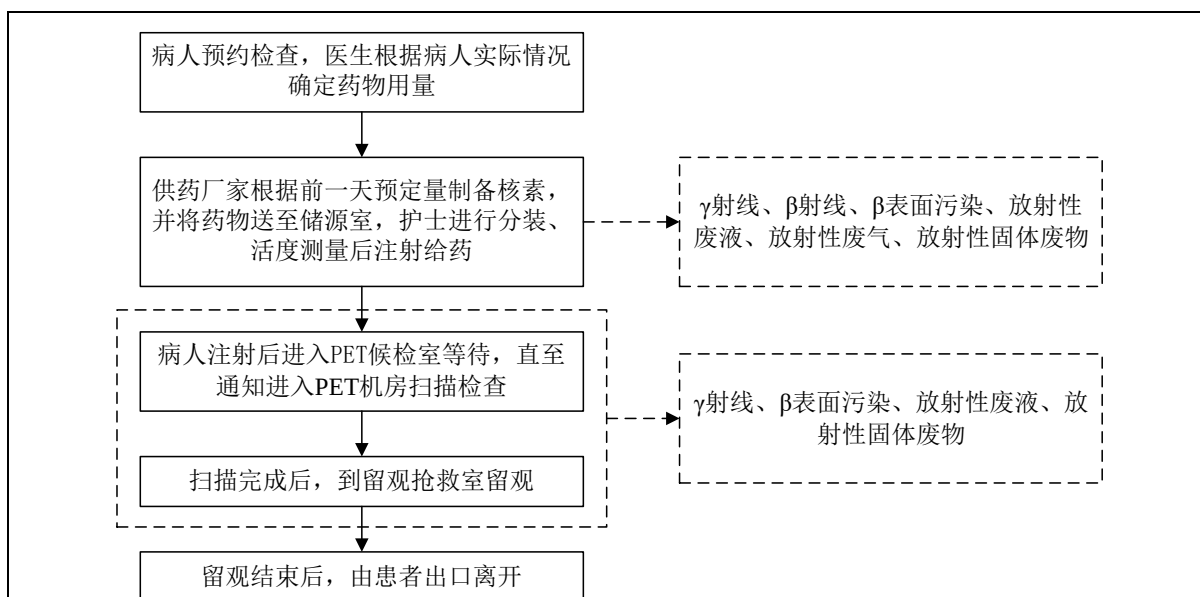


图 9.1.1-1 PET 显像诊断项目工艺流程与产污环节图

因此，PET 显像诊断项目的污染因子为 γ 射线、 β 射线、 β 表面污染、放射性废液、放射性废气和放射性固体废物。

④PET 配套校准源

本项目 PET/CT 和 PET/MR 拟配置校准源，共配备 2 枚 ^{68}Ge 校准源，1 枚活度为 $1.11 \times 10^8 \text{Bq}$ ，1 枚活度为 $5.5 \times 10^7 \text{Bq}$ ，均为 V 类放射源。 ^{68}Ge 半衰期为 288d，衰变模式为电子俘获（EC），产生 β 射线。

1) 校准源操作流程

将 ^{68}Ge 校准源放置在病床上；做放射源透射的质量控制；进行病人检查，采集病人体内核素发射的射线，然后再采集校准源的透射线；将源卸下，置于专用铅盒中放入储源室保险柜保存。

2) 污染因子

^{68}Ge 校准源衰变放出 β 射线和 γ 射线，同时 ^{68}Ge 校准源报废时产生废旧放射源。

(2) SPECT 显像诊断项目

①设备组成和工作原理

SPECT（Single Photon Emission Computed Tomography，单光子发射型计算机断层显像），是一种利用放射性核素的检查方法。SPECT/CT 主要由三部分组成，即探头、旋转运动机架、计算机及其辅助设备。探头部分主要由准直器、晶体、光导、光电倍增管、模拟定位计算电路组成。SPECT/CT 自身带有一个 CT 球管，在

SPECT 核素扫描的基础上，可以同时获得 CT 解剖图像，从而更有利于对疾病做出全面、准确的判断。

SPECT 其使用放射性核素进行诊断的基本原理是：受检者注射含放射性核素的药物，放射性核素在特定的器官或组织发射出 γ 射线，穿过组织器官后到达 SPECT 探测器。SPECT 使用低能准直器对 γ 射线进行准直，通过闪烁体将 γ 射线能力转换为光信号，再通过光电倍增管将光信号转化为电信号并进行放大，得到的测量值代表在该投影线上的放射性大小，再利用计算机从投影求解断层图形。其主要的功能特点是：除了显示脏器形态结构外，更重要的是可观察到脏器血流灌注、功能和代谢的变化。临床主要应用于骨骼显像、心脏灌注断层显像、甲状腺显像、肺显像、肾动态显像等。

②诊疗计划

SPECT 显像诊断项目正式开展后，使用 1 台 SPECT/CT 开展工作，每年工作 250 天，每周工作 5 天，每天工作 8h。共规划使用 3 种核素 ^{99m}Tc 、 ^{67}Ga 、 ^{201}Tl 进行显像诊断。SPECT/CT 开展 ^{99m}Tc 核素显像诊断每日最多 30 人， ^{201}Tl 显像诊断每日最多 5 人， ^{67}Ga 核素显像诊断每日最多 5 人。

表 9.1.1-2 SPECT 显像诊断项目诊疗规划

诊疗项目	诊断核素	患者数量	核素用量	给药放射	来源
SPECT 显像诊断	^{99m}Tc	30 人/天	$9.25 \times 10^8 \text{Bq/人}$	静脉注射	外购成品单支药物
	^{201}Tl	5 人/天	$1.85 \times 10^8 \text{Bq/人}$	静脉注射	
	^{67}Ga	5 人/天	$3.7 \times 10^8 \text{Bq/人}$	静脉注射	

③工艺流程与产污环节

工作人员在 SPECT 手套箱内测量活度后直接在分装注射间的 SPECT 铅屏蔽注射窗的屏蔽下为病人注射。病人注射后在 SPECT 候检室内候检，待药物充分代谢后，通过语音呼叫，进入 SPECT/CT 机房。SPECT/CT 机房工作人员在控制廊内进行语音提示摆位，必要时进入机房指导，摆位完成后离开机房返回控制廊。工作人员隔室操作对患者进行扫描诊断，每次扫描 10min。扫描结束后，如有需要进入留观室内短暂留观，留观结束后患者将从核医学科东侧患者出口离开核医学核素诊断场所。

SPECT 显像诊断工作流程与产物环节见图 9.1.1-2。

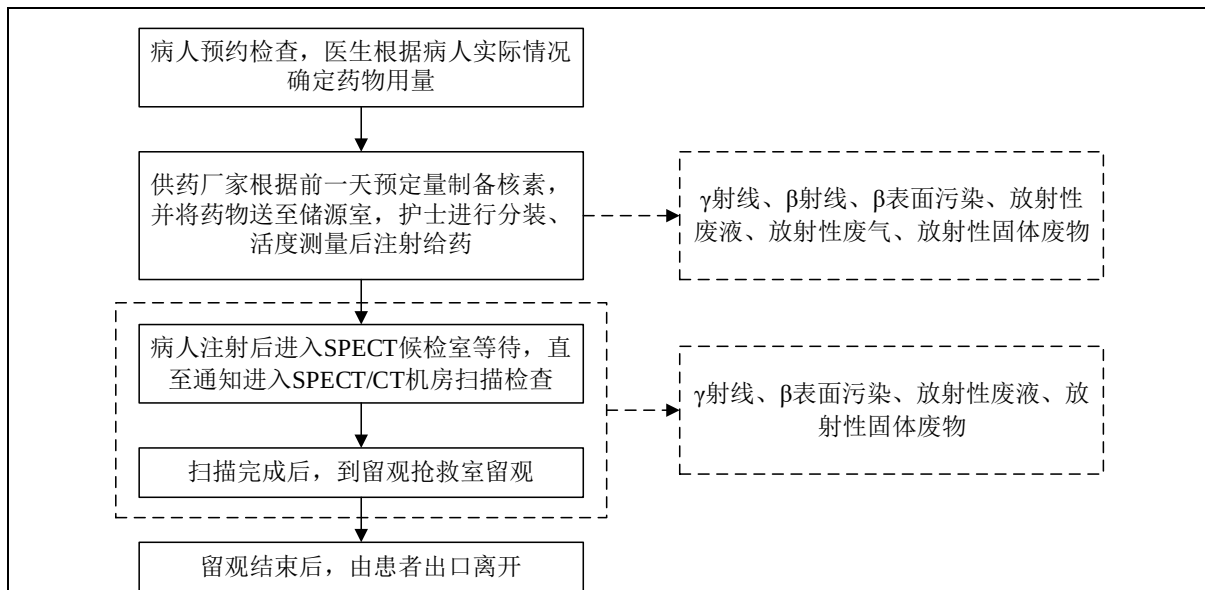


图 9.1.1-2 SPECT/CT 显像诊断工作流程与产污环节图

因此，SPECT 显像诊断项目的污染因子为 γ 射线、 β 表面污染、放射性废液、放射性废气和放射性固体废物。

(3) SPECT/CT 和 PET/CT 配套用 CT

由 X 射线装置的工作原理可知，X 射线是随机器的开、关而产生和消失。因此，CT 装置在非诊断状态下不产生射线，只有在开机时才会发出 X 射线。因此，在开机期间，X 射线成为污染环境的主要因子。

另外，X 射线会与空气发生电离作用，会产生少量臭氧和氮氧化物。因此，在开机期间，污染因子主要为 X 射线、臭氧、氮氧化物。

(4) 敷贴治疗项目

①工作原理

当患者患有血管瘤、痣、疤痕疙瘩、酒渣鼻、毛细血管扩张、神经性皮炎、局限性慢性湿疹、局限性皮肤瘙痒和某些皮肤癌等症时，通过 ^{90}Sr 放射源的敷贴照射，让敷贴充分接近病变皮肤，通过核素在衰变过程中释放的纯 β 射线，作用于增生组织细胞，可以降低细胞分裂速度，延长核分裂周期，闭塞毛细血管及止痒和镇痛等作用而达到诊疗目的。

本项目使用的 ^{90}Sr 敷贴器为外购商品敷贴器，初始活度为 $1.85 \times 10^9 \text{Bq}$ ，为 V 类放射源。 ^{90}Sr 衰变时释放 β 射线， β 射线在人体组织内的射程仅有几毫米，通过 β 射线对病变部位的电离辐射生物效应，可达到治疗的目的，并且减少对其它组织的损伤。由于 ^{90}Sr 半衰期为 28.1a，使用过程中只需半年进行一次衰变校正。本项目所用

的 ^{90}Sr 敷贴器（放射源）从有生产、销售资质的正规厂家购买，严格按照放射源进行管理，不使用时贮存在专用贮源箱中，存放于敷贴室内，使用时将专用长柄工具在专用的敷贴治疗室实施治疗。

医务人员会提前了解患者瘤、痣、疤痕疙瘩等需要治疗部位的形状和情况，进而确定采用的敷贴治疗方案，根据病人预约情况安排治疗，并且在敷贴治疗时，禁止其他人员进入敷贴治疗室。

②诊疗规划

敷贴治疗项目正式开展后，规划使用 1 枚 ^{90}Sr 敷贴器（放射源）进行敷贴治疗。每年工作 250 天，每周工作 5 天，每日最多治疗 2 人。

表 9.1.1-3 敷贴治疗项目诊疗规划

放射源	患者数量	放射源初始活度	给药方式	来源
^{90}Sr 敷贴器	2 人/天	$1.85 \times 10^9 \text{Bq}$	敷贴给药	外购成品源

③工艺流程与产污环节

患者在敷贴治疗室接受治疗，医生根据病人病变的大小，厚薄及部位的不同，确定每次照射时间； ^{90}Sr 敷贴器是固定敷贴器，一般有圆形和方形，操作是由工作人员首先用橡皮圈在疤痕疙瘩附近固定遮盖，凸出病变位置，用防护材料（如橡皮泥或塑料等）将病灶周围正常皮肤覆盖，然后按下敷贴器，用胶布或绷带固定于病变处，再将敷贴器上面放置大于敷贴器面积的防护材料并固定，记录敷贴时间，达到预定治疗剂量时及时取掉。治疗完毕，将敷贴器放回贮源箱内。敷贴治疗项目工艺流程及产污环节图见图 9.1.1-4。

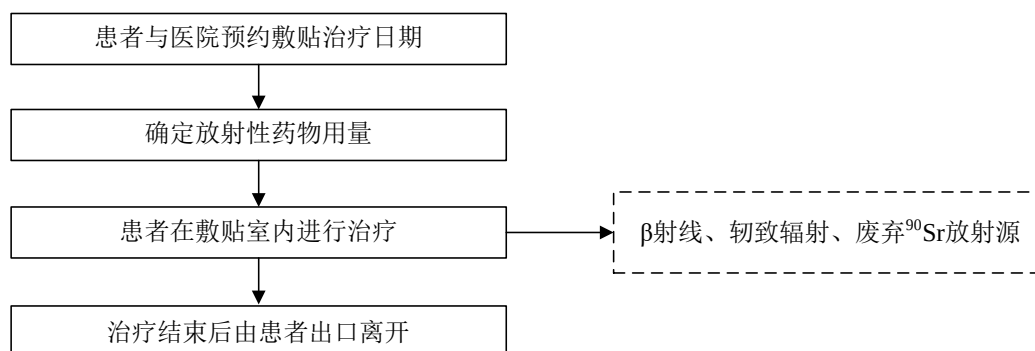


图 9.1.1-4 敷贴治疗项目工艺流程及产污环节

因此，敷贴治疗项目的污染因子为 β 射线、轫致辐射、废旧 ^{90}Sr 放射源。

(5) 核医学核素诊断场所人流和物流的路径规划

①人流的路径规划

1) 工作人员路径

医生经走廊进入相应诊室接诊或阅片室阅片；技师进入控制廊操作设备和相应机房进行摆位；负责核素分装注射的护士经缓冲间、淋浴间进入分装注射间进行分药、施药，负责敷贴治疗给药的护士经走廊进入敷贴室进行敷贴给药，负责导诊的护士由核医学入口到达护士站。

2) 患者路径

PET 和 SPECT 显像诊断：患者经护士站往南经患者通道到达相应的注射窗口接受药物注射，然后分别前往相应候检室等待，等待完毕后进入相应机房接受扫描检查，患者在完成扫描后需在留观室进行留观，确认无恙后则经患者通道往东经前室离开核医学核素诊断场所。

敷贴治疗：患者经走廊进入敷贴室内，在敷贴室接受治疗后，治疗完毕后再按原路离开核医学核素诊断场所。

②物流的路径规划

1) 放射性药物路径

放射性药物配送人员每天上班前或午休停诊期间经缓冲间和分装注射间，将预定的放射性药物送至储源室，和专人进行交接，过程均在监控下进行。

2) 污物路径

放射性固废经分类收集后转至固废间的衰变箱进行衰变，衰变期满经检测符合排放标准后，选择在上班前无病人时段，经分装注射间和缓冲间往北最终送至医院医疗废物暂存间集中收集后按医疗废物处置。

医院拟通过时空管控避免人流物流路径交叉，其路径设置是合理可行的。核医学核素诊断场所人流和物流路径见附图 5-1。

9.1.2 核医学核素治疗场所

(1) 骨癌治疗项目

①工作原理

本项目拟使用含 ^{89}Sr 核素的放射性药物进行骨癌治疗，通过高度选择性聚集在病变部位的放射性核素所发射出的射程很短的 β 射线，对病变进行集中照射，在局

部产生足够的电离辐射生物学效应，达到抑制或破坏病变组织的目的，其有效射程很短，因而邻近正常组织和全身辐射吸收剂量很低，从而达到止痛和破坏肿瘤的目的，同时减轻对其他组织的损害。

②诊疗规划

骨癌治疗项目正式开展后，每年工作 250 天，每周工作 1 天，规划使用 1 种放射性核素 ^{89}Sr ，为外购单支成品药物。 ^{89}Sr 核素每日最多治疗 3 人，单人次最大使用量为 $1.48 \times 10^8 \text{Bq}$ 。

③工艺流程与产污环节

根据医院提供的资料，患者需提前预约治疗。所使用的核素为外购单支成品药物，用于治疗的药物由工作人员在分装间的手套箱内测量活度后，随后在服药间的移动注射车的屏蔽下为病人注射，每份用于治疗放射性药物由供药商事先分装，预约病人后按约定用量和时间发货，治疗时不需再分装。在对患者进行注射治疗后，如无异常情况，根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）附录 B.1 患者出院的体内放射性核素活度要求可知，本项目患者给药量低于放射治疗患者出院时体内放射性核素活度的要求，患者可从西侧患者出口离开医院，无需住院。

表 9.1.2-1 患者体内放射性活度出院标准对比分析

核素	单人最大核素用量	《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中出院时体内放射性活度要求	满足情况
^{89}Sr	$1.48 \times 10^8 \text{Bq}$	$2 \times 10^8 \text{Bq}$	满足

骨癌治疗项目工艺流程与产污环节见图 9.1.2-1。

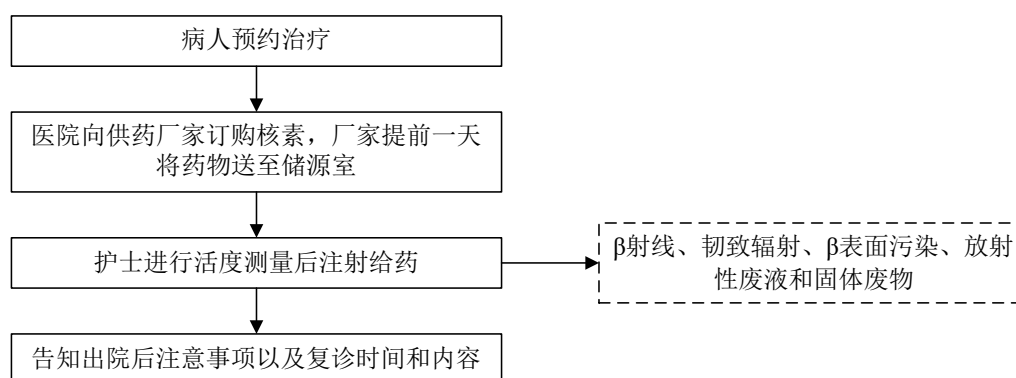


图 9.1.2-1 骨癌治疗项目工艺流程与产污环节图

因此，骨癌治疗项目的污染因子为 β 射线、韧致辐射、 β 表面污染和放射性废液和固体废物。

(2) ^{131}I 诊疗项目

①工作原理

1) 甲功测定: 甲状腺具有选择性摄取和浓聚碘的功能, 其摄碘的速度和数量以及碘在甲状腺的停留时间, 均取决于甲状腺的功能状态。食物中的碘为 ^{127}I , 而 ^{131}I 为其同位素, 具有相同的理化性质, 但 ^{131}I 具有放射性, 在其衰变时发出 γ 射线。因此, 给检查者口服一定量的 ^{131}I 后, 即被甲状腺所摄取, 在体外用特定的 γ 射线探测器就可测得甲状腺对 ^{131}I 的吸收情况, 从而判断甲状腺的功能状况。甲功测定单次 ^{131}I 给药量很小, 最大用量仅为 $10\mu\text{Ci}$ 。

2) 甲亢治疗: 甲状腺具有高度选择性摄取 ^{131}I 的能力, 功能亢进的甲状腺组织摄取量将更多, 可高达血浆的几百倍, 且在甲状腺内停留的时间较长, 有效半衰期可达 7.6 天。在患者服用 ^{131}I 后, 90%以上的 ^{131}I 都会聚集到患者的甲状腺, 其余的 ^{131}I 随代谢排出体外。 ^{131}I 衰变为 ^{131}Xe 时放射出 95%的 β 射线, 该射线能量低, 在甲状腺内的平均射程仅有 0.5mm, 一般不会造成甲状腺周围组织例如甲状旁腺、喉返神经等的辐射损伤。因此, ^{131}I 治疗可使部分甲状腺组织受到 β 射线的集中照射, 使部分甲状腺细胞发炎症、萎缩、直至功能丧失, 从而减少甲状腺激素的分泌, 使亢进的功能恢复正常, 达到治疗的目的。

3) 甲癌治疗: 放射性核素 ^{131}I 可以高度选择性聚集在分化型甲状腺癌及转移灶, ^{131}I 衰变时发射出射程很短的 β 射线和能量跃迁时发出的 γ 射线, 从而对病变组织进行内照射治疗, 在局部产生足够的电离辐射生物学效应, 达到抑制或破坏病变组织的目的, 而邻近的正常组织吸收剂量很低, 从而达到治疗目的。

②诊疗规划

甲测: 项目正式开展后, 规划使用放射性核素 ^{131}I 进行甲功测定。每年工作 250 天, 每周工作 5 天, 日最大接诊量为 20 人, 每名患者最大服药量为 $1.85\times 10^5\text{Bq}$ 。

甲亢治疗: 项目正式开展后, 规划使用放射性核素 ^{131}I 进行治疗。每年工作 250 天, 每周工作 5 天, 单日最大就诊人数为 5 人。甲亢治疗核素单人次最大使用量为 $3.7\times 10^8\text{Bq}$ 。

甲癌治疗: 项目正式开展后, 规划使用放射性核素 ^{131}I 进行治疗。医院每周一安排甲癌患者就诊住院, 单日最大就诊住院人数为 5 人, 每周最大就诊住院人数为 5 人。甲癌患者需住院 2~5 天后出院。甲癌治疗核素单人次最大使用量为

$7.4 \times 10^9 \text{Bq}$ 。

表 9.1.2-2 甲测、甲亢、甲癌治疗项目诊疗规划

治疗核素	患者数量	核素用量	给药方式	来源
^{131}I 甲测	20 人/天	$1.85 \times 10^5 \text{Bq/人}$	口服	外购药物
^{131}I 甲亢	5 人/天	$3.7 \times 10^8 \text{Bq/人}$	口服	
^{131}I 甲癌	5 人/周（周一安排住院）	$7.4 \times 10^9 \text{Bq/人}$	口服	

③工艺流程与产污环节

甲测、甲亢、甲癌治疗使用 ^{131}I 为外购成品药物碘[^{131}I]化钠口服液体，医院按需采购放射性药物，在约定的时间由放射性药物供应单位负责将放射性药物运送至储源室，病人进行治疗前，辐射工作人员将装有药物的屏蔽容器放在分装间的自动分碘仪内，打开密封盖，通过电脑控制系统操作自动分碘仪测定活度自动分装药物，患者根据医护人员指示进行服药，并用一次性口杯接适量纯净水服下。

甲测患者经预约问诊后，通过走廊到达服药间，在服药间内服用放射性药物后由患者出口离开核医学核素治疗场所。患者分别于服药后 2h、4h、6h、24h 由核医学核素诊断场所入口进入甲测室进行吸碘率的测定，然后打印报告，检查结束。

甲亢患者经预约问诊后，通过走廊到达服药间，在服药间内服用放射性药物后在医生的语音指导下在服药间短暂留观，如无异常情况，可离开核医学核素治疗场所。本项目 ^{131}I 甲亢治疗患者单人用药量为 10mCi ，体内放射性活度低于 400MBq ，根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021），甲亢患者服药后可不必住院，经短暂观察无碍后离开核医学核素治疗场所。医院应对患者做出书面建议，给出接触同事和亲属及到公众场所的合理限制和有关防护措施（限制接触时间及距离等）。

甲癌患者经预约问诊后，通过走廊到达服药间，在服药间内服用放射性药物后在医生的语音指导下进入甲癌病房住院，一般住院 2~5 天，周六前即可出院。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）附录 B.1 患者出院的体内放射性核素活度要求可知，甲癌患者出院时，体内 ^{131}I 放射性活度需低于 400MBq ，当甲癌患者在患者通道东侧经剂量测定仪检测体内放射性活度降低至 400MBq （当患者体内 ^{131}I 活度为 400MBq 时，距患者 1m 处的辐射剂量率低于 $25\mu\text{Sv/h}$ ）后方可出院，患者住院时间要视患者病情和手术病灶切除情况而定。

甲测项目工作流程与产污分析见图 9.1.2-2，甲亢治疗项目工作流程与产污分析见图 9.1.2-3，甲癌治疗工作流程与产污分析见图 9.1.2-4。

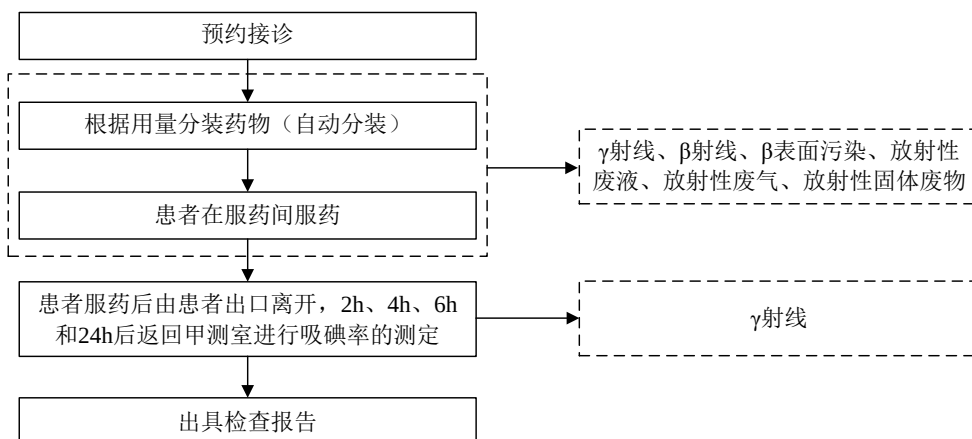


图 9.1.2-2 甲功能测定工艺流程及产污环节分析图

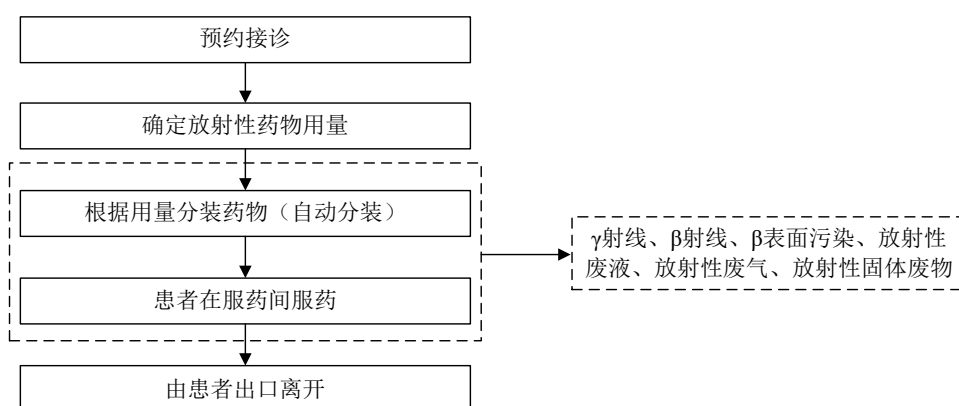


图 9.1.2-3 甲亢治疗工艺流程及产污环节分析图

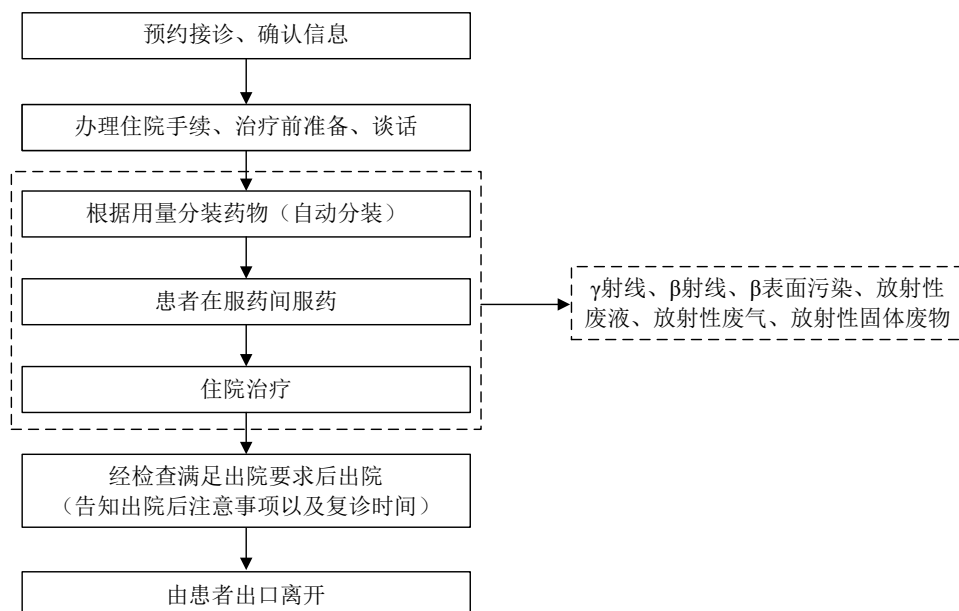


图 9.1.2-4 甲癌治疗工艺流程及产污环节分析图

综上所述， ^{131}I 甲测、甲亢和甲癌治疗项目的主要污染因子主要是 γ 射线、 β 射线、 β 表面污染、放射性废液、废气及固体废物。

(3) ^{177}Lu 肿瘤治疗项目

①工作原理

^{177}Lu 放射性药物主要用于缓解前列腺癌等晚期恶性肿瘤骨转移所致骨痛，用于治疗肿瘤转移的放射性药物都是趋骨性的，骨组织代谢活跃的部分浓聚更多的放射性药物。骨肿瘤病灶部位由于骨组织受到破坏，成骨细胞的修复作用极其活跃，所以浓聚大量的放射性药物。由于不是肿瘤细胞直接浓聚放射性药物，是肿瘤部位骨组织代谢活跃形成的放射性药物浓聚，因此是一种间接的浓聚机制。骨肿瘤病灶浓聚的放射性药物靶/非靶比值很高，非密封放射性物质衰变过程中发射 β 射线，辐射作用引起肿瘤组织内毛细血管扩张、水肿，细胞结构不清；染色体淡或固缩，炎细胞浸润；进一步肿瘤细胞核消失或空泡形成，坏死或纤维化形成，从而治疗骨肿瘤。

②诊疗规划

^{177}Lu 肿瘤治疗项目正式开展后，规划使用放射性核素 ^{177}Lu 进行治疗。医院每周六安排 5 名患者就诊住院， ^{177}Lu 肿瘤治疗患者住院 1 天后出院。 ^{177}Lu 治疗核素单人最大使用量为 $7.4 \times 10^9 \text{Bq}$ 。

表 9.1.2-3 ^{177}Lu 肿瘤治疗项目规划

治疗核素	患者数量	核素用量	给药方式	来源
^{177}Lu	5 人/周（周六安排住院）	$7.4 \times 10^9 \text{Bq/人}$	静脉滴注	外购单支成品药物

③工作流程及产污环节

工作人员根据临床诊断所需药物的使用量、预约检查的人数，提前一天向供药单位订购放射性药物，供药单位在约定的时间送药品，经确认无误完成相关交接、登记手续后，将药物于储源室暂存。本项目所使用的 ^{177}Lu 核素为外购单支成品药物，药物自带铅罐（20mmPb）的屏蔽，由医护人员在病房为病人进行药物滴注，滴注过程约 40min，医护人员在值班室通过视频观察患者给药过程，患者住院 1 天后离开病房出院。

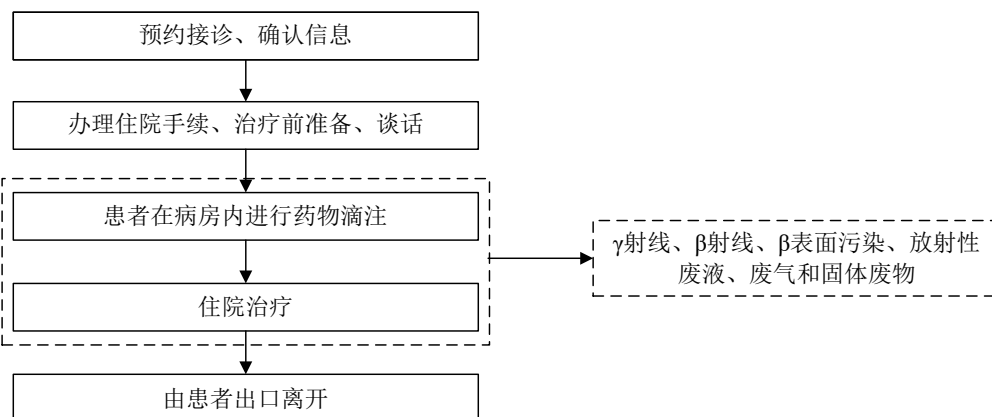


图 9.1.2-5 ^{177}Lu 肿瘤治疗工艺流程及产污环节图

因此， ^{177}Lu 肿瘤治疗项目污染因子为 β 射线、 γ 射线、 β 表面污染、放射性废液、废气和固体废物。

(4) 人流和物流的路径规划

①人流的路径规划

1) 工作人员路径

负责 ^{89}Sr 取药、测活和注射的护士经护士站由缓冲间、淋浴卫生间进入分装间进行 ^{89}Sr 取药、测活，而后进入服药间内注射给药，负责 ^{131}I 自动分装给药的护士进入分装间进行 ^{131}I 自动分装给药，负责甲测的护士，则进入甲测室进行吸碘率的测定，负责 ^{177}Lu 注射给药的护士进入病房内为患者进行静脉滴注，负责导诊的护士由核医学科入口到达护士站。

2) 患者路径

骨癌治疗：患者在护士站登记后往东进入服药间接收注射给药，给药后再经原路离开核医学核素治疗场所。

甲测：患者在护士站登记后往东经患者走廊进入服药间服药，服药后等到检查时间进入甲测室进行甲功能测定，检查完毕后再按原路离开核医学核素治疗场所。

甲亢治疗：患者在护士站登记后往东进入服药间服药，服药后再经原路离开核医学核素治疗场所。

甲癌治疗：患者在护士站登记、安排入院后往东进入服药间服药，服药后再经走廊进入相应病房住院，出院时由走廊往南，经前室离开核医学核素治疗场所。

^{177}Lu 肿瘤治疗：患者在护士站登记、安排入院后往东经患者走廊进入相应病房住院并在病房内接受药物滴注，出院时由走廊往南，经前室离开核医学核素治疗场所。

所。

甲测、甲亢、甲癌患者及 ^{177}Lu 肿瘤治疗患者分时段给药，四种类型治疗患者不会在核素治疗场所进行交叉给药。甲癌患者和 ^{177}Lu 肿瘤治疗患者住院后在病房内严格管理，禁止患者随意进出病房。

从某种程度上讲，给药患者相当于一个流动的放射源，在一段时间内，对近距离接触的公众可能产生 γ 外照射。但是这种影响是暂时的，其影响将随着时间的推移越来越小，医院应加强对服药患者管理，向患者及其家属做出口头及书面的住院期间及出院后的防护措施指导，给出辐射防护建议，要求患者在一定时间内避免外出。

