

西安交通大学医学院第一附属医院
国际陆港医院核技术利用项目
环境影响报告表

(报批稿)

建设单位:	西安交通大学医学院第一附属医院
评价单位:	中圣环境科技发展有限公司

二〇二二年九月

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.....	22
表 8 环境质量和辐射现状.....	42
表 9 项目工程分析与源项.....	45
表 10 辐射安全与防护.....	90
表 11 环境影响分析.....	136
表 12 辐射安全管理.....	215
表 13 结论与建议.....	221
表 14 审批.....	225

图件列表

图 1-1 西安交通大学第一附属医院国际陆港医院地理位置
图 1-2 西安交通大学第一附属医院国际陆港医院平面布局图
图7-1 西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术应用项目评价范围图
图 8-1 西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院现状监测点位图
图 9-1 典型 PET-CT 实物图
图 9-2 项目 PET 放射诊断工作流程及产污环节示意图
图 9-3 SPECT-CT 放射诊断工作流程及产污环节示意图
图 9-4 甲癌治疗工作流程及产污环节示意图
图 9-5 甲亢治疗工作流程及产污环节示意图
图9-6 甲状腺吸碘功能测定流程及产污环节示意图
图9-7 注射窗口注射的放射性药物的工艺流程及产污环节
图 9-8 ^{90}Y 微球治疗第一阶段操作流程及产污环节图
图 9-9 ^{90}Y 微球治疗第二阶段操作流程及产污环节图
图 9-10 ^{90}Y 树脂微球总活度测量和抽取示意图
图 9-11 ^{90}Y 树脂微球介入注射示意图
图9-12 ^{177}Lu 治疗项目工作流程及产污环节
图 9-13 ^{90}Sr 敷贴治疗工艺流程及产污环节
图9-14 籽源操作流程及产污环节示意图
图 9-15 钨铈发生器的结构示意及常见外观图
图 9-16 ^{99}Mo 衰变详细过程图
图 9-17 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射性药物生产工艺流程及产污节点图
图 9-18 典型医用电子直线加速器示意图
图 9-19 典型医用电子直线加速器内部结构框图
图9-20 X射线和电子束治疗模式结构示意图
图9-21 加速器放疗流程及产污环节示意图
图 9-22 后装机外形图和施源器

- 图 9-23 后装治疗机近距离治疗流程及产污环节示意图
- 图 9-24 伽玛刀辐射头结构示意图
- 图 9-25 ^{60}Co 放疗设备的治疗过程及产污环节简图
- 图 9-26 DSA 工作示意图
- 图 9-27 数字减影血管造影机外观图
- 图 9-28 DSA 介入治疗流程及产污环节示意图
- 图 10-1 地下二层局部平面布局
- 图 10-2 地下一层平面布局图
- 图 10-3 一层平面布局图
- 图 10-4 二层平面布局图
- 图 10-5 三层平面布局图
- 图 10-6 四层平面布局图
- 图 10-7 核医学科管控分区及流线图
- 图 10-8 地下二层管控分区图
- 图 10-9 一层管控分区图
- 图 10-10 二层管控分区图
- 图 10-11 三层介入手术管控分区图
- 图 10-12 四层管控分区图
- 图 10-13 复合手术室及楼下管控分区图
- 图 10-14 ^{90}Y 相关行进路线
- 图 10-15 直线加速器及伽玛刀机房通风管道布设图
- 图 10-16 直线加速器机房线缆及通风管道穿墙管道剖面图
- 图 10-17 直线加速器机房辐射安全措施安装示意图
- 图 10-18 伽玛刀机房风管及电缆沟穿墙示意图
- 图 10-19 伽玛刀机房安全装置示意图
- 图 10-20 后装机通风管及电缆沟做法示意图
- 图 10-21 后装机通风管道布设图
- 图 10-22 后装机摄像、急停按钮等安全装置位置图
- 图 10-23 核医学科通风设计图
- 图 10-24 核医学科衰变池位置
- 图 10-25 衰变池平面图
- 图 10-26 核医学科放射性废水管道布置
- 图 11-1 PET 及 ECT 计算点示意图
- 图 11-2 直线加速器机房平面布局图
- 图 11-3 加速器有用线束主屏壁区半宽度计算示意图
- 图 11-4 加速器射线路径图（平面图）
- 图 11-5 加速器射线路径图（剖面图）
- 图 11-6 后装机机房平面布局
- 图 11-7 后装治疗机 2 射线路径图（平面图）
- 图 11-8 后装治疗机射线路径图（剖面图）
- 图 11-9 伽玛刀机房四邻关系图
- 图 11-10 伽玛刀机房计算点位示意图（1）
- 图 11-11 伽玛刀机房计算点位示意图（2）
- 图 11-12 出束状态下距地面 1m 高度、测量间隔为 0.5m 的辐射水平矩阵图

图11-13 出束状态下测量间隔为0.5m的辐射水平垂直矩阵图

图11-14 闭束状态下距地面1m高度、测量间隔为0.5m的辐射水平矩阵图

图11-15 闭束状态下测量间隔为0.5m的辐射水平垂直矩阵图

图 11-16 DSA 机房计算点位图

附件列表

附件 1 西安交通大学医学院第一附属《环境影响评价委托书》；

附件 2 《西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院辐射工作场所本底水平监测报告》（报告编号:SFJ（2021）0099SFS 号）；

附件 3 西安交通大学医学院第一附属医院辐射工作人员培训档案；

附件 4 西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院环境影响报告书批复（西港批复[2016]5 号

表 1 项目基本情况

建设项目名称	西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术利用项目				
建设单位	西安交通大学医学院第一附属医院				
法人代表	吕毅	联系人	王欣然	联系电话	18590953899
注册地址	西安市国际港务区港务西路以西、秦汉大道以南				
项目建设地点	西安市国际港务区港务西路以西、秦汉大道以南				
立项审批部门	/		批准文号	/	
建设项目总投资(万元)	251331.65	项目环保投资(万元)	218	投资比例(环保投资/总投资)	0.09%
项目性质	<input type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input checked="" type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其他			占地面积(m ²)	310498
应用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类		
		<input type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> I类(医疗使用) <input type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input checked="" type="checkbox"/> V		
	非密封放射性物质	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物		
		<input type="checkbox"/> 销售	/		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> 乙 <input type="checkbox"/> 丙		
	射线装置	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类		
	其他	/			

项目概述

1.1 建设单位情况

项目位于西安市国际港务区内，北至秦汉大道，南至新北路，西至杏渭路，东至港务西路（图 1-1），是一所以神经、精神国家区域医疗中心建设的“大专科”，集医、教、研、康、预防、保健、体检为一体，涵盖大内、大外、妇、儿、急、重症、康复的“小综合”的国际化医院。医院总占地面积 310498m²，总建筑面积 341290m²，建设内容包括医疗主楼、国际交流中心、质子治疗中心以及配套附属设施等。该项目于 2016 年 7 月 28 日取得西安市环境保护局国际港务区分局批复（西港批复[2016]5 号，附件 4），医院分两期建设，目前该项目综合楼（一期）已基本建设完成，一期涉及医院核医学科、放疗科、介入科等治疗、检查科室，二期待建，主要涉及研发、科研等内容。

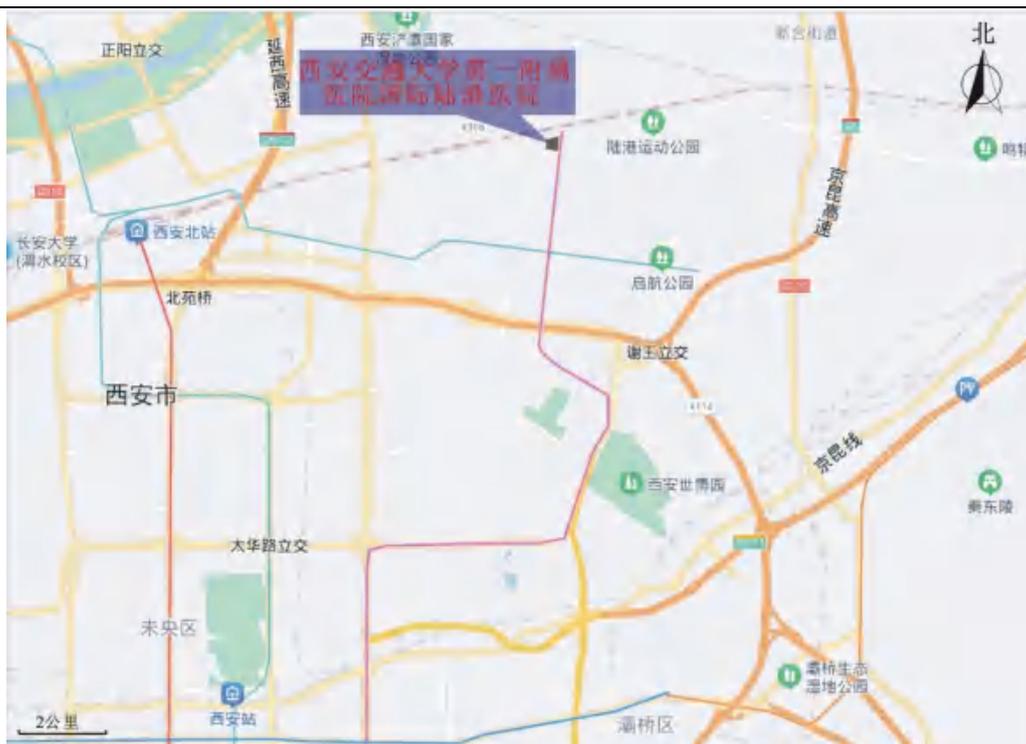


图 1-1 西安交通大学第一附属医院国际陆港医院地理位置

1.2 项目规模

西安交通大学第一附属医院国际陆港医院一期核医学科、放疗科、介入科涉及射线装置、放射源、非密封放射性同位素的使用，其中核医学科位于1#综合楼的地下一层的西南角，放疗科位于核医学科地下，介入手术室位于1#综合楼三层北侧，杂合手术室位于四层中部，具体的位置示意图1-2。

本次评价涉及核医学科、放疗科、介入手术相关内容见表1-2，核医学科使用核素 ^{99m}Tc 为核医学科淋洗， ^{68}Ga 、 ^{18}F 为本项目二期生产，若二期生产项目的建设时序与本项目不匹配，则 ^{68}Ga 、 ^{18}F 按照每天的使用量提前从有资质单位外购，其余核医学科使用放射性同位素均外购。

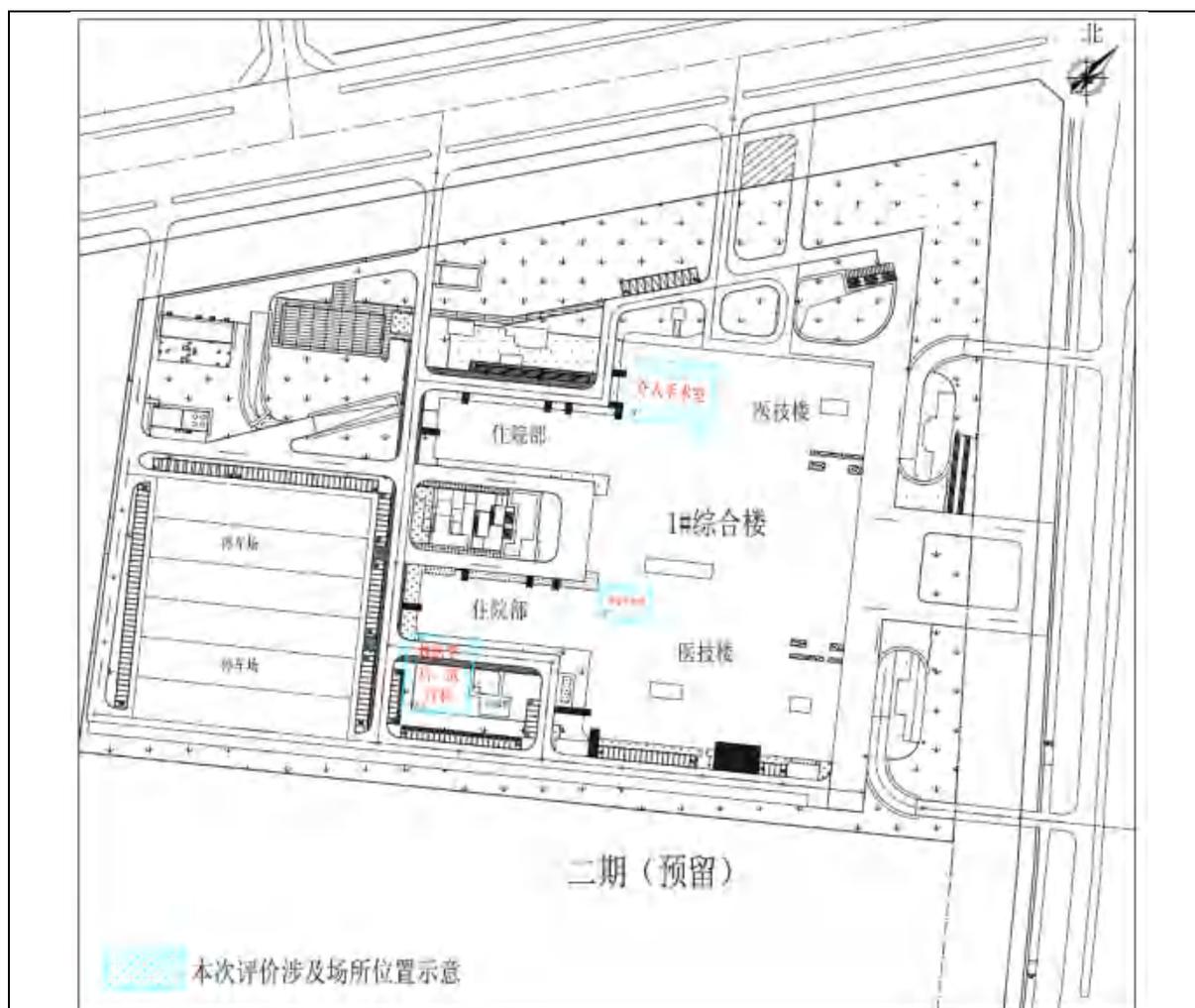


图 1-2 西安交通大学第一附属医院国际陆港医院平面布局图

表1-1 西安交通大学第一附属医院国际陆港医院本次环评内容

放射源							
核素名称	活度 (Bq)	类别	用途	贮存方式/地点			
^{192}Ir	3.7×10^{11}	III	放射治疗	地下二层后装机房			
^{60}Co	2.33×10^{14}	I	放射治疗	地下二层伽玛刀机房			
^{90}Sr - ^{90}Y	1.85×10^9	V	敷贴治疗	地下一层敷贴室			
非密封放射性物质							
序号	核素名称	单次最大操作量(Bq)	日最大接诊人数(人)	日最大用量(Bq)	年最大用量(Bq)	来源	备注
1	^{18}F	3.70×10^8	30	1.11×10^{10}	2.78×10^{12}	二期生产	PET 显像
2	^{68}Ga	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}	二期生产	PET 显像
3	^{64}Cu	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}	外购	PET 显像
4	^{89}Zr	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}	外购	PET 显像
5	^{124}I	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}	外购	PET 显像
6	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	7.40×10^8	70	5.18×10^{10}	1.30×10^{13}	自产	ECT 显像
7	^{201}Tl	7.40×10^7	5	3.70×10^8	9.25×10^{10}	外购	ECT 显像
8	^{123}I	1.85×10^8	1	1.85×10^8	4.63×10^{10}	外购	ECT 显像
9	^{51}Cr	1.85×10^8	1	1.85×10^5	4.63×10^{10}	外购	ECT 显像
10	$^{99\text{m}}\text{Mo}$	/	/	1.11×10^{11}	5.55×10^{12}	外购	药物制备
11	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	8.88×10^{10}	2.22×10^{13}	/	药物贮存

12	¹²⁵ I(籽源)	3.70×10 ⁹	4	1.48×10 ¹⁰	3.70×10 ¹²	外购	籽源植入
13	¹⁰³ Pd(籽源)	3.70×10 ⁹	1	3.70×10 ⁹	9.25×10 ¹¹	外购	籽源植入
14	¹⁶⁶ Ho(籽源)	3.70×10 ⁹	1	3.70×10 ⁹	9.25×10 ¹¹	外购	籽源植入
15	³⁵ S	3.70×10 ⁸	1	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹⁰	外购	注射治疗
16	⁴⁶ Sc	3.70×10 ⁸	1	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹⁰	外购	注射治疗
17	⁸⁹ Sr	1.85×10 ⁸	2	3.7×10 ⁸	9.25×10 ¹⁰	外购	注射治疗
18	¹⁸⁶ Re	3.70×10 ⁹	1	3.70×10 ⁷	9.25×10 ¹¹	外购	注射治疗
19	¹⁸⁸ Re	1.85×10 ⁹	1	1.85×10 ⁷	4.63×10 ¹¹	外购	注射治疗
20	¹⁵³ Sm	9.25×10 ⁸	4	3.70×10 ⁷	9.25×10 ¹¹	外购	注射治疗
21	²¹¹ At	7.40×10 ⁸	1	7.40×10 ⁷	1.85×10 ¹¹	外购	注射治疗
22	²²³ Ra	1.11×10 ⁷	1	1.11×10 ⁷	2.78×10 ⁹	外购	注射治疗
23	²²⁵ Ac	1.11×10 ⁷	1	1.11×10 ⁷	2.78×10 ⁹	外购	注射治疗
24	²²⁷ Th	1.11×10 ⁷	1	1.11×10 ⁷	2.78×10 ⁹	外购	注射治疗
25	¹⁷⁷ Lu	3.70×10 ⁹	1	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹¹	外购	注射治疗
26	¹³¹ I	1.85×10 ⁶	200	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹⁰	外购	甲功测定
27	¹³¹ I	3.70×10 ⁹	8	2.96×10 ¹⁰	7.4×10 ¹²	外购	甲癌, 口服
28	¹³¹ I	3.70×10 ⁸	10	3.70×10 ⁹	9.25×10 ¹¹	外购	甲亢, 口服
29	⁹⁰ Y	3.70×10 ⁹	1	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹¹	外购	注射治疗
装置							
射线装置名称	型号	数量 (台)	类别	最大能量	等中心最大剂量 率 (cGy/min)	备注	
医用电子直线 加速器	待定	2	II	X 射线能量: 10MV; 电子线能量: 20MeV	2400cGy/min	新增	
PET-CT	待定	1	III	CT 部分: 管电压 140kV; 管电流 800mA		新增	
SPECT-CT	待定	2	III			新增	
PET-MR	待定	1	/	/	/	新增	
DSA	待定	7	II	管电压125kV, 管电流1250mA		新增	
<p>由于本项目PET和SPECT-CT的设备型号未确定, 在后期的使用过程中可能会涉及使用放射源对设备进行调校, 该部分内容待放射源类型确定后完善相关手续, 本次不评价</p> <p>由于本项目医用电子直线加速器的设备型号未确定, 是否配备CBCT功能尚不明确, 待后期型号确定若配备CBCT功能完善相关手续, 本次不予评价</p>							

1.3 目的和任务的由来

根据《中华人民共和国环境影响评价法》和《建设项目环境保护管理条例》，本项目需进行环境影响评价。由“关于发布<射线装置分类>的公告（环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告2017年第66号）”可知，本项目涉及II、III类射线装置的使用；由《放射源分类办法》（国家环境保护总局公告2005年第62号）可知，本项目涉及I类、III类、V类放射源；由《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）可知，核医学科涉及乙级非密封源工作场所。

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021版）》（生态环境部部令第16号），本项目属于“五十五、核与辐射—172、核技术利用建设项目”，应编制环境影响报告表。

1.4 产业政策符合性

西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院作为大型综合类医院，诊断和治疗是医院的重点发展方向，随着医院放疗楼中核医学科、介入、放疗的建设，医院可为病人提供一个更加优越的诊疗环境，具有明显的社会效益，同时对提高医院肿瘤、神经疾患和心脏疾病的诊断水平放疗具有重大意义，提高了医院的档次和服务水平，吸引更多的就诊人员，在保障病人健康的同时也为医院创造了更大的经济效益。因此西安交通大学第一附属医院国际陆港医院核技术应用项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）“实践的正当性”的要求。

1.5 项目选址及布局

（1）项目选址合理性

本项目建于西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院院内，项目无新征用地，医院用地为医疗用地，医院位于西安市国际港务区港务西路以西、秦汉大道以南区域，西侧和南侧均为待建用地。医院周边主要为待建用地，场址周围无明显环境制约因素，本项目选址基本合理。

（2）项目布局合理性分析

本次评价涉及核医学科、放疗科、介入科及杂合手术室，核医学科和放疗科位于1#综合楼西南角，放疗科位于地下二层，核医学科位于地下一层，放疗科周围北侧为医院配电室和控制室等附属用房，核医学科北侧为配电室，东侧均为地下停车场区域，地上为医院绿化区域。介入手术室位于1#综合楼北侧区域，周围为手术配套的准备用房及住院病房。杂合手术室位于四层手术室中部，西侧为产房，北侧为ICU，东侧为行政报告厅及口腔诊室，布局合理，既有便于医疗工作，又便于对核素、射线装置及放射源的集中管理，有利于辐射防护和环境保护。

1.6 核技术利用及辐射安全管理现状

（1）核技术利用现状

西安交通大学医学院第一附属医院涉及辐射工作场所的院区包括西安交通大学医学院第一附属医院雁塔院区，校部梦工场，陆港门诊部，阎良院区，大部分辐射工作场所位于雁塔院区，除阎良院区涉及II类射线装置外，其余均院区仅涉及III类射线装置，医院涉及放射性操作场所见表1-2。

表 1-2 西安交通大学医学院第一附属医院涉及辐射工作场所列表

序号	放射性操作场所	地址
1	放疗科	陕西省西安市雁塔区放疗科一楼
2	伽玛刀科	陕西省西安市雁塔区伽玛刀楼一层
3	核医学科	陕西省西安市雁塔区影像楼五楼
4	影像科	陕西省西安市雁塔区影像楼三层
5	影像科	陕西省西安市雁塔区影像楼一层
6	门诊影像科	陕西省西安市雁塔区综合楼一层影像科门诊
7	大兴善寺院区	陕西省西安市雁塔区小寨兴善寺西街 55 号
8	影像科 PET/CT	陕西省西安市雁塔区 PET/CT 室一层
9	回旋加速器	陕西省西安市雁塔区回旋加速器室
10	心导管科	陕西省西安市雁塔区门诊楼五层和影像大楼二层
11	腔镜中心	陕西省西安市雁塔区综合楼三层手术室
12	骨科	陕西省西安市雁塔区三层手术室
13	疼痛科	陕西省西安市雁塔区东一楼二层疼痛科
14	再生医学与外科工程研究中心	陕西省西安市雁塔区校部梦工场
15	体检部	陕西省西安市雁塔区门诊楼五层体检科
16	内分泌科	陕西省西安市雁塔区综合楼一层骨密度室
17	口腔科	陕西省西安市雁塔区门诊楼五层口腔科
18	碎石室	陕西省西安市雁塔区综合楼一层泌尿男科诊疗室
19	陆港门诊部	陕西省西安市灞桥区西安国际港务区港务大道 7 号
20	东区医学影像科	陕西省西安市阎良区门诊医技楼一层医学影像科
21	东区数字减影心血管造影室	陕西省西安市阎良区门诊医技楼三层介入中心心血管造影室
22	影像科门诊	陕西省西安市雁塔区住院大楼南广场

医院辐射安全许可证证号为陕环辐证（00073），医院现持有《辐射安全许可证》发证日期为 2022 年 2 月 21 日，有效期至 2026 年 7 月 28 日，许可范围为：使用 I、III、V 类密封放射源；使用 II、III 类射线装置，生产、使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所（见表 1-3）。

表 1-3 陕环辐证[00073]核准的核技术应用项目内容一览表

(一) 放射源						
序号	核素	类别	总活度(贝克)/活度(贝克)×枚数		活动种类	
1	Sr-90 (Y90)	V 类	1.08×10 ⁹ ×1		使用	
2	Sr-90 (Y90)	V 类	2.4×10 ⁷ ×2		使用	
3	Sr-90	V 类	2.4×10 ⁷ ×1		使用	
4	Na-22	V 类	3.7×10 ⁶ ×1		使用	
5	Ir-192	III 类	3.7×10 ¹¹ ×1		使用	
6	Co-60	I 类	1.031×10 ¹² ×192		使用	
(二) 非密封放射性物质						
序号	工作场所	场所等级	核素	日等效操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	活动种类
1	PET-CT 室	乙级	Zr-89	3.70×10 ⁶	1.80×10 ⁷	生产, 使用
2	核医学实验室	乙级	Y-90	7.4×10 ⁷	2.22×10 ¹¹	使用
3	影像楼六层	乙级	Tc-99m	2.96×10 ⁷	4.44×10 ¹²	使用
4	SPECT 室	乙级	Tc-99m	2.28×10 ⁸	6.0×10 ¹²	使用
5	敷贴治疗室	丙级	Sr-89	4.8×10 ³	1.2×10 ⁷	使用
6	核医学实验室	乙级	Ra-223	7.4×10 ⁷	2.22×10 ⁹	使用

西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术利用项目

7	核医学实验室	丙级	P-32	2.0×10^4	5.0×10^7	使用
8	PET/CT 室	乙级	N-13	1.85×10^8	5.55×10^{12}	生产, 使用
9	核医学实验室	乙级	Lu-177	7.40×10^8	1.11×10^{12}	使用
10	影像楼六层	乙级	I-131	1.11×10^9	5.55×10^{11}	使用
11	核医学实验室	乙级	I-131	5.6×10^6	1.4×10^{10}	使用
12	核医学实验室	乙级	I-125(粒籽源)	1.85×10^8	5.55×10^{11}	使用
13	核医学实验室	丙级	I-125	4.0×10^4	1.0×10^8	使用
14	PET/CT 室	乙级	I-124	3.70×10^6	1.80×10^7	生产, 使用
15	核医学实验室	乙级	Ge-68	9.25×10^5	3.7×10^9	使用
16	PET/CT 室	乙级	Ga-68	2.32×10^7	1.56×10^8	生产, 使用
17	PET/CT 室	乙级	F-18	5.55×10^8	1.665×10^{13}	生产, 使用
18	PET/CT 室	乙级	Cu-64	3.70×10^6	1.85×10^7	生产, 使用
19	PET/CT 室	乙级	C-11	1.85×10^8	5.55×10^{12}	生产, 使用
20	核医学实验室	乙级	At-211	1.48×10^8	1.48×10^{10}	使用
21	核医学实验室	乙级	Ac-225	7.4×10^7	2.22×10^9	使用
(三) 射线装置						
序号	类别	装置名称		数量	活动种类	
1	II 类	直线加速器		3	使用	
2	II 类	回旋加速器 Minitrace		1		
3	II 类	数字减影血管造影机		9		
4	III 类	CT 定位机		1		
5	III 类	模拟定位机		1		
6	III 类	曲面断层机		1		
7	III 类	口腔 CT		1		
8	III 类	小 C 型臂		4		
9	III 类	拍片机		4		
10	III 类	影像尿流动力机		1		
11	III 类	碎石机		2		
12	III 类	中型 C 臂		1		
13	III 类	数字乳腺机		2		
14	III 类	数字胃肠机		2		
15	III 类	双能 X 线骨密度		1		
16	III 类	移动拍片机		3		
17	III 类	DR 拍片机		2		
18	III 类	CT 机		7		
19	III 类	ICT		1		
20	III 类	双板 DR		1		
21	III 类	单板 DR		1		
22	III 类	DR		1		
23	III 类	肠胃机		1		
24	III 类	车载 CT		1		
25	III 类	超高端 CT		1		
26	III 类	SPECT/CT		2		
27	III 类	PET/CT		1		
28	III 类	牙片机		2		
29	III 类	口腔全景牙片机		1		
30	III 类	移动式 C 型臂 X 光机		1		

31	III类	移动小C型臂	2					
(2) 医院核技术利用项目台账情况								
西安交通大学医学院第一附属医院核技术利用项目台账见表 1-4。								
表 1-4 西安交通大学医学院第一附属医院核技术利用项目台账情况								
放射源								
序号	核素	出厂日期	出厂活度	类别	数量	用途	场所	装源日期
1	钴-60	2019.7.1	$9.546 \times 10^{11} \sim 1.006 \times 10^{12}$	II	192	放疗	伽马刀科	2019.8.18
2	铯-192	2019.12.17	3.7×10^{11}	III	1	放疗	放疗科	2019.12.25
3	铈-90/钇-90	1998.9.28	1.18×10^9	V	1	敷贴治疗	核医学科	1998.10.12
4	钠-22	2012.5.1	3.7×10^6	V	1	校准	PET/CT	2012.6.20
非密封放射性物质								
序号	核素	总活度 (贝可)	用途	来源				
1	Tc-99m	6×10^{12}	显像	广东希埃核药物中心				
2	I-131	1.4×10^{10}	甲功测定、甲亢治疗	四川核动力研究所				
3	F-18	1.665×10^{13}	显像	西安交通大学医学院第一附属医院				
4	P-32	3.7×10^7	治疗	北京原子高科股份有限公司				
5	I-125	1.0×10^8	放免测定	北京北方生物技术研究所有限公司				
6	Sr-89	3.7×10^7	治疗	四川核动力研究所				
7	C-11	5.55×10^{12}	显像	西安交通大学医学院第一附属医院				
8	N-13	5.55×10^{12}	显像	西安交通大学医学院第一附属医院				
9	Zr-89	1.80×10^7	显像	西安交通大学医学院第一附属医院				
10	Y-90	2.22×10^{11}	治疗	远大集团				
11	Tc-99m	4.44×10^{12}	显像	北京原子高科股份有限公司				
12	Ra-223	2.22×10^9	治疗	中国同辐股份有限公司				
13	Lu-177	1.11×10^{12}	治疗	北京原子高科股份有限公司				
14	I-131	5.55×10^{11}	甲癌治疗	四川核动力研究所				
15	I-125(粒籽源)	5.55×10^{11}	治疗	天津赛德				
16	I-124	1.80×10^7	显像	西安交通大学医学院第一附属医院				
17	Ge-68	3.70×10^9	发生器	北京原子高科股份有限公司				
18	Ga-68	1.56×10^8	显像	西安交通大学医学院第一附属医院				
19	Gu-64	1.80×10^7	显像	西安交通大学医学院第一附属医院				
20	At-211	1.48×10^{10}	治疗	北京原子高科股份有限公司				
21	Ac-225	2.22×10^9	治疗	北京原子高科股份有限公司				
射线装置								
序号	装置名称	规格型号	类别	场所	来源	登记日期		
1	直线加速器	ELERKTA Synergy VMAT	II	放疗科加速器一室	医科达	2021.04.16		
2	直线加速器	Synergy	II	放疗科加速器二室	医科达	2010.10.01		
3	直线加速器	VersaHD	II	放疗科加速器三室	瑞典医科达公司	2018.5.10		
4	模拟定位机	Simulix.HP	III	放疗科模拟定位机室	荷兰核通oldelfa	2002.09.24		
5	CT 定位机	Brilliance	III	放疗科大孔径 CT 定位机房	philips	2012.04.23		
6	64CT 机	BrillianceTMCT	III	影像楼一层第一 CT 检查室	philips	2009.10.01		

西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术利用项目

7	64CT 机	TSX.101A Aquilion64	III	门诊影像科第一 CT 室	日本东芝	2009.05.01
8	16CT 机 (门诊)	brilliance Mx.16CT	III	门诊影像科第二 CT 室	philips	2014.12.26
9	128CT 机	Secura.philipsBrillianceict	III	影像楼一层第二 CT 检查室	philips	2014.12.26
10	(能谱) CT	Revolution	III	门诊影像科第三 CT 室	GE 公司	2017.3.21
11	40 排 CT 机	uCT530	III	大兴善寺院区影像科 CT 室	上海联影医疗科技有限公司	2018.7.27
12	数字胃肠机	UD.150B.40/L	III	影像楼三层数字胃肠机三室	日本岛津	2008.07.01
13	数字胃肠机	SONIALVISION G4	III	影像楼三层数字胃肠机二室	日本岛津公司	2019.5.23
14	数字乳腺机	Senographe Pristna	III	影像楼三层乳腺机一室	通用电气	2021.04.16
15	拍片机单板 (门诊)	Digital Diagnost V2	III	门诊影像科 DR 拍片机二室	飞利浦公司	2013.01.29
16	拍片机双板 (门诊)	Digital Diagnost V2	III	门诊影像科 DR 拍片机一室	飞利浦公司	2014.12.26
17	拍片机(三 楼 5 室)	RED SPEED M	III	影像楼三层 DR 拍片机五室	日本岛津	2014.1.8
18	移动拍片机	MUX.200D	III	门诊影像科综合楼一层	日本岛津	2013.07.16
19	移动拍片机	MUX.200D	III	门诊影像科综合楼一层	日本岛津	2013.07.16
20	移动拍片机	MUX.200D	III	门诊影像科综合楼一层	Philips	2014.9.23
21	拍片机(体 检部)	NOVA FA.C	III	门诊五层体检科 DR 拍片室	西班牙	2016.11.04
22	DSA (1)	ALLuraXperFD10C	II	门诊五层介入手术一室	飞利浦公司	2014.9.26
23	DSA (2)	ALLuraXperFD10C	II	门诊五层介入手术二室	飞利浦公司	2016.9.26
24	DSA.FD20 (3)	ALLuraXperFD20	II	门诊五层介入手术三室	飞利浦公司	2008.06.1
25	DSA (4)	AXIOM Artis dFC	II	门诊五层介入手术四室	德国西门子股份公司	2009.12.1
26	DSA (5)	ALLuraXPerFD20	II	门诊五层介入手术五室	荷兰飞利浦	2014.9.26
27	DSA (6)	UNIQ FD20	II	门诊五层介入手术六室	飞利浦	2019.5.24
28	DSA (7)	MRC2000407ROT-GS1004	II	影像楼二层介入手术一室	飞利浦公司	2021.04.16
29	口腔 CT	KaVo3DeXam	III	牙片 CT 室	美国 KaVo	2013.03.20
30	曲面断层机	ORTHOPHOS X	III	曲面断层机室	德国 sirona	2018.05.23
31	牙科 X 射线	INTR	III	牙片室	芬兰	2009.02.01
32	影像尿流动力学及多功	HK.Urot.I	III	尿流动力学室	深圳慧康	2013.06.22

	能诊疗床					
33	碎石机	Hk.ESWIL.Vm MZ.VI	III	碎石机室	深圳慧康	2006.05.01
34	双能 X 线骨密度仪	Lexxos(外星人)	III	综合楼一层骨密度室	法国 DMS 公司	2008.12.01
35	回旋加速器	Minitrace	II	回旋加速器室	GE 公司	2014.5.26
36	小 C 型臂	Siremobil Compact L	III	东一楼二层介入手术室	德国西门子股份公司	2008.12.01
37	小 C 型臂	BV endvra	III	综合楼三层手术二室	飞利浦公司	2014.11.19
38	小 C 型臂	BV endvra	III	综合楼三层手术七室	飞利浦公司	2014.11.19
39	移动小 C 型臂	BV endvra	III	综合楼三层手术一室	飞利浦公司	2021.04.16
40	中型 C 臂	PLX7000B	III	校部梦工厂 C 型臂室	南京爱普	2013.01.29
41	碎石机	HK.ESWIL.Vm MZ.V	III	碎石机室	深圳慧康	2000.12.01
42	小 C 型臂	VeradiusRO.0306	III	影像楼二层介入手术二室	飞利浦	2016.12.5
43	DR 拍片机	uDR588i	III	大兴善寺院区影像科 DR 室	上海联影医疗科技有限公司	2018.7.27
44	DR 拍片机	ASR.6250	III	国际陆港门诊部一层放射科	深圳安科高技术股份有限公司	2016.2.23
45	CT 机	TSX-101A	III	东区门诊医技楼一层医学影像科 2 号 CT 室	日本东芝	2020.4.28
46	ICT	Brilliance iCT	III	东区门诊医技楼一层医学影像科 128 排 CT 室	美国飞利浦	2020.4.28
47	双板 DR	Definium6000	III	东区门诊医技楼一层医学影像科 DR 检查室 (1)	北京 GE	2020.4.28
48	单板 DR	DR-F	III	东区门诊医技楼一层医学影像科 DR 检查室 (2)	北京 GE	2020.4.28
49	DR	MRAD-D50S RADREX	III	东区门诊医技楼一层医学影像科 DR 检查室 (3)	日本东芝	2020.4.28
50	胃肠机	DFX-1000AKXO-80XM	III	东区门诊医技楼一层医学影像科胃肠室	大连东芝	2020.4.28
51	移动 X 光机	IME-100L	III	东区门诊医技楼一层医学影像科:影像科	日本东芝	2020.4.28
52	牙片机	MSD-III	III	东区门诊医技楼三层口腔科二区三层牙片室	福建梅生	2020.4.28
53	口腔全景牙片机	Planmeca ProMax 3D	III	东区门诊医技楼三层口腔科二区三层口腔科 CT 室	芬兰 Planmea	2020.4.28

54	移动式 C 型臂 X 光机	PLX112B	III	东区门诊医技楼三层手术室二区三层 3 号手术室	南京普爱	2020.4.28
55	DSA	UNIQ FD20	II	东区门诊医技楼三层介入中心血管造影室二区三层 DSA 数字减影血管造影室	荷兰飞利浦	2020.4.28
56	移动小 C 型臂	BV endvra	III	综合楼三层手术一室	飞利浦公司	2021.04.16
57	数字乳腺机	Senographe Pristna	III	门诊医技楼一层医学影像科乳腺钼靶检查室	通用电气	2021.04.16
58	移动小 C 型臂	BV endvra	III	西咸新区中国西部科技创新港 21 号楼	飞利浦公司	2021.04.16
59	车载 CT	NeuViz128/N128I190344E	III	住院大楼南广场	东软医疗	2021.04.16

(3) 近几年履行环保审批情况

医院自 2007 年以来，共开展了 13 个核技术利用项目，大部分项目为雁塔区项目，均履行了环保审批手续。其中，满足验收条件的项目均已完成了竣工环保验收，基本情况见表 1-3。

1-3 西安交通大学医学院第一附属医院辐射类环评履行情况

编号	项目名称	环保审批	环保竣工验收
1	西安交通大学医学院第一附属医院核技术应用项目辐射环境影响报告表 (放射源 ^{60}Co 、 ^{192}Ir 、 ^{90}Sr - ^{90}Y ，放射性同位素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{32}P 、 ^{131}I 、 ^{125}I 及 X 射线装置)	陕环批复[2007]886 号	陕环批复 [2013]413 号
2	西安交通大学医学院第一附属医院 PET-CT 及门诊综合楼 X 射线装置应用项目环境影响报告表 (放射性同位素 ^{18}F 、放射源 ^{22}Na 、5 台 DSA、1 台 CT、1 台 X 拍片机和 2 台牙片机)	陕环批复[2011]572 号	
3	西安交通大学医学院第一附属医院医用射线装置环境影响登记表 (2 台 III 类射线装置)	市环批复[2013]329 号	/
4	西安交通大学医学院第一附属医院回旋加速器及射线装置核技术应用项目环境影响报告表 (1 台回旋加速器及乙级操作场所、11 台 III 类射线装置)	陕环批复[2013]413 号	陕环批复[2016]362 号
5	西安交通大学医学院第一附属医院医用直线加速器核技术应用项目环境影响报告表 (1 台医用直线加速器)	陕环批复[2016]696 号	自主验收
6~10	建设项目环境影响登记表	备案号分别为:	/

	(3台小C臂及4台拍片机,1台DR、1台DR、2台CT)	201761011300000284 201761011300000268 201761011300000240 201861011300000955 20176101000400000093	
11	西安交通大学医学院第一附属医院新增射线装置及放射性同位素项目环境影响报告表 (1台DSA、新增放射性同位素 ¹³¹ I、 ^{99m} Tc)	陕环批复[2018]525号	自主验收
12	西安交通大学医学院第一附属医院新增射线PET-MR及TOMO核技术利用项目环境影响报告表 (PET-MR使用场所和TOMO)	陕环批复[2019]175号	项目未建设
13	西安交通大学医学院第一附属医院新增射线装置核技术利用建设项目环境影响报告表 (3台DSA)	市环批复[2021]41号	自主验收
14	西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术利用项目	环评报告编制阶段	/

(3) 辐射安全管理情况

①辐射管理机构基本情况

为了加强对辐射安全和防护管理工作,促进放射性同位素和射线装置的合法使用,西安交通大学医学院第一附属医院专门成立了辐射防护领导小组,由主管院长担任组长,相关科室人员担任组员。

②制定规章制度及落实情况

西安交通大学医学院第一附属医院制定了多项辐射安全管理制度,包括辐射防护和安全保卫制度、操作制度、设备维修维护制度、辐射工作人员培训制度、辐射工作人员个人体检制度、工作场所环境辐射水平监测、放射工作岗位职责、辐射事故应急制度等,并严格按照规章制度执行。

③工作人员培训情况

单位制定有辐射工作人员培训计划,目前医院从事辐射相关工作人员约551人,均参加了辐射安全和防护培训,通过了考核并取得了培训证书(人员培训名录见附件3)。

④个人剂量监测情况

工作期间,辐射工作人员佩戴个人剂量计,接受剂量监测,医院为放射性工作人员建立了剂量健康档案并存档,医院定期对辐射工作人员进行健康体检并存档备案。查阅医院放射性工作人员个人剂量检测报告(报告编号:第00005-2101-000190

号、第 00005-2102-000579、第 00005-2103-001040、第 00005-2104-001496），医院 2020 年 12 月~2021 年 11 月年全年医院放射性工作人员的年度职业外照射个人剂量最大为 1.84mSv 小于医院放射性工作人员年有效剂量限值（5mSv）；医院每两年组织辐射工作人员进行一次健康体检，医院现有的辐射工作人员未发现疑似放射病。

⑤工作场所及辐射环境监测情况

医院放射性工作场所设置有电离辐射警示牌、报警装置和工作指示灯。医院配备有 4 台巡测仪，104 台个人剂量报警仪及 7 台其他监测仪器，并制定工作场所监测计划，医院按期进行监测并建立了辐射环境监测档案。医院每年均委托有资质单位对放射性场所及周围环境进行一次辐射监测，建立监测技术档案，并向相关部门提交了年度评估报告。

⑥应急管理情况

医院依据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与装置安全和防护条例》等法律法规的要求，制定了辐射环境应急预案，以保证本单位一旦发生核技术利用项目辐射意外事件时，能迅速采取必要和有效的应急响应行动，妥善处置放射事故，保护工作人员、公众的健康与环境安全，同时在预案中进一步明确规定本单位有关意外放射事件处理的组织机构及其职责、事故报告、信息发布和应急处理程序等内容。

⑦放射性“三废”处理情况

放射性废液：医院现有核医学科产生的放射性废液集中收集在衰变池进行衰变，满足排放要求后排入医院污水站处理，根据医院提供的核医学科放射性废水检验检测报告（中陕核工业集团综合分析测有限公司 SHZC-QI-1），核医学科衰变池废水排水前总 α 0.394Bq/L，总 β 1.34 Bq/L，满足《核医学辐射防护与安全要求》

（HJ1188-2021）中对放射性废水的要求。

放射性固废：核医学科使用后的空药瓶和擦拭物、废棉签等放射性固体废物均分类收集于铅筒内，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 0.8Bq/cm² 的可对废物清洁控并作为医疗废物处理。

放射性废气：核医学科通风橱及各配套房间内均设置有通风管道，产生的放射性废气经有过滤系统的专用通风管道排出，过滤系统的废活性炭按照放射性固体废物管理。

⑧年度监测报告：2021年西安交通大学医学院第一附属医院委托陕西新高科辐射技术有限公司对医院现有放射工作场所进行了环境辐射水平年度检测，并出具了检测报告。

监测结论为：

医用直线加速器机房防护门、防护墙、放射工作人员操作处、电缆沟出口关注点剂量当量率最大为 $0.41\mu\text{Sv/h}$ ，均满足环评阶段提出的管控要求。

PECT/CT机在规定条件下机房和工作场所的放射工作人员操作位、观察窗、人员门、四周墙体外各关注点剂量当量率最大为 $0.45\mu\text{Sv/h}$ ；SPECT/CT机和SPECT机在规定条件下，机房和工作场所的放射工作人员操作位、观察窗、人员门、四周墙体外各关注点剂量当量率最大为 $0.09\mu\text{Sv/h}$ ；回旋加速器机房和工作场所的放射工作人员操作位、人员门、四周墙体外各关注点剂量当量率最大为 $0.12\mu\text{Sv/h}$ ；满足核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求，核医学科工作场所表面活度检测结果最大为 0.57Bq/cm^2 ，满足核医学科控制区工作场所的放射性表面污染控制水平应不大于 40Bq/cm^2 ，核医学科监督区工作场所的放射性表面污染控制水平应不大于 4Bq/cm^2 的要求。

伽玛刀工作场所在运行条件下机房和工作场所的放射工作人员操作位、观察窗、人员门、四周墙体外各关注点剂量当量率最大为 $0.14\mu\text{Sv/h}$ ，后装治疗机房在运行条件下机房和工作场所的放射工作人员操作位、观察窗、人员门、四周墙体外各关注点剂量当量率最大为 $0.11\mu\text{Sv/h}$ ，均满足环评阶段提出的管控要求。

5台DR机、1台数字胃肠机在规定条件下，各机房的放射工作人员操作处、观察窗、人员门、四周墙体外及机房楼上、楼下关注点剂量当量率最大为 $0.19\mu\text{Sv/h}$ ，符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中6.3.1c）条“具有短时、高剂量率曝光的摄影程序（如DR、CR、屏片摄影）机房外的周围剂量当量率应不大于 $25\mu\text{Sv/h}$ ”和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求。

6台CT机、1台大孔径CT、2台口腔CT、1台牙片机、1台乳腺机、1台骨密度仪在正常工作条件下，机房的放射工作人员操作位、观察窗、人员门、四周墙体外及机房楼上、楼下等关注点剂量当量率最大为 $0.85\mu\text{Sv/h}$ ，符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中6.3.1b）条“机房外的周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ”

的要求。

6 台 DSA 机、7 台移动式 C 形臂机、1 台数字胃肠机在正常工作条件下，放射工作人员操作位、观察窗、人员门、四周墙体外及机房楼上、楼下各关注点剂量当量率最大为 $0.26\mu\text{Sv/h}$ ，“具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ”和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求。

1 台大孔径 CT 机、5 台 CT 机、1 台乳腺机、1 台全身骨密度仪、2 台口腔 CT 机、1 台模拟定位机、2 台碎石机和 1 台牙片机在规定条件下，各机房的放射工作人员操作处、观察窗、人员门、四周墙体外及机房楼上、楼下关注点剂量当量率最大为 $0.59\mu\text{Sv/h}$ ，符合《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中 6.3.1b) 条“机房外的周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ”和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求。

4 台 DR 机在规定条件下，各机房的放射工作人员操作处、观察窗、人员门、四周墙体外及机房楼上、楼下关注点剂量当量率最大为 $0.16\mu\text{Sv/h}$ ，符合《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中 6.3.1c) 条“具有短时、高剂量率曝光的摄影程序（如 DR、CR、屏片摄影）机房外的周围剂量当量率应不大于 $25\mu\text{Sv/h}$ ”和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求。

3 台移动 DR 机的使用和防护符合《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中 7.7 的要求。

西安交通大学医学院第一附属医院严格按照陕西省生态环境厅的各项要求，并且认真履行各项规章制度，每年接受陕西省辐射监督管理站、西安市生态环境局监督检查和环境辐射监测。

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	¹⁹² Ir	3.7×10 ¹¹	III	使用	放射治疗	地下二层后装机房	后装治疗机	/
2	⁶⁰ Co	2.33×10 ¹⁴	I	使用	放射治疗	地下二层伽玛刀机房	伽玛刀机头内	/
3	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	1.85×10 ⁹	V	使用	敷贴治疗	一层敷贴室	敷贴室铅箱内	/

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

表 3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量(Bq)	日等效最大操作量(Bq)	年最大用量(Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	¹⁸ F	液态	使用	1.11×10 ¹⁰	1.11×10 ⁷	2.78×10 ¹²	PET显像	很简单	核医学科检查区	万级净化制药间，通风橱
2	⁶⁸ Ga	液态	使用	7.40×10 ⁸	7.40×10 ⁵	1.85×10 ¹¹	PET显像	很简单	核医学科检查区	
3	⁶⁴ Cu	液态	使用	7.40×10 ⁸	7.40×10 ⁵	1.85×10 ¹¹	PET显像	很简单	核医学科检查区	
4	⁸⁹ Zr	液态	使用	7.40×10 ⁸	7.40×10 ⁶	1.85×10 ¹¹	PET显像	很简单	核医学科检查区	
5	¹²⁴ I	液态	使用	7.40×10 ⁸	7.40×10 ⁶	1.85×10 ¹¹	PET显像	很简单	核医学科检查区	
6	^{99m} Tc	液态	使用	5.18×10 ¹⁰	5.18×10 ⁷	1.30×10 ¹³	ECT显像	很简单	核医学科检查区	万级净化制药间，通风橱
7	²⁰¹ Tl	液态	使用	3.70×10 ⁸	3.70×10 ⁵	9.25×10 ¹⁰	ECT显像	很简单	核医学科检查区	
8	¹²³ I	固态	使用	1.85×10 ⁸	1.85×10 ⁵	4.63×10 ¹⁰	ECT显像	很简单	核医学科检查区	
9	⁵¹ Cr	固态	使用	1.85×10 ⁸	1.85×10 ⁵	4.63×10 ¹⁰	ECT显像	很简单	核医学科检查区	淋洗间，通风橱
10	⁹⁹ Mo	液态	药物制备	1.11×10 ¹¹	1.11×10 ⁸	5.55×10 ¹²	发生器淋洗	贮存	淋洗间	
11	^{99m} Tc	固态	药物制备	8.88×10 ¹⁰	8.88×10 ⁸	2.22×10 ¹³	发生器淋洗	简单	淋洗间	
12	¹²⁵ I(粒籽源)	固态	使用	1.48×10 ¹⁰	1.48×10 ⁷	3.70×10 ¹²	粒籽植入	很简单	ECT1 机房	注射区，通风橱
13	¹⁰³ Pd(粒籽源)	固态	使用	3.70×10 ⁹	3.70×10 ⁶	9.25×10 ¹¹	粒籽植入	很简单	ECT1 机房	
14	¹⁶⁶ Ho(粒籽源)	液态	使用	3.70×10 ⁹	3.70×10 ⁶	9.25×10 ¹¹	粒籽植入	很简单	ECT1 机房	
15	³⁵ S	液态	使用	3.70×10 ⁸	3.70×10 ⁷	9.25×10 ¹⁰	注射、治疗	简单	核医学科注射区	万级净化制药间，通风
16	⁴⁶ Sc	液态	使用	3.70×10 ⁸	3.70×10 ⁷	9.25×10 ¹⁰	注射、治疗	简单	核医学科注射区	

西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术利用项目

17	⁸⁹ Sr	液态	使用	3.70×10 ⁸	3.70×10 ⁷	9.25×10 ¹⁰	注射、治疗	简单	核医学科注射区	橱
18	¹⁸⁶ Re	液态	使用	3.70×10 ⁹	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹¹	注射、治疗	简单	核医学科注射区	
19	¹⁸⁸ Re	液态	使用	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁸	4.63×10 ¹¹	注射、治疗	简单	核医学科注射区	
20	¹⁵³ Sm	液态	使用	3.70×10 ⁹	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹¹	注射、治疗	简单	核医学科注射区	
21	²¹¹ At	液态	使用	7.40×10 ⁸	7.40×10 ⁸	1.85×10 ¹¹	注射、治疗	简单	核医学科注射区	
22	²²³ Ra	液态	使用	1.11×10 ⁷	1.11×10 ⁸	2.78×10 ⁹	注射、治疗	简单	核医学科注射区	
23	²²⁵ Ac	液态	使用	1.11×10 ⁷	1.11×10 ⁸	2.78×10 ⁹	注射、治疗	简单	核医学科注射区	
24	²²⁷ Th	液态	使用	1.11×10 ⁷	1.11×10 ⁸	2.78×10 ⁹	注射、治疗	简单	核医学科注射区	
25	¹⁷⁷ Lu	液态	使用	3.70×10 ⁹	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹¹	注射、治疗	简单	核医学科病房	万级净化制 药间，通风 橱
26	⁹⁰ Y	液态	使用	3.70×10 ⁹	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹¹	介入注射	简单	三层 DSA 手术室	
27	^{99m} Tc	液态	使用	3.7×10 ⁸	3.7×10 ⁶	9.25×10 ¹⁰	介入注射	简单		
28	¹³¹ I	液体	使用	2.96×10 ¹⁰	2.96×10 ⁹	7.4×10 ¹²	甲癌治疗	简单	核医学科病房	碘分装，分 装仪
29	¹³¹ I	液态	使用	3.70×10 ⁹	3.70×10 ⁸	9.25×10 ¹¹	甲亢治疗	简单	核医学科病房	
30	¹³¹ I	液态	使用	3.70×10 ⁸	3.70×10 ⁷	9.25×10 ¹⁰	甲功测定	简单	核医学科病房	

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	2	待定	电子	X 射线能量：10MV； 电子线能量：20MeV	2400cGy/h	放疗	放疗科	
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(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	1	待定	140	800	显像	核医学科	
2	SPECT-CT	III	2	待定	140	800	显像	核医学科	
3	DSA	II	7	待定	125	1250	介入治疗	手术室	

(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 (mA)	中子强度 (n/s)	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度(Bq)	贮存方式	数量	
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

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
含有放射性核素的排泄物和冲洗废水	液态	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 等	/	/	/	总 $\beta < 10\text{Bq/L}$ 总 $\alpha < 1\text{Bq/L}$	衰变池	经衰变池衰变值符合排放要求后排放
沾有放射性核素的注射器、手套、擦拭废纸等	固态	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{125}I 、 ^{32}P 、 ^{177}Lu 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{89}Sr 、 ^{35}S 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{46}Sc 等	/	/	/	/	存于专用放射性废物铅筒内	暂存至其放射性比活度低于相应清洁解控水平后作为一般医疗固体废物处理
废气	气态	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{125}I 、 ^{32}P 、 ^{177}Lu 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{89}Sr 、 ^{35}S 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{46}Sc 等	/	/	/	/	/	经活性炭过滤后由大楼屋顶排放
废弃 ^{68}Ge - ^{68}Ga 、 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器	固态	^{68}Ga 、 ^{68}Ge 、 ^{99}Mo 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	/	/	/	密封在铅外壳屏蔽体贮存在核医学科废物暂存间	生产厂家回收
废 ^{192}Ir 、 ^{60}Co 和 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源	固态	^{192}Ir 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr - ^{90}Y	/	/	/	/	废 ^{192}Ir 、 ^{60}Co 密封在设备铅罐中， ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源暂存在储源铅箱内	生产厂家回收
直线加速器废靶	固态	/	直线加速器使用一定年限或退役时产生的废靶件					作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固体废物暂存间衰变暂存，最终交加速器生产厂家或有资质的单位收贮
/	/	/	/	/	/	/	/	/

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

评价 委托书	西安交通大学医学院第一附属医院《环境影响评价委托书》，2021.8.10，附件 1。
法规 文件	<p>1.国家法律</p> <p>(1) 《中华人民共和国环境保护法（修订）》，2015.1.1；</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法（修订）》，2018.12.29；</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003.10.1；</p> <p>2.国务院行政法规及规范性文件</p> <p>(1) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（第 449 号），国务院，2019.3.2；</p> <p>(2) 国务院《修改〈建设项目环境保护管理条例〉的决定》(国令第 682 号)，2017.7.16；</p> <p>3.部门规章及规范性文件</p> <p>(1) 国家环境保护总局《关于发布放射源分类办法的公告》（2005 年第 62 号），2005.12.23；</p> <p>(2) 环境保护部《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（国家环境保护总局令第 31 号公布），2006 年 3 月 1 日施行，2019 年 8 月 22 修正；</p> <p>(3) 国家环保总局《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 号文），2006.9.26；</p> <p>(4) 环境保护部《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令 部令第 18 号）2011.5.1；</p> <p>(5) 环境保护部《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），2016.3.7；</p> <p>(6) 环境保护部和国家卫生和计划生育委员会《射线装置分类》（公告 2017 年第 66 号），2017.12.5；</p> <p>(7) 环境保护部《放射性废物分类》，2018.1.1；</p> <p>(8) 生态环境部《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 2018 年 9 号公告），2018.5.15；</p> <p>(9) 生态环境部《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法（2019 年修订）》，2021.1.4；</p> <p>(10) 《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</p>

	<p>告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），2020.1.1；</p> <p>（11）生态环境部《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》，2021.1.1。</p> <p>4.地方政府及其职能部门的法规、政策及规范性文件</p> <p>（1）陕西省人大《陕西省放射性污染防治条例（2019 年修正）》，2019.7.31；</p> <p>（2）陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》的通知（陕环办发〔2018〕29 号），2018.6.6。</p>
<p>技术标准</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.《建设项目环境影响评价技术导则总纲》（HJ2.1-2016）； 2.《辐射环境保护管理导则核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）； 3.《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）； 4.《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）； 5.《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）； 6.《放射诊断防护要求》（GBZ130-2020）； 7.《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）； 8.《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）； 9.《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）； 10.《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）； 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房》（GBZ/T201.2-2011）； 12.《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 3 部分：γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）； 13.《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）； 14.《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）。
<p>其他</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.《辐射防护手册第一分册 辐射源与屏蔽》（李德平、潘自强主编，原子能出版社，1987）； 2.《辐射防护手册第三册-安全手册》； 3.建设单位提供的其他技术资料；

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

本项目是在固定的有实体边界的射线机房内使用射线装置、密封放射源、非密封放射性物质工作场所，参照《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内容和格式》（HJ10.1-2016）对核技术利用建设项目的评价范围和保护目标的相关规定，以本项目涉及场所的边界外 50m 的范围作为本项目的评价范围，具体评价范围详见图 7-1。根据图 7-1 可以看出，本项目的评价范围均位于医院占地范围内。

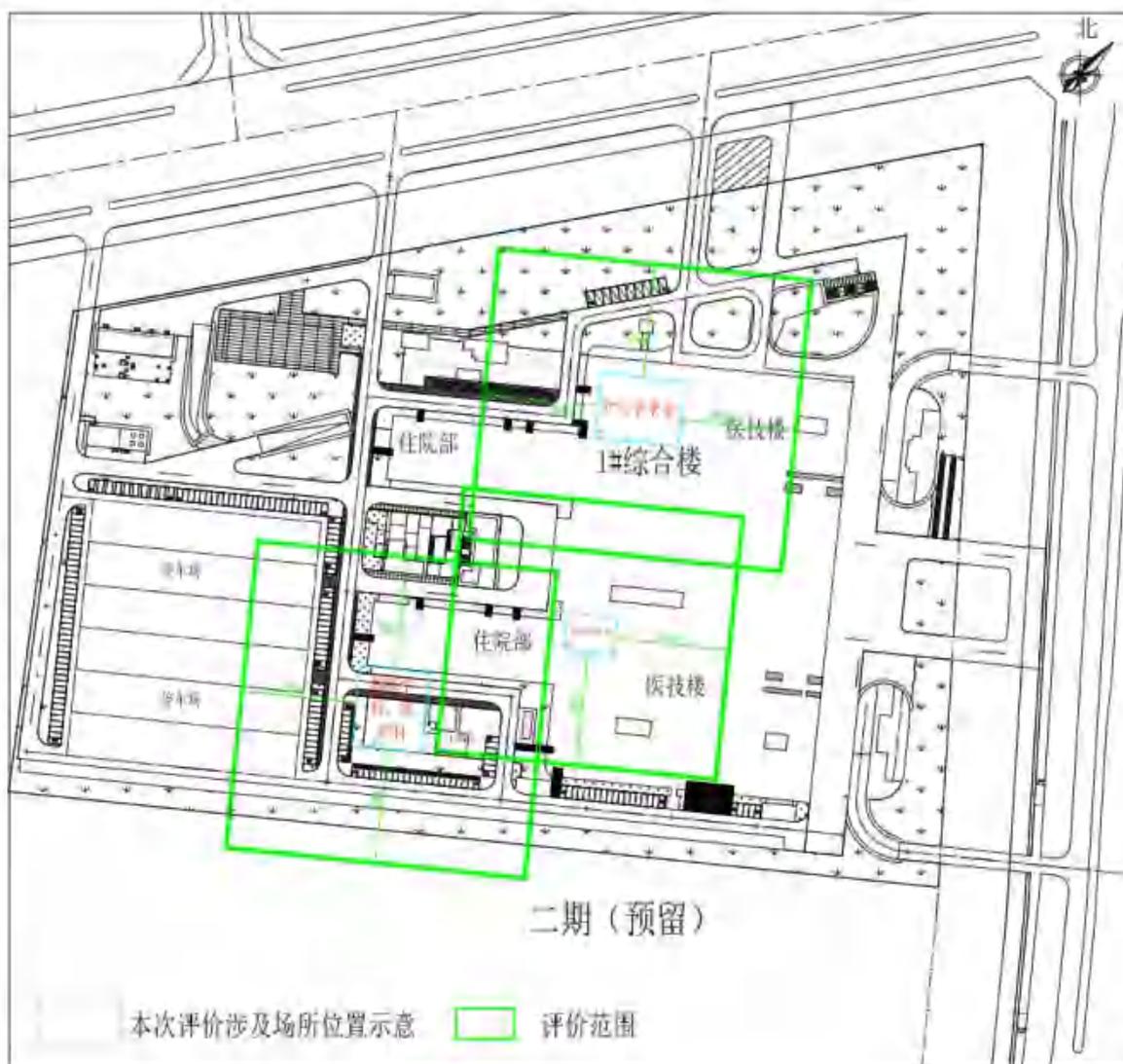


图 7-1 西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术应用项目评价范围图

7.2 保护目标

根据评价范围，结合周边环境情况，确定本项目的保护目标是本项目涉及场所的边界外 50m 范围内活动的辐射工作人员和公众（非辐射工作人员），实际上辐射环境

影响最大的是辐射工作场所相邻的其他工作场所中活动的人群，本项目保护目标见表 7-1。

表 7-1 本项目环境保护目标一览表

序号	保护对象	相对方位	规模	与辐射源点最近距离 m	剂量约束值
1	直线加速器控制室操作人员	机房东侧	10 人	5.8	5mSv/a
2	伽玛刀控制室操作人员	机房东侧		7.4	
3	后装机控制室操作人员	机房南侧		2.9	
4	伽玛刀指导摆位人员	机房内		1	
5	后装机指导摆位人员	机房内		1	
6	三层介入手术操作人员	机房内		0.8	
7	三层介入控制室操作人员	机房外控制室	10 人	3.1	
8	四层复合手术室操作人员	机房内		0.8	
9	四层复合手术室	机房外控制室		3.2	
10	ECT 机房控制室操作人员	机房东侧	30 人	5.89	
11	ECT 指导摆位人员	机房内		1	
12	PET 机房控制室操作人员	机房东侧		5.81	
13	PET-CT 指导摆位人员	机房内		1	
14	ECT 中心注射、分装等操作人员	分装柜外操作位		0.5	
15	PET-CT 中心注射、分装等操作人员	分装柜外操作位		0.5	
16	¹³¹ I 分装、指导服药等工作人员	碘分装室		1.5	
17	¹⁷⁷ Lu 注射操作人员	病房内		0.3	
18	敷贴室工作人员	敷贴室		0.5	
10	直线加速器机房周围公众及其他工作人员	机房门口	流动人员	10.11	0.1mSv/a
11	伽玛刀机房周围公众及其他工作人员	机房门口		7.4	
12	后装机机房周围公众及其他工作人员	机房门口		2.9	
13	ECT、PET 显像检查周围公众及其他工作人员	检查室门口、楼下停车场、楼上停车区		1.4	
14	核医学科注射治疗区域周围公众及其他工作人员	注射治疗区域门口、楼下停车场、楼上停车区		1.6	
15	¹³¹ I 操作场所及病房区周围公众及其他工作人员	¹³¹ I 治疗场所门口、地上、地下区域		1.8	
16	三层介入手术室周围公众及其他工作人员	介入手术区域周围及楼上、楼下区域		2.75	
17	四层复合手术室周围公众及其他工作人员	复合手术室周围及楼上、楼下区域		2.75	
18	核医学科、放疗科、介入手术室、复合手术室周围人员	可能经过该区域的人员		1.6	
19	评价范围内其他公众人员	1#综合楼内及医院停车场	1.6		

7.3 评价标准

1、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

①职业照射

4.3.2.1 应对个人受到的正常照射加以限制，以保证本标准 6.2.2 规定的特殊情况

外，由来自各项获准实践的综合照射所致的个人总有效剂量和有关器官或组织的总当量剂量不超过附录B（标准的附录B）中规定的相应剂量限值。不应将剂量限值应用于获准实践中的医疗照射。

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

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

b)任何一年中的有效剂量，50mSv。

②公众照射

B1.2.1 实践使公众有关关键人群组的成员所受的平均剂量估计值不应超过下述限值：

a)年有效剂量，1mSv；

b)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。

考虑医院未来的放射性同位素和射线装置发展，并为其他辐射设施和实践活动留有余地，本评价对职业照射和公众照射的年剂量管理约束值设定为：项目实施后，部分职业人员可能轮岗，存在受照剂量叠加的情况，故对职业人员取其连续5年的年平均有效剂量限值20mSv的四分之一即5mSv作为约束值；项目周围公众取年有效剂量限值1mSv的十分之一即0.1mSv作为约束值。

③分区

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求，应把辐射工作场所分为控制区和监督区，以便于辐射防护管理和职业照射控制。

6.4.1 控制区

6.4.1.1 注册者和许可证持有者应把需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。

6.4.2 监督区

6.4.2.1 注册者和许可证持有者应将下述区域定为监督区：这种区域未被定为控制区，在其中通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价。

④表面放射性污染的控制

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

第B2款表面污染控制水平

第 B2.1 款，工作场所的表面污染控制水平如 7-2 所列。

表 7-2 工作场所的放射性表面污染控制水平单位：Bq/cm²

表面类型		α 放射性物质		β 放射性物质
		极毒性	其他	
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、监督区	4×10 ⁻¹	4×10 ⁻¹	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 ⁻²	4×10 ⁻²	4×10 ⁻¹

1) 该区内的低污染子区除外。

⑤非密封源工作场所的分级

非密封源工作场所的分级应按附录C（标准的附录）的规定进行。

第 C1 款，应按表7-3将非密封源工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级。

7-3 非密封源工作场所的分级

级别	日等效最大量/Bq
甲	>4×10 ⁹
乙	2×10 ⁷ ~4×10 ⁹
丙	豁免活度值以上~2×10 ⁷

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

表7-4 放射性核素毒性组别修正因子

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

表7-5 操作方式与放射源状态修正因子

操作方式	放射源状态			
	表面污染水平 较低的固体	液体，溶 液，悬浮液	表面有污染的 固体	气体，蒸汽，粉末，压 力很高的固体
源的贮存	1000	100	10	1
很简单的操作	100	10	1	0.1
简单操作	10	1	0.1	0.01
特别危险的操作	1	0.1	0.01	0.001

⑥放射性物质向环境排放的控制

第8.6.2款规定，不得将放射性废液排入普通下水道，除非经审管部门确认是满足下列条件的低放废液，方可直接排入流量大于10倍排放流量的普通下水道，应对每次排放作好记录：

a) 每月排放的总活度不超过10ALImin（ALImin是相应于职业照射的食入和吸入ALI值中的较小者，其具体数值可按B1.3.4和B1.3.5条的规定获得）；

b) 每一次排放的活度不超过1ALImin，并且每次排放后用不少于3倍排放量的水进行冲洗。

2、放疗机房控制要求

(1) 参考《放射治疗放射防护要求》GBZ121-2020

6 工作场所放射防护要求

6.1 布局要求

6.1.1 放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。

6.1.2 放射治疗工作场所应分为控制区和监督区。治疗机房、迷路应设置为控制区；其他相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需经常检查其职业照射条件的区域设为监督区。

6.1.3 治疗机房有用线束照射方向的防护屏蔽应满足主射线束的屏蔽要求，其余方向的防护屏蔽应满足漏射线及散射线的屏蔽要求。

6.1.4 治疗设备控制室应与治疗机房分开设置，治疗设备辅助机械、电器、水冷设备，凡是可以与治疗设备分离的，尽可能设置于治疗机房外。

6.1.5 应合理设置有用线束的朝向，直接与治疗机房相连的治疗设备的控制室和其他居留因子较大的用室,尽可能避开被有用线束直接照射。

6.1.6 X射线管治疗设备的治疗机房、术中放射治疗手术室可不设迷路； γ 刀治疗设备的治疗机房，根据场所空间和环境条件，确定是否选用迷路；其他治疗机房均应设置迷路。

6.2 空间、通风要求

6.2.1 放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需要。

6.2.2 放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排

风口应设在治疗机房下部，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数应不小于 4 次/h。

6.3 屏蔽要求

6.3.1 治疗机房墙和入口门外关注点周围剂量当量率参考控制水平

6.3.1.1 治疗机房（不包括移动式电子加速器治疗机房）墙和入口门外 30 cm 处（关注点）的周围剂量当量率应不大于下述 a）、b）和 c）所确定的周围剂量当量率参考控制水平。

a) 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，由周剂量参考控制水平求得关注点的周围剂量当量率参考控制水平 \dot{H}_c ，见式（1）：

$$\dot{H}_c \leq He/(t \cdot U \cdot T) \quad (1)$$

式中：

\dot{H}_c ——周围剂量当量率参考控制水平，单位为微希沃特每小时（ $\mu\text{Sv/h}$ ）；

He——周剂量参考控制水平，单位为微希沃特每周（ $\mu\text{Sv/周}$ ），其值按如下方式取值：放射治疗机房外控制区的工作人员： $\leq 100 \mu\text{Sv/周}$ ；放射治疗机房外非控制区的人员： $\leq 5 \mu\text{Sv/周}$ 。

t——设备周最大累积照射的小时数，单位为小时每周（h/周）；

U——治疗设备向关注点位置的方向照射的使用因子；

T——人员在关注点位置的居留因子，取值方法参见附录 A。

b) 按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高周围剂量当量率参考控制水平 $\dot{H}_{c, \max}$ ：

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

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

c) 由上述 a) 中的导出周围剂量当量率参考控制水平 \dot{H}_c 和 b) 中的最高周围剂量当量率参考控制水平 $\dot{H}_{c, \max}$ ，选择其中较小者作为关注点的周围剂量当量率参考控制水平 \dot{H}_c 。

6.3.2 治疗机房顶屏蔽的周围剂量当量率参考控制水平

6.3.2.1 在治疗机房上方已建、拟建二层建筑物或在治疗机房旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点至机房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗机房顶外表面 30cm 处，或在立体角区域内的高层建筑物中人员驻留处，周围剂量当量率参考控制水平同 6.3.1。

6.3.2.2 除 6.3.2.1 的条件外，若存在天空反射和侧散射，并对治疗机房墙外关注点位置照射时，该项辐射和穿出机房墙透射辐射在相应处的周围剂量当量率的总和，按 6.3.1 确定关注点的周围剂量当量率作为参考控制水平。

6.3.3 屏蔽材料

屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能和经济因素，符合最优化要求，新建机房一般选用普通混凝土。

6.4 安全装置和警示标志要求

6.4.1 监测报警装置

含放射源的放射治疗机房内应安装固定式剂量监测报警装置，应确保其报警功能正常。

6.4.2 联锁装置

放射治疗设备都应安装门机联锁装置或设施，治疗机房应有从室内开启治疗机房门的装置，防护门应有防挤压功能。

6.4.3 标志

医疗机构应当对下列放射治疗设备和场所设置醒目的警告标志：

- a) 放射治疗工作场所的入口处，设有电离辐射警告标志；
- b) 放射治疗工作场所应在控制区进出口及其他适当位置，设有电离辐射警告标志和工作状态指示灯。

6.4.4 急停开关

6.4.4.1 放射治疗设备控制台上应设置急停开关，除移动加速器机房外，放射治疗机房内设置的急停开关应能使机房内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。通常应在机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧和控制台等处设置。

6.4.4.2 放射源后装近距离治疗工作场所，应在控制台、后装机设备表面人员易触及位置以及治疗机房内墙面各设置一个急停开关。

6.4.5 应急储存设施

6.4.5.1 γ 源后装治疗设施应配备应急储源器。

6.4.5.2 中子源后装治疗设施应配备符合需要的应急储源水池。

6.4.6 视频监控、对讲交流系统

控制室应设有在实施治疗过程中观察患者状态、治疗床和迷路区域情况的视频装置；还应设置对讲交流系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。

(2) 参考《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198—2021)

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 30 cm 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 30 cm 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 μSv 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)。

7 操作的辐射安全与防护要求

7.2 治疗期间，应有两名以上人员协调操作，认真做好当班记录，严格执行交接班制度；加速器试用、调试、检修期间，控制室须有工作人员值守。

7.3 任何人员未经授权或允许不得进入控制区。工作人员须在确认放射治疗或者治疗室束流已经终止的情况下方可进入放射治疗室,进入含放射源或质子/重离子装置的治疗室前须携带个人剂量报警仪。检修人员进入质子/重离子加速器大厅和束流输送通道区域前,应先进行工作场所辐射监测。

7.4 应加强放射源倒装活动的辐射安全管理,倒装工作应由有相应能力且通过辐射安全考核的专业人员进行;应制定放射源倒装活动方案,对辐射监测与报警仪器的有效性、操作场所分区隔离设置、倒源屏蔽体搭建进行确认;倒装放射源时应对倒装热室周围和含源设备表面进行辐射监测,关注倒源屏蔽体的辐射防护效果和含源设备表面进行辐射监测,关注倒源屏蔽体的辐射防护效果和含源设备的表面污染情况,做好安装和更换的放射源清点并记录;倒源结束后对含放射源的放射治疗设备、场所与周围环境进行辐射监测。

3、放射诊断机房控制要求

参考《放射诊断放射防护要求》GBZ130-2020

(1) 适用范围

本标准适用于 X 射线影像诊断和介入放射学。

(2) X 射线设备机房布局

① 应合理设置 X 射线设备、机房的门、窗和管线口位置,应尽量避免有用线束直接照射门、窗、管线口和工作人员操作位。

② X 射线设备机房(照射室)的设置应充分考虑邻室(含楼上和楼下)及周围场所的人员防护与安全。

③ 每台固定使用的 X 射线设备应设有单独的机房,机房应满足使用设备的布局要求。

④ 除床旁摄影设备、便携式 X 射线设备和车载式诊断 X 射线设备外,对新建、改建和扩建项目和技术改造、技术引进项目的 X 射线设备机房,其最小有效使用面积、最小单边长度应符合表 7-6 的规定。

表7-6 X射线设备机房(照射室)使用面积、单边长度的要求

设备类型	机房内最小有效使用面积 (m ²)	机房内最小单边长度 (m ²)
单管头 X 射线设备 ^b (含 C 形臂,乳腺 CBCT)	20	3.5
CT 机(不含头颅移动 CT)	30	4.5

^b单管头、双管头或多管头 X 射设备的每个管球各安装在 1 个房间内

(3) X 射线设备机房屏蔽

① 不同类型 X 射线设备（不含床旁摄影设备和便携式 X 射线设备）机房的屏蔽防护应不低于表 7-7 的规定。

② 医用诊断 X 射线防护中不同铅当量屏蔽物质厚度的典型值参见附录 C 中表 C.4~表 C.7。

表7-7 不同类型X射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向铅当量 (mm)	非有用线束方向铅当量 (mm)
介入 X 射线设备机房	2	2
标称 125kV 以上的摄影机房	3.0	2.0

③ 机房的门和窗关闭时应满足表 7-7 的要求。

④ 距 X 射线设备表面 100cm 处的周围剂量当量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 时且 X 射线设备表面与机房墙体距离不小于 100cm 时，机房可不作专门屏蔽防护。

(4) X 射线设备机房屏蔽

CT 机、乳腺摄影、乳腺 CBCT、口内牙片摄影、牙科全景摄影、牙科全景头颅摄影、口腔 CBCT 和全身骨密度仪机房外的周围剂量率当量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；测量时，X 射线设备连续出束时间应大于仪器响应时间。

(5) X 射线设备工作场所防护

① 机房应设有观察窗或摄像监控装置，其设置的位置应便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

② 机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。

③ 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。

④ 机房门外应有电离辐射警告标志；机房门上方应有醒目的工作状态指示灯，灯箱上应设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句；候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。

⑤ 平开机房门应有自动闭门装置；推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施；工作状态指示灯能与机房门有效关联。

⑥ 电动推拉门宜设置防夹装置。

⑦ 受检者不应在机房内候诊；非特殊情况，检查过程中陪检者不应滞留在机房内。

⑧ 机房出入门宜处于散射辐射相对低的位置。

⑨ 每台 X 射线设备根据工作内容，现场应配备不少于表 7-8 基本种类要求的工作人员、受检者防护用品与辅助防护设施，其数量应满足开展工作需要，对陪检者应至少配备铅防护衣。防护用品和辅助防护设施的铅当量应不小于 0.25mmPb；介入防护手套铅当量应不小于 0.025mmPb；甲状腺、性腺防护用品铅当量应不小于 0.5mmPb；移动铅防护屏风铅当量应不小于 2mmPb。介入放射学机房防护设施应满足相应设备类型的防护要求。

表 7-8 个人防护用品和辅助防护设施配置要求

放射检查类型	工作人员		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
介入放射学操作	铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套 选配：铅橡胶帽子	铅悬挂防护屏/铅防护帘、床侧防护帘/床侧防护屏；选配：移动铅防护屏风	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套 选配：铅橡胶帽子	—

注 1：“—”表示不做要求。

4、核医学科相关标准

(1) 参考《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）：

本标准适用于医疗机构开展核医学诊断、治疗、研究和放射性药物制备中使用放射性物质时的防护。

5 工作场所的放射防护要求

5.1 工作场所平面布局和分区

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

5.1.2 核医学工作场所平面布局设计应遵循如下原则：

- a) 使工作场所的外照射水平和污染发生的概率达到尽可能小；
- b) 保持影像设备工作场所内较低辐射水平以避免对影像质量的干扰；
- c) 在核医学诊疗工作区域，控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门等安全措施，限制患者或受检者的随意流动，保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射；

d) 在分装和给药室的出口处应设计卫生通过间，进行污染检测。

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

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

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

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

5.1.4 核医学放射工作场所应划分为控制区和监督区。控制区一般包括使用非密封源核素的房间（放射性药物贮存室、分装及（或）药物准备室、给药室等）、扫描室、给药后候诊室、样品测量室、放射性废物储藏室、病房（使用非密封源治疗患者）、卫生通过间、保洁用品储存场所等。监督区一般包括控制室、员工休息室、更衣室、医务人员卫生间等。应根据GB 18871的有关规定，结合核医学科的具体情况，对控制区和监督区采取相应管理措施。

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

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

5.2 放射防护措施要求

5.2.3 核医学工作场所通风系统独立设置，应保持核医学工作场所良好的通风条件，合理设置工作场所的气流组织，遵循自非放射区向监督区再向控制区的流向设计，保持含放射性核素场所负压以防止放射性气体交叉污染，保证工作场所的空气质量。合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于

0.5m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。

5.2.4 分装药物操作宜采用自动分装方式。

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

5.2.6 控制区的入口应设置电离辐射警告标志。

5.2.7 核医学场所中相应位置应有明确的患者或受检者导向标识或导向提示。

5.2.8 给药后患者或受检者候诊室、扫描室应配备监视设施或观察窗和对讲装置。

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

5.2.10 扫描室外防护门上方应设置工作状态指示灯。

6.2 放射性药物操作的放射防护要求

6.2.1 操作放射性药物应有专门场所，如临床诊疗需要在非专门场所给药时则需采取适当的防护措施。放射性药物使用前应适当屏蔽。

6.2.2 装有放射性药物的给药注射器，应有适当屏蔽。

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

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

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

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

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

6.2.10 放射性物质贮存室应定期进行放射防护监测，无关人员不应入内。

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

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

6.2.13 所有放射性物质不再使用时，应立即送回原地安全储存。

6.2.14 当发生放射性物质溢出、散漏事故时，应根据单位制定的放射事故处置应急预案，及时控制、消除放射性污染；当人员皮肤、伤口被污染时，应迅速去污并给予医学处理。

6.2.15 核医学放射工作人员应按GBZ128的要求进行外照射个人监测，同时对于近距离操作放射性药物的工作人员，宜进行手部剂量和眼晶状体剂量监测，保证眼晶状体连续5年期间，年平均当量剂量不超过20mSv，任何1年中的当量剂量不超过50mSv。

8 医用放射性废物的放射防护管理要求

8.1 放射性废物分类，应根据医学实践中产生废物的形态及其中的放射性核素种类、半衰期、活度水平和理化性质等，将放射性废物进行分类收集和分别处理。

8.2 设废物储存登记表，记录废物主要特性和处理过程，并存档备案。

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

8.4 开展放射性药物治疗的医疗机构，应为住院治疗患者或受检者提供有防护标志的专用厕所，专用厕所应具备使患者或受检者排泄物迅速全部冲入放射性废液衰变池的条件，而且随时保持便池周围清洁。

8.5 供收集废物的污物桶应具有外防护层和电离辐射警示标志。在注射室、注射后病人候诊室、给药室等位置放置污物桶。

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

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

8.8 每袋废物的表面剂量率应不超过0.1mSv/h，质量不超过20kg。

8.9 储存场所应具有通风设施，出入口设电离辐射警告标志。

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

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

附录K（规范性附录）个人防护用品和应急及去污用品

K.1 个人防护用品

表7-6 个人防护用品

场所类型	工作人	
	必备	选备
普通核医学和 SPECT 场所	铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖	铅橡胶帽、铅玻璃眼镜
正电子放射性药物和 ^{131}I 的场所	放射性污染防护服	—

注：“—”表示不需要要求，宜使用非铅防护用品。

K.2 应急及去污用品

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

（2）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）

4.3 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。

4.3.2 核医学工作场所的控制区主要包括回旋加速器机房、放射性药物合成和分装室、放射性药物贮存室、给药室、给药后候诊室、扫描室、核素治疗病房、给药后患者的专用卫生间、放射性废物暂存库、衰变池等区域。

4.3.3 核医学工作场所的监督区主要包括回旋加速器和显像设备控制室、卫生通过间以及与控制区相连的其他场所或区域。

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。

4.4 剂量限值与剂量约束值

4.4.1 剂量限值

核医学工作人员职业照射剂量限值应符合 GB18871 附录 B 中 B1.1 的相关规定，核医学实践使公

众成员所受到的剂量照射限值应符合 GB18871 附录 B 中 B1.2 的相关规定。

4.4.2 剂量约束值

4.4.2.1 一般情况下，职业照射的剂量约束值不超过 5mSv/a；

4.4.2.2 公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

4.4.3 放射性表面污染控制水平

核医学工作场所的放射性表面污染控制水平按照 GB18871 执行。

4.5 服药患者出院要求

4.5.1 为确保放射性核素治疗患者出院后，不至于使接触患者的家庭成员及公众超过相关的剂量约束

或剂量限值，出院患者体内放射性核素活度应符合附录 B 的相关规定。

4.5.2 接受碘-131 治疗的患者，应在其体内的放射性活度降至 400MBq 以下或距离患者体表 1 米处的周围剂量当量率不大于 25 μ Sv/h 方可出院。

5 选址和布局

5.1 选址

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

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

5.1.3 核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。

5.2 布局

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

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

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

表面污染监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。

6 工作场所的辐射安全与防护

6.1 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。

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。

6.1.5 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 $25\mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.7 固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.8 放射性物质贮存在专门场所内，并应有适当屏蔽。

6.2 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。

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。

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。

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。

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。

6.2.6 粒籽源植入场所应配备辐射监测仪器，手术结束后应对手术床及周边区域进行辐射水平监测，以排除粒籽源在手术植入过程中遗漏或丢失。

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。

6.2.9 扫描机房外门框上方应设置工作状态指示灯。

6.3 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。

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 放射性废物的管理

7.1 一般要求

7.1.1 应根据核医学时间中产生废物的形态及其中的放射性核素的种类、半衰期、活度水平和理化性质等，按放射性废物分类要求将放射性废物进行分类收集和分别处理。

7.1.2 应按照废物最小化的原则区分放射性废物与解控废物，不能混同处理，应尽量控制和减少放射性废物产生量。

7.1.3 核医学实践中产生的短寿命放射性废物，应尽量利用贮存衰变的方法进行处理，待放射性核素厚度浓度满足解控水平后，实施解控。不能解控的放射性废物，应送交有资质的放射性废物收贮或处置机构进行处理。

7.1.4 应建立放射性废物收集、贮存、排放管理台账，做好记录并存档备案。

7.2 固体放射性废物的管理

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 表面污染小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 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处理：

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

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

c) 含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天；

7.3.3 放射性废液排放

7.3.3.1 对于槽式衰变池贮存方式：

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

b) 所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（含碘-131 核素的暂存超过 180 天），监测结果经审管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排口总 α 不大于 $1\text{Bq}/\text{L}$ 、总 β 不大于 $10\text{Bq}/\text{L}$ 、碘-131 的放射性活度浓度不大于 $10\text{Bq}/\text{L}$ 。

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

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

7.4 气态放射性废物的管理

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

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

5、放射性废水排放标准

由于该评价项目产生的放射性废水最终排入市政管网，因此执行根据《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）4.1.2 规定的综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值：总 β 不大于10Bq/L，总 α 不大于1Bq/L。

6、室内空气质量

室内空气质量臭氧和氮氧化物浓度限值执行《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素》（GBZ2.1-2019），臭氧的最大容许浓度 0.3mg/m³。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理位置和场所位置

西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院位于西安市国际港务区港务西路以西、秦汉大道以南区域，具体见图1-1。

8.2 环境现状评价的对象、监测因子和监测点位

(1) 环境现状评价的对象

本次环境现状评价的对象为本项目辐射工作场所区域及周边环境。

(2) 监测因子

γ 辐射空气吸收剂量率。

(3) 监测点位

按《辐射环境监测技术规范》（HJT61-2021）及《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）中有关布点原则和方法，并结合本项目的实际情况，对医院辐射工作场所周边环境辐射水平背景值监测。

8.3 监测方案、质量保证措施和监测结果

(1) 监测方案

①监测单位

陕西省放射性物质监督检查站

②监测时间和监测方法

监测时间：2021 年 7 月 30 日

监测方法：监测方法依据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）

③监测仪器

本次监测仪器为辐射防护用 X、 γ 辐射周围剂量当量率仪，仪器的参数见表 8-1。

表 8-1 环境现状监测仪器及参数一览表

项目	相关内容
仪器名称	X、 γ 辐射剂量仪
仪器型号	JB4000
编号	SHZC-FS07
检定证书编号	DLjl2020-06005
仪器检定有效期至	2021.08.08
校准因子	1.03

(2) 质量保证措施

- ①合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性；
- ②监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗；
- ③监测仪器已经计量部门检定，检定合格，并在检定有效期内；
- ④每次测量前后均检查仪器的工作状态是否良好；
- ⑤由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；
- ⑥监测报告严格实行三级审核制度，经过校对、校核，最后由技术总负责人审定。

(3) 监测结果

西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院辐射工作场所周边背景值监测结果见表 8-2，检测报告见附件 2。

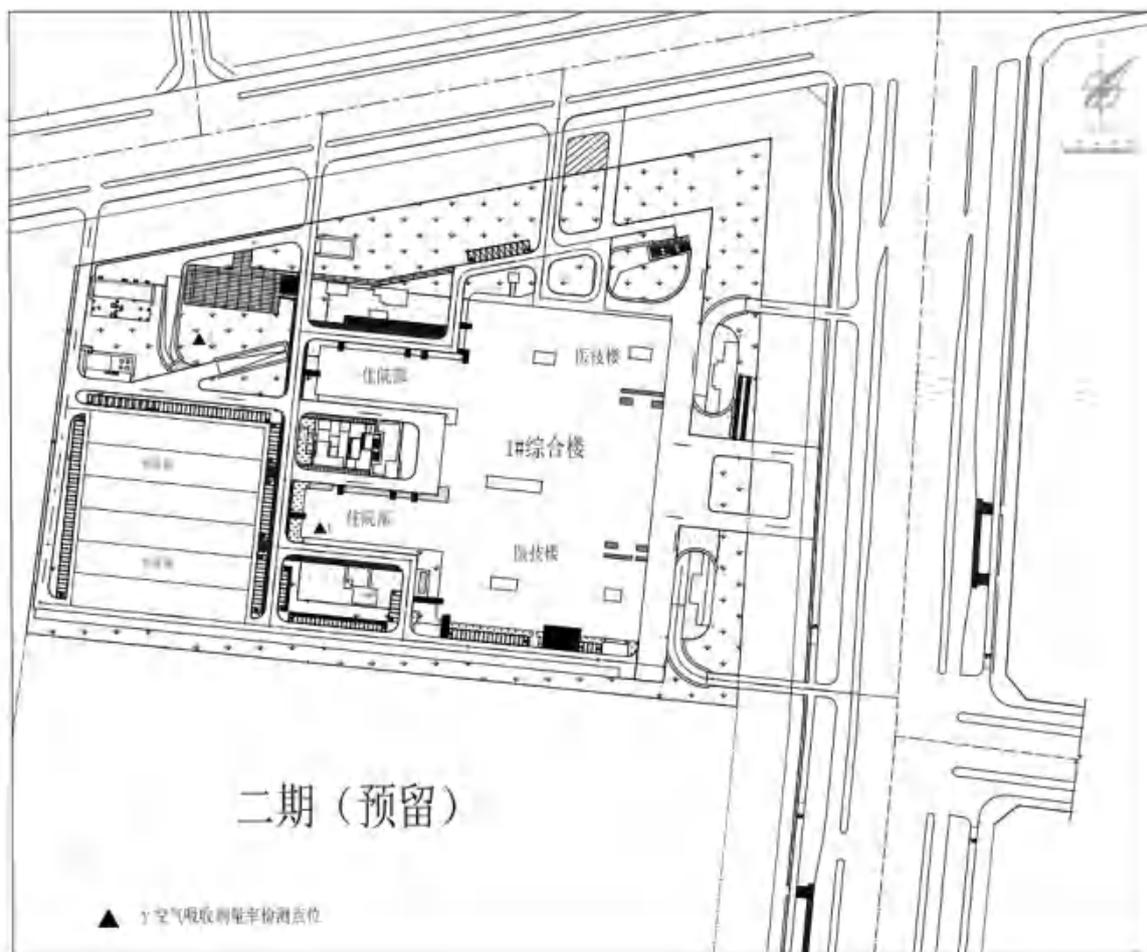


图 8-1 西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院现状监测点位图

表 8-2 辐射环境剂量率监测结果

序号	点位描述	监测结果 ¹⁾ (μGy/h)				监测工况
		最小值	最大值	平均值	标准偏差	
1	项目地	0.03	0.05	0.04	0.01	背景值监测
2	厂区内草坪	0.04	0.06	0.05	0.01	

注：1) 以上数据均以校正；以上数据均以扣除仪器对宇宙天然射线的响应值，仪器在测点处对应宇宙射线响应值 $X_e=11.5nGy/h$

根据表 8-2 可知，西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院辐射工作场所拟建地辐射环境剂量平均值为 0.04~0.05μGy/h。

《中国环境天然放射性水平》（2015 年 7 月）陕西省西安市 γ 辐射空气吸收剂量率天然辐射水平见表 8-3。

表 8-3 西安市环境天然放射性 γ 辐射空气吸收剂量率调查结果 (nGy/h)

	原野	道路	室内
范围	50.0~117	52.0~121.0	79.0~130.0
均值	71.0	76.0	107.0
标准差	17.0	20.0	24.0

综上，西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院辐射工作场所拟建地辐射环境剂量基本与《中国环境天然放射性水平》（2015 年 7 月）中西安市辐射剂量率监测结果在同一水平。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 工程设备和工艺分析

本项目涉及放射性操作场所大体上分为三类：核医学，包括非密封放射性核素的生产、诊断和治疗；放射治疗，包括放射源及射线装置的放射治疗；介入手术，主要为介入手术室及杂合手术室在 DSA 引导下的手术。

9.1.1 核医学科工程设备和工艺分析

本项目放射性核素操作涉及的工艺如下表所示。

表 9-1 本项目涉及的核素及其操作方式

场所名称	核素操作	涉及的核素
核医学科 (PET 机房)	PET 放射诊断	^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I
淋洗室	利用 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{99}Mo 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$
核医学科 (ECT 机房)	SPECT-CT 放射诊断	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{123}I 、 ^{201}Tl 、 ^{51}Cr
核医学科 (注射)	放射治疗	^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{89}Sr 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{46}Sc 、 ^{35}S 等
核医学科 (病房)	甲癌治疗、粒籽植入治疗、 ^{177}Lu 、 ^{90}Y 住院	^{131}I 、 ^{177}Lu 、 ^{125}I 、 ^{103}Pd 、 ^{166}Ho 、 ^{90}Y
核医学科 (碘分装)	甲亢、甲癌治疗、甲功测定	^{131}I
粒子植入手术室	ECT1 机房	^{125}I 、 ^{103}Pd 、 ^{166}Ho
介入手术	^{90}Y 介入手术	^{90}Y 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$

9.1.1.1 PET

1. 设备组成及工作原理

(1) PET-CT

PET-CT 是正电子发射断层与计算机断层诊断技术 (Positron Emission Tomography and Computer Tomography) 的缩写，是在 PET (Positron Emission Tomography) 和 CT (Computer Tomography) 的基础上发展起来的新设备，充分结合了 PET 高灵敏度和 CT 高分辨率的优势，使这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。

PET-CT 主要由扫描仪、显像床、电子柜、操作工作站、分析工作站和影像硬拷

贝等组成，它是决定图像质量的基础。CT 扫描仪位于 PET 扫描仪的前方，两者组合在一个机架内，后配 PET、CT 融合对位工作站，一次成像同时完成 CT 及 PET 扫描。典型 PET-CT 见图 9-1。



图 9-1 典型 PET-CT 实物图

PET-CT 显像的物理原理是利用回旋加速器加速带电粒子（如质子、氘核）轰击靶核，通过核反应产生正电子放射性核素（如 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{18}F 等），并合成相应的显像剂，引入机体后定位于靶器官，这些核素在衰变过程中发射正电子，这种正电子在组织中运行很短距离后，即与周围物质中的电子相互作用，发生湮灭反应，产生出方向相反、能量相等（511keV）的两个光子。PET 显像是采用一系列成对的互成 180° 排列并与符合线路相连的探测器测量湮灭反应产生的光子，从而获得机体正电子核素的断层分布图，显示病变的位置、形态、大小和代谢功能，对疾病进行诊断。

PET-CT 显像能够通过一次快速扫描成像不仅能提供精确的全身解剖图像，而且可依据不同的正电子显像药物勾画出不同组织器官特定的生物代谢分布图。主要用于人体器官的功能代谢显像，对那些有代谢异常的疾病，如：肿瘤、冠心病、神经系统等病种有着独特的优势，能够更早期地发现和诊断疾病，为及早治疗和观察治疗赢得宝贵时间。

（2）PET-MR

PET-MRI，即正电子发射计算机断层显像仪 PET 和核磁共振成像术 MR 两强结合一体化组合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和显像可获得代谢显像，而 MR 对 PET 图像做放射性的衰减校正，可以提供解剖学和组织特征，两者结合可以看到组织功能和新陈代谢，可提供比传统成像方式更为优质的影像结果。检查采用放射性核素或其标记物作为示踪剂，通

过注射方式进入体内后，依其化学及生物学特性不同，随血流等进入某些特定的组织器官，参与或模仿某些生命物质在人体内的病理生理、引流代谢的过程。由于正常组织和病变组织在这个过程中的差异，使其聚集这种放射性核素或其标记物的能力发生了变化。因此，PET-MR 是目前最好的高端体检手段。

PET-MR 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。环形晶体探测器是正电子放射显像系统中的重要部分，它采用块状晶体结构并通过精细切割成更小的晶体探测单元以降低散射、提高计数率。许多快晶体结构组成一个环，再由数十个环构成整个探测器。晶体探测器将高能光子转换成荧光，再通过晶体探测器后方的光电倍增管（PMT）将光信号转换成电信号，最终生成的时间脉冲信号进行符合线路甄别出耦合的符合性事件后，经滤波反投影或 OSEM 等重建算法，以及衰减校正后生成 PET 图像。

MR 主要主要组成部分为磁体系统、梯度系统、射频系统、计算机系统和辅助设备系统 5 部分组成。

2 工作流程及产污环节

PET-CT 及 PET-MR 诊断工作流程基本相同，放射诊断工作流程如下：

①根据临床诊断需药量，提前一天向医院放射性药物制备提出药物需求，包括种类及数量。

②医院放射性核素生产场所按照需求进行放射性药物的生产、分装。

③医院拟采用自动分装仪进行分装，进一步减少了工作人员的受照剂量，自动分装仪位于注射室内。

④患者根据预约情况，进入地下一层核医学科门口候诊区域候诊，工作人员根据工作安排呼叫轮到诊断的患者名字，根据视频监控图像，通过语音提示，指导患者到达注射窗前。

放射工作人员将钨合金注射器防护套套在注射器上，隔着注射窗口对患者进行药物注射（静推给药），注射后的注射器以及棉签等固体废物丢入旁边专用废物桶。

⑤放射工作人员根据视频监控图像，通过语音提示，指导药物注射后的患者进入注射后候诊室候诊。

⑥通过语音提示，患者进入 PET 机房接受显像扫描。患者进入机房后，控制室的放射工作人员通过观察窗和语音系统，指导患者正确躺在检查床上，然后隔室操作

PET-CT 或 PET-MR 对患者实施显像扫描。如遇到个别特殊的患者需要协助摆位时，放射工作人员从控制室进入机房对患者辅助摆位，随后离开机房进入控制室，隔室操作 PET-CT 或 PET-MR 对患者实施显像扫描。

⑦进行 PET 显像检查的患者因为扫描成像清晰度等原因，需要在留观室进行留观，一般留观 10~30min，留观结束后也由专用通道乘坐专用电梯离开核医学科。

本项目 PET 用放射性药物 ^{18}F 为医院二期自产， ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I 为医院向有销售资质的供药单位根据用量订购单支成品药，核医学科不对药物进行分装，外购药物药物贮存在专用铅箱，按照预定要求送到医院分装净化间。