②物流的路径规划

1) 放射性药物路径

放射性药物配送人员每天上班前经护士站、缓冲间、分装间，将预定的放射性药物送至储源室，和专人进行交接，过程均在监控下进行。

2) 污物路径

放射性固废经分类收集后转至固废间的衰变箱进行衰变，衰变期满经检测符合排放标准后，选择在上班前无病人时段，经分装间、缓冲间、护士站往北最终送至医院医疗废物暂存间集中收集后按医疗废物处置。

医院拟通过时空管控避免人流物流路径交叉，其路径设置是合理可行的。核医学核素治疗场所人流和物流路径见附图 5-2。

9.1.3 放疗科

(1) 设备组成

①直线加速器

医用电子直线加速器主要由三大部分组成：电子发射单元，电子加速单元和电子线引出单元。它的结构单元为：加速管、电子枪、微波系统、调制器、束流传输系统及准直系统、真空系统、恒温水冷系统和控制保护系统。电子治疗子系统基本组成部件主要包括初级准直器、散射箔、托盘、均整器、电离室、光阑、附件接口、限光筒。典型直线加速器外部结构见图 9.1.3-1。

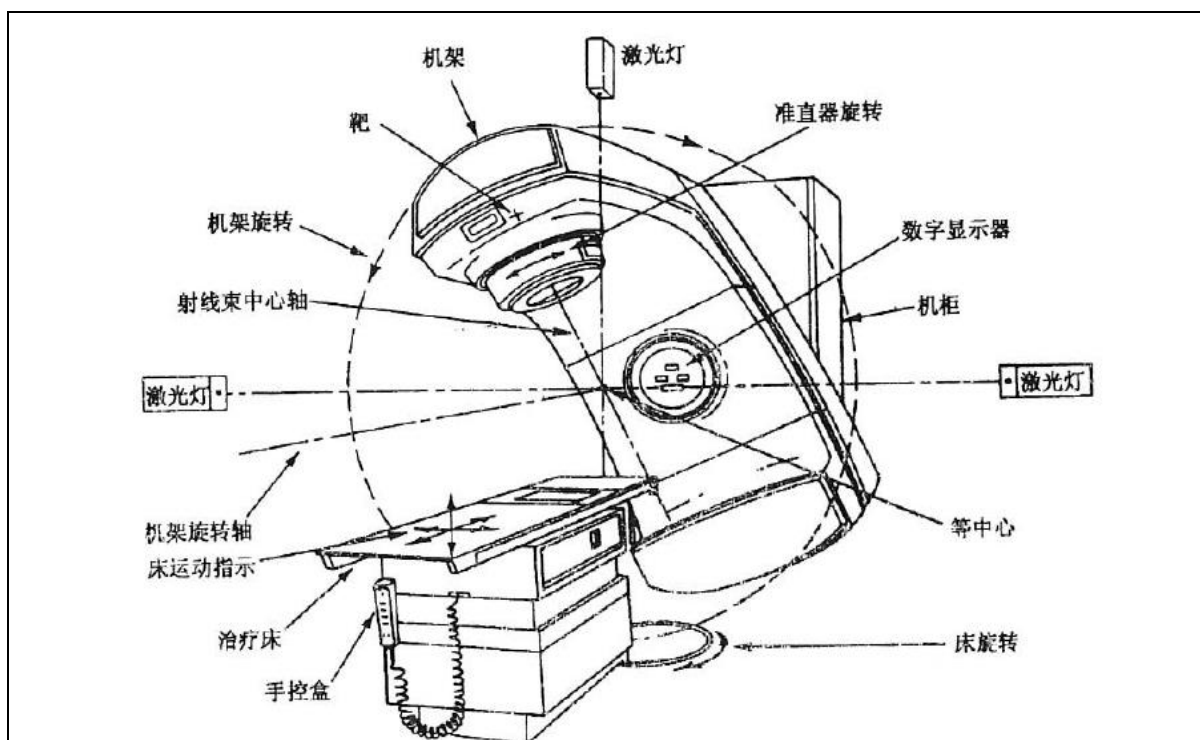


图 9.1.3-1 典型直线加速器机外部结构图

②模拟定位 CT

模拟定位 CT 不仅可以像诊断性 CT 一样为治疗计划系统提供高质量的横断面 CT 影像资料，还可以帮助临床医生精确勾画出肿瘤靶区及危险器官的轮廓，进而帮助计算机计划系统进行组织不均匀性校正，提高剂量计算的准确性。现代的模拟定位 CT 综合了部分影像系统、计划设计系统和传统 X 射线模拟机的功能，常选用大孔径、高速扫描的螺旋 CT。由于扫描速度快，扫描层厚薄，重建的 CT 图像质量较高。临床医师可以及时发现异常病变，判断肿瘤性质，并进而确定治疗方式，布野方法及处方剂量。

(2) 工作原理

①直线加速器

医用电子直线加速器是将电子枪产生的电子经加速管加速后形成高能电子线的装置。电子枪产生的电子线由微波加速波导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子线由电子窗口射出，经调制、准直后射向患者病灶；或电子线靶物质相互作用产生韧致辐射 X 射线束，经一次准直器和滤线器形成剂量均匀的 X 射线束，再经监测电离室和二次准直器限束，到达患者病灶实现治疗目的。

因此，作为一种体外照射的放射治疗设备，医用电子直线加速器利用产生的高

能电子线或 X 射线，对人体病灶部位进行照射，使肿瘤组织受到不可逆损伤。根据癌症类型及其所在位置、患者的身体状况等，选择不同的输出方式对肿瘤进行照射，同时使肿瘤周围正常组织得到最大限度的保护，达到治疗肿瘤的目的。

直线加速器有电子线和 X 射线两种治疗模式，治疗模式结构示意图 9.1.3-2。

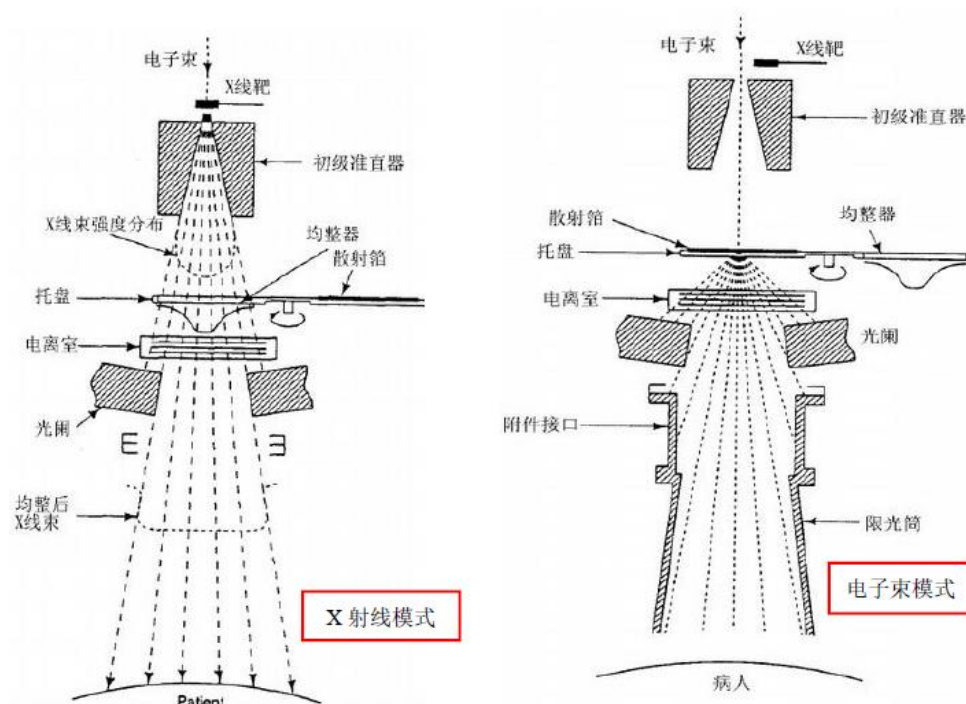


图 9.1.3-2 X 射线和电子线治疗模式结构示意图

②模拟定位 CT

CT 是计算机断层 X 射线摄影术（Computed Tomography）的简称，它使用了精确准直的 X 射线从各种不同的离散角度扫描所关注的平面，利用探测器记录透射光束的衰减量，并经过数学运算，电子计算机处理相应数据。它根据人体不同组织对 X 线的吸收与透过率的不同，应用灵敏度极高的仪器对人体进行测量，然后将测量所获取的数据输入电子计算机，电子计算机对数据进行处理后，就可摄下人体被检查部位的断面或立体的图像，发现体内任何部位的细小病变。

（3）工艺流程及产污环节

①直线加速器

治疗前先确认治疗方案，包括确定照射时间和剂量，定位患者照射部位，调整照射角度和视野，再开机进行治疗。在治疗过程中，除患者外其他人员均不在治疗室内，医护人员通过视频装置观察患者情况。工艺流程及产污环节如图 9-4 所示。

具体操作流程为：

- 1) 根据医生指导意见，需要接受治疗的患者提前预约登记，以确定治疗时间；
- 2) 预约患者首先在直线加速器机房南侧的模拟定位 CT 机房内进行肿瘤定位，确定肿瘤的具体位置和形状；
- 3) 物理师通过医生给出治疗剂量，通过治疗计划系统（TPS）制定治疗计划；
- 4) 肿瘤患者在技师协助下躺上治疗床，进行摆位，根据 TPS 确定照射位置和面积；
- 5) 技师离开治疗室，进入控制室，根据 TPS 计划进行出束治疗；
- 6) 治疗结束后，关机，打开治疗室防护门，患者离开治疗室。

本项目直线加速器工作流程与产污环节见图 9.1.3-3。

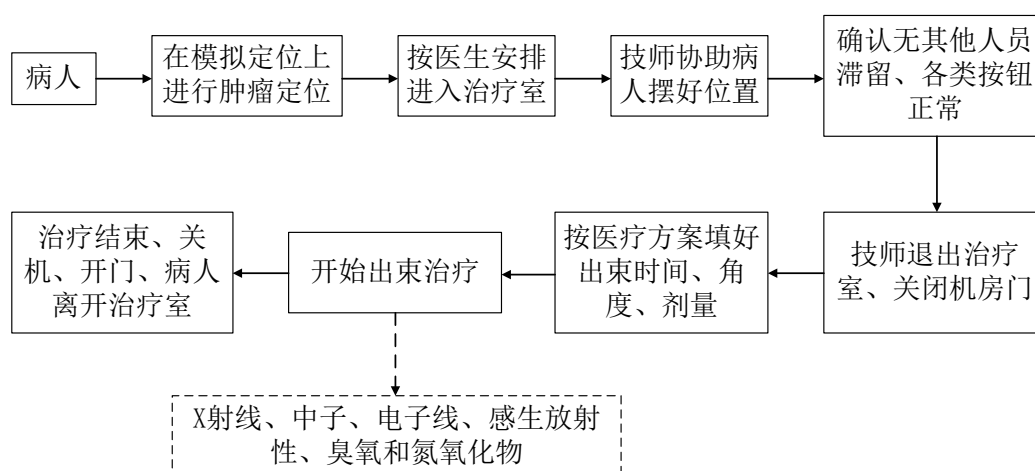


图 9.1.3-3 直线加速器工作流程与产污环节图

②模拟定位 CT

模拟定位 CT 影像诊断是指利用 X 射线的穿透性取得人体内器官与组织的影像信息以判断肿瘤大小、位置的技术，本项目模拟定位 CT 机诊断流程如下：

- 1) 病人经医生诊断、正当性判断后，确定需要 X 射线影像诊断的病人与放疗科预约登记；
- 2) 患者在医护人员的指导下正确摆位；
- 3) 进行隔室操作，利用模拟定位 CT 进行肿瘤定位；
- 4) 检查结束离开检查室。

工艺流程及产污环节见下图。

9.2 污染源项描述

9.2.1 正常工况下污染源项描述

本项目核医学科拟使用放射性核素和放射源的有关参数及辐射工作人员工作负荷见表 9.2.1-1、表 9.2.1-2 和表 9.2.1-3。

表 9.2.1-1 非密封放射性核素的相关放射性属性

核素名称	状态	半衰期	毒性级别	衰变方式	主要射线和能量 (MeV)	活动种类
PET 显像诊断						
^{18}F	液态	109.8min	低毒	β^+ 、EC	$\gamma 0.511$	使用
^{68}Ga	液态	68.3min	低毒	β^+ 、EC	$\gamma 0.511$	使用
SPECT 显像诊断						
核素名称	状态	半衰期	毒性级别	衰变方式	主要射线和能量 (MeV)	活动种类
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	液态	6.02h	低毒	I.T.	$\gamma 0.140$	使用
^{201}Tl	液态	72.9h	低毒	EC	0.135,0.167	使用
^{67}Ga	液态	78h	中毒	EC	$\gamma 0.184$	使用
骨癌治疗						
核素名称	状态	半衰期	毒性级别	衰变方式	主要射线和能量 (MeV)	活动种类
^{89}Sr	液态	50.53d	中毒	β^-	$\beta 0.5846$	使用
甲测、甲亢治疗、甲癌治疗						
核素名称	状态	半衰期	毒性级别	衰变方式	主要射线和能量 (MeV)	活动种类
^{131}I	液态	8.02d	中毒	β^-	$\gamma 0.365$	使用
^{177}Lu 肿瘤治疗						
核素名称	状态	半衰期	毒性级别	衰变方式	主要射线和能量 (MeV)	活动种类
^{177}Lu	液态	6.73d	中毒	β^-	$\gamma 0.2083$	使用

注：衰变方式栏中 E.C.表示轨道电子俘获；I.T.表示同质异能跃迁。

表 9.2.1-2 放射源的相关放射性属性

核素名称	状态	半衰期	毒性级别	衰变方式	主要射线和能量 (MeV)
^{68}Ge	固态	288d	中毒	EC	$\gamma 1.89$
^{90}Sr	固态	28.1a	高毒	β^-	$\beta 0.546$

表 9.2.1-3 辐射工作人员情况以及工作负荷一览

工作场所	操作内容	时间	人员配备
核医学核素诊断场所			
分装注射间	PET 取药分装	每次 30s	2 人 (轮岗操作)
	PET 注射	每次 30s	
	SPECT 取药测活	每次 30s	2 人 (轮岗操作)
	SPECT 注射	每次 30s	
敷贴室	敷贴给药	每次 2min	1 人
护士站	导诊和预约登记	每天 8h	2 人
登记室			
PET/MR 机房	指导患者躺至正确的位置	每人次摆位 1min	4 人 (2 人 1 组轮岗操作)
控制室	PET/MR 控制、图像采集	每人次扫描 30min	
PET/CT 机房	指导患者躺至正确的位置	每人次摆位 1min	4 人 (2 人 1 组轮岗操作)
控制室	PET/CT 控制、图像采集	每人次扫描 15min (其中 CT 扫描 10 秒)	
SPECT/CT 机房	指导患者躺至正确的位置	每人次摆位 1min	4 人 (2 人 1 组轮岗操作)
控制室	SPECT/CT 控制、图像采集	每人次扫描 15min (其中 CT 扫描 10 秒)	
诊室	接诊	每天 8h	4 人
阅片室	阅片	每天 8h	
核医学核素治疗场所			
服药间	⁸⁹ Sr 注射	每次 30s	1 人
分装间	⁸⁹ Sr 取药测活	每次 30s	
	¹³¹ I 自动分装给药	每次 1min	1 人
	¹⁷⁷ Lu 测活	每次 30s	1 人
病房	¹⁷⁷ Lu 给药、回收药品容器	每次 2min	
甲测室	甲测	每次 30s, 每人 4 次	1 人
护士站、出入院 服务间	预约登记、出入院服务	2000h (¹³¹ I)	1 人
		800h (¹⁷⁷ Lu)	

(1) 核医学核素诊断场所污染源项分析

本项目 PET/CT、SPECT/CT 采用数字成像, 无废显 (定) 影液、洗片废液、废胶片产生。

①X 射线、 γ 射线、 β 射线和韧致辐射

PET/CT、SPECT/CT 扫描时产生的 X 射线; 在放射性药物操作, 病人注射后候

诊、扫描及留观等过程中产生的 γ 射线、 β 射线和韧致辐射。

② β 放射性表面污染

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

③放射性废液

放射性废液主要为核素操作人员清洗或去污废水、患者候检或留观期间产生的如厕废水以及工作场所清洗废水。本项目核医学核素诊断场所各项诊疗均为门诊治疗，病人在场所内停留时间短。

敷贴治疗采用放射源，因此以上患者均不产生放射性废液。根据《建筑给水排水设计标准》（GB 50015-2019），门诊患者（主要为 PET 显像诊断患者和 SPECT 显像诊断患者）每人次用水定额取 10L，核素诊断场所每日最多诊断患者 80 人，患者废水产生量为 $0.8\text{m}^3/\text{d}$ ；辐射工作人员每日去污和场所清洗共产生废水 $0.1\text{m}^3/\text{d}$ 。则核医学核素诊断场所废水产生量为 $0.81\text{m}^3/\text{d}$ ， $202.5\text{m}^3/\text{a}$ （以 250 天计）。

⑤放射性废气

放射性药物在分装、活度测量和给药过程中，药物挥发产生含放射性核素的废气。

⑥放射性固体废物

放射性固体废物主要为一次性杯子、一次性注射器、针头、手套、药棉、纱布、破损杯皿、擦拭污染地面的物品、废敷贴器以及废气处理更换的废活性炭等。

核医学核素诊断场所每年门诊量最大为 20000 人，类比浙江同类型医院核医学项目开展情况，患者门诊诊疗过程放射性固废产生量约为 $0.02\text{kg}/\text{人次}$ ，则本项目核医学核素诊断场所运行时门诊产生的放射性固废约为 $400\text{kg}/\text{a}$ 。

综上所述，本项目核医学核素治疗场所运行时产生的放射性固废总量约为 $400\text{kg}/\text{a}$ 。

废旧 ^{90}Sr 放射源每 5 年产生 1 枚，废旧放射源进行包装整備后送交有相应资质的放射性废物集中贮存单位贮存。

另外，更换的 ^{68}Ge 校准源也作为放射性固体废物管理。 ^{68}Ge 的半衰期为 288 天，当其衰变至其活度不能满足校准需要时，将更换放射源，从而产生废 ^{68}Ge 放射源。医院预计约每 4 年更换一次源，一次产生 2 枚废源。

核医学核素诊断场所放射性药物均根据诊断计划按需订购，一般不会产生剩余放射性药物，如出现放射性药物购买过量用不完的情况，可将放射性药物连同铅罐放置于核医学核素诊断场所固废间暂存，放置衰变贮存 30 天或者超过十个半衰期后，作为医疗废物处理。

(2) 核医学核素治疗场所污染源项分析

① γ 射线和 β 射线

在放射性药物操作，病人服药后住院等过程中产生的 γ 射线及 β 射线。

② β 表面污染

医生在对放射性药物的操作中，会引起工作台、工作服和手套等产生放射性沾污，造成小面积的 β 表面污染。

③放射性废液

放射性废液主要为患者服用/注射放射性药物后产生的排泄物及冲洗水等含有放射性核素的废水，核医学科工作人员完成放射性药物操作后清洗去污的废水，工作场所清洗及应急洗消产生的可能含放射性物质的废水。

骨癌治疗患者在接受治疗后即可直接离开，不作停留，甲测、甲亢患者服药后立刻离开核医学核素治疗场所，因此上述患者不产生放射性废液。根据《综合医院建筑设计规范》(GB 51039-2014)，住院患者每人每次用水定额取 150L，根据现有核医学核素治疗场所病房的设计，核医学科核素治疗场所共 5 间单人病房，最多可容纳 5 名住院患者，则患者废水产生量为 $0.75\text{m}^3/\text{d}$ 。辐射工作人员每日去污和场所清洗共产生废水 $0.1\text{m}^3/\text{d}$ 。则核医学核素治疗场所废水产生量为 $0.85\text{m}^3/\text{d}$ ， $298\text{m}^3/\text{a}$ (以 350 天计)。

④放射性废气

放射性药物在分装、活度测量和给药过程中，药物挥发产生含放射性核素的废气。

⑤放射性固废

开展核素治疗时，甲测及甲亢患者产生的放射性废物主要是工作人员操作过程产生的服药杯子、一次性卫生用品、垫料、一次性注射器、针头、手套、药棉、纱布、破损杯皿、擦拭污染地面的物品等，按照每人 0.02kg 产生量进行估算，正常情况下，核医学科核素治疗场所骨癌治疗、甲测及甲亢患者年放射性固体废物的产生

量为 128kg/a。

甲癌患者和 ^{177}Lu 肿瘤治疗患者产生的放射性废物主要是患者住院产生的医疗废物，按照每人每天 0.5kg 产生量进行估算。核医学核素治疗场所一年最多治疗 250 名甲癌患者和 250 名 ^{177}Lu 肿瘤治疗患者，其中甲癌患者保守按照住院 5 天计， ^{177}Lu 肿瘤治疗患者保守按照住院 2 天，则患者住院治疗产生的放射性固废的产生量为 875kg/a。

综上所述，本项目核医学核素治疗场所运行时产生的放射性固废总量约为 1003kg/a。

核医学核素治疗场所放射性药物均根据诊断计划按需订购，一般不会产生剩余放射性药物，如出现放射性药物购买过量用不完的情况，可将放射性药物连同铅罐放置于核医学核素治疗场所固废间暂存， ^{131}I 放置衰变贮存 180 天， ^{177}Lu 放置衰变贮存十个半衰期后，作为医疗废物处理。

排风管道更换的下的废活性炭含有放射性核素也属于放射性废物。本项目核医学科共有 4 支排风管道，放射性废气排放口位于肿瘤综合治疗中心楼顶，排放口和手套箱顶部设活性炭吸附装置均设置活性炭吸附装置，活性炭装置总填装量 25kg，平均每半年由厂家更换一次，产生量为 50kg/a。

(3) 放疗科直线加速器污染源项分析

本项目直线加速器的技术参数见表 9.2.1-4。

表 9.2.1-4 直线加速器主要技术参数

设备名称	医用电子直线加速器
X 射线能量	15/10/6MV
电子线能量	最大为 22MeV
源轴距 (SAD)	100cm
等中心剂量率	15MV: 600Gy/h 10MV (FFF 模式): 1440Gy/h 6MV (FFF 模式): 840Gy/h
X 射线有用线束张角	$\leq 28^\circ$
等中心点高度	$\leq 130\text{cm}$
最大照射野	40cm×40cm
泄漏辐射比率	1×10^{-3}

本项目直线加速器投入使用后，预计每天放射治疗患者最多为 40 人次，平均每

名患者治疗照射最大时间为 2.5min，每周工作 5 天，每年工作 250 天，则本项目的周工作时间为 8.33h，年工作时间为 416.67h。

①X 射线

直线加速器运行时，从电子枪发出来的电子束，在直线加速管内经加速电压加速，轰击到靶上，产生 X 射线用于治疗。本项目直线加速器 X 射线最大能量为 15MV。由于 X 射线贯穿能力强，将对周围环境造成一定的辐射污染。

②中子

直线加速器在运行过程中产生的高能 X 射线与周围物质相互作用时，均会产生中子。直线加速器治疗机头外的杂散中子成为直接光中子，来源于 X 射线中能量大于 10MeV 的光子与直线加速器的靶、准直器及电子束和光子束通道上的其他物质相互作用发生光核反应所产生的中子。

③电子线

直线加速器处于电子束模式下使用初始电子线进行浅层治疗时，会产生电子线，本项目直线加速器产生的电子线最高能量为 22MeV，高能电子线随机器的开关而产生和消失。

④感生放射性

本项目加速器高能电子线最大能量为 22MeV，随机器的开关而产生和消失。根据《辐射防护手册：辐射源与屏蔽》（第一分册）中 P226，绝大数天然核素的（ γ ，n）反应阈能在 10MeV 以上。加速器处于电子束治疗模式，电子线最大的能量超过 10MeV 时，可能与加速器内部构件和空气作用，使构件激发感生放射性和产生感生放射性核素，主要是 ^{15}O 、 ^{13}N 等。一般在正常通风情况下，感生放射性气体不会对辐射工作人员和患者造成危害。

⑤废气

直线加速器在运行过程中，X 射线作用于空气以及次级辐射等因素，可产生少量臭氧及氮氧化物。

⑥放射性固体废物

本项目直线加速器只有在靶损坏或退役时才会产生废靶，若有废靶产生，经监测有产生活化时将作为放射性固体废物处理。

综上所述，本项目医用电子直线加速器运行时产生的污染因子主要为 X 射线、

中子、电子线、感生放射性、少量臭氧和氮氧化物以及活化后的废靶。

(4) 放疗科模拟定位 CT 污染源项分析

本项目模拟定位 CT 的主要技术参数见表 9.2.1-5。

表 9.2.1-5 模拟定位 CT 主要技术参数

装置名称	型号	类别	数量	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	工作场所
模拟定位 CT	待定	III 类	1 台	140	1300	模拟定位 CT 机房

模拟定位 CT 机投入使用后，预计每天诊断患者最多为 50 人次，设备单次曝光时间不超过 30 秒，每周工作 5 天，每年工作 250 天，则设备年出束时间为 104.2h。

本项目模拟定位 CT 采用数字成像，无废显（定）影液、洗片废液、废胶片产生。

①X 射线

由 X 射线装置的工作原理可知，X 射线随机器的开、关而产生和消失。医院使用的 X 射线装置在非诊断状态下不产生射线，只有在开机并处于出束状态时才会发出 X 射线。因此，在开机期间，污染因子主要为 X 射线。

②废气

本项目模拟定位 CT 运行时，由于 X 射线与空气电离作用，会有少量臭氧和氮氧化物产生。

9.2.2 非正常工况污染源项描述

(1) 核医学科非正常工况源项描述

①射线装置机房门灯联锁装置发生故障时，人员误入正在运行的射线装置机房，对人员造成误照射。

②由于工作人员操作不熟练或违反放射操作规程或误操作等其他原因致使放射性药物洒漏，造成意外照射和辐射污染。

③由于未锁好核医学科进出口的大门或取用药物后未及时锁好防护门或保险柜等药物保管工作不到位致使放射性药剂丢失，可能对公众和周围环境造成辐射污染。

(2) 放疗科直线加速器非正常工况源项描述

①安全联锁失效，人员可能在防护门未关闭时误入机房，如果这时运行直线加速器，则可能造成误照射事故。

②除受治疗患者以外，机房中仍有其他人员未撤离时，操作人员未严格按照操作规程确认机房中环境便运行直线加速器，则会造成机房中人员误照射。

(3) 放疗科模拟定位 CT 非正常工况源项描述

①装置运行时，由于门-灯联锁系统失效，人员误入或滞留在机房而造成误照射；

②X 射线装置工作状态下，没有关闭防护门对人员造成的误照射。

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全设施

10.1.1 核医学科项目安全设施

(1) 工作场所布局

本项目核医学科分为核医学核素诊断场所和核素治疗场所，为 2 个非密封放射性物质工作场所。核医学科核素诊断场所和核素治疗场所均位于肿瘤综合治疗中心一层。

本项目核医学科周边不邻接产科、儿科、食堂等部门，放射性区域与非放射性区域之间有明确的分界隔离。核医学科用房相对独立，其中放射性药物暂存于储源室，放射性废物暂存于固废间。诊疗流程连续完整，有相对独立的辐射防护措施，有明确的监督区和控制区划分，工作场所设置了相对独立的患者通道和医生通道。患者通道与医生通道分开，患者单向流动，注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉，避免了患者之间交叉影响；放射性药物在上班之前送至储源室，避免与患者交叉。

核医学核素诊断场所和核素诊疗场所出入口均设有单向门禁系统，防止给药后患者进入非放射性区域，或无关人员进入放射性区域，且出入口远离人员密集区；分装注射间的出口处设置有缓冲间和淋浴间，具有去污及淋浴功能；核医学科的候检室和留观室均设有患者专用卫生间。衰变池组设置在核医学科北侧地下，储源室和固废间紧邻分装注射间，便于放射性废液、放射性固体废物的短距离收集和贮存衰变和放射性药物的集中存放，同时可以减小受污染区域。本项目核医学科放射性废气排风口位于肿瘤综合治疗中心楼顶，并尽可能远离邻近的高层建筑。

本项目核医学科选址和工作场所布局满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中关于核医学工作场所对于选址、布局的要求以及《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）中关于安全操作的要求，核医学科选址和布局合理。

(2) 衰变池选址合理性分析

根据设计单位出具的图纸资料，本项目衰变池设置在核医学科北侧地下，为不锈钢成品衰变池，衰变池内包含 1 个短半衰期衰变池（ $13\text{m}^3 \times 3$ ）和 1 个长半衰期衰变池（ $75\text{m}^3 \times 4$ ），衰变池上方为室外绿地，拟设置电离辐射警告标志、围栏，以防

止无关人员进入。

本项目核医学科核素诊断场所产生的放射性废水先经 2 个并联的污泥池沉淀预处理后在水泵作用下排入短半衰期衰变池进行衰变。核医学科核素治疗场所产生的放射性废水先经另外 2 个并联的污泥池沉淀预处理后在水泵作用下排入长半衰期衰变池进行衰变。

衰变池间设有控制室，可实现远程操控和远程监控。在衰变池间进水端拟安装流量计进行实时监测流量。本项目衰变池间上方设有混凝土盖板和电离辐射警告标志。

综上所述，本项目衰变池选址相对合理。

(3) 非密封放射性物质工作场所分级、分类和分区管理

①非密封放射性物质工作场所分级

本项目核医学核素诊断场所使用的放射性核素有 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{201}Tl 、 ^{89}Sr ，本项目核医学核素治疗场所使用的放射性核素有 ^{131}I 、 ^{177}Lu ，根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）附录 A 和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 C 和附录 D，查得本项目各放射性核素的毒性组别修正因子和操作方式修正因子以及日等效最大操作量计算公式（日等效最大操作量=日最大操作量×毒性组别修正因子/操作方式修正因子）。同时根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）附录 A，医疗机构使用 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 相关活动视为“很简单操作”，使用 ^{131}I 核素相关活动视为“简单操作”，其余核素相关活动参照 ^{131}I 视为“简单操作”。

本项目核医学科放射性核素日等效最大操作量计算见表 10.1.1-1。

表 10.1.1-1 放射性核素日最大等效操作量计算

工作场所	核素名称	日最大操作量 (Bq)	毒性组别修正因子	操作方式修正因子	日等效最大操作量 (Bq)	分级
核素诊断场所	^{18}F	2.22×10^{10}	0.01	10	2.22×10^7	乙级
	^{68}Ga	7.4×10^9	0.01	1	7.4×10^7	
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	2.78×10^{10}	0.01	10	2.78×10^7	
	^{201}Tl	9.25×10^8	0.01	1	9.25×10^6	
	^{67}Ga	1.85×10^9	0.1	1	1.85×10^8	
	合计				3.19×10^8	
核素治疗	^{89}Sr	4.44×10^8	0.1	1	4.44×10^7	乙级
	^{131}I 甲测	3.7×10^6	0.1	1	3.7×10^5	

场所	¹³¹ I 甲亢	1.85×10 ⁹	0.1	1	1.85×10 ⁸	
	¹³¹ I 甲癌	3.7×10 ¹⁰	0.1	1	3.7×10 ⁹	
	合计				3.93×10 ⁹	
	¹⁷⁷ Lu	3.7×10 ¹⁰	0.1	1	3.7×10 ⁹	
	合计				3.7×10 ⁹	
	最大值				3.93×10 ⁹	
注：1.由于核医学核素诊断场所所使用的 ¹⁸ F 和 ⁶⁸ Ga 核素半衰期较短，为保证每批次最后一位患者注射的含 ¹⁸ F 和 ⁶⁸ Ga 核素的放射性药物量为 10mCi，需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，即要考虑放射性药物的实际使用量和购买备药量，也要考虑使用过程中的衰变因素，本项目满负荷情况下计划一天送 2 次药（上午、下午各 1 次），并且根据患者情况，优先使用含 ⁶⁸ Ga 的放射性药物，因此， ¹⁸ F 和 ⁶⁸ Ga 核素的日最大操作量按照 2 倍考虑，则 ¹⁸ F 和 ⁶⁸ Ga 核素的日最大操作量分别为 2.22×10 ¹⁰ Bq 和 7.4×10 ⁹ Bq。 2.对于本项目核医学核素治疗场所， ⁸⁹ Sr 骨癌治疗、 ¹³¹ I 甲测、甲亢治疗和甲癌治疗仅在周一至周五进行，其日等效最大操作量合计为 3.93×10 ⁹ Bq， ¹⁷⁷ Lu 仅在周六、周日进行，其日等效最大操作量为 3.7×10 ⁹ Bq。因此，取较大值作为本项目核医学核素治疗场所的日等效最大操作量来进行分级。						

根据上表并结合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于非密封源工作场所的分级原则，本项目核医学核素诊断场所和核医学核素治疗场所非密封放射性核素日等效最大操作量分别为 3.19×10⁸Bq 和 3.93×10⁹Bq，属于“2×10⁷Bq~4×10⁹Bq”的范围，均为乙级非密封放射性物质工作场所。

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》（GBZ 120-2020）附录 G 核医学的工作场所分类办法，本项目核医学科使用的非密封放射性物质（核素）加权活度见下表。

表 10.1.1-2 核医学科非密封放射性物质加权活度计算结果

工作场所	核素	毒性权重因子	操作性质修正因子	日操作最大活度（Bq）	放射性核素加权活度（Bq）	总加权活度（Bq）	场所分类
核医学核素诊断场所							
储源室	¹⁸ F	1	100	2.22×10 ¹⁰	2.22×10 ⁸	2.46×10 ⁹	II类
	⁶⁸ Ga	1	100	7.4×10 ⁹	7.4×10 ⁷		
	^{99m} Tc	1	100	2.78×10 ¹⁰	2.78×10 ⁸		
	²⁰¹ Tl	1	100	9.25×10 ⁸	9.25×10 ⁶		
	⁶⁷ Ga	1	100	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁷		
	⁹⁰ Sr	100	100	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁹		
分装注射间	¹⁸ F	1	1	2.22×10 ¹⁰	2.96×10 ¹⁰	6.76×10 ¹⁰	I类
	⁶⁸ Ga	1	1	7.4×10 ⁹	7.4×10 ⁹		
	^{99m} Tc	1	1	2.78×10 ¹⁰	2.78×10 ¹⁰		
	²⁰¹ Tl	1	1	9.25×10 ⁸	9.25×10 ⁸		