项目 PET 放射诊断工作流程及产污环节见图 9-2。

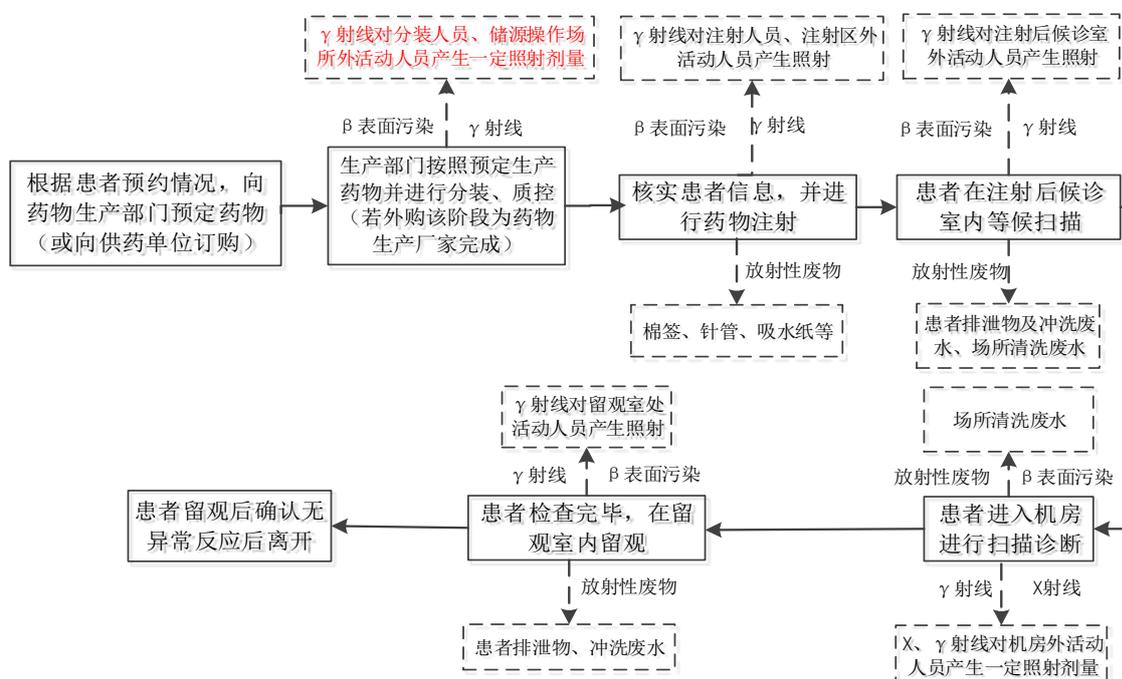


图 9-2 项目 PET 放射诊断工作流程及产污环节示意图

项目 PET 放射诊断过程的污染因子主要是： γ 射线、X 射线、 β 表面污染、放射性“三废”等。

项目 PET-CT 和 PET-MR 拟使用放射性核素相关情况见表 9-2。

表 9-2 项目 PET 中心拟使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量 (Bq)	日最大受检人数	日最大操作量 (Bq/d)	年最大用量 (Bq/a)
^{18}F	液体	109.8min	β^+ ,EC	3.70×10^8	30	1.11×10^{10}	2.78×10^{12}
^{64}Cu	液体	12.7h	β^+ ,EC	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}
^{89}Zr	液体	78.4h	β^+ ,EC	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}
^{124}I	液体	4.18d	β^+ ,EC	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}
^{68}Ga	液体	68.3min	β^+ ,EC	3.70×10^8	2	7.40×10^8	1.85×10^{11}

注：周工作 5 天，年工作 50 周

3 设备参数

项目核医学科 PET-CT 设备参数见表 9-3。

表 9-3 项目核医学科 PET 主要设备参数一览表

设备名称	型号	数量	类别	具体参数
PET-CT	待定	1 台	III 类	CT 部分:最大管电压 140kV 最大管电流 800mA
PET-MR	待定	1 台	/	/

9.1.1.2 SPECT-CT

(1) 设备组成及工作原理

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

SPECT-CT 基本结构包括: 旋转探头装置、电子线路、数据处理和图像重建的计算机系统。ECT 探头绕人体一周, 在旋转时每隔一定角度 (3° 或 6°) 采集一帧图片, 然后经滤波反向投影法或迭代重叠法或傅里叶变化法等方法, 用电子计算机自动处理, 将图像叠加, 重建为该脏器的横断面、冠状面、矢状面或任何需要的不同方位的断层、切面图像, 最后极大提高了诊断的灵敏度和正确性。

SPECT-CT 由 SPECT 和诊断 CT 融合而成, 通过对受检者的一次扫描, 可以达到单独的 CT 无法达到的诊断效果, 完成 SPECT 和 CT 的一站式检查。在 SPECT-CT 诊疗中, CT 机主要起定位和辅助分析作用, 用于提高核素诊断效果。SPECT-CT 主要用于探测人体内放射性核素发射出的 γ 射线并成像, 用于详细分析病灶区的厚度和形态等病征信息。SPECT-CT 即可得出功能代谢显像, 又可得出解剖学显像, 对于病灶定位、病症诊断极具特殊优势, 帮助医生降低误诊率, 使医疗机构整体诊疗水平获得提高。

(2) 工作流程及产污环节

项目 ECT 放射诊断工作流程:

项目核医学科 SPECT-CT 与 PET 的工作流程基本一致, SPECT-CT 诊断项目使用的放射性核素除 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 为自制, 其余均为外购。根据临床诊断需药量, 提前一天向供药单位订购所需放射性药物, 供药单位按照订购要求在约定时间内将放射性药物运送

至项目核医学科指定地点，核医学科安排专人接收，经确认无误完成相关交接手续，并将放射性药物暂放制药室。

项目外购的放射性药物是事先由供药单位分装好，医院不再进行分装，在特殊情况下，需要临时调整放射性药物使用量时才会进行简单分装。核医学科设分装柜，特殊情况下药物的分装操作均在分装柜中进行。

医生开具 SPECT-CT 诊断单，并告知患者诊断过程存在辐射危害，病人通过注射将放射性药物摄入，患者摄入药品后被安排至专用的注射后候诊室候诊，扫描患者需休息 20~30min 后进入 ECT 机房进行扫描诊断，根据西安交通大学医学院第一附属医院现有核医学科 ECT 运行情况，进行 ECT 显像检查的患者不需要留观，显像检查结束后患者向南沿核医学科通道，由单向门出乘坐专用电梯离开核医学科。核医学科 SPECT-CT 放射诊断工作流程及产污环节见图 9-3。

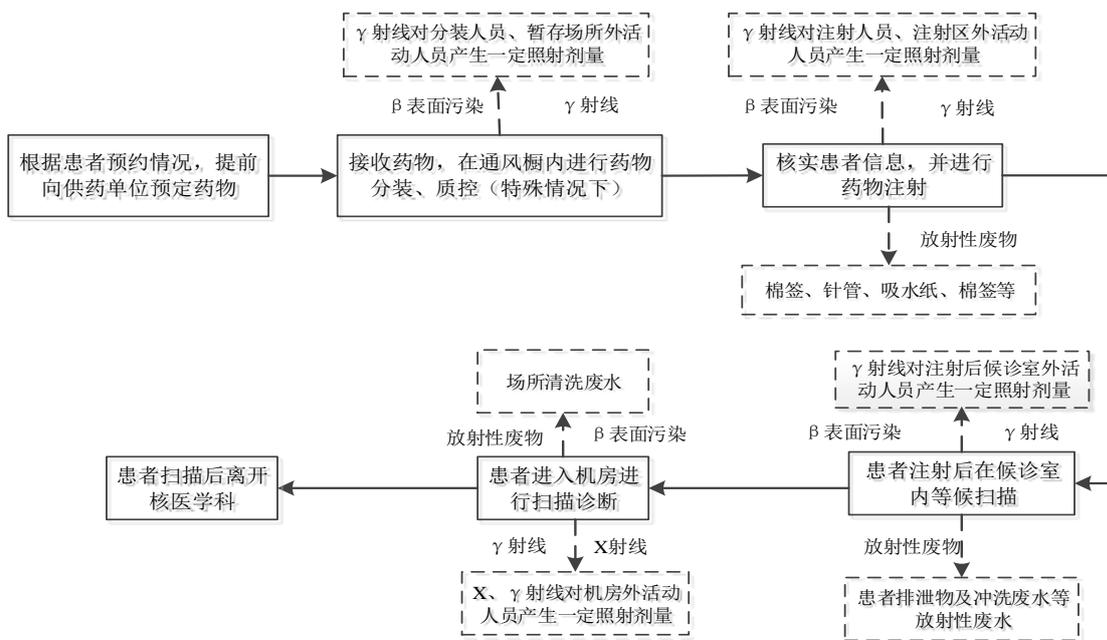


图 9-3 SPECT-CT 放射诊断工作流程及产污环节示意图

ECT 中心设置有气体发生器室，气体发生器室用作肺部疾病诊断，气体发生器工作流程为：在高纯度的氩气中，将外加入的锝(^{99m}Tc)淋洗液自控加热至 2550°C ，为时 15 秒后产生平均 20nm 的颗粒 ^{99m}Tc 气体。病人吸入 ^{99m}Tc 气体后，用 SPECT-CT 进行显像检查，能得到锝气体在小气道和肺泡的分布图，以用于诊断肺部疾病。

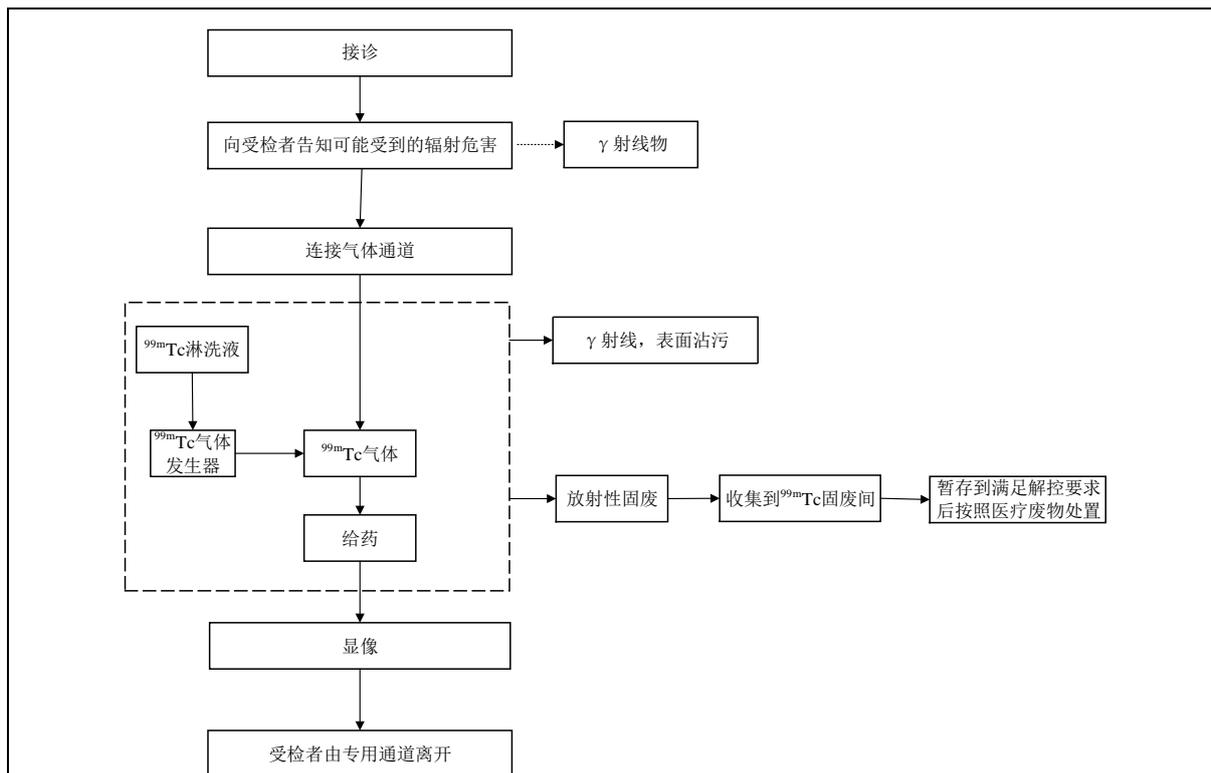


图 9-4 ^{99m}Tc 气体发生器放射诊断工作流程及产污环节示意图

SPECT-CT显像用放射性药物除 ^{99m}Tc 为发生器淋洗外，其余均由有销售资质的供货单位供应，外购药物均为按需求订购的单支成品药，核医学科不对药物进行分装，外购药物药物贮存在专用铅箱，按照预定要求送到医院分装净化间。

SPECT-CT放射诊断过程的污染因子主要是： γ 射线、X射线、 β 表面污染、放射性“三废”等。SPECT-CT拟使用放射性核素相关情况见表 9-4。

表 9-4 SPECT-CT 拟使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量 (Bq)	日最大受检人数 (人)	日最大操作量 (Bq/d)	年最大用量 (Bq/a)
^{99m}Tc	液体	6.02h	IT, β	7.4×10^8	100	7.4×10^{10}	1.85×10^{13}
^{201}Tl	液体	20.4min	EC	7.4×10^7	5	3.7×10^8	9.25×10^{10}
^{123}I	液体	13.2h	EC	1.85×10^8	1	1.85×10^8	4.63×10^{10}
^{51}Cr	液体	27.7d	EC	1.85×10^8	1	1.85×10^8	4.6×10^{10}

注：周工作 5 天，年工作 50 周

(4) 设备参数

项目核医学科 SPECT-CT 设备参数见表 9-5。

表 9-5 项目核医学科 ECT 主要设备参数一览表

设备名称	型号	数量	类别	具体参数
SPECT-CT	待定	2 台	III 类	CT 部分：最大管电压 140kV 最大管电流 500mA

9.1.1.3 ^{131}I

(1) 甲癌治疗

①工作原理

利用特异性抗体作为载体，与能释放 β 射线或 γ 射线的放射性核素结合，借助抗体的靶向作用，与肿瘤组织特异性结合，使肿瘤组织区域聚集大量的放射性核素，并滞留一定时间，放射性核素在衰变过程中发射 β 射线或 γ 射线，通过射线的辐射作用破坏或干扰肿瘤细胞的结构和功能，起到抑制、杀伤或杀死肿瘤细胞的作用。

②治疗流程

由于甲癌患者服药剂量较大，从某种程度上讲，服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，并且患者排泄物也会对环境可能产生一定的影响。因此，甲癌患者通常采用住院治疗，住院时间3~5天，达到出院标准后方可出院，按规定时间全身扫描复查，以观察甲癌残留灶基转移灶的摄碘情况。

甲癌治疗服药治疗前准备阶段：

门诊接诊患者，询问患者病史及临床表现，对患者进行相关辅助检查（一般为甲功检测、甲状腺超声等），医生根据检查结果做出判断并制定相应的治疗方案。

甲癌治疗服药治疗阶段：

医院根据病人预约情况预定采购放射性药物，在约定的时间内由放射性药物供应单位负责将放射性药物运送至核医学科地下一层的分装室，核医学科安排专人接收，经确认无误完成相关交接手续，铅罐暂存在分装仪中。进行放射性治疗用药前，由工作人员提前把储源铅罐中的放射性药物装进自动分装仪中，工作人员在分装室内远程操作，自动分装仪进行药物自动分装。核医学科甲癌病房有4间（8床），每天最多可收治8名患者，一般服用药物约70~100mCi，偶尔出现需要服用大剂量的患者，当服用药物大于等于100mCi则安排单独病房。

甲癌患者通过走廊到达甲癌给药窗口进行服药，服用放射性药物后进入甲癌病房住院，甲癌患者服用 ^{131}I 后禁止外出，仅允许在病房内部自由活动。

病人出院当天需经过辐射检测仪器检测，满足体内放射性活度低于400MBq要求时，方可离开甲癌病房出院。在核医学科病房出口门禁内一侧墙体上设置固定式辐射剂量率监测仪，住院病人住院时间到期，医生语音指导患者站在制定地标进行体表1m处的周围剂量当量率低于 $25\mu\text{Sv/h}$ 后，医生方会通过控制面板确认开门，患者方可离开

治疗区出院。

按规定时间全身扫描复查，了解全身 ^{131}I 摄取情况，以评估治疗效果。

③产污环节

甲癌治疗过程会产生 β 、 γ 射线、 β 表面污染、放射性废水和放射性固体废物，甲癌治疗服药治疗阶段的工作流程详见图9-5。

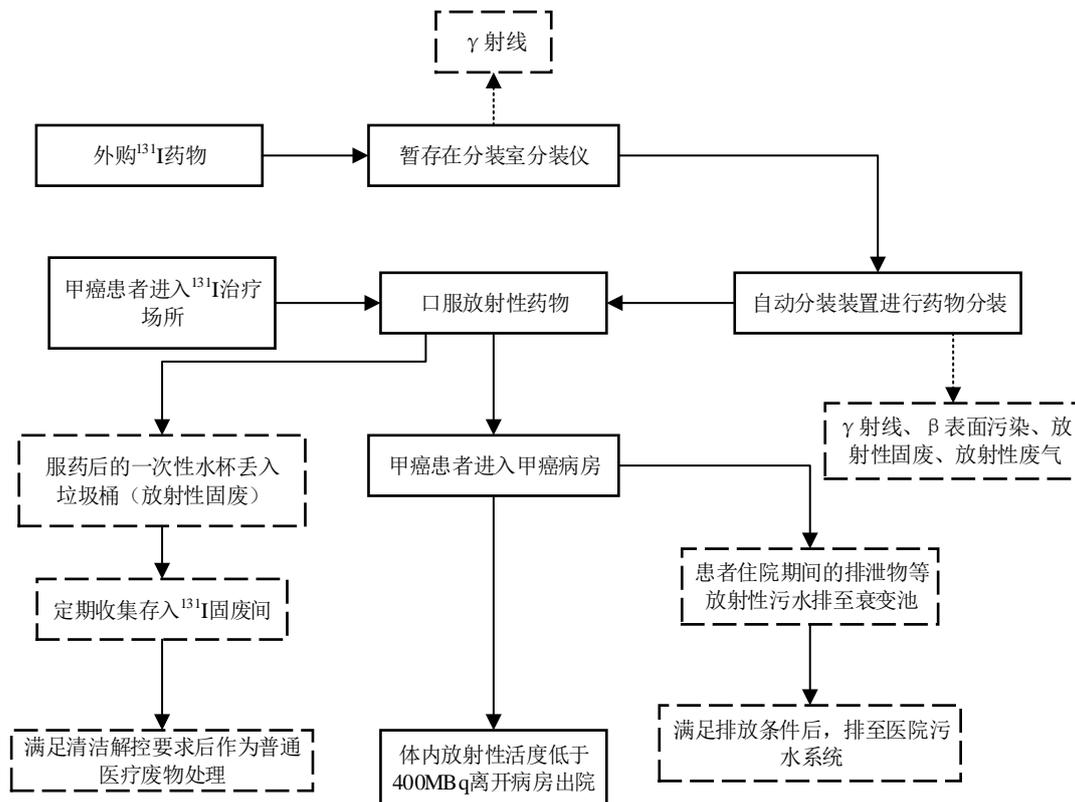


图 9-5 甲癌治疗工作流程及产污环节示意图

(2) 甲亢治疗

①工作原理

甲亢治疗是利用甲状腺具有强大的聚碘功能，口服一定量的 ^{131}I 后，可被甲状腺组织大量摄取。碘 ^{131}I 在衰变过程中，可释放 β 射线和 γ 射线。 β 射线可选择性的破坏甲状腺组织而不影响邻近组织（如甲状旁腺）。甲状腺组织被破坏后逐渐坏死，并纤维化，从而减少甲状腺激素的合成和分泌，达到类似与甲状腺全切除的目的。

②治疗流程

门诊接诊患者，询问患者病史级临床表现，对患者进行相关辅助检查（一般为甲功五项、甲状腺超声、肝肾功能、甲状腺吸碘率等），医生根据检查结果做出判断并制定相应的治疗方案，告知患者治疗前注意事项。

根据临床诊断需药量，提前一天向供药单位订购所需放射性药物。供药单位按照订购要求在约定时间内将放射性药物运送至核医学科地下一层的碘分装室，核医学科安排专人接收，经确认无误完成相关交接手续，铅罐暂存在分装室自动分装仪中。

进行放射性治疗用药前，由工作人员提前把储源铅罐中的放射性药物装进自动分装仪中，工作人员在分装室内远程操作，自动分装仪进行药物自动分装。

甲亢患者经预约问诊后，进入 ^{131}I 服药室口服药物，一般服药后直接离开辐射工作场所，无需留观。

③产污环节

甲亢治疗过程会产生 γ 射线、 β 表面污染和放射性固体废物，项目甲亢治疗的工作流程及产污环节见图9-6。

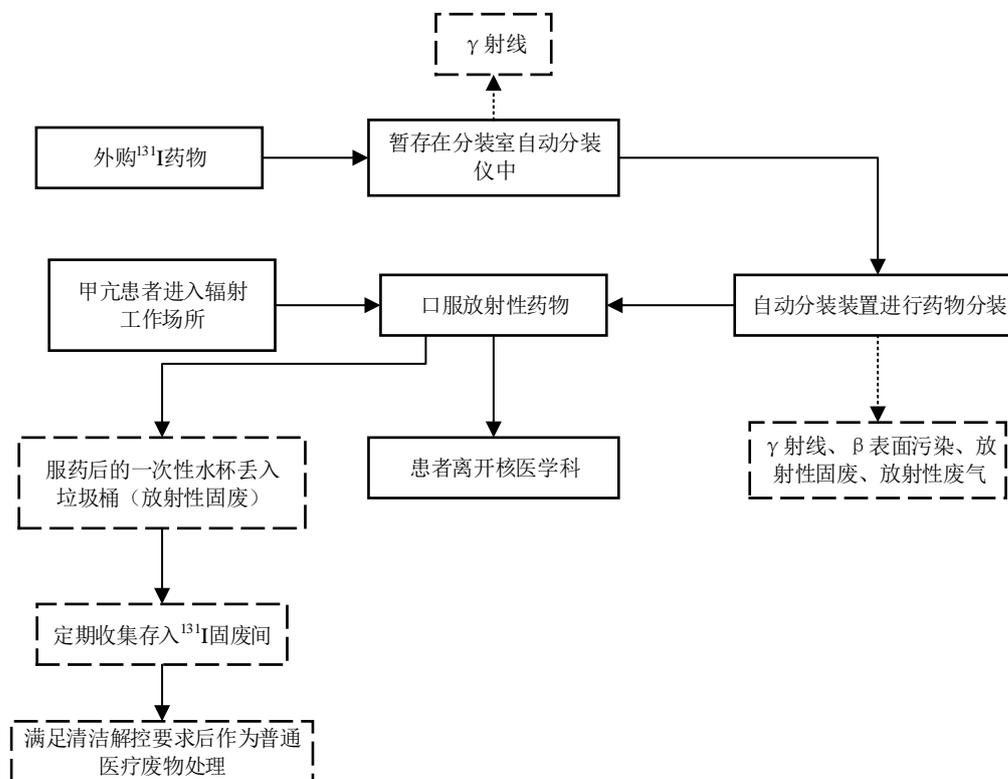


图 9-6 甲亢治疗工作流程及产污环节示意图

(3) 甲状腺吸碘功能测定

①工作原理

碘是甲状腺合成甲状腺激素的主要原料，故 ^{131}I 能被甲状腺摄取和浓聚，甲状腺摄取碘的量和速率与甲状腺的功能有关。 ^{131}I 能发出 γ 射线，用甲状腺功能测定仪可于甲状腺部位测量服 ^{131}I 后不同时间甲状腺的摄 ^{131}I 率，即可得知甲状腺的功能状态。

②测定流程

甲状腺吸碘功能测定主要用于计算 ^{131}I 治疗患者的服药量，以及亚急性甲状腺炎患者的诊断。主要流程包括接诊、向受检者告知危害、病人准备、制备受检者 ^{131}I 溶液用量、给药和服药、休息、甲功测定和结果判定。受检者口服 ^{131}I 4h、6h、24h 后，工作人员，用甲功能测定仪测定甲状腺部位的放射性计数，测量前先测定室内自然本底的计数及标准源计数（将与患者服用的等量 ^{131}I 溶液加入试管中，然后插入专用颈部模型内，测量标准源计数），测量患者甲状腺部位放射性计数，计算甲状腺摄 ^{131}I 率，绘制摄 ^{131}I 率曲线，并注明各时间点的摄 ^{131}I 率。

③产污环节

甲状腺吸碘功能测定流程及产污环节示意图如图9-7所示，甲吸测定过程会产生 β 、 γ 射线、 β 表面污染和放射性固体废物等。

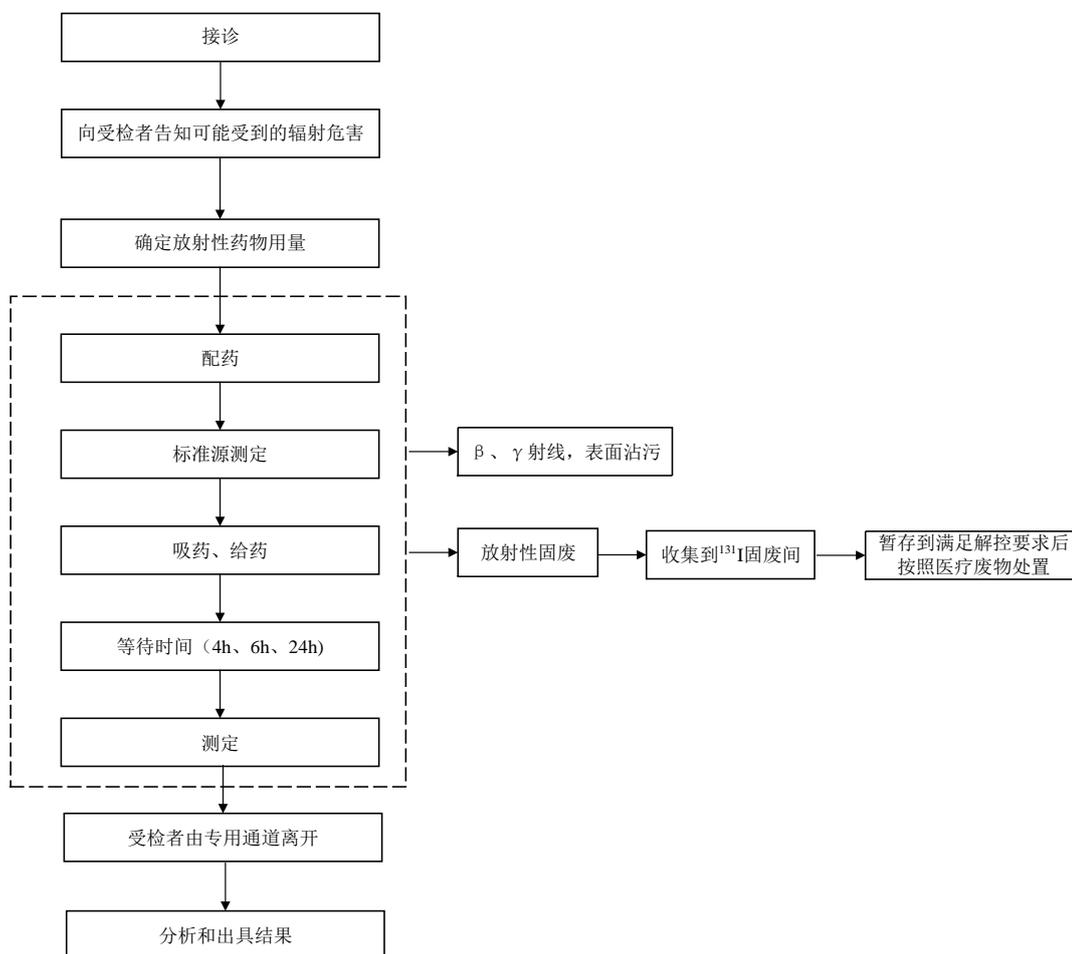


图 9-7 甲状腺吸碘功能测定流程及产污环节示意图

本项目甲状腺吸碘功能测定使用量最大为0.05mCi，分装和给药方式同上述甲亢治疗时的方式。甲状腺功能测定是甲亢治疗流程中治疗前阶段的步骤，甲状腺功能测定是在甲功测定室内利用甲状腺功能测定仪来测定患者甲状腺吸碘率。一般患者需要

服用2~50 μ Ci ^{131}I ，服用药量非常小，服药后患者体外0.5m处辐射剂量率水平约为0.02~0.07 μ Sv/h，与天然环境辐射本底相当，因此甲功测定室不需要进行专门的辐射防护屏蔽设计，甲状腺功能检查后的患者也不需要进行辐射安全管控。

甲亢、甲癌治疗拟使用放射性核素相关情况见表 9-6。

表 9-6 甲亢、甲癌治疗拟使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素用量 (Bq)	日最大受检人数	日最大操作量 (Bq/d)	年最大用量 (Bq/a)	用途
^{131}I	液体	8.02d	β^-	1.85×10^6	200	3.7×10^8	9.25×10^{10}	甲功测定
^{131}I	液体	8.02d	β^-	3.7×10^8	10	3.7×10^9	9.25×10^{11}	甲亢治疗
^{131}I	液体	8.02d	β^-	3.7×10^9	8	2.96×10^{10}	7.4×10^{12}	甲癌治疗

注：周工作 5 天，年工作 50 周

9.1.1.4 注射治疗

本项目治疗用放射性药物包括 ^{177}Lu 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{89}Sr 、 ^{35}S 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{46}Sc 等，其中 ^{177}Lu 注射治疗需患者在注射后需在核医学科住院一段时间，故在核医学科病房中进行治疗， ^{90}Y 注射需在DSA引导下进行，故在介入手术室进行注射，其余放射性药物均在地下一层核医学科专用注射窗口进行注射后离开核医学科。

(1) 核素治疗工作原理

① ^{177}Lu 治疗肠道内分泌癌

^{177}Lu 是一种治疗性核素，性质优良，可以标记较小肽类，靶向性较高，半衰期为161h，有充分时间结合受体，适合运输。 ^{177}Lu 同时发射 β 及 γ 射线， β 射线能量为0.497MeV，在组织中的平均射程为2mm，在对病灶发生辐射作用时对骨髓抑制较轻，比其他治疗核素更安全。同时其较低能量的 γ 射线，可减少对医护人员的辐射。

② ^{153}Sm 治疗骨肿瘤

^{153}Sm 是一种放射性核素，由反应堆制备，通过中子轰击浓缩的 ^{152}Sm 氧化物而产生。 ^{153}Sm 可同时发射 β 和 γ 两种射线平均能量224keV，组织内平均射程0.6mm，最大射程2~3mm； γ 射线平均能量为 103keV。 ^{153}Sm 物理半衰期1.95天，经静脉注射后由血液循环系统快速清除，血液中的半衰期5.5min。

^{153}Sm 趋骨性极低，与骨组织不具备自然亲和力，但其与乙二胺四亚甲基磷酸（EDTMP）螯和后可形成新的复合物，即 ^{153}Sm -EDTMP，从而能获得较高的趋骨性，经静脉注入机体后能迅速与含羟基磷灰石的骨组织紧密结合，在骨转移灶的放射性浓集是正常骨组织的5倍。使得骨转移灶中恶性肿瘤细胞能持续暴露于较高辐射

剂量的 β 射线下，达到局部控制或治疗的目的。 ^{153}Sm 所释放的 β 射线电离性能及生物学作用较强，经不同途径引入体内后适合用于局部病灶的内照射治疗，同时由于其组织内射程较短，对病灶周围正常组织的辐射损伤较小，有利于局部治疗时的剂量控制。

③ ^{186}Re 治疗骨肿瘤

^{186}Re 是一种极具潜力的治疗用放射性核素，具有优良的核性质：半衰期为90.6h， β 粒子能量中等（最大能量为1.07MeV），组织中平均射程约3.7mm，杀伤力在300~400个细胞直径范围。

④ ^{188}Re 治疗骨关节炎

^{188}Re 半衰期16.9h，最大能发射2.12MeV的 β 射线， ^{186}Re 发射的 β 射线能量式中，组织内照射射程短，最大组织射程11mm，平均射程为3.9mm，对周围组织损伤小，特别适用于内照射治疗。

⑤ ^{211}At 治疗肿瘤

^{211}At 半衰期7.2h，平均每衰变一次发射一个 α 粒子和6.3个俄歇电子，是一种新型的 α 射线的靶向同位素治疗药物。就放射治疗而言它的 α 粒子在组织中射程短（55~80 μm ），仅相当于6~8个细胞范围。 ^{211}At 对周围正常组织损伤很小，是鳞状上皮细胞癌目前首选的肿瘤标志物，灵敏度可达60%，特异性可达95%，它对非小细胞肺癌的早期诊断、疗效监测和预后判断均有重要意义。

⑥ ^{89}Sr 治疗骨肿瘤

核素 ^{89}Sr 是利用机体内能高度选择地聚集在病变组织的化合物作为载体，将放射性核素运送到病变组织或细胞，使放射性核素与病变细胞紧密结合。根据来自源的辐射强度随距离平方值增长而减小的原理，使得辐射剂量主要集中在病灶内，而在比较远处的正常健康细胞得到较低的、不会引起损伤的剂量。

^{89}Sr 是钙族元素，为一种亲骨性放射性核素，进入体内后同钙一样参加骨矿物质的代谢过程，静脉给药后，恶性肿瘤骨转移病灶内的摄取率大于正常骨组织的2~25倍，并滞留在癌灶中，发射平均能量为1.463MeV的 β 射线，半衰期为50.5天，其辐射效应杀伤癌细胞，缩小病灶，起到良好的镇痛作用。

⑦ ^{35}S 治疗肿瘤

^{35}S 发出的 β 射线最大能量为0.167MeV，平均能量为0.0488MeV，半衰期87.44d，

用于脑胶质瘤治疗。

⑧²²³Ra治疗骨肿瘤

²²³Ra是一种放射性核素，物理半衰期为11.4天，能发射 α 射线，同时还能发射 β 射线和 γ 射线。其中 α 射线占 95.3%（能量范围5~7.5MeV）， α 粒子在组织中射程仅43微米。

²²³Ra在内照射时具有极强的细胞毒性，对肿瘤细胞具有较强的杀灭作用，而其短射程对正常组织影响较小，并能够模拟钙的作用，并与羟基磷灰石形成复合物以加快一些部位骨质更新，例如骨转移灶部位。这种强有力的药物的 α 粒子的穿透范围短，不会伤害附近的健康组织和关键的骨髓。对工作人员和患者周围公众外照射影响轻。

⑨²²⁵Ac治疗神经内分泌肿瘤和前列腺癌

²²⁵Ac（ α 放射性核素）在内照射时具有极强的细胞毒性，对肿瘤细胞具有较强的杀灭作用，而其短射程对正常组织影响较小（ α 粒子的射程仅47微米），半衰期10d，衰变时产生5.830MeV的 α 射线，此外，也有较低几率产生0.099 MeV的 γ 射线。

⑩²²⁷Th治疗肿瘤

²²⁷Th（ α 放射性核素）可以在体内和体外高效地杀灭癌细胞，典型 α 放射体的辐射范围通常小于100微米，等于几个细胞的直径，衰变时产生6.146MeV的 α 射线，此外，也有较低几率产生0.236MeV的 γ 射线。

⑪⁴⁶Sc治疗肿瘤

⁴⁶Sc发出的 β 射线最大能量为1.48MeV，半衰期83.8d，具有作为临床药物和诊断试剂的潜力，可用于癌症靶向治疗。

⑫⁹⁰Y治疗肿瘤

⁹⁰Y 半衰期为 64.2h，是通过化学方法从 Sr-90 中提取，将其离子键结合在树脂微球上制成微小颗粒，药物为悬浮液形式，通过选择性动脉插管的方法将载有 ⁹⁰Y 放射性核素的颗粒注入肿瘤血管，使 ⁹⁰Y 滞留于肿瘤组织内达到足够剂量杀死肿瘤细胞，此微球具有不能通过毛细血管网，且不被巨噬细胞所吞噬，生物相容性好、无毒、核素衰变基本完成后微球开始生物降解而不再堵塞血管的特点。⁹⁰Y 发出的 β 射线能量为 2.284MeV，在人体组织中的最大射程为 11mm，平均射程 2.5mm。

⁹⁰Y 树脂微球是一款靶向放射治疗产品，由含有钇的生物相容性树脂微球组成，

直径为 20-60 μm 。该产品被广泛应用于肿瘤的选择性体内放射治疗（SIRT）中，即在肝脏病灶处，通过局部的大剂量高能量 β 辐射起到杀死癌细胞的目的，同时不伤害肝脏组织。被广泛用于手术治疗不可切除的肿瘤。

(2) 工作流程

①注射窗口注射治疗药物工作流程

门诊诊断：患者在门诊经过诊断后，医生临床诊断确定患者所需药物的使用量，并告知患者可能受到的辐射。

订药：本项目注射用药物均为外购药物，为单支成品药物，工作人员根据患者临床诊断所需药物的使用量，提前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，医院核医学科安排专人接收放射性核素，药物货包通过注射室北侧的传药窗进入注射室，在经确认无误，并完成相关交接、登记手续后，放入完级净化制药间。患者在治疗前进入核医学科诊室，医生告知患者注射前后注意事项，并要求患者在注射前上洗手间。患者进入专用注射治疗窗口，由医护人员在注射窗的屏蔽下为病人注射，患者注射后离开核医学科。含有放射性药物注射后的残留液的注射器以及处理含放射性核素的其他废液的吸水垫等废物，收集在专用的固体废物衰变桶内。具体工作流程及产污环节图9-8。

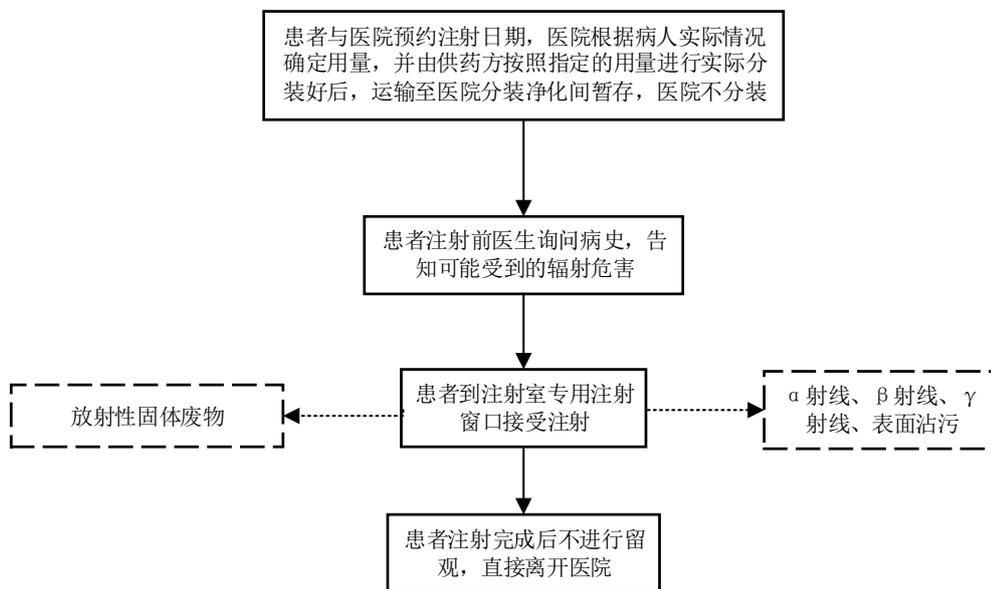


图9-8 注射窗口注射的放射性药物的工艺流程及产污环节

②⁹⁰Y介入注射药物工艺流程及产污环节

⁹⁰Y 微球以 DSA 介入的形式开展治疗，微球通过导管经由肝总动脉、右肝动脉或

左肝动脉注射引导到肝脏肿瘤中，在输送到肝动脉后，微球被选择性输送并停留在肿瘤的微血管中，发挥局部放射治疗。

^{90}Y 介入治疗工艺流程分为两个阶段：

第一阶段：

在治疗前 7-14 天需使用锝标记聚合白蛋白 ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 注入肝动脉，以评估患者是否适合此项治疗，根据医院提供的资料，每个患者使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的最大用量为 $3.7\times 10^8\text{Bq}$ ($10\text{mCi/人}\cdot\text{次}$)， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 在地下一层万级净化制药间进行药物存储、分装和活度测量工作，在 DSA 手术室注射。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 是一种对人体无害的诊断用蛋白，分子大小近似 ^{90}Y 微球体，可模拟 ^{90}Y 微球在体内的分布状态，确保 ^{90}Y 微球会停驻在肝脏，而非其他器官，不会造成其他器官的放射性伤害。仅重点描述使用的具体步骤（见图 9-9），描述如下：

- 1) 前一天住院并填妥血管摄影同意书，通知禁食 6-8h，排空尿液；
- 2) 送 DSA 机房做血管造影，放置导管并栓塞胃肠侧枝血管，用导管注入 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进入肝脏；
- 3) 然后病人进入核医学科 ECT1 机房进行显像扫描，了解 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 在人体分布情况；
- 4) 在 ECT1 显像扫描完成后，患者可通过患者通道离开。

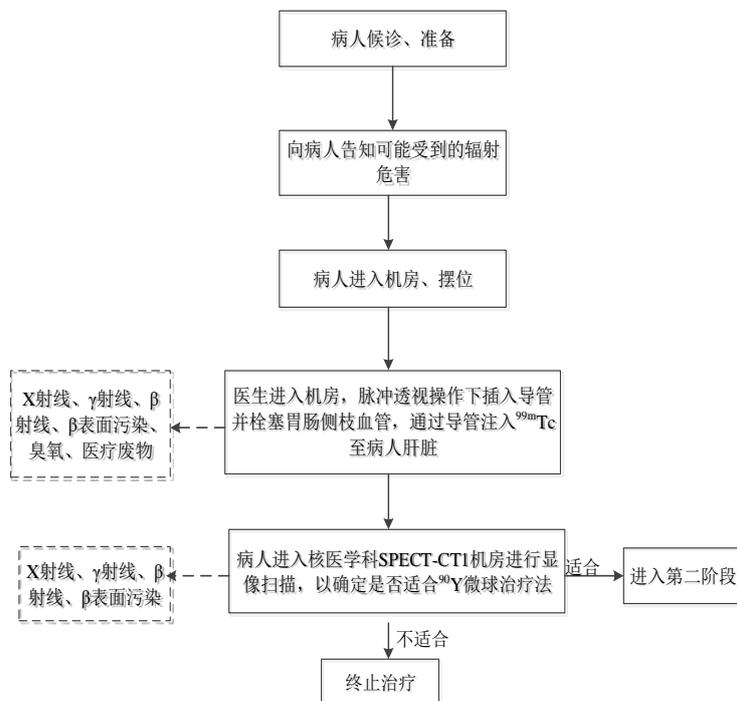


图 9-9 ^{90}Y 微球治疗第一阶段操作流程及产污环节图

第二阶段:

在第一阶段确定病人适合 ^{90}Y 微球治疗后, 7-10d 进行 ^{90}Y 微球输注, 根据医院提供的资料, 每个患者使用 ^{90}Y 的最大用量为 $3.7 \times 10^9 \text{Bq}$ ($100 \text{mCi/人} \cdot \text{次}$), ^{90}Y 在地下一层万级净化制药间进行药物存储、分装和活度测量工作, 在三层 DSA 手术室注射。具体步骤见图 9-10, 描述如下:

- 1) 前一天填写妥血管摄影同意书, 通知禁食 6-8h, 排空尿液;
- 2) 送 DSA 机房做血管造影, 放置导管并栓塞胃肠侧枝血管, 医生用导管注入 ^{90}Y 树脂微球;
- 3) 接受手术后的病人进入 ECT1 机房进行显像扫描 ^{90}Y 与机体组织相互作用产生的韧致辐射信号, 再次确定肝脏中微球的留置区域;
- 4) 治疗结束后将病人送至核医学科专用病房进行医学留观。

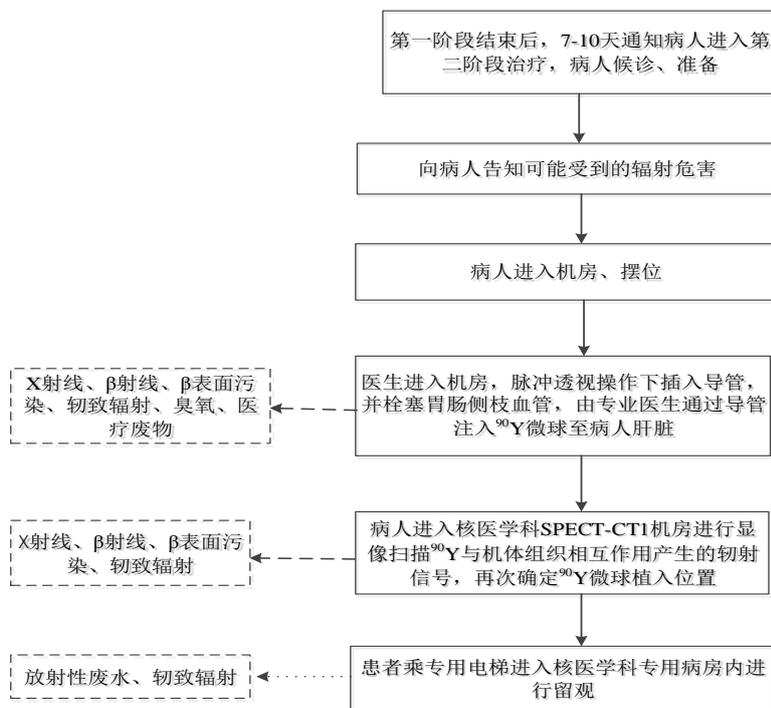


图 9-10 ^{90}Y 微球治疗第二阶段操作流程及产污环节图

^{90}Y 树脂微球总活度测量和抽取

在分装室先将无菌 V 瓶置于 15mm 有机玻璃 V 架上。工作人员手持内置 ^{90}Y 树脂微球西林瓶的防护罐 (未打开) 进行摇晃, 持续时间大约 30s/例。摇匀后迅速打开防护罐盖子, 使用长柄镊子夹取含 ^{90}Y 树脂微球西林瓶放置在活度计测井内, 测量 ^{90}Y 树脂微球总活度并进行记录; 将使用注射器 (配有 15mm 有机玻璃注射器防护套) 扎入西林瓶底部, 快速抽压数次, 使西林瓶中的 ^{90}Y 树脂微球混合均匀, 抽取一定量 ^{90}Y

树脂微球注入 V 瓶，将剩余放射性药物放置在活度计测井中进行测量，直至抽取完成患者所需的剂量为止；注入结束后，拔出注射器并装好针管，将 V 瓶顶部塞盖好。



图 9-11 ^{90}Y 树脂微球总活度测量和抽取示意图

^{90}Y 介入注射

^{90}Y 树脂微球介入注射具体步骤描述如下：将测量完活度的含 ^{90}Y 树脂微球的 V 瓶放置于注射防护盒内，连接将输液管、三通旋阀、无菌水或者 5%右旋糖苷和造影剂等辅助材料；装配完毕后，先手动压注射防护盒外 B 口注射器注入造影剂，复查导管位置；其次使用 B 口另一个注射器注入无菌水或者 5%右旋糖苷冲洗导管，避免导管内与 ^{90}Y 树脂微球混合。通过 D 口脉冲注入无菌水使 V 瓶的微球回旋形成悬浮物，通过 V 瓶 C 口将 ^{90}Y 树脂微球经连接病人体内的导管 A 口压入患者体内，直达病灶；将微球分小剂量多次注入，过程大概持续 20min；通过 B 口无菌水或者 5%右旋糖苷注入导管，完成后将导管从病人体内取出，将注射器导管等放置于放射性废物桶内。

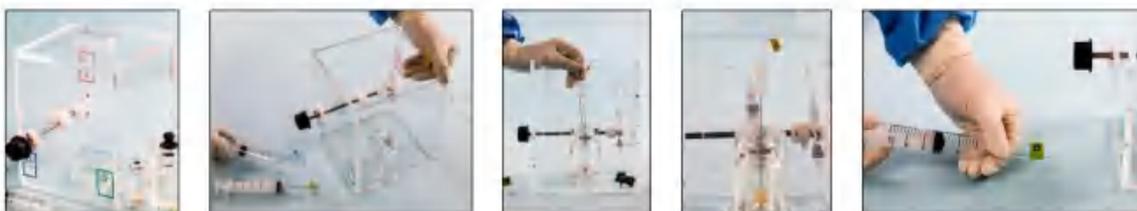


图 9-12 ^{90}Y 树脂微球介入注射示意图

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的分装、介入注射

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 经分装橱分装后，送往介入手术室进行注射，在介入手术中对患者的皮肤施行局部麻醉，使用经皮穿刺技术执行 HAG；将一条细小的导管插入腹股沟内的动脉中，并逆行进入肝动脉；在选择性地将血管造影导管置入肝动脉后，将 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 通过导管注入肝脏。然后取出导管。

③ ^{177}Lu 注射治疗

使用核素 ^{177}Lu 开展前列腺癌、神经内分泌癌治疗，工作人员根据临床诊断所需药物的使用量，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 ^{177}Lu 药物送入核医学科万级净化制

药间，本项目 ^{177}Lu 药品为单支成品药物，无需分装，使用时由医护人员在病房内为患者注射。 ^{177}Lu 患者一般住院1天，患者出院要求参照甲癌，住院病人住院时间到期经医生同意后，通过监测体内放射性活度确认满足降低至400MBq要求（辐射剂量率监测仪监测患者体表1m 处的周围剂量当量率低于 $25\mu\text{Sv/h}$ 即可满足体内放射性活度低于 400MBq），方可离开病区出院。