	^{67}Ga	1	1	1.85×10^9	1.85×10^9		
固废间	^{18}F	1	10	1.11×10^8	1.11×10^7	4.54×10^7	III类
	^{68}Ga	1	10	3.7×10^7	3.7×10^6		
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1	10	2.78×10^8	2.78×10^7		
	^{201}Tl	1	10	9.25×10^6	9.25×10^5		
	^{67}Ga	1	10	1.85×10^7	1.85×10^6		
运动负荷室	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1	1	2.78×10^{10}	2.78×10^{10}	2.78×10^{10}	II类
PET 机房、候诊室、留观室	^{18}F	1	10	1.11×10^{10}	1.11×10^9	1.48×10^9	II类
	^{68}Ga	1	10	3.7×10^9	3.7×10^8		
SPECT 机房、候诊室、留观室	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1	10	2.78×10^{10}	2.78×10^9	2.87×10^{11}	I 类
	^{201}Tl	1	10	9.25×10^8	9.25×10^7		
	^{67}Ga	1	10	1.85×10^7	1.85×10^6		
敷贴室	^{90}Sr	100	100	1.85×10^9	1.85×10^9	1.85×10^9	II类
核医学核素治疗场所							
储源室	^{89}Sr	100	100	4.44×10^8	4.44×10^8	7.63×10^{10}	I 类
	^{131}I 甲测	100	100	3.7×10^6	3.7×10^6		
	^{131}I 甲亢	100	100	1.85×10^9	1.85×10^9		
	^{131}I 甲癌	100	100	3.7×10^{10}	3.7×10^{10}		
	^{177}Lu	100	100	3.7×10^{10}	3.7×10^{10}		
分装间、服药间	^{89}Sr	100	1	4.44×10^8	4.44×10^{10}	7.63×10^{12}	I 类
	^{131}I 甲测	100	1	3.7×10^6	3.7×10^8		
	^{131}I 甲亢	100	1	1.85×10^9	1.85×10^{11}		
	^{131}I 甲癌	100	1	3.7×10^{10}	3.7×10^{12}		
	^{177}Lu	100	1	3.7×10^{10}	3.7×10^{12}		
固废间	^{89}Sr	100	10	4.44×10^8	4.44×10^9	7.63×10^{11}	I 类
	^{131}I 甲测	100	10	3.7×10^6	3.7×10^7		
	^{131}I 甲亢	100	10	1.85×10^9	1.85×10^{10}		
	^{131}I 甲癌	100	10	3.7×10^{10}	3.7×10^{11}		
	^{177}Lu	100	10	3.7×10^{10}	3.7×10^{11}		

病房 (5 间)	¹³¹ I 甲癌	100	1	3.7×10^{10}	3.7×10^{12}	7.4×10^{12}	I 类
	¹⁷⁷ Lu	100	1	3.7×10^{10}	3.7×10^{12}		
甲测室	¹³¹ I 甲测	100	10	3.7×10^6	3.7×10^7	3.7×10^7	III类

注：加权活度=日操作最大活度×核素毒性权重因子÷操作性质修正因子；操作放射性核素的最大加权活度 $>5 \times 10^{10}$ Bq 的为 I 类核医学工作场所，操作放射性核素的最大加权活度 $5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^{10}$ Bq 的为 II 类核医学工作场所，操作放射性核素的最大加权活度 $<5 \times 10^7$ Bq 的为 III 类核医学工作场所。

根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中关于“按不同级别工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求”，各类工作场所要求见下表。

表 10.1.1-3 按不同级别工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求

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

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

本项目核医学科用房保守均按表 10.1.1-3 的 I 类要求，在辐射工作区域的地面采取易清洁、不易渗透的材料，如 PVC 胶；墙面采取易清洁不易渗透的瓷砖，地板和墙壁接缝采用无缝隙、圆角设计；工作台表面采用易清洗的不锈钢材料；含放射性废液的排水管道在满足需要的情况下，尽量缩短管道长度，并做有标记；工作场所应保证良好的通风，设置手套箱并设有独立的排风管道。

③分区原则和区域划分情况

1) 分区原则

为了便于加强管理，切实做好辐射安全防范工作，按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）的要求，在辐射工作场所内划出控制区和监督区，在项目运营期间采取分区管理措施。

控制区：在正常工作情况下控制正常照射或防止污染扩散，以及在一定程度上预防或限制潜在照射，要求或可能要求专门防护手段和安全措施的限定区域。在控

制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平指示。运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可证）和实体屏蔽（包括门锁和联锁装置）限制进出控制区，并定期审查控制区的实际状况，确认是否需要改变该区的防护手段或安全措施，或是更改该区的边界。

监督区：未被确定为控制区，正常情况下不需要采取专门防护手段或安全措施，但要不断检查其职业照射状况的区域。在监督区入口处的合适位置张贴表明监督区的标牌；并定期检查工作状况，确认是否需要防护措施和安全条件，或是否需要更改监督区的边界。

2) 核医学科辐射防护分区管理情况

结合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中相关要求，本项目核医学科辐射防护分区管理情况见表 10.1.1-4 和附图 5-5。

表 10.1.1-4 核医学科辐射防护分区管理情况

场所	控制区	监督区
核医学核素诊断场所	PET/MR 机房、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、患者更衣间、PET 候检室、SPECT 候检室、留观室、运动负荷兼抢救间、分装注射间、储源室、固废间、患者通道、敷贴室、清洁间	缓冲间、淋浴间、控制廊、护士站、走廊、患者走廊、设备间、库房、卫生间及屏蔽墙外 30cm 区域
核医学核素治疗场所	病房（5 间）、走廊、分装间、服药间、储源室、固废间、抢救室、被服衰变间、固废暂存间、保洁间、甲测室	缓冲间、淋浴卫生间、出入院服务间、值班室、保洁间、新风机房及屏蔽墙外 30cm 区域
衰变池	短半衰期衰变池间、长半衰期衰变池间、污泥池（4 个）	管路设备间、楼梯间、前室

（4）工作场所辐射屏蔽防护设计

根据建设单位提供资料，本项目核医学科辐射屏蔽防护设计见下表。

表 10.1.1-5 核医学核素诊断场所辐射屏蔽防护设计

工作场所	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
储源室	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门
固废间	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门
分装注射间	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门

	PET 注射窗	40mmPb 铅玻璃
	SPECT 注射窗	20mmPb 铅玻璃
缓冲间	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
淋浴间	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门
运动负荷兼抢救室	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门
PET 候检室	南侧墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	其余三侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
SPECT 候检室	南侧墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	其余三侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门
留观室	南侧墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	其余三侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
清洁间	四侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门
PET/CT 机房	四侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门（2 扇）	8mmPb 铅防护门
	观察窗	8mmPb 铅玻璃
PET/MR 机房	四侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门（2 扇）	8mmPb 铅防护门
	观察窗	8mmPb 铅玻璃
SPECT/CT 机房	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料
	防护门（2 扇）	6mmPb 铅防护门
	观察窗	6mmPb 铅玻璃
甲测室	四侧墙体	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	4mmPb 铅防护门
敷贴室	四侧墙体	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	4mmPb 铅防护门
患者走廊	四侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
东侧走廊	四侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料

注：1.本项目 PET 候检室上方楼板采用 300mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料作为屏蔽防护措施，其余核医学核素诊断场所控制区上方楼板均采用 130mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料作为屏蔽防护措施；地坪均采用 300mm 混凝土+40mm 硫酸钡防护涂料作为屏蔽防护措施。
2.根据建设单位提供资料，本项目使用的混凝土的密度不小于 2.35g/cm³，实心砖的密度不小于 1.65g/cm³；硫酸钡防护涂料的密度不小于 3.8g/cm³。

表 10.1.1-6 核医学核素治疗场所辐射屏蔽防护设计

工作场所	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
储源室	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
固废间	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
分装间	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
	传递窗	10mmPb 铅玻璃
缓冲间	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	南侧防护门	8mmPb 铅防护门
	北侧防护门	10mmPb 铅防护门
淋浴间	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	6mmPb 铅防护门
服药间	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
被服衰变间	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
保洁间	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
固废室	四侧墙体	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
患者走廊	四侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	10mmPb 铅防护门
病房 1	西侧墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	北侧墙体	480mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	其余两侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门
病房 2~4	北侧墙体	480mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	其余三侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料

	防护门	8mmPb 铅防护门
病房 5	东侧墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	北侧墙体	480mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	其余两侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料
	防护门	8mmPb 铅防护门

注：1.本项目 5 间病房上方楼板和下方地坪采用 400mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料作为屏蔽防护措施，其余核医学核素治疗场所控制区上方楼板采用 130mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料作为屏蔽防护措施，下方地坪采用 180mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料作为屏蔽防护措施。
2.根据建设单位提供资料，本项目使用的混凝土的密度不小于 2.35g/cm³，实心砖的密度不小于 1.65g/cm³；硫酸钡防护涂料的密度不小于 3.8g/cm³。

基于远期核医学科退役后利于场所功能及布局调整，采用上表中辐射屏蔽防护设计方案，既做到选材最优，也能够保证满足屏蔽防护要求和空间利用需求。

根据建设单位提供的机房辐射屏蔽防护设计方案，将本项目 SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房屏蔽体的主要技术参数列表分析，并根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中对 X 射线机房防护设计的技术要求、最小有效使用面积及最小单边长度的要求，对本项目 PET/CT 机房和 SPECT/CT 机房辐射屏蔽防护设计进行对照分析，具体见表 10.1.1-7 和表 10.1.1-8。

表 10.1.1-7 机房辐射屏蔽防护设计对照分析

机房名称	防护设施	屏蔽材料及厚度（总折算铅当量）	《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）要求	符合情况
PET/CT 机房	四侧墙体	240mm 实心砖+60mm 硫酸钡防护涂料（8mmPb）	有用线束及非有用线束方向铅当量均为 2.5mmPb	符合
	顶棚	180mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料（7.89mmPb）		符合
	地坪	180mm 混凝土+40mm 硫酸钡防护涂料（5.89mmPb）		符合
	防护门（2 扇）	内衬 8mm 铅板（8mmPb）		符合
	观察窗	8mmPb 铅玻璃（8mmPb）		符合
SPECT/CT 机房	四侧墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料（6mmPb）		符合
	顶棚	180mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料（7.89mmPb）		符合
	地坪	180mm 混凝土+40mm 硫酸钡防护涂料（5.89mmPb）		符合
	防护门（2 扇）	内衬 6mm 铅板（6mmPb）		符合
	观察窗	6mmPb 铅玻璃（6mmPb）		符合

注：1.本项目使用的实心砖的密度按照不小于 1.65g/cm³ 考虑，根据《放射防护实用手册》（主编赵兰才、张丹枫）表 6.14，得在管电压为 150kV 的情况下，240mm 实心砖等效屏蔽厚度保守折算为 2mmPb；

2.本项目使用的硫酸钡防护涂料的密度不小于 $3.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，根据《放射防护实用手册》（主编赵兰才、张丹枫）表 6.14，得在管电压为 150kV 的情况下，40mm 硫酸钡涂料等效屏蔽厚度保守折算为 4mmPb；60mm 硫酸钡涂料等效屏蔽厚度保守折算为 6mmPb。

3.本项目使用的混凝土的密度按照不小于 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 考虑，根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中附录 C，得在管电压为 150kV（主束）的情况下，180mm 混凝土等效屏蔽厚度保守折算为 1.89mmPb。

表 10.1.1-8 机房规格与标准对照分析

机房名称	拟设置情况		《放射诊断放射防护要求》 （GBZ 130-2020）要求		符合情况
	最小单边长度 （m）	有效使用面积 （ m^2 ）	最小单边长度 （m）	最小有效使用面积 （ m^2 ）	
PET/CT 机房	4.7	36.6	4.5	30	符合
SPECT/CT 机房	4.7	36.6	4.5	30	符合

根据上表可知，本项目 PET/CT 机房和 SPECT/CT 机房有效使用面积、最小单边长度均大于标准要求，其四侧墙体、顶棚、地坪、防护门以及观察窗均采取的辐射屏蔽防护设计并充分考虑了邻室（含楼上及楼下）及周围场所的人员防护与安全，且屏蔽厚度均高于有用线束和非有用线束铅当量防护厚度标准规定值。从 X 射线放射诊断场所的屏蔽方面考虑，本项目 PET/CT 机房和 SPECT/CT 机房的有效使用面积、最小单边长度和防护设施满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关要求。

（5）辐射安全和防护、环保相关设施

①核医学核素诊断场所

1）拟在新建核医学核素诊断场所控制区各房间防护门外设置明显的电离辐射警告标志，警示人员注意安全；实行分区管理，入口处设置明显的监督区和控制区标识。

2）在机房受检者防护门与工作人员防护门上方设置工作状态指示灯，并与防护门联锁，防护门关闭时指示灯为红色，防护门打开时，指示灯灭。

3）在工作场所范围内设置视频监控系统，便于观察受检者的情况、工作场所进出/口情况；PET、SPECT 机房和控制室之间拟安装对讲装置和视频监控，便于工作人员通过视频监控观察患者，通过对讲装置于受检者联系。

4）储源室设置视频监控，实行双人双锁管理，并做好防火、防盗措施。对于核素种类、生产单位、活度、出入库使用及注销等，严格登记建档。出入口安装摄像头、红外报警装置，并入医院安保监控系统。

5）患者进出设置专用通道，防护门均为单向门禁，并在工作场所内设置路线指

引。

②核医学核素治疗场所

1) 拟在新建核医学核素治疗场所控制区各房间防护门外设置明显的电离辐射警告标志，警示人员注意安全；实行分区管理，入口处设置明显的监督区和控制区标识。

2) 在工作场所范围内设置视频监控系统，便于观察受检者的情况、工作场所进出/口情况；分装间和服药间之间拟安装对讲装置和视频监控，便于工作人员通过视频监控观察患者，通过对讲装置于受检者联系。在病房内设置对讲系统，医护人员通过对讲系统通知患者取餐食。

3) 工作人员通过视频及对讲装置对甲癌患者进行查房等医疗活动。当医护人员必须进入专用病房对患者进行救治时，应穿戴个人防护污染用品。

4) 储源室设置视频监控，实行双人双锁管理，并做好防火、防盗措施。对于核素种类、生产单位、活度、出入库使用及注销等，严格登记建档。出入口安装摄像头、红外报警装置，并入医院安保监控系统。

5) 患者进出设置专用通道，防护门均为单向门禁，并在工作场所内设置路线指引。

(6) 防护设施、个人防护用品和监测仪器

根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020)、《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020)中的相关要求，本项目核医学科配置相应的防护设施、个人防护用品和监测仪器，主要配置情况见表 10.1.1-9。

表 10.1.1-9 拟配置的防护设施、个人防护用品和监测仪器一览

序号	种类名称	设置场所	数量	防护
核医学核素诊断场所				
1	保险柜	储源室	1 个	/
2	衰变箱	固废间	2 个	10mmPb
3	PET 手套箱	分装注射间	1 台	40mmPb
4	SPECT 手套箱	分装注射间	1 台	20mmPb
5	PET 注射窗	分装注射间	1 个	40mmPb
6	SPECT 注射窗	分装注射间	1 个	20mmPb
7	注射器防护套	分装注射间	若干	10mmPb

8	注射器防护提盒	分装注射间	2 个	10mmPb
9	铅罐	储源室、分装注射间	若干	¹⁸ F、 ⁶⁸ Ga 为 50mmPb; ^{99m} Tc、 ²⁰¹ Tl、 ⁶⁷ Ga 为 20mmPb
10	活度计	分装注射间	2 台	/
11	铅桶	分装注射间、PET 候检 室、SPECT 候检室、留 观室	若干	10mmPb
12	铅防护衣、铅橡胶 颈套、铅橡胶帽 子、铅防护眼镜	分装注射间、控制廊	若干	0.5mmPb
13	专用长柄工具	敷贴室	1 个	/
14	有机玻璃眼镜/面 罩	敷贴室	1 个	/
15	应急及去污用品	缓冲间	1 套	/
16	放射性污染防护服	缓冲间	若干	/
17	铅防护屏风	PET 机房	2 个	10mmPb
18	铅防护屏风	SPECT 机房、PET 候检 室、SPECT 候检室	若干	4mmPb
19	表面污染监测仪	缓冲间	1 台	/
20	环境辐射巡测仪	缓冲间	1 台	/
21	个人剂量报警仪	人员随身携带	4 台	/
22	个人剂量计	人员随身携带	1 个/人	/
核医学核素治疗场所				
1	保险柜	储源室	2 个	/
2	衰变箱	固废间	4 个	10mmPb
3	手套箱	分装间	1 个	20mmPb
4	传递窗	分装间	1 个	10mmPb
5	注射器防护套	分装间	1 个	4mm 有机玻璃
	移动注射车	服药间		
6	铅罐	储源室、分装间	2 个	⁸⁹ Sr 为 10mm 有机玻璃 +10mmPb; ¹³¹ I 为 50mmPb; ¹⁷⁷ Lu 为 20mmPb
7	自动分碘仪	分装间	1 台	/
8	活度计	分装间	1 台	/
9	铅桶	分装间、服药间、铅桶	7 个	10mmPb
10	剂量测定计	走廊	1 台	/
11	铅防护衣、铅橡胶 颈套、铅橡胶帽	分装间	2 套	0.5mmPb

	子、铅防护眼镜			
12	放射性污染防护服	缓冲间	若干	/
13	表面污染监测仪	缓冲间	1 台	/
14	环境辐射巡测仪	缓冲间	1 台	/
15	个人剂量报警仪	人员随身携带	2 台	/
16	个人剂量计	人员随身携带	1 个/人	/

(7) 放射性药物存放场所的辐射安全措施

①核医学科使用的放射性药物应向厂商按需订购，生产厂商根据医院订购合同，按时定量将放射性药物送至储源室，使用时工作人员从储源室内拿出，连同铅罐包装放置于手套箱内。

②储源室应防火、防盗（保险柜、防盗门、双人双锁、房间内设置视频监控并入科室和医院保卫科监控系统、门口设置红外报警系统和电离辐射警告标志）。

③储源室应定期进行放射防护监测，无关人员不应入内。

④应建立放射性药物的出入库登记制度，贮存、领取、使用放射性药物时，应当进行登记、检查，做到账物相符。

⑤应定期检查放射性药物的实际库存数量及贮存场所。

⑥储源室内设施和措施应满足“六防”的防护要求。

(8) 放射性表面污染控制

①工作场所分区管理和工作人员的防护措施

本项目按照开展临床核医学非密封性放射性同位素的种类及用量，对工作场所进行了划分，从非活性区进出活性工作区需经缓冲间和淋浴间（含淋浴和去污功能），并在缓冲间和淋浴间内设置检测区和消洗设施，检测区内配备表面污染监测仪等检测设备。

工作人员进入放射工作场所均更换服装，穿戴工作衣、裤、帽、鞋、防护口罩、胶质手套及相应个人防护用品。工作人员离开放射工作场所，均进行清洗、更衣、并对手部等体表部位进行表面污染测定，确认未受表面污染后离开。

②工作场所表面污染防护

涉及放射性药物操作的工作场所拟按要求采用易清洗且不易渗透材料（如 PVC 板等），拐角使用弧线处理；地面要求平整光滑，易于清洗，可铺设塑料地坪或涂刷塑料油漆；墙面要求平整光滑，1 米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；工作台面要求平整、光滑、易于清洗。可以铺砌磨光花岗岩板材或不锈钢面板等。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，以尽可能减少表面污染。

放射性药物的操作均在分装注射间/分装间手套箱内进行，手套箱内操作台面要求光滑、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。

（9）人员防护措施

人员主要指本项目辐射工作人员、受检者/患者及本次评价范围内其他人员。

①辐射工作人员的防护

在实际工作中，为了减少辐射工作人员所受到的照射剂量，普遍采用屏蔽防护、时间防护和距离防护。

1) 屏蔽防护：辐射工作场所外围环境中的其他人员主要依托墙体、顶棚、门、窗等实体进行屏蔽防护；为受检者配备铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜等个人防护用品，注射器配备注射器防护套。SPECT 机房和 PET 机房内设置移动铅屏风。

2) 时间防护：工作场所周围设置明显的警示、隔离措施，提示其他人员尽可能减少在辐射工作场所周围的停留时间。

3) 距离防护：设置必要的防护、隔离、警示措施，尽可能增大人员与辐射工作场所之间的防护距离。

4) 本项目核医学所有辐射工作人员均应配备个人剂量计并定期送检，开展职业健康监护并建立个人职业健康监护档案。

②受检者、其他人员的防护

为减少受检者、其他人员的照射剂量，主要采取屏蔽防护、时间防护和距离防护措施。

1) 屏蔽防护：将辐射源安置在专用、固定的工作场所内，通过场所的有效实体屏蔽辐射源产生的有害辐射；为患者配备铅橡胶颈套、铅橡胶帽子等个人防护用品。

2) 时间防护：在满足检查要求的前提下，尽量减少扫描时间，使照射时间最小化。

3) 距离防护：在不影响工作质量的前提下，尽可能增加受检者与射线源的距离，减少受检者的受照剂量。

4) 辐射工作场所外围环境中的其他人员主要依托场所墙体、顶棚、门、窗等实体进行屏蔽防护。工作场所周围设置明显的警示、隔离措施，提示其他人员尽可能减少在辐射工作场所周围的停留时间，增大人员与辐射工作场所之间的防护距离。

5) 应做好患者分类，避免甲测、甲亢和甲癌患者混合服用 ^{131}I 放射性药物。

(10) 操作过程中的防护措施

操作放射性药物时，须在有负压的手套箱内进行，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。分装注射间、分装间、敷贴室拟设铅桶，产生的放射性固废收集于铅桶内专用塑料包装袋，装满后的专用塑料包装袋应密封、不破漏，及时转运暂存于固废间的衰变箱进行衰变。

(11) 敷贴治疗的辐射安全措施

敷贴室设置电离辐射警告标志，室内张贴治疗操作规程及管理制度。敷贴室四周墙体采用实心砖+硫酸钡防护涂料作为屏蔽材料，防护门内衬铅板，且设置门禁系统，可以满足放射防护原则的要求。敷贴治疗中，辐射工作人员应采取有效的个人防护措施，如戴乳胶手套、有机玻璃眼镜或面罩，尽量使用远距离操作工具。医院应对 ^{90}Sr 敷贴器的使用情况等进行登记，治疗结束后由医护人员清点回收，实施敷贴治疗时不应将敷贴源带出治疗室外。

(12) 对服药和注射后病人防护措施

首先告知病人及家属辐射可能带来的危害性，患者要与陪护人员实行隔离，陪护人员不允许在候诊室内驻留，医院需要划定专门的陪护人员等候区并尽量远离非密封源工作场所，同时要求患者在注射后在相应候检室静候，禁止随意走动，呕吐物和排泄物要排入候检室内专用厕所，最终排入相应衰变池组。

(13) 核医学科辐射安全与防护措施与标准符合性分析

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021），本项目核医学科与标准符合性分析见表。

表 10.1.1-10 核医学科与标准符合性分析

标准要求	本项目情况	符合情况
------	-------	------

辐射工作场所分区	4.3.1 应按照 GB18871 的要求将核医学工作场所划分出控制区和监督区，并进行相应的管理。	本项目已按相关要求划分控制区和监督区。	符合
	4.3.4 控制区的入口应设置规范的电离辐射警告标志及标明控制区的标志，监督区入口处应设置标明监督区的标志。	本项目拟在控制区入口设置电离辐射警告标志和控制区的标志；在监督区入口设置标明监督区的标牌。	符合
选址	5.1.1 核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层，设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。	本项目核医学科位于医院肿瘤综合治疗中心一层；设置有独立的人员通道和物流通道。	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。	本项目核医学科不毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，且与非放射性工作场所有明确的分界隔离。	符合
	5.1.3 核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。	本项目核医学科排风口位于肿瘤综合治疗中心楼顶，已尽可能远离周边高层建筑。	符合
布局	5.2.1 核医学工作场所应合理布局，住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置；同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局，控制区应相对集中，高活室集中在一端，防止交叉污染。尽量减小放射性药物、放射性废物的存放范围，限制给药后患者的活动空间。	本项目核医学科拟设置相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。控制区的出入口设置缓冲间和淋浴间，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。控制区内设有给药后患者的专用卫生间。	符合
	5.2.2 核医学工作场所应设立相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开，减少给药后患者对其他人员的照射。注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉，人员与放射性药物通道不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷。		符合
	5.2.3 核医学工作场所宜采取合适的措施，控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动，避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲间，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。		符合
屏蔽要求	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。	本项目均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。	符合
	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。	本项目核医学科屏蔽设计已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。	符合
	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	经表 11 辐射环境影响分析计算，本项目核医学科手套箱、	符合

	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 $25\mu\text{Sv/h}$ 。	注射窗等设备屏蔽厚度满足要求。	
	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 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。	本项目固体放射性废物收集桶、放射性废水管道裸露部分均采取铅屏蔽。	符合
	6.1.8 放射性物质贮存在专门场所内，并应有适当屏蔽。	本项目核医学科设有储源室和固废间，分别用于存放放射性药物和放射性固体废物，其屏蔽厚度满足要求。	符合
场所安全措施要求	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。	本项目核医学科用房室内表面及装备结构均满足要求。	符合
	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。	本项目核医学科拟设置手套箱，并为从事放射性药物操作的工作人员配备必要的防护用品。	符合
	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。	本项目核医学科内拟配备便携式 X- γ 辐射剂量率巡测仪和表面污染仪，如监测表面污染水平超出控制标准，立即采取相应的去污措施。	符合
	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。	本项目核医学科储源室拟设置保险箱用于存放放射性药物，固废间你设置衰变箱用于存放放射性固体废物，并建立台账，及时登记，确保账物相符。	符合
	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。	本项目拟配备药物转移铅罐，容器表面张贴电离辐射警告标志，容器在运送时有适当的固定措施。	符合
	6.2.9 扫描机房外门框上方应设置工作状态指示灯。	本项目机房防护门上方设有工作状态指示灯。	符合
密闭和通风要求	6.3.1 核医学工作场所应保持有良好的通风，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。	本项目核医学核素诊断场所和核素治疗场所产生的废气经由排风井内 4 支单独密闭管道排至肿瘤综合治疗中心楼顶，并高出屋脊排放。排风井由混凝土浇筑，能有效屏蔽放射性废气对其余楼层公众的辐射影响。各排风管道内保持负压，设置止回阀，防止气流倒灌，	符合
	6.3.4 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱、通风橱等密		符合

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

10.1.2 放疗科直线加速器项目安全设施

(1) 工作场所布局

本项目放疗科位于肿瘤综合治疗中心地下一层，新建 2 间直线加速器机房及其配套用房和 1 间模拟定位 CT 机房及其配套用房。机房六面布局见表 10.1.2-1。

表 10.1.2-1 机房六面布局一览

工作场所	方位	周边房间及场所
1 号直线加速器机房	东侧	2 号直线加速器机房
	南侧	准备大厅、控制室、质控室、更衣间和体膜放置间
	西侧	设备用房、排烟机房、补风机房、更衣间和走廊
	北侧	水冷机房
	上方	电梯厅、柴发室、院内道路和绿地
	下方	土层
2 号直线加速器机房	东侧	热水机房
	南侧	准备大厅、控制室、质控室、更衣间和体膜放置间
	西侧	1 号直线加速器机房
	北侧	水冷机房
	上方	柴发室、卫生间、院内道路和绿地
	下方	土层
模拟定位 CT 机房	东侧	控制室
	南侧	走廊
	西侧	走廊
	北侧	走廊
	上方	库房、读片室、走廊和变配电间
	下方	土层

本项目直线加速器机房拟建于医院的地下室内，下方为土层，机房拟采用“L”型迷路，机房与控制室分开并单独设置，机房相邻不涉及儿科病房、产房等特殊人群，且避开人员密集区域满足《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》

（GBZ/T 201.1-2007）中“治疗机房的布局要求”的规定及《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中的选址与布局要求。

本项目模拟定位 CT 机房周边设置了控制室等辅助用房，且避开了人群较多的办公场所，选址靠近放射治疗场所，便于诊疗流程的开展。

综上所述，本项目直线加速器机房和模拟定位 CT 机房平面布局合理可行。

（2）分区原则和区域划分情况

①分区原则

为便于加强管理，切实做好辐射安全防范工作，按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求在辐射工作场所内划出控制区和监督区，在项目运营期间采取分区管理措施。

②放疗科辐射防护分区管理情况

结合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中相关要求，放疗科辐射防护分区管理情况见表 10.1.2-2 和图 10.1.2-1。

表 10.1.2-2 放疗科辐射防护分区管理情况

场所	控制区	监督区
直线加速器机房（2 间）	直线加速器机房内部区域（包含迷路）	直线加速器配套控制室、质控室、准备大厅、热水机房、水冷机房、设备用房、补风机房、走廊和更衣间
模拟定位 CT 机房	模拟定位 CT 机房内部区域	配套控制室

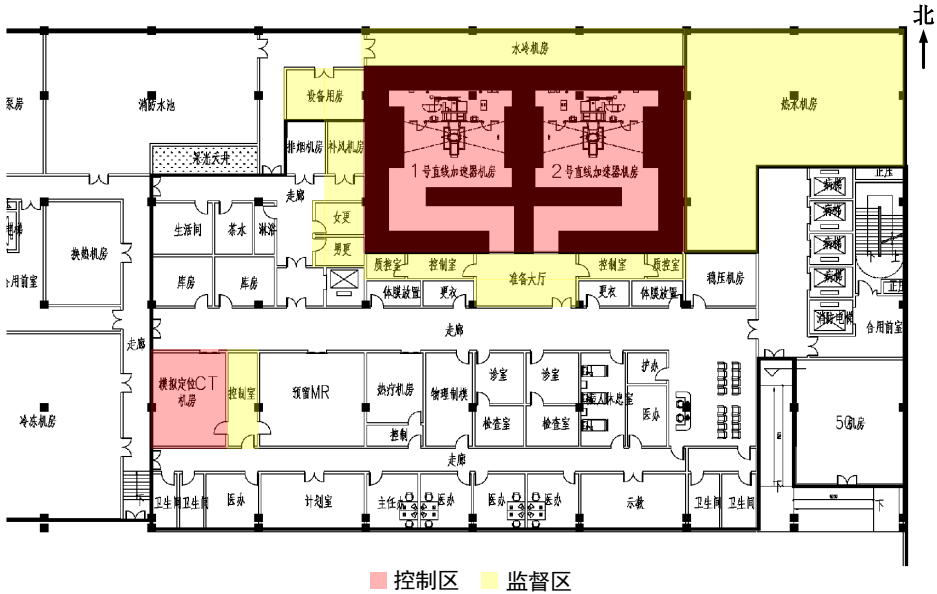


图 10.1.2-1 放疗科辐射防护分区管理情况图

(3) 工作场所辐射屏蔽防护设计

①直线加速器机房屏蔽防护设计

根据设计单位提供资料，机房辐射屏蔽防护设计见表 10.1.2-3。

表 10.1.2-3 本项目直线加速器机房辐射屏蔽防护设计

机房名称	部位		设计参数	
			尺寸	
直线加速器机房 (2 间)	机房几何尺寸		机房南北长 7.0m，东西宽 7.8m（不含迷路），迷路内入口宽 2m，迷路外入口（门洞）宽 1.6m，迷路长 10.1m，迷路宽度 2m，机房总面积 84.8m ² （含迷路），净高 4m。	
	屏蔽墙		屏蔽物及厚度	宽度
	东墙	主屏蔽区	3000mm 钢筋混凝土	4.8m
		次屏蔽区	1800mm 钢筋混凝土	/
	西墙	主屏蔽区	3000mm 钢筋混凝土	4.8m
		次屏蔽区	1800mm 钢筋混凝土	/
	北墙	侧屏蔽区	1800mm 钢筋混凝土	/
	东墙	迷路内墙	1400mm 钢筋混凝土	/
		迷路外墙	1600mm 钢筋混凝土	/
	顶棚	主屏蔽区	2700mm 钢筋混凝土	4.8m
		次屏蔽区	1800mm 钢筋混凝土	/
	机房防护门		20mm 铅板+150mm 含硼聚乙烯板 (防护材料组合从里向外依次为：一层 10mm 铅板+150mm 含硼聚乙烯板+一层 10mm 铅板)	/

注：1.根据建设单位提供资料，钢筋混凝土密度不小于 2.35g/cm³；含硼聚乙烯含硼量不小于 10%。
2.本项目 2 间直线加速器机房左右对称布置，1 号直线加速器机房的东墙与 2 号直线加速器机房的西墙共用，其余屏蔽防护设计均相同。

根据表 11 环境影响分析，本项目直线加速器机房的辐射屏蔽防护措施能够使机房外的辐射剂量率均小于机房外各关注点的导出剂量率参考控制水平，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中辐射屏蔽相关要求。因此，机房屏蔽防护设计基本合理。

②机房电缆布设及管线屏蔽补偿

直线加速器机房与控制室操作台之间的各种电缆管线，室内部分以地沟形式在地坪以下布设。穿墙部分位于迷路外墙，穿墙管道呈“∩”型穿墙，下沉后穿越屏蔽墙到达控制室，并与控制台与电气控制系统连接，通过多次折返的电缆沟设计和下沉地面穿越屏蔽墙的设计，增加了射线的散射次数和衰减，从而保证不减弱屏蔽

墙体的屏蔽效果。

其他所有电、水、气管、物理测试管线布设必须符合辐射屏蔽防护要求，如在防护墙体设置开关箱等嵌入式电气设备，要在箱体后补充相应的屏蔽防护措施。

本项目直线加速器机房电缆沟布设见图 10.1.2-2，电缆沟穿墙示意图 10.1.2-3。

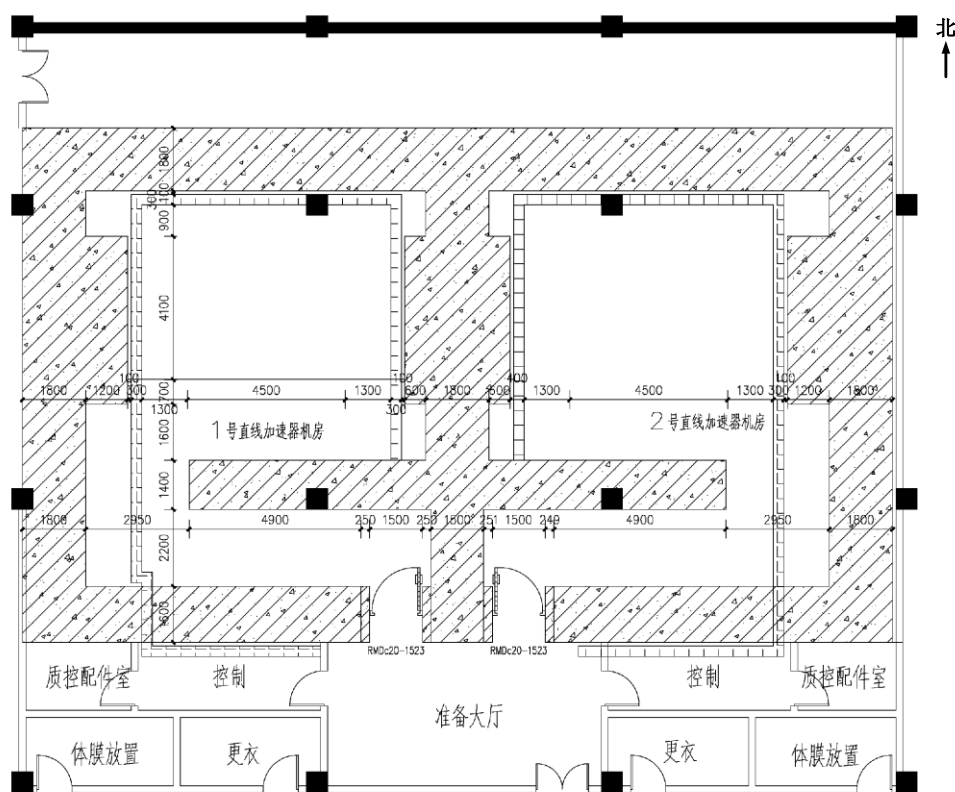


图 10.1.2-2 直线加速器机房电缆布设图

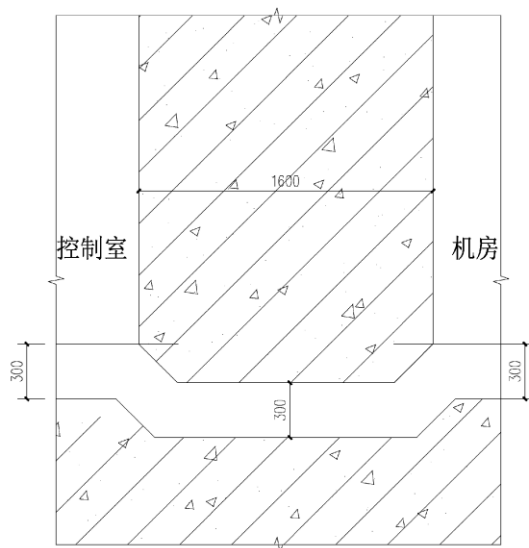


图 10.1.2-3 直线加速器机房电缆沟穿墙示意图

③机房通风设计及风管屏蔽补偿

本项目直线加速器机房设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，拟在机房内设置 2 个进风口，2 个排风口，排风管底部（排风口）离地 30cm，进风口位于机房吊顶，进风口与排风口为对角设置，机房内废气经风井排至肿瘤综合治疗中心楼顶，并高出屋脊排放，不属于人流较大的区域。直线加速器机房风管布置示意图见图 10.1-4。

拟安装排风机的有效排风量不小于 $1500\text{m}^3/\text{h}$ ，机房体积约为 340m^3 ，机房换气次数大于 4 次/h，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中放射治疗机房通风换气次数应不小于 4 次/h 的要求。

直线加速器机房风管布置示意图 10.1.2-4。

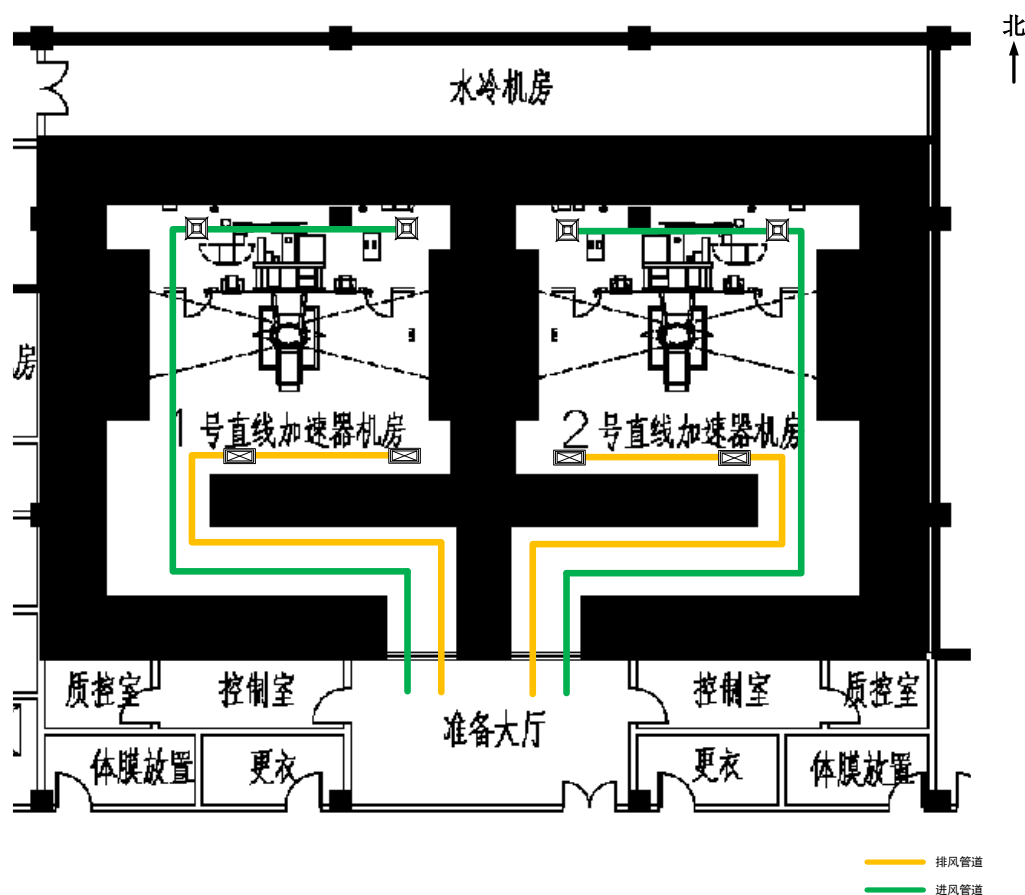


图 10.1.2-4 直线加速器机房风管布置示意图

风管沿着机房到达迷路防护门上方，穿墙部分采取了多次折弯的设计，穿墙部分管道采用 10mm 铅板+50mm 含硼聚乙烯包裹，射线经过了迷路内墙的阻挡、迷路的散射等，不会直接照向风管穿墙区域。直线加速器机房风管穿墙处示意图如下。

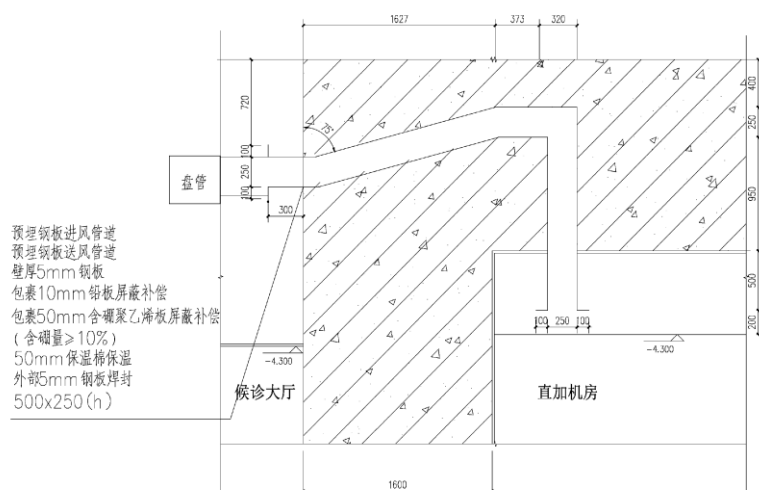


图 10.1.2-5 直线加速器机房风管穿墙处示意图

④模拟定位 CT 机房屏蔽防护设计

根据建设单位提供的机房辐射屏蔽防护设计方案，将本项目模拟定位 CT 机房屏蔽体的主要技术参数列表分析，并根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中对 X 射线机房防护设计的技术要求、最小有效使用面积及最小单边长度的要求，对本项目模拟定位 CT 机房辐射屏蔽防护设计进行对照分析，具体见表 10.1.2-4、表 10.1.2-5。

表 10.1.2-4 机房辐射屏蔽防护设计对照分析

机房名称	防护设施	屏蔽材料及厚度（总折算铅当量）	《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）要求	符合情况
模拟定位 CT 机房	四侧墙体	240mm 实心砖+20mm 硫酸钡防护涂料（4mmPb）	有用线束及非有用线束方向铅当量均为 2.5mmPb	符合
	顶棚	250mm 混凝土+20mm 硫酸钡防护涂料（4.5mmPb）		符合
	防护门（2 扇）	内衬 4mm 铅板（4mmPb）		符合
	观察窗	4mmPb 铅玻璃（4mmPb）		符合

注：1.本项目使用的实心砖的密度按照不小于 1.65g/cm³ 考虑，根据《放射防护实用手册》（主编赵兰才、张丹枫）表 6.14，保守按管电压为 150kV 的情况下，240mm 实心砖等效屏蔽厚度折算为 2mmPb。
2.根据设计单位提供资料，本项目使用的硫酸钡防护涂料的密度不小于 3.8g/cm³，20mm 硫酸钡涂料等效屏蔽厚度均折算为 2mmPb。
3.本项目使用的混凝土的密度按照不小于 2.35g/cm³ 考虑，根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中附录 C，保守按管电压为 150kV（有用线束）的情况下，250mm 混凝土等效屏蔽厚度折算为 2.5mmPb。

表 10.1.2-5 机房规格与标准对照分析

机房名称	拟设置情况		《放射诊断放射防护要求》 (GBZ 130-2020) 要求		符合 情况
	最小单边长度 (m)	有效使用面积 (m ²)	最小单边长度 (m)	最小有效使用 面积 (m ²)	
模拟定位 CT 机房	5.4	34.5	4.5	30	符合

根据上表可知，本项目模拟定位 CT 机房有效使用面积、最小单边长度均大于标准要求，其四侧墙体、顶棚、地坪、防护门以及观察窗均采取的辐射屏蔽防护设计并充分考虑了邻室（含楼上及楼下）及周围场所的人员防护与安全，且屏蔽厚度均高于有用线束和非有用线束铅当量防护厚度标准规定值。从 X 射线放射诊断场所的屏蔽方面考虑，本项目模拟定位 CT 机房的有效使用面积、最小单边长度和防护设施满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关要求。

（4）辐射安全和防护、环保相关措施

①设备固有安全性

本项目直线加速器拟购于正规厂家，采用目前较先进的技术，设备各项安全措施齐备，本身具备多种安全防护措施。

1) 控制台上的显示装置可显示辐射类型、标称能量、照射时间、吸收剂量、治疗方式等参数，操作人员可以随时了解设备运行情况。

2) 剂量监测与治疗控制安全联锁。为保证病人治疗剂量准确，不致出现超剂量照射，系统设置了治疗剂量联锁、治疗时间联锁和治疗中旋转机架角度联锁。当治疗剂量、时间及治疗机头旋转角度其中之一到达设定值时，联锁装置会自动停止照射。

3) 运动使能开关。为防止工作人员误操作造成事故，在手控盒两侧设置了运动使能开关，只有当左右两侧的开关同时按下时才有可能对机器运动部件进行启动和控制。

4) 急停按钮。治疗床旁设置有急停按钮，当发现异常后，按下急停按钮，机器将自动切断主电源。

5) 剂量测试系统。在控制系统主菜单中有“剂量系统测试”部分，可以随时了解病人剂量情况。

6) 密码设置。设置有密码，操作密码只有具体操作人员掌握，只有输入正确的密码后才可能进行操作和参数的修改等。

7) 系统操作联锁。直线加速器设置了硬件联锁,在非正常操作或在异常情况下,可以停止机器运行或切断电源,以备特殊情况下应急之用。

②辐射防护设施设计

1) 电离辐射警告标志、工作状态指示灯:机房出入口处设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯。

2) 视频装置、双向交流对讲系统:控制室应设有在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷路区域情况的视频装置,并设置双向交流对讲系统,以便操作者和患者之间进行双向交流。

3) 固定式辐射剂量监测仪(带有报警功能):机房内迷路内入口处设置带有异常情况下报警功能的固定式辐射剂量监测仪,显示单元位于控制室内的主机面板上,对监测点进行实时剂量率监测和报警。仪器有声光报警,以警示现场工作人员,确保工作人员安全。

4) 门-机联锁装置、紧急开门装置:机房防护门与直线加速器联锁,防护门开启或意外开启状态下,无法出束或自动停止出束。防护门采用电动移门,设置有室内紧急开门装置,紧急状况下,能从机房内开门,并设有防夹伤功能。

5) 急停按钮:在直线加速器机房控制室控制台上、迷路出入口及防护门内侧、机房四周墙壁等位置设置多个急停按钮,急停按钮相互串联,急停按钮为红色按钮,高度约 1.2m,易于辨认,人员可以在事故情况下按下急停按钮,按下后不能自动复位。急停按钮设置满足应急需求,位置和数量合理可行。

本项目直线加速器机房安全逻辑示意和辐射防护设施设计见图 10.1.2-6 和图 10.1.2-7。

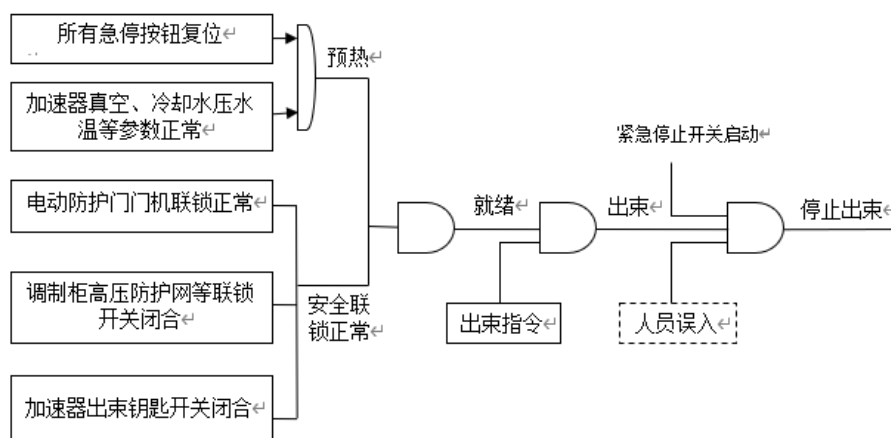


图 10.1.2-6 直线加速器机房安全逻辑示意图

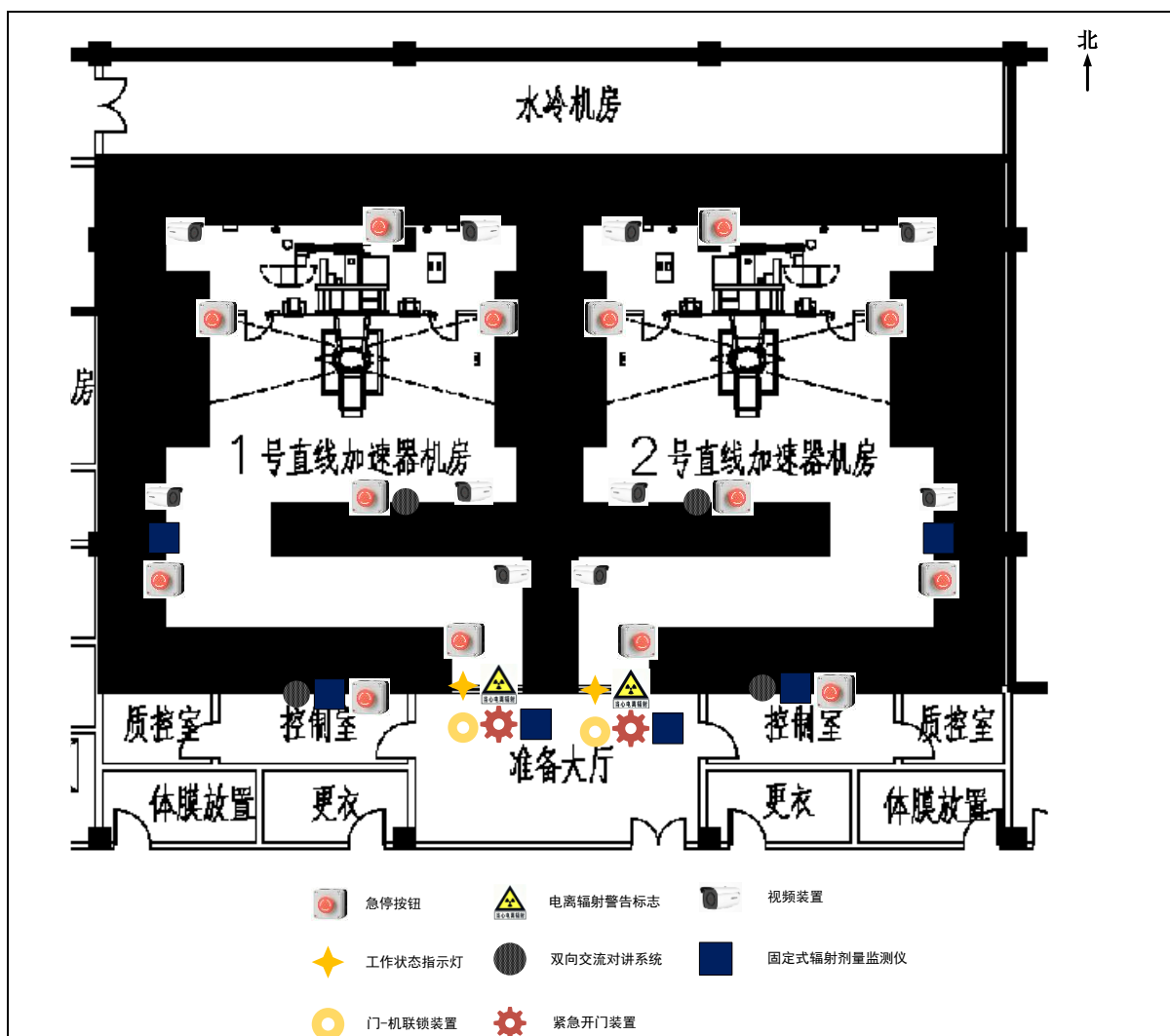


图 10.1.2-7 直线加速器机房辐射防护设施设计图

③其他防护措施

1) 本项目直线加速器工作人员为新聘辐射工作人员，医院拟为每人配备个人剂量计，拟配备个人剂量报警仪 2 台，工作人员在工作期间应正确佩戴个人剂量计，在进入机房时应持个人剂量报警仪；

2) 医院拟为放疗科配备 1 台便携式 X- γ 辐射剂量率巡测仪和 1 台中子剂量仪；

3) 操作室上张贴相应的辐射工作制度、操作规程、岗位职责等；

4) 受检者出入口门外应设置黄色警戒线，告诫无关人员请勿靠近。

本项目直线加速器机房辐射安全与防护措施符合性分析见下表。

表 10.1.2-7 直线加速器机房辐射安全与防护措施符合性分析

《放射治疗辐射安全与防护要求》 (HJ 1198-2021) 中要求	本项目设计情况	符合 情况
放射治疗室应设置室内紧急开门装置，防护门应设置防夹伤功能；放射治疗室应设置门-机联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束照射，出束状态下开门停止出束或放射源回到治疗设备的安全位置。	机房防护门与直线加速器联锁，防护门开启或意外开启状态下，无法出束或自动停止出束。防护门采用电动平开门，设置有室内紧急开门装置，紧急状况下，能从机房内开门，并设有防夹伤功能。	符合
放射治疗工作场所，应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等。	机房出入口处设置电离辐射警告标志、中文警示说明和工作状态指示灯，其中，工作状态指示灯与直线加速器联锁，显示其工作状态。	符合
应在放射治疗设备的治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁内设置急停按钮。控制室应设有在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷路区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统。	拟设计安装急停按钮，以便应急状态下停止出束，急停按钮分布于控制室控制台上、治疗床侧、机房内墙上、迷路墙上等位置，便于机房内人员观察到且易于触发。设置视频装置和双向交流对讲系统对讲系统。	符合
医用电子直线加速器治疗室（一般在迷路的内入口处）应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内或机房门附近。	机房内迷路内入口处设置带有异常情况下报警功能的固定式辐射剂量监测仪。	符合

根据上表可知，本项目直线加速器机房安全防护设施满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中相关要求。

④模拟定位 CT 的辐射安全措施

- 1) 机房内布局要合理，避免有用线束直接照射门、窗和管线口位置。
- 2) 控制室上张贴相应的各项规章制度、操作规程。
- 3) 机房门外设电离辐射警告标志，门上方设醒目的工作状态指示灯，灯箱处设警示语句；候诊区设放射防护注意事项告知栏。机房门设有闭门装置，工作状态指示灯能与机房门有效关联。
- 4) 所有辐射工作人员必须配备个人剂量计。
- 5) 机房拟采用动力通风装置进行通风，排放口均设置于机房吊顶，保证机房内有良好的通风。设备管线等均拟以地沟穿过墙体，地沟上盖钢板。
- 6) 在满足诊断要求的前提下，在每次使用射线装置进行诊断之前，根据诊断要求和病人实际情况制定最优化的诊断方案，选择合理可行尽量低的射线照射参数，以及尽量短的曝光时间，减少工作人员和相关公众的受照时间，也避免病人受到额外剂量的照射。

7) 机房应配备相应的防护用品与辅助防护设施, 其配备要求需按照《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 的要求进行配备。

表 10.1.2-8 个人防护用品和辅助防护设施配置要求

场所 类型	工作人员		患者和受检者	
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施
CT	—	—	铅橡胶性腺防护围裙(方形)或方巾、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子各 1 件	—

10.2 三废的治理

10.2.1 核医学科

本项目核医学科使用非密封放射性物质过程中会产生放射性废气、废液及固体废物, 医院拟采取以下三废的治理措施。

(1) 放射性废液

本项目核医学科运行时产生的放射性废液主要为核素操作人员清洗或去污废水、患者候检、留观或住院期间产生的如厕废水以及工作场所清洗废水。

核医学科设有 2 组专门的放射性废液衰变池, 用于收集核医学科运行过程中可能产生的放射性废液, 通过暂存衰变满足相关标准要求后, 再排入医院污水处理系统进一步处理, 对周围环境影响较小。

①衰变池

本项目核医学衰变池组为成品不锈钢衰变池, 拟设置在核医学科北侧地下衰变池间内。核医学核素诊断场所短半衰期衰变池组内设置有 2 个污泥池+3 个相同体积的并联衰变池, 单个衰变池有效容积为 13m^3 , 总有效容积为 39m^3 , 采用“槽式”排放, 通过阀门切换并联运行。

核医学核素治疗场所长半衰期衰变池组内设置有 2 个污泥池+4 个相同体积的并联衰变池, 单个衰变池有效容积为 75m^3 , 总有效容积为 300m^3 , 采用“槽式”排放, 通过阀门切换并联运行。

衰变池间拟设置电离辐射警告标志和中文警示说明。衰变池间四侧墙体均采用 300mm 混凝土, 顶部均为 200mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料, 下方为土层, 各防护门均内衬 6mm 厚铅板。

每个衰变池均设有人员检修井, 检修井由盖板封闭, 便于衰变池自动控制系统、衰变池池体、水泵、管道维修及监督检查。衰变池设有液位传感器和压力传感

器，自动切换废水收集和排放。每个衰变池均设有人工取样口，并设有阈值报警装置。

②放射性废液收集管道

核医学科产生的放射性废液通过专门的管道进行统一收集，并经管道排入相应的衰变池内。核医学科放射性废液管道均要求抗酸碱、耐腐蚀并有一定防辐射功能。本项目核衰变池间上方设有混凝土盖板和电离辐射警告标志。

本项目核医学科排水管线走向示意图见图 5-6。

③放射性废液处理流程

衰变池采用“槽式”排放，通过阀门切换并联运行，进水管上设电磁阀，出水采用潜水泵压力排出。运行时先关闭第二、三池进水管上电磁阀，打开第一池进水管上的电磁阀，使废水进入第一池；待第一池达到设计液位后，打开第二池进水管上的电磁阀，关闭第一池进水管上的电磁阀，使废水进入第二池；按照同样的操作方法，使废水依次进入第三池、第四池；待第三（四）池达到设计液位后，关闭第三（四）池进水管上的电磁阀，打开第一池潜水泵，将经过衰变后的废水排入医院污水处理站进一步处理，医院污水处理站经处理达标后排放纳入市政污水管网。3 个衰变池分别按照上述程序，轮流反复交替使用。

核医学核素诊断场所短半衰期衰变池间内 3 个衰变池，核医学核素治疗场所长半衰期衰变池间内 4 个衰变池分别按照上述程序，轮流反复交替使用。

衰变池进水管上的电磁阀和衰变池排水泵采用 PLC 可编程控制器自动控制。衰变池组的自动化控制系统除能自动控制电磁阀开关及自动启停排水泵外，还能实时监控池内液位状态，水位超过设定正常水位能自动报警，各衰变池的液位、衰变时间自动显示在电脑的显示屏和控制柜的文本显示器上，并可随时查阅或打印当前和历史的相关记录。衰变池的管理应做到以下几个方面：

1) 衰变池池底和池壁应坚固、耐酸碱腐蚀和无渗透性，放射性衰变池应加以密封，应有防止废液溢出、污泥硬化淤积、堵塞进出水口、废液衰变池超压、防水、防渗和防漏的措施。

2) 规定在核医学科内给药后患者使用专用厕所，不得使用其他厕所。

3) 专用厕所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。

4) 每个衰变池设置人工取样口, 以方便取样检测。

5) 衰变池顶板上方设置电离辐射警告标志和中文警示说明。

6) 建立放射性废液的暂存和处理台账, 详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废水产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。

(2) 放射性废气

本项目核医学科共设有 4 条排风管道, 1 号管道连接 5 间核素治疗病房; 2 号管道连接甲测室、淋浴卫生间、储源室 (2 间)、缓冲间 (2 间)、分装间、服药间、固废间 (2 间)、抢救室、走廊、固废暂存间、保洁间、被服衰变间、分装注射间、淋浴间、运动负荷兼抢救室; 3 号管道连接 PET/MR 机房、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、患者更衣间、PET 候检室、SPECT 候检室、留观室、清洁间、走廊; 4 号管道的设计排风量为 $2000\text{m}^3/\text{h}$, 排放风速不低于 0.5m/s , 单独连接 3 个手套箱。

本项目核医学科产生的废气经由排风井内 4 支单独密闭管道排至肿瘤综合治疗中心楼顶, 并高出屋脊排放。排风井由混凝土浇筑, 能有效屏蔽放射性废气对其余楼层公众的辐射影响。各排风管道内保持负压, 设置止回阀, 防止气流倒灌, 手套箱顶部和排风口均设活性炭吸附装置。

本项目核医学科排风管线走向示意图见附图 5-7。

(3) 放射性固体废物

本项目核医学科运行时产生的放射性固体废物主要为一次性杯子、一次性注射器、针头、手套、药棉、纱布、破损杯皿、擦拭污染地面的物品和废气处理更换的废活性炭等。

医院拟将上述放射性固体废物收集于核医学科铅废物桶内, 并使用专用塑料包装袋包装, 包装袋显著位置要标明废物类型、收贮时间、核素种类及数量等内容。装满后的包装袋应密封、不破漏, 每袋重量不超过 20kg , 将上述放射性固体废物及时转运暂存于固废间的衰变箱 (10mmPb) 内, 不同类别废物分开存放。所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天, 所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍, 含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天。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 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$, 可对废物清洁解控并作为医疗废物 (活性炭作为危险废物) 进行处理。

更换的废 ^{68}Ge 和 ^{90}Sr 放射源应当按照废旧放射源返回合同规定，将废旧放射源交回生产单位或者返回原出口方。

10.2.2 放疗科直线加速器和模拟定位 CT

本项目放疗科直线加速器和模拟定位 CT 运行时无放射性废气、废液产生。

(1) 废气

本项目直线加速器机房运行时会产生少量臭氧和氮氧化物，机房设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，设置有 2 个进风口和 2 个排风口，呈“上进下出，对角设置”，机房内废气最终通过肿瘤综合治疗中心楼顶排至大气环境。拟安装排风机的有效排风量约为 $1500\text{m}^3/\text{h}$ ，机房体积约为 340m^3 ，故机房换气次数大于 4 次/h。臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，对周围环境影响较小。

本项目模拟定位 CT 机房拟设置动力通风装置，进风口及排风口拟设置于机房吊顶，保证机房内有良好的通风。产生的少量臭氧和氮氧化物经通排风系统收集后最终从肿瘤综合治疗中心楼顶排放。

(2) 放射性固体废物

本项目对于直线加速器靶损坏或退役时产生的活化后的废靶，由设备厂家回收最终送交有资质的单位回收处置，医院不暂存，正常情况下不会对环境造成明显影响。

10.2.3 射线装置报废管理要求

按照《浙江省辐射环境管理办法》要求，本项目 PET/CT、SPECT/CT、直线加速器和模拟定位 CT 需要报废处理时，建设单位应当对射线装置内的高压射线管进行拆解，并报颁发辐射安全许可证的生态环境主管部门核销。

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

11.1.1 施工期环境影响分析

见《舟山医院肿瘤综合治疗中心建设工程环境影响报告表》。

11.1.2 设备安装调试期环境影响分析

设备的安装调试应请设备厂家专业人员进行，院方不得自行安装及调试设备。在设备安装调试阶段，应加强辐射防护管理，在此过程中应保证各屏蔽体屏蔽到位，关闭防护门，在各个机房门外设立电离辐射警告标志，不允许其他无关人员进入机房所在区域，防止辐射事故发生。由于各设备的安装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是可接受的。

11.2 运行阶段对环境的影响

11.2.1 核医学科运行阶段环境影响分析

(1) β 放射性表面污染环境影响分析

① β 放射性表面污染类比分析

为了解本项目核医学科运行时的 β 表面污染影响，类比对象引用江南大学附属医院（无锡市第四人民医院）新院区新建放射诊疗及迁建 1 台回旋加速器项目竣工环境保护验收监测数据（报告编号为 GABG-HJ22380068 和 GABG-HJ22380068-1），由于 β 表面污染与核素种类和核素日等效操作量有关，与工作场所屏蔽防护无关。项目可比性分析详见表 11.2.1-1，类比对象 β 表面污染监测结果详见表 11.2.1-2、表 11.2.1-3 和表 11.2.1-4。

表 11.2.1-1 类比对象可比性分析

核素		类比项目（江南大学附属医院）	本项目
^{18}F	日等效最大操作量（Bq）	1.48×10^7	1.11×10^7
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	日等效最大操作量（Bq）	3.70×10^7	2.78×10^7
^{131}I	日等效最大操作量（Bq）	3.7×10^9	3.7×10^9

注： ^{131}I 为核素诊断场所使用核素。

表 11.2.1-2 江南大学附属医院非密封放射性物质（ ^{18}F ）工作场所 β 表面污染监测结果

监测场所	序号	监测点位置		检测结果（Bq/cm ² ）
PET 诊断区域	1	PET/CT 注射室	墙面	<0.12
	2		地面	<0.12

	3		门表面	<0.12
	4		通风柜表面	0.84
	5		椅子表面	<0.12
	6		洗手池表面	<0.12
	7		注射台表面	2.48
	8		放射性废物桶表面	<0.12
	9		推车表面	<0.12
	10		医疗废物桶表面	<0.12
	11	源库	地面	<0.12
	12		墙面	<0.12
	13		门表面	<0.12
	14		保险柜表面	<0.12
	15	废物间	地面	<0.12
	16		墙面	<0.12
	17		门表面	<0.12
	18		放射废物桶表面	<0.12
	19		医疗废物桶表面	<0.12
	20		水池表面	<0.12
	21	PET/CT 候检室 1	地面	<0.12
	22		墙面	<0.12
	23		门表面	<0.12
	24		椅子表面	<0.12
	25		凳子表面	<0.12
	26		垃圾桶表面	<0.12
	27		洗手间地面	<0.12
	28		洗手池墙面	<0.12
PET 诊断 区域	29	PET/CT 候检室 1	洗手间门表面	<0.12
	30		便池表面	0.44
	31		洗手池表面	<0.12
	32		洗手间垃圾桶表面	<0.12
	33	PET/CT 候检室 2	地面	<0.12
	34		墙面	<0.12
	35		门表面	<0.12

PET 诊断区域	36	PET/CT 候检室 3	垃圾桶表面	<0.12
	37		椅子表面	<0.12
	38		凳子表面	<0.12
	39		洗手间地面	<0.12
	40		洗手池墙面	<0.12
	41		洗手间门表面	<0.12
	42		便池表面	0.61
	43		洗手池表面	0.16
	44		洗手间垃圾桶表面	<0.12
	45	PET/CT 候检室 3	地面	<0.12
	46		墙面	<0.12
	47		门表面	<0.12
	48		垃圾桶表面	<0.12
	49		椅子表面	<0.12
	50		凳子表面	<0.12
	51		洗手间地面	<0.12
	52		洗手池墙面	<0.12
	53		洗手间门表面	<0.12
	54		便池表面	<0.12
	55		洗手池表面	4.1
	56		洗手间垃圾桶表面	<0.12
	57	PET/CT 候检室 4	地面	<0.12
	58		墙面	<0.12
	59		门表面	<0.12
	60		垃圾桶表面	<0.12
	61		椅子表面	<0.12
	62		凳子表面	<0.12
	63		洗手间地面	<0.12
	64		洗手池墙面	<0.12
	65		洗手间门表面	<0.12
	66		便池表面	0.31
	67		洗手池表面	0.18
	68		洗手间垃圾桶表面	<0.12

	69	PET/CT 候检室 5	地面	<0.12
	70		墙面	<0.12
	71		门表面	<0.12
	72		垃圾桶表面	<0.12
	73		椅子表面	<0.12
	74		凳子表面	<0.12
	75		洗手间地面	<0.12
	76		洗手池墙面	<0.12
	77		洗手间门表面	<0.12
	78		便池表面	<0.12
	79		洗手池表面	0.14
	80		洗手间垃圾桶表面	<0.12
	81	PET/CT 候检室 6	地面	<0.12
	82		墙面	<0.12
	83		门表面	<0.12
	84		垃圾桶表面	<0.12
PET 诊断 区域	85	PET/CT 候检室 6	椅子表面	<0.12
	86		凳子表面	<0.12
	87		洗手间地面	<0.12
	88		洗手池墙面	<0.12
	89		洗手间门表面	<0.12
	90		便池表面	4.5
	91		洗手池表面	<0.12
	92		洗手间垃圾桶表面	<0.12
	93	病人通道	地面	<0.12
	94		墙面	<0.12
	95		门表面	<0.12
	96		垃圾桶表面	<0.12
	97		饮水机表面	<0.12
	98	PET/CT 检查室 2	地面	<0.12
	99		墙面	<0.12
	100		门表面	<0.12
	101		诊断床表面	<0.12

	102		推车表面	<0.12
	103	PET/CT 控制室	地面	<0.12
	104		墙面	<0.12
	105		门表面	<0.12
	106		桌面	<0.12
	107		椅面	<0.12
	108		铅玻璃观察窗表面	<0.12
	注：仪器检出限为 0.12Bq/cm²。			