^{177}Lu 治疗项目工作流程及产污环节见图9-13。

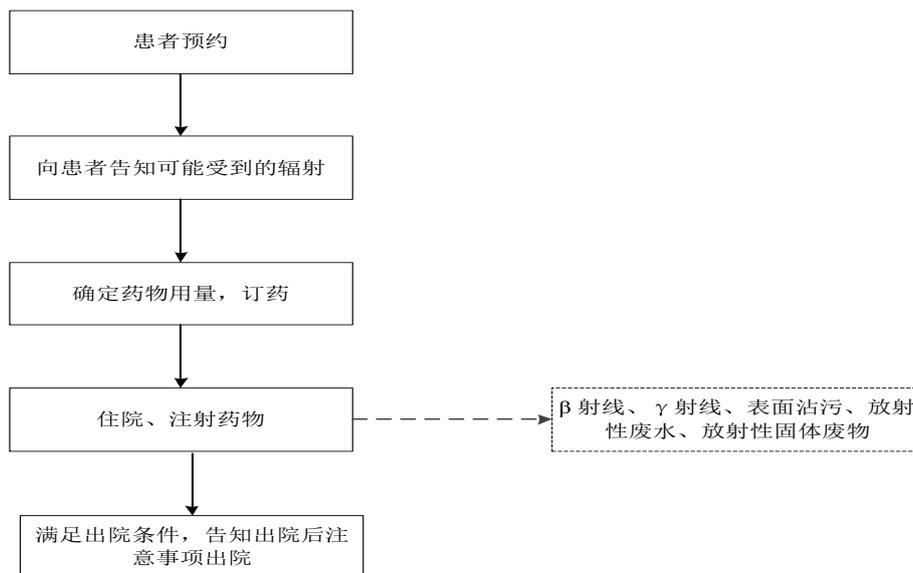


图9-13 ^{177}Lu 治疗项目工作流程及产污环节

放射性核素注射治疗拟使用放射性核素相关情况见表 9-7，所有注射用放射性核素均为外购。

表 9-7 放射性核素注射治疗拟使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量 (Bq)	日最大受检人数	日最大操作量 (Bq/d)	年最大用量 (Bq/a)
^{177}Lu	液态	6.647h	β^-	$3.70\text{E}+9$	1	$3.70\text{E}+9$	$9.25\text{E}+11$
^{35}S	液态	87.51d	β^-	$3.70\text{E}+8$	1	$3.70\text{E}+8$	$9.25\text{E}+10$
^{46}Sc	液态	83.78d	β^-	$3.70\text{E}+8$	1	$3.70\text{E}+8$	$9.25\text{E}+10$
^{89}Sr	液态	50.53d	β^-	$1.85\text{E}+8$	4	$7.40\text{E}+8$	$1.85\text{E}+11$
^{153}Sm	液态	46.50h	β^-	$9.25\text{E}+8$	4	$3.70\text{E}+9$	$9.25\text{E}+11$
^{186}Re	液态	3.7183d	β^-	$3.70\text{E}+9$	1	$3.70\text{E}+9$	$9.25\text{E}+11$
^{188}Re	液态	17.004h	β^-	$1.85\text{E}+9$	1	$1.85\text{E}+9$	$4.63\text{E}+11$
^{211}At	液态	7.214h	α	$7.40\text{E}+8$	1	$7.40\text{E}+8$	$1.85\text{E}+11$
^{223}Ra	液态	11.43d	α	$1.11\text{E}+7$	10	$1.11\text{E}+8$	$2.78\text{E}+10$
^{225}Ac	液态	10.0d	α	$1.11\text{E}+7$	10	$1.11\text{E}+8$	$2.78\text{E}+10$
^{227}Th	液态	18.68d	α	$1.11\text{E}+7$	10	$1.11\text{E}+8$	$2.78\text{E}+10$
^{90}Y	液态	2.67d	β^-	$3.70\text{E}+9$	1	$3.70\text{E}+9$	$9.25\text{E}+11$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	液态	6.02h	IT, β^-	$3.70\text{E}+8$	1	$3.70\text{E}+8$	$9.25\text{E}+10$

9.1.1.5 敷贴治疗

本项目拟开展的敷贴治疗采用 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器， ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器属于密封放射

源。

(1) 工作原理

^{90}Sr 敷贴器是利用 ^{90}Sr 衰变成 ^{90}Y ， ^{90}Y 衰变发出能量为 2.2MeV 的 β 射线， β 射线具有较强的电离能力，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。由于 ^{90}Sr 半衰期长，使用过程中只需半年校正衰变一次。本项目所用的 ^{90}Sr 敷贴器（放射源）均需外购，作为放射源管理，平时贮存在敷贴室内的贮源箱中。

(2) 工作流程及产污环节

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 - ^{90}Y 敷贴器是固定敷贴器，一般有圆形和方形，操作是由医生首先用橡皮圈在疤痕疙瘩附近固定遮盖，凸出疤痕位置，然后按下敷贴器。治疗完毕，将敷贴器放回贮源箱。 ^{90}Sr 敷贴治疗工艺流程及产污环节见图 9-14。

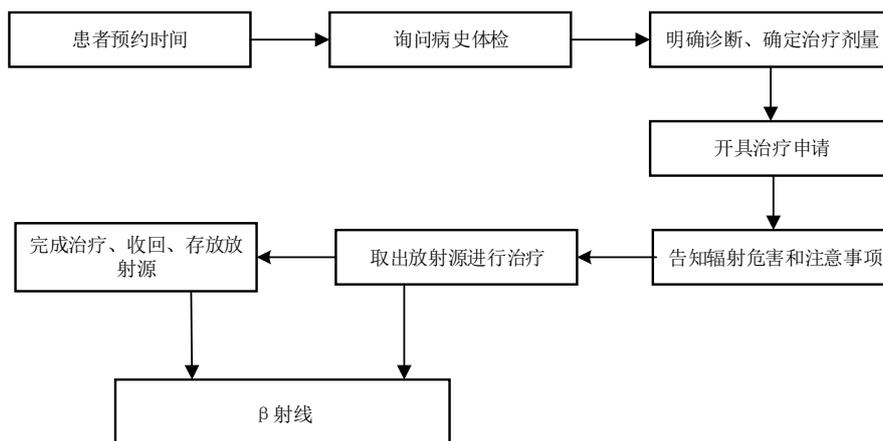


图 9-14 ^{90}Sr 敷贴治疗工艺流程及产污环节

(3) 源项分析

^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器是使用 ^{90}Sr 作为辐射源， ^{90}Sr 半衰期 28.5 年，发射纯 β 射线，最大能量 0.546MeV，平均能量 0.2MeV，组织内射程仅为 2~3mm，但子体 ^{90}Y 半衰期 64.2 小时， β 射线能量 2.274MeV，组织内最大射程为 12.9mm。 ^{90}Sr 敷贴器的污染因子包括源活性物质、 β 射线和韧致辐射。为减轻韧致辐射影响，配置了专用的贮源容器，采取了内层低原子序数材料的铝和外层重金属材料的铅两层屏蔽设计。本评价项目拟使用的 ^{90}Sr 敷贴源活度为 $1.85 \times 10^9 \text{Bq}$ 。根据《关于发布放射源分类办法的公告》（国家环境保护总局公告 2005 年第 62 号），该放射源属于 V 类放射源。

(4) 工作负荷

该敷贴治疗项目正式开展后，预计每天治疗病人 10 人。

9.1.1.6 粒籽植入

(1) 粒籽植入工作原理

粒籽源植入术，是一种用于近距离主治间植入的内放射治疗技术，在 CT、B 超等影像学引导下，通过手术或微创方式把放射性粒籽植入到肿瘤部位或相关的淋巴系统内。由于射线能在局部连续不间断的作用于肿瘤，使得任何进入活跃期的肿瘤细胞都被射线抑制和杀灭，从而使局部肿瘤得到最有效的控制。本项目拟使用的粒籽源为 ^{125}I 、 ^{166}Ho 和 ^{103}Pd 。

^{125}I 释放能量为 27.4keV~31.4 keV 的 X 射线以及 35.5 keV 的 γ 射线，组织穿透能力约为 1.5cm。

^{166}Ho 可以发出高能 β 射线，发射能量为 γ 射线能量为 81keV，组织最大穿透厚度为 8.7mm，平均 2.2mm。

^{103}Pd 平均能量为 20.74keV，发射的管子能量较低，组织间穿透距离 1.7cm。

(2) 工作流程

提前预定的 ^{125}I 、 ^{166}Ho 和 ^{103}Pd 粒籽源被经营单位（要有从事放射性药品经营许可证）根据需求分装后由专人送到万级净化制药间保险箱暂存，医院不进行粒籽源的装枪、消毒工作，负责接收人员核对、签收并作详细登记，然后贮存在专用的保险柜内，为患者进行植入手术时将粒籽源转移到 ECT1 机房。粒籽植入流程及产污环节示意图如图 9-15 所示。

粒籽源被送入万级净化制药间保险箱暂存，一般当日进行植入手术，植入手术过程中产生 γ 射线，为避免操作不当粒籽源未能植入患处，厂家每次装枪会考率额外的粒籽源，手术过程中会产生少量废弃粒籽源，该部分粒籽源贮存在专用铅箱中同植入枪返回厂家。

拟使用粒籽源相关情况见表 9-8。

表 9-8 粒籽源治疗拟使用粒籽源相关情况一览表

核素名称	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量 (Bq)	日最大受检人数	日最大操作量 (Bq/d)	年最大用量 (Bq/a)
^{125}I	固态	59.7d	EC	3.70×10^9	4	1.48×10^{10}	3.7×10^{12}
^{166}Ho	固态	16.9d	β^-	3.70×10^9	1	3.70×10^9	9.25×10^{11}
^{103}Pd	固态	17d	EC	3.70×10^9	1	3.70×10^9	9.25×10^{11}

注：周工作 5 天，年工作 50 周

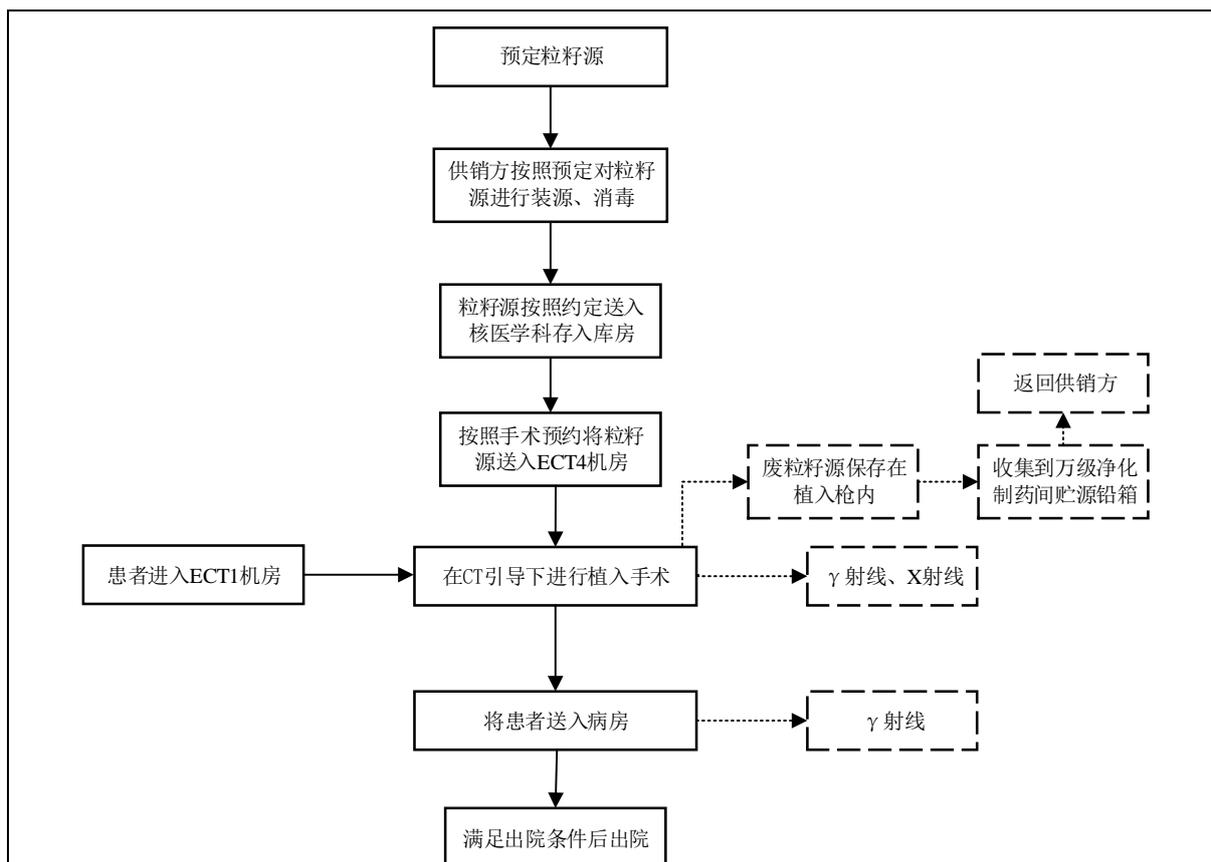


图9-15 粒籽源操作流程及产污环节示意图

9.1.1.7 ^{99m}Tc 药物制备环节的工作原理及工艺流程

(1) 工作原理

本项目拟使用从供货商处购置的钼锝 (^{99}Mo - ^{99m}Tc) 发生器进行淋洗、分装、标记得到 ^{99m}Tc 药物。 ^{99m}Tc 核素一般用于 SPECT 进行功能代谢显像，通过病灶部位对药物的摄取了解病灶功能代谢状态，从而对疾病正确诊断。 ^{99m}Tc 为纯 γ 光子发射体，方便易得，几乎可用于人体各重要脏器的形态和功能显像，是显像检查中最常用的放射性核素。目前全世界应用的显像药物中， ^{99m}Tc 及其标记的化合物占 80% 以上，广泛用于心、脑、肾、骨、肺等多种脏器疾患的显像检查。

钼锝 (^{99}Mo - ^{99m}Tc) 发生器是一种器是一种内含母体核素 ^{99}Mo ，能产生子体核素 ^{99m}Tc 的装置。其具体工作原理为： ^{99}Mo 以钼酸铵的形式溶解于氨水中，再转化到 0.01mol/L 盐酸体系，pH=3~3.5 条件下， ^{99}Mo 以 $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ 吸附在 Al_2O_3 色层柱上， $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ 衰变时产生 ^{99m}Tc ， ^{99m}Tc 以 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 的形式存在，由于两者电荷不同，可利用 Al_2O_3 对其吸附能力差异，通过生理盐水将 ^{99m}Tc 淋洗下来，而母体仍留在发生器内。钼锝发生器的结构示意图及外观见图 9-16，钼锝 (^{99}Mo - ^{99m}Tc) 发生器详细的衰变过程见图 9-17。

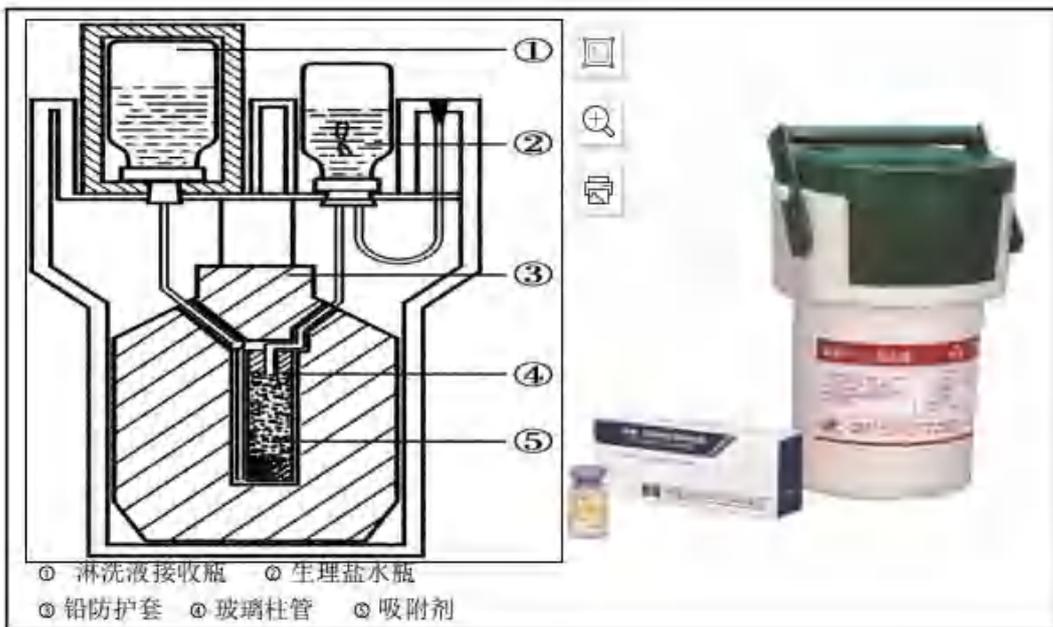


图 9-16 钼铯发生器的结构示意及常见外观图

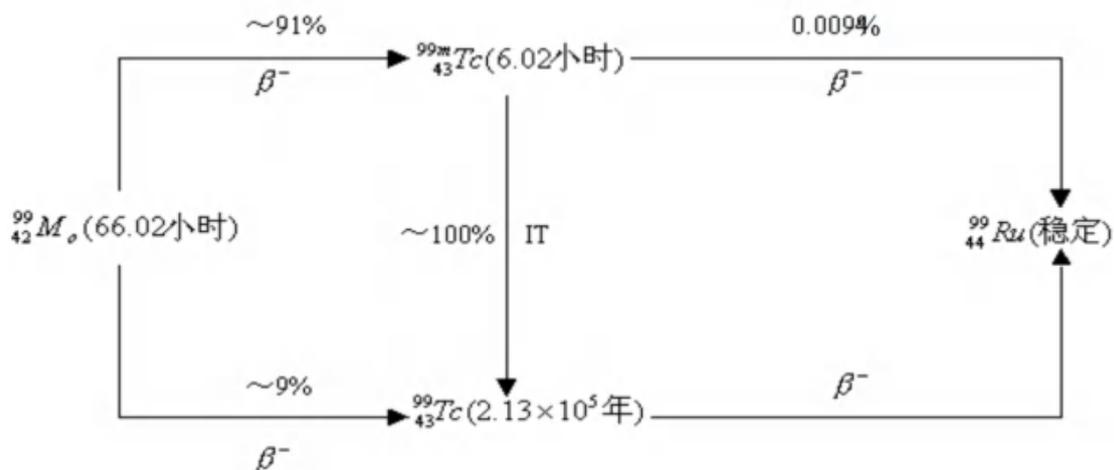


图 9-17 ^{99}Mo 衰变详细过程图

(2) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射性显像剂的生产 and 分装工艺流程及污染分析

放射性工作人员根据医院每天需注射患者的量，定量淋洗出 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记的溶液，经标记、分装、质控和制成针剂，供病人静脉注射。本项目 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 生产和分装工艺流程如下：

1) 原料的采购及入库暂存

本项目 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器拟从具备发生器销售资质的公司直接购买并由该公司负责运输医院内。医院计划每周购买一批，每批根据订单量采购 1 只发生器，拟购的单个 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器的最大活度为 $1.11 \times 10^{11} \text{Bq}$ (3Ci)，发生器外自带 10mmPb 铅防护。采购的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器铅罐由供应商经物流通道送至医院核医学科擦拭

干净后送入淋洗间内暂存。

2) 淋洗、分装前准备

放射性工作人员汇总 ^{99m}Tc 注射所需剂量（使用时间与活度），制作标签（载明时间与活度），逐一贴在外包装防护套上，经物流通道净化进入淋洗间。

3) 淋洗、标记、分装、质检工作

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

活度测量：上一步制得的淋洗液在万级净化制药间内用活度计进行测量，辐射工作人员用注射器吸取少量淋洗液，垂直放入活度计井中，测量其放射性活度，得出该瓶淋洗液的比活度。

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

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

质量检验：批量生产结束时，会保留一部分样品做强制性的质控测试。经过标记、分装的注射液（约 10mCi 左右，实际试验使用活度约为 1mCi ），使用 6mm 厚的防护铅罐经传递窗进入万级净化制药间西侧质控室，在检测通风柜内（正面底面屏蔽 $\geq 10\text{mmPb}$ ，其余四面 $\geq 5\text{mmPb}$ ）对淋洗液的 pH 值、放射化学纯度、放射性活度或浓度等项目进行质量检验。质检时通风柜内打开铅罐，蘸取少量药品点板，再将涂有少量放射性药品的测试板放入设备中自动检测。测试板上涂有的放射性药物极少，对工作人员的辐射影响基本可以忽略。点板完成后铅罐会盖上，放在通风柜中自然衰变，待药物完全衰变后，将药物取出。

4) 装包

质检合格后，采用专用外包装防护套（ 5mmPb ）包装的针剂放入不锈钢包装箱

内（6mmPb），每个转运箱最多存放 8 支注射器，由传递窗口送入注射间。

5) 给药：患者给药采用注射方式进行，工作人员（作好防护措施，穿铅衣、戴铅眼镜等）从不锈钢包装箱内取出带包装防护套的注射器，在注射窗口（10mmPb 当量）操作台进行注射。

注射完药物后进入注射后等待室等待约半小时后进入 ECT 机房显像检查，期间禁止人员陪护，病人不得离开注射后候诊室，产污环节见图 9-18。

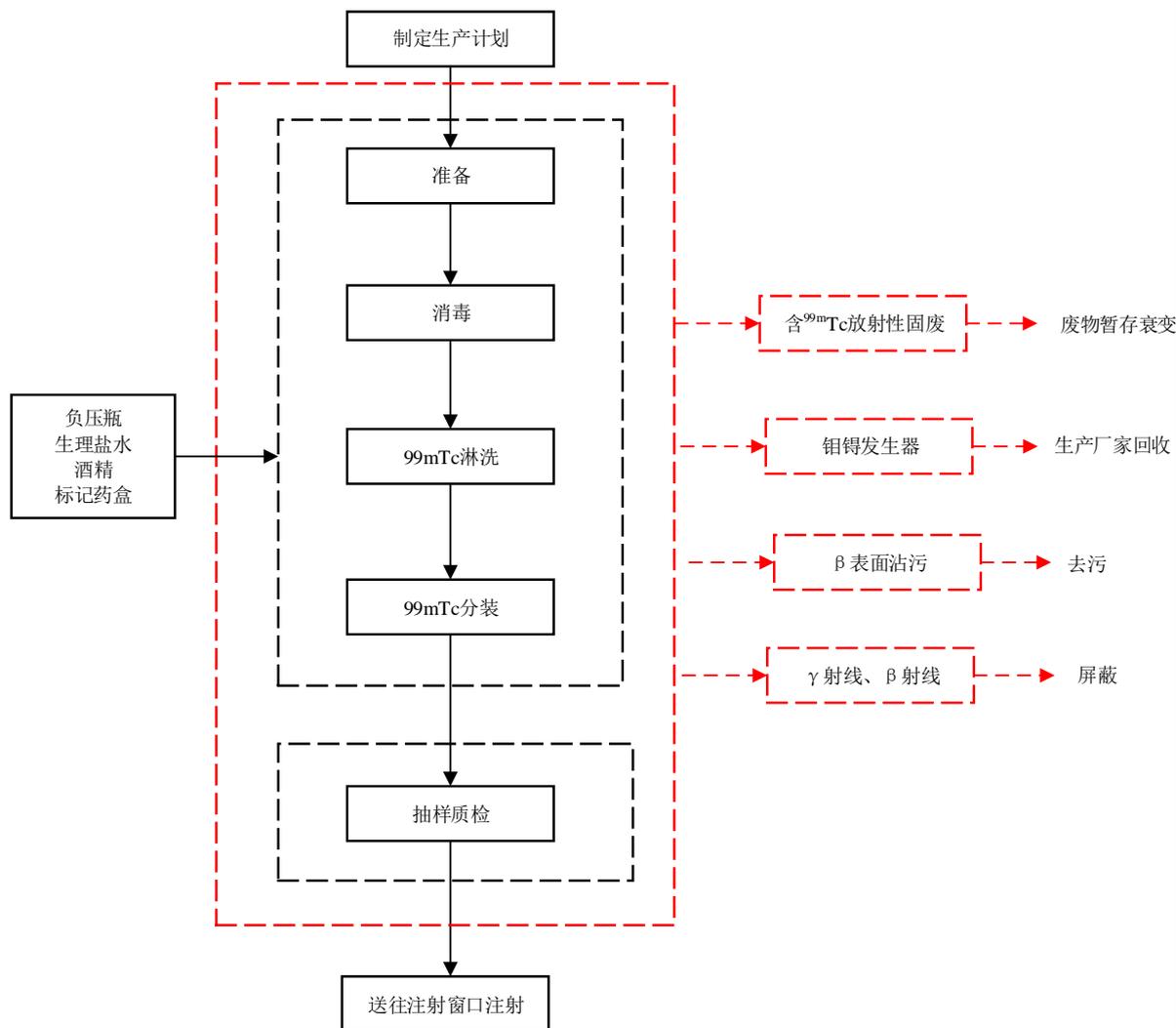


图 9-18 ^{99m}Tc 放射性药物生产工艺流程及产污节点图

达到使用寿命的 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器暂存于固废间，根据数量每半年或一年由供货商回收一次。

(3) 工作负荷

公司计划投产后每周购买一批钼铯发生器，每批根据订单量采购 1~3 只发生器，拟购的单个 ⁹⁹Mo-^{99m}Tc 发生器的最大活度为 $1.11 \times 10^{11} \text{Bq}$ (3Ci) ⁹⁹Mo 的日最大操作量为 $1.11 \times 10^{11} \text{Bq}$ ，每年使用 50 个钼铯发生器，则 ⁹⁹Mo 的年最大用量为 5.55×1

0^{12}Bq ($1.11 \times 10^{11}\text{Bq} \times 50$)。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 通过钼锝发生器淋洗制备，根据厂家相关资料可知钼锝发生器的淋洗效率为 80%，则第一次淋洗 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的量为 $8.88 \times 10^{10}\text{Bq}$ (2400mCi ，满足本项目每天病人注射量 1400mCi 的需求)。

(4) 污染源项

由图 9-15 可见， ^{99}Mo 的衰变方式是 β^- ，衰变时除发射 β^- 射线外还发射 γ 射线， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的主要衰变方式是同质异能跃迁，同时发射 γ 射线。

由于淋洗时间很短，一般只需三分钟左右，因此， ^{99}Tc 在洗脱液中放射性贡献极小，所以用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记液中 ^{99}Tc 的放射性可以忽略不计。另外，由于 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器属于色谱柱型发生器，用三氧化二铝作吸附柱，三氧化二铝对母体核素 ^{99}Mo 有很强的亲和力，子体核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 则几乎不被吸收，加上淋洗液用生理盐水，因此，仅有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 被洗出，从而保证放射性核素的纯度。

由此可见，用钼锝 (^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$) 发生器淋洗、标记等操作对工作环境造成的影响主要是 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器本身，洗脱出来的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记溶液对工作人员的 γ 外照射， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 洗脱液操作过程中对工作台面、地面等造成表面污染。

固态放射性废物主要是经淋洗后衰变到无使用价值的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器、工作人员操作戴的手套，沾有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记液的分装瓶等，废弃的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器在铅屏蔽下暂存于 ECT 中心固废间，由厂家回收处理。

^{99}Mo 及其衰变产物 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{99}Tc 等均为非挥发性物质，洗脱过程在密闭发生器中负压条件下进行，无溶液的挥发，因此，无放射性气体污染。但是放射性药物的分装、取药可能存在洒出污染危险，为安全起见，洗脱操作通常都在超净工作台内进行。

本项目钼锝 (^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$) 发生器淋洗、标记、分装、包装过程的污染源项如下：

① γ 射线

在发生器淋洗、标记、质检、分装 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的过程中，放射性药物也会对局部环境和操作人员产生 γ 射线外照射，因此， γ 射线是 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物淋洗、标记、质检、分装过程中的主要污染因子。

② β^- 表面污染

本项目的放射工作人员在药物的淋洗、标记、质检、分装环节，可能会撒落药物，对工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾污，造成 β 局部放射性表面污染。

③放射性废液

正常情况下不产生放射性废液，事故状况下发生洒落，采用干法去污，首先是用吸水纸擦拭，然后用酒精棉球反复擦拭直至检测数据合格，擦使用的吸水纸、酒精棉球等作为放射性固废处理，发生器淋洗过程一般不产生放射性废水。

④放射性固体废物

放射性固废包括淋洗后衰变到无使用价值的发生器、沾有放射性药物的吸水纸和酒精棉球、工作人员操作时佩戴的一次性手套以及质控过程产生少量沾污放射性核素的滤膜、废试纸、针筒、针头、试管、手套等。

⑤放射性废气

本项目中 ^{99}Mo 及其衰变产物 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 均为非挥发性物质，且 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物淋洗分装均在密闭的通风柜内进行，通风柜内均设有独立的通风系统，通风系统设置活性炭过滤装置，排放口高出肿瘤大楼屋顶。

综上所述， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射性显像剂的淋洗、标注、分装、质检以及包装转运过程产生的污染物主要为 γ 射线、表面污染、放射性废气、放射性固体废物。

9.1.2 放疗科的设备和工艺分析

项目拟在医院1#综合楼地下二层新建2间加速器机房，1间 ^{192}Ir 后装机房，1间 ^{60}Co 头部伽玛刀机房，并配套建设定位机房、控制室、设备间等其他辅助用房。放疗科拟使用的放疗装置参数见表9-9。

表 9-9 1#综合楼地下二层放疗科主要设备参数一览表

医用电子直线加速器						
X 射线能量	射线装置类别	等中心最大剂量率	最大照射野	泄露辐射	辐射源与等中心距离 SAD	等中心位置到地面距离
10MV	II	2400cGy/min	40×40cm ²	≤0.1%	100cm	125cm
由于本项目医用电子直线加速器的设备型号未确定，是否配备 CBCT 功能尚不明确，待后期型号确定若配备 CBCT 功能完善相关手续，本次不予评价						
后装机						
核素	总活度(Bq)	放射源类别	半衰期	衰变方式	γ 射线能量	主射束朝向
^{192}Ir	3.7×10^{11}	III	74.0d	β^- 、轨道电子俘获	0.316MeV	可照射 4π 方向
头部伽玛刀						
核素	总活度 (Bq)	放射源类别	半衰期	衰变方式	γ 射线能量	
^{60}Co	2.33×10^{14}	I	5.27 年	γ 衰变	1.17MeV 和 1.33MeV	

9.1.2.1 医用电子直线加速器

(1) 设备组成

医用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束引出单元。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示意图如 9-19 所示，内部结构示意图如 9-21 所示。本项目直线加速器为 10MV，有电子和 X 射线两种治疗模式，示意图如 9-21 所示。

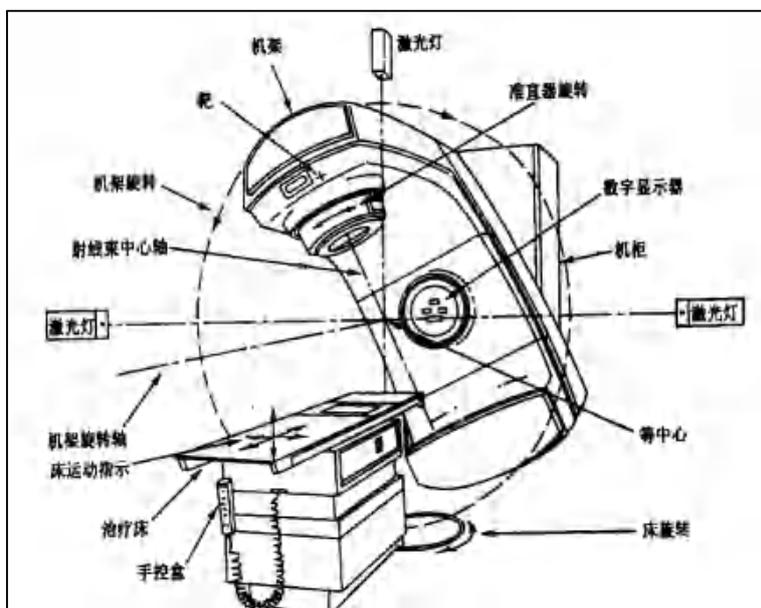


图 9-19 典型医用电子直线加速器示意图

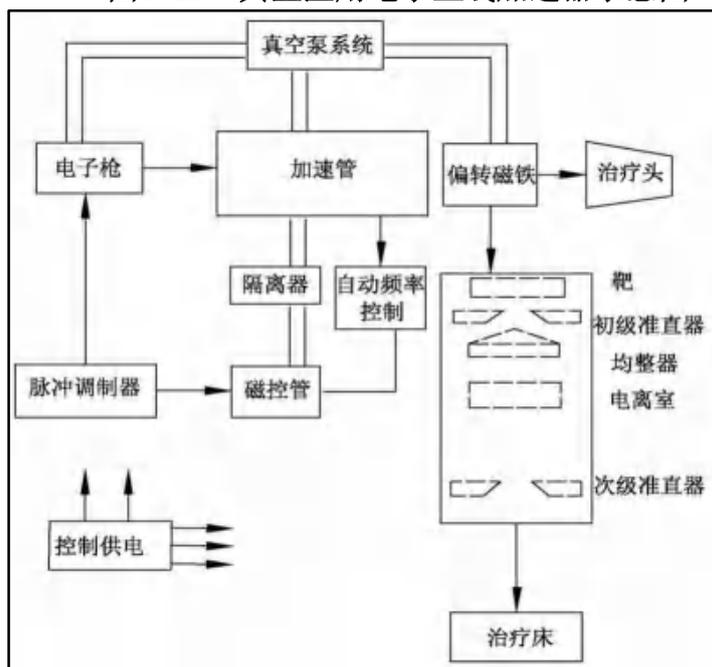


图 9-20 典型医用电子直线加速器内部结构框图

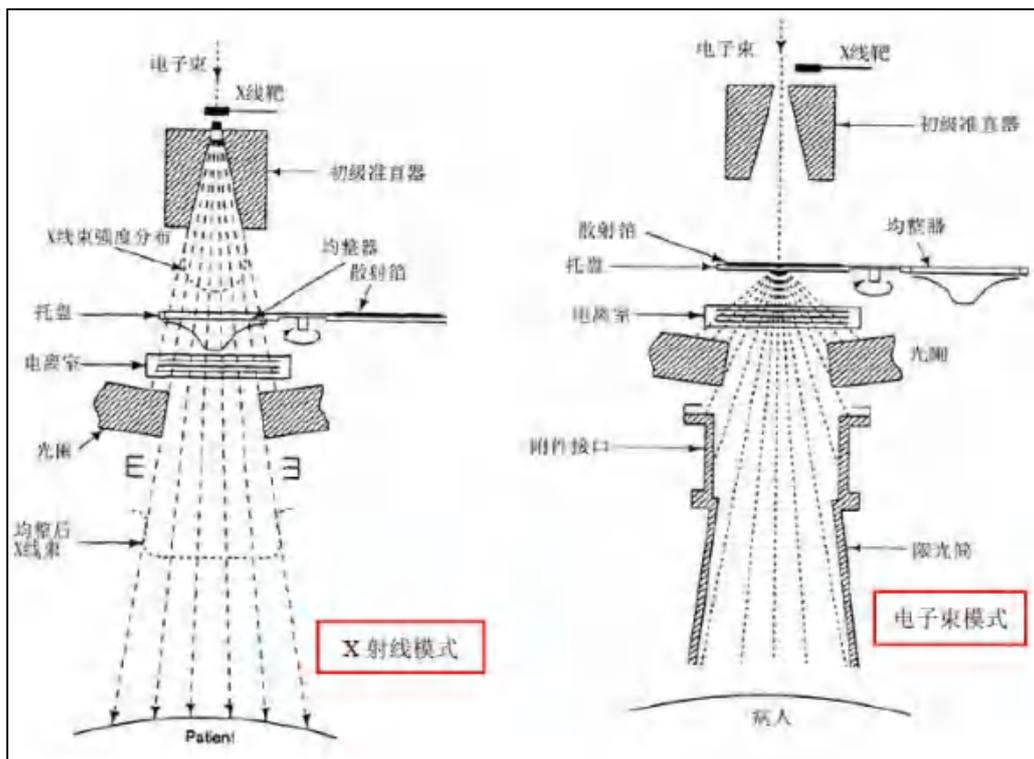


图9-21 X射线和电子束治疗模式结构示意图

(2) 工作原理

直线加速器根据被加速的高能电子轰击重金属靶而产生高能X射线的原理，以最佳输出能量对人体肿瘤进行照射治疗；同时也能直接利用初始电子束进行治疗，属II类射线装置。

电子线束治疗工作原理：电子从发射源射出，进入真空加速管加速，经磁偏转装置转向（一般为 90° 或 270° ），电子扩散箔使电子均匀射出，形成电子线束。经散射箔扩大射束直径，再通过光阑提高电子野的均整性，最后由输出窗射出达到患者病灶实现治疗的目的，即初始电子束直接引出并经散射、均整后用于患者的治疗。

X线束治疗工作原理：电子从发射源射出，进入真空加速管加速，经磁偏转装置转向射向高原子序数的金属靶，电子同金属靶的原子核相撞，速度骤减并损失部分能量转换为X射线，经平板滤片过滤不必要的射线，剩余有用线束经二次准直射出。

(3) 流程简述

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。在加速器治疗过程中，除病人外其他人员均不在治疗室内，医护人员通过闭路电视系统观察病人情况。放疗流程及产污环节如图9-22所示。

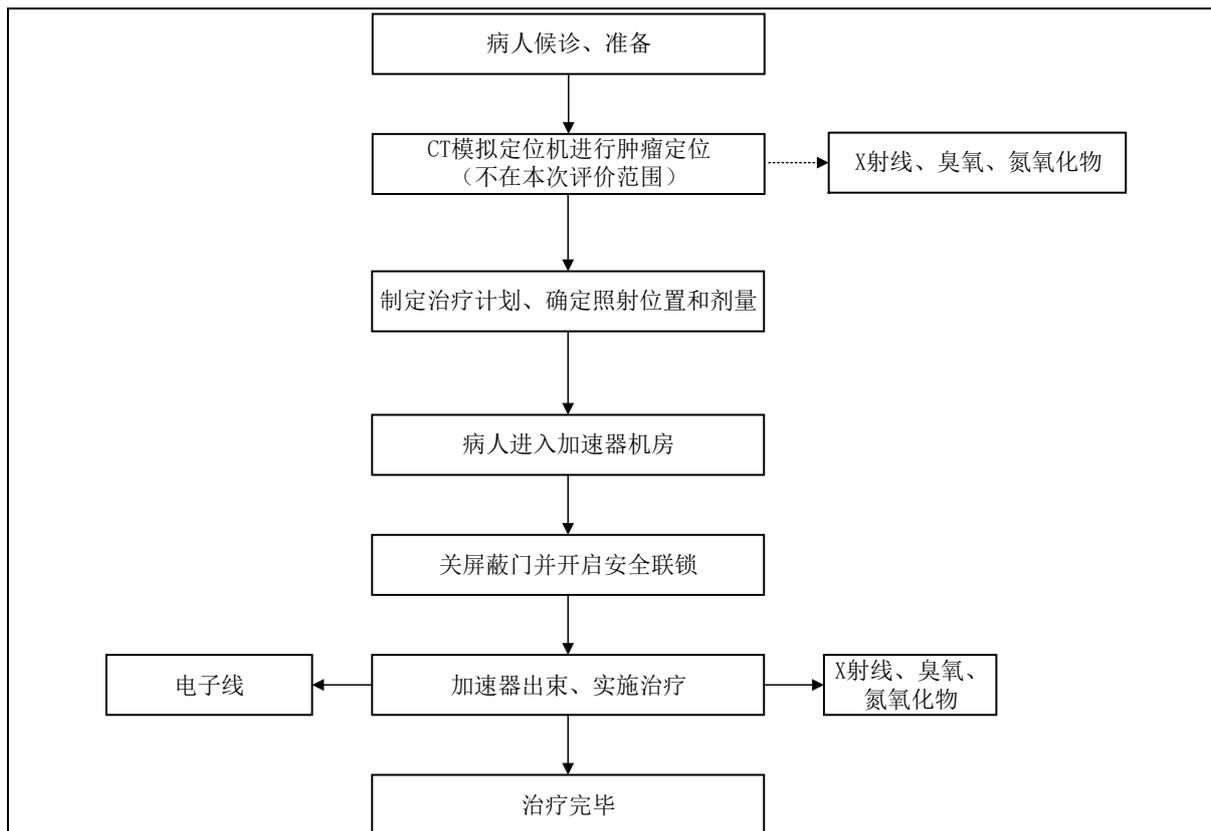


图9-22 加速器放疗流程及产污环节示意图

- 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预约病人首先在 CT 模拟定位机上进行肿瘤定位，确定肿瘤的具体位置和形状（依托的 CT 模拟定位机医院另行备案，不属于此次评价范围）；
- ③物理师通过医生给出的治疗剂量，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，技师进入治疗室卸载患者。

（4）产污环节

正常工况的瞬时辐射：开机状态下，加速器会产生 X 射线；一旦切断电源，X 射线就会消失。故正常工况时，加速器治疗出束时污染源主要为开机状态下产生的 X 射线；另外，当采用电子模式治疗时，会有电子产生。

在直线加速器开机过程中会产生臭氧、NO_x 等有害气体；另有更换的废靶件产生。

9.1.2.2 后装治疗机

（1）设备组成

本项目后装机（如图 9-23）采用 ^{192}Ir 核素为放射源。后装机由治疗计划系统、控制系统和治疗系统组成，治疗计划系统包括计算机、数字化仪、打印机及治疗系统软件；治疗系统包括专用控制微机系统、步进电机、施源器、放射源、储源器、真假源传输结构、紧急回源机构、计时器和治疗通道组成。储源器是容纳放射源的容器，当放射源不工作时可提供电离辐射的防护。施源器是将放射源送入预定位置的部件，自带屏蔽防护；通道是在后装机中专供密封放射源或其组件在其运动的轨迹，此管道与储源器和施源器相连接。

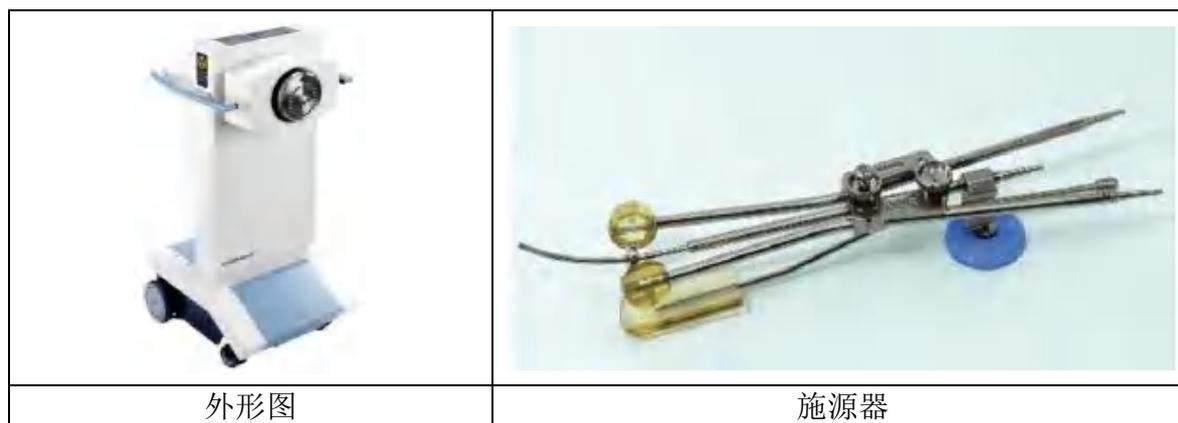


图 9-23 后装机外形图和施源器

（2）工作原理

后装机即近距离放射治疗机，是新一代肿瘤治疗设备，可进行后装放射治疗。后装放射治疗是指把不带放射源的治疗容器置于治疗部位，由电脑遥控步进电机将放射源送入容器进行放射治疗，如此可避免放射治疗容器过程中医务人员因放射受伤。可以将放射源准确安全地输送到患者需要治疗的部位进行放射治疗。

（3）工作方式

后装机是将放射源施用器放置于人体管腔内瘤体表面，在衰变过程中不断放出 γ 射线，通过计算机控制系统，使放射源直接在瘤体表面或瘤体内进行放疗。

（4）工艺流程

^{192}Ir 后装 γ 源近距离治疗机产污环节见图 9-24（图中模拟定位不属于本次评价范围）。由放疗医师给患者放置施源器，然后由辐射工作人员送入后装 γ 源近距离治疗室内。病人在治疗室内，接上与源相连的导管，然后借助后装治疗机将源送到需要照射的部位，源由工作人员在医生操作室遥控操作。先驱动假源探路，正常后缩回假源，再驱动真源按计划执行治疗，放射源步进到位精度为 mm 级。治疗结束后，源安全返回贮源位置，方可打开迷路防护门，辐射工作人员将病人送出治疗室。

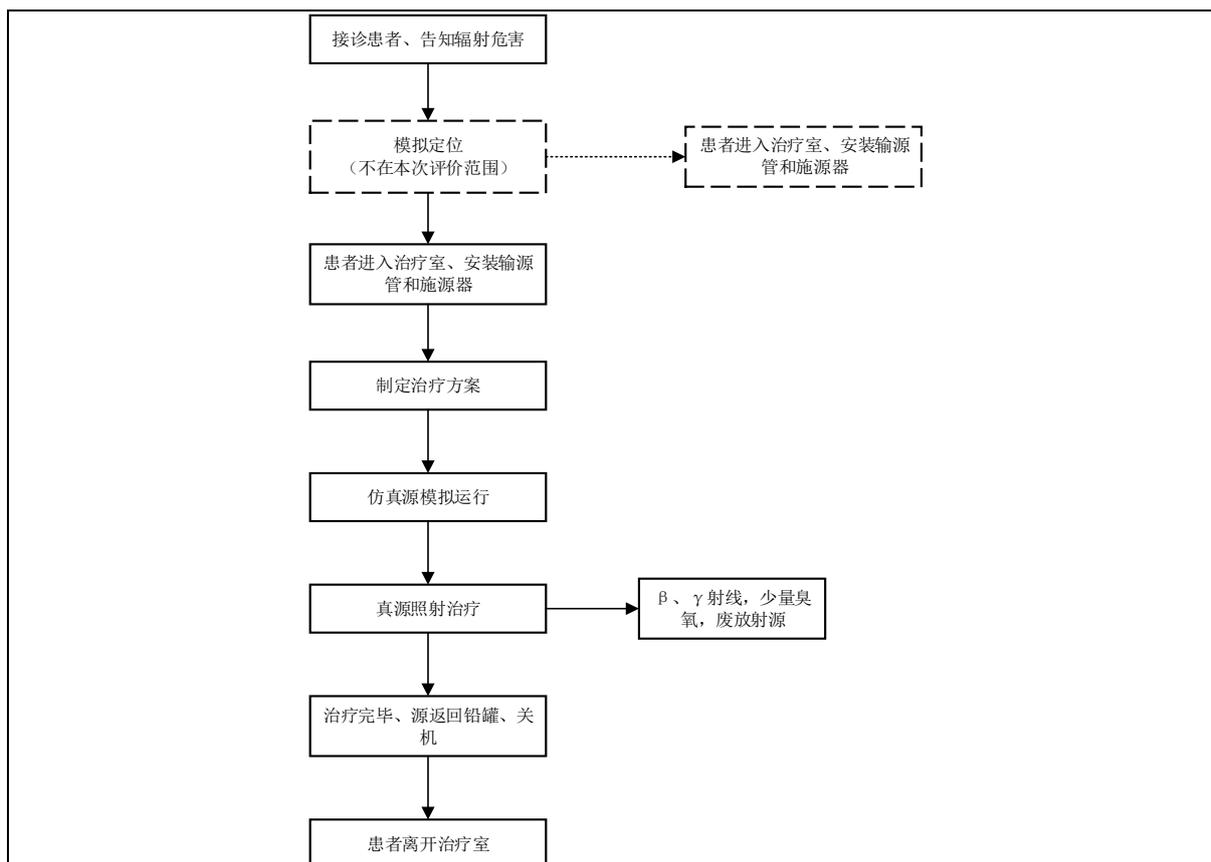


图 9-24 后装治疗机近距离治疗流程及产污环节示意图

(5) 产污环节

本项目拟新增1台后装机，各使用1枚 ^{192}Ir 放射源，设计装源活度为 $3.7\times 10^{11}\text{Bq}$ 。按照国家环保总局《放射源分类办法》，属于III类放射源。核素 ^{192}Ir 半衰期为74天，衰变过程会发出 β 、 γ 射线；当放射源衰变至其活度不能满足放射治疗需要时，将更换放射源，从而产生废放射源。

9.1.2.3 伽玛刀

(1) 设备组成

头部伽玛刀内含 192 枚活度均为 $1.214\times 10^{12}\text{Bq}$ （总活度为 6300Ci， $2.33\times 10^{14}\text{Bq}$ ）的放射源 ^{60}Co 。伽玛刀的机头主要由源体、准直体、外屏蔽体、屏蔽门、驱动装置等部分组成（见图 9-25）。因其需要对不同方向进行治疗照射，伽玛刀结构略有不同，但工作方式相同，均为控制源体在完全屏蔽状态和完全暴露状态之间切换，实现设备的开、关机。

(4) 操作流程及产污染环节

①当病人被确诊需要进行伽玛刀放射治疗后，主治医生首先向病告知可能受到的辐射危害；

②采用 CT/MRI 对病灶位置进行定位（不在本次评价范围），制定放射治疗计划，确定照射位置和照射剂量后，开始对病人实施放疗；

③给患者安装立体定位框架后，患者进入伽玛刀治疗室；

④工作人员将病人安置在治疗床上摆位，摆位完毕后工作人员退出治疗室；

⑤工作人员在控制台上确认相关参数，启动设备，关闭机房防护门、三维治疗床进入治疗腔内精确定位；

⑥准直体定位后打开开关体，对病人实施放射治疗；

⑦治疗时间到，关闭开关体和准直体，重复前面步骤直至全部靶点治疗完成；

⑧治疗结束，三维治疗床退出，屏蔽门打开，工作人员去掉病人身体上的立体定位框架，病人离开伽玛刀机房。

^{60}Co 放疗设备治疗过程及其产污环节简要图示见图 9-26。

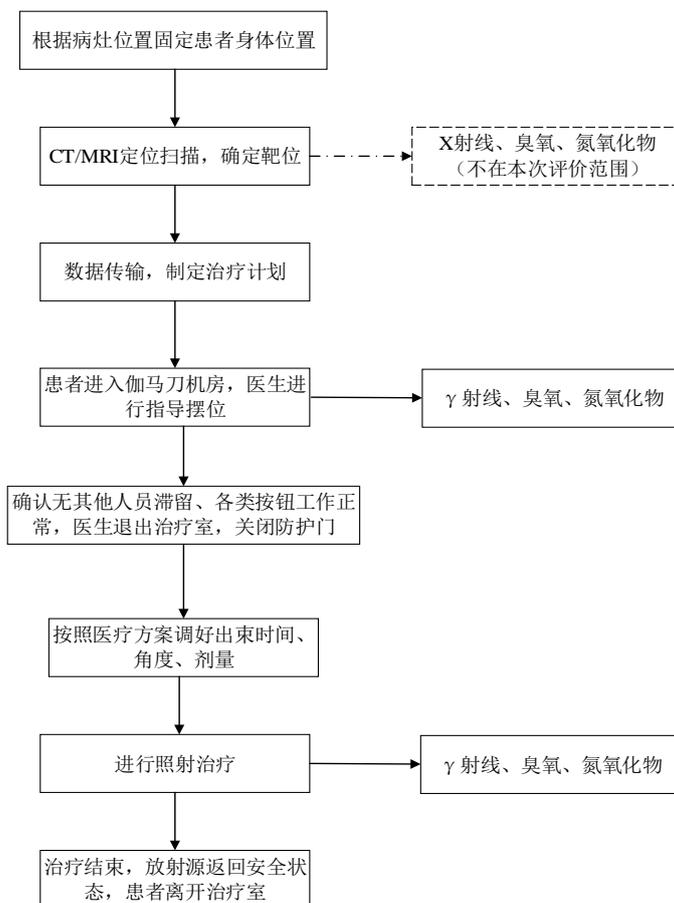


图 9-26 ^{60}Co 放疗设备的治疗过程及产污环节简图

(5) 产污环节

^{60}Co 放疗设备系采用密封源在体外进行治疗，治疗时才开启放射源准直通道对患者进行治疗，治疗完毕后就关闭准直通道。项目使用的 ^{60}Co 放射源安装于放疗设备的源体内，准直通道屏蔽采用钨合金屏蔽棒进行屏蔽，其作用是使治疗室空气泄漏剂量达到规定要求。经放疗设备自身的防护措施屏蔽后，关闭设备时对环境基本不产生影响。

在开启设备治疗过程中主要污染因子为 γ 射线及治疗过程中产生的少量臭氧和退役后的废放射源，设备关闭时 ^{60}Co 衰变会发出 γ 射线。放射源退役后，医院应将其送交源的生产厂家处理。

^{60}Co 放疗设备配套使用的 CT/MRI 均为 1#综合楼地下二层拟新增设备，目前暂未确定设备型号，故 CT 运行 X 射线产生的环境影响本次评价不考虑，待相关内容确定后另行评价。

9.1.3 介入科

本项目 1#综合楼三层设置 6 间 DSA 手术室四层设置 1 间杂合 DSA 手术室，三层 DSA 手术室有一间作为 ^{90}Y 介入操作的手术室。

1.DSA 工作原理

DSA是通过电子计算机进行辅助成像的血管造影方法，它是应用计算机程序进行两次成像完成的。在注入造影剂之前，首先进行第一次成像，并用计算机将图像转换成数字信号储存起来。注入造影剂后，再次成像并转换成数字信号。两次数字相减，消除相同的信号，得到一个只有造影剂的血管图像。这种图像较以往所用的常规脑血管造影所显示的图像更清晰和直观，一些精细的血管结构亦能显示出来，对比度分辨率高，减去了血管以外的背景，尤其使与骨骼重叠的血管能清楚显示。由于造影剂用量少，浓度低，损伤小、较安全。节省胶片使造影价格低于常规造影。通过DSA处理的图像，使血管的影像更为清晰，在进行介入手术时更为安全。在进行DSA手术时，医务人员将介入导管经皮下注入血管，通过DSA自带的X射线成像系统，将导管在血管内的影像显现出来。通过DSA处理的图像，使血管的影像更为清晰，在进行介入手术时更为安全。DSA工作示意图见图9-27。

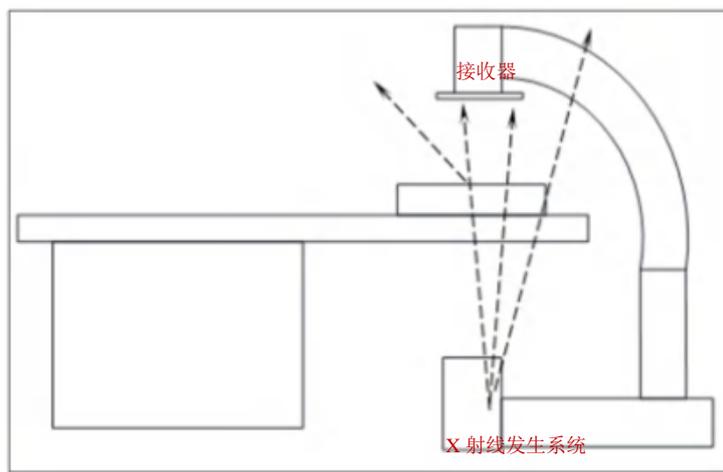


图 9-27 DSA 工作示意图

2.设备组成

DSA（数字减影血管造影系统）因其整体结构像大写的“C”，因此也称作 C 型臂 X 光机。DSA 设备主要由 X 射线发生系统、影像接收器和显示系统、影像处理和系统控制部分、机架系统和导管床、影像存储和传输系统、防护屏及防护铅帘等构成。

常见数字减影血管造影机外观见图 9-28。

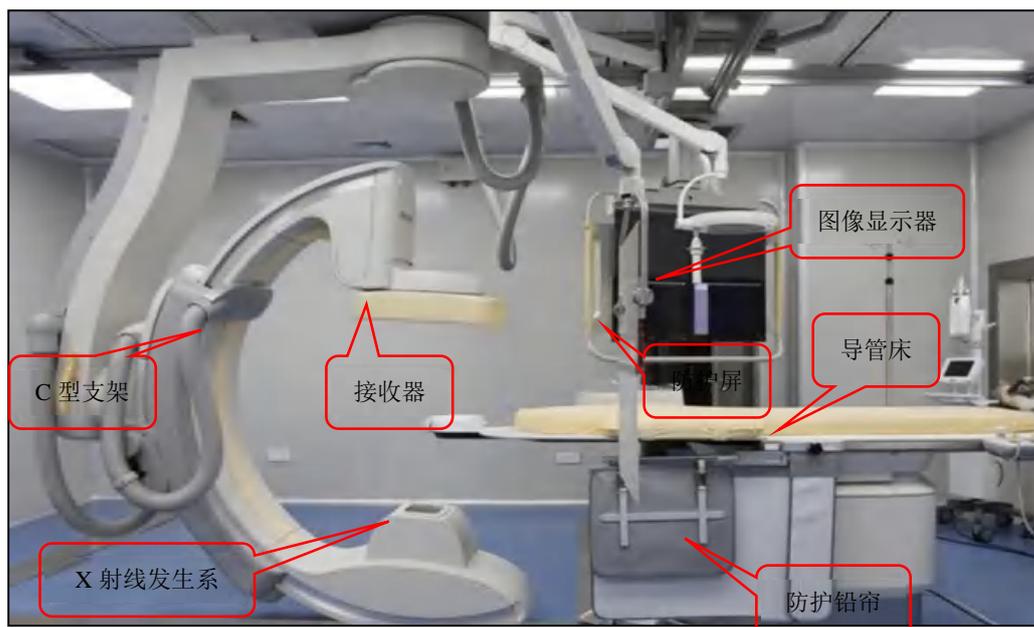


图 9-28 数字减影血管造影机外观图

3.操作流程

数字减影血管造影系统（DSA）在进行曝光时分为 DSA 检查和介入治疗两种情况，对应的治疗流程及产污见图 9-29。

（1）DSA 检查

DSA 检查采用隔室操作方式，通过控制 DSA 的 X 线系统曝光，采集造影部位图

像。具体方式是受检者位于检查床上，医护人员调整 X 线球管、人体、影像增强器三者之间的距离，然后进入操作间，关好防护门。医师、操作人员通过操作间的电子计算机系统控制 DSA 的 X 系统曝光，采集造影部位图像。医师根据该图像确诊患者病变的范围、程度，选择治疗方案。

(2) DSA 介入治疗

DSA 介入治疗采用近台同室操作方式。通过控制 DSA 的 X 线系统曝光，对患者的部位进行间歇式透视。具体方式是受检者位于手术床上，介入手术医师位于手术床一旁，距 DSA 的 X 线管 0.3~1.0m 处，在非主射束方向，配备个人防护用品（如铅衣、铅围脖、铅眼镜、铅手套等），同时手术床旁设有屏蔽挂帘和移动式防护帘。介入治疗中，医生、护士佩戴防护用品，医师根据操作需求，踩动手术床下的脚踏开关启动 DSA 的 X 线系统进行透视（DSA 的 X 线系统连续发射 X 射线），通过悬挂显示屏上显示的连续画面，完成介入操作。每台手术 DSA 系统的 X 线系统进行透视的次数及每次透视时间因患者的部位、手术的复杂程度而不同。介入手术完后关机，病人离开介入室。

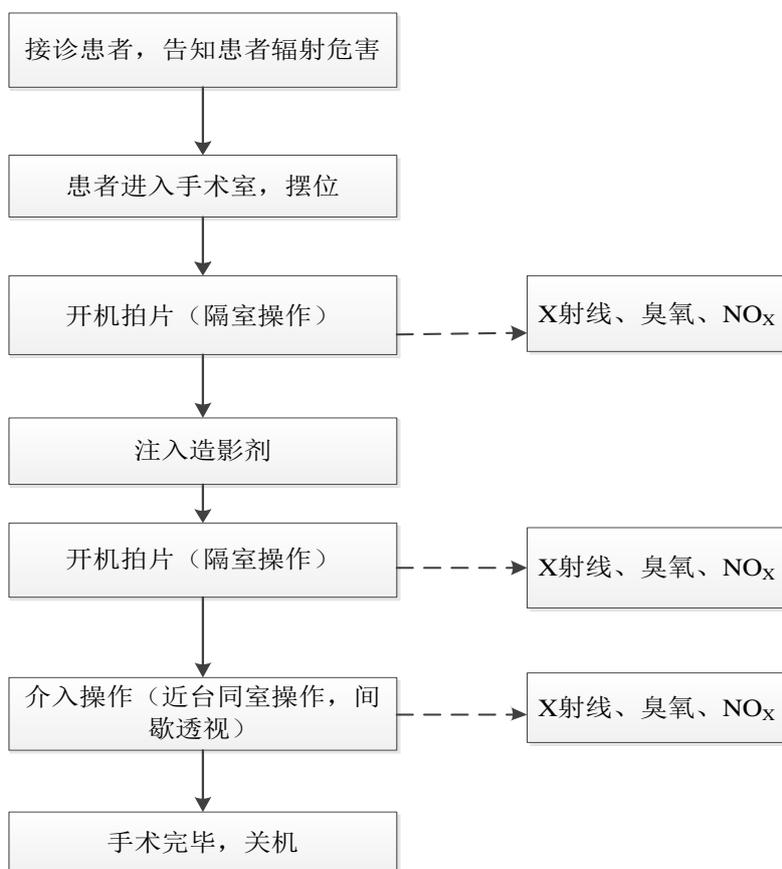


图 9-29 DSA 介入治疗流程及产污环节示意图

4.设备参数

目前介入手术室的 DSA 型号未确定，参考同类设备中较大能量进行预测，相关参数见表 9-11。

表 9-11 DSA 相关参数表

名称	类别	数量 (台)	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途
数字减影血管造影设备 (DSA)	II	7	125	1250	介入诊断/辅助治疗

9.2 污染源项描述

9.2.1 建设阶段的污染源项

本项目辐射工作场所在建设阶段不产生放射性废物、放射性废水和放射性气体，产生的环境影响主要是设备安装时产生的噪声、扬尘、废水、固体废物等，废水及固体废物依托医院现有的环保措施处理。本项目工程量较小，没有大型机械设备进入施工场地，施工场地安排有序，施工人员较少，有抑尘措施，施工期短，合理安排施工秩序，对周围环境的影响在可接受的范围内。随着施工期的结束，这些影响也随即结束。

9.2.2 运行阶段污染源项

9.2.2.1 核素诊断治疗项目污染源项分析

1 正常工况

(1) 放射性污染

① 电离辐射

PET/CT、SPECT/CT扫描时产生的X射线；药物在分装、注射、候诊、扫描及留观等过程中产生的 γ 射线及 β 射线； ^{223}Ra 等药物在注射过程中产生的 α 粒子。

② 放射性表面污染

医生在对含有放射性药物的种种操作中，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 α 、 β 放射性表面污染。

③ 废气

在放射性药物淋洗、质控、分装时，药物挥发产生的含放射性核素的废气。

④ 废水

PET、SPECT/CT 显像检查的患者注射完药物后续在候诊室等待检查，且 PET 检

查患者在显像检查后还需留观，在此过程中会产生含有放射性的排泄物。

核素治疗注射窗口使用 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{89}Sr 、 ^{35}S 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{46}Sc 等核素，进行核素治疗的患者注射后不做停留，直接离开核医学科。外购放射性核素均为生产厂家按照需求进行分装，医院不进行分装，一般不会产生放射性药物的撒漏，且医生佩戴一次性手套进行药物注射，药物注射后直接将手套丢入放射性废物桶中，该过程一般不产生放射性废水。

一般情况下 ^{131}I 测定及甲亢治疗患者给药后不需要留观，直接离开，不考虑该部分的放射性废水排放。

医生在操作 ^{90}Y 放射性核素过程中佩戴一次性手套，手术完成直接将手套丢入放射性废物桶中，故 ^{90}Y 介入手术过程中一般不产生放射性废水。

核医学科设置专用病房用于核素治疗患者的住院，在患者住院期间会产生含放射性废液的排泄物。

⑤ 固体废物

放射性药物操作过程中产生的如注射器、一次性口杯、一次性手套、棉签、滤纸等带微量放射性的医疗固体废弃物。核医学科住院患者产生的沾染放射性同位素的生活垃圾。 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器经一段时间的使用后，其活度会降低至不适宜用于治疗，届时建设单位拟对不能使用的 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器进行密封放射源退役处置，退役的密封放射源由生产厂家回收。

(2) 非放射性污染物

主要为电离辐射产生 O_3 、 NO_x 等废气、设备运行产生的噪声及工作人员产生的少量生活垃圾。

2 事故工况

①在分装、取放射性药物等过程中，由于放射性工作人员或服药患者违规操作、误操作，引起放射性药物倾洒，造成的放射性表面污染。

②由于管理不当，发生放射性药物或者发生器失窃，导致公众受照和环境受到辐射污染。

③对于患者管理不当，患者体内放射性活度尚未衰减到较低水平而到公共场所活动，造成公众受照。

④放射性废物未经足够的时间衰变进行排放，使排放超出规定的限值，可能对

环境或人体造成一定的危害。

⑤放射性固体废物未经足够的时间衰变进行擅自处理，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

⑥通风系统中的过滤装置活性炭失效，放射性废气未达到排放标准排放。

⑦职业人员未按要求穿戴个人防护用品，造成超剂量照射。

9.2.2.2 ^{99m}Tc 的淋洗、标记和分装污染源项分析

(1) 正常工况

^{99m}Tc 淋洗、分装产生的污染物主要是在 ^{99m}Tc 标记溶液洗脱过程中产生的 γ 射线、 β 表面污染，还有含放射性核素的气态和固态流出物。

①贯穿辐射及表面污染

^{99m}Tc 标记药物淋洗、分装过程中 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器本身及淋洗出来的 ^{99m}Tc 标记溶液会对工作人员产生 γ 外照射， ^{99m}Tc 洗脱液操作过程中可能对工作台面等造成 β 表面污染。

②其他废物

i 气态污染物

^{99}Mo 及其衰变产物 ^{99m}Tc 、 ^{99}Tc 等均为非挥发性物质，淋洗过程在密闭的发生器中负压条件下进行，无溶液的挥发，无放射性废气产生。

ii 放射性废水

正常情况下，采取干法去污，无放射性废水产生；极少数情况下，因操作人员违规操作，未佩戴一次性橡胶手套或手套破裂，出现人员皮肤污染，则需要进入去污间清洗去污，会产生少量放射性废水。

iii 放射性固体废物

固态放射性废物主要是废弃的 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器，沾有 ^{99m}Tc 标记液的分装瓶、工作人员操作戴的手套等，收集后放入固废间暂存，达到清洁解控水平后作为一般医疗垃圾处理，废弃的 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器单独收集后定期交生产厂家回收处置。

(2) 事故工况

①在分装、取放射性药物等过程中，由于放射性工作人员违规操作、误操作，引起放射性药物倾洒，造成的放射性表面污染。

②由于管理不当，发生放射性药物或者发生器失窃，导致公众受照和环境受到

辐射污染。

③放射性固体废物未经足够的时间衰变进行擅自处理，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

9.2.2.3 直线加速器

1. 正常工况

加速器产生的辐射可分为瞬时辐射和剩余辐射两类。瞬时辐射包括初级辐射（指被加速的带电粒子）及其与靶材料或加速器的结构材料相互作用产生 X 射线，在加速器开机的时产生，停机后就消失。剩余辐射是指加速器的初级粒子束和次级辐射在加速器结构材料及环境介质（包括空气、屏蔽物等）中诱发生成的感生放射性，它们在加速器停止运行后继续存在。加速器的主要危害因素如下：

（1）电子束

电子直线加速器产生的电子束贯穿能力相对 X 射线和中子而言弱得多，即使是高能电子束，空气中的射程也只有几十米。因此在 X 射线得到充分屏蔽的情况下，电子束也就得到了足够的屏蔽。

（2）X 射线

电子直线加速器由调速管提供微波功率。调速管工作时脉冲电压和峰值电流一般都很高，因此可能产生 X 射线，X 射线对人体产生外照射影响。X 射线向外从各个方向穿过辐射头也会产生漏射线，从辐射头射出的漏射线，遍布机头各处。当主射线射入某种物质时，会产生散布于各个方向上的次级散射辐射。

（3）感生放射性

根据《辐射防护手册辐射源与屏蔽》（第一分册）可知，绝大多数天然核素的反应阈能在 10MeV 以上，当加速器发射能量高于 10MeV 时，加速器靶物质（件）以及机头等金属部件由于受电子的轰击会产生感生放射性，本项目拟使用的加速器的能量为 10MeV，一般不会产生感生放射性。

（4）中子

《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）提出，电子直线加速器治疗 X 射线能量大于 10MeV 时，由于 (γ, n) 反应生成“杂散”中子，应根据治疗装置生产厂家给出的且不高于国家标准的指标，考虑机房的中子屏蔽，以及迷路入口防护门外“杂散”中子的散射辐射及中子俘获 γ 射线辐射。本项目拟

新增的加速器 X 射线最大能量为 10MeV，故不考虑中子问题。

(5) 放射性废水

加速器设备中使用的内循环冷却水可能产生感生放射性。在加速器运行时，循环水系统的某一部分可能使附近的操作人员受到照射。因此，循环水系统尽量避开可能使工作人员受到照射的地方。冷却水中被活化形成的放射性核素主要为 ^{15}O 、 ^{13}N ，它们的半衰期分别是 2.1min 和 7.3s，半衰期较短，只需经过 10 个半衰期后其活度就可以衰减到较低水平。

(6) 放射性固体废物

靶物质经长期照射后，也可积累一定量的感生放射性核素，通常 1 个靶使用 7~10a 才更换一次，加速器废靶件作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固体废物暂存间衰变暂存，最终交加速器生产厂家或有资质的单位收贮。

(7) 非放射性污染物

主要为电离辐射产生 O_3 、 NO_x 等废气、设备运行产生的噪声及工作人员产生的少量生活垃圾。

2. 事故工况

(1) 安全连锁系统故障或失效，机房的防护门未关好即开机导致射线泄漏，造成机房防护门外活动人员受到意外照射；

(2) 安全连锁系统故障或失效，加速器运行中人员闯入受到意外照射；

(3) 工作人员或无关人员在治疗过程中滞留机房，受到意外照射。

9.2.2.4 后装机

1. 正常工况

后装机使用的 ^{192}Ir 密封源， β 射线被完全屏蔽，源活性物质也不会泄露，因此只有 γ 射线对人体产生外照射。本项目后装机治疗室设置了迷路，因此仅少量散射线和穿透机房屏蔽的泄漏射线对机房外环境产生辐射影响。

^{192}Ir 放射源为点状米粒大小，密封型，外有不锈钢包壳，因此在正常使用下，不会产生放射性“三废”。其运营期的主要污染源为：

(1) 治疗室泄漏辐射后装机正常运行时的主要环境污染因子为能量流形式的 γ 射线。在正常治疗条件下，后装机 ^{192}Ir 放射源发出的平均能量为 370keV 的 γ 射线，有小部分穿过治疗室屏蔽体（包括屏蔽墙、顶棚）及迷路防护门泄漏到工作场所及周

围环境中，对周围的工作人员和公众产生 γ 外照射。

(2) 治疗前、治疗后装卸输源导管在治疗前、治疗后装卸输源导管时， ^{192}Ir 源 γ 辐射有小部分穿过工作容器，对装卸人员产生 γ 射线外照射。

(3) ^{192}Ir 放射源会使治疗室内的空气电离而产生少量臭氧和 NO_x ，臭氧在常温常压下稳定性较差，可自行分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

2.事故工况

(1) 放射源密封壳破损，源活性物质泄漏；

(2) 治疗过程中，发生卡源事故；

(3) 安全联锁装置失效，人员误入治疗室而受到额外照射，还可能发生放射源阻丝、源位异常等故障；

(4) 设备检修时，工作人员误将治疗机的屏蔽装置打开或者卸下放射源，对维修人员产生额外照射。

(5) 工作人员操作不当或设备故障，在设备安装、更换放射源时，放射源由设备或容器中滑落出来，造成安装或操作人员受到额外照射。

9.2.2.5 伽玛刀

1.正常工况

(1) γ 射线

项目 ^{60}Co 放疗设备所使用的 ^{60}Co 放射源会产生 γ 射线对周边环境造成影响，伽玛刀机房在运行过程中不产生放射性废气、放射性废水和放射性固体废物。此外，当放射源的活度不能满足放疗治疗工作或因医院不再进行放射治疗时，放射源会进行更换或报废，产生 γ 射线也会对周边环境造成影响。

(2) β 射线

^{60}Co 发射的 β 粒籽能量为0.318MeV，此能量的 β 粒籽在钢中的射程为0.1mm，项目治疗机中放射源属密封放射源，采用不锈钢包壳进行密封，该包壳已将 β 射线屏蔽，所以评价中不考虑 β 射线的影响。

(3) 其他非放射性污染源

本项目伽玛刀在运行时会产生极少量的臭氧及氮氧化物及定位时产生的医用器具和药棉等医用废物。放射源贮存于伽玛刀源体中，在伽玛刀停机状态下，源体内空间极小，臭氧及氮氧化物产生量很小，经排风系统处理后对环境影响较小。

2.事故工况

(1) 因工作人员操作不当或出现设备故障，在设备安装和换装放射源时，发生放射源由设备或容器中跌落出来，造成安装或操作人员受到强辐射照射。

(2) 设备检修时，工作人员误将伽玛刀的屏蔽装置打开或卸下放射源，对维修人员产生辐射照射。

(3) 治疗结束后，放射源源闸开关出现故障不能收回或放射源安装不到位。

(4) 伽玛刀换装放射源后产生的报废源，因管理不善发生被盗、丢失、遗弃等事故。

(5) 人员误入正在进行照射的机房，造成的意外照射。

9.2.2.6 DSA

1.正常工况

本项目使用数字减影血管造影系统（DSA），属于II类射线装置。数字减影血管造影系统（DSA）的X射线系统在拍片或透视时，将产生X射线和臭氧。注入的造影剂不含放射性，同时射线装置均采用先进的数字显影技术，不会产生废显影液、废定影液和废胶片。

^{90}Y 树脂微球为悬浮液，悬浮溶液为无菌水，无挥发性，且在治疗全过程中， ^{90}Y 微球不暴露在空气，且游离的 ^{90}Y 核素以氯化钇形式存在，氯化钇不具备挥发性，故不产生放射性气体或气溶胶的辐射影响。

医院使用 ^{90}Y 树脂微球治疗过程中产生的放射性固废包括：注射 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物产生的一次性手套、输液管、患者体内导管等； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{90}Y 树脂微球分装过程中产生的转移用的一次性手套、注射器、含剩余药物的西林瓶等；注射 ^{90}Y 药物产生的一次性手套、输液管、患者体内导管、V 瓶及有机玻璃防护罐等。

(2) 非正常工况

①在使用 DSA 发射 X 射线进行介入治疗时，人员误入机房引起误照射；

②工作人员未按要求穿戴个人防护用品时，造成额外附加照射剂量；

③使用 DSA 的医生或者护士在手术室内曝光时未穿戴铅围裙、防护手套、防护帽和防护眼镜等防护用具，而受到超剂量外照射；

④ ^{90}Y 给药后患者擅自离开病房，对医务人员、公众造成意外照射。

9.2.2.7 其他非放射性废物

工人员产生少量的生活污水依托医院污水处理设施处理后排入到市政管网。固废：本项目的固体废物，主要为工作人员产生的生活垃圾依托医院生活垃圾收储系统进行处置。

9.2.3 工作负荷

西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院综合楼核医学科、放疗科及介入科启用后，由西安交通大学医学院第一附属医院雁塔院区中现有科室调配，根据工作安排适时增加放射性工作人员，西安交通大学医学院第一附属医院雁塔院区核医学科、放疗科和介入科工作人员均完成辐射安全培训并具有相应的工作能力。

9.2.3.1 核医学科工作负荷

根据医院提供的资料，核素诊断项目正式开展后，每年工作 250 天，每周工作 5 天，每天工作 8h。

9.2.3.2 放疗科工作负荷

拟新增 2 间加速器机房，拟各安装 1 台 10MeV 医用电子直线加速器，每天放射治疗工作量为 60 人/d，每周工作 5d，平均每人野次治疗剂量 1.5Gy，平均每人治疗照射 3 野次，周工作负荷 $W=60 \times 5 \times 1.5 \times 3=1350\text{Gy/周}$ 。加速器等中心剂量率为 10Gy/min，则经计算周工作时间 2.25h。

拟新建 1 间后装机房，安装 1 台后装机，使用 1 枚 ^{60}Co 放射源，投入使用后预计平均每天放射治疗工作量最多为 10 人，每周工作 5 天，后装机初装源治疗时间：6 分钟，后期治疗时间 35 分钟，平均治疗时间 20 分钟，则平均周治疗时间为 16.7h，全年工作时长约 835h。

伽玛刀投入运行后，每周工作约 10h，全年工作 50 周，总工作时间为 500h。

9.2.3.3 DSA 手术工作负荷

根据医院提供资料，介入科和杂合手术室的 DSA 机房每年最多进行手术 1000 台，每台手术一般采集 1min，透视 10min。

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全措施

10.1.1 工作场所布局和分区

(1) 工作场所布局

①放疗科设置在1#综合楼地下二层的西南角，核医学科位于放疗科楼上，地面上为医院的绿化用地，DSA位于1#综合楼3层、4层手术室。

放疗中心位于地下二层的西南角，西侧、南侧和地下均为自然的岩土层，北侧为医院配套的配电室和控制室等附属用房，东侧为地下停车区。放疗中心最西侧从北向南依次布置伽玛刀机房及两间直线加速器机房，机房东侧为放疗科配备的CT机房及MR机房。CT机房北侧为后装机房，南侧为MR机房。

核医学科位于地下一层西南角，北侧为医院分配电室，西侧为放疗科伽玛刀及直线加速器机房的高出部分，南侧为自然岩土层，东侧为医院地下停车区。核医学科分为东西两部分，东侧为PET及ECT显像检查区域，西侧为甲癌、甲亢治疗区域及核医学科住院病房。显像检查区处进行显现检查药物注射外还进行放射性治疗药物的注射

介入手术室位于医院综合楼3层北侧，楼上为ICU病房，楼下为住院药房，介入手术室东侧为楼间连廊，南侧为手术辅助、供应区域，西侧接病房电梯。

杂合手术室位于医院综合楼4层中部手术室，该区域主要进行腔镜手术和外科手术，杂合手术室位于该区域的最西侧，东侧为手术室的控制室和设备间，其余侧为洁净走廊，楼上为屋顶，楼下为手术准备室的更衣室。

放疗科平面布局、核医学科平面布局，介入手术室平面布局及介入手术室楼上楼下平面布局见图10-1~10-6。

②项目核医学工作场所与放疗、放射工作区域分层设置，不连通。核医学科设有独立的出入口，出入口设置有单向门禁系统，可避免与工作无关人员任意出入而受到不必要的辐射照射或扩大污染范围。核医学科住院治疗设置两个区域，西侧作为甲癌患者住院区域，共设置4间病房（双人间）和1间抢救室。东侧作为其他核素的住院治疗，设置1间（3人间） ^{177}Lu 病房、1间（单人间） ^{90}Y 核素治疗病房及1间（单人间）粒籽植入病房。所有病房内设有与护士相连接的监控对讲装置，区域设有专门的取餐窗口。碘分装并采用自动分碘仪分装药物，降低了医护人员的受照剂量，区域出入口设置有门禁系

统，病人住院期间患者不能随意出入病房。

③介入手术室位于1#综合楼北侧，通过隔离门与三层其他功能区隔离，无关人员不得进入。杂合手术室位于医院综合楼4层中部手术室，手术室区域与其他区域分隔开。

(2) 工作场所分区

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

将加速器机房、伽玛刀机房、后装机机房(包括治疗室和迷路)划为控制区，以实体为边界，将与控制区相邻的辅助机房、控制室、会议室、周围过道等划为监督区。

将核医学科 ECT 机房、PET 机房、PET-MR 机房、抢救室、注射室、制药间、质控室、注射后候诊室、留观室、核医学科住院病房、固废室等化为控制区，将与控制区相邻的走廊、控制室、更衣室等化为监督区。

将 DSA 手术室各防护门内的区域划分为控制区，机房周边的控制室间、设备间、走廊、过道及楼上、楼下等相邻区域均划为监督区。

具体控制区与监督区划分见图 10-7~10-13。

(3) 核医学人流、物流路径规划

1) 地下一层核医学科路径规划

①医护人员路径：核医学科的医护人员由电梯厅进入地下一层后通过专用医护通道进入显像检查操作室及药物分装、注射区。卫生间内配置有表面污染监测设备，设置有感应式洗手池和淋浴设施，本区域所有工作人员完成工作后均原路返回。

②受检者/患者路径：显像检查注射前候诊设在地下一层电梯间南侧的大厅，患者在护士站咨询接受问诊、宣教，根据叫号通过西侧核医学科单向门禁系统进入显像检查区进行注射。由于 ^{51}Cr 的半衰期为 27.7d，故为注射 ^{51}Cr 的患者设置了单独的留观间，注射 ^{51}Cr 的患者产生的放射性废水单独收集。其余受检者注射后按照接受显像检查的类型进入 ECT 候诊区和 PET 候诊区候诊进行候诊。

根据西安交通大学医学院第一附属医院现有核医学科 ECT 运行情况，进行 ECT 显像检查的患者不需要留观，进行 PET 显像检查的患者一般留观 10~30min，留观结

束后由专用通道乘坐专用电梯离开核医学科。

^{89}Sr 、 ^{46}Sc 、 ^{35}S 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 等注射治疗患者，由西侧专用注射窗口注射药物后向南乘坐专用电梯离开核医学科。

核医学科 ECT1 机房作为籽粒植入的专用机房用于籽粒植入患者手术，籽粒植入患者每天最多 6 人，为避免植入患者与其他 ECT 检查患者的接触，籽粒植入患者一般安排在 ECT 检查正常下班之后进行手术，手术前医生从万级净化制药间储源箱取出籽粒源植入枪放入 ECT1 机房做术前准备，患者按照预约进入 ECT1 机房，医生在 CT 引导下进行籽粒植入，完成植入后，籽粒植入患者躺在手术床上，由工作人员将患者延西侧通道送入籽粒植入病房，患者满足出院条件后通过病房西侧的单项专用通道离开病房。

^{90}Y 治疗在三层的介入手术室治疗后，沿三层医护人员专用通道经中心供应区到达大楼南侧手术辅助区，由医护人员专用电梯进入地下一层核医学科 ECT1 机房进行显像检查，检查后通过西侧的通道送入 ^{90}Y 病房，患者满足出院条件后通过病房西侧的单项专用通道离开病房。 ^{90}Y 治疗患者人数较少，为避免患者与其他检查患者的接触， ^{90}Y 治疗患者患者一般安排在医院正常下班之后进行手术及显像检查， ^{90}Y 治疗患者在三层 DSA 机房完成注射后，医院安排相关人员对患者沿途经过区域的进行临时管控，要求该区域无其他人员出现，后迅速将患者转移至核医学科 ECT1 机房进行显像检查。

接受 ^{131}I 治疗的患者在确认适宜进行服碘治疗后，按照预约时间来到医院 ^{131}I 治疗区域，医护人员对患者进行治疗前的宣教及相关的注意事项后进入服碘区服碘，甲状腺功能测定的患者在北侧服碘室进行服碘，一般患者需要服用 $2\sim 50\mu\text{Ci}$ ^{131}I ，服用药量非常小，服药后患者体外 0.5m 处辐射剂量率水平约为 $0.02\sim 0.07\mu\text{Sv/h}$ ，与天然环境辐射本底相当，服碘后原路返回离开 ^{131}I 治疗区。南侧服碘室为甲亢和甲癌的服碘区，甲癌服药后进入病房住院，甲亢服碘后沿南侧通道离开 ^{131}I 治疗区。

该路径上，患者出入口均设置为单向门禁，仅允许患者单向通行。注射后等候室设有专用卫生间，受检者可在专用卫生间内如厕。

③放射性药物路径：药物在核医学科的暂存有两个场所一个为东侧的万级净化制药间，一个为西侧的碘分装。除 ^{131}I 通过进药间送往碘分装暂存外，其余核医学科涉及的放射性药物均由东侧的进药间通过注射区送入万级净化制药间、淋洗间，暂存、

使用。配送人员在医生每天上班前从东侧停车场直接送入放射性药品，由专人进行交接，交接过程均在监控下进行，医院拟制定放射性药物管理制度，做好放射性药物的台账管理。

④污物路径：地下一层核医学科场所设置多个固废间，暂存不同区域的放射性固体废物，放射性固体废物按照半衰期不同分类暂存在固废间内，衰变至符合清洁解控水平后，由患者通道送医院医疗废物库集中收集后按照医疗废物处置。

人流、物流行进路线见图 10-7 及图 10-14。

肿瘤病房综合楼核医学、放疗机房选址、布局与分区合理性分析见表 10-1。

表 10-1 1#综合楼核医学、放疗机房选址、布局与分区合理性分析

法规标准	类型	要求	本项目	符合性
《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)	选址与布局	放射治疗场所的选址应充分考虑其对周围环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。 放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避免儿科病房、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。	本项目放射治疗场所设置在医院 1#综合楼的地下二层西南角，集中设置，放疗科所在区域无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域。	符合
	分区原则	放射治疗场所应划为控制区和监督区。一般情况下，控制器包括加速器大厅、治疗室（含迷路）…术中放射治疗室应确定为临时控制区。 与控制区相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区。	将放射治疗机房划为控制区，与控制区相邻的区域划为监督区，具体见布局分区图。	符合
《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)	布局要求	放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置 放射治疗工作场所应分为控制区和监督区。治疗机房、迷路应设置为控制区；其他相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需经常检查其职业照射条件的区域设为监督区。 治疗机房有用线束照射方向的防护屏蔽应满足主射线束的屏蔽要求，其余方向的防护屏蔽应满足漏射线及散射线的屏蔽要求。 X 射线管治疗设备的治疗机房、术中放射治疗手术室可不设迷路； γ 刀治疗设备的治疗机房，根据场所空间和环境条件，确定是否选用迷路；其他治疗机房均应设置迷路	本项目放射治疗场所设置在医院 1#综合楼的地下二层西南角，集中设置，机房及其辅助设施同时设计和建造，并布局在同一区域；将放射治疗机房划为控制区，与控制区相邻的区域划为监督区，具体见布局分区图；根据影响分析章节计算结果，放疗机房的防护能力能满足相关屏蔽要求；放疗机房均设计有迷路。	符合

	6.2.2	放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数应不小于4次/h。	放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口与排风口位置应对角设置，通风换气次数满足通风次数要去	符合
《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)	辐射工作场所分区	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。核医学工作场所的控制区主要包括回旋加速器机房、放射性药物合成和分装室、放射性药物贮存室、给药室、给药候诊室、扫描室、核素治疗病房、给药后患者专用卫生间、放射性废物暂存库、衰变池等区域。核医学工作场所的监督区主要包括回旋加速器和显像设备控制室、卫生通过间以及与控制区相连的其他场所或区域。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。	按照 GB18871 的要求对核医学科进行分区划分，并进行相应的管理，具体分区划分见图，在控制区的入口设置有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。	符合
	选址	核医学科工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中与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；核医学科工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并应于非放射性工作场所有明确的分界隔离。核医学工作场所排风口的的位置尽可能远离周边高层建筑。	核医学科设置在医院 1#综合楼的地下一层西南角，设置有相应的物理隔离和单独的人员、物流通道，地下一层核医学科北侧为医院分变配电室，东侧为下停车场，西侧为岩土层，周围不涉及产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，核医学科设置独立排风管，排风管道通过大楼屋顶排出，排风口位置远离周围高层建筑。	符合
	布局	核医学科工作场所应合理布局，住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置；同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局，控制区应相对集中，高活室集中在一端，防止交叉污染。尽量减少放射性药物、放射性废物的存放范围，限制给药后患者的活动空间。 核医学科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尽可能短捷。	核医学科诊断场所和治疗场所相对分开，控制区相对集中设置，高活室集中在一端，防止交叉污染，对给药后患者进行管控，根据检查需要候诊或者直接离开核医学科。 核医学科设置有相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。 核医学科采用门禁制度及单向通道，控制无关人员随意进入控制	符合

		<p>核医学工作场所宜采取合适的措施，控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动，避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲区，为工作人员和患者提供必要的可更换衣物、防护用品、冲洗设施和表面监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。</p>	<p>区，给药后患者按照指引要求候诊或者离开核医学科，核医学科设置有工作人员专用更衣室，在控制区入口设置有卫生缓冲区，控制区还设置有给药后患者的专用卫生间。</p>	
<p>《核医学放射防护要求》 (GBZ120-2020)</p>	<p>工作场所平面布局和分区</p>	<p>在医疗机构内部区域选择核医学场址，应充分考虑周围场所的安全，不应邻接产科、儿科、食堂等部门，这些部门选址时也应避开核医学场所。尽可能做到相对独立布置或集中设置，宜有单独出、入口，出口不宜设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。</p> <p>核医学工作场所平面布局设计应遵循如下原则：</p> <p>a) 使工作场所的外照射水平和污染发生的概率达到尽可能小；</p> <p>b) 保持影像设备工作场所内较低辐射水平以避免对影像质量的干扰；</p> <p>c) 在核医学诊疗工作区域，控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门等安全措施，限制患者或受检者的随意流动，保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射；</p> <p>d) 在分装和给药室的出口处应设计卫生通过间，进行污染检测。</p> <p>核医学工作场所从功能设置可分为诊断工作场所和治疗工作场所。其功能设置要求如下：</p> <p>a) 对于单一的诊断工作场所应设置给药前患者或受检者候诊区、放射性药物贮存室、分装给药室（可含质控室）、给药后患者或受检者候诊室(根据放射性核素防护特性分别设置)、质控（样品测量）室、控制室、机房、给药后患者或受检者卫生间和放射性废物储藏室等功能用房；</p> <p>b) 对于单一的治疗工作场所应设置放射性药物贮存室、分装及药物准备室、给药室、病房（使用非密封源治疗患者）或给药后留观区、给药后患者专用卫生间、值班室和放置急救设施的区域等功能用房；</p> <p>c) 诊断工作场所和治疗工作场所都需要设置清洁用品储存场所、员工休息室、护士站、更衣室、卫生间、去污淋浴间、抢救室或抢救功能区等辅助用房；</p> <p>d) 对于综合性的核医学工作场所，部分功能用房和辅助用房可以共同利用；</p>	<p>核医学科设置在 1# 综合楼地下一层西南角，设置有相应的物理隔离和单独的人员、物流通道，地下一层核医学科北侧为医院放疗科机房，一层核医学科北侧为配电室、东侧为停车场，不涉及产科、儿科、食堂等部门及人员密集区。</p> <p>核医学科在控制区的入口和出口设置门禁系统，进行单向行进路线控制，对就诊患者进行限制；</p> <p>核医学科设置有清洁用品储存场所、员工休息室、护士站、更衣室、卫生间、去污淋浴间、抢救室或抢救功能区等辅助用房；</p> <p>对核医学进行分区划分，并按照 GB18871 有关规定采取相应的分区管控措施；</p> <p>本项目设计有合适的时间空间管控及物理分区模式来控制辐射源（放射性药物、放射性废物、给药后患者或受检者）的活动；</p> <p>根据使用放射性药物的种类、形态、特性和活度，确定核医学治疗区(病房)的位置及其放射防护要求，给药室靠近病房，减少放射性药物</p>	<p>符合</p>

	<p>e) 正电子药物制备工作场所至少应包括回旋加速器机房工作区、药物制备区、药物分装区及质控区等。</p> <p>核医学放射工作场所应划分为控制区和监督区。控制区一般包括使用非密封源核素的房间（放射性药物贮存室、分装及（或）药物准备室、给药室等）、扫描室、给药后候诊室、样品测量室、放射性废物储藏室、病房（使用非密封源治疗患者）、卫生通过间、保洁用品储存场所等。监督区一般包括控制室、员工休息室、更衣室、医务人员卫生间等。应根据GB18871的有关规定，结合核医学科的具体情况，对控制区和监督区采取相应管理措施。</p> <p>核医学工作场所的布局应有助于开展工作，避免无关人员通过。治疗区域和诊断区域应相对分开布置。根据使用放射性药物的种类、形态、特性和活度，确定核医学治疗区(病房)的位置及其放射防护要求，给药室应靠近病房，尽量减少放射性药物和给药后患者或受检者通过非放射性区域。</p> <p>通过设计合适的时间空间交通模式来控制辐射源（放射性药物、放射性废物、给药后患者或受检者）的活动，给药后患者或受检者与注射放射性药物前患者或受检者不交叉，给药后患者或受检者与工作人员不交叉，人员与放射性药物通道不交叉。合理设置放射性物质运输通道，便于放射性药物、放射性废物的运送和处理；便于放射性污染的清理、清洗等工作的开展。应通过工作场所平面布局的设计和屏蔽手段，避免附近的辐射源（核医学周边场所内的辐射装置、给药后患者或受检者）对诊断区设备成像、功能检测的影响。</p>	<p>和给药后患者或受检者通过非放射性区域。</p> <p>通过工作场所平面布局的设计和屏蔽手段，避免附近的辐射源对诊断区设备成像、功能检测的影响。</p>	
--	---	--	--

根据表 10-1，项目放疗机房工作场所布局均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中的相关规定，核医学科工作场所布局均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中的相关规定。综上，本项目放射性工作场所布局基本合理。

（4）非密封放射性物质工作场所分级

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），满足以下条件应当作为一个单独场所进行日等效操作核算：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。

常见的放射性药品生产、使用场所日等效操作量核算中操作因子的选取：

ii.放射性药品生产中，分装、标记等活动视为“简单操作”；

iii.医疗机构使用 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{125}I 粒子源相关活动视为“很简单的操作”，使用 ^{131}I 核素相关活动视为“简单操作”。

本项目综合楼地下一层核医学科地下一层PET及ECT检查、注射治疗区 ^{177}Lu 治疗场所， ^{131}I 治疗区域和 ^{90}Y 介入场所基本相对独立，各自的诊断流程连续完整，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，且人流及物流具有各自相对独立的通道，互不交叉。因此，可认为以上工作场所分别为一个独立的非密封放射性物质工作场所。

1) 地下一层显像、检查、注射治疗、 ^{177}Lu 治疗场所

综合楼地下一层PET及ECT检查场所涉及的核素包括 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{123}I 、 ^{89}Sr 、 ^{35}S 、 ^{46}Sc 、 ^{125}I 、 ^{103}Pd 、 ^{166}Ho 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 等核素因此该项目辐射工作场所日等效操作量核算见表10-2。

表10-2 地下一层显像、检查、注射治疗、 ^{177}Lu 治疗场所分级计算表

项目	核素	日最大用量(Bq)	操作方式	理化性质	毒性因子	日等效操作量(Bq)
PET 显像、检查	^{18}F	1.11E+10	很简单:10	液态	低毒:0.01	1.11E+7
	^{68}Ga	7.40E+8	很简单:10	液态	低毒:0.01	7.40E+5
	^{64}Cu	7.40E+8	很简单:10	液态	低毒:0.01	7.40E+5
	^{89}Zr	7.40E+8	很简单:10	液态	中毒:0.1	7.40E+6
	^{124}I	7.40E+8	很简单:10	液态	中毒:0.1	7.40E+6
ECT 显像、检查	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	5.18E+10	很简单:10	液态	低毒:0.01	5.18E+7
	^{201}Tl	3.70E+8	很简单:10	液态	低毒:0.01	3.70E+5
	^{123}I	1.85E+8	很简单:10	液态	低毒:0.01	1.85E+5
	^{51}Cr	1.85E+8	很简单:10	液态	低毒:0.01	1.85E+5
发生器淋洗	^{99}Mo	1.11E+11	源的贮存:100	固态	中毒:0.1	1.11E+8
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	8.88E+10	简单:1	液态	低毒:0.01	8.88E+8
籽粒植入	^{125}I (籽粒源)	1.48E+10	很简单:100	固态	中毒:0.1	1.48E+7
	^{103}Pd (籽粒源)	3.70E+9	很简单:100	固态	中毒:0.1	3.70E+6
	^{166}Ho (籽粒源)	3.70E+9	很简单:100	固态	中毒:0.1	3.70E+6
注射治疗	^{35}S	3.70E+08	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+07
	^{46}Sc	3.70E+08	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+07
	^{89}Sr	3.70E+08	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+07
	^{186}Re	3.70E+09	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+08
	^{188}Re	1.85E+09	简单:1	液态	中毒:0.1	1.85E+08

	¹⁵³ Sm	3.70E+09	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+08
	²¹¹ At	7.40E+08	简单:1	液态	高度:1	7.40E+08
	²²³ Ra	1.11E+07	简单:1	液态	极毒:10	1.11E+08
	²²⁵ Ac	1.11E+07	简单:1	液态	极毒:10	1.11E+08
	²²⁷ Th	1.11E+07	简单:1	液态	极毒:10	1.11E+08
¹⁷⁷ Lu 治疗	¹⁷⁷ Lu	3.70E+9	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+8
⁹⁰ Y 介入治疗的分装	⁹⁰ Y	3.70E+09	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+08
	^{99m} Tc	3.70E+08	简单:1	液态	低毒:0.01	3.70E+06
合计						3.95E+9
⁹⁰ Y 介入治疗前需要使用 ^{99m} Tc 进行模拟, ⁹⁰ Y 介入治疗使用的 ^{99m} Tc 和 ⁹⁰ Y 不同时分装, 且 ⁹⁰ Y 的日等效操作量大于 ^{99m} Tc 的日等效操作量, 故计算该场所的日等效操作量仅考虑 ⁹⁰ Y						

根据表10-2可知, 项目投入运行后, 地下一层显像、检查、注射治疗、¹⁷⁷Lu治疗场所操作放射性核素的日等效最大操作量约为 3.95×10^9 Bq, 在 $2.0 \times 10^7 \sim 4.0 \times 10^9$ 之间, 属于乙级非密封放射性物质工作场所。