表 11.2.1-3 江南大学附属医院非密封放射性物质（^{99m}Tc）工作场所周围辐射水平监测结果

监测场所	序号	监测点位置		检测结果（Bq/cm ² ）
SPECT 诊断区域	1	SPECT-CT 注射室	通风柜表面	<0.12
	2		凳子表面	<0.12
	3		椅子表面	0.34
	4		医疗废物桶表面	<0.12
	5		注射台表面	<0.12
	6		门表面	<0.12
	7		地面	<0.12
	8		墙面	<0.12
	9		铅废物桶表面	<0.12
	10	SPECT-CT 注射后候诊室	地面	<0.12
	11		墙面	<0.12
	12		座椅	<0.12
	13		垃圾桶表面	<0.12
	14		门表面	<0.12
	15		饮水机表面	<0.12
	16	男卫生间	地面	<0.12
	17		墙面	<0.12
	18		门表面	<0.12
	19		便池表面	3.0
	20		洗手池墙面	0.13
	21		垃圾桶表面	<0.12
	22	女卫生间	地面	<0.12
	23		墙面	<0.12

	24		门表面	<0.12
	25		便池表面	2.2
	26		洗手池墙面	0.23
	27		垃圾桶表面	<0.12
SPECT 诊 断区域	28	患者通道	地面	<0.12
	29		墙面	<0.12
	30		门表面	<0.12
	31		椅子表面	<0.12
	32	SPECT-CT 检查 室 1	地面	<0.12
	33		墙面	<0.12
	34		门表面	<0.12
	35		诊断床表面	<0.12
	36		凳子表面	<0.12
	37		柜表面	<0.12
	38	卫生通过间	地面	<0.12
	39		墙面	<0.12
	40		淋浴表面	<0.12
	41	SPECT-CT 操作 室	地面	<0.12
	42		墙面	<0.12
	43		桌子表面	<0.12
	44		椅子表面	<0.12
	45		铅玻璃观察窗表面	<0.12
注：仪器检出限为 0.12Bq/cm ² 。				

表 11.2.1-4 江南大学附属医院非密封放射性物质 (¹³¹I) 工作场所 β 表面污染监测数据

监测场所	序号	监测点位置		检测结果 (Bq/cm ²)
核素治疗区域	1	给药间	通风柜表面	<0.05
	2		门表面	<0.05
	3		门把手表面	<0.05
	4		铅废物桶表面	<0.05
	5		地面	<0.05
	6		墙面	<0.05
	7		给药窗表面	<0.05
	8	抢救室	地面	<0.05

核素治疗 区域	9		墙面	<0.05
	10		门表面	<0.05
	11		门把手表面	<0.05
	12		床表面	<0.05
	13		柜子表面	<0.05
	14		洗手池表面	<0.05
	15	清洗污被暂存区	地面	<0.05
	16		墙面	<0.05
	17		门表面	<0.05
	18		门把手表面	<0.05
	19		洗手池表面	<0.05
	20	患者通道	地面	<0.05
	21		墙面	<0.05
	22		门表面	<0.05
	23		门把手表面	<0.05
	24		电梯门表面	<0.05
	25	甲癌病房 1	地面	<0.05
	26		墙面	<0.05
	27		门表面	<0.05
	28		门把手表面	<0.05
核素治疗 区域	29	甲癌病房 1	床表面	<0.05
	30		柜子表面	<0.05
	31		洗手间墙面	<0.05
	32		洗手间地面	<0.05
	33		洗手池表面	<0.05
	34		便池表面	0.25
	35		洗手间门表面	<0.05
	36		洗手间门把手表面	<0.05
	37		废物桶表面	<0.05
	38	甲癌病房 2	地面	<0.05
	39		墙面	<0.05
	40		门表面	<0.05
	41		门把手表面	<0.05

	42		床表面	<0.05
	43		柜子表面	<0.05
	44		洗手间地面	<0.05
	45		洗手间墙面	<0.05
	46		洗手池表面	<0.05
	47		便池表面	<0.05
	48		洗手间门表面	<0.05
	49		洗手间门把手表面	<0.05
	50		废物桶表面	<0.05
	51	甲癌病房 3	地面	<0.05
	52		墙面	<0.05
	53		门表面	<0.05
	54		门把手表面	<0.05
	55		床表面	<0.05
	56		柜子表面	<0.05
	57		洗手间地面	<0.05
核素治疗 区域	58	甲癌病房 3	洗手间墙面	<0.05
	59		洗手池表面	<0.05
	60		便池表面	<0.05
	61		洗手间门表面	<0.05
	62		洗手间门把手表面	<0.05
	63		废物桶表面	<0.05
	64	甲癌病房 5	地面	<0.05
	65		墙面	<0.05
	66		门表面	<0.05
	67		门把手表面	<0.05
	68		床表面	<0.05
	69		柜子表面	<0.05
	70		洗手间地面	<0.05
	71		洗手间墙面	<0.05
	72		洗手池表面	<0.05
	73		便池表面	<0.05
	74		洗手间门表面	<0.05

	75		洗手间门把手表面	<0.05	
	76		废物桶表面	<0.05	
	77		地面	<0.05	
	78	甲癌病房 6	墙面	<0.05	
	79		门表面	<0.05	
	80		门把手表面	<0.05	
	81		床表面	<0.05	
	82		柜子表面	<0.05	
	83		洗手间地面	<0.05	
	84		洗手间墙面	<0.05	
	85		洗手池表面	<0.05	
	86		便池表面	<0.05	
	核素治疗 区域		87	甲癌病房 6	洗手间门表面
		88	洗手间门把手表面		<0.05
		89	废物桶表面		<0.05
90		甲癌病房 7	地面	<0.05	
91			墙面	<0.05	
92			门表面	<0.05	
93			门把手表面	<0.05	
94			床表面	<0.05	
95			柜子表面	<0.05	
96			洗手间地面	<0.05	
97			洗手间墙面	<0.05	
98			洗手池表面	<0.05	
99			便池表面	<0.05	
100			洗手间门表面	<0.05	
101			洗手间门把手表面	<0.05	
102			废物桶表面	<0.05	
注：仪器检出限为 0.05Bq/cm ² 。					

根据上述监测结果可知，江南大学附属医院非密封放射性物质（¹⁸F）工作场所大部分点位均未检出 β 表面污染，剩余点位中检出最大 β 表面污染为 4.5Bq/cm²；江南大学附属医院非密封放射性物质（^{99m}Tc）工作场所大部分点位均未检出 β 表面污染，剩余点位中检出最大 β 表面污染为 3.0Bq/cm²；江南大学附属医院非密封放射性

物质 (^{131}I) 工作场所大部分点位均未检出 β 表面污染, 剩余点位中检出最大 β 表面污染为 $0.25\text{Bq}/\text{cm}^2$ 。以上三个非密封放射性物质工作场所均符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 规定的控制区 β 表面污染小于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$, 监督区 β 表面污染小于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ 要求。

类比项目与本项目均具有可比性, 因此通过类比, 医院在落实相关屏蔽和辐射安全措施后, 可以推测本项目运行时核医学科监督区和控制区 β 表面污染符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 相关标准。

② β 表面污染防治管理措施

β 表面污染主要来源于辐射工作人员操作时, 放射性物质逸出或飞散在操作台、地板、墙壁、个人防护用品等表面, 对职业人员和公众造成辐射影响, 因此, 为了使本项目非密封放射性物质工作场所的 β 表面污染水平达到《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 规定的要求, 医院要做到以下安全防护措施:

- 1) 使用、操作放射性同位素的人员应经过培训, 具备相应的技能与防护知识;
- 2) 开瓶、转移、标记等易产生放射性物质逸出或飞散的操作, 其操作须在手套箱内进行;
- 3) 操作液体放射性物质应在易去除污染的工作台上放置的搪瓷盘内进行, 并铺以吸水性好的材料;
- 4) 吸取液体的操作必须用合适的器具, 严禁用口吸取;
- 5) 不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物件操作;
- 6) 放射性操作之后应对工作台、设备、地面及个人防护用品进行放射性表面污染监测, 若发现异常, 应进行清洗、去污, 满足标准要求后离开;
- 7) 放射性药品用后应及时存放在专用柜内, 需防盗、防水、防火、柜外应有电离辐射标志;
- 8) 做好就诊病人的管理, 特别是已服药和注射放射性药品的病人管理工作, 严格划定好控制区和监督区, 禁止无关人员随处走动;
- 9) 如 β 表面污染水平超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 规定值, 医院应暂停开展核医学活性区的相关业务, 去污染经监测符合标准后方可重新开展业务。

在落实以上各项安全防护措施，工作人员规范操作的情况下，核医学科监督区和控制区 β 表面污染可以满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）相关要求。

③β 射线辐射影响分析

本项目核医学核素诊断场所敷贴治疗使用的 ^{90}Sr 放射源和核医学核素治疗场所骨癌治疗使用的 ^{89}Sr 核素均为纯 β 衰变，在衰变过程中仅产生 β 射线。参考《辐射防护导论》（方杰，北京，1991）P127，β 粒子射程估算见下式。

$$R=0.412E^{(1.265-0.09541\ln E)} \quad 0.01 < E < 2.5\text{MeV} \dots (\text{式 } 11.2.1-1)$$

$$d=R/\rho \quad (\text{式 } 11.2.1-2)$$

式中：

R ——粒子在低原子序数物质中的射程， g/cm^2 ；

d ——β 射线在介质中的射程， cm ；

ρ ——介质的密度，空气密度为 $1.29 \times 10^{-3} \text{g}/\text{cm}^3$ ；有机玻璃密度为 $1.18 \text{g}/\text{cm}^3$ ；铅玻璃密度为 $4.6 \text{g}/\text{cm}^3$ ；人体密度为 $1 \text{g}/\text{cm}^3$ ；

E_{MAX} ——β 射线的最大能量， MeV 。

表 11.2.1-5 β 射线在屏蔽材料中理论最大射程

核素	β 射线能量	空气中射程	有机玻璃	铅玻璃中射程	人体中射程
	MeV	cm	cm	cm	cm
^{90}Sr	0.546	143	0.16	0.040	0.185
^{89}Sr	0.5846	157	0.172	0.044	0.203

经计算可知，本项目核医学核素诊断场所敷贴治疗使用的 ^{90}Sr 放射源和核医学核素治疗场所骨癌治疗使用的 ^{89}Sr 核素产生的 β 射线在有机玻璃等材料中的射程较短，且有墙体和铅门进行屏蔽，故其产生的 β 射线对周围环境影响很小。

④韧致辐射影响分析

^{90}Sr 放射源和 ^{89}Sr 核素均为纯 β 衰变，屏蔽强 β 粒子的高原子序数材料会产生韧致辐射。根据《辐射防护导论》，对 β 辐射源，韧致辐射采用下式进行计算。

$$H_r=4.58 \times 10^{-14} A \cdot Z_c \cdot \left(\frac{E_b}{r}\right)^2 \cdot \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \cdot q \cdot \eta \dots (\text{式 } 11.2.1-3)$$

式中：

H_r ——距离屏蔽层源 r 米处的辐射剂量率， Gy/h ；

r —参考点与屏蔽层的距离，m；

A —放射源活度，Bq；

Z_e —屏蔽材料的有效原子序数，取自《辐射防护导论》表 4.4，空气取 7.36，有机玻璃取 5.85；

E_b —韧致辐射的平均能量 E_b 是入射 β 粒子的最大能量的 1/3，即 $E_b=E_{\max}/3$ ，MeV；

μ_{en}/ρ ——平均能量为 E_b 的韧致辐射在空气中的质量能量吸收系数， m^2/kg ，取自《辐射防护导论》附表 1，取 2.672×10^{-3} ；

q —参考点所在区域相应的居留因子，保守取 1；

η —透射比，根据公式 $\eta=10^{-d/TVL}$ 得出（其中 TVL 屏蔽层在 β 粒子平均能量下的什值层厚度，参考《辐射防护导论》表 3.5 查得 ^{89}Sr 和 ^{90}Sr 在铅和混凝土中分别取值：0.14cm、8.6cm）。

表 11.2.1-6 关注点位辐射剂量率估算

使用场所	序号	关注点	A	E_b	r	屏蔽厚度	η	辐射剂量率
			Bq	Mev	m			$\mu\text{Gy/h}$
核医学核素诊断场所	56	^{90}Sr 敷贴室给药位	1.85×10^9	0.18	0.5	/	1	0.24
核医学核素治疗场所	9	^{89}Sr 手套箱取药位	4.44×10^8	0.19	0.5	10mm 有机玻璃 +10mmPb 铅罐 +20mmPb 手套箱	3.73×10^{-22}	6.30×10^{-24}
	10	^{89}Sr 注射车注射位	1.48×10^8	0.19	0.5	+4mm 有机玻璃防护套 +20mmPb 移动注射车	5.18×10^{-15}	8.76×10^{-17}

由上表估算结果可知， ^{90}Sr 放射源产生的韧致辐射在敷贴室距源 0.5m 处的辐射剂量率最大为 $0.24\mu\text{Gy/h}$ ； ^{89}Sr 核素产生的韧致辐射在手套箱取药位、注射车注射位距源 0.5m 处的辐射剂量率最大为 $8.76 \times 10^{-17}\mu\text{Gy/h}$ ，考虑到核医学科四侧墙体、顶棚和防护门的屏蔽和距离衰减，本项目 ^{90}Sr 放射源和 ^{89}Sr 核素放出的 β 粒子所致韧致辐射对周围环境的辐射影响将会更小。

（2） γ 射线环境影响分析

①核医学核素诊断场所 γ 射线环境影响分析

本项目 PET 显像诊断项目使用 ^{18}F 和 ^{68}Ga 进行显像诊断；SPECT 显像诊断项目使用的放射性核 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 和 ^{67}Ga 进行显像诊断。以上核素衰变过程中，会产生 γ 射线。

PET 显像诊断项目使用的放射性核素中， ^{18}F 核素诊断人数最多，日使用量最大，且各核素诊断流程相同。由于 ^{18}F 核素和 ^{68}Ga 主要光子能量均为 0.511MeV，因此 ^{18}F 核素和 ^{68}Ga 核素周围剂量当量率常数相近，PET 显像诊断用核素对工作场所的辐射影响分析均按照 ^{18}F 核素进行辐射屏蔽分析。SPECT 诊断项目使用的放射性核素中， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的日操作量相对于 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 核素较大，主要光子能量相当，周围剂量当量率常数相近，且各核素诊断流程相同，因此 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 核素对工作场所的影响分析按照 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行辐射屏蔽分析。

辐射工作人员在放射性药物操作区进行相关放射性药物的操作和给病人注射放射性核素，这个过程主要是放射性核素产生的 γ 射线引起的辐射照射。当病人注射了放射性药物之后，病人又成为一个活动的辐射体，其所在的工作场所则要考虑来自病人身体的射线辐射。

1) 工作场所屏蔽体外剂量率计算公式

辐射工作人员进行相关放射性药物的分装和给病人注射放射性核素，这个过程主要是放射性核素产生的 γ 射线引起的辐射照射。当病人注射了放射性药物之后，病人又成为一个活动的辐射体，其所在的工作场所则要考虑来自病人身体的射线辐射。

场所屏蔽计算公式参考《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020)，辐射剂量率估算公式为：

$$H=10^{-X/\text{TVL}} \cdot A \cdot \Gamma / R^2 \quad (\text{式 } 11.2.1-4)$$

式中：

H ——屏蔽体外关注点剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

X ——屏蔽厚度，mm；

TVL —— γ 射线的什值层厚度，mm；

A ——单个患者或受检者所用放射源的最大活度，单位为 MBq；

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

R ——参考点与放射源间的距离，m。

根据《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020)，本项目涉及核素辐射剂量率估算的相关参数取值见表 11.2.1-7。

表 11.2.1-7 涉及核素辐射剂量率估算相关参数取值

核素名称	^{18}F	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{131}I
铅什值层厚度 TVL ($\rho=11.3\text{t/m}^3$)	16.6mm	1mm	11
混凝土什值层厚度 TVL ($\rho=2.35\text{t/m}^3$)	176mm	110mm	170
砖什值层厚度 TVL ($\rho=1.65\text{t/m}^3$)	263mm	160mm	240
周围剂量当量率常数 (裸源) ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)	0.143	0.0303	0.0595
患者体外 1m 处的周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)	0.092	0.0207	0.0583
注: ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的 TVL 和周围剂量当量率常数 (裸源) 均参考《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020)。			

2) 工作场所辐射水平分析

a) 储源室

本项目核医学核素诊断场所使用的核素为外购成品药物。工作人员根据临床诊断所需药物的使用量、预约检查的人数, 提前一天向供药单位订购放射性药物, 供药单位在约定的时间, 将预约用量的药物送至核医学科核素诊断治疗场所, 核医学科安排专人接收放射性核素, 经确认无误完成相关交接手续后暂存在储源室。

储源室四侧墙体为 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料, 顶棚为 180mm 混凝土+60mm 硫酸钡涂料, 地坪为 180mm 混凝土+40mm 硫酸钡涂料, 防护门内衬 6mm 铅板, 放射性药物存于保险柜内。

b) 固废间

核素应用过程中产生的固废核素活度按不超过使用量的 1% 计。固废间四侧墙体为 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡防护涂料, 顶棚为 180mm 混凝土+60mm 硫酸钡涂料, 地坪为 180mm 混凝土+40mm 硫酸钡涂料, 防护门内衬 6mm 铅板, 放射性固废暂存于 10mmPb 衰变箱中。

c) 分装注射间

医护人员给药前, 将放射性药物从储源室连同铅罐拿到分装注射间, 放置于手套箱内, 给药前的相关操作均在手套箱内进行。外购药物不开展分装, PET 显像诊断用的放射性药物根据病人的需要进行分装, 分装后放入注射器防护套内, 注射前医护人员在不小于 20mmPb 的手套箱内直接拿出带有铅防护套的注射器。

PET 诊断患者注射时, 药物置于 10mmPb 注射器防护套内, 工作人员在 40mmPb 铅玻璃注射窗后进行。

SPECT 诊断患者注射时，药物置于 10mmPb 注射器防护套内，工作人员在 20mmPb 铅玻璃注射窗后进行。

d) PET 候检室和 SPECT 候检室

患者注射完放射性药物后，通过患者通道进入相应候检室，候检时间一般为 30min，随后进入相应机房进行显像和诊断。

本项目核医学核素诊断场所拟设置 1 间 PET 候检室，候检室内设置 3 张病床，病床均匀分布，病床之间设置移动式铅屏风。患者注射含 ^{18}F 核素的放射性药物后经过一段时间的等待，药物活度已经小于 $3.70 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi)，偏保守的角度仍按单个患者注射含 ^{18}F 核素的放射性药物后为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ 的点源估算，PET 候检室内按存在 3 个患者同时等待，则 PET 候检室的源强总活度为 $1.11 \times 10^8 \text{Bq}$ 。

拟设置 1 间 SPECT 候检室，设置 4 张病椅，病椅之间设置移动式铅屏风。患者注射含 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的放射性药物后经过一段时间的等待，药物活度已经小于 $9.25 \times 10^8 \text{Bq}$ (25mCi)，保守按单个患者注射含 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的放射性药物后为 $9.25 \times 10^8 \text{Bq}$ 的点源估算，SPECT 候检室内按存在 4 个患者同时等待，则 SPECT/CT 候检室的源强总活度为 $3.70 \times 10^9 \text{Bq}$ 。

e) 留观室

患者扫描后如有需要可以进入留观室进行留观，留观室设有 1 张病床，留观时间一般为 10min，无特殊情况发生则离开核医学科。患者注射放射性药物后经过一段时间的等待和检查后，药物活度已经小于初始注射量，偏保守的角度仍按初始注射活度估算，保守按 1 个注射完含 ^{18}F 核素的放射性药物的患者进行估算，则留观室的源强总活度为 $3.70 \times 10^8 \text{Bq}$ 。

f) 运动负荷兼抢救室

运动负荷室存在注射完含 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的放射性药物的患者，患者注射药物后经过一段时间的等待，药物活度已经小于 $9.25 \times 10^8 \text{Bq}$ (25mCi)，偏保守的角度仍按单个患者 $9.25 \times 10^8 \text{Bq}$ 的点源估算，则运动负荷室的源强总活度为 $9.25 \times 10^8 \text{Bq}$ 。

g) 机房摆位人员

摆位过程工作人员在铅防护屏风 (PET/CT 机房为 10mm 铅当量，SPECT/CT 机房 4mm 铅当量) 后进行摆位工作，按身体距离患者约 1m 进行估算。

根据式 11.2.1-4，本项目核医学核素诊断场所关注点位辐射剂量率估算见表

11.2.1-8, 关注点位置见附图 5-8。

表 11.2.1-8 核医学核素诊断场所关注点位辐射剂量率估算

序号	关注点		距离	源强	屏蔽材料及厚度	辐射剂量率
			m	Bq		μSv/h
1	储源室	西墙外 30cm 处	1.8	¹⁸ F 2.22×10 ¹⁰	50mmPb 铅罐+240mm 实心 砖+40mm 硫酸钡防护涂料	1.72×10 ⁻¹⁷
				⁶⁸ Ga 7.4×10 ⁹		
				^{99m} Tc 2.78×10 ¹⁰		
				²⁰¹ Tl 9.25×10 ⁸		
				⁶⁷ Ga 1.85×10 ⁹		
				2	南墙外 30cm 处	
⁶⁸ Ga 7.4×10 ⁹						
^{99m} Tc 2.78×10 ¹⁰		20mmPb 铅罐+240mm 实心 砖+40mm 硫酸钡防护涂料				
²⁰¹ Tl 9.25×10 ⁸						
⁶⁷ Ga 1.85×10 ⁹						
3		防护门外 30cm 处	1.9			¹⁸ F 2.22×10 ¹⁰
				⁶⁸ Ga 7.4×10 ⁹		
				^{99m} Tc 2.78×10 ¹⁰	20mmPb 铅罐+6mmPb 铅防 护门	
				²⁰¹ Tl 9.25×10 ⁸		
				⁶⁷ Ga 1.85×10 ⁹		
				4	顶棚 30cm 处	5.2
⁶⁸ Ga 7.4×10 ⁹						
^{99m} Tc 2.78×10 ¹⁰		20mmPb 铅罐+130mm 混凝 土+60mm 硫酸钡涂料				
²⁰¹ Tl 9.25×10 ⁸						
⁶⁷ Ga 1.85×10 ⁹						
5		下方距地 170cm 处	5.8			
				⁶⁸ Ga 7.4×10 ⁹		
				^{99m} Tc 2.78×10 ¹⁰	20mmPb 铅罐+300mm 混凝 土+40mm 硫酸钡涂料	
				²⁰¹ Tl 9.25×10 ⁸		

				^{67}Ga 1.85×10^9			
6	固废间	西墙外 30cm 处	1.8	^{18}F 2.22×10^8 ^{68}Ga 7.4×10^7 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 2.78×10^8 ^{201}Tl 9.25×10^6 ^{67}Ga 1.85×10^7	10mmPb 衰变箱+240mm 实 心砖+40mm 硫酸钡防护涂 料	4.43×10^{-17}	
7		防护门外 30cm 处	1.9	^{18}F 2.22×10^8 ^{68}Ga 7.4×10^7 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 2.78×10^8 ^{201}Tl 9.25×10^6 ^{67}Ga 1.85×10^7	10mmPb 衰变箱+6mmPb 铅 防护门	1.27	
8		顶棚 30cm 处	5.2	^{18}F 2.22×10^8 ^{68}Ga 7.4×10^7 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 2.78×10^8 ^{201}Tl 9.25×10^6 ^{67}Ga 1.85×10^7	10mmPb 衰变箱+130mm 混 凝土+60mm 硫酸钡涂料	1.40×10^{-12}	
9		下方距地 170cm 处	5.8	^{18}F 2.22×10^8 ^{68}Ga 7.4×10^7 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 2.78×10^8 ^{201}Tl 9.25×10^6 ^{67}Ga 1.85×10^7	10mmPb 衰变箱+300mm 混 凝土+40mm 硫酸钡涂料	1.04×10^{-21}	
10	分装注射 间	PET 手套 箱操作位	0.5	^{18}F 2.22×10^{10} ^{68}Ga 7.4×10^9	50mmPb 铅罐+40mmPb 手套 箱	4.81×10^{-2} 1.60×10^{-2}	6.41×10^{-2}
11		SPECT 手 套箱操作 位	0.5	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 2.78×10^{10} ^{201}Tl 9.25×10^8 ^{67}Ga 1.85×10^9	50mmPb 铅罐+20mmPb 手套 箱	3.37×10^{-67} 1.12×10^{-68} 2.24×10^{-68}	3.71×10^{-67}
12		PET 注射位	0.5	^{18}F 3.7×10^8 ^{68}Ga 3.7×10^8	40mmPb 注射窗+10mmPb 注 射器防护套	0.21 0.21	
13		SPECT 注射位	0.5	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 9.25×10^8 ^{201}Tl 1.85×10^8 ^{67}Ga	20mmPb 注射窗+10mmPb 注 射器防护套	1.12×10^{-28} 2.24×10^{-29} 4.48×10^{-29}	

				3.7×10^8			
14		南墙外 30cm 处	3.8	^{18}F 3.7×10^8	10mmPb 注射器防护套 +240mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	4.81×10^{-2}	4.81×10^{-2}
			3.8	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 9.25×10^8		1.58×10^{-12}	
15		防护门外 30cm 处	2.6	^{18}F 3.7×10^8	+10mmPb 注射器防护套 +6mm 防护门	0.85	0.85
			2.6	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 9.25×10^8		4.15×10^{-16}	
16		顶棚 30cm 处	5.2	^{18}F 3.7×10^8	10mmPb 注射器防护套 +130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	2.51×10^{-2}	2.51×10^{-2}
				$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 9.25×10^8		8.94×10^{-13}	
17		下方距地 170cm 处	5.8	^{18}F 3.7×10^8	10mmPb 注射器防护套 +300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}
				$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 9.25×10^8		4.03×10^{-14}	
18	运动负荷 兼抢救室	南墙外 30cm 处	2.4	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 9.25×10^8	240mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	2.71×10^{-2}	
19		北墙外 30cm 处	2.3		240mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	2.95×10^{-2}	
		防护门外 30cm 处	2.3		6mm 防护门	3.62×10^{-6}	
20		顶棚 30cm 处	5.2		130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	6.11×10^{-3}	
21		下方距地 170cm 处	5.8		300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	2.75×10^{-4}	
22	PET 候检 室	南墙外 30cm 处	3.4	^{18}F 1.11×10^9	370mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	9.75×10^{-2}	
23		北墙外 30cm 处	3		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	0.39	
		防护门外 30cm 处	3.3		8mmPb 防护门	3.09	
24		顶棚外 30cm 处	5.2		300mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	2.10×10^{-2}	
25		下方距地 170cm 处	5.8		300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	2.57×10^{-2}	
26	SPECT 候 检室	南墙外 30cm 处	3.4	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 3.7×10^9	370mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	8.33×10^{-3}	
27		北墙外 30cm 处	3		240mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	6.95×10^{-2}	
		防护门外 30cm 处	3.5		6mmPb 防护门	6.25×10^{-6}	
28		顶棚外 30cm 处	5.2		130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	2.44×10^{-2}	
29		下方距地 170cm 处	5.8		300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	1.10×10^{-3}	
30	留观室	东墙外 30cm 处	2	^{18}F 3.7×10^8	240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	0.29	
31		南墙外 30cm 处	3.4		370mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	3.25×10^{-2}	
32		北墙外 30cm 处	3		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	0.13	
		防护门外 30cm 处	3.4		8mmPb 防护门	0.97	
33		顶棚外 30cm 处	5.2		130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	6.47×10^{-2}	

34		下方距地 170cm 处	5.8		300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	8.58×10 ⁻³
35	PET/MR 机房	摆位处	1	¹⁸ F 3.7×10 ⁸	/	34
36		东墙外 30cm 处	3.6		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	9.04×10 ⁻²
37		防护门外 30cm 处	3.8		8mmPb 防护门	0.78
38		西墙外 30cm 处	3.5		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	9.57×10 ⁻²
39		北墙外 30cm 处	4.3		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	8.91×10 ⁻²
		防护门外 30cm 处	4.5		8mmPb 防护门	0.55
		观察窗外 30cm 处	4.4		8mmPb 铅玻璃	0.58
40		顶棚外 30cm 处	5.2		130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	6.47×10 ⁻²
41	下方距地 170cm 处	5.8	300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	8.58×10 ⁻³		
42	PET/CT 机 房	摆位处	1	¹⁸ F 3.7×10 ⁸	10mmPb 铅屏风	8.5
43		东墙外 30cm 处	3.5		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	9.57×10 ⁻²
44		南墙外 30cm 处	4.3		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	6.34×10 ⁻²
		防护门外 30cm 处	4.5		8mmPb 防护门	0.55
45		北墙外 30cm 处	4.3		240mm 实心砖+60mm 硫酸 钡防护涂料	6.34×10 ⁻²
		防护门外 30cm 处	4.5		8mmPb 防护门	0.55
		观察窗外 30cm 处	4.4		8mmPb 铅玻璃	0.58
46		顶棚外 30cm 处	5.2		130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	6.47×10 ⁻²
47	下方距地 170cm 处	5.8	300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	8.58×10 ⁻³		
48	SPECT/CT 机房	摆位处	1	^{99m} Tc 9.25×10 ⁸	4mmPb 铅屏风	1.91×10 ⁻³
49		南墙外 30cm 处	4.3		240mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	8.45×10 ⁻³
		防护门外 30cm 处	4.5		6mmPb 防护门	9.46×10 ⁻⁷
50		西墙外 30cm 处	3.5		240mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	1.28×10 ⁻²
51		北墙外 30cm 处	4.3		240mm 实心砖+40mm 硫酸 钡防护涂料	8.45×10 ⁻³
		防护门外 30cm 处	4.5		6mmPb 防护门	9.46×10 ⁻⁷
		观察窗外 30cm 处	4.4		6mmPb 铅玻璃	9.89×10 ⁻⁷
52		顶棚外 30cm 处	5.2		130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	6.11×10 ⁻³
53	下方距地 170cm 处	5.8	300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	3.96×10 ⁻⁴		
54	患者通道	顶棚外 30cm 处	5.2	¹⁸ F 3.7×10 ⁸	130mm 混凝土+60mm 硫酸 钡涂料	6.47×10 ⁻²

55		下方距地 170cm 处	5.8		300mm 混凝土+40mm 硫酸 钡涂料	8.58×10^{-3}
注：根据《辐射防护导论》，将 γ 射线减弱一定程度所需物质厚度 d 与物质的密度 ρ 成反比关系（ $d_1/d_2 = \rho_2/\rho_1$ ），同时根据建设单位提供资料，本项目拟使用的硫酸钡防护涂料密度不小于 3.8g/cm^3 ，混凝土的密度不小于 2.35g/cm^3 ，估算时将硫酸钡防护涂料厚度折算为混凝土厚度。如本表 9#点位屏蔽材料及厚度为 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料，经密度折算后等效 240mm 实心砖+64.7mm 混凝土。						

由上表估算结果可知，核医学核素诊断场所控制区实体边界外 30cm 处周围剂量当量率均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，手套箱和注射窗外表面 30cm 处人员操作位周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，其他非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 $25\mu\text{Sv/h}$ ，屏蔽设计满足要求，对周围辐射环境影响较小。其中，各机房摆位处的周围剂量当量率较高，摆位人员应尽可能采用视频和语音指导摆位，避免近距离接触患者，或在完成摆位工作后尽可能快的离开机房，尽量缩短与给药后患者的接触时间，以减少辐射照射影响。

实际上，患者在注射或服用药物后的等待过程中，由于衰变作用导致患者体内核素的活度不断减少，因而对墙外或门外的辐射影响也不断降低。

3) PET 配套校准源辐射影响分析

本项目 PET/CT 和 PET/MR 拟配置校准源，共配备 2 枚 ^{68}Ge 校准源，1 枚活度为 $1.11 \times 10^8\text{Bq}$ ，1 枚活度为 $5.5 \times 10^7\text{Bq}$ ，均为 V 类放射源，贮存在储源室保险柜中。

^{68}Ge 校准时放置于 PET 扫描床，PET 机房均采取足够的辐射屏蔽。职业人员能在较短的时间内完成校准准备操作，因此 ^{68}Ge 校准源对周围环境的影响和对辐射工作人员造成的年有效剂量可忽略不计。

4) X 射线影响分析

PET/CT 和 SPECT/CT 进行 CT 扫描时，场所周围存在 CT 散射与患者释放的 γ 射线的叠加辐射贡献，故单独进行分析。

本项目所使用的 PET/CT 和 SPECT/CT 设备型号未定，配套 CT 最大管电压为 140V。参考西门子厂家 140kV 工况下 CT 周围的剂量率分布曲线，1m 处的杂散辐射为 $0.052\mu\text{Gy/mA}\cdot\text{s}$ （垂直）和 $0.051\mu\text{Gy/mA}\cdot\text{s}$ （水平），CT 扫描通常不超过 300mA，剂量换算系数 Sv/Gy 取 1，故 1m 处的杂散辐射剂量率最高约为 $5.62 \times 10^4\mu\text{Gy/h}$ 。其他型号设备的 CT 散射辐射水平也在相同量级。

本项目 PET/CT 机房和 SPECT/CT 机房的各屏蔽物的有效屏蔽厚度均不低于 5.89mmPb，根据《放射诊断放射防护要求》附录 C 的 C.1.2 中式 C.1 计算得屏蔽透射因子最大为 4.53×10^{-7} ，距离屏蔽体外最近关注点的距离取 3.5m，剂量换算系数

Sv/Gy 取 1，则 CT 设备运行所致的辐射剂量率为 $2.08 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/h}$ ，本项目 PET/CT 机房和 SPECT/CT 机房相邻布置，则叠加辐射剂量率按保守考虑，为 $2.08 \times 10^{-3} \times 2 = 4.16 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/h}$ ，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）规定的 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求。

根据表 11.2.1-8 估算结果，本项目机房控制区边界外的附加剂量率估算结果叠加 CT 运行所致辐射剂量率后最大为 $0.58 + 4.16 \times 10^{-3} = 0.58 \mu\text{Sv/h}$ ，仍满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）规定的 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求。

5) 人员受照剂量估算

关注点人员的有效剂量参考方杰主编的《辐射防护导论》中的公式计算，计算公式如下：

$$D_{\text{Eff}} = D_r \times t \times T \times U \quad (\text{式 } 11.2.1-5)$$

式中： D_{Eff} ——辐射外照射人均年有效剂量，Sv；

D_r ——辐射剂量率，Gy/h（剂量换算系数，Sv/Gy 取 1）；

t ——年工作时间，h；

T ——居留因子；

U ——使用因子，以点源考虑， U 取 1。

不同场所的居留因子根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）附录 A 选取，本项目居留因子的选取见表 11.2.1-9。