2) 地下一层¹³¹I治疗区域

地下一层¹³¹I治疗区域, 包括甲癌治疗、甲功测定, 甲亢治疗, 该区域具体分级计算见表10-3。

表10-3 地下一层核医学科病房区域工作场所分级计算表

项目	核素	日最大用量(Bq)	操作方式	理化性质	毒性因子	日等效操作量(Bq)
¹³¹ I 治疗区域	¹³¹ I	2.96E+10	简单:1	液态	中毒:0.1	2.96E+09
	¹³¹ I	3.70E+09	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+08
	¹³¹ I	3.70E+08	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+07
合计						3.37E+09

根据表10-3可知, 项目投入运行后, 一层核素治疗操作放射性核素的日等效最大操作量约为 3.37×10^9 Bq, 在 $2.0 \times 10^7 \sim 4.0 \times 10^9$ 之间, 属于乙级非密封放射性物质工作场所。

3) 综合楼三层DSA机房

⁹⁰Y介入手术室位于综合楼三层的手术室, ⁹⁰Y在DSA的引导下注射, 在注射⁹⁰Y之前需要使用最大约10mCi ^{99m}Tc注射进行定位, ^{99m}Tc和⁹⁰Y不同时操作, 且⁹⁰Y的使用量大于^{99m}Tc的使用操作量大, 故使用⁹⁰Y进行操作场所等级判定, 具体分级计算见表10-4。

表10-4 ⁹⁰Y介入手术工作场所分级计算表

项目	核素	日最大用量(Bq)	操作方式	理化性质	毒性因子	日等效操作量(Bq)
⁹⁰ Y 介入治疗	⁹⁰ Y	3.70E+09	简单:1	液态	中毒:0.1	3.70E+08
	^{99m} Tc	3.70E+08	简单:1	液态	低毒:0.01	3.70E+06
合计						3.74E+08
⁹⁰ Y 介入治疗前需要使用 ^{99m} Tc 进行模拟, 在 DSA 手术室 ^{99m} Tc 和 ⁹⁰ Y 不同时注射, 且 ⁹⁰ Y 的日等效操作量大于 ^{99m} Tc 的日等效操作量, 故计算该场所的日等效操作量仅考虑 ⁹⁰ Y						

根据表10-4可知，⁹⁰Y介入手术室投入运行后操作放射性核素的日等效最大操作量约为 $3.74 \times 10^8 \text{Bq}$ ，在 $2.0 \times 10^7 \sim 4.0 \times 10^9$ 之间，属于乙级非密封放射性物质工作场所。

综上，1#综合楼本次新增三个乙级操作场所。

(3) 非密封放射性物质工作场所分类

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）核医学的非密封放射性物质工作场所根据操作放射性核素的权重活度分为三级，见表 10-5。

表 10-5 临床核医学工作场所分级

分类	权重活度, MBq
I	>50000
II	50~50000
III	<50

注：权重活度=（计划的日最大操作活度×核素毒性权重因子）/操作性质修正因子

放射性核素毒性权重因子和操作性质修正因子见表 10-6 和 10-7。

表 10-6 常用放射性核素毒性权重因子

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

表 10-7 不同操作性质的修正因子

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

本项目核医学各场所权重活度计算结果见表 10-8。

表 10-8 核医学工作场所使用核素权重活度计算结果

工作场所	核素	日最大操作量 (Bq)	毒性权重因子	操作性质修正因子	计算结果 (Bq)	类别
淋洗间	⁹⁹ Mo	1.11E+11	100	100	1.11E+11	2.00E+11 I
	^{99m} Tc	8.88E+10	1	1	8.88E+10	
万级净化制药间	¹⁸ F	1.11E+10	1	100	1.11E+08	4.80E+11 I
	⁶⁸ Ga	7.40E+08	1	100	7.40E+06	
	⁶⁴ Cu	7.40E+08	100*	100	7.40E+08	
	⁸⁹ Zr	7.40E+08	100*	100	7.40E+08	
	¹²⁴ I	7.40E+08	100*	100	7.40E+08	
	^{99m} Tc	7.40E+10	1	1	7.40E+10	
	²⁰¹ Tl	3.70E+08	1	100	3.70E+06	
	¹²³ I	1.85E+08	1	100	1.85E+06	
	⁵¹ Cr	1.85E+08	1	100	1.85E+06	
	⁹⁰ Y	3.70E+09	100*	1	3.70E+11	
	^{99m} Tc	3.70E+08	1	100	3.70E+06	
	³⁵ S	3.70E+08	100*	100	3.70E+08	
	⁴⁶ Sc	3.70E+08	100*	100	3.70E+08	
	⁸⁹ Sr	7.40E+08	100	100	7.40E+08	
¹⁸⁶ Re	3.70E+09	100*	100	3.70E+09		

	¹⁸⁸ Re	1.85E+09	100	100	1.85E+09		
	¹⁵³ Sm	3.70E+09	100	100	3.70E+09		
	²¹¹ At	7.40E+08	100*	100	7.40E+08		
	²²³ Ra	1.11E+08	1	100	1.11E+06		
	²²⁵ Ac	1.11E+08	100*	100	1.11E+08		
	²²⁷ Th	1.11E+08	100*	100	1.11E+08		
	¹²⁵ I	1.48E+10	100	100	1.48E+10		
	¹⁰³ Pd	3.70E+09	100*	100	3.70E+09		
	¹⁶⁶ Ho	3.70E+09	100*	100	3.70E+09		
显像检查注射区	¹⁸ F	1.11E+10	1	10	1.11E+09	3.09E+10	II
	⁶⁸ Ga	7.40E+08	1	10	7.40E+09		
	⁶⁴ Cu	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
	⁸⁹ Zr	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
	¹²⁴ I	7.40E+08	100*	10	7.40E+07		
	^{99m} Tc	7.40E+10	1	10	7.40E+09		
	²⁰¹ Tl	3.70E+08	1	10	3.70E+07		
	¹²³ I	1.85E+08	1	10	1.85E+07		
注射治疗区域	⁵¹ Cr	1.85E+08	1	10	1.85E+07	1.17E+12	I
	³⁵ S	3.70E+08	100*	1	3.70E+10		
	⁴⁶ Sc	3.70E+08	100*	1	3.70E+10		
	⁸⁹ Sr	7.40E+08	100	1	7.40E+10		
	¹⁸⁶ Re	3.70E+09	100*	1	3.70E+11		
	¹⁸⁸ Re	1.85E+09	100	1	1.85E+11		
	¹⁵³ Sm	3.70E+09	100	1	3.70E+11		
	²¹¹ At	7.40E+08	100*	1	7.40E+10		
	²²³ Ra	1.11E+08	1	1	1.11E+08		
锡气体发生器	²²⁵ Ac	1.11E+08	100*	1	1.11E+10	7.40E+09	II
	²²⁷ Th	1.11E+08	100*	1	1.11E+10		
抢救、运动负荷	^{99m} Tc	7.40E+10	1	10	7.40E+09	7.47E+10	I
	^{99m} Tc	7.40E+10	1	1	7.40E+10		
	²⁰¹ Tl	3.70E+08	1	1	3.70E+08		
	¹²³ I	1.85E+08	1	1	1.85E+08		
ECT 患者候诊	⁵¹ Cr	1.85E+08	1	1	1.85E+08	7.46E+09	II
	^{99m} Tc	7.40E+10	1	10	7.40E+09		
	²⁰¹ Tl	3.70E+08	1	10	3.70E+07		
ECT 长半衰期患者候诊	¹²³ I	1.85E+08	1	10	1.85E+07	1.85E+07	III
PET 患者候诊、留观室	⁵¹ Cr	1.85E+08	1	10	1.85E+07	2.34E+10	II
	¹⁸ F	1.11E+10	1	10	1.11E+09		
	⁶⁸ Ga	7.40E+08	1	10	7.40E+07		
	⁶⁴ Cu	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
	⁸⁹ Zr	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
ECT2	¹²⁴ I	7.40E+08	100*	10	7.40E+09	7.47E+09	II
	^{99m} Tc	7.40E+10	1	10	7.40E+09		
	²⁰¹ Tl	3.70E+08	1	10	3.70E+07		
	¹²³ I	1.85E+08	1	10	1.85E+07		
ECT1	⁵¹ Cr	1.85E+08	1	10	1.85E+07	2.29E+11	I
	¹²⁵ I	1.48E+10	100	10	1.48E+11		
	¹⁰³ Pd	3.70E+09	100*	10	3.70E+10		
	¹⁶⁶ Ho	3.70E+09	100*	10	3.70E+10		
	^{99m} Tc	7.40E+10	1	10	7.40E+09		
	²⁰¹ Tl	3.70E+08	1	10	3.70E+07		
	¹²³ I	1.85E+08	1	10	1.85E+07	2.34E+10	II
	⁵¹ Cr	1.85E+08	1	10	1.85E+07		
	¹⁸ F	1.11E+10	1	10	1.11E+09		

PET-CT、PET-MR	⁶⁸ Ga	7.40E+08	1	10	7.40E+07		
	⁶⁴ Cu	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
	⁸⁹ Zr	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
	¹²⁴ I	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
显像检查区污洗间	^{99m} Tc	7.40E+10	1	10	7.40E+09	3.09E+10	II
	²⁰¹ Tl	3.70E+08	1	10	3.70E+07		
	¹²³ I	1.85E+08	1	10	1.85E+07		
	⁵¹ Cr	1.85E+08	1	10	1.85E+07		
	¹⁸ F	1.11E+10	1	10	1.11E+09		
	⁶⁸ Ga	7.40E+08	1	10	7.40E+07		
	⁶⁴ Cu	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
	⁸⁹ Zr	7.40E+08	100*	10	7.40E+09		
碘分装间	¹³¹ I	3.37E+10	100	1	3.37E+12	3.37E+12	I
甲癌病房	¹³¹ I	7.40E+09	100	1	7.40E+11	7.40E+11	I
⁹⁰ Y 介入手术室	⁹⁰ Y	3.70E+09	100*	1	3.70E+11	3.70E+11	I
病房区固废间	¹³¹ I	3.37E+10	100	10	3.37E+11	3.37E+11	I
核医学科病房抢救室	¹³¹ I	3.70E+09	100	1	3.70E+11	3.70E+11	I
¹⁷⁷ Lu 病房	¹⁷⁷ Lu	3.70E+09	100*	1	3.70E+11	3.70E+11	I
粒籽植入病房	¹²⁵ I	1.48E+10	100	1	1.48E+12	1.48E+12	I
⁹⁰ Y 病房	⁹⁰ Y	3.70E+09	100*	1	3.70E+11	3.70E+11	I

注:由于本项目部分核素的毒性权重因子 GBZ120-2020 中未明确,参考已有核素毒性因子 ¹⁰³Pd、¹⁶⁶Ho、³⁵S、⁴⁶Sc、¹⁸⁶Re、⁹⁰Y 与 ⁷⁵Se 及 ¹³¹I 均为中毒组核素,毒性权重因子参考 ⁷⁵Se 及 ¹³¹I 取 100,²¹¹At 为高毒组核素,²²⁷Th 及 ²²⁵Ac 为极毒组核素毒性权重因子取 100,表中用*标出

对照《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020),本项目各放射性场所为I类、II类和 III 类工作场所,各类场所室内表面和装备结构要求见表 10-9。

表 10-9 各类工作场所室内表面和装备的要求

种类	I 类	II 类	III 类
工作场所	淋洗间、万级净化制药间、注射治疗区域、抢救、运动负荷、ECT1、碘分装间、甲癌病房、 ⁹⁰ Y 介入手术室、病房区固废间、核医学科病房抢救室、 ¹⁷⁷ Lu 病房、粒籽植入病房、 ⁹⁰ Y 病房	显像检查注射区、锝气体发生器、ECT 患者候诊、PET 患者候诊、留观室、ECT2、PET-CT、PET-MR、显像检查区污洗间	ECT 长半衰期患者候诊
地面	与墙壁接缝无缝隙	与墙壁接缝无缝隙	易清洗
表面	易清洗	易清洗	易清洗
分装柜	需要	需要	不必须
通风	特殊的强制通风	良好通风	一般自然通风
管道	特殊的管道 ^a	普通管道	普通管道
盥洗与去污	洗手盆 ^b 和去污设备	洗手盆 ^b 和去污设备	洗手盆 ^b

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

根据医院提供的资料,核医学科地面拟采用塑料地坪或涂刷塑料油漆,保证地面的平整、光滑,易于清洗;墙面与地面连接处采用弧形设计,避免缝隙产生,1m

以下部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；药物分装在手套箱内进行，手套箱操作台面光滑、平整，易于清洗去污；工作台面拟采用磨光花岗岩板材或不锈钢面板，以保证平整光滑易于清洗；核医学科控制区洗手盆拟采用感应式或脚踏式开关，避免污染水龙头；核医学科控制区设置通风管道，采用机械通风方式。通过上述措施，可满足《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）规定的要求。

10.1.2 辐射安全防护及环保设施

10.1.2.1 辐射防护屏蔽设计

(1) 综合地下二层放疗科

地下二层放疗科西侧设置2间直线加速器机房，1间伽玛刀机房，1间后装机机房，直线加速器专用机房防护参数见表10-10~11。伽玛刀机房和后装机机房的防护能力见表10-12。

表 10-10 北侧 10MeV 直线加速器专用机房的防护参数

项目	尺寸/防护厚度	材质
机房	7.7m×8m，面积 61.6m ² ，高 3.9m	/
迷道	宽 2.2m，长 9.8m	/
机房北侧主防护墙	厚 3.0m，有用射线宽 4.6m	混凝土
机房北侧次防护墙	厚 1.7m	混凝土
机房南侧主防护墙	厚 3.0m，有用射线宽 4.6m	混凝土
机房南侧次防护墙	厚 1.8m	混凝土
屋顶主防护	厚 2.9m，有用射线宽 4.1m	混凝土
屋顶次防护	厚 1.7m	混凝土
底板	厚 0.5m	混凝土
西侧侧屏蔽区	厚 1.7m	混凝土
东侧侧屏蔽区	厚 1.8m	混凝土
北侧迷道外墙	厚 1.7m	混凝土
防护门	1.9m×2.35m	16mmPb
混凝土密度≥2.35g/cm ³ ；		

表 10-11 南侧 10MeV 直线加速器专用机房的防护参数

项目	尺寸/防护厚度	材质
机房	7.7m×8m，面积 61.6m ² ，高 3.9m	/
迷道	宽 2.1m，长 9.8m	/
机房北侧主防护墙	厚 3.0m，有用射线宽 4.6m	混凝土
机房北侧次防护墙	厚 1.7m	混凝土
机房南侧主防护墙	厚 3.0m，有用射线宽 4.6m	混凝土
机房南侧次防护墙	厚 1.7m	混凝土
屋顶主防护	厚 2.9m，有用射线宽 4.1m	混凝土
屋顶次防护	厚 1.7m	混凝土
底板	厚 0.5m	混凝土
西侧侧屏蔽区	厚 1.7m	混凝土

东侧侧屏蔽区	厚 1.8m	混凝土
北侧迷道外墙（北侧 10MeV 机房南墙）	主防护厚 3.0m，有用射线宽 4.6m，次屏蔽厚 1.8m	混凝土
防护门	1.9m×2.35m	16mmPb
混凝土密度 $\geq 2.35\text{g/cm}^3$ ；		

表10-12 伽玛刀和后装机辐射防护屏蔽设计方案

名称	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
伽玛刀机房	机房尺寸	6.6m×6.8m，高3.9m
	迷道	2.00m×6.8m
	北侧防护墙	1200mm混凝土
	南侧防护墙	1700mm混凝土
	西侧防护墙	1000mm混凝土
	东侧迷倒内墙	800mm混凝土
	东侧迷倒外墙	1000mm混凝土
	顶棚	1200mm混凝土
	底板	500mm混凝土
	防护门	2.1m×2.35m, 10mmPb
后装机	机房尺寸	5.7m×6.6m，高3.8m
	迷道	2.0m×7.4m
	南侧、北侧防护墙	800mm混凝土
	西侧防护墙	700mm混凝土
	迷道内墙	700mm混凝土
	迷倒外墙	700mm混凝土
	顶棚	700mm混凝土
	底板	700mm混凝土
防护门	1.8m×2.25m, 8mmPb	

(2) 综合地下一层核医学科

综合楼地下一层核医学科包括显像、检查及其它住院和 ^{131}I 治疗两部分，具体辐射防护屏蔽措施见表10-13~10-14。

表10-13 显像、检查及其它住院场所辐射防护屏蔽设计方案

名称	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
ECT1机房	机房尺寸	机房8.42m×6.26m，高5.5m
	北侧、南侧、东侧墙体（南墙与ECT2机房共用）	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西侧墙体	370mm页岩实心砖墙
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	观察窗	4mmPb铅玻璃观察窗
	工作人员进出防护门	4mmPb防护门
	患者进出防护门	4mmPb防护门
ECT2 机房	机房尺寸	机房8.42m×6.44m，高5.5m
	北侧、东侧墙体（北墙与ECT1机房共用）	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	南侧防护墙（南墙与PET机房共用）	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆

	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	观察窗	4mmPb玻璃观察窗
	工作人员进出防护门	4mmPb防护门
	患者进出防护门	4mmPb防护门
PET-CT 机房	机房尺寸	机房8.42m×6.46m，高5.5m
	四侧墙体 (北墙和ECT2机房共同)	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	观察窗	10mmPb玻璃观察窗
	工作人员进出防护门	10mmPb防护门
	患者进出防护门	8mmPb防护门
PET-MR 机房	机房尺寸	机房8.42m×7.14m，高5.5m
	四侧墙体	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆 (机房四周墙体增加0.21mm高3.5m紫铜板)
	顶棚	300mm混凝土(增加0.21mm紫铜板)
	底板	300mm混凝土(增加0.21mm紫铜板)
	观察窗	10mmPb防护门
	工作人员进出防护门	8mmPb防护门+0.21mm紫铜板
	缓冲间门	8mmPb防护门
	患者进出防护门	10mmPb防护门+0.21mm紫铜板
留观室	尺寸	4.13m×5.06m，高5.5m
	北、南侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西侧防护墙	370mm页岩实心砖+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	东侧防护墙	370mm页岩实心砖墙
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	人员进出防护门	10mmPb防护门
PET 注射 后候诊室	尺寸	7.86m×5.09m，高5.5m
	东侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆
	北侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	南侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	人员进出防护门	16mmPb防护门
PET 候诊 卫生间	尺寸	2.19m×1.56m，高5.5m
	南侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	北侧、东侧、西侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	人员进出防护门	8mmPb防护门
ECT 注射 后候诊室	尺寸	6.06m×4.82m，高5.5m
	北侧、西侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+30mm高纯度硫酸钡砂浆
	东侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	南侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆 /370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	人员进出防护门	8mmPb防护门

ECT 候诊 卫生间	尺寸	4.26m×3.42m, 高5.5m
	南侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	西侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	北侧、东侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	人员进出防护门	4mmPb防护门
运动、抢 救室	尺寸	4.26m×2.65m, 高5.5m
	北侧防护墙	370mm页岩实心砖墙
	东侧、西侧、南侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	东侧人员进出防护门	4mmPb防护门
	西侧人员进出防护门	6mmPb防护门
ECT 注射 后候诊室 (长半衰 期核素候 诊)	尺寸	2.52m×2.15m, 高5.5m
	四周防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	人员进出防护门	10mmPb防护门
等候区 卫生间	尺寸	1.5m×2.155m, 高5.5m
	四周防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	人员进出防护门	10mmPb防护门
ECT 注射 后候诊室	尺寸	2.82m×3.425m, 高5.5m
	北、西、东侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	南侧防护墙	240mm页岩实心砖墙
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	人员进出防护门	8mmPb防护门
固废室	尺寸	2.82m×3.425m, 高5.5m
	北、西、南侧防护墙	240mm页岩实心砖墙
	东侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	人员进出防护门	4mmPb防护门
鐳气体发 生器	尺寸	2.11m×3.7m, 高5.5m
	西侧、南侧防护墙	240mm页岩实心砖墙
	北侧防护墙	240mm页岩实心砖墙/370mm页岩实心砖墙
	东侧防护墙	370mm页岩实心砖墙
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	进出防护门	4mmPb防护门
医生注射 区	尺寸	6.91m×2.3m, 高5.5m
	西侧、东侧、北侧防护墙	370mm页岩实心砖墙
	南侧防护墙	370mm页岩实心砖墙(门西)/370mm页岩实心砖墙 +20mm高纯度硫酸钡砂浆(门东)
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	医生防护门	12mmPb防护门

	传递窗（西北）	10 mmPb传递窗
	传递窗（东北）	20 mmPb传递窗
	PET注射窗	45mmPb注射窗
	ECT注射窗	10mmPb注射窗
PET 注射区	尺寸	3.08m×2.23m，高5.5m
	北侧、西侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	东侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	注射窗	45mmPb注射窗
ECT 注射区	防护门	12mmPb防护门
	尺寸	2.80m×2.11m，高5.5m
	北侧、东侧防护墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西侧防护墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
进药间	注射窗	10mmPb注射窗
	尺寸	3.26m×1.545m，高5.5m
	东侧、西侧、北侧墙	240mm页岩实心砖墙
	南侧防护墙	370mm页岩实心砖墙
万级净化制药间	传递窗	20 mmPb传递窗
	尺寸	4.72m×3.4m，高5.5m
	东侧、西侧、北侧墙	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	南侧防护墙	370mm页岩实心砖墙
淋洗间	防护门	4mmPb防护门
	传递窗	10mmPb传递窗
	四周墙体	240mm页岩实心砖墙
	尺寸	1.77m×2.7m，高5.5m
质控室	防护门	4mmPb防护门
	传递窗	10mmPb传递窗
	东侧墙体	240mm页岩实心砖墙/370mm页岩实心砖墙+30mm高纯度硫酸钡砂浆
	尺寸	1.77m×2.7m，高5.5m
注射治疗室患者端	防护门	4mmPb防护门
	注射窗	6mmPb注射窗
	四侧墙体	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	尺寸	3.02m×2.1m，高5.5m
注射治疗室医生端	防护门	4mmPb防护门
	注射窗	6mmPb注射窗
	四侧墙体	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	尺寸	2.83m×2.1m，高5.5m
177LU 病房	防护门	6mmPb防护门
	防护窗	6mmPb防护窗
	西侧南部墙体	370mm页岩实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆
	北侧、东侧、南侧、西侧北部墙体	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
籽粒植入	防护门	6mmPb防护门
	尺寸	11.46m×5.97m，高5.5m
	四侧墙体	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	尺寸	11.46m×5.97m，高5.5m

病房	防护窗	6mmPb防护窗
	防护门	6mmPb防护门
90Y 病房	尺寸	5.80×4.09m, 高5.5m
	四侧墙体	240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	防护窗	6mmPb防护窗
	防护门	6mmPb防护门
配餐窗	传递窗	6mmPb传递窗

表10-14 核医学科治疗场所辐射防护屏蔽设计方案

名称	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
分装室	尺寸	6.9m×3.3m, 高5.5m
	西侧、南侧墙体	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	北侧、东侧墙体	370mm实心砖墙
	进药、固废间传递窗	20mmPb传递窗
	甲癌服碘窗	20mmPb服药窗
	甲功测定服碘窗	10mmPb服药窗
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	东侧防护门	12mmPb防护门
进药间	尺寸	2.56m×1.36m, 高5.5m
	西侧、南侧、东侧墙体	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	北侧墙体	370mm实心砖墙
	传递窗	20mmPb传递窗
	防护门	10mmPb防护门
固废室	尺寸	2.56m×1.48m, 高5.5m
	四侧墙体	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	传递窗	20mmPb传递窗
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	10mmPb防护门
甲功测定服碘区	尺寸	2.56m×1.58m, 高5.5m
	西侧、北侧、东侧墙体	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	南侧墙体	370mm实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	服药窗	10mmPb服药窗
	防护门	8mmPb防护门
甲亢、甲癌服碘区	尺寸	2.56m×1.76m, 高5.5m
	四侧墙体	370mm实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆
	服药窗	20mmPb服药窗
	防护门	20mmPb防护门
取餐口	传递窗	20mmPb传递窗
干净被服暂存	尺寸	3.9m×1.86m, 高5.5m
	东、南、北侧墙体	370mm实心砖墙
	西侧墙体	与直线加速器共墙1.7m混凝土

病房	尺寸	自北向南依次为：4.07m×8.42m，3.8m×8.42m，3.8m×8.42m，4.04m×8.42m；高5.5m
	四侧墙体	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护窗	18mmPb防护窗
	防护门	18mmPb防护门
抢救室	尺寸	3.76m×7.86m；高5.5m
	四侧墙体	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	12mmPb防护门
污水间	尺寸	1.86m×3.16m；高5.5m
	南、北侧墙体	370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西墙	3与直线加速器共墙1.8m混凝土
	东墙	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	10mmPb防护门
固废间	尺寸	1.86m×3.26m，高5.5m
	南、北墙体	370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西墙	与直线加速器共墙1.8m混凝土
	东墙	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	10mmPb防护门
污染被服	尺寸	1.86m×6.76m，高5.5m
	南、北墙体	370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西墙	与直线加速器共墙1.8m混凝土
	东墙	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	10mmPb防护门
清洗间	尺寸	1.86m×3.26m，高5.5m
	南、北墙体	370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西墙	与直线加速器共墙1.8m混凝土
	东墙	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	10mmPb防护门
污物间	尺寸	1.86m×2.85m，高5.5m
	南、北墙体	370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	西墙	与直线加速器共墙1.8m混凝土
	东墙	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	10mmPb防护门
甲亢治疗留	尺寸	1.86m×2.85m，高5.5m
	四侧墙体	370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆

观	顶棚	300mm混凝土
	底板	300mm混凝土
	防护门	6mmPb防护门

(3) 综合楼三层介入手术室

综合楼三层北侧设置介入手术专用手术室，拟新增6台DSA，四层杂合手术室新增1台DSA,具体辐射防护屏蔽措施见表10-15。

表10-15 DSA工作场所辐射防护屏蔽设计方案

名称	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
介入手术室 DSA	尺寸	DSA1室8.04m×9.02m, DSA2室8.04m×9.02m, DSA3室6.22m×9.02m, DSA4室6.27m×7.87m, DSA5室8.19m×10.17m, DSA6室8.01m×10.17m, 高4.8m
	四侧墙体	240mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆
	顶棚	250mm混凝土
	底板	250mm混凝土
	患者进出防护门	4mmPb防护门
	医生进出防护门	4mmPb防护门
	污物进出防护门	4mmPb防护门
	观察窗	4mmPb观察窗
4层杂合手 术室 DSA	尺寸	9.9m×8.5m, 高4.8m
	四侧墙体	轻质隔墙+3mm高纯度防护铅板
	顶棚	150mm混凝土+2mm高纯度防护铅板
	底板	250mm混凝土
	患者进出防护门	4mmPb防护门
	医生进出防护门	4mmPb防护门
	污物进出防护门	4mmPb防护门
	观察窗	4mmPb观察窗

10.1.2.2 放射源安全管理

本项目放疗科涉及放射源为 I 类、III 类源，在伽玛刀、后装机设备内储存，粒籽源贮存在注射区保险柜内，⁹⁰Sr 敷贴治疗源在敷贴室保险柜储存。粒籽源贮存场所和⁹⁰Sr 敷贴治疗室均设置双人双锁，粒籽源当天由供销方送入医院，未使用完的粒籽源当天由供销方回收，核医学科采用安全监控等管理措施，并做好放射源每次取用和归还储存的登记。

10.1.2.3 核医学科辐射防护设施和用品

本项目核医学拟配备的防护设施和用品见表10-16。

表10-16 核医学科拟配备的防护设施和用品表

序号	种类名称	设置场所	数量	铅当量
核素诊断、治疗场所				
1	手套箱	淋洗间、制药间	2个	正面底面屏蔽≥10mmPb, 其余四面≥5mmPb
2	手套箱	制药间	1个	正面底面屏蔽≥45mmPb, 其余四面≥35mmPb

3	质控室	质控室	1 个	正面底面屏蔽 $\geq 20\text{mmPb}$, 其余四面 $\geq 15\text{mmPb}$
			1 个	正面底面屏蔽 $\geq 10\text{mmPb}$, 其余四面 $\geq 5\text{mmPb}$
4	注射器转移防护盒	注射区	2 个	6mmPb
5	放射性药品转移铅罐	注射区	2 个	45mmPb
6	注射器防护套	注射区	2 个	5mmPb
7	注射器防护套	注射区	2 个	10mmPb
8	ECT 注射窗	ECT 注射室	1 个	6mmPb
9	PET 注射窗	PET 注射室	1 个	45mmPb
10	铅屏	ECT 显像机房	2 个	4mmPb
11	铅屏	PET 显像机房	1 个	8mmPb
12	粒籽源贮源箱	注射室	1 个	供源厂家配备满足标准要求的贮源箱
13	去污工具组	更衣间	2 套	/
14	脚踏式放射性废物衰变桶	净化制药间、质控室、注射室、污物间等	8 个	10mmPb
15	放射性废物暂存柜	固废间	2	10mmPb
16	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	显像检查区	4 套	0.5mmPb
甲亢、甲癌治疗区				
1	自动分装仪	^{131}I 分装室	1 个	正面底面屏蔽 $\geq 40\text{mmPb}$, 其余四面 $\geq 30\text{mmPb}$
2	分装通风橱	^{131}I 分装室	1 个	正面底面屏蔽 $\geq 40\text{mmPb}$, 其余四面 $\geq 30\text{mmPb}$
3	储源铅罐	^{131}I 分装室	1 个	40mmPb
4	脚踏式放射性废物衰变桶	^{131}I 分装室、病房区域	8 个	20mmPb
5	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	^{131}I 分装室	2 套	0.5mmPb
6	去污工具组	更衣间	1 套	/
7	放射性废物暂存柜	^{131}I 固废间	1 个	20mmPb
敷贴治疗区				
1	贮源箱	敷贴室	1 个	供源厂家配备满足标准要求的贮源箱
2	脚踏式放射性废物衰变桶	敷贴室	1 个	2mmPb

本项目个人防护用品数量、防护厚度均满足《医用 X 射线诊断放射防护要求》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等相关要求，可以满足医院开展的核技术利用项目运行的要求。

表 10-17 本项目核医学科拟配置的监测仪器一览表

名称	数量
α 、 β 表面污染监测仪	2
便携式 X- γ 辐射巡测仪	3
活度计	2
固定式剂量报警仪	2

核医学科运行期间主要污染物为 X- γ 射线、 α 、 β 表面污染等，根据项目特点，医院拟配置 α 、 β 表面污染监测仪、便携式 X- γ 辐射巡测仪，住院病房区出口过道处设置监测系统以监测出院病人体内残留药物剂量，满足标准要求方可出院。项目拟配备的监测仪器符合《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》对监测仪器的配置要求。

10.1.2.4 工作人员卫生通过间配备设施

本项目核医学科在进入制药室和分装室前设置了卫生通过间，卫生通过间将包含以下设施：a、工作人员污染检测设备：卫生通过间内设置一套检测设备；b、工作人员洗消设施；c、工作人员去污设施；d、专用贮衣柜，工作人员进入卫生通过间换工作服，离开时换便装离开，工作服用专用洗衣设备清洗。污洗间主要功能为存放清洁物品和污物清洗。

10.1.2.5 核医学安全防护措施

(1) 储存过程的防护措施

① 显像检查区放射性药物存储过程的防护措施

本项目 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器置于供药商提供的铅罐（10mm 铅当量）中，由供药商派专人直接送至核医学科淋洗间有手套箱正面底面屏蔽 $\geq 10\text{mmPb}$ ，其余四面 $\geq 5\text{mmPb}$ 防护厚度的手套箱内。分装净化间门锁实行双人管理制度；日常期间由值班人员巡视检查；出入口安装摄像头、红外报警装置，并入科室监控系统。

显像检查区其他用于治疗放射性药物注射针剂，均由供药商派专人直接送至万级净化制药间，转入医院前表面辐射剂量率水平满足《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）。为保证放射性药品的安全储存，万级净化制药间设置双人双锁。工作场所入口醒目位置设置电离辐射警告标志并附中文说明， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 分装和淋洗工作场设置固定式剂量率探头，当探测到剂量率超过设置阈值时，则分装和淋洗室内声光报警，人员撤离。

PET 使用放射性药物部分由二期项目进行生产、分装，若二期项目与本项目的运行时间不匹配则需外购 PET 用药自行分装。PET 所需药物使用 45mmPb 的铅防护罐通过传递窗送到注射室，由正面底面屏蔽 $\geq 45\text{mmPb}$ ，其余四面 $\geq 35\text{mmPb}$ 的手套箱暂存，注射前进行分装。

② 核素治疗区放射性药物存储过程的防护措施

本项目其他的注射治疗的放射性核素均为购买的单支药物，由供药方按照订购量按约定时间送往医院 ECT 中心，存入分装净化间的手套箱内（正面底面屏蔽 $\geq 10\text{mmPb}$ ，其余四面 $\geq 5\text{mmPb}$ ）。转入医院前表面辐射剂量率水平满足《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）要求，医院安排专人接收，建立放射性药物使用台账。

（2）放射性药品诊断、治疗过程屏蔽措施

①PET 使用放射性药物部分由二期项目进行生产、分装，若二期项目与本项目的运行时间不匹配则需外购 PET 用药自行分装。PET 所需药物使用 45mmPb 的铅防护罐通过传递窗送到注射室，根据病人所需剂量分装至带防护套的注射器（ 10mm 铅当量）中给病人注射，PET 药物注射时医生和病人间设置有 45mm 铅当量的注射窗。诊断过程中产生的放射性废物采用 10mm 铅当量铅桶收集屏蔽，然后每天转入放射性废物间内。操作过程医生穿着有铅衣、铅帽、铅围领、铅手套、铅眼镜等，其防护铅当量为 0.5mm 。

②医生在进行放射性药物 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的淋洗、标记、分装操作时首先做好个人防护，包括穿铅衣，戴铅眼镜、口罩、工作帽等。将带有 10mm 铅当量防护罐的钼铯发生器置于手套箱中淋洗、分装、标记（手套箱正面底面屏蔽 $\geq 10\text{mmPb}$ ，其余四面 $\geq 5\text{mmPb}$ ）。根据病人所需剂量分装至带防护套的注射器（ 5mm 铅当量）中，将注射器置于注射器转运盒（ 6mm 铅当量）中后，经测量核定药物活度后转移至注射台给病人注射。工作人员位于注射室内，患者位于注射台另一侧（注射室），隔室注射。ECT 患者注射台设置有 10mm 铅当量的注射防护铅窗，诊断过程中产生的放射性废物采用 10mm 铅当量铅桶收集屏蔽，然后每天转入放射性废物间内。

③其他用于治疗放射性药物不涉及分装，注射直接在专用注射窗口完成，注射时医生和病人间设置有 6mm 铅当量的防护窗，操作过程中产生的放射性废物采用 10mm 铅当量铅桶收集屏蔽，然后每天转入放射性废物间内。操作过程医生穿着有铅衣、铅帽、铅围领、铅手套、铅眼镜等，其防护铅当量为 0.5mm 。

④ ^{90}Y 为新型的放射性药物，用于不可切除的原发性肝癌及结直肠癌肝转移的综合治疗，供药单位在约定的时间送药品，医院核医学科安排专人接收放射性核素，药物货包通过注射室北侧的传药窗进入注射室，在经确认无误，并完成相关交接、登记手续后，放入万级净化制药间。 ^{90}Y 在地下一层万级净化制药间进行药物存储、分装和

活度测量工作，在三层 DSA 手术室 DSA 引导下进行注射，注射后通过专用电梯进入核医学科 ECT1 机房进行检查后送入专用病房。由于 ^{90}Y 治疗患者人数较少，为避免患者与其他检查患者的接触， ^{90}Y 治疗患者患者一般安排在医院正常下班之后进行手术及显像检查， ^{90}Y 治疗患者在三层 DSA 机房完成注射后，医院安排相关人员对患者沿途经过区域的进行临时管控，要求该区域无其他人员出现，后迅速将患者转移至核医学科 ECT1 机房进行显像检查。

(3) 制药间、注射区、废物间安全防护措施

制药间、注射区、废物间防护门均设置电离辐射警告标志，废物桶等辐射设施同样设置电离辐射警告标志；分装放射性药物操作在手套箱内进行，通风速率不小于 1m/s ，手套箱内设独立排风管道；注射室设置叫号系统；注射室配置注射窗、注射器防护套等防护用品；辐射工作人员进入制药间前设置卫生通过间，卫生通过间设置有污物工具组；个人防护用品铅当量不低于 0.5mmPb ；制药间、注射区实行视频监控和双人双锁管理，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。

(4) PET、ECT 机房及休息室内安全防护措施

机房与控制室之间设置观察窗和对讲装置，受检者出入防护门上方设置工作状态指示灯和灯箱警示语句，且工作状态指示灯和防护门有效联动；防护门均设闭门装置；机房控制室和注射后候诊室、留观室之间设置视频监控系统 and 双向对讲装置；候诊室内候诊严禁串门，严禁在通道内穿行，以避免与其他受检者之间的交叉照射；候诊区域设置专用厕所，并设置感应式水龙头和节水坐便器，废水收集至衰变池衰变处理；此外，在控制区出入口、走廊内设置视频监控装置及引导标识，提醒和控制给药后患者的流动。

(5) 工作场所表面污染控制与防护

① 工作场所分区管理

本项目按照开展临床核医学项目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，工作人员从非活性区进出活性工作区需经卫生通过间，并在卫生通过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。

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。

放射性药物的暂存、分装均在万级净化制药间手套箱内进行，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滤纸的瓷盘内进行。

（6）工作人员的防护措施

辐射工作人员进入制药间、注射室经卫生通过间更换服装，并穿戴工作服、帽、鞋、防护口罩、胶质手套及相应个人防护用品。工作人员离开制药室，需返经卫生通过间，清洗、更衣、并对手部等体表部位进行污染测定，确认未受放射污染，方可离开。如果发现污染，工作服需进行清洗、处理，经清洗消除污染后，再次监测，直至污染达到标准限值以内后方可使用；皮肤、手部等体表部位污染，需至淋浴间进行清洗、处理，经清洗消除污染后，需再次监测，直至污染达到标准限值以内方可离开。

（7）受检者的防护

受检者根据预约按时来院，在注射室接受注射药物，到指定地点候诊、检查，不应随意走动，并在受检者专用厕所如厕。检查完毕由病人专用出口离开，尽量减少对其他人员的影响。

为防止无关人员进入控制区，核医学科内部控制区走廊入口的防护门、检查出口门设置为带门禁系统的单向门，实现“入口受检者只入不出、出口受检者只出不入”，保证控制区内受检者的单向流动，避免无关人员进入控制区；并且在控制区走廊出入口的防护门处设置固定式剂量监测报警仪。

10.1.2.6 核医学科病房区安全防护措施

本项目甲癌病区设计总体采取以下原则：（a）核医学科病房区工作场所的外照射水平和污染发生的概率达到尽可能小；（b）核医学科病房区控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门等安全措施，限制患者的随意流动，保证工作场所内的其他人员免受不必要的照射；（c）核医学科病房区出口处应设置 X- γ 剂量率监测

仪，当监测到距离患者体表 1 米处的剂量率小于 $25\mu\text{Sv/h}$ 才能让患者出院。

(1) 核医学科病房区工作场所布局

核医学科病房区设置在一层核医学科西侧设有两条患者专用通道，一条为 ^{131}I 治疗区患者通道，一条为其他住院患者专用离开通道，患者通道设有出入口单向门禁，医生办公、给药室和治疗病房分开，带药患者和医生路径不交叉，病房内设置有患者专用厕所，废水统一收集至专用衰变池处置。

(2) 治疗区内部防护措施

① ^{131}I 治疗区碘分装室配备 1 台自动分药仪， ^{131}I （甲亢和甲癌）均在自动分药仪内进行分装操作，自动分药仪自带 40mm 铅当量屏蔽系统，并且自动分装仪设置有双锁，将铅罐锁在自动分药仪内，同时自动分药仪表面配套 1 套固定式剂量报警仪，当出现射线泄漏时能报警。工作人员只需在输入厂家标定的 ^{131}I 放射性药物活度、标定时间等参数，设定稀释蒸馏水的体积，系统会自动完成定量分配、在线活度测量和体积配比等全部工作，最后工作人员在计算机上输入患者姓名，服用药物的量等参数，系统会自动按照输入的药量给患者分装药物，工作人员远程指导患者服用，不近距离接触放射性药物，减少了工作人员直接接触时间。甲功测定用药由工作人员在分装室内 40mmPb 的通风橱内进行稀释分装，传递至给药室。

病人服药操作过程中产生的放射性废物采用 20mm 铅当量铅桶收集屏蔽，然后每天转入 ^{131}I 固废间 20mm 铅柜内暂存。

② 每间病房设置一个屏蔽防护门，病房防护门、给药室防护门以及通风橱、通道防护门、铅废物桶等辅助设施均设置电离辐射警告标志；

③ 每间病房设置专用厕所，并设置有感应式水龙头和节水坐便器；

④ 患者进出设置专用通道，防护门均为单向门禁；

⑤ 给药室、病房均设有视频监控装置，护士办与给药室、病房均设置语言对讲系统；

⑥ 辐射工作人员配有铅衣、铅橡胶帽子、铅防护眼镜、铅橡胶手套，防护当量不低于 0.5mmPb 当量；备有一次性工作服、工作帽、口罩及橡胶手套等。

上述警示和安全控制措施对预防和控制潜在照射，避免放射性污染，保障相关辐射工作人员和公众的健康与安全起着积极的作用，能符合要求。

(3) 患者管理措施

治疗患者根据预约按时来院，在诊室/谈话室进行诊断和宣教，甲癌治疗患者在给药室口服药物后到指定病房住院治疗， ^{177}Lu 治疗患者在病房内住院后安排注射治疗，住院期间不应随意走动，并在病房内专用厕所如厕。甲癌病房设置 240mm 页岩实心砖进行防护， ^{177}Lu 病房设置 120mm 页岩实心砖进行防护，

病房内设置对讲和监控等设置，避免工作人员和住院患者接触，住院患者住院期间应减小放射性废物产生，患者食物宜采用产生废物少的食材。

住院结束后在病人病房区出口处测量体内放射性活度低于 400MBq（体表外 1m 处剂量率小于 $25\mu\text{Sv/h}$ ）方可由患者专用出口出院。住院患者通道入口防护门和出口防护门均带门禁系统的单向门，实现“入口患者只入不出、出口患者只出不入”，保证控制区内受检者的单向流动，避免无关人员进入控制区。病人离院时医院应给出书面指导，限制与儿童或孕妇密切接触，避免与他人长时间接触，近期避免到公共场所活动。

10.1.2.7 内照射辐射防护的措施

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

（1）围封隔离：对于工作场所，采取两区划分管理，严密而有效的围封隔离控制区，以限制可能被污染的体积和表面，防止放射性物质向周围环境扩散，防止由于人员或物体的移动而将污染带到相邻房间等措施。内照射以吸入途径可能性最大，所以工作场所拟设置通风系统，以降低空气中的放射性物质浓度。放射性药物分装过程均在屏蔽且密封负压的分装装置内进行，基本不会有放射性物质的散布，辐射工作人员均不直接接触核素，放射性药物都处于良好的屏蔽状态。能有效的减低工作人员内照射的风险。

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

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

定，不得在开放型放射工作场所或污染区进食或吸烟等。

10.1.2.8 敷贴治疗的辐射安全措施

敷贴治疗项目使用的 ^{90}Sr 敷贴器（放射源）需外购，作为放射源管理，平时装在专用贮源箱内，储存在敷贴室内；

敷贴治疗项目使用的 ^{32}P 敷贴器由送药商将 ^{32}P 溶液送至核医学科敷贴室，暂存于治疗区贮源室内，使用时，由专业的工作人员在有机玻璃通风橱内进行制备。敷贴治疗项目的辐射防护措施及与标准的对照分析见表 10-18。

表 10-18 敷贴治疗室的辐射安全措施与标准的对照分析表

《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）		本项目辐射安全措施	评价
敷贴器贮源箱放射防护要求	贮源箱的外表面应标有放射性核素名称、最大容许装载放射性活度和牢固、醒目的电离辐射标志	制定相应的管控要求，要求贮源箱的外表面清晰的标注核素名称、容许装载活度和醒目的电离辐射警示标志	满足
	贮源箱的屏蔽层结构应分内外两层。内层为铝或有机玻璃等低原子序数材料，并具有防火、防盗的性能	拟定制专用的有内外两侧屏蔽结构的贮源箱，并具有防火、防盗的性能	满足
	贮源箱表面 5cm 和 100cm 处因泄露辐射所致的周围剂量当量率分别不应超过 $10\mu\text{Sv/h}$ 和 $1\mu\text{Sv/h}$	拟定制专用的贮源箱，贮源箱表面的剂量满足相应的的管控要求	满足
敷贴治疗的放射防护要求	敷贴治疗应设置专用治疗室，该治疗室应与诊断室、登机值班室和候诊室分开设置。治疗室内使用面积应满足治疗要求。	本项目设置了专用的敷贴室，与诊断室、登机值和候诊室分开设置，敷贴室内使用面积能满足治疗要求。	满足
	治疗室内高 1.5m 以下的墙面应有易去污的保护涂层。地面，尤其在治疗患者位置，应铺有可更换的质地较软又容易去污染的铺料。	本项目敷贴室内墙面、地面拟采用易清洗去污的材料，在治疗患者位置，拟设置防滑胶垫等易去污的铺料，胶垫可随时更换。	满足
	治疗室内患者作为之间应保持 1.2m 的距离或设置适当材料与厚度的防护屏蔽。	本项目拟设置 2 个座位，座位之间相距约 1.5m。	满足
	治疗室内应制定敷贴治疗操作规程及卫生管理制度，并配有 β 污染检查仪等检测仪器	本项目敷贴室内将敷贴操作规程及卫生管理制度上墙，核医学科配备 β 检查仪	满足

由上表可知，敷贴治疗室工作场所采取的辐射安全与防护措施基本符合《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）相关要求。

10.1.2.9 放射性药物的存放控制措施

PET 检查使用的 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 及 ^{68}Ga 由医院二期项目生产制备，药物生产完毕后进行分装，分装完毕后存入转运铅罐，由专人使用转运小推车运至注射室（二期项目与本项目的时序不匹配时，以上药物均为外购）， ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I 放射性药物为外购。ECT 检查使用的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 由医院购买的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器在淋洗间进行药物制备，制备完成后自动进入铅罐，在分装柜内进行分装，其余 ECT 检查使用的药物外购。其余所有注射

治疗放射性药物也均为外购。

所有外购放射性药物均为核医学科提前向供药单位订购，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万级净化制药间内的手套箱内。

^{131}I 也需提前向供药单位订购，供药单位在约定的时间将预约用量的药物送至 ^{131}I 分装室，由专人确认无误完成相关交接手续后暂存在碘分装室自动分装仪内。

医院配备专（兼）职人员负责放射性药物的管理并建立健全放射性物质的保管、领用、注销登记和定期检查制度。要求设置专门的台账（如交收账、库存帐、消耗账），加强对放射性药物的管理，严防丢失。放置放射性物质的容器，必须容易开启和关闭，容器外必须有明显的标签（注明元素名称、理化状态、射线类型、活度水平、存放起止时间、存放负责人等）。放射性药物要设有专门可靠的防火防盗等安全设施的贮存场所，且不得将放射性药物与易燃易爆及其他危险物品放在一起。

10.1.2.10 医用电子直线加速器安全控制措施

（1）紧急停机开关：直线加速器设备控制台上设置急停开关、机房内不同方向的墙面、入口门内墙设置急停开关，每间加速器工作场所拟设置急停开关 5 个（控制室 1 个、迷路入口处 1 个、治疗室内 3 个），紧急停机开关有明显的标志，供应急停止使用，事故处理完毕后，急停开关复位，加速器才能重新启动。

（2）实时摄像监视和对讲系统：在加速器机房内均设有摄像监视系统，使控制室的工作人员可实时观察到治疗室内加速器的工作情况，如发生意外情况可及时处理；机房和控制室之间设置对讲系统，方便操作人员与患者的交流。

（3）实时辐射水平监测系统：在加速器机房内均设有固定式剂量率仪监测探头，实时监测到辐射剂量率水平显示在控制室中，并具有报警功能，工作人员可以及时了解加速器的工作情况以及机房中的辐射水平。

（4）手动开门装置：在加速器门口靠近防护门处设置 1 个手动开门装置，防护门安装防夹装置。

（5）联锁装置：各加速器机房的电动防护门均与加速器放疗装置联锁，门未关紧的情况下，加速器不能出束，一旦防护门被打开，联锁装置即切断该加速器机房内加速器治疗机的出束电源，使加速器立即停止出束，治疗机房内应有从室内开启治疗机房门的装置，防护门有防挤压功能。

(6) 直线加速器机房排风口距地面 30cm 处，通风管道呈 45°从机房门上方穿过屏蔽墙。送风口与排风收集口形成对角分布，通风设计基本满足“高进低出、对角设置”的要求，通风管道走向见图 10-15。

根据设计单位提供的资料，直线加速器机房的通风换气次数可达 6 次/h，能满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中“治疗室通风换气次数应不小于 4 次/h”的要求。

(7) 电缆管线穿墙设计：设备电缆穿墙方式拟采用倒梯形设计，电缆沟 350mm，以保证不减弱屏蔽墙体的屏蔽效果，电缆管线穿墙剖面图见图 10-16。

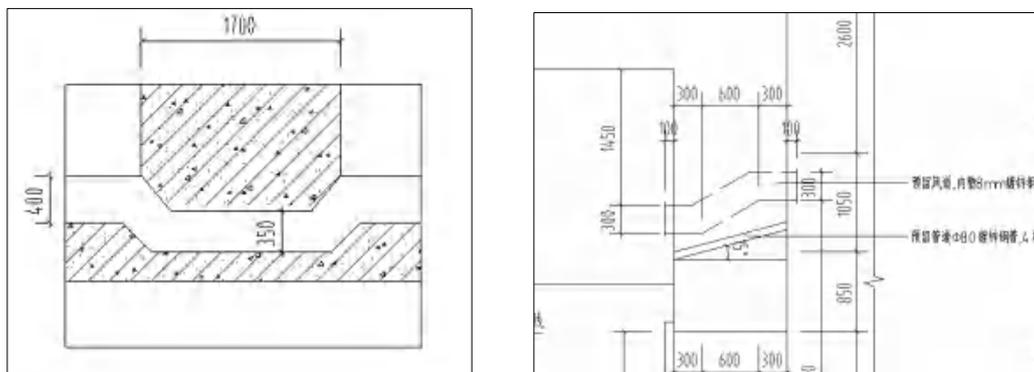


图 10-16 直线加速器机房线缆及通风管道穿墙管道剖面图

(8) 辐射安全警示措施：在防护门外拟安装工作状态指示灯和电离辐射警告标志，防护门粘贴放射防护注意事项，其中工作状态指示灯具备开机、停机指示。直线加速器机房辐射安全设施布局示意图见图 10-17。

(9) 个人防护监测设备配备

放疗科拟配备 1 台 X、 γ 辐射巡测仪，为直线加速器机房配备铅衣、铅帽等防护用品 1 套和个人剂量报警仪 2 台。医院辐射工作人员进入直线加速器机房前，在控制室内通过控制台、安装在机房内的监控设备等方式确定加速器已停止出束后方可进入加速器机房，进入加速器机房时佩戴个人剂量报警仪和个人剂量计。在日常没有使用时，防护用品、监测仪和报警仪应该存放在机房外合适区域，做好标记，由专人负责日常的管理和定期检查有无损坏。

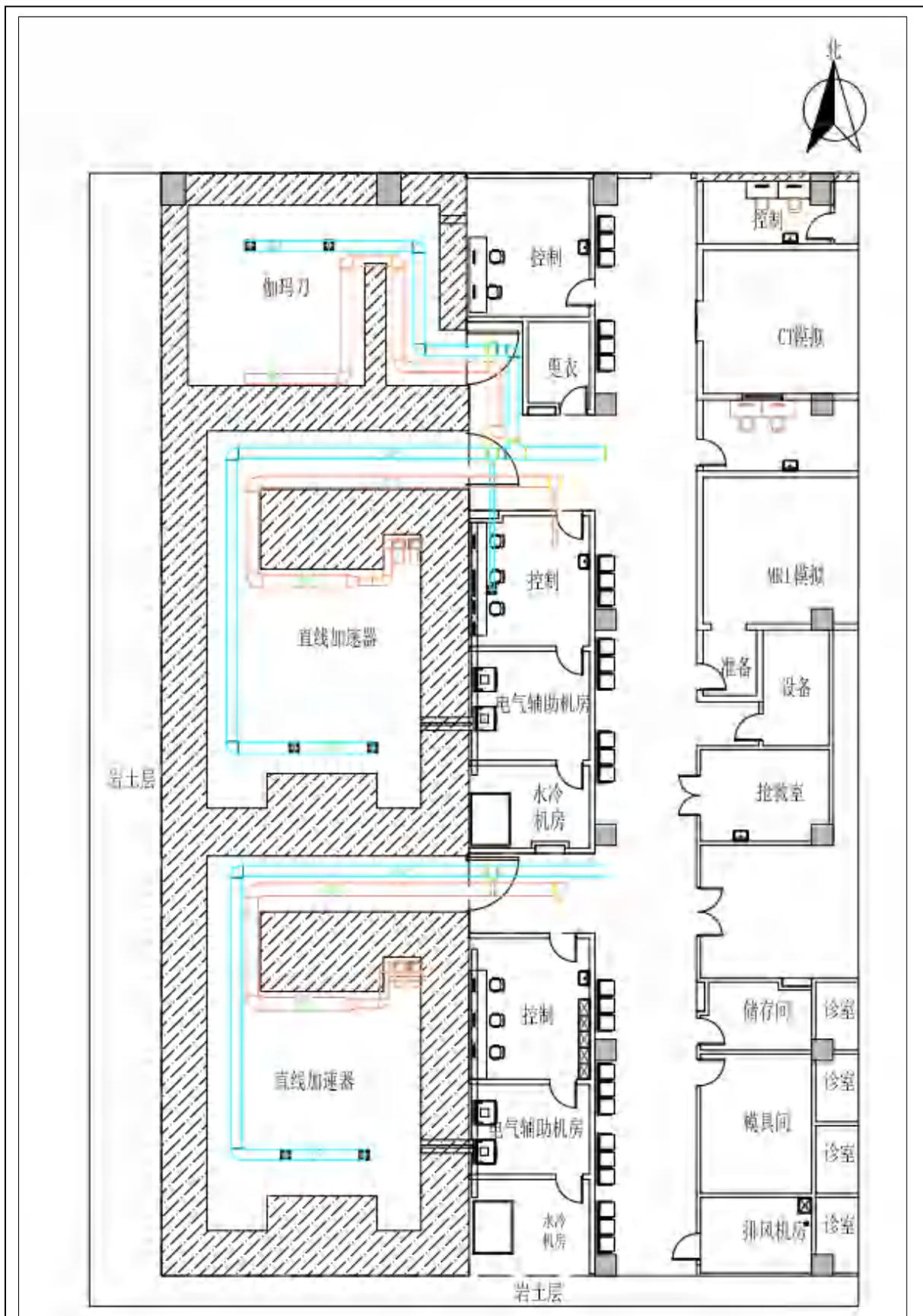
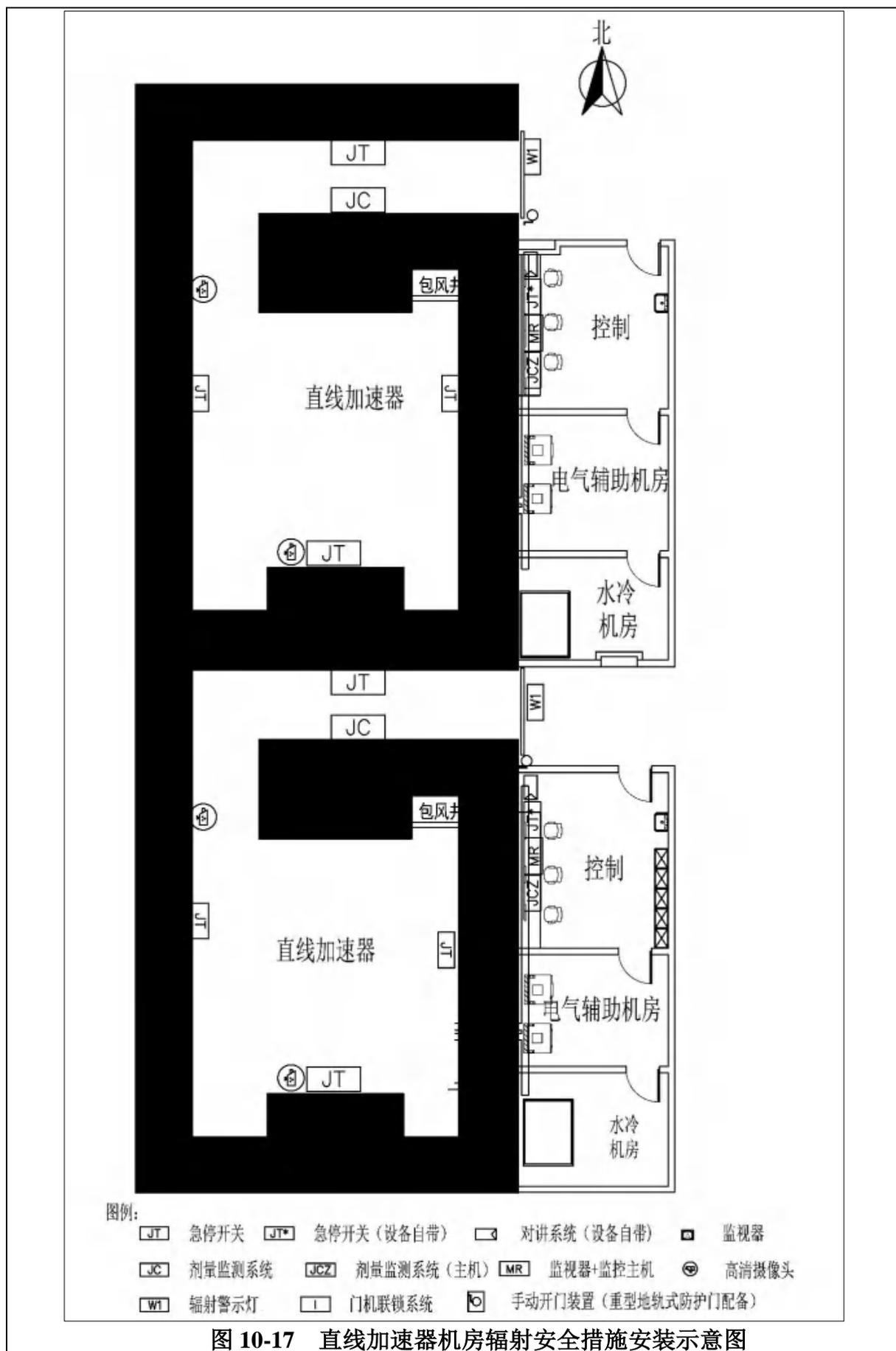


图 10-15 直线加速器及伽玛刀机房通风管道布设图



10.1.2.11 伽玛刀安全控制措施

(1) 穿墙管道：伽玛刀机房的控制电缆均拟布设于电缆沟内，电缆沟埋设在地下，电缆沟下穿防护墙进入设备间，采用了“U”型穿墙方式从迷路外墙地下穿过墙体。

伽玛刀机房的通风口位于迷道上方，采用 45°穿墙的方式（见图 10-18）。进风口设在放射治疗机房上部，排风口设在治疗机房下部，进风口与排风口位置应对角设置，机房设置强制排风，通风管道示意图见图 10-17。

根据设计单位提供的资料，伽玛刀机房的通风换气次数可达 6 次/h，能满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中“治疗室通风换气次数应不小于 4 次/h”的要求。

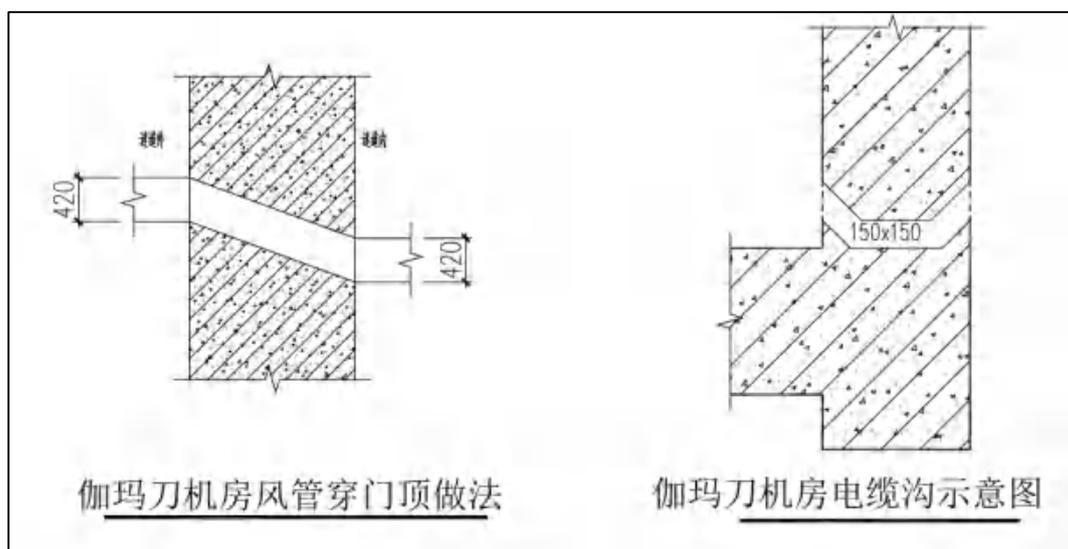


图 10-18 伽玛刀机房风管及电缆沟穿墙示意图

(2) 安全联锁装置和急停开关：伽玛刀设备安装门机联锁装置，治疗机房有从室内开启治疗室机房门的装置，防护门应有防挤压功能，伽玛刀设备控制台、设备表面人员易触及位置以及机房内不同方向的墙面各设置一个急停开关，见图 10-19。

(3) 源项控制：本项目拟使用的 ^{60}Co 放疗设备是 γ 射线治疗装置，在治疗机机头部是 ^{60}Co 放射源的贮存和照射部分，机头使用 400mm 以上厚度的铸铁屏蔽防护措施，在源未开启时，可有效屏蔽 γ 射线，对环境基本没有影响。开启使用时，根据治疗范围的不同，可通过机头自身设置的准直器防护措施，使其 γ 射线泄露辐射不超过相关规定的限值。

(4) 监视和对讲装置：控制室内设有在实施治疗过程中观察患者状态、治疗床和迷路区域情况的视频装置，还设置对讲交流系统，以便操作者和患者之前进行双向交流。

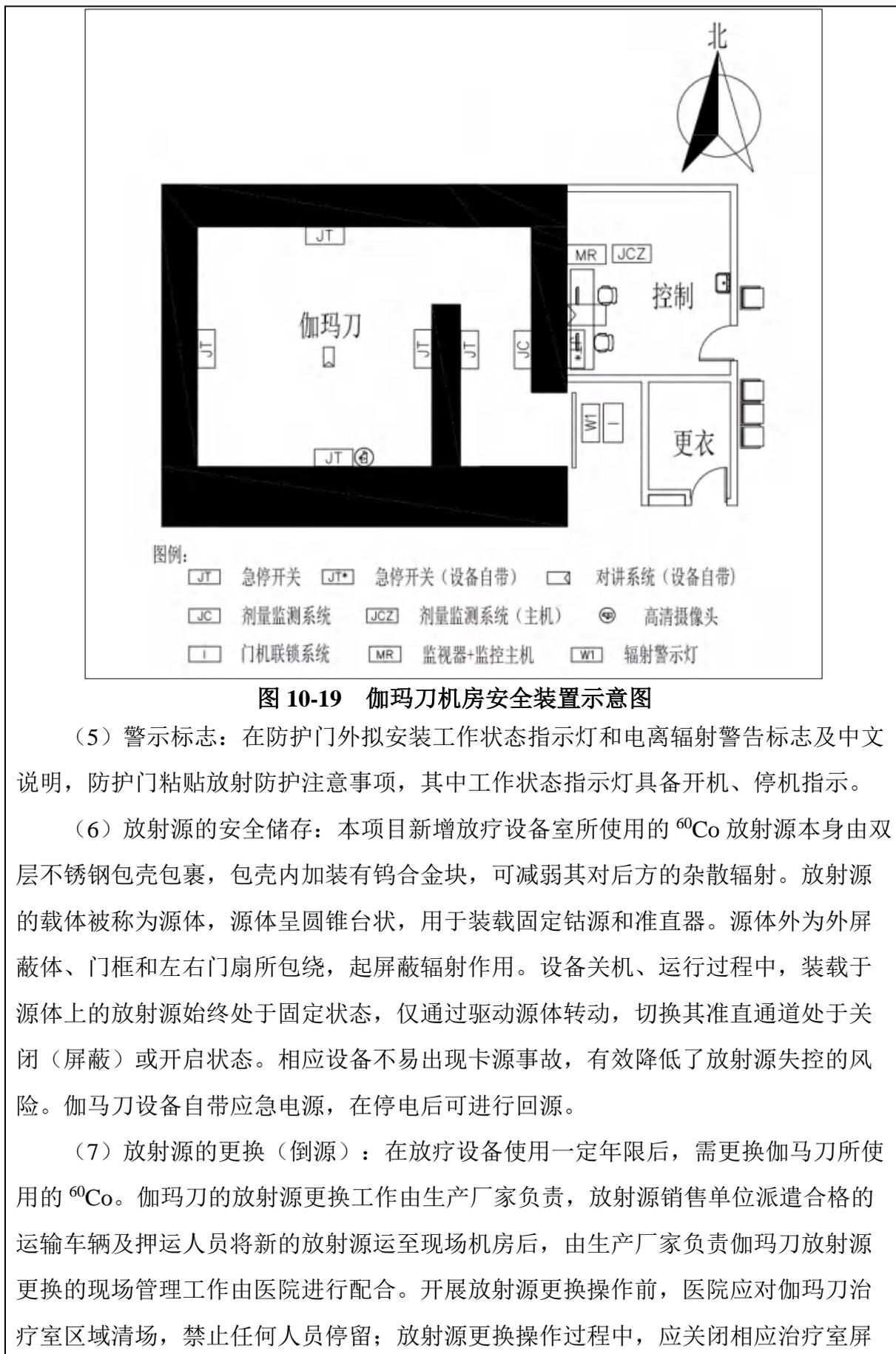


图 10-19 伽玛刀机房安全装置示意图

（5）警示标志：在防护门外拟安装工作状态指示灯和电离辐射警告标志及中文说明，防护门粘贴放射防护注意事项，其中工作状态指示灯具备开机、停机指示。

（6）放射源的安全储存：本项目新增放疗设备室所使用的⁶⁰Co放射源本身由双层不锈钢包壳包裹，包壳内加装有钨合金块，可减弱其对后方的杂散辐射。放射源的载体被称为源体，源体呈圆锥台状，用于装载固定钴源和准直器。源体外为外屏蔽体、门框和左右门扇所包绕，起屏蔽辐射作用。设备关机、运行过程中，装载于源体上的放射源始终处于固定状态，仅通过驱动源体转动，切换其准直通道处于关闭（屏蔽）或开启状态。相应设备不易出现卡源事故，有效降低了放射源失控的风险。伽马刀设备自带应急电源，在停电后可进行回源。

（7）放射源的更换（倒源）：在放疗设备使用一定年限后，需更换伽马刀所使用的⁶⁰Co。伽马刀的放射源更换工作由生产厂家负责，放射源销售单位派遣合格的运输车辆及押运人员将新的放射源运至现场机房后，由生产厂家负责伽马刀放射源更换的现场管理工作由医院进行配合。开展放射源更换操作前，医院应对伽马刀治疗室区域清场，禁止任何人员停留；放射源更换操作过程中，应关闭相应治疗室屏

蔽防护门，放射源更换操作结束前，禁止任何人员入内。

(8) 废旧放射源处理：放射源更换操作（倒源）产生的废旧放射源由放射源销售单位负责处置。伽玛刀源体内的废旧放射源导出后，装入储源铅罐并由放射源销售单位运回，按照废旧放射源处理规定进行处理。医院在购置放射源同时，应与放射源销售单位签订废旧放射源回收协议。

(9) 监测设备：放疗科配备有 X、 γ 辐射巡测仪，伽玛刀机房配备 1 台个人剂量报警仪；同时系统自带固定式剂量报警仪，探头安装在治疗室内，剂量显示器安装在控制室内可以实时检测治疗室内的辐射剂量情况，并能设定报警阈值，对超过设定值的剂量数值发出声光报警信号，提醒工作人员受到照射，固定式剂量报警仪监测结果显示在控制室内，便于操作人员观察，此外放射源还安装有放射源在线监控装置。

10.1.2.12 后装机安全控制措施

(1) 穿墙管道：后装机的电缆均通过电缆沟走线，采用 U 型方式穿越屏蔽墙体到达机房外，保证不减弱屏蔽墙体的屏蔽效果。通风管道采用斜向 45° 设计穿过机房屏蔽墙，电缆沟、通风管道穿过屏蔽墙的设计方案见图 10-20。

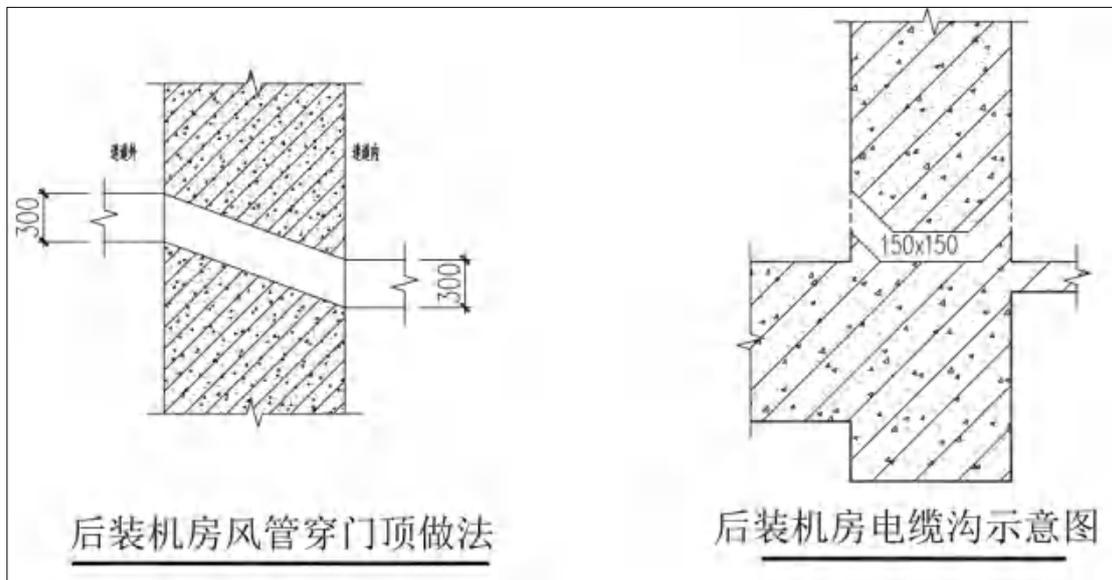


图 10-20 后装机通风管及电缆沟做法示意图

(2) 通风设计：后装机房的新风口设在房间天花板处，排风口设在房间内新风口的对角线，距离地面约 30cm 处，通风设计基本满足“高进低出、对角设置”的要求。后装机房通风管线设计见图 10-21。

根据设计单位提供的资料，后装机机房的通风换气次数可达 6 次/h，能满足《放

射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中“治疗室通风换气次数应不小于4次/h”的要求。

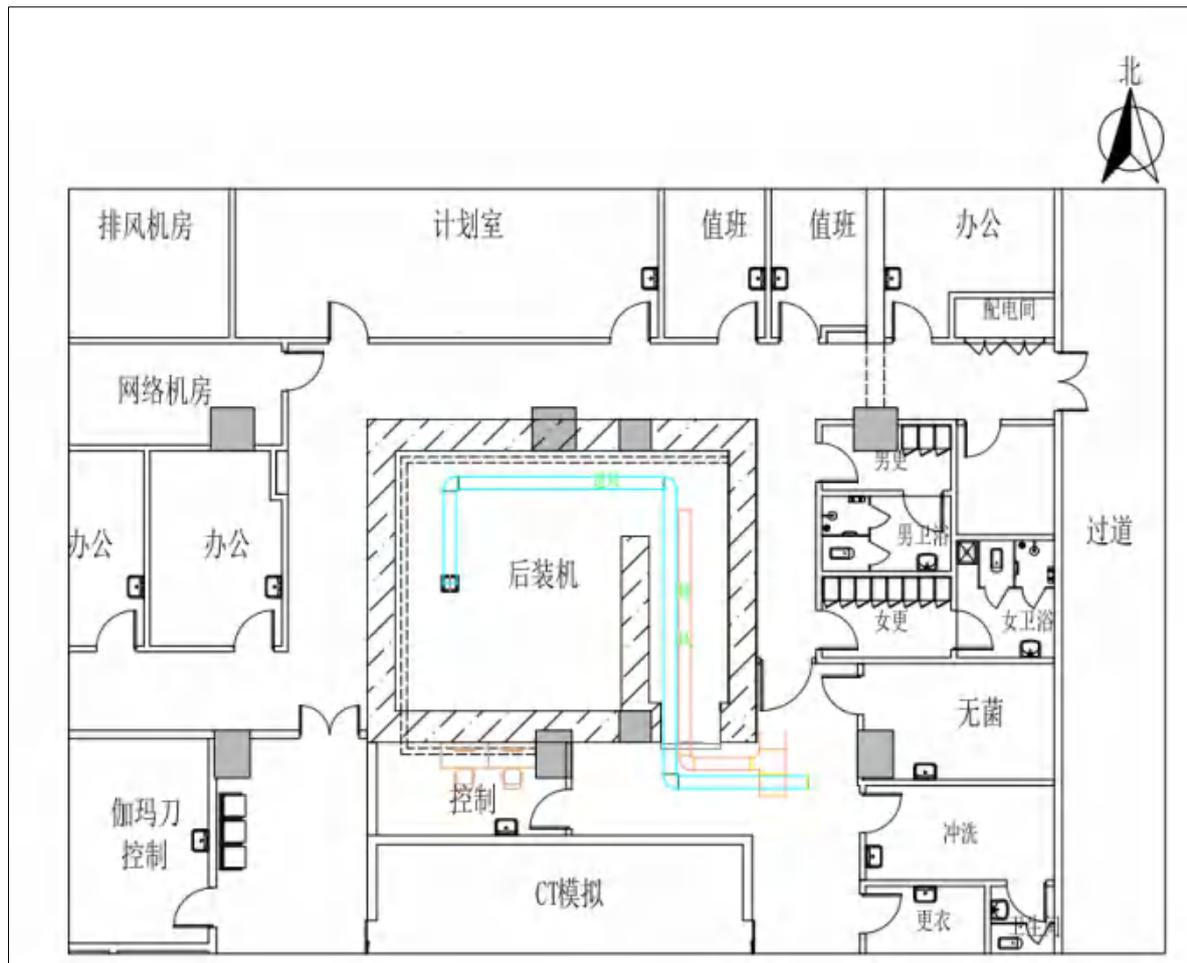


图 10-21 后装机通风管道布设图

（3）急停开关：治疗机房有从室内开启治疗室机房门的装置，防护门应有防挤压功能，后装机设备控制台、设备表面人员易触及位置以及机房内不同方向的墙面各设置一个急停开关。在紧急情况下，按下任一急停按钮均能够使放射源迅速返回贮源器，紧急情况处理完毕，急停按钮复位后，后装机才能重新启动。

（4）安全联锁装置：后装机设备安装门机联锁装置，治疗过程中，意外开门时，系统将自动收回放射源至贮源器，治疗机房有从室内开启治疗室机房门的装置，防护门应有防挤压功能。

（5）手动开门装置：医院拟为后装机房安装手动开门装置，在停电或设备故障等情况下，防护门可以手动打开。

（6）监视和对讲装置：控制室内设有在实施治疗过程中观察患者状态、治疗床和迷路区域情况的视频装置，还设置对讲交流系统，以便操作者和患者之前进行双

向交流。

(7) 辐射监测设施：后装机房内将设置辐射剂量率监测设施，并将监测水平实时显示在控制台上，操作人员可以在控制台上通过辐射剂量率的监测显示判断放射源由工作贮源器内输出和返回贮存位置的状态，放疗科配备有 X、 γ 辐射巡测仪，后装机工作人员配备个人剂量报警仪，进入治疗室佩戴，此外放射源还安装有放射源在线监控装置。

(8) 辐射安全警示设施：在防护门拟安装工作状态指示灯和电离辐射警告标志及中文说明，防护门粘贴放射防护注意事项，其中工作状态指示灯具备开机、停机指示。

(9) 防护应急装备：后装机治疗室内配备一个铅储源容器、一个长柄镊子。

(10) 开关门控制系统：机房门内迷道入口处设置开门控制系统，确保一旦有患者家属或维修人员误关在机房内时能及时开门离开；门外设置关门控制系统，控制室内设置具备开、关门功能的控制系统。

本项目后装机安全装置位置图见图 10-22。

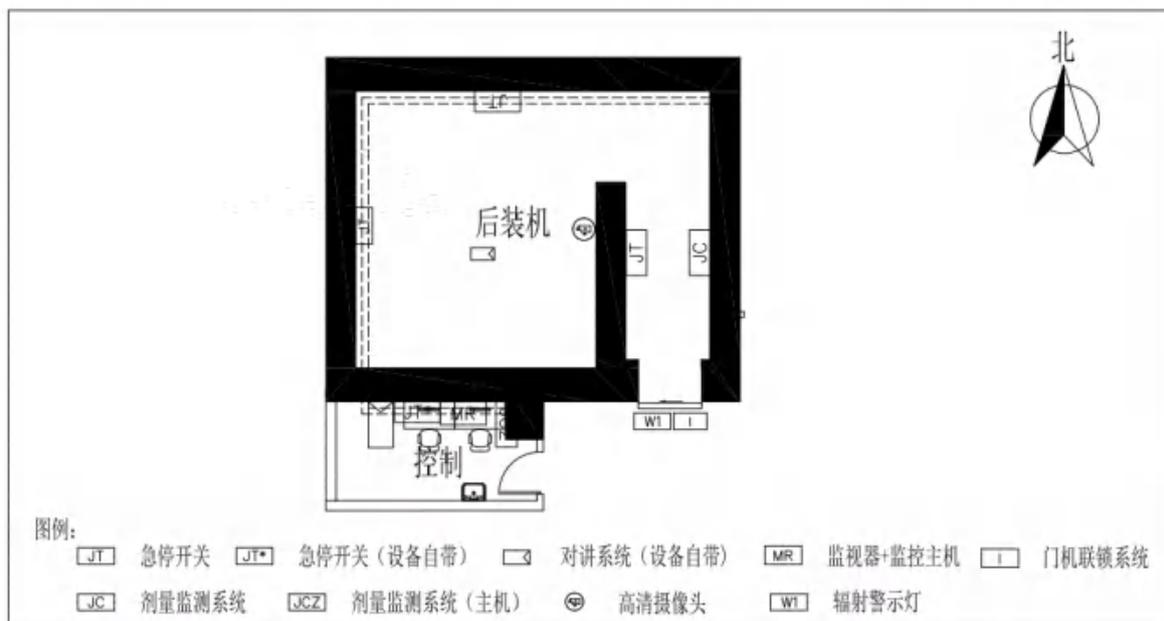


图 10-22 后装机摄像、急停按钮等安全装置位置图

10.1.2.13 DSA 安全控制措施

(1) 在 DSA 机房门口应设置明显的放射性警告标识和中文警示说明，机房内应张贴检查室管理制度、应急预案等规章制度，候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。

(2) 机房门外应设置醒目的工作状态指示灯，指示灯的灯箱上应设有“射线有害，灯亮勿入”的警示语句；机房门应有闭门装置，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动。

(3) 放射性工作人员进出门采用光电感应或者脚踏式开关；病人进出门为不锈钢铅防护电动推拉门，推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施，且应设置防夹装置。

(4) 放射工作人员配备铅当量不小于 0.5mmPb 医用铅防护帽、0.50mmPb 医用铅围脖 0.5mmPb 医用铅防护衣、0.5mmPb 铅眼镜、0.025mmPb 介入防护手套等个人防护用品。对病人病灶进行照射时，将病人病灶以外的部位用防护用品（其中儿童铅当量不小于 0.5mmPb）进行遮盖，避免病人受到不必要的照射；

(5) DSA 机房设置动力排风装置，手术室内设置多个排风口，每小时换气次数为 6 次，防止机房空气中臭氧和氮氧化物等有害气体累积。

(6) ^{90}Y 树脂微球手术配备专用的防护配件

^{90}Y 树脂微球手术专用的防护配件是为了满足放射安全的基本原则以及协助手术中处理 ^{90}Y 树脂微球产品而设计的，使用有机玻璃和铅材料，此外，为防止放射性污染，需要在手术中可能存在放射性污染的地面粘贴一次性铺巾。导管的接头下方需放置双层铺巾，以防止手术中发生放射性污染， ^{90}Y 手术专用防护用品配件见表10-19。

表10-19 ^{90}Y 树脂微球手术专用的防护配件一览表

序号	防护用品	数量	备注
1	传输系统防护	1套/手术	一次性用品，手术完成后，集中收集送至医废间专用的放射性废物桶
2	15mm有机玻璃V架	1个/手术	
3	西林瓶的防护罐	1个/手术	
4	15mm有机玻璃注射器防护套	1个/手术	
5	3mmPb的铅玻璃	1个/手术	
6	一次性铺巾	按需配置	容纳任何意外泄漏的污染物

10.2 三废的治理

10.2.1 废气

10.2.1.1 核医学科放射性废气

设计单位对核医学科进行了整体的新风和排风系统设计，结合建筑排风竖井的情况，实施核医学科废气的室外高空排风。

核医学工作场所保持良好的通风，工作场所的气流流向遵循自清洁区向监督区

再向控制区的方向，保持工作场所的负压和各区之间的压差，防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

碘-131 治疗病房设有单独的通风系统，病房的门窗有封闭措施，保持治疗区域内的负压，治疗区的空气经单独的排气管道经过高效活性炭吸附装置过滤后高空排放。放射性药物的分装以及挥发性放射性核素的操作都在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，手套箱和通风橱均设计单独的排风系统并有一定的通风能力。镓气体发生器室采用专用排风系统。

核医学科通风设计图见图 10-23。

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

10.2.1.2 放疗科非放射性废气治理措施

医用电子直线加速器机房、后装机机房、伽玛刀机房废气主要为臭氧及氮氧化物，分别设置通风系统通过独立管道引至医院排风井排放。

10.2.2 固体废物

10.2.2.1 放射性固体废物

（1）固废产生量

①显像检查：废弃的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器根据数量每半年或一年由供货商回收处置，沾有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记液的分装瓶及沾染 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{201}Tl 、 ^{123}I 、 ^{188}Re 等放射性药物的手套、棉签、口罩及废活性炭等，存入注射室脚踏式铅桶（10mm 铅当量），之后暂存于固废暂存间放射性衰变箱（10mm 铅当量）内。

注射后等候室、留观室均设置有脚踏式铅桶（10mm 铅当量）收集患者诊断、候诊过程产生的放射性固废，之后暂存于固废暂存间放射性衰变箱（10mm 铅当量）内。

上述含放射性固废在废物间暂存至解控水平后，运至医院医疗废物暂存间，最

终交有资质单位进行处置，放射性固体废物产生量约 50kg/a。

③¹³¹I 分装室、服药室：产生含 ¹³¹I 废物（如一次性口杯、棉签、含 ¹³¹I 的废活性炭等固体废物）约 20kg/a。

④核医学科病房：产生含 ¹³¹I、¹⁷⁷Lu、⁹⁰Y 等核素的废物（患者住院期间产生的含有 ¹³¹I、¹⁷⁷Lu、⁹⁰Y 等核素的生活垃圾）约 100kg/a。

⑤籽源手术室（ECT1 机房）：籽源均为按照约定数量装枪好的，现场不进行分装、消毒，多余的籽源留在枪中，有生产厂家回收，不产生废放射源。

⑥敷贴室：⁹⁰Sr-⁹⁰Y 敷贴器经一段时间的使用后，其活度会降低至不适宜用于治疗，届时建设单位拟对不能使用的 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 敷贴器进行密封放射源退役处置，退役的密封放射源由生产厂家回收。

⑦⁹⁰Y 手术室：在 ⁹⁰Y 介入手术过程中会产生沾染了 ⁹⁰Y 的空药瓶、一次性输入装置（包括：无菌管组、无菌瓶、注射活塞、注射器）、一次性防护用品（包括：手套、口罩、纱布、手术洁净服）和一次性铺巾、垫巾等，年产生量约 5kg。

⑧放疗科：当放射源的活度不能满足放疗治疗工作或因医院不再进行放射治疗时放射源将进行更换或报废，放射源的更换由专业技术人员进行，更换或报废的放射源由厂家进行回收。

（2）放射性固体废物处置措施

放疗科和敷贴使用的放射源，当活度不能满足放疗治疗工作或因医院不再进行放射治疗时放射源将进行更换或报废，放疗科的放射源的更换由专业技术人员进行，所有更换或报废的放射源由厂家进行回收。

核医学科及 ⁹⁰Y 介入手术产生的放射性固体废物主要由带放射性核素的一次性水杯、一次性手套、污染的针头、注射器、棉棒、破碎的玻璃器皿、废活性炭等，铅桶内放置塑料袋，注射器和破碎玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物先装入硬纸盒或其他包装材料中，然后再装入塑料袋内，之后存入固废间的废物暂存柜。放射性废物与非放射性废物严格分开收集，确保不扩大污染，避免交叉污染。

核医学科配备放射性废物衰变桶，污物桶内拟放置专用塑料袋直接收纳废物，装满后的废物袋密封，废物衰变桶收集放射性固体废物后，将放射性固体废物转移至放射性废物暂存间的放射性废物柜内。

对注射器和玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入硬纸盒或其它包

装材料中，然后装入专用塑料袋内。每袋废物的表面剂量率不超过 0.1mSv/h，重量不超过 20kg，并在污物衰变桶上标有废物类型、核素种类、比活度水平和存放日期等内容。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/cm²、 β 表面污水小于 0.8Bq/cm²，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。

10.2.2.2 其他固废处置措施

直线加速器靶物质经常长期照射后，也可积累一定量的感生放射性核素，因此，退役的废靶件应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固体废物暂存间衰变暂存，最终交加速器生产厂家或有资质的单位收贮。

本项目产生的办公、生活垃圾依托医院大楼拟建设的收集系统进行回收后由当地环卫部门清运。

10.2.3 放射性液体废物

10.2.3.1 放射性废液

(1) 放射性液体产生量

①显像检查：每天接受 PET 显像检查的病人最大为 38 人，其中 ¹⁸F 显像检查最多为 30 人/天，⁶⁸Ga、⁸⁹Zr、⁶⁴Cu、¹²⁴I 显像检查最多各为 2 人/天。每天接受 ECT 显像检查的病人最大为 107 人，其中 ^{99m}Tc 显像检查最多为 100 人/天、²⁰¹Tl 显像检查最多为 5 人/天、¹²³I 显像检查最多为 1 人/天，⁵¹Cr 显像检查最多为 1 人/天。

⁵¹Cr 的半衰期较长且每天检查患者人数最多 1 名，接受 ⁵¹Cr 检查的患者在独立的卫生间进行候诊，该部分的废水单独收集。

为减少放射性废水的产生，在进行显像检查前医院要求患者先进行排尿，显像检查患者在检查期间平均排尿 1 次，参考《节水型卫生洁具》（GB/T31436-2015），节水型蹲便器平均用水量为 6L，患者排泄物 0.3L。根据西安交通大学医学院第一附属医院现有核医学科运行情况，进行 ECT 显像检查的患者不需要留观，进行 PET 显像检查的患者因为扫描成像清晰度原因，需要留观，留观考虑产生一次排泄物的收集。

经计算，显像检查产生的短半衰期放射性废水约 1140.3L/d，长半衰期（⁵¹Cr）放射性废水约 12.6L/d。

②核医学病房：核医学科病房区分两部分，一部分为甲癌病区，一部分为其他核素治疗病区。其中甲癌病区设置 4 间（8 床）病房，其他核素治疗区设置 ¹⁷⁷Lu 病

房 1 间（3 床），粒籽植入病房 1 间（1 床）和 ^{90}Y 病房 1 间（1 床）。

根据西安交通大学医学院第一附属医院现有核医学科住院病房用水情况（现有核医学科住院病房平均每天的用水定额为 80~100L/床·日），计算核医学科病房区（13 床）用水总量最大为 1300L/日。

综上，核医学科进入衰变池总废水量为 2452.9L/d，其中显像检查产生的短半衰期放射性废水约 1140.3L/d，长半衰期（ ^{51}Cr ）放射性废水约 12.6L/d；病房区产生的放射性废水约 1300L/d。

（2）放射性废水处理措施

衰变池用于储存衰变显像检查、放射性药物治疗以及放射性药物生产工作场所产生的放射性废水。

①衰变池选址

核医学科衰变池位于综合楼南侧的绿化用地，衰变池周围环境图见图 10-24。衰变池为全地下设置，衰变池上方为停车场。核医学科衰变池选址属于人员较少居留或经过位置，因此从辐射防护考虑，选址合理。

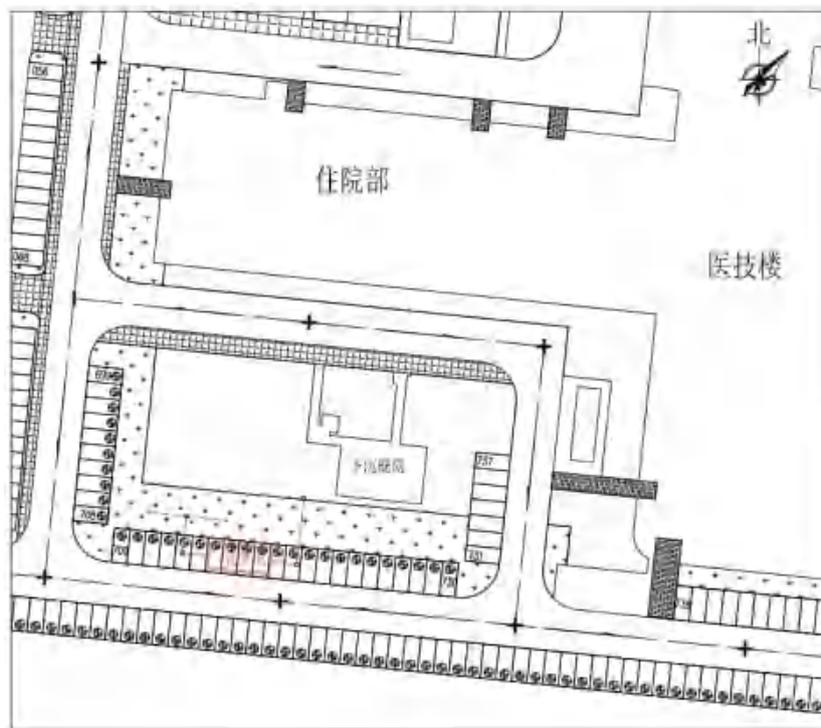


图 10-24 核医学科衰变池位置

②衰变池设计

考虑使用核素的半衰期，将需收集废水分为 A 类、B 类和 C 类，A 类废水主要为显像检查短半衰期核素产生的废水，通过地下二层的管道井输送到衰变池，B 类

废水主要为核医学科病房区域产生的废水，通过地下二管道井排入衰变池，C类废水主要为显像检查长半衰期核素产生的废水，通过地下二层的管道进输送到衰变池，衰变池长33m，宽9.3m。衰变池整体结构采用钢筋混凝土结构，池顶井盖使用含铅铸铁井盖。池体壁为20cm混凝土，地板为25cm混凝土，顶板为15cm混凝土，内壁加20mm高纯度硫酸钡砂浆防护，池体坚硬、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施，衰变池池体表面设置有保护层。衰变池平面图见图10-25。

衰变池内有压力传感器和限位开关，压力传感器可以感应水位高度，限位开关可以设定水位高度，水位高度一般有三个高度，第一个高度为最低限位，第二个高度为报警限位高度，第三个高度为最高限位，最低限位为衰变池排水最低高度，当衰变池排水水位到此高度时，可以进行报警警示，排水阀自动关闭，排水停止。第二个报警限位高度为当水位到达此高度时，会进行报警警示，同时衰变池进水管阀门自动关闭，防止水位过高。第三个最高限位为当报警限位高度发生故障失灵时，水位到达此限位时，衰变池进水管阀门会自动关闭，禁止废水进入衰变池。此三个限位高度防止衰变池水位过高或过低，保证衰变池的自动运行。

衰变池由A类、B类、C类组成，A类放射性废水衰变水池由化粪池和衰变池组成，化粪池2组每组容积 10m^3 ，化粪池平时运行一组，在化粪池清掏时，关闭正在运行的化粪池进水阀门，开启另一组阀门启用另一组化粪池，关闭的化粪池需要在30d后方可清掏排空，两组化粪池轮序运行。衰变池三组，每组 50m^3 ，衰变水池为轮序使用第一组存满后开启第二组衰变池，第二组存满后开启第三组衰变池，第三组存满后开启第一组泄水阀，自流至污水提升泵井，自动排空，关闭排水阀，开启进水阀。

B类放射性废水衰变水池由化粪池和衰变池组成，化粪池2组每组容积 10m^3 ，衰变池4组每组容积 82m^3 。化粪池平时运行一组，在化粪池清掏时，关闭正在运行的化粪池进水阀门，开启另一组阀门启用另一组化粪池，关闭的化粪池需要在180d后方可清掏排空，两组化粪池轮序运行。衰变水池为轮序使用，当第一组衰变池达到最高水位时，关闭第一组进水阀，开启第二组的进水阀依次轮序，当第四组衰变池贮存满后，开启第一组衰变池的排水阀，自流至污水提升泵井，自动排空，关闭排水阀，开启进水阀。

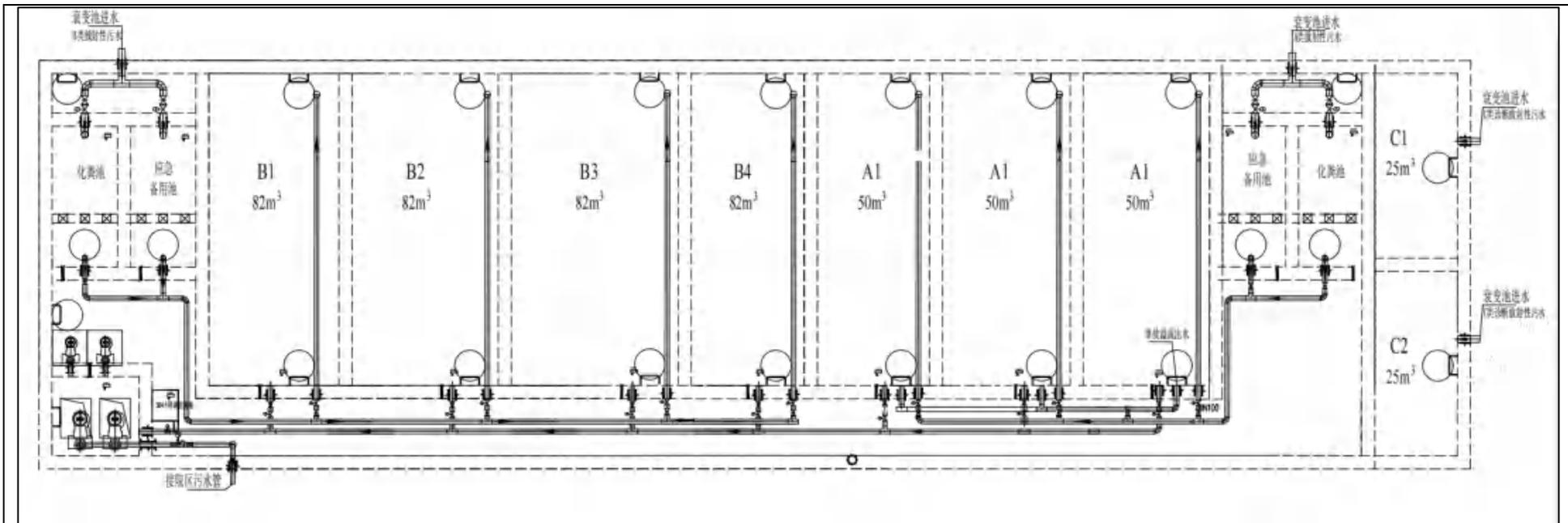


图 10-25 衰变池平面图

C 类放射性废水衰变水池有 2 组衰变池组成，每组容积 25m^3 ，衰变水池为轮序使用。

衰变池出口所接检查井内设监测取样点，在线监测，在放射性污水处理设施排放口设置监测取样点，满足总 $\alpha < 1\text{Bq/L}$ ，总 $\beta < 10\text{Bq/L}$ 的要求后排放。

③放射性废水管道敷设及防护措施

放射性废水管道埋地管道不额外进行防护，非埋地管道均采用包裹铅皮防护作为补偿。

④放射性废水管道走向布置

核医学科的放射性废水管道布置图见 10-26。由图可知，PET 候诊区及留观室产生的放射性废水通过 PET 候诊区西侧的管道井沿地下二层屋顶管道敷设后由地下二层管道井排至室外 A 类衰变池，ECT 候诊区产生的放射性废水与污洗区产生的废水通过地下二层管道井

排至室外 A 类衰变池。

ECT 候诊区长半衰期等候区卫生间产生的放射性废水，向北通过地下二层诊疗长半衰期排水提升排至室外 C 类衰变池。

核医学科所有住院病房的废水经收集后，沿南侧排水管道排往 B 类衰变池。

同时环评建议放射性废水收集的管道走向、阀门和管道的连接应设计成尽可能少的死区，下水道宜短，大水流管道应有标记，避免放射性废水集聚，便于检测和维修。放射性废水管道，应由文字标记和流动方向标记，衰变池显著位置应设电离辐射警示标志，不同存储池应进行编号标记。

⑤衰变池容积可行性估算

A 类衰变池的容积为 150m^3 ，B 类衰变池的容积为 328m^3 ，C 类衰变池的容积为 50m^3 ，根据前文计算，A 类衰变水池的水量为 1140.3L/d ，进入 B 类衰变水池的水量为 1300L/d ，进入 C 类衰变水池的水量为 12.6L/d 。

根据《核医学科辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中有关规定“所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（含 ^{131}I 核算的暂存超过 180 天），检测结果经审管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。”本项目 A 类衰变池中暂存的核素，半衰期最长的为 ^{124}I ，10 个半衰期为 41.76d ，则经过 42d 产生放射性废水最大 48m^3 ；B 类衰变池中暂存 ^{131}I 、 ^{90}Y 、 ^{177}Lu 及粒籽植入患者住院产生的废水，按照暂存超过 180 天核算，产生放射性废水 234m^3 。C 类衰变池中暂存的核素，半衰期最长的为 ^{51}Cr ，10 个半衰期为 270.71d ，经过 271d 产生放射性废水最大产生放射性废水 3.41m^3 。