表 11.2.1-9 居留因子的选取

场所	居留因子 (T)		示例
	典型值	范围	
全居留	1	1	管理人员或职员办公室、治疗计划区、治疗控制室、护士站、咨询台、有人护理的候诊室及周边建筑物中的驻留区域
部分居留	1/4	1/2-1/5	1/2: 相邻的治疗室、与屏蔽室相邻的病人检查室 1/5: 走廊、雇员休息室、职员休息室
偶然居留	1/16	1/8-1/40	1/8: 各治疗室门 1/20: 公厕、自动售货区、储藏室、设有座椅的户外区域、无人护理的候诊室、病人滞留区域、屋顶、门岗室 1/40: 仅有行人车辆来往的户外区域、无人看管的停车场，车辆自动卸货/卸客区域、楼梯、无人看管的电梯

a) 辐射工作人员所受年有效剂量估算

根据医院提供的资料，项目正式开展后，每年工作 250 天，每周工作 5 天，每天工作 8h。核医学核素诊断场所各工序涉及辐射工作人员情况以及工作负荷见表 11.2.1-10。

表 11.2.1-10 辐射工作人员情况以及工作负荷一览

工作场所	操作内容	时间	人员数量
分装注射间	PET 取药分装	每次 30s	2 人 (轮岗操作)
	PET 注射	每次 30s	
	SPECT 取药测活	每次 30s	2 人 (轮岗操作)
	SPECT 注射	每次 30s	
敷贴室	敷贴给药	每次 2min	1 人
护士站	导诊和预约登记	每天 8h	2 人
登记室			
PET/MR 机房	指导患者躺至正确的位置	每人摆位 1min	4 人 (2 人 1 组 轮岗操作)
控制室	PET/MR 控制、图像采集	每人扫描 30min	
PET/CT 机房	指导患者躺至正确的位置	每人摆位 1min	4 人 (2 人 1 组 轮岗操作)
控制室	PET/CT 控制、图像采集	每人扫描 15min (其中 CT 扫描 10 秒)	
SPECT/CT 机房	指导患者躺至正确的位置	每人摆位 1min	4 人 (2 人 1 组 轮岗操作)
控制室	SPECT/CT 控制、图像采集	每人扫描 15min (其中 CT 扫描 10 秒)	
诊室	接诊	每天 8h	4 人
阅片室	阅片	每天 8h	

根据医院预估工作量，关注点处人员居留因子等参数，估算辐射工作人员的年有效剂量估算见表 11.2.1-11。

表 11.2.1-11 辐射工作人员受照年有效剂量估算

工作场所	工作内容	辐射剂量率	年工作时间	年有效剂量	
		μSv/h	h	mSv	
分装注射间	PET 取药分装	6.41×10 ⁻² (10#)	83.3 (30s/次×10000 人次)	5.34×10 ⁻³	1.14×10 ⁻² /人
	PET 注射	0.21 (12# ¹⁸ F)	83.3 (30s/次×10000 人次)	1.75×10 ⁻²	
	SPECT 取药测活	3.71×10 ⁻⁶⁷ (11#)	83.3 (30s/次×10000 人次)	3.09×10 ⁻⁶⁸	4.66×10 ⁻³⁰ /人
	SPECT 注射	1.12×10 ⁻²⁸ (13# ^{99m} Tc)	83.3 (30s/次×10000 人次)	9.33×10 ⁻³⁰	
敷贴室	敷贴给药	0.24 (56#韧致辐射)	16.7 (2min/次×500 人次)	4.01×10 ⁻³	
护士站	导诊	1.28×10 ⁻² (50#)	2000 (8h/天×250 天)	2.56×10 ⁻²	0.11/人
登记室	预约登记	9.75×10 ⁻² (22#)	2000 (8h/天×250 天)	0.20	
PET/MR 机房	摆位	34 (35#)	41.7 (1min/次×2500 人次)	1.42	1.07/人
	操作位	0.58 (39#)	1250 (30min/次×2500 人次)	0.73	

PET/CT 机房	摆位	8.5 (42#)	125 (1min/次×7500 人次)	1.06	1.08/人
	操作位	0.58 (45#)	1875 (15min/次×7500 人次)	1.09	
		8.49×10^{-2} (CT)	20.8 (10s/次×7500 人次)	4.13×10^{-3}	
SPECT/CT 机房	摆位	1.91×10^{-3} (48#)	166.7 (1min/次×10000 人次)	3.18×10^{-4}	1.19×10^{-2} /人
	操作位	8.45×10^{-3} (51#)	2500 (15min/次×10000 人次)	2.11×10^{-2}	
		8.49×10^{-2} (CT)	27.8 (10s/次×10000 人次)	4.13×10^{-3}	
诊室	接诊	9.75×10^{-2} (22#)	2000 (8h/天×250 天)	0.20	6.50×10^{-2} /人
阅片室	阅片	3.25×10^{-2} (31#)	2000 (8h/天×250 天)	6.50×10^{-2}	

根据上述估算结果可知，本项目核医学核素诊断场所辐射工作人员所受年有效剂量最大为 1.08mSv，能够满足本项目职业人员所受年有效剂量不超过 5mSv 的年剂量约束值要求。

b) 公众受照剂量估算

根据各关注点处辐射剂量率，结合核医学核素诊断场所周围公众情况、关注点处人员居留因子等参数，由式 11.2.1-5 计算即可得到核医学核素诊断场所周围公众年有效剂量，见表 11.2.1-12。

表 11.2.1-12 周围公众年有效剂量估算

关注场所	方位	辐射剂量率	居留因子	距离	年受照时间	年有效剂量
		$\mu\text{Sv/h}$		m	h	mSv
楼梯间	东侧	9.04×10^{-2} (36#)	1/16	紧邻	2000	1.13×10^{-2}
前室		0.29 (30#)	1/16	紧邻	2000	3.63×10^{-2}
档案室		0.29 (30#)	1/16	紧邻	2000	3.63×10^{-2}
走廊	南侧	9.75×10^{-2} (22#)	1/4	紧邻	2000	4.88×10^{-2}
导诊大厅	西侧	1.28×10^{-2} (50#)	1/4	紧邻	2000	6.40×10^{-3}
日间化疗办公室	上方	2.44×10^{-2} (28#)	1	紧邻	2000	4.88×10^{-2}
日间化疗治疗室		6.47×10^{-2} (33#)	1/4	紧邻	2000	3.24×10^{-2}
地下停车场	下方	2.57×10^{-2} (25#)	1/16	紧邻	2000	3.21×10^{-2}
污物暂存间		2.57×10^{-2} (25#)	1/16	紧邻	2000	3.21×10^{-2}
机房		2.57×10^{-2} (25#)	1/16	紧邻	2000	3.21×10^{-2}
设备用房		2.57×10^{-2} (25#)	1/16	紧邻	2000	3.21×10^{-2}

根据上述估算结果可知：公众所受年有效剂量最大为 4.88×10^{-2} mSv，能够满足

本项目公众所受年有效剂量不超过 0.1mSv 的年剂量约束值要求。

对于本项目核医学核素诊断场所 50m 范围内其他公众，由于辐射剂量率随距离的增大逐渐衰减，故其所受年有效剂量将小于 $4.88 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ，也能够满足本项目公众所受年有效剂量不超过 0.1mSv 的年剂量约束值要求。

综上所述，本项目核医学核素诊断场所辐射工作人员和周围公众所受年有效剂量均满足职业人员不超过 5mSv 和公众不超过 0.1mSv 的年剂量约束值要求，对评价范围内环境保护目标影响较小。

②核医学核素治疗场所 γ 射线环境影响分析

辐射工作人员在放射性药物操作区进行相关放射性药物的操作和给病人注射放射性核素，这个过程主要是放射性核素产生的 γ 射线引起的辐射照射。当病人注射了放射性药物之后，病人又成为一个活动的辐射体，其所在的工作场所则要考虑来自病人身体的射线辐射。

1) 工作场所屏蔽体外剂量率计算公式

核素治疗场所屏蔽计算公式参考《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)，辐射剂量率估算公式同式 11.2.1-4。核素治疗场所涉及核素辐射剂量率估算相关参数取值见表 11.2.2-1。

表 11.2.2-1 本项目涉及核素辐射剂量率估算相关参数取值表

核素名称	^{131}I	^{177}Lu
铅什值层厚度 TVL ($\rho=11.3\text{t/m}^3$)	11	4.7
混凝土什值层厚度 TVL ($\rho=2.35\text{t/m}^3$)	170	150
砖什值层厚度 TVL ($\rho=1.65\text{t/m}^3$)	240	214
周围剂量当量率常数 (裸源) ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)	0.0595	0.00517
患者体外 1m 处的周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)	0.0583	0.003

备注：1. ^{131}I 周围剂量当量率常数及来源于《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)， ^{177}Lu 周围剂量当量率常数来源于《中国辐射卫生》2021 年 12 月第 30 卷第 6 期“ ^{177}Lu -Dotatate 治疗的放射防护评估”；
2. 表中 ^{131}I 的 TVL 取值参考《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)， ^{177}Lu 的 TVL 取值参考《辐射防护手册第三分册》(潘自强主编)中的图 2.16 几种常用屏蔽材料对宽束 γ 射线的半值层和十分之一值层厚度。

2) 工作场所辐射水平分析及预测

a) 储源室

甲测、甲亢和甲癌使用的 ^{131}I 核素为外购罐装药物， ^{177}Lu 肿瘤治疗所使用的 ^{177}Lu 核素为外购单支成品药物。工作人员根据临床诊断所需药物的使用量、预约检查的人数，提前一天向供药单位订购放射性药物，供药单位在约定的时间，将预约

用量的药物以单支成品药物送至核医学科核素诊断治疗场所，核医学科安排专人接收放射性核素，经确认无误完成相关交接手续后暂存在储源室。

储源室四侧墙体为 240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料，顶棚和地坪均为 180mm 混凝土+180mm 硫酸钡防护涂料，防护门内衬 8mm 铅板，放射性药物存于保险柜内。

b) 固废间

核素应用过程中产生的固废表面核素活度按不超过使用量的 1%计。固废间四侧墙体为 240mm 实心砖+50mm 硫酸钡防护涂料，顶棚和地坪均为 180mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料，防护门内衬 8mm 铅板，放射性固废暂存于固废间 10mmPb 铅废物箱中。

c) 分装间、服药间

¹³¹I：医护人员给药前，将放射性药物从储源室连同铅罐拿到分装间，连同铅罐放入给手套箱内的自动分碘仪中。根据病人的需要，工作人员在分装间内远程操作自动分碘仪，患者在服药间直接拿取盛有分装好的药液的一次性杯子服药。服药后，甲测和甲亢患者服药后由核医学西侧出口离开，甲癌患者到病房住院观察，全过程进行严格监控。因此，在药物分装和患者服药过程中，工作人员不近距离接触药物。

¹⁷⁷Lu：工作人员在分装间手套箱内对放射性药物进行测活。

d) 病房

甲癌患者口服完放射性药物后，通过患者通道进入病房。甲癌治疗患者每周一安排住院，甲癌患者需要住院 2~5 天，周六前即可出院。

¹⁷⁷Lu 肿瘤治疗患者每周六安排住院，需要住院 1 天。¹⁷⁷Lu 肿瘤治疗患者通过患者通道进入病房，工作人员前往病房内对患者进行滴注给药，给药期间医护人员在值班室通过视频观察患者给药过程，给药结束后，医护人员进入病房回收药品容器。

e) 甲测室

甲测室每次 1 个患者进行检查，则甲测室的源强总活度为 $3.7 \times 10^5 \text{Bq}$ 。

根据式 11.2.1-4，拟建核医学科核素治疗场所辐射剂量率计算结果见表 11.2.2-2，关注点位置见附图 5-9。

表 11.2.2-2 核医学科核素治疗场所辐射剂量率计算结果

序号	关注点		距离	源强	屏蔽材料及厚度	辐射剂量率	
			m	Bq		μSv/h	
1	储源室	南墙外 30cm 处	1.3	¹³¹ I 3.89×10 ¹⁰	50mmPb 铅罐+240mm 实 心砖+50mm 硫酸钡涂料	1.32×10 ⁻³	1.40×10 ⁻³
				¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ¹⁰	20mmPb 铅罐+240mm 实 心砖+50mm 硫酸钡涂料	8.00×10 ⁻⁵	
2		防护门外 30cm 处	1.5	¹³¹ I 3.89×10 ¹⁰	50mmPb 铅罐+内衬 8mm 铅板	5.49×10 ⁻³	5.54×10 ⁻³
				¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ¹⁰	20mmPb 铅罐+内衬 8mm 铅板	5.44×10 ⁻⁵	
3		上方 30cm 处	5.2	¹³¹ I 3.89×10 ¹⁰	50mmPb 铅罐+130mm 混 凝土+60mm 硫酸钡防护 涂料	1.90×10 ⁻⁴	2.03×10 ⁻⁴
				¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ¹⁰	20mmPb 铅罐+130mm 混 凝土+60mm 硫酸钡防护 涂料	1.27×10 ⁻⁵	
4		下方距地 170cm 处	5.8	¹³¹ I 3.89×10 ¹⁰	50mmPb 铅罐+180mm 混 凝土+60mm 硫酸钡防护 涂料	9.46×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻⁴
				¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ¹⁰	20mmPb 铅罐+180mm 混 凝土+60mm 硫酸钡防护 涂料	5.98×10 ⁻⁶	
5	固废间	南墙外 30cm 处	1.3	¹³¹ I 3.89×10 ⁸	10mmPb 衰变箱+240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂 料	5.70×10 ⁻²	5.71×10 ⁻²
¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ⁸				1.07×10 ⁻⁴			
6		防护门外 30cm 处	1.5	¹³¹ I 3.89×10 ⁸	10mmPb 衰变箱+内衬 8mm 铅板	0.24	0.24
				¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ⁸		7.30×10 ⁻⁵	
7		上方 30cm 处	5.2	¹³¹ I 3.89×10 ⁸	10mmPb 衰变箱+130mm 混凝土+60mm 硫酸钡防 护涂料	8.24×10 ⁻³	8.25×10 ⁻³
				¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ⁸		1.71×10 ⁻⁵	
8		下方距地 170cm 处	5.8	¹³¹ I 3.89×10 ⁸	10mmPb 衰变箱+180mm 混凝土+60mm 硫酸钡防 护涂料	4.10×10 ⁻³	4.11×10 ⁻³
				¹⁷⁷ Lu 3.7×10 ⁸		8.03×10 ⁻⁶	
9	分装间	¹³¹ I 自动分装给药	0.5	¹³¹ I 甲测 3.7×10 ⁶	50mmPb 铅罐+20mmPb 手套箱	3.81×10 ⁻⁷	
				¹³¹ I 甲亢 1.85×10 ⁹		1.91×10 ⁻⁴	
				¹³¹ I 甲癌 3.7×10 ¹⁰		3.81×10 ⁻³	
			¹⁷⁷ Lu 测活	0.5	¹⁷⁷ Lu 7.4×10 ⁹	20mmPb 手套箱	4.93×10 ⁻³
11	服药间	上方 30cm 处	5.2	¹³¹ I 7.4×10 ⁹	130mm 混凝土+60mm 硫 酸钡防护涂料	0.75	
¹⁷⁷ Lu 7.4×10 ⁹				2.53×10 ⁻²			
12		下方距地	5.8	¹³¹ I 7.4×10 ⁹	180mm 混凝土+60mm 硫	0.30	

		170cm 处		^{177}Lu 7.4×10^9	酸钡防护涂料	9.43×10^{-3}
13	病房 1	^{177}Lu 给药位	0.5	^{177}Lu 7.4×10^9	/	88.8
14		防护门外 30cm 处	3	^{131}I 7.4×10^9	内衬 8mm 铅板	8.98
				^{177}Lu 7.4×10^9		4.90×10^{-2}
15		西墙外 30cm 处	2.8	^{131}I 7.4×10^9	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.43
				^{177}Lu 7.4×10^9		8.26×10^{-2}
16		北墙外 30cm 处	4.5	^{131}I 7.4×10^9	480mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.11
				^{177}Lu 7.4×10^9		2.80×10^{-3}
17		上方 30cm 处	5.2	^{131}I 7.4×10^9	400mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料	1.92×10^{-2}
				^{177}Lu 7.4×10^9		4.00×10^{-4}
18	下方距地 170cm 处	5.8	^{131}I 7.4×10^9	400mm 混凝土+60mm 硫酸钡防护涂料	1.55×10^{-2}	
			^{177}Lu 7.4×10^9		3.22×10^{-4}	
19	病房 5	东墙外 30cm 处	5.2	^{131}I 7.4×10^9	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.37
				^{177}Lu 7.4×10^9		1.04×10^{-2}
20	患者入口	防护门外	6	^{131}I 7.4×10^9	内衬 8mm 铅板	2.25
				^{177}Lu 7.4×10^9		8.45×10^{-2}
21	甲测室	甲测位	0.5	^{131}I 3.7×10^5	/	8.63×10^{-2}
注：1.病房 1~病房 4 的辐射屏蔽防护设计相同，故以病房 1 作为代表进行预测分析； 2.根据《辐射防护导论》，将 γ 射线减弱一定程度所需物质厚度 d 与物质的密度 ρ 成反比关系（ $d1/d2=\rho2/\rho1$ ）。本项目拟使用的硫酸钡防护涂料密度为 $3.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，混凝土密度为 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ ，估算时将硫酸钡防护涂料厚度折合为混凝土厚度。如本表 7#点位屏蔽材料及厚度为 370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料，经密度折算后等效 370mm 实心砖+97mm 混凝土。						

由上表估算结果可知，核医学核素治疗场所各控制区内房间防护门和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率均小于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，手套箱、注射窗等设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率均小于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，屏蔽设计满足要求，对周围辐射环境影响较小。

实际上，患者在住院过程中，由于衰变作用导致患者体内核素的活度不断减少，因而对墙外或门外的辐射影响也不断降低。

3) 人员受照剂量估算

a) 辐射工作人员所受年有效剂量估算

本项目辐射工作人员情况以及工作负荷一览见下表。

表 11.2.2-3 辐射工作人员情况以及工作负荷一览

工作场所	操作内容	时间	人员数量
服药间	^{89}Sr 注射	每次 30s	1 人
分装间	^{89}Sr 取药测活	每次 30s	
	^{131}I 自动分装给药	每人次 1min	1 人
	^{177}Lu 测活	每人次 30s	1 人
病房	^{177}Lu 给药、回收药品容器	每人次 2min	
甲测室	甲测	每次 30s, 每人 4 次	1 人
护士站、出入院服务间	预约登记、出入院服务	2000h (^{131}I)	1 人
		800h (^{177}Lu)	

根据表 11.2.2-2 预测的各关注点处辐射剂量率, 结合医院预估工作量, 关注点处人员居留因子等参数, 由式 11.2.1-5 计算即可得到辐射工作人员的年有效剂量, 见表 11.2.2-4。

表 11.2.2-4 核素治疗场所辐射工作人员年有效剂量估算

工作场所	工作内容	辐射剂量率	年工作时间	年有效剂量		
		μSv/h	h	mSv		
服药间	⁸⁹ Sr 注射	0.24 (10#韧致辐射)	1.25 (30s/次×150 人次)	3.00×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴	
分装间	⁸⁹ Sr 取药测活	6.30×10 ⁻²⁴ (9#韧致辐射)	1.25 (30s/次×150 人次)	7.88×10 ⁻²⁷		
	¹³¹ I 自动分装给药	3.81×10 ⁻⁷ (9# ¹³¹ I 甲测)	83.3 (1min/次×5000 人次)	3.17×10 ⁻⁸	9.95×10 ⁻⁶	
		1.91×10 ⁻⁴ (9# ¹³¹ I 甲亢)	20.8 (1min/次×1250 人次)	3.97×10 ⁻⁶		
		3.81×10 ⁻³ (9# ¹³¹ I 甲癌)	4.17 (1min/次×250 人次)	1.59×10 ⁻⁵		
		¹⁷⁷ Lu 测活	4.93×10 ⁻³ (9# ¹⁷⁷ Lu)	2.08 (30s/次×250 人次)	1.03×10 ⁻⁵	0.37
病房	¹⁷⁷ Lu 注射	88.8 (12#)	8.33 (2min/次×250 人次)	0.74		
甲测室	甲测	8.63×10 ⁻² (20#)	166.7 (30s/次×4 次×5000 人)	1.44×10 ⁻²		
护士站、出入院服务间	预约登记	0.43 (14# ¹³¹ I)	2000 (8h/天×250 天)	0.86	0.46	
		8.26×10 ⁻² (14# ¹⁷⁷ Lu)	800 (8h/天×100 天)	6.61×10 ⁻²		

综上, 核医学核素治疗场所辐射工作人员所受年有效剂量最大为 0.46mSv, 满足辐射工作人员年有效年剂量约束值不超过 5mSv 的要求。

b) 公众受照剂量估算

根据表 11.2.2-2 预测的各关注点处辐射剂量率, 结合核医学科核素治疗场所周围公众情况、关注点处人员居留因子等参数, 由式 11.2.1-5 计算即可得到核医学科

周围公众的年有效剂量，见表 11.2.2-5。

表 11.2.2-5 核医学科核素治疗场所公众人员年有效剂量估算

关注场所	方位	辐射剂量率	距离	居留因子	年受照时间	年有效剂量	
		$\mu\text{Sv/h}$	m		h	mSv	
新风机房	东侧	0.37 ($^{19}\text{I}^{131}$)	2	1/16	2000	1.16×10^{-2}	1.17×10^{-2}
		1.04×10^{-2} ($^{19}\text{Lu}^{177}$)			800	1.30×10^{-4}	
院内道路和绿地	东侧	0.37 ($^{19}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/16	2000	4.63×10^{-2}	4.68×10^{-2}
		1.04×10^{-2} ($^{19}\text{Lu}^{177}$)			800	5.20×10^{-4}	
导诊大厅	西侧	0.43 ($^{15}\text{I}^{131}$)	8	1/4	2000	3.36×10^{-3}	3.62×10^{-3}
		8.26×10^{-2} ($^{15}\text{Lu}^{177}$)			800	2.58×10^{-4}	
过道	北侧	0.11 ($^{16}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/4	2000	5.50×10^{-2}	5.56×10^{-2}
		2.80×10^{-3} ($^{16}\text{Lu}^{177}$)			800	5.60×10^{-3}	
日间化疗办公室	上方	1.92×10^{-2} ($^{17}\text{I}^{131}$)	紧邻	1	2000	3.84×10^{-2}	3.87×10^{-2}
		4.00×10^{-4} ($^{17}\text{Lu}^{177}$)			800	3.20×10^{-4}	
日间化疗治疗室	上方	1.92×10^{-2} ($^{17}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/4	2000	9.60×10^{-3}	9.68×10^{-3}
		4.00×10^{-4} ($^{17}\text{Lu}^{177}$)			800	8.00×10^{-5}	
地下停车场		1.55×10^{-2} ($^{18}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/16	2000	1.94×10^{-3}	1.95×10^{-3}
		3.22×10^{-4} ($^{18}\text{Lu}^{177}$)			800	1.61×10^{-5}	
检查室		1.55×10^{-2} ($^{18}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/4	2000	7.75×10^{-3}	7.81×10^{-3}
		3.22×10^{-4} ($^{18}\text{Lu}^{177}$)			800	6.44×10^{-5}	
医生办公室	下方	1.55×10^{-2} ($^{18}\text{I}^{131}$)	紧邻	1	2000	3.10×10^{-2}	3.13×10^{-2}
		3.22×10^{-4} ($^{18}\text{Lu}^{177}$)			800	2.58×10^{-4}	
示教室	下方	1.55×10^{-2} ($^{18}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/4	2000	7.75×10^{-3}	7.81×10^{-3}
		3.22×10^{-4} ($^{18}\text{Lu}^{177}$)			800	6.44×10^{-5}	
卫生间	下方	1.55×10^{-2} ($^{18}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/16	2000	1.94×10^{-3}	1.95×10^{-3}
		3.22×10^{-4} ($^{18}\text{Lu}^{177}$)			800	1.61×10^{-5}	
机房	下方	1.55×10^{-2} ($^{18}\text{I}^{131}$)	紧邻	1/16	2000	1.94×10^{-3}	1.95×10^{-3}
		3.22×10^{-4} ($^{18}\text{Lu}^{177}$)			800	1.61×10^{-5}	

综上，公众所受年有效剂量最大为 $5.56 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ，满足本项目公众成员年有效年剂量约束值不超过 0.1mSv 的要求。

综上所述，核医学科核素治疗场所辐射工作人员和周围的公众所受外照射年有效剂量符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于“剂量限值”的要求和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中要求的年有效剂量管理约束值即工作人员 5mSv 和公众 0.1mSv。

（3）核医学科辐射叠加影响分析

由于本项目核医学核素诊断场所和核素治疗场所南北相邻，故考虑场所同时运行时的辐射叠加影响。根据平面布局，职业人员主要考虑核素诊断场所控制廊辐射工作人员同时受到核素治疗场所的辐射影响。根据表 11.2.2-2 可知，主要考虑核素治疗场所固废室对控制廊辐射工作人员的影响，具体见表 11.2.3-1。

表 11.2.3-1 控制廊辐射工作人员辐射叠加影响分析

人员	影响场所	辐射剂量率	年工作时间	年有效剂量	
		$\mu\text{Sv/h}$	h	mSv	
控制廊辐射工作人员	核素诊断场所	见表 11.2.1-11		2.16	1.13/人
	核素治疗场所	5.71×10^{-2} (表 11.2.2-2 5#)	2000 (8h×250 天)	0.1	

由上表可知，经叠加后本项目控制廊辐射工作人员所受年有效剂量最大为 1.13mSv，满足辐射工作人员年有效年剂量约束值不超过 5mSv 的要求。

公众主要考虑西侧导诊大厅，具体见表 11.2.3-2。

表 11.2.3-2 导诊大厅公众辐射叠加影响分析

工作场所	辐射剂量率	距离	居留因子	年受照时间	年有效剂量	
	$\mu\text{Sv/h}$	m		h	mSv	
导诊大厅	8.26×10^{-2} (表 11.2.1-8 45#)	紧邻	1/4	2000	6.40×10^{-3}	1.00×10^{-2}
	0.43 (表 11.2.2-2 15# ¹³¹ I)	8	1/4	2000	3.36×10^{-3}	
	8.26×10^{-2} (表 11.2.2-2 15# ¹⁷⁷ Lu)	8	1/4	800	2.58×10^{-4}	

由上表可知，经叠加后导诊大厅公众所受年有效剂量最大为 1.00×10^{-2} mSv，满足本项目公众成员年有效年剂量约束值不超过 0.1mSv 的要求。

（4）核医学科三废影响分析

①放射性废液

1) 核医学核素诊断场所

本项目核医学核素诊断场所运行时产生的放射性废液主要为核素操作人员清洗

或去污废水、患者候检或留观期间产生的如厕废水以及工作场所清洗废水。根据污染源项描述可知，上述放射性废液量约为 $0.81\text{m}^3/\text{d}$ ， $202.5\text{m}^3/\text{a}$ （以 250 天计）。

本项目核医学核素诊断场所短衰变期衰变池组由 2 个污泥池+3 个相同容积的衰变池组成，单个衰变池有效容积为 13m^3 ，采用“槽式”排放，并通过阀门切换并联运行，则第 1 个衰变池最后进入的废水存储时间为： $13\text{m}^3 \times 2 \div 0.81\text{m}^3 \approx 32$ 个工作日（保守按照 6 周考虑，即 42 天，为第 3 个衰变池注满的时间）。放射性废液在衰变池内暂存时间保守按照每日门诊数 80 人满负荷估算，核医学科实际运行中，每天诊断人数不超过 80 人，实际的暂存时间也将大于 42 天。对于 ^{18}F 、 ^{68}Ga 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天”的要求。对于 ^{67}Ga 和 ^{201}Tl 核素，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期”的要求。

综上所述，本项目核医学核素诊断场所产生的放射性废液可以在衰变池内暂存时间约为 42 天，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中相关要求，放射性废液经监测合格后可排入医院污水处理系统进一步处理，对周围环境的影响较小。

2) 核医学核素治疗场所

本项目核医学核素治疗场所运行时产生的放射性废液主要为核素操作人员清洗或去污废水、患者住院期间产生的如厕废水以及工作场所清洗废水。根据污染源项描述可知，上述放射性废液量约为 $0.85\text{m}^3/\text{d}$ ， $298\text{m}^3/\text{a}$ （以 350 天计）。

本项目核医学核素治疗场所长衰变期衰变池组由 2 个污泥池+4 个相同容积的衰变池组成，单个衰变池有效容积为 75m^3 ，采用“槽式”排放，并通过阀门切换并联运行，则第 1 个衰变池最后进入的废水存储时间为： $75\text{m}^3 \times 3 \div 0.85\text{m}^3 \approx 264$ 天（为第 4 个衰变池注满的时间）。对于 ^{131}I 核素，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“含 ^{131}I 核素的放射性废液暂存时间超过 180 天”的要求。对于 ^{177}Lu 核素，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期”的要求。

本项目核医学核素治疗场所涉及使用核素 ^{89}Sr 骨癌治疗患者在接受治疗后即可直接离开，因此患者不产生放射性废液，仅考虑辐射工作人员每日去污和场所清洗

过程中产生极少量含 ^{89}Sr 核素的放射性废液。

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 中规定了单次放射性废水排放总活度应小于核素对应的 $ALI_{\min}$ ，月排放总量不得超过 $10ALI_{\min}$ 。 $ALI_{\min}$ 的计算方法如下：

$$ALI_{\min}=DL/e_j \quad (\text{式 } 11.2.4-1)$$

DL 表示职业人员接触限值，取 20mSv；

e_j 表示《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 表 B3 工作人员食入单位摄入量所致的待积有效剂量，查表得 ^{89}Sr 取 $2.6 \times 10^{-9}\text{Sv/Bq}$ 。

根据上式计算的 ^{89}Sr 核素的 $ALI_{\min}$ 结果见下表。

表 11.2.4-1 废水排放情况

核素名称	工作人员食入单位摄入量所致的待积有效剂量	职业人员接触限值	$ALI_{\min}$
^{89}Sr	$2.6 \times 10^{-9}\text{Sv/Bq}$	20mSv	$7.69 \times 10^6\text{Bq}$

项目排放情况详见表 11.2.4-2。

表 11.2.4-2 废水排放情况

核素名称	周最大用量	排入比例	单周衰变池核素排入活度	衰变池核素排入周数	单个衰变池活度	贮存天数	衰变后单次排放活度
^{89}Sr	$4.44 \times 10^8\text{Bq}$	1%	$4.44 \times 10^6\text{Bq}$	3 周	$1.33 \times 10^7\text{Bq}$	264 天	$3.56 \times 10^5\text{Bq}$

因此，参考《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》(辐射函〔2023〕20 号) 中对含 ^{131}I 放射性废液的排放方式的规定，本项目放射性废液经衰变池衰变后，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 单次排放的废液中各核素活度小于各核素的 $1ALI_{\min}$ ，每月排放的废液中各核素活度小于各核素的 $10ALI_{\min}$ ，并经监测放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L 、总 β 不大于 10Bq/L 后，可排入医院污水处理系统进一步处理。

综上所述，本项目核医学核素治疗场所产生的放射性废液可以在衰变池内暂存时间约为 264 天，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 和《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》(辐射函〔2023〕20 号) 中相关要求，放射性废液经监测合格后可排入医院污水处理系统进一步处理，对周围环境的影响较小。

②放射性废气

本项目核医学科运行时会产生极少量的放射性废气。核医学科共设有 4 支放射性废气排风管道，能够保持良好的通风，废气经由排风井内单独密闭管道排至肿瘤综合治疗中心楼顶，并高出屋脊排放。排风井由混凝土浇筑，能有效屏蔽放射性废气对其余楼层公众的辐射影响。各排风管道内保持负压，设置止回阀，防止气流倒灌，手套箱顶部和排风口均设活性炭吸附装置。因此项目排风设计满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）关于通风的要求，对周围环境影响较小。

③放射性固体废物

本项目核医学科运行时产生的放射性固体废物主要为一次性注射器、针头、手套、药棉、纱布、破损杯皿、擦拭污染地面的物品、废敷贴器和废气处理更换的废活性炭等。根据污染源项描述可知，核医学核素诊断场所运行时产生的放射性固废总量约为 400kg/a；核医学核素治疗场所运行时产生的放射性固废总量约为 1003kg/a；核医学科排风管道废活性炭总量约为 50kg/a。

本项目核医学科设置铅桶，核医学核素诊断场所和核素诊断场所均设有单独的固废间，收集的放射性固体废物根据核素衰变周期分类收集、分类转移并暂存于固废间衰变箱内，衰变箱采用 10mmPb 进行屏蔽防护，以保证其外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天，所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍，含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天。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 ，可对废物清洁解控并作为医疗废物进行处理（废活性炭作为危险废物处理）。

更换的废 ^{68}Ge 和 ^{90}Sr 放射源应当按照废旧放射源返回合同规定，将废旧放射源交回生产单位或者返回原出口方。

放射性废物排放控制：

a) 严格区分放射性废物与非放射性废物，不可混同处理，应力求控制和减少放射性废物产生量。

b) 对所有放射性固体废物采用先收集在各自相关工作场所的铅桶内，再将铅桶内的固体废弃物连同专用塑料包装袋，存放到固废间的衰变箱内，集中收储一段时

间后（视不同的核素，控制不同的收贮时间，以减少放射性废物的收贮量）再分类处理。受不同核素污染的固体废物分开收储，每次收集时专用塑料包装袋表面应贴上标签，标明物品及最后一天的收集时间，内装注射器及碎玻璃等物品的废物袋应附加不易刺破的外套（如硬牛皮纸外套）。

c) 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。

11.2.2 放疗科直线加速器运行阶段环境影响分析

本项目 2 间直线加速器机房东西紧邻且对称布置，辐射屏蔽防护设计相同，故以 1 号直线加速器机房作为样本机房进行运行阶段的环境影响分析。

本项目直线加速器有电子线和 X 射线两种治疗模式，因电子线的穿透能力弱于 X 射线，所以一般情况下，机房屏蔽设计满足屏蔽 X 射线防护要求时即可满足屏蔽电子线的防护需要。

本项目直线加速器尚未确定具体型号，计划使用 6MV、10MV 和 15MV 中的 2 种档位的直线加速器，其中，6MV 和 10MV 分别对应的 X 射线最高输出剂量率为 840Gy/h、1440Gy/h。10MV 档的能量与最大剂量率均大于 6MV 档位，因此，对周围环境的影响，10MV 档大于 6MV 档，机房的辐射屏蔽防护在满足 10MV 档位防护要求的基础上，便能满足更低能量、更低输出剂量率的屏蔽防护要求。

本项目在理论预测分析时，均以 10MV、15MV 的能量和剂量率保守进行理论预测分析，不对 6MV 进行额外的分析。

（1）计算参数和工作负荷

①计算参数

本项目直线加速器相关计算参数见表 10.1.2-3。根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）附录 B 相关内容，可知 X 射线在混凝土中的 TVL_1 和 TVL 以及患者受照面积 400cm^2 的散射因子 α_{ph} 。

表 11.2.5-1 混凝土对 10MV 和 15MV 的 X 射线 TVL 值

医用电子直线加速器 X 射线能量	10MV	15MV
有用线束在混凝土 TVL_1	41cm	44cm
有用线束在混凝土 TVL	37cm	41cm
90°泄漏辐射在混凝土 TVL_1	35cm	36cm

90°泄漏辐射在混凝土 TVL	31cm	33cm
患者散射辐射（散射角 30°）在混凝土中 TVL	28cm	
注：混凝土密度为 2.35t/m³；		

表 11.2.5-2 10MV 和 18MV 下患者受照面积 400cm² 的散射因子 α_{ph}

散射角	散射因子 α_{ph}	
	10MV	18MV
30°	3.18×10^{-3}	2.53×10^{-3}

注：本项目医用电子加速器最大 X 射线能量为 15MV，由于《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）表 B.2 中未提供散射角为 30° 时，15MV 下的散射因子 α_{ph} 在故本项目保守按 10MV 考虑。

0.5MV 时混凝土对 45° 入射辐射的散射因子 (α_2) 为 2.2×10^{-2} 。

②工作负荷

本项目医用电子直线加速器投入使用后，预计每天放射治疗患者最多为 40 人次，平均每名患者治疗照射最大时间为 2.5min，每周工作 5 天，则本项目的周照射时间为 8.33h，年照射时间为 416.67h。

（2）关注点位的选取

本项目医用电子直线加速器机房采用“L”型迷路，有用线束不向迷路照射，迷路出口设置防护门。机房主屏蔽墙为东、西墙和顶棚。

结合图纸，机房的关注点位有：东墙、西墙和顶棚有用线束照射方向主屏蔽墙外（a、b、l 点）、与主屏蔽墙直接相连的次屏蔽墙外（c₁/c₂、d₁/d₂、m₁/m₂ 点）、水冷机房（e 点）、控制室（f 点）、质控室（k 点）、防护门外（g 点）。

不同点位的居留因子参照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中附表 A.1。关注点情况见表 11.2.5-3、图 11.2.5-1 和图 11.2.5-2。

表 11.2.5-3 医用电子直线加速器机房关注点情况

关注点		辐射类型	路径	距离（m）
a	东墙主屏蔽区外 30cm （2 号直线加速器机房）	有用线束	O ₂ -a	8.2
b	西墙主屏蔽区外 30cm （补风机房）	有用线束	O ₁ -b	8.3
c ₁ /c ₂	东墙次屏蔽区外 30cm （2 号直线加速器机房）	泄漏	O-c _{1/2}	8.1
		散射	O ₂ -O-c _{1/2}	
d ₁ /d ₂	西墙次屏蔽区外 30cm （设备用房、走廊）	泄漏	O-d _{1/2}	8.6
		散射	O ₁ -O-d _{1/2}	

<i>e</i>	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	泄漏	O-e	5.8
<i>f</i>	迷路外墙外 30cm (控制室)	泄漏	O-f	9.5
<i>k</i>	迷路外墙外 30cm (质控室)	泄漏	O ₁ -k	10
<i>g</i>	防护门外 30cm 处	泄漏	O ₂ -g	10.6
		散射	O ₁ -O-B-P-g	7.4-7.2-3.0
<i>l</i>	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	有用线束	O ₃ -l	7.3
<i>m₁/m₂</i>	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地和道路)	泄漏	O-m _{1/2}	7.2
		散射	O ₃ -O-m _{1/2}	

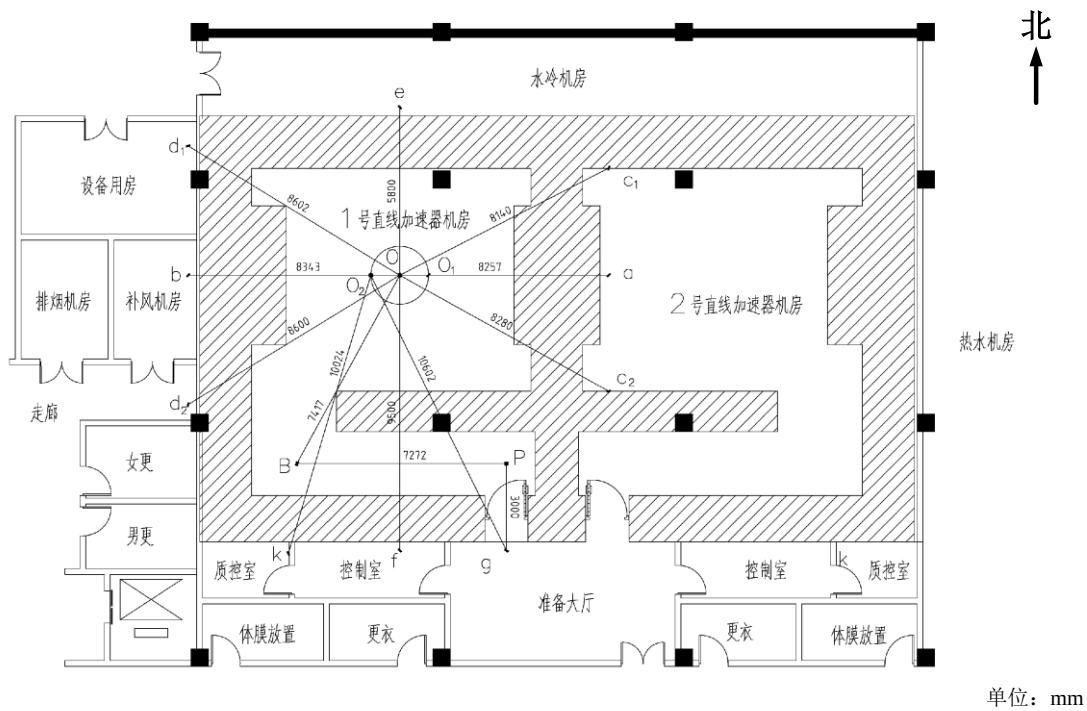


图 11.2.5-1 医用电子直线加速器机房关注点平面图

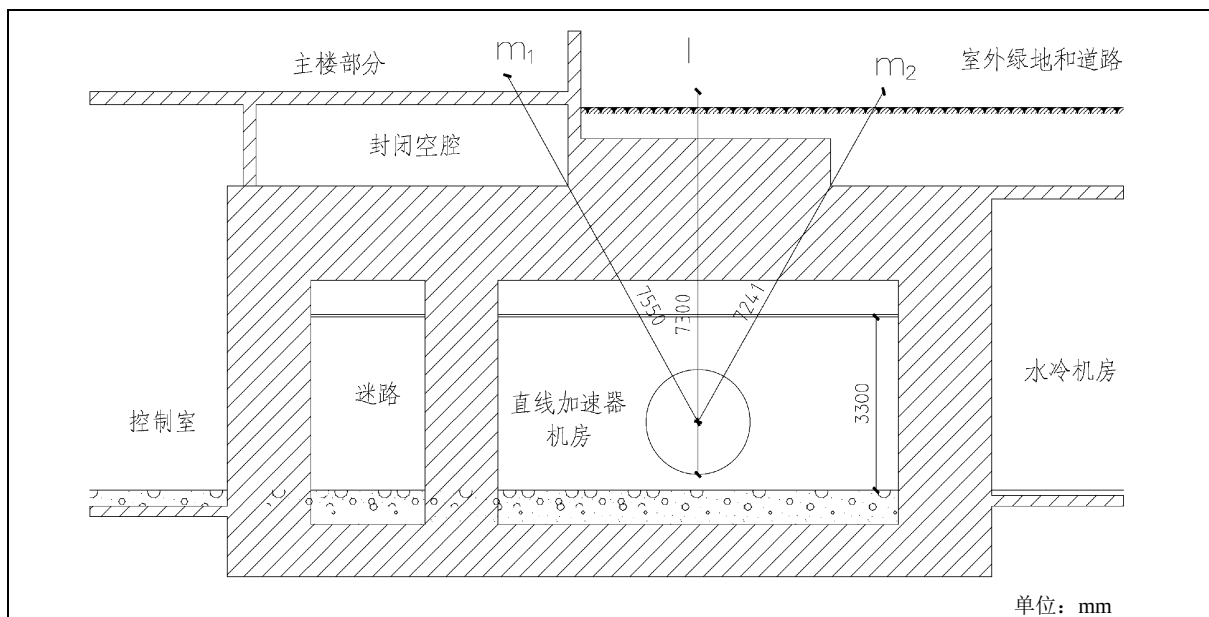


图 11.2.5-2 医用电子直线加速器机房关注点剖面图

(3) 关注点导出剂量率参考控制水平

由《放射治疗放射防护要求》(GBZ 121-2020)，关注点的导出剂量率控制水平为：

$$\dot{H}_c \leq H_e / (t \times U \times T) \quad (\text{式 11.2.5-1})$$

式中：

$\dot{H}_c$ ——周围剂量当量率参考控制水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

H_e ——周参考剂量控制水平， $\mu\text{Sv/周}$ ；

t ——设备周最大累积照射的小时数，h；

U ——治疗设备向关注点位置的方向照射的使用因子；

T ——人员在相应关注点位置的居留因子。

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021) 6.1.4 中的相关要求：

a) 治疗室墙和入口门外表面 30cm 处、邻近治疗室的关注点、治疗室房顶外的地面附近和楼层及在治疗室上方已建、拟建二层建筑物或治疗室旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点治疗室房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗室顶外表面 30cm 处和在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处的周围剂量当量率应同时满足下列 1) 和 2) 所确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ ：

1) 使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子（可依照附录 A 选取），由以下周剂量参考控制水平（ $\dot{H}_c$ ）求得关注点的导出剂量率参考控制水平

$\dot{H}_{c,d}(\mu\text{Sv/h})$:

机房外辐射工作人员: $\dot{H}_c \leq 100\mu\text{Sv/周}$;

机房外非辐射工作人员: $\dot{H}_c \leq 5\mu\text{Sv/周}$ 。

2) 按照关注点人员居留因子的不同, 分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,max}(\mu\text{Sv/h})$:

人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所: $\dot{H}_{c,max} \leq 2.5\mu\text{Sv/h}$;

人员居留因子 $T \leq 1/2$ 的场所: $\dot{H}_{c,max} \leq 10\mu\text{Sv/h}$ 。

b) 穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射, 以年剂量 $250\mu\text{Sv}$ 加以控制。

c) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶, 机房顶外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 $100\mu\text{Sv/h}$ 加以控制 (可在相应位置处设置电离辐射告示牌)。

各关注点导出剂量率参考控制水平见表 11.2.5-4 和表 11.2.5-5。

表 11.2.5-4 导出剂量率参考控制水平计算结果

关注点		T	t	$\dot{H}_c$	$\dot{H}_{c,d}$
		/	h	$\mu\text{Sv/周}$	$\mu\text{Sv/h}$
a	东墙主屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	1/4	8.33	5	9.6
b	西墙主屏蔽区外 30cm (补风机房)	1/16	8.33	5	38
c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	1/4	8.33	5	2.4
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	1/4	8.33	5	2.4
e	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	1/16	8.33	5	9.6
f	迷路外墙外 30cm (控制室)	1	8.33	100	23
k	迷路外墙外 30cm (质控室)	1/4	8.33	5	2.4
g	防护门外 30cm 处	1/8	8.33	5	4.8
l	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	1/16	8.33	5	38
m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地和道路)	1/16	8.33	5	9.6

表 11.2.5-5 剂量率参考控制水平最终取值

关注点		$\dot{H}_{c,d}$	$\dot{H}_{c,max}$	$\dot{H}_c$
		$\mu\text{Sv/h}$	$\mu\text{Sv/h}$	$\mu\text{Sv/h}$
<i>a</i>	东墙主屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	9.6	10	9.6
<i>b</i>	西墙主屏蔽区外 30cm (补风机房)	38	10	10
<i>c₁/c₂</i>	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	2.4	10	2.4
<i>d₁/d₂</i>	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	2.4	10	2.4
<i>e</i>	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	9.6	10	9.6
<i>f</i>	迷路外墙外 30cm (控制室)	23	2.5	2.5
<i>k</i>	迷路外墙外 30cm (质控室)	2.4	10	2.4
<i>g</i>	防护门外 30cm 处	4.8	10	4.8
<i>l</i>	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	38	10	10
<i>m₁/m₂</i>	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地和道路)	9.6	10	9.6

(4) 预测模型

①有用线束主屏蔽区宽度核算

有用线束防护区宽度核算的计算见下式。

$$Y_p = 2[(a + SAD) \times \tan \theta + 0.3] \dots \dots \dots (\text{式 } 11.2.5-2)$$

式中：

Y_p —机房有用射线束主屏蔽区的宽度，m；

θ —治疗束的最大张角（相对束中的轴线），即射线最大出射角的一半；射线最大出射角 28° ， θ 取 14° ；

SAD —源轴距，m，对于本项目医用电子直线加速器 SAD 为 100cm；

a —等中心至“墙”的距离；当主屏蔽区向机房内凸时，“墙”指与主屏蔽相连接的次屏蔽墙（或顶）的内表面；当主屏蔽墙区向机房外凸时，“墙”指与主屏蔽区墙（或顶）的外表面。

②防护材料有效屏蔽厚度与屏蔽透射因子

1) 有效防护材料厚度

当 X 射线束以 θ 角斜入射厚度为 X (cm) 的屏蔽物质时，射线束在斜射路径上

的防护材料有效屏蔽厚度 X_e (cm) 见下式。

$$X_e = X \cdot \sec \theta \dots\dots\dots \text{(式 11.2.5-3)}$$

式中:

θ —斜射角, 即入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角。

2) 屏壁厚度与屏蔽透射因子的相应关系

对于给定的屏蔽物质的厚度 X (cm), 按式 (11.2.5-3) 计算有效屏蔽厚度 X_e (cm), 相应的辐射屏蔽投射因子 B 见下式:

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \dots\dots\dots \text{(式 11.2.5-4)}$$

式中:

B —透射因子, 无量纲;

TVL_1 —第一个什值层厚度, cm;

TVL —平衡什值层厚度, cm。

③有用线束和泄漏辐射剂量率估算

对于给定防护材料厚度时, 屏蔽体外关注点的剂量率 $\dot{H}$ ($\mu\text{Sv/h}$) 计算见下式。

$$\dot{H} = \frac{H_0 f}{R^2} \cdot B \text{ (式 11.2.5-5)}$$

式中:

$\dot{H}_0$ —有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的常用最高剂量率, $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$;

R —辐射源点 (靶点) 至关注点的距离, m;

f —对有用线束为 1; 对泄漏辐射为泄漏辐射比率, 取 1×10^{-3} 。

④散射辐射剂量率估算

对于与主屏蔽区直接相连的次屏蔽区 (如关注点 c_1/c_2 、 d_1/d_2 、 m_1/m_2), 除了考虑有用线束的泄漏辐射外, 还需考虑有用线束水平或向顶部照射时, 人体散射辐射穿过次屏蔽区后的剂量影响。散射辐射主要考虑患者一次散射辐射的剂量率。

患者体表的散射辐射在防护实体外关注点的剂量率 $\dot{H}$ ($\mu\text{Sv/h}$) 的计算见下式。

$$\dot{H} = \frac{H_0 \cdot a_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^2} \cdot B \dots\dots\dots \text{(式 11.2.5-6)}$$

式中:

$\dot{H}_0$ —有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的常用最高剂量率,

$\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}$;

R_s —患者（位于等中心点）至关注点的距离，m；

α_{ph} —患者 400cm^2 面积上垂直入射 X 射线散射至距其 1m（关注点方向）处的剂量比例，又称 400cm^2 面积上的散射因子；

F —治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积， cm^2 。

⑤加速器（ $\leq 10\text{MV}$ ）机房的迷路散射辐射屏蔽与剂量估算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）5.2.6，机房迷路散射辐射屏蔽与剂量估算如下：

1) 入口 g 处的散射辐射剂量率

入口 g 处的散射辐射剂量率 $\dot{H}_g$ 按下式计算：

$$\dot{H}_g = \frac{\alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_1^2} \cdot \frac{\alpha_2 \cdot A}{R_2^2} \dot{H}_o \dots\dots\dots (\text{式 } 11.2.5-7)$$

式中：

$\dot{H}_g$ —g 处的散射辐射剂量率， $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

α_{ph} —患者 400cm^2 面积上的散射因子，通常取 45° 散射角的值；

F —治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积， cm^2 ；

α_2 —砼墙入射的患者散射辐射的散射因子，通常取 i 处的入射角为 45° ，散射角为 0° ， α_2 值见《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）附录 B 表 B.6，通常取 0.5MeV 栏内容；

A —i 处的散射面积， m^2 ；

R_1 —“o-i”之间的距离，m；

R_2 —“i-g”之间的距离，m；

$\dot{H}_o$ —有用线束中心轴上距靶 1m 处的常用最高剂量率， $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ 。

2) 泄漏辐射在 g 点处的辐射剂量率

泄漏辐射经迷路内墙屏蔽后至 g 点辐射剂量率 $\dot{H}_{og}$ ，根据式 11.2.5-4 和式 11.2.5-5 计算。

3) 防护门外的辐射剂量率

当给定防护门屏蔽厚度 X 时，防护门 30cm 处的辐射剂量率 $\dot{H}$ ($\mu\text{Sv}/\text{h}$) 根据下式计算：

$$\dot{H}=\dot{H}_g \cdot 10^{\left(\frac{X}{TVL}\right)}+\dot{H}_{Og} \cdots \cdots \cdots \text{(式 11.2.5-8)}$$

式中:

TVL—取 0.5cm (铅), 即 5mm;

X—治疗机房防护门铅防护材料厚度, mm。

⑥加速器 (>10MV) 机房的迷路散射辐射

1) 总中子注量 Φ_i

迷路中的中子散射路径为“O-i-g”。i 点是从等中心点与迷路内墙端的连线和迷路长轴中心线之间的交点。在 i 点的总中子注量 Φ_i 按下式计算:

$$\Phi_i=\frac{Q_n}{4\pi d_i^2}+\frac{5.4Q_n}{2\pi S}+\frac{1.26Q_n}{2\pi S} \cdots \cdots \cdots \text{(式 11.2.5-9)}$$

式中:

Φ_i —等中心处 1Gy 治疗照射时 i 处的总中子注量, (中子数/m²)/Gy;

Q_n —等中心处每 1Gy 治疗照射时加速器机头发射出的总中子数, 根据 NCRPNO.151 表 B.9 (P172~173), 本项目型号未定, 因此保守取 7.6×10^{11} ;

d_i —等中心 O 至 i 的距离, m;

S—治疗机房的总内表面积 (m²), 包括四壁墙、顶面和底面, 不包括迷路内各面积。

式 11.2.4-14 用于铅屏蔽加速器机头, 对于钨屏蔽的加速器机头, 式 11.2.5-9 的第一项和第二项均乘以衰减因子 0.85, 本项目保守按铅屏蔽加速器机头考虑。

2) 机房入口处中子俘获 γ 射线剂量率 ($\dot{H}_\gamma$)

机房内及迷路内的中子与屏蔽物质作用时产生中子俘获 γ 射线, 机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的中子俘获 γ 射线的剂量率 $\dot{H}_\gamma$ 按下式计算:

$$\dot{H}_\gamma=6.9 \times 10^{-16} \cdot \Phi_i \cdot 10^{-d_2/TVD} \cdot \dot{H}_0 \cdots \cdots \cdots \text{(式 11.2.5-10)}$$

式中:

6.9×10^{-16} —该方法中的经验因子, Sv/(中子数/m²);

d_2 —i 点至机房入口 g 点的距离, m; 本项目为 i-g 距离;

TVD—将 γ 辐射剂量减至其十分之一的距离 (称为什值距离), 对于 15MV 电子直线加速器为 3.9m;

$\dot{H}_0$ —等中心点处治疗 X 射线剂量率 (μ Gy/h), 依据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分: 电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T 201.2-2011) 的 4.8.3, 屏蔽

计算中可视为 $\mu\text{Sv/h}$ 。

3) 机房入口的中子剂量率 ($\dot{H}_n$)

机房内的中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的剂量率 $\dot{H}_n$ 按下式计算:

$$\dot{H}_n = 2.4 \times 10^{-15} \cdot \Phi_t \cdot \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \cdot [1.64 \times 10^{-(d_2/1.9)} + 10^{-(d_2/T_n)}] \cdot \dot{H}_0 \dots \text{(式 11.2.5-11)}$$

式中:

2.4×10^{-15} —该计算方法中的经验因子, Sv/(中子数/ m^2);

S_0 —迷路内口的面积, $S_0 = 2.95 \times 3.3 = 9.7 \text{m}^2$;

S_1 —迷路横截面积, $S_1 = 2.2 \times 3.3 = 7.3 \text{m}^2$;

d_2 —i 点到迷路入口 (g) 的距离, m;

T_n —迷路中能量相对高的中子剂量组分式方括号中的第二项衰减至十分之一行径的距离 (m), 称为什值距离。 T_n 是一个经验值, 与迷路横截面积有关, T_n 按下式计算:

$$T_n = 2.06 \sqrt{S_1} \dots \text{(式 11.2.5-12)}$$

4) 防护门外散射辐射剂量率计算

迷路入口防护门屏蔽设计时, 通常使用中子和中子俘获 γ 射线屏蔽后有相同的辐射剂量率, 对于中子俘获 γ 射线, 以铅屏蔽; 对于中子, 以含硼 (5%) 聚乙烯屏蔽, 对于已经定防护门屏蔽厚度 X_γ 和 X_n 时, 防护门外的辐射剂量率按下式计算:

$$\dot{H} = \dot{H}_\gamma \cdot 10^{-(x_\gamma/TVL_\gamma)} + \dot{H}_n \cdot 10^{-(x_n/TVL_n)} + \dot{H}_{Og} \cdot B_{Og} \dots \text{(式 11.2.5-13)}$$

式中:

$\dot{H}$ 、 $\dot{H}_\gamma$ 、 $\dot{H}_n$ 、 $\dot{H}_{Og}$ 意义同前文;

X_γ —防护门铅屏蔽厚度, mm;

X_n —防护门含硼 (5%) 聚乙烯屏蔽厚度, mm;

B_{Og} —防护门对 $\dot{H}_{Og}$ 的屏蔽透射因子, $\dot{H}_{Og}$ 相对防护门入口处的总剂量率较小, 可以忽略 $\dot{H}_{Og} \cdot B_{Og}$ 项;

TVL_γ —中子俘获 γ 射线铅屏蔽中的什值层, cm, 根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分: 电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T 201.2-2011) 附录 C, 查得 $TVL_\gamma = 31 \text{mm}$;

TVL_n —中子在含硼（5%）聚乙烯屏蔽中的什值层，cm，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）附录C，查得 $TVL_n=45\text{mm}$ ；

（5）预测结果分析

①有用线束主屏蔽区宽度核算

有用线束主屏蔽区宽度核算结果见表 11.2.5-6。

表 11.2.5-6 有用线束主屏蔽区宽度核算

主屏蔽体	设计形式	a	Y_p	设计的主屏蔽范围值	结论
		m	m	m	
东墙	外凸	6.95	4.56	4.8	满足
西墙	内凸	5.15	3.67	4.8	满足
顶棚	外凸	5.4	4.29	4.8	满足

②机房外各关注点辐射剂量率估算

1) 10MV，FFF 模式

本项目直线加速器（10MV，FFF 模式）机房外有用线束和泄露辐射剂量率估算见表 11.2.5-7。

表 11.2.5-7 有用线束和泄漏辐射剂量率估算（10MV，FFF 模式）

关注点		X	θ	X_e	R	B	$\dot{H}$
		m	°	m	m	/	$\mu\text{Sv/h}$
a	东墙主屏蔽区外 30cm (2号直线加速器机房)	3	0	3	8.2	1.00×10^{-8}	0.22
b	西墙主屏蔽区外 30cm (补风机房)	3	0	3	8.3	1.00×10^{-8}	0.21
c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2号直线加速器机房)	1.8	30	2.07	8.1	2.83×10^{-7}	6.21×10^{-3}
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	1.8	30	2.07	8.6	2.83×10^{-7}	5.51×10^{-3}
e	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	1.8	0	1.8	5.8	2.10×10^{-6}	9.00×10^{-2}
f	迷路外墙外 30cm (控制室)	3	0	3	9.5	2.83×10^{-10}	4.51×10^{-6}
k	迷路外墙外 30cm (质控室)	1.6	0	1.6	10	9.28×10^{-6}	0.14
g	防护门外 30cm 处	1.4	30	1.61	10.6	8.62×10^{-6}	0.11
l	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	2.7	0	2.7	7.3	6.47×10^{-8}	1.75

m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地和道路)	1.8	30	2.07	7.2	2.83×10^{-7}	7.86×10^{-3}
注：1.对于关注点 a、b、l， TVL_1 取 41cm， TVL 取 37cm， f 取 1，其余关注点 TVL_1 取 35cm， TVL 取 31cm， f 取 10^{-3} ； 2.根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器治疗机房》(GBZ/T 201.2-2011)的相关要求，对于关注点 k 通常以 0° 垂直入射保守估算，下表同。							

本项目直线加速器（10MV，FFF 模式）机房外散射辐射剂量率估算见表 11.2.5-8。

表 11.2.5-8 散射辐射剂量率估算（10MV，FFF 模式）

关注点		X_e	R_s	F	α_{ph}	B	$\dot{H}$
		m	m	cm ²	/	/	μSv/h
c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	2.07	8.1	1600	3.18×10^{-3}	4.05×10^{-8}	1.13×10^{-2}
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	2.07	8.6	1600	3.18×10^{-3}	4.05×10^{-8}	1.00×10^{-2}
m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地和道路)	2.07	7.2	1600	3.18×10^{-3}	4.05×10^{-8}	1.43×10^{-2}
注：TVL 取 28cm。							

本项目直线加速器（10MV，FFF 模式）机房入口 g 处的散射辐射剂量率估算见表 11.2.5-9。

表 11.2.5-9 机房入口 g 处散射辐射剂量率的估算（10MV，FFF 模式）

关注点		α_{ph}	α_2	A	F	R_1	R_2	$\dot{H}_g$
		/	/	m ²	cm ²	m	m	μSv/h
g	防护门外 30cm 处	1.35×10^{-3}	22×10^{-3}	14.5	1600	7.4	10.2	439

机房防护门外的散射辐射剂量为 $439 \times 10^{-(20/5)} = 4.39 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ ，则防护门外的辐射剂量率 $\dot{H}$ 为 $4.39 \times 10^{-2} + 0.11 = 0.16 \mu\text{Sv/h}$ 。

本项目直线加速器（10MV，FFF 模式）机房外各关注点辐射剂量率估算结果汇总分析见表 11.2.5-10。

表 11.2.5-10 辐射剂量率估算结果汇总分析（10MV，FFF 模式）

关注点		剂量率估算结果（μSv/h）			剂量率参考控制水平（μSv/h）	符合情况
		有用线束/泄漏	散射辐射	合计		
a	东墙主屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	0.22	/	0.22	9.6	符合
b	西墙主屏蔽区外 30cm (补风机房)	0.21	/	0.21	10	符合

c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	6.21×10^{-3}	1.13×10^{-2}	1.76×10^{-2}	2.4	符合
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	5.51×10^{-3}	1.00×10^{-2}	1.56×10^{-2}	2.4	符合
e	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	9.00×10^{-2}	/	9.00×10^{-2}	9.6	符合
f	迷路外墙外 30cm (控制室)	4.51×10^{-6}	/	4.51×10^{-6}	2.5	符合
k	迷路外墙外 30cm (质控室)	0.14	/	0.14	2.4	符合
g	防护门外 30cm 处	0.11	4.39×10^{-2}	0.16	4.8	符合
l	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	1.75	/	1.75	10	符合
m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地 和道路)	7.86×10^{-3}	5.74×10^{-2}	6.53×10^{-2}	9.6	符合

2) 15MV

本项目直线加速器 (15MV) 机房外有用线束和泄露辐射剂量率估算见表 11.2.5-11。

表 11.2.5-11 各关注点有用线束和泄漏辐射剂量率估算 (15MV)

关注点		X	θ	X_e	R	B	$\dot{H}$
		m	°	m	m	/	μSv/h
a	东墙主屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	3	0	3	8.2	5.70×10^{-8}	0.51
b	西墙主屏蔽区外 30cm (补风机房)	3	0	3	8.3	5.70×10^{-8}	0.50
c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	1.8	30	2.07	8.1	6.58×10^{-7}	6.02×10^{-3}
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	1.8	30	2.07	8.6	6.58×10^{-7}	5.34×10^{-3}
e	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	1.8	0	1.8	5.8	4.33×10^{-6}	7.72×10^{-2}
f	迷路外墙外 30cm (控制室)	3	0	3	9.5	1.00×10^{-9}	6.65×10^{-6}
k	迷路外墙外 30cm (质控室)	1.6	0	1.6	10	1.75×10^{-5}	0.11
g	防护门外 30cm 处	1.4	30	1.61	10.6	1.63×10^{-5}	8.70×10^{-2}
l	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	2.7	0	2.7	7.3	3.07×10^{-7}	2.08
m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿 地和道路)	1.8	30	2.07	7.2	6.58×10^{-7}	7.61×10^{-3}

注：1.注：1.对于关注点 a 、 b 、 l ， TVL_1 取 44cm， TVL 取 41cm，其余关注点 TVL_1 取 36cm， TVL 取 33cm。

本项目直线加速器 (15MV) 机房外散射辐射剂量率估算见表 11.2.5-12。

表 11.2.5-12 散射辐射剂量率估算 (15MV)

关注点		X_e	R_s	F	α_{ph}	B	$\dot{H}$
		m	m	cm ²	/	/	μSv/h
c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	2.07	8.1	1600	3.18×10^{-3}	4.05×10^{-8}	4.71×10^{-3}
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	2.07	8.6	1600	3.18×10^{-3}	4.05×10^{-8}	4.18×10^{-3}
m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地和道路)	2.07	7.2	1600	3.18×10^{-3}	4.05×10^{-7}	5.96×10^{-3}

注: 1.TVL 取 28cm;

2.由于《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分: 电子直线加速器治疗机房》(GBZ/T 201.2-2011) 附录 B 的表 B.2 中未提供 15MV 下, 散射角为 30° 的散射因子 α_{ph} , 故本项目保守按 10MV 下取 3.18×10^{-3} 。

在 i 点的总中子注量 Φ_B 估算见表 11.2.5-13。

表 11.2.5-13 总中子注量估算

Q_n	d_l	S	Φ_B
中子数/Gy	m	m ²	(中子数/m ²) /Gy
7.6×10^{11}	7.4	183	5.51×10^9

机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的中子俘获 γ 射线的剂量率 $\dot{H}_\gamma$ 估算见表 11.2.5-14。

表 11.2.5-14 机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的中子俘获 γ 射线的剂量率估算

Φ_B	$\dot{H}_0$	d_2	TVD	$\dot{H}_\gamma$
(中子数/m ²) /Gy	μSv/h	m	m	μSv/h
5.51×10^9	6×10^8	10.2	3.9	5.53

什值距离 T_n 和机房内的中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的剂量率 $\dot{H}_n$ 估算见表 11.2.5-15。

表 11.2.5-15 中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的剂量率

Φ_B	$\dot{H}_0$	S_0	S_l	d_2	T_n	$\dot{H}_n$
(中子数/m ²) /Gy	μSv/h	m ²	m ²	m	m	μSv/h
5.51×10^9	6×10^8	9.7	7.3	10.2	5.57	135

防护门外 30cm (g 点) 处的辐射剂量率 $\dot{H}$ 估算见表 11.2.5-16。

表 11.2.5-16 机房入口门外 30cm (g 点) 处的辐射剂量率估算

$\dot{H}_\gamma$	X_γ	TVL_γ	$\dot{H}_n$	X_n	TVL_n	$\dot{H}$
$\mu\text{Sv/h}$	mm	mm	$\mu\text{Sv/h}$	mm	mm	$\mu\text{Sv/h}$
5.53	20	31	135	150	45	1.32

本项目直线加速器 (15MV) 机房外各关注点辐射剂量率估算结果汇总分析见表 11.2.5-17。

表 11.2.5-17 辐射剂量率估算结果汇总分析 (15MV)

关注点		剂量率估算结果 ($\mu\text{Sv/h}$)			剂量率参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	符合情况
		有用线束/泄漏	散射辐射	合计		
<i>a</i>	东墙主屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	0.51	-	0.51	9.6	符合
<i>b</i>	西墙主屏蔽区外 30cm (补风机房)	0.50	-	0.50	10	符合
c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	6.02×10^{-3}	4.71×10^{-3}	1.08×10^{-2}	2.4	符合
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	5.34×10^{-3}	4.18×10^{-3}	9.52×10^{-3}	2.4	符合
<i>e</i>	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	7.72×10^{-2}	-	7.72×10^{-2}	9.6	符合
<i>f</i>	迷路外墙外 30cm (控制室)	6.65×10^{-6}	-	6.65×10^{-6}	2.5	符合
<i>k</i>	迷路外墙外 30cm (质控室)	0.11	-	0.11	2.4	符合
<i>g</i>	防护门外 30cm 处	8.70×10^{-2}	1.32	1.41	4.8	符合
<i>l</i>	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	2.08	-	2.08	10	符合
m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿地和道路)	7.61×10^{-3}	5.96×10^{-3}	1.36×10^{-2}	9.6	符合

综上所述, 本项目直线加速器在 10MV 和 15MV 下运行, 机房的辐射屏蔽措施均能够使其机房外各关注点的辐射剂量率小于剂量率参考控制水平。

(6) 职业人员和周围公众年有效剂量估算

本项目直线加速器的周工作时间为 8.33h, 技师的年受照时间 208.34h, 公众的年受照时间为 416.67h。根据式 11.2.1-5, 本项目职业人员和周围公众年有效剂量估算见表 11.2.5-18。

表 11.2.5-18 职业人员和周围公众年有效剂量估算

关注点		辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	居留 因子	年有效剂量 (mSv)	剂量约束值 (mSv/a)	人员 类别
a	东墙主屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	0.51	1/4	5.31×10^{-2}	0.1	公众
b	西墙主屏蔽区外 30cm (补风机房)	0.5	1/16	1.30×10^{-2}	0.1	公众
c_1/c_2	东墙次屏蔽区外 30cm (2 号直线加速器机房)	1.76×10^{-2}	1/4	1.83×10^{-3}	0.1	公众
d_1/d_2	西墙次屏蔽区外 30cm (设备用房、走廊)	1.56×10^{-2}	1/4	1.63×10^{-3}	0.1	公众
e	北墙次屏蔽区外 30cm (水冷机房)	9.00×10^{-2}	1/16	2.34×10^{-3}	0.1	公众
f	迷路外墙外 30cm (控制室)	6.65×10^{-6}	1	1.39×10^{-6}	5	职业 人员
k	迷路外墙外 30cm (质控室)	0.14	1/4	1.46×10^{-2}	0.1	公众
g	防护门外 30cm 处	1.41	1/8	7.34×10^{-2}	0.1	公众
l	机房顶主屏蔽区外 30cm 处 (室外绿地和道路)	2.08	1/16	5.42×10^{-2}	0.1	公众
m_1/m_2	机房顶次屏蔽区外 30cm 处 (电梯厅、柴发室、室外绿 地和道路)	6.53×10^{-2}	1/16	1.70×10^{-3}	0.1	公众

注：各关注点辐射剂量率取值为 10MV，FFF 模式估算结果和 15MV 条件估算结果中的较大值。

注：各关注点辐射剂量率取值为 10MV，FFF 模式估算结果和 15MV 条件估算结果中的较大值。

由上表可知，本项目医用电子直线加速器运行时，控制室辐射工作人员所受的年有效剂量为 $1.39 \times 10^{-6} \text{mSv}$ ，能够满足本项目职业人员所受年有效剂量不超过 5mSv 的剂量约束值要求。

直线加速器机房周围各关注点的公众所受的年有效剂量最大为 $7.34 \times 10^{-2} \text{mSv}$ 。对于机房 50 米范围内其他公众，由于剂量率与距离平方成反比以及评价范围内墙体以及土层的屏蔽，随着距离的增加，则直线加速器机房外 50m 范围内公众所受的年有效剂量更小。

综上，本项目直线加速器机房周围及 50m 范围内其他公众所受的年有效剂量最大值为 $7.34 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ，能够满足本项目公众所受年有效剂量不超过 0.1mSv 的剂量约束值要求。

以上数据是以机房实体屏蔽体外 30cm 处根据最大使用剂量的剂量率值进行估算，在实际的放疗工作中，工作人员一般都不会近距离停驻在治疗室实体屏蔽体附近，而且很少使用最大剂量，因此以上是偏保守的估算结果，实际情况中职业人员

和公众受照累计剂量均低于以上估算值。

(7) 电子线和感生放射性影响分析

根据《辐射防护手册》第三分册 4.1.5 加速器的辐射源 (P95), “能量为 E (MeV) 的单能电子线, 在物质中的最大射程 (单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) 约为能量 (单位为 MeV) 的 0.6 倍”。本项目医用电子直线加速器以电子档工作时最大电子线能量为 22MeV, 射程为 $22\times 0.6=13.2\text{g}/\text{cm}^2$, 可以估算出 22MeV 的电子在密度为 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 的混凝土中的深度约为 5.6cm, 而本项目屏蔽体厚度最小的为 150cm 混凝土, 对电子线能被完全屏蔽。因此, 可不考虑电子线对屏蔽墙外的辐射影响。

由于机房有足够的屏蔽, 直线加速器运行期间产生的感生放射性不会对机房外的环境产生辐射污染。但每次治疗结束后, 辐射工作人员需进入机房引导治疗后患者离开并对下一位患者进行摆位。往往由于患者较多, 辐射工作人员一般在医用电子直线加速器停机后 2min 左右就进入治疗室内, 此时大部分感生放射性核素未能充分衰变。本项目按照平均每位患者摆位时间为 30s 考虑, 则年总摆位时间为 83.33h, 本项目共有 2 名技师, 则单名技师的年摆位时间按 41.67h 考虑, 保守采用《医用电子直线加速器质量控制检测规范》(WS 674-2020) 标准规定限值最大值 (距离外壳表面 1m 处 $\leq 20\mu\text{Sv}/\text{h}$) 进行估算, 则本项目辐射工作人员在摆位时受到的年有效剂量最大为 0.83mSv。

综上所述, 本项目辐射工作人员的年有效剂量为 $0.83+1.39\times 10^{-6}=0.83\text{mSv}$, 仍满足本项目职业人员所受年有效剂量不超过 5mSv 的剂量约束值要求。

医院应对加速器机房加强通风排气, 并采取人员延时进入机房, 以降低活化空气的感生放射性水平, 减少人员受照剂量。

(8) 三废环境影响分析

本项目医用电子直线加速器正常运行过程中无放射性废气、废液和固体废物产生, 在靶损坏或退役时会产生活化后的废靶。

①臭氧和氮氧化物

本项目直线加速器运行过程中, 会产生少量臭氧、氮氧化物。机房设置强制排风系统, 采取全排全送的通风方式, 机房内废气最终通过肿瘤综合治疗中心楼顶排至大气环境。拟安装排风机的有效排风量为 $1500\text{m}^3/\text{h}$, 机房换气次数大于 4 次/h。臭氧和氮氧化物排入大气环境后, 经自然分解, 对周围环境影响较小。

②废靶

本项目对于直线加速器靶损坏或退役时产生的活化后的废靶，由设备厂家回收最终送交有资质的单位回收处置，医院不暂存，因而正常情况下不会对环境造成明显影响。

11.2.3 放疗科模拟定位 CT 运行阶段环境影响分析

(1) 机房周围辐射剂量率估算

对于模拟定位 CT 运行时产生的 X 射线的辐射屏蔽。参考西门子厂家 140kV 工况下 CT 周围的剂量率分布曲线，1m 处的杂散辐射为 $0.052\mu\text{Gy}/\text{mA}\cdot\text{s}$ （垂直）和 $0.051\mu\text{Gy}/\text{mA}\cdot\text{s}$ （水平），CT 扫描通常不超过 300mA，剂量换算系数 Sv/Gy 取 1，故 1m 处的杂散辐射剂量率最高约为 $5.62\times 10^4\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。其他型号设备的 CT 散射辐射水平也在相同量级。

本项目模拟定位 CT 机房的各屏蔽体的有效屏蔽厚度均不低于 4mmPb，根据《放射诊断放射防护要求》附录 C 的 C.1.2 中式 C.1 计算得屏蔽透射因子最大为 1.50×10^{-5} ，距离屏蔽体外最近关注点的距离取 3m，剂量换算系数 Sv/Gy 取 1，则 CT 设备运行所致的辐射剂量率为 $9.37\times 10^{-2}\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）规定的 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 控制剂量率要求。

(2) 人员受照剂量估算

本项目模拟定位 CT 机投入使用后，预计每天诊断患者最多为 50 人次，设备单次曝光时间不超过 30 秒，则设备年出束时间为 104.2h，本项目辐射工作人员年受照时间为 52.1h。

对于职业人员，居留因子取 1，年受照时间为 52.1h，根据式 11.2.1-5 计算，则本项目模拟定位 CT 机房辐射工作人员所受年有效剂量最大为 $4.88\times 10^{-3}\text{mSv}$ ，能够满足本项目职业人员所受年有效剂量不超过 5mSv 的年剂量约束值要求。

对于公众，居留因子保守取 1，年受照时间为 104.2h，根据式 11.2.1-5 计算，则本项目模拟定位 CT 机房周围公众所受年有效剂量最大为 $9.76\times 10^{-3}\text{mSv}$ ，能够满足本项目公众所受年有效剂量不超过 0.1mSv 的年剂量约束值要求。

(3) 臭氧及氮氧化物影响分析

模拟定位 CT 运行过程中，X 射线或电子线会与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物。本项目模拟定位 CT 机房拟设置动力通风装置，进风口及排风口拟设置

于机房吊顶，保证机房内有良好的通风。产生的少量臭氧和氮氧化物经动力通风装置收集后最终从肿瘤综合治疗中心楼顶排放。臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，可达标排放，对周围环境影响较小。

11.3 事故影响分析

11.3.1 核医学科事故影响分析

(1) 可能发生的事故

主要考虑电离辐射损伤和药物失控对环境的影响。

①射线装置机房门灯联锁装置发生故障时，人员误入正在运行的射线装置机房，对人员造成误照射。

②由于工作人员操作不熟练或违反放射操作规程或误操作等其他原因致使放射性药物洒漏，造成意外照射和辐射污染。

③由于未锁好核医学科进出口的大门或取用药物后未及时锁好防护门或保险柜等药物保管工作不到位致使放射性药剂丢失，可能对公众和周围环境造成辐射污染。

(2) 辐射事故防范措施

①制定完善的操作规范，对操作人员定期培训，使之熟练操作，严格按照操作规范操作，减少药物洒漏事故的发生。若少量放射性物质洒漏，应迅速用吸附衬垫吸干溅洒的液体，以防止污染扩散。若大量放射性物质洒漏，医院应立即封锁相关场所，并向上级有关部门报告，等待专业人员前来处理。事故处理结束后，使用表面污染检测仪对洒漏放射性液态的区域进行表面污染监测，符合国家相关标准后，结束应急状态。事后及时总结经验，形成纸质报告并存档。

②制定和完善放射性核素安全管理制度，设专人负责，做好核素的领取、使用登记工作，确保放射性药物的安全。专用源库设置防盗门及报警装置等设施，做好防火防盗工作。

当发生放射性药物丢失事故时，事故发现者应立即报告医院辐射事故应急指挥领导小组，保护现场。领导小组立即启动本单位辐射事故应急预案，疏散现场无关人员；向当地生态环境主管部门、公安部门、卫生主管部门报告，在 2 小时内填写《辐射事故初始报告单》；协助公安、生态环境和卫生主管部门对丢失放射性药物进行侦查和追缴，力争在最短时间内将放射性物品找回。

③加强对有药患者的管理，在不影响诊断和治疗的情况下，限制其服药量，限制患者出院时的放射性药物携带量，并对出院的有药患者提供与他人接触时的辐射防护措施的书面指导，使患者明白并自觉做到短期内不到公众场所活动，并避免与家人近距离密切接触。

④加强放射性废物的管理，对储存的放射性废物在废物桶外标明放射性废物的型、核素种类和存放日期的说明，并做好相应的记录。放射性废液和固体废物经足够长的时间衰变后，方可排放或按照普通医疗垃圾处理，并做好监测记录。

⑤核医学科个人防护用品主要包括工作服、工作鞋、帽等基本防护用品，以及铅橡胶围裙、铅防护眼镜等防护用品。工作人员进入控制区必须穿戴放射防护用品，个人计量仪佩戴于铅橡胶围裙内部左胸前。在进行分装及注射放射性药物时穿放射性污染防护服、戴口罩、手套，必要时戴防护眼镜。尽量利用长柄钳、镊子等工具操作，增加与放射性药物的距离。为病人注射放射性药物时，工作人员手部有一定受照量，操作者应使用注射器屏蔽装置。科主任负责个人防护用品使用方法培训及个人防护用品的存放、更新工作。

⑥严格按照辐射监测计划进行辐射水平监测，如果控制区各房间辐射水平监测结果表明防护墙外辐射水平偏高，应适当增加防护墙厚度。

11.3.2 放疗科直线加速器事故影响分析

(1) 可能发生的辐射事故

本项目直线加速器的安装、检修由设备厂家负责，医院只负责日常安全使用及管理。由于机房的屏蔽措施以及设备固有的安全联锁装置，设备在正常使用的情况下发生事故的概率极小，可能发生的辐射事故主要包括：

①安全联锁失效，人员可能在防护门未关闭时误入机房，如果这时运行加速器，则可能造成误照射事故。

②除接受治疗患者以外，机房中仍有其他人员未撤离时，操作人员未严格按照操作规程确认机房中环境便运行加速器，则会造成机房中人员误照射。

本项目直线加速器属于Ⅱ类射线装置，当设备关机时不会产生辐射影响，不存在影响辐射环境质量事故，只有当设备开机时才会产生辐射影响。

(2) 辐射事故预防措施

一旦发现有人误入直线加速器机房，工作人员应立即利用最近的急停开关切断

设备电源，启动医院辐射事故应急预案。为防止直线加速器辐射事故发生，应采取多种防范措施：

①控制台上要有辐射类型、标称能量、照射时间、吸收剂量、治疗方式等参数的显示装置，操作人员可随时了解设备运行情况。

②条件显示联锁：加速器具有联锁装置，只有当射线能量、吸收剂量选值、照射方式和过滤器的规格等参数选定，并当治疗室与控制台等均满足预选条件后，照射才能进行。

③剂量控制联锁：安装有剂量监测系统，当吸收剂量未达到预选值时，照射终止。

④控制台上配置有独立于其他任何控制辐照终止系统的控制计时器，当辐照终止后能保留计时器读数，计时器复零，才能启动下次辐照。

⑤有控制超剂量的联锁装置，当剂量超过预选值时，可自动终止照射。

⑥有剂量分布监测装置与辐照终止系统联锁，当剂量分布偏差超过预选值时，可自动终止辐照。

⑦有全部安全联锁设施检查装置，能保证所有安全联锁系统保持良好的运行状态。

⑧有门机安全联锁，机房门关闭后设备才能开机，被打开时会自动关机。

⑨有时间控制联锁，当预选照射时间已定时，定时器能独立地使照射停止。

⑩控制台和治疗室内均安有急停开关。

⑪机房门外设置有声音警示作用的工作状态指示灯和电离辐射警告标志。

⑫视频监控、对讲装置：治疗室和控制室之间安装有视频监控、对讲装置，控制室能通过视频监视治疗室内患者治疗的情况，并通过对讲机与室内人员联系，以便医师在操作时观察患者在治疗室的状态，及时处理意外情况。

11.3.3 放疗科模拟定位 CT 事故影响分析

（1）可能发生的辐射事故

①模拟定位 CT 在运行时，由于安全联锁系统失效，人员误入或滞留在治疗机房内而造成误照射；

②工作人员或病人家属还未全部撤离治疗机房，控制室人员启动设备，造成滞留人员的误照射；

③模拟定位 CT 在运行时，没有关闭防护门对人员造成的误照射。

(2) 辐射事故预防措施

①制定经常性自检制度，对门-灯联锁、工作状态指示灯等防护设施进行经常性检查，如发现这些防护设施不够完善或失灵，立即维护、修复；

②制定完善的操作规范，对操作人员定期培训，使之熟练操作，严格按照操作规范操作，减少意外照射事故的发生；

③医务人员必须严格按照 X 射线装置操作程序进行诊断，确定机房内工作人员及病人家属均离开机房后方可开机，以避免工作人员和公众接受不必要的辐射照射；

④项目应严格遵循所用辐射设备的安全使用年限，避免机械故障造成辐射事故，严禁超期使用；

⑤严格按照辐射监测计划进行辐射水平监测，如验收监测及年度监测结果表明外墙、防护门缝隙、观察窗、孔洞等处辐射水平偏高时，应立即停机，查明原因并优化屏蔽设计和施工，未整改到位前，设备不得开机。

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

12.1.1 机构的设置

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》相关要求，本项目为使用乙级非密封放射性物质工作场所，使用 II、III类射线装置情况，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。

医院已成立了放射管理委员会，全面负责医院的辐射安全管理工作及相关工作。该文件中明确了领导小组成员组成及相关职责，本项目实施后，核医学负责人需纳入医院现有的辐射安全与环境保护管理机构中，建设单位应及时更新、调整管理机构的人员组成。

12.1.2 辐射工作人员管理

(1) 辐射安全与防护考核

医院严格执行辐射工作人员培训和考核制度，根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号）和《关于进一步优化辐射安全考核公告》（生态环境部公告第 2021 年第 9 号），医院现有 206 名辐射工作人员，其中使用III类射线装置的辐射工作人员均参加了医院自行组织的培训考核，并考核合格，其余辐射工作人员均参加了国家核技术利用辐射安全与防护培训平台集中考核，考核合格且成绩均在有效期内。

对于本项目新增辐射工作人员，应在国家核技术利用辐射安全与防护培训平台进行相应类别的辐射安全与防护培训，并报名参加相应类别的考核，考核合格后方可上岗，并按时接受再培训。

(2) 职业健康检查

辐射工作人员上岗前，应当进行上岗前的职业健康检查，符合辐射工作人员健康标准的，方可参加相应的辐射工作。上岗后辐射工作人员应定期进行职业健康检查，两次检查的时间间隔不超过 2 年，必要时可增加临时性检查。辐射工作人员脱离放射工作岗位时，放射工作单位应当对其进行离岗前的职业健康检查。

对于新增本项目辐射工作人员，医院应按要求至少每两年进行在岗期间职业健

康检查，并建立职业健康监护档案。

(3) 个人剂量检测

对于本项目新增辐射工作人员均应配备个人剂量计，并按期（最长不超过 3 个月）委托有资质单位进行个人剂量检测，并建立个人剂量检测档案。

本项目辐射工作人员的考核合格证书、职业健康监护档案、个人剂量检测档案三个文件上的人员信息应统一；职业照射个人检测档案应保存至年满七十五周岁。建设单位应设专人进行环保档案的整理、存档，项目环保档案应包括：项目环境影响评价资料、相关环保会议纪要、辐射安全许可证申请资料、项目竣工环境保护验收资料、日常监测资料（或台账）、辐射工作人员培训资料、考核合格证书、体检报告、个人剂量检测报告及相关调查资料。以上资料按年度进行整理、规范化保存，发现问题及时上报、解决，以满足生态环境主管部门监督检查的要求。

12.1.3 年度评估报告

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，辐射工作单位应当对本单位放射性同位素和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。医院年度评估报告包括：放射性同位素与射线装置台账、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。

医院已按要求对开展的核技术利用项目进行了辐射安全与防护状况评估，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。本项目建成运行后，医院应将本项目纳入现有辐射安全与防护状况年度评估报告，定期上报至发证机关。

12.2 辐射安全管理规章制度

为了保护辐射工作人员、公众及环境的安全，促进辐射实践的正当性，辐射防护的最优化，规范工作人员的操作规程，根据相关法律、法规、规范的要求，医院已制定了《放射（辐射）安全管理制度》、《放射（辐射）防护和安全保卫制度》、《放射从业人员检测管理制度》、《放射防护用品管理制度》、《放射防护培训制度》、《个人剂量监测制度》、《放射诊疗场所放射防护检测与评价制度》、《放射诊疗中心仪器设备使用、维护管理制度》、《放射诊断岗位职责》等管理规章制度。医院现有辐射安全管理规章制度内容较为全面，符合相关要求，现有规章制度基本满足医院从事相关辐射活动辐射安全和防护管理的要求。

鉴于建设单位目前还未制定核医学相关管理规章制度，在本项目建成后运行前，建设单位应根据本项目的特点，制定和完善以下方面的管理规章制度，并对现有制度进行补充和完善，以保证医院辐射相关工作安全有序开展。

（1）操作规程：根据 PET/CT 和 SPECT/CT 设备的操作规程，明确操作人员的权限以及操作时必须采取的防护措施，明确工作中的控制措施以及操作程序等。

（2）岗位职责：明确核医学科辐射工作人员及辐射安全管理人员的岗位责任，并落实到个人，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任，层层落实。

（3）辐射防护和安全保卫制度：根据本项目核医学科的具体情况制定辐射防护和安全保卫制度，重点是：定期检查相关的辐射安全装置及检测仪器，发现问题及时修理或更换；工作人员定期开展个人剂量检测和职业健康监护。

（4）设备检修维护制度：明确监控设备以及监测仪器在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施，监测仪器必须保持良好工作状态。

（5）台账管理制度：医院应当建立放射性核素与射线装置台账，记载放射性同位素的核素名称、出厂时间和活度、标号、编码、来源和去向，及射线装置的名称、型号、射线种类、类别、用途、来源和去向等事项。

（6）放射性三废管理制度：明确医院运营过程中产生的放射性三废，明确放射性三废的收集、处理、处置等事项。

（7）应急预案：对应急措施、事故后续处理等做出要求，明确建立应急机构和人员职责分工，应急人员的组织、培训以及应急，辐射事故分类与应急响应的措施。

12.3 辐射监测

辐射监测是安全防护的一项必要措施，通过辐射剂量监测得到的数据，可以分析判断和估计电离辐射水平，防止人员受到过量的照射。根据实际情况，建设单位需建立辐射监测制度，包括工作场所监测、环境监测和个人剂量监测。

12.3.1 监测仪器和防护设备

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，使用放射性同位素、射线装置的单位应该配置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。使用非密封放射性物质的单位还应当有表面污染监测仪。根据以上要求，本项目辐射工作场所监测仪器拟配备情况见表 12.3.1-1。

表 12.3.1-1 辐射工作场所监测仪器拟配备情况

工作场所	监测仪器	数量
核医学科	表面污染监测仪	2 台
	个人剂量报警仪	6 台
放疗科直线加速器机房	中子剂量仪	1 台
	固定式辐射剂量检测仪（带有报警功能）	2 台
	个人剂量报警仪	2 台
模拟定位 CT 机房	个人剂量报警仪	1 台
全院共用	X-γ 辐射剂量率巡测仪	1 台

本项目运行期间主要污染物为 X-γ 射线、β 表面污染、中子剂量外照射等，根据项目特点，医院共拟配备 1 台 X-γ 辐射剂量率巡测仪、2 台表面污染监测仪、1 台中子剂量仪和 9 台个人剂量报警仪以及每名辐射工作人员均配备个人剂量计，并建立个人剂量档案，项目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》对监测仪器的配备要求。

12.3.2 监测计划

（1）年度监测

医院已委托有资质的单位对辐射工作场所的剂量进行监测，监测周期为 1 次/年；年度监测报告应附于《辐射安全和防护状况年度评估报告》一并提交给发证机关。

（2）日常自行监测

日常工作中，每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测），需使用 β 表面污染监测仪对本项目辐射工作场所放射性污染情况进行监测，工作人员离开辐射工作场所时，需监测手、皮肤暴露部分以及工作服、手套、鞋、帽等的污染水平，这部分日常监测工作由本项目辐射工作人员自行完成。此外，本项目辐射工作场所应采用环境辐射巡测仪进行定期监测，频次不少于 1 次/月，以确保屏蔽防护性能的良好。

（3）监测内容和要求

监测内容：β 表面放射性污染；周围剂量当量率；中子剂量率。

监测布点及数据管理：监测布点应参考环评提出的监测计划或验收监测布点方案。监测数据应记录完善，并将数据实时汇总，建立好监测数据台账以便核查。

表 12.3.1-2 辐射工作场所监测计划建议

工作场所	监测内容	监测点位	监测周期	
			自行监测	委托监测
核医学科	β 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，候检室，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等	每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）	1 次/年
	周围剂量当量率	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点位和存有放射性物质的装置/设备的表面	1 次/月	1 次/年
直线加速器机房	周围剂量当量率	直线加速器机房防护门外、门缝、电缆线沟、管线洞口、四侧墙体外 30cm 处、顶棚等处	1 次/季度	1 次/年
	中子剂量率			
模拟定位 CT 机房	周围剂量当量率	机房四侧屏蔽墙外 30cm 处、顶棚 100cm 处，楼下 170cm 处及周围需要关注的监督区、机房防护门及门缝、观察窗、电缆/空调/风管穿墙处等	1 次/季度	1 次/年

12.4 辐射事故应急

12.4.1 辐射事故应急响应机构的设置

医院已成立了放射管理委员会，该组织同时负责辐射事故应急响应的相关工作：

（1）人员组成：

组长：李略

副组长：王和平、金晓红

成员：胡舟朝、陈国雄、何伟岳、张增辉、王斌达、张玉惠、陈炳、郑珉、周海伟、林善红、李可、方国康、谢蓓蕾、冷雪

（2）职责：

- 1、定期组织对放射诊疗场所、设备和人员进行放射防护情况进行自查和检测，发现事故隐患及时上报至院办并落实整改措施；
- 2、发生人员受超剂量照射事故，应启动本预案；
- 3、事故发生后立即组织有关部门人员进行放射性事故应急处理；
- 4、2h 内向生态环境主管部门报告事故情况；
- 5、负责放射性事故应急处理具体方案的研究确定和组织实施工作；
- 6、放射事故中人员受照时，要通过个人剂量计或其它工具、方法迅速估算受照

人员的受照剂量；

7、负责迅速安置受照人员就医，组织控制区内人员的撤离工作，并及时控制事故影响，防止事故的扩大蔓延。

12.4.2 辐射事故应急预案

为了应对辐射事故和突发事件，医院已按要求制定了《放射事故应急处理预案》，医院制定的应急预案包括如下内容：

- （1）制定依据；
- （2）应急组织、人员组成及职责；
- （3）放射性事故应急救援应遵循的原则；
- （4）放射性事故应急处理程序。

医院现有应急预案范围仅为人员超剂量照射等所致辐射事故，本项目为新增核医学科项目，原有应急预案未提及核医学科相关辐射事故应急措施，不能够满足相关要求，根据国务院第 449 号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》第四十一条对辐射事故应急预案内容的要求，本项目建成后，应重新编制辐射事故应急预案，预案应当包括下列内容：

- （1）应急机构和职责分工；
- （2）辐射事故分级；
- （3）辐射事故响应；
- （4）辐射应急事故解除；
- （5）应急人员的组织、培训以及应急和救助的装备、资金、物资准备；
- （6）辐射事故应急人员培训和演练计划。

经与医院核实，自辐射活动开展以来，未发生过辐射事故。在今后预案实施过程中，应根据国家新发布的相关法规内容，结合医院实际及时对预案进行补充修改，使之更符合实际需要。

12.4.3 应急人员的培训演习计划

为了能有效应对辐射事故和突发事件，建设单位须定期进行应急人员的演习培训，模拟事故发生时应进行的流程和应采取的措施，当辐射事故发生时才能熟练、沉着、有效应对事故的危害降到最低。

12.4.4 辐射事故上报的要求

对于在医院定期监测或委托监测时发现异常情况的，应根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《关于建立放射性同位素与射线装置事故分级处理报告制度的通知》等要求，向生态环境主管部门报告。在发生辐射事故时，事故单位应当立即启动本单位的辐射事故应急预案，采取必要防范措施，并根据要求在 2h 内填写《辐射事故初始报告表》，向生态环境主管部门和公安部门报告，造成或者可能人员超剂量照射的，还应当同时向卫生部门报告。

12.5 竣工环保验收

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

表 13 结论与建议

13.1 结论 13.1.1 项目概况 舟山医院位于浙江省舟山市定海区定沈路 739 号，计划在肿瘤综合治疗中心（地上共 16 层，地下共 1 层）一层建设核医学科，核医学科分为核素诊断场所和核素治疗场所。在核医学核素诊断场所内新增 1 台 PET/CT 和 1 台 PET/MR，使用 ^{18}F、^{68}Ga 核素进行显像诊断，本项目 PET/CT 和 PET/MR 拟配置 2 枚 ^{68}Ge 校准源；新增 1 台 SPECT/CT，使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$、^{67}Ga、^{201}Tl 进行显像诊断；使用 ^{90}Sr 放射源进行敷贴治疗。核医学核素治疗场所使用 ^{89}Sr 核素进行骨癌治疗；使用 ^{131}I 核素进行甲状腺吸碘率测定、甲亢治疗和甲癌治疗；使用 ^{177}Lu 核素进行肿瘤治疗；设置 5 间单人核素治疗病房。 本项目核医学核素诊断场所和核医学核素治疗场所非密封放射性核素日等效最大操作量分别为 $3.19\times 10^8\text{Bq}$ 和 $3.93\times 10^9\text{Bq}$，均为乙级非密封放射性物质工作场所。本项目核医学科拟配置 2 枚 ^{68}Ge 校准源和 1 枚 ^{90}Sr 放射源均为 V 类放射源。SPECT/CT 和 PET/CT 均为 III 类射线装置。 在肿瘤综合治疗中心地下一层建设放疗科，放疗科内新建 2 间医用电子直线加速器机房及其配套用房，机房内各新增 1 台 15MV 直线加速器为 II 类射线装置；新建 1 间模拟定位 CT 机房及其配套用房，机房内新增使用 1 台模拟定位 CT，为 III 类射线装置。 13.1.2 产业政策分析结论 根据国家发展和改革委员会制订的《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，本项目核医学科属于第一类“鼓励类”第六项“核能”中第 4 条“……同位素、加速器及辐照应用技术开发……”；SPECT/CT、PET/CT、放疗科直线加速器和模拟定位 CT 属于第一类“鼓励类”第十三项“医药”中第 4 条“……高性能医学影像设备，高端放射治疗设备……”，均符合国家产业政策。 13.1.3 实践正当性分析结论 本项目的建设可以更好地满足患者就诊需求，提高对疾病的诊治能力。核技术应用项目的开展，对保障人民群众身体健康、拯救生命起了十分重要的作用，因
--

此，本项目的实践是必要的。本项目产生的辐射给职业人员、公众及社会带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害，该核技术应用实践具有正当性，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中“实践的正当性”原则。

13.1.4 辐射安全与防护分析结论

（1）辐射安全防护措施结论

①核医学科

辐射屏蔽防护设计：本项目核医学科四侧墙体采用实心砖墙+硫酸钡防护涂料作为屏蔽材料，顶棚和地坪均采用混凝土+硫酸钡防护涂料作为屏蔽材料，防护门为内衬铅板，观察窗为铅玻璃，其防护铅当量满足防护屏蔽要求，对 X 射线和 γ 射线等起到了有效的屏蔽。

辐射防护相关措施：对辐射工作场所进行分区管理，划分为监督区和控制区，控制区并设置相应的电离辐射警告标志，限制无关人员进入。建设单位拟制定针对性的操作规程，职业人员工作时穿戴相应的个人防护用品。为辐射工作人员配备了个人剂量计，并配备了个人剂量报警仪，场所配备 X- γ 辐射监测仪、表面污染监测仪等；定期对辐射工作人员开展个人剂量监测和职业健康检查监护。在落实以上辐射安全措施后，核医学科辐射安全措施能够满足辐射安全防护的要求。核医学科分装注射间/分装间拟配备专用手套箱、放射性药物专用注射窗/传递窗；核医学科工作场所拟设置电离辐射警告标志、工作状态指示灯、对讲及监控设施；设置有 2 组满足要求的并联衰变池组、铅桶、衰变箱放射性废气专用排风管线及活性炭吸附装置。

②放疗科直线加速器和模拟定位 CT

辐射屏蔽防护设计：本项目直线加速器机房四侧墙体、顶棚均采用钢筋混凝土防护，并设有迷路，防护门为铅门+含硼聚乙烯材料，其屏蔽厚度、防护效果满足相关标准要求。

本项目 1 间模拟定位 CT 机房四侧墙体和顶棚均采用实心砖墙+硫酸钡防护涂料作为屏蔽防护材料，机房设有铅玻璃观察窗和铅防护门，各屏蔽物的铅当量厚度满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的要求。

辐射防护相关措施：直线加速器机房防护门上方拟设置工作状态指示灯和电离辐射警告标志，且拟设置门-机联锁和带有异常情况下报警功能的固定式辐射剂量监

测仪；设备、机房内防护墙及操作室控制台处均设计有急停按钮；机房内将安装视频装置和双向交流对讲系统。

模拟定位 CT 机房门外拟设电离辐射警告标志、醒目的工作状态指示灯，灯箱处拟设警示语句；设有门-灯联锁等安全设施。机房均配置相应的个人防护用品和辅助防护设施，其配置均按照《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的要求。

（2）辐射安全管理结论

医院已成立放射管理委员会，并制定了一系列辐射安全管理规章制度。医院应根据本项目的特点，制定和完善制度，并对现有制度进行补充和完善，以保证医院辐射相关工作安全有序开展。医院已对现有辐射工作人员进行了职业健康监护和个人剂量监测，并建立了个人职业健康监护档案和个人剂量检测档案。

13.1.5 环境影响分析结论

（1）辐射影响分析结论

经理论预测分析，本项目核医学科运行时控制区实体边界外 30cm 处周围剂量当量率均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，手套箱和注射窗外表面 30cm 处人员操作位周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，各关注点位的周围剂量当量率均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中相关要求，对周围辐射环境影响较小。

本项目 2 间直线加速器机房各屏蔽体外 30cm 处的辐射剂量率均小于机房外各关注点的导出剂量率参考控制水平，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中辐射屏蔽相关要求。

本项目模拟定位 CT 机房各屏蔽体外辐射剂量率均能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）规定的 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求。

经理论估算，本项目核医学科、放疗科直线加速器和模拟定位 CT 辐射工作人员和周围公众所受年有效剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中的剂量限值要求，也满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中职业人员和公众所受年有效剂量不超过 5mSv 和 0.1mSv 的年剂量约束值要求。

（2）三废影响分析结论

①核医学科

1) 本项目核医学科产生的放射性废液可以在衰变池内暂存时间满足《核医学辐

射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函〔2023〕20 号）中相关要求，可排入医院污水处理系统进一步处理，对周围环境的影响较小。

2）本项目核医学科运行时产生的放射性废气经活性炭过滤后，最终高出肿瘤综合治疗中心楼顶排放，对周围环境影响较小。

3）本项目核医学科运行时产生的放射性固废在使用专用塑料包装袋收集后，分类暂存于固废间的衰变箱内储存时间满足要求后（所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天，所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍，含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天），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 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物清洁解控并作为医疗废物进行处理，对周围环境的影响较小。

更换的废 ^{68}Ge 和 ^{90}Sr 放射源应当按照废旧放射源返回合同规定，将废旧放射源交回生产单位或者返回原出口方。

②放疗科直线加速器和模拟定位 CT

直线加速器机房内设置强制排风系统，通风换气次数不低于 4 次/h，机房内产生的臭氧、氮氧化物对周围环境影响很小。

模拟定位 CT 机房拟设置动力通风装置，以保证机房内有良好的通风。产生的少量臭氧和氮氧化物经动力通风装置收集后最终从肿瘤综合治疗中心楼楼顶排放。臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，对周围环境影响较小。

本项目对于直线加速器靶损坏或退役时产生的活化后的废靶，由设备厂家回收最终送交有资质的单位回收处置，医院不暂存，正常情况下不会对环境造成明显影响。

13.1.6 可行性分析结论

综上所述，舟山医院肿瘤综合治疗中心核技术利用建设项目选址符合国家相关法律法规，平面布局合理可行。医院在落实本报告提出的各项污染防治措施后，其场所内辐射安全措施及安全管理措施满足从事相应辐射活动的要求，职业人员和公众年有效剂量满足相关标准要求，营运期对周围环境产生的辐射影响在可接受范围内，故从辐射环境保护角度论证，该项目的建设是可行的。

13.2 建议与承诺

13.2.1 建议

医院应加强辐射安全教育培训，提高职业工作人员对辐射防护的理解和执行辐射防护措施的自觉性，杜绝放射性事故的发生。

13.2.2 承诺

（1）按照相关法律法规要求严格履行环评制度、环保验收制度、辐射安全许可制度，加强环保档案管理，由专人或兼职人员负责。

（2）严格按照本报告的屏蔽防护设计方案、辐射安全措施、辐射安全设施及装置、三废治理装置及措施等辐射环保内容进行建设。

（3）加强辐射工作人员的管理，监督人员防护用具的使用。严格按照本报告提出的要求进行辐射工作人员的培训、个人剂量监测、健康检查，并按要求建立保管辐射工作人员档案。

（4）制定完善各项辐射安全管理制度和辐射事故应急预案，并监督执行各项制度。按照应急预案处理和上报辐射事故，并及时将应急预案向生态环境主管部门备案。

（5）严格执行辐射监测计划，发现问题及时整改。

（6）本项目环评审批后，及时申领辐射安全许可证；项目竣工后，按照国家相关法律法规尽快自主组织竣工环保验收。

（7）在实施诊治之前，事先告知患者或被检查者辐射对健康的潜在影响。

（8）按要求每年向发证机关提交本单位辐射安全和防护年度评估报告。

（9）接受生态环境主管部门的监督检查。

表 14 审批

下一级生态环境部门预审意见:

经办人： 公章

年 月 日

审批意见:

经办人： 公章

年 月 日