A 类衰变池的容积为 150m^3 ，衰变池由 3 格衰变池组成，每格衰变池的容积为 50m^3 ，单格衰变池可贮存放射性废水 43.84d ，则第 3 格衰变池存满后，第 1 格衰变池可满足暂存 41.76d 的要求，衰变池容积能满足放射性废水的贮存需求。

B 类衰变池的容积为 328m^3 ，衰变池由 4 格衰变池组成，每格衰变池的容积为 82m^3 ，单格衰变池可贮存放射性废水 61.53d ，则第 4 格衰变池存满后，第 1 格衰变池可满足暂存 180d 的要求，衰变池容积能满足放射性废水的

贮存需求。

C类衰变池的容积为 50m^3 ，衰变池由2格衰变池组成，每格衰变池的容积为 25m^3 ，单格衰变池可贮存放射性废水1984.12d，则第2格衰变池存满后，第1格衰变池可满足暂存271d的要求，衰变池容积能满足放射性废水的贮存需求。

放射性废液经专用排污管道进入到衰变池，在贮存衰变后，总 β 放射性满足《医疗机构水污染排放标准》(GB18466-2005)中规定的总 β 放射性 $<10\text{Bq/L}$ 的要求后经审管部门核准后，可作普通废液处理。

10.2.3.2 其他废水处置措施

加速器设备中使用的内循环冷取水可能产生感生放射性。在加速器运行时，循环水系统的某一部分可能使附近的操作人员受到照射。因此，循环水系统尽量避开可能使工作人员受到照射的地方。冷却水中被活化形成的放射性核素主要为 ^{15}O 、 ^{13}N ，它们的半衰期分别是2.1min和7.3s，半衰期较短，只需放置一定时间后其活度就可以衰减到较低水平。

医护人员产生的生活污水经医院污水管网收集后排入医院污水处理站处理达标后排入市政污水管网。

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

本项目辐射工作场所土建工程属于“西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院项目”建设内容之一，其施工期环境影响包含在《西安交通大学医学院第一附属医院国际港务区医院项目环境影响报告书》中，本次评价简要分析环境影响。

1、建设阶段对环境的影响

本项目施工期主要为防护设施安装和装修装饰，施工期短，施工范围小，通过对施工时段的控制以及施工现场严格管理等手段，可使本项目施工期环境影响的范围和强度进一步减小。施工结束后，项目施工期环境影响随之消除。因此，本次评价不对施工期的环境影响进行具体分析。

2、设备安装调试期间的环境影响分析

设备的安装、调试应由设备厂家专业人员进行，医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，禁止无关人员靠近。人员离开时各机房必须上锁并派人看守。设备安装调试阶段，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。由于各设备的安装和调试均在机房内进行，经过墙体的屏蔽和距离衰减后对环境的影响是可接受的。设备安装完成后，医院方需及时回收包装材料及其它固体废物并作为一般固体废物进行处置，不得随意丢弃。

综上所述，只要工程施工期严格做到以上要求，就可以使其对环境的影响降至最小程度。施工结束后，项目施工期环境影响将随之消除。

11.2 运行阶段对环境的影响

11.2.1 核医学科

根据工程分析可知，项目运行阶段环境影响主要为PET-CT和SPECT-CT中CT部分在出束时产生的X射线，放射性核素（ ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等）在使用过程中产生的 γ 射线、 β 表面污染、放射性“三废”等对医务人员和公众产生的外照射。

11.2.1.1 工作场所辐射影响分析

(1) X射线影响分析

①机房空间符合性分析

项目PET-CT、SPECT-CT机房（按CT部分评价）使用面积及最小单边长度符合性分析详见表11-1。

表11-1 机房使用面积及最小单边长度符合性分析一览表

机房名称	参数	设计值	评价标准 ^注	是否符合
PET-CT 机房	使用面积	54.39m ²	≥30m ² （按 CT 评价）	符合
	最小单边长	6.46m	≥4.5m（按 CT 评价）	符合
ECT1 机房	使用面积	52.71m ²	≥30m ² （按 CT 评价）	符合
	最小单边长	6.26m	≥4.5m（按 CT 评价）	符合
ECT2 机房	使用面积	54.22m ²	≥30m ² （按 CT 评价）	符合
	最小单边长	6.44m	≥4.5m（按 CT 评价）	符合

注：评价标准依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）。

根据表11-1可知，项目PET-CT、SPECT-CT机房使用面积及最小单边长度满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中CT机房相关要求。

②机房防护屏蔽设计符合性

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020），项目PET-CT、ECT机房X射线防护屏蔽措施符合性分析见表11-2。

表11-2 机房X射线防护屏蔽措施符合性分析一览表

机房名称	屏蔽部位	屏蔽材料及规格	等效屏蔽 (mmPb)	标准要求 (mmPb)	是否 符合
ECT1 机房 (按 CT 部分评价)	北、南、东墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	4.2	≥2.5	符合
	西墙	370mm页岩实心砖墙	3	≥2.5	符合
	顶棚	300mm混凝土	4.29	≥2.5	符合
	底板	300mm混凝土	4.29	≥2.5	符合
	观察窗	4mmPb玻璃观察窗	4	≥2.5	符合
	防护门	4mmPb铅防护门	4	≥2.5	符合
ECT2 机房 (按 CT 部分评价)	北、东墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	4.2	≥2.5	符合
	南墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	4.2	≥2.5	符合
	西墙	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	4.2	≥2.5	符合
	顶棚	300mm混凝土	4.29	≥2.5	符合
	底板	300mm混凝土	4.29	≥2.5	符合
	观察窗	4mmPb玻璃观察窗	4	≥2.5	符合
PET-CT 机房 (按 CT 部分评价)	防护门	4mmPb防护门	4	≥2.5	符合
	四侧墙体	370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	4.2	≥2.5	符合
	顶棚	300mm混凝土	4.29	≥2.5	符合
	底板	300mm混凝土	4.29	≥2.5	符合
	观察窗	10mmPb玻璃观察窗	10	≥2.5	符合
	工作人员进出防	10mmPb防护门	10	≥2.5	符合

	护门				
	患者进出防护门	8mmPb防护门	8	≥2.5	符合

注：混凝土密度取 2.35g/cm³，参考《辐射安全手册》（潘自强），150kV 管电压下混凝土的什值层为 69.9mm，铅的什值层为 1mm，则 150kV 下 300mm 混凝土的铅当量相当于 4.29mmPb。根据《放射防护实用手册》（主编赵兰才、张丹枫）表 6.14：管电压 150kV 保守考虑，24cm 实心砖折算 2mmPb 当量，37cm 实心砖折算 3mmPb 当量。参考《放射防护实用手册》（主编赵兰才、张丹枫）表 6.14，实心砖密度取 1.65g/cm³，核算等效屏蔽厚度 37cm 实心砖折算为 3mmPb 当量；根据防护设计单位提供资料 140kV 下 10mm 高纯度硫酸钡砂浆相当于 0.6mmPb；

根据表 11-2 可知，项目 PET-CT、ECT 机房 X 射线的防护屏蔽措施满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中相关要求。

③辐射环境影响分析

1) 关注点的选取

关注点的选取主要考虑可能对放射工作人员或公众产生影响的区域，项目各关注点分布示意简图见图 11-1。

2) 各关注点剂量率估算

项目拟在 PET 机房内安装使用 1 台 PET-CT，CT 部分最大管电压 140kV、最大管电流 800mA；拟在 ECT 机房内安装使用 1 台 SPECT-CT，CT 部分最大管电压 140kV、最大管电流 500mA。

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中表 E.2，75%位数下，焦点处的剂量率最大为 60mGy（扫描时间 2s），本次评价保守按照 CT 扫描时，焦点处的最大剂量率为 1800mGy/min 考虑。

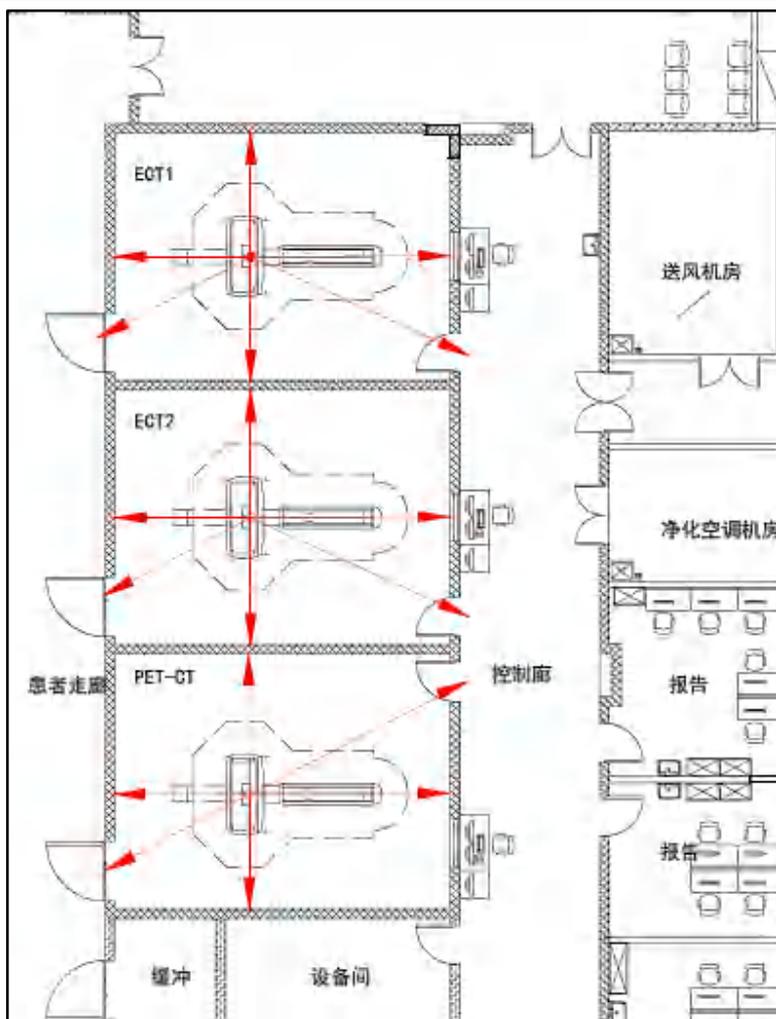


图 11-1 PET 及 ECT 计算点示意图

A. 泄漏辐射剂量率估

a. 估算方法

泄漏辐射剂量率计算公式参考《辐射防护手册第一分册 辐射源与屏蔽》（李德平、潘自强主编，原子能出版社，1987）。对于给定的屏蔽物质，屏蔽透射因子依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）附录 C 计算。

$$H = \frac{f \cdot H_0 \cdot B}{R^2} \quad \dots\dots\dots \text{（公式 11-1）}$$

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \dots\dots\dots \text{（公式 11-2）}$$

式中：f·H₀—泄漏辐射距焦点 1m 处的平均空气比释动能率，参考 GBZ130-2002 取 1000μGy/h；

R—靶点至关注点的距离，m；

B—屏蔽透射因子；

X——屏蔽体等效铅厚度，mmPb；

α 、 β 、 γ 为铅对 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数见表 11-3。

表 11-3 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

电压	材料	α	β	γ
140kV (CT)	铅	2.009	3.990	0.3420

注： α 、 β 、 γ 取值参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）附录 C。

b.估算结果

不同模式下，各关注点的泄漏辐射剂量率估算见表 11-4。

表 11-4 PET 和 ECT (CT 部分) 各关注点泄漏辐射剂量率计算结果一览表

机房	关注点位置描述	铅当量 (mm)	R (m)	B	H ($\mu\text{Gy/h}$)	
ECT1	东侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	3.90E-04
		观察窗外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
		防护门外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
	南侧	ECT2 机房	4.2	3.8	9.26E-06	6.41E-04
	西侧	防护墙外	3	4.87	1.21E-04	5.09E-03
		患者进出门外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
	北侧	患者走廊	4.2	3.8	9.26E-06	6.41E-04
	楼上	绿化带	4.29	6.0	7.67E-06	2.13E-04
楼下	停车场	4.29	2.1	7.67E-06	1.74E-03	
ECT2	东侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	3.90E-04
		观察窗外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
		防护门外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
	南侧	PET 机房	4.2	3.9	9.26E-06	6.09E-04
	西侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	3.90E-04
		患者进出门外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
	北侧	ECT1 机房	4.2	3.9	9.26E-06	6.09E-04
	楼上	绿化带	4.29	6.0	7.67E-06	2.13E-04
楼下	停车场	4.29	2.1	7.67E-06	1.74E-03	
PET-CT	东侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	3.90E-04
		观察窗外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
		防护门外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
	南侧	设备间、缓冲间	4.2	3.9	9.26E-06	6.09E-04
	西侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	3.90E-04
		患者进出门外	4	4.87	1.41E-05	5.94E-04
	北侧	ECT2 机房	4.2	3.9	9.26E-06	6.09E-04
	楼上	绿化带	4.29	6.0	7.67E-06	2.13E-04
楼下	停车场	4.29	2.1	7.67E-06	1.74E-03	

注：同侧防护门、防护窗的距离取最不利直线距离；设备安装位置为射线口距地面 0.8m

B. 散射辐射剂量率估算

a.估算方法

关注点处的散射辐射剂量率参考《辐射防护手册第一分册》（李德平、潘自强主编，原子能出版社，1987）中给出的公式计算。

$$H = \frac{H_0 \cdot \alpha \cdot B \cdot (S/400)}{(d_0 \cdot d_s)^2} \dots\dots\dots \text{（公式 11-3）}$$

式中：H—关注点处的患者散射剂量率，μGy/h；

H_0/d_0^2 —焦点处的最大剂量率，取 $1.08 \times 10^8 \mu\text{Gy/h}$ ；

α —患者对 X 射线的散射比，取 5.5×10^{-6} （取自 ICRP147，140kV 射线 90° 散射）；

S—散射面积，取典型值 400cm^2 ；

d_s —患者与关注点的距离，m；

B—屏蔽透射因子。

b.估算结果

不同模式下，各关注点处散射辐射剂量率计算结果见表11-5。

表 11-5 PET 和 ECT（CT 部分）各关注点散射辐射剂量率计算结果一览表

机房	关注点位置描述		铅当量 (mm)	d_s (m)	B	H (μGy/h)
ECT1	东侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	1.59E-04
		观察窗外	4	4.87	1.41E-05	2.41E-04
		防护门外	4	4.87	1.41E-05	2.41E-04
	南侧	ECT2 机房	4.2	3.8	9.26E-06	3.06E-04
	西侧	防护墙外	3	4.87	1.21E-04	5.50E-03
		患者进出门外	4	4.87	1.41E-05	6.42E-04
	北侧	患者走廊	4.2	3.8	9.26E-06	5.72E-04
	楼上	绿化带	4.29	6.0	7.67E-06	1.75E-04
楼下	停车场	4.29	2.1	7.67E-06	1.78E-03	
ECT2	东侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	1.59E-04
		观察窗外	4	4.87	1.41E-05	2.41E-04
		防护门外	4	4.87	1.41E-05	2.41E-04
	南侧	PET 机房	4.2	3.9	9.26E-06	3.06E-04
	西侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	4.22E-04
		患者进出门外	4	4.87	1.41E-05	6.42E-04
	北侧	ECT1 机房	4.2	3.9	9.26E-06	5.72E-04
	楼上	绿化带	4.29	6.0	7.67E-06	1.75E-04
楼下	停车场	4.29	2.1	7.67E-06	1.78E-03	
PET-CT	东侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	1.59E-04
		观察窗外	4	4.87	1.41E-05	2.41E-04

		防护门外	4	4.87	1.41E-05	2.41E-04
	南侧	设备间、缓冲间	4.2	3.9	9.26E-06	4.87E-04
	西侧	防护墙外	4.2	4.87	9.26E-06	4.22E-04
		患者进出门外	4	4.87	1.41E-05	6.42E-04
	北侧	ECT2 机房	4.2	3.9	9.26E-06	3.15E-04
	楼上	绿化带	4.29	6.0	7.67E-06	1.75E-04
	楼下	停车场	4.29	2.1	7.67E-06	1.78E-03

注：同侧防护门、防护窗的距离取最不利直线距离；设备安装位置为射线口距地面 0.8m

C.辐射有效剂量率

根据表 11-4~11-5 的计算结果，不同模式下各关注点处总的辐射有效剂量率见表 11-6。

表 11-6 PET 和 ECT (CT 部分) 各关注点总的辐射剂量率计算结果一览表

机房	关注点位置描述		泄漏辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	散射辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	总剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
ECT1	东侧	防护墙外	3.90E-04	1.59E-04	5.49E-04
		观察窗外	5.94E-04	2.41E-04	8.35E-04
		防护门外	5.94E-04	2.41E-04	8.35E-04
	南侧	ECT2 机房	6.41E-04	3.06E-04	9.47E-04
	西侧	防护墙外	5.09E-03	5.50E-03	1.06E-02
		患者进出门外	5.94E-04	6.42E-04	1.24E-03
	北侧	患者走廊	6.41E-04	5.72E-04	1.21E-03
	楼上	绿化带	2.13E-04	1.75E-04	3.88E-04
楼下	停车场	1.74E-03	1.78E-03	3.52E-03	
ECT2	东侧	防护墙外	3.90E-04	1.59E-04	5.49E-04
		观察窗外	5.94E-04	2.41E-04	8.35E-04
		防护门外	5.94E-04	2.41E-04	8.35E-04
	南侧	PET 机房	6.09E-04	3.06E-04	9.14E-04
	西侧	防护墙外	3.90E-04	4.22E-04	8.12E-04
		患者进出门外	5.94E-04	6.42E-04	1.24E-03
	北侧	ECT1 机房	6.09E-04	5.72E-04	1.18E-03
	楼上	绿化带	2.13E-04	1.75E-04	3.88E-04
楼下	停车场	1.74E-03	1.78E-03	3.52E-03	
PET-CT	东侧	防护墙外	3.90E-04	1.59E-04	5.49E-04
		观察窗外	5.94E-04	2.41E-04	8.35E-04
		防护门外	5.94E-04	2.41E-04	8.35E-04
	南侧	设备间、缓冲间	6.09E-04	4.87E-04	1.10E-03
	西侧	防护墙外	3.90E-04	4.22E-04	8.12E-04
		患者进出门外	5.94E-04	6.42E-04	1.24E-03
	北侧	ECT2 机房	6.09E-04	3.15E-04	9.23E-04
	楼上	绿化带	2.13E-04	1.75E-04	3.88E-04
楼下	停车场	1.74E-03	1.78E-03	3.52E-03	

由表 11-6 可知，本项目 PET-CT 及 ECT 运行时机房外的剂量率最大为 0.0106 μ Sv/h，机房的屏蔽防护均能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）。PET-CT 及 ECT 开机运行经防护机房的屏蔽对外环境的影响可忽略不计。

11.2.1.2 核素诊断场所辐射水平

根据医院提供非密封放射源使用数据，见表 11-7。

表 11-7 诊断用放射性药物的使用情况

核素	单次最大用量(Bq)	日最大用量 (Bq)	周围剂量当量率常数 (μ Sv·m ² /MBq·h)	场所
¹⁸ F	3.7×10 ⁸	1.11×10 ¹⁰	0.143	PET 检查
⁶⁸ Ga	3.7×10 ⁸	7.4×10 ⁸	0.134	
⁶⁴ Cu	3.70×10 ⁸	7.40×10 ⁸	0.029	
⁸⁹ Zr	3.70×10 ⁸	7.40×10 ⁸	/	
¹²⁴ I	3.70×10 ⁸	7.40×10 ⁸	0.185	
^{99m} Tc	7.4×10 ⁸	7.4×10 ¹⁰	0.0303	ECT 检查
²⁰¹ Tl	7.4×10 ⁷	3.7×10 ⁸	/	
¹²³ I	1.85×10 ⁸	1.85×10 ⁸	0.061	
⁵¹ Cr	1.85×10 ⁸	1.85×10 ⁸	/	

从表中可以看出，用于 PET 显像诊断的 ¹⁸F、⁶⁸Ga 单次最大用量相同，¹⁸F 的日最大用量比其他核素用量高 15 倍，照射率常数差异非常小，因此，PET 显像诊断中需要考虑日最大操作量时以 ¹⁸F 作为关键代表核素进行环境影响分析。

用于 ECT 显像诊断的 ^{99m}Tc、²⁰¹Tl 及 ¹²³I，^{99m}Tc 的单次最大用量是其他核素用量的 10 倍和 4 倍，^{99m}Tc 的日最大用量是其他核素用量的 200 倍和 400 倍，照射率常数是 ¹²³I 的 0.5 倍，综合考虑 ECT 显像诊断等均以 ^{99m}Tc 作为关键代表核素进行环境影响分析。

(1) γ 射线影响分析

①公式及相关参数选取

在辐射环境影响预测时，将放射性核素铅罐、注射针剂及已注射药物的病人简化成点源。查阅《辐射防护手册》，在不考虑给药后时间及患者自身屏蔽的衰减作用，将放射性核素当作裸源。本次评价参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中 I.2 估算经屏蔽后的 γ 射线剂量率。

$$H_p = A \times \Gamma \times 10^{-X/TVL} / R^2 \quad (\text{公式11-4})$$

式中：

H_p —屏蔽体外关注点剂量率控制值， μ Sv/h；

A —单个患者所用放射源的最大活度，MBq；

Γ —距源1m处的周围剂量当量率常数， μ Sv·m²/（h·MBq）；

R—参考点与放射源之间的距离，m；

X—墙体屏蔽厚度，mm；

TVL— γ 射线在防护材料中的十分之一值层厚度，mm。

根据《辐射防护导论》P88可知，将 γ 射线减弱一定程度所需物质厚度d与物质的密度 ρ 成反比，关系见式11-5，根据防护设计单位提供资料本项目拟使用的硫酸钡涂料密度不小于 $2.79\text{g}/\text{cm}^3$ ，混凝土密度取 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$d_1/d_2=\rho_2/\rho_1 \quad (\text{公式11-5})$$

项目使用的放射性核素相关参数见表11-8。

表11-8 放射性核素相关参数一览表

核素	单次最大给药量 (MBq)	射线能量 (keV)	周围剂量当量率常数 (裸源) $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	TVL (mm)		
				混凝土	铅	砖
^{18}F	370	511	注射前: 0.143 患者体内: 0.092	176	16.6	263
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	740	140	注射前: 0.0303 患者体内: 0.0207	110	1	160

②周围剂量当量率控制目标值

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)中工作场所防护水平要求“6.1.5 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面30cm处的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面30cm处人员操作位的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，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 $25\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。6.1.7 固体放射性废物收集桶、暴露与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 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。”。

③药物质控、储存时的辐射影响

项目 PET 诊断使用的放射性核素 ^{18}F 为医院二期项目生产、分装，送往注射室，若二期项目与本项目不匹配则外购药物在注射室进行分装，本次按照在注射室分装计算。购买的 ^{18}F 由药物供应商将药物放置于铅罐 (50mmPb)，直接运输至核医学科注射室分装橱待用。

ECT 使用的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 为自主淋洗生产需在万级精华制药间分装，其余注射放射性药物均为购买的已分装剂量，一般不需再次分装。药物储存、分装时的辐射影响按日放

放射性药物每日最大操作量进行计算， ^{18}F $1.11 \times 10^{10} \text{Bq/d}$ ， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ $7.4 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。

项目在分装质控、储存时，各关注点的周围剂量当量率计算结果见表11-9~11-10。

表11-9 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 净化分装各关注点的周围剂量当量率估算结果

关注点	预测活度 (MBq)	防护能力	距离 (m)	防护能力 (mmPb)	估算结果 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率控制值 ($\mu\text{Sv/h}$)	是否符合
手套箱正面/底面表面30cm	74000	10mmPb	0.5	10	8.97E-7	2.5	符合
手套箱其余面表面30cm	74000	5mmPb	0.5	5	8.97E-2	25	符合

表11-10 ^{18}F 分装分装各关注点的周围剂量当量率估算结果

关注点	预测活度 (MBq)	防护能力	距离 (m)	防护能力 (mmPb)	估算结果 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率控制值 ($\mu\text{Sv/h}$)	是否符合
手套箱正面/底面表面30cm	11000	45mmPb手套箱+50mm铅罐	0.5	95	0.01	2.5	符合
手套箱其余面表面30cm	11000	35mmPb手套箱+50mm铅罐	0.5	85	0.05	25	符合

根据表11-9和表11-10可知，放射性药物 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 分装时，分装柜工作面的外表面30cm处周围剂量当量率最大为 $8.97\text{E}-2\mu\text{Sv/h}$ ，放射性药物 ^{18}F 分装时，分装柜工作面的外表面30cm处周围剂量当量率最大为 $0.05\mu\text{Sv/h}$ ，满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)工作场所防护水平要求。

④给药过程的辐射影响

PET注射窗按照注射1名注射 ^{18}F （单次最大用量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ ）患者计算，ECT注射窗按照注射1名注射 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （单次最大用量为 $7.4 \times 10^8 \text{Bq}$ ）患者计算。药物注射过程中关注点周围剂量当量率如表11-11所示。

表11-11 药物注射时各关注点的周围剂量当量率估算结果

注射核素	关注点	预测活度 (MBq)	屏蔽设计措施	距离 (m)	防护能力 (mmPb)	估算结果 (μSv/h)	剂量率控制值 (μSv/h)	是否符合
¹⁸ F	注射窗口外表面5cm	370	10mmPb 当量注射铅套+45mmPb 注射台	0.3	55.00	0.30	2.5	符合
	医生注射区北墙外30cm	370	10mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	2.3	33.35	0.101	2.5	符合
	医生注射区东墙外30cm	370	10mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	3.77	33.35	0.04	2.5	符合
	医生注射区南墙外30cm	370	10mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	0.6	33.35	1.49	2.5	符合
	医生注射区西墙外30cm	370	10mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	4.37	33.35	0.03	2.5	符合
	医生进出防护门	370	10mmPb当量注射铅套+12mmPb铅防护门	4.37	22.00	0.14	2.5	符合
	注射室地板下30cm	370	10mmPb当量注射铅套+300mm钢筋混凝土	2.1	38.30	0.06	2.5	符合
	注射室屋顶上方30cm	370	10mmPb当量注射铅套+300mm钢筋混凝土	4.6	38.30	1.28E-02	2.5	符合
^{99m} Tc	注射窗口外表面5cm	740	5mmPb 当量注射铅套+10mmPb 注射台	0.3	15.00	2.49E-13	2.5	符合
	医生注射区北墙外30cm	740	5mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	2.3	7.31	2.06E-07	2.5	符合
	医生注射区东墙外30cm	740	5mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	2.04	7.31	2.62E-07	2.5	符合
	医生注射区南墙外30cm	740	5mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	0.6	7.31	3.03E-06	2.5	符合
	医生注射区西墙外30cm	740	5mmPb当量注射铅套+370mm页岩实心砖墙	6.17	7.31	2.87E-08	2.5	符合
	医生进出防护门	740	5mmPb当量注射铅套+12mmPb铅防护门	6.17	19.31	2.87E-20	2.5	符合
	注射室地板下30cm	740	5mmPb当量注射铅套+300mm混凝土	2.1	7.73	9.53E-08	2.5	符合
	注射室屋顶上方30cm	740	5mmPb当量注射铅套+300mm混凝土	4.6	7.73	1.99E-08	2.5	符合

注：（1）南侧墙部分防护能力370mm页岩实心砖墙，部分防护能力370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆，本次预测按照最少370mm页岩实心砖墙计算；（2）医生手持注射针套据地1.5m，距离墙体按0.5m考虑；

根据表11-11可知，放射性药物¹¹C注射过程中，注射台外表面30cm处的周围剂量当量率约为0.30μSv/h，注射室四面墙体、屋顶、地面外30cm处的周围剂量当量率最大为1.49μSv/h；放射性药物^{99m}Tc注射过程中，注射台外表面30cm处的周围剂量当量率约为2.49×10⁻¹³μSv/h，注射室四面墙体、屋顶、地面外30cm处的周围剂量当量率最大为3.03×10⁻⁶μSv/h；注射室及注射台外表面30cm处的周围剂量当量率均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中工作场所防护水平要求。

⑤注射后候诊过程中辐射影响

核医学科设置3间ECT注射后候诊室，一间（4.82m×6.06m）最大候诊人数18人，按照13320MBq进行预测，一间（2.52m×2.15m）

最大候诊8人，按照5920MBq进行预测，一间（2.82m×3.425m）最大候诊人数1人，按照740MBq进行预测。设置一间PET-CT注射后候诊室，同一时间内候诊室最多4人候诊，按照1480MBq进行预测。项目注射后候诊室的周围剂量当量率估算结果见表11-12。

表11-12 注射后候诊室周围剂量当量率估算结果

位置	关注点	预测活度 (MBq)	屏蔽设计措施	距离 (m)	防护能力 (mmPb)	估算结果 (μSv/h)	剂量率控制值(μSv/h)	是否符合
ECT 注射后候诊室 (4.82m×6.06m)	东墙外 30cm	13320	240mm 页岩实心砖墙+30mm 高纯度硫酸钡砂浆	2.28	1.82	0.80	2.5	符合
	北墙外 30cm	13320	240mm 页岩实心砖墙+30mm 高纯度硫酸钡砂浆	2.9	1.82	0.49	2.5	符合
	南墙外 30cm ⁽¹⁾	13320	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.82	1.72	1.60	2.5	符合
	西墙外 30cm	13320	240mm 页岩实心砖墙+30mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.32	1.82	2.37	2.5	符合
	地板下 30cm	13320	300mm 混凝土	1.6	2.73	0.20	2.5	符合
	屋顶上 30cm	13320	300mm 混凝土	5.1	2.73	0.020	2.5	符合
	进出门外 30cm	13320	8mmPb 防护门	2.41	8	4.75E-07	2.5	符合
ECT 注射后候诊室 (3.42m×4.26m)	东墙外 30cm	5920	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.22	1.72	2.27E-01	2.5	符合
	北墙外 30cm	5920	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.04	1.72	2.18	2.5	符合
	南墙外 30cm	5920	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	2.42	1.72	4.03E-01	2.5	符合
	西墙外 30cm	5920	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.04	1.72	2.18	2.5	符合
	地板下 30cm	5920	300mm 混凝土	1.6	2.73	8.97E-02	2.5	符合
	屋顶上 30cm	5920	300mm 混凝土	5.1	2.73	8.83E-03	2.5	符合
	进出门外 30cm	5920	8mmPb 防护门	3.22	8.00	4.79E-07	2.5	符合
ECT 注射后候诊室 (2.5m×2.15m)	东墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.79	1.72	1.13E-02	2.5	符合
	北墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.64	1.72	2.84E-02	2.5	符合
	南墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙	1.64	1.50	1.51E-01	2.5	符合
	西墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.79	1.72	1.10E-01	2.5	符合
	地板下 30cm	740	300mm 混凝土	1.6	2.73	1.07E-02	2.5	符合
	屋顶上 30cm	740	300mm 混凝土	5.1	2.73	8.96E-03	2.5	符合
	进出门外 30cm	740	8mmPb 防护门	1.79	8.00	5.98E-08	2.5	符合
PET-CT 注射后候诊室	东墙外 30cm	1480	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	4.12	25.59	0.24	2.5	符合
	北墙外 30cm	1480	370mm 页岩实心砖墙+40mm 高纯度硫酸钡砂浆	2.4	27.83	0.51	2.5	符合
	南墙外 30cm	1480	370mm 页岩实心砖墙+40mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.67	27.83	1.061	2.5	符合
	西墙外 30cm	1480	370mm 页岩实心砖墙+60mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.67	30.07	0.778	2.5	符合

	地板下 30cm	1480	300mm 混凝土	1.6	28.30	1.084	2.5	符合
	屋顶上 30cm	1480	300mm 混凝土	5.1	28.30	0.107	2.5	符合
	进出门外 30cm	1480	16mmPb 防护门	4.12	16.00	0.900	2.5	符合

注：（1）ECT候诊南墙240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆/370mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆，按照240mm页岩实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆预测；（2）所有候诊区距离墙的距离按照设计给定位置测量；（3）患者距离地面的距离取1.0m

由表 11-12 可知，项目在采取设计阶段提出的屏蔽措施后，患者在注射后候诊室候诊期间，各关注点的周围剂量当量率不超过本次评价周围剂量当量率控制目标，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中工作场所防护水平要求。

⑥扫描过程辐射影响

项目扫描前可能由伺服工作人员指导患者摆位，伺服过程工作人员距离患者约0.5m。本项目ECT机房设置两间，其防护能力相同，都进行显像检查，本次采用面积小的机房进行预测，PET-CT及PET-MR均进行PET检查，由于其防护能力相同，检查使用的药物相同，故采用机房面积小的PET-CT进行预测，项目扫描诊断过程机房周围剂量当量率估算结果见表11-13。

表11-13 项目扫描诊断过程机房周围剂量当量率估算结果

位置	关注点	预测活度 (MBq)	屏蔽设计措施	距离 (m)	防护能力 (mmPb)	估算结果 (μSv/h)	剂量率控制值(μSv/h)	是否符合
PET 机房	伺服摆位	370	0.5mmPb 铅衣	1.0	0.50	32.795	/	/
	东墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	4.87	25.59	0.043	2.5	符合
	北墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.9	25.59	0.066	2.5	符合
	南墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.9	25.59	0.066	2.5	符合
	西墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	4.87	25.59	0.043	2.5	符合
	地板下 30cm	370	300mm 混凝土	1.4	28.30	0.354	2.5	符合
	屋顶上 30cm	370	300mm 混凝土	5.3	28.30	0.025	2.5	符合
	观察窗外 30cm	370	10mmPb 玻璃观察窗	4.87	10.00	0.370	2.5	符合
	患者进出防护门外 30cm	370	8mmPb 防护门	4.87	8.00	0.489	2.5	符合
	医生进出防护门外 30cm	370	10mmPb 防护门	4.87	10.00	0.370	2.5	符合
ECT 机房	伺服摆位	740	0.5mmPb 铅衣	1.0	0.50	4.844	/	/
	东墙外 30cm	740	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	4.87	2.53	1.91E-03	2.5	符合
	北墙外 30cm	740	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.8	2.53	3.14E-03	2.5	符合

南墙外 30cm	740	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.8	2.53	3.14E-03	2.5	符合
西墙外 30cm	740	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	4.87	2.53	1.91E-03	2.5	符合
地板下 30cm	740	300mm 混凝土	1.4	2.73	1.46E-02	2.5	符合
屋顶上 30cm	740	300mm 混凝土	5.3	2.73	1.02E-03	2.5	符合
观察窗外 30cm	740	4mmPb 铅玻璃观察窗	4.87	4.00	6.46E-05	2.5	符合
患者进出防护门外 30cm	740	4mmPb 防护门	4.87	4.00	6.46E-05	2.5	符合
医生进出防护门外 30cm	740	4mmPb 防护门	4.87	4.00	6.46E-05	2.5	符合

注：(1) 检查床的高度按0.8m计算；

由表 11-13 可知，项目在采用设计阶段提出的屏蔽措施后，在诊断期间各机房关注点的周围剂量当量率不超过本次评价周围剂量当量率控制目标，均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中屏蔽要求。

⑦留观、抢救过程辐射影响

主要用于留观室主要用于显像检查过程中，患者图像的检验校核，根据西安交通大学医学院第一附属医院目前核医学科的运行情况，仅 PET 检查患者需要留观，ECT 患者不需要留观，抢救室通常除危重患者需要抢救外也无其他患者停留情况，因此本次评价按留观室仅有 1 名 PET 检查患者留观，抢救室在不同的时间内仅有 1 名 ECT 检查患者或 1 名 PET 检查患者抢救进行核算。项目留观、抢救室各关注点的周围辐射剂量率估算结果见表 11-14。

表11-14 留观、抢救室各关注点周围辐射剂量率估算结果

位置	关注点	预测活度 (MBq)	屏蔽设计措施	距离 (m)	防护能力 (mmPb)	估算结果 (μSv/h)	剂量率控制值 (μSv/h)	是否符合
留观室 (PET 检查 后患者)	东墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙	2.87	23.35	0.17	2.5	符合
	北墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.67	25.59	0.36	2.5	符合
	南墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.07	25.59	1.07E-1	2.5	符合
	西墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.04	25.59	0.93	2.5	符合
	地板下 30cm	370	300mm 混凝土	1.2	37.30	0.14	2.5	符合
	屋顶上 30cm	370	300mm 混凝土	5.5	28.30	0.02	2.5	符合
	人员进出门外 30cm	370	10mmPb 不锈钢铅防护门	2.87	10.00	1.07	2.5	符合
抢救室 (ECT 检查)	东墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.57	1.72	2.31E-2	2.5	符合
	北墙外 30cm	740	370mm 页岩实心砖墙	2.24	2.31	1.49E-2	2.5	符合

后患者)	南墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.58	1.72	1.18E-1	2.5	符合
	西墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	2.5	1.72	4.72E-2	2.5	符合
	地板下 30cm	740	300mm 混凝土	1.2	2.73	1.99E-2	2.5	符合
	屋顶上 30cm	740	300mm 混凝土	5.5	2.73	9.49E-4	2.5	符合
	东侧人员进出门外 30cm	740	4mmPb 防护门	3.57	4	1.20E-4	2.5	符合
	西侧人员进出门外 30cm	740	6mmPb 防护门	2.5	6	2.45E-6	2.5	符合
抢救室 (PCT 检查 后患者)	东墙外 30cm	370	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	3.57	17.39	0.25	2.5	符合
	北墙外 30cm	370	370mm 页岩实心砖墙	2.24	23.35	0.27	2.5	符合
	南墙外 30cm	370	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.58	17.39	1.26	2.5	符合
	西墙外 30cm	370	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	2.5	17.39	0.50	2.5	符合
	地板下 30cm	370	300mm 混凝土	1.2	28.30	4.82E-1	2.5	符合
	屋顶上 30cm	370	300mm 混凝土	5.5	28.30	0.02	2.5	符合
	东侧人员进出门外 30cm	370	4mmPb 防护门	3.57	4	1.58	2.5	符合
	西侧人员进出门外 30cm	370	6mmPb 防护门	2.5	6	2.45	2.5	符合

注：（1）抢救和运动负荷设置为同一房间，按照设计运动负荷床位设置在东侧，抢救床位设置在西侧，床位高度按照0.6m计

由表 11-14 可知，项目在采用设计阶段提出的屏蔽措施后，抢救室、留观室外各关注点的周围剂量当量率均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中屏蔽要求。

⑧运动车及钨气体发生器机房的辐射影响

ECT患者在注射窗口进行药物注射后进入候诊室候诊，部分患者需要进入运动、抢救室和钨气体发生器室，按照每次1名注射^{99m}Tc（单次最大用量为 $7.4 \times 10^8 \text{Bq}$ ）患者计算周围剂量估算结果见表11-14。

表 11-14 运动车及钨气体发生器机房周围各关注点周围辐射剂量率估算结果

位置	关注点	预测活度 (MBq)	屏蔽设计措施	距离 (m)	防护能力 (mmPb)	估算结果 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率控制值 ($\mu\text{Sv/h}$)	是否符合
运动车	东墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.81	1.72	9.00E-02	2.5	符合
	北墙外 30cm	740	370mm 页岩实心砖墙	2.24	2.31	1.49E-02	2.5	符合
	南墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	1.58	1.72	1.18E-01	2.5	符合
	西墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙+20mm 高纯度硫酸钡砂浆	4.04	1.72	1.81E-02	2.5	符合
	地板下 30cm	740	300mm 混凝土	1.2	2.73	1.99E-02	2.5	符合

	屋顶上 30cm	740	300mm 混凝土	5.5	2.73	9.49E-04	2.5	符合
	东侧人员进出门外 30cm	740	4mmPb 防护门	1.81	4	4.68E-04	2.5	符合
	西侧人员进出门外 30cm	740	6mmPb 防护门	4.04	6	9.39E-07	2.5	符合
钨气体发生器机房	东墙外 30cm	740	370mm 页岩实心砖墙	2.52	2.31	1.17E-02	2.5	符合
	北墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙	1.5	1.5	2.15E-01	2.5	符合
	南墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙	1.5	1.5	2.15E-01	2.5	符合
	西墙外 30cm	740	240mm 页岩实心砖墙	2.39	1.5	8.48E-02	2.5	符合
	地板下 30cm	740	300mm 混凝土	1.2	2.73	1.99E-02	2.5	符合
	屋顶上 30cm	740	300mm 混凝土	5.5	2.73	9.49E-04	2.5	符合
	两侧人员进出门外 30cm	740	4mmPb 防护门	1.5	4	6.81E-04	2.5	符合
注：（1）抢救和运动负荷设置为同一房间，按照设计运动负荷床位设置在东侧，抢救床位设置在西侧，床位高度按照0.6m计；（2）钨气体发生器室的北墙按照最少240mm页岩实心砖预测；								

由表 11-14 可知，项目在采用设计阶段提出的屏蔽措施后，在运动车及钨气体发生器机房在使用期间各关注点的辐射剂量率不超过本次评价剂量率控制值要求，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中工作场所防护水平要求。

⑨针剂转移过程的辐射影响

放射性药物注射前，放射工作人员将待注射药物从分装柜中取出，并转移至注射台，转移过程中针剂采用屏蔽铅盒，盛装带有钨合金注射屏蔽套的药物。针剂转移过程的周围剂量当量率估算结果如表11-15。

表 11-15 针剂转移过程中周围剂量当量率估算结果

核素	活度 (Bq)	关注点	屏蔽措施	距离 (m)	估算结果 ($\mu\text{Sv/h}$)
^{11}C	3.7×10^8	到工作人员体表	45mm铅当量转移铅罐 +10mmPb当量注射铅套	0.5	0.11
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	7.4×10^8	到工作人员体表	6mm铅当量铅盒+5mmPb当 量注射铅套	0.5	8.97E-10

(2) β 剂量率分析

根据患者用药种类和活度，放射工作人员进行药物分装质控、注射或给药。正常情况下基本不会发生液体药物泄漏，但若放射工作人员操作失误，使针剂中放射性核素泄漏，将造成工作场所的污染，产生 β 射线辐射影响。其次，药物注射后患者的体液、排泄物等含有放射性药物，如患者随意吐痰等可造成其停留场所的污染。另外，若密封源破损将可能导致工作场所的 β 表面污染，可能对周边环境产生辐射影响。

由于 β^+ 在富含电子的组织内移动大约 1mm 后会很快与负电子结合发生湮灭反应。为保守起见，本次评价对 ^{18}F 产生的 β^+ 射线按 β^- 射线进行射程的保守估算， β^- 射线在材料中的射程计算公式如下：

$$b d = E_{\beta \max} / 2\rho \quad (\text{公式11-6})$$

式中：d---为防护厚度，cm；

ρ ---屏蔽材料密度， g/cm^3 ；

$E_{\beta \max}$ --- β 粒子最大能量，MeV；

各核素 β 射线在空气中理论最大射程见表11-16。

表11-16 各核素 β 射线在空气中理论最大射程

核素	F-18	C-11	N-13	Ga-68
β 射线能量 (MeV)	0.63	0.96	1.19	1.9
空气密度 (g/cm^3)	1.29×10^{-3}			
空气中的射程 (cm)	244	372	461	736
铅的密度 (g/cm^3)	11.34			
铅中的射程 (cm)	0.03	0.04	0.05	0.08
铅玻璃密度 (g/cm^3)	4.6			
铅玻璃中的射程 (cm)	0.07	0.10	0.13	0.21

本项目辐射工作场所设置有足够的空间，同时根据表 11-16， β 射线在各屏蔽体

中的射程均小于屏蔽体的厚度，因此 β 射线对周围辐射环境影响是很小，本次评价不考虑。

(3) 显像检查对周围保护目标的影响

① 工作人员

1) PET 诊断

根据药物的使用方式和医务人员行走路径，医护人员一般不会长时间接触正电子药物诊断病人，但在注射药物、扫描时医护人员会近距离接触药物，在协助摆位、在控制室操作设备时，辐射工作人员会受到药物的辐射影响，因此职业照射估算分析按照上述内容计算放射性核素对工作人员的辐射影响。

工作时间及计算参数：

PET 使用的药物为医院二期项目生产、分装，若二期项目与本项目不匹配则外购 PET 用药，外购 PET 用药品时在注射室分装柜前分装，需根据患者所需注射药物活度在分装柜内进行药物分装，预计每天分装约 20min，则年累计分装时间 83.34h；每位患者平均注射时间为 10s，每天最多检查 42 人，全年 250d 注射时间约为 29.17h；PET-CT 诊断前工作人员需在诊断室内对患者进行摆位，一般情况工作人员可进行视频和语音隔室指导摆位，按 1/10 患者需要近距离协助摆位，每次摆位时间 0.5 分钟考虑，则全年需侍服摆位时间约为 8.75h；放射工作人员在 PET-CT 或 PET-MR 控制室平均操作时间约为 20min/人，则年累积操作时间约为 3500h。

2) ECT 诊断

① 工作时间及计算参数

ECT 使用的放射性药物除 ^{99m}Tc 外，其余放射性核素均为外购的单支药物，无需分钟， ^{99m}Tc 的分装引起的放射性工作人员剂量在钼铯发生器制备计算，本阶段不计算。每位患者平均注射时间为 10s，每天最多检查 107 人，全年 250d 注射时间约为 74.31h；ECT 诊断前工作人员需在诊断室内对患者进行摆位，一般情况工作人员可进行视频和语音隔室指导摆位，按 1/10 患者需要近距离协助摆位，每次摆位时间 0.5 分钟考虑，则全年需侍服摆位时间约为 22.29h；放射工作人员在 ECT 控制室平均操作时间约为 10min/人，则年累积操作时间约为 4458.4h。

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

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

式中： H_r —辐射外照射人均年有效剂量，mSv；

H —辐射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

t —年工作时间，h；

T —居留因子，职业人员取 1。

辐射工作人员外照射受照剂量估算结果见表 11-17。

表 11-17 辐射工作人员个人年外照射剂量估算

操作	工作时间	辐射剂量率 $H(\mu\text{Sv/h})$	年有效剂量 (mSv/a)	
			各岗位年剂量	合计
PET 分装	83.34	0.05	4.17E-03	1.59
PET 注射	29.17	0.3	8.75E-03	
PET 摆位	8.75	32.795	0.29	
PET 扫描	3500	0.370	1.30	
ECT 注射	74.31	2.49E-13	1.85E-14	0.11
ECT 摆位	22.29	4.844	1.08E-01	
ECT 扫描	4458.4	6.46E-05	2.88E-04	

②公众受照剂量估算

由地下一层核医学科布局可知，工作场所外公众可到达区域为地面绿化带、地下二层停车场，根据显像场所计算表格可以看出，PET 注射后候诊室对外环境的影响最大，选取对屋顶最大贡献值 $0.107\mu\text{Sv/h}$ ，对地下二层停车场的最大剂量贡献值 $1.084\mu\text{Sv/h}$ 进行计算，根据平面布局选取注射后候诊室对外环境的影响计算。计算结果见表 11-18。

表 11-18 公众个人年有效剂量估算

关注点		辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年受照时间 (h)	居留因子	年有效剂量($\mu\text{Sv/a}$)
显像、检查场所	PET 注射候诊室楼上绿化带	0.107	一天工作 8 小时， 一年工作 250 天	1/5	42.8
	PET 注射候诊室楼下停车场	1.084		1/40	54.2

根据估算结果可知，核医学显像检查对公众年有效剂量最大值为 0.054mSv 小于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

11.2.1.3 发生器淋洗

^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器本身自带铅屏蔽（具备 10mm 铅当量屏蔽能力），表面剂量率较小，由送药单位送至医院分装净化室，将带有铅当量防护罐的钼铯发生器置于手套箱中淋洗、分装、标记（正面底面屏蔽 $\geq 10\text{mmPb}$ ，其余四面 $\geq 5\text{mmPb}$ ）。

西安交通大学医学院第一附属医院在分装净化室通风柜内进行淋洗、分装工作，淋洗、分装过程中，发生器中 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素发生同质异能跃迁，会衰变产生能量为

0.140MeV 的 γ 射线，可能对工作人员产生辐射影响。根据医院提供的资料，本项目使用的 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器最大淋洗 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 为 $8.88 \times 10^{10} \text{Bq}$ ，分装操作量为 $7.4 \times 10^8 \text{Bq}$ 。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物在制备完毕后，工作人员采用注射器抽取少量药物（约为 10mCi）并置于防护罐内，通过药物传递窗口送达质控室。质检人员将药物转移至通风橱铅罐内，利用注射器或毛细管在通风橱内沾取少量药物，滴在烧杯内试纸上待扩散完全后进行检测。质控抽取量约为 1mCi，质控操作过程中手套箱采用正面底面屏蔽 $\geq 10\text{mmPb}$ ，其余四面 $\geq 5\text{mmPb}$ 铅玻璃防护屏蔽。假定淋洗、分装、质控药物操作距离为 0.3m，则根据公式 11-8、公式 11-9 可估算出淋洗柜表面剂量率，估算结果见表 11-19。

(公式 11-8)

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

A—非密封放射性物质活度，MBq；

R—非密封放射性物质距关注点距离，m；

Γ —周围剂量当量率常数， $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{MBq} \cdot \text{h}$ ， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 取 $0.0303 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{MBq} \cdot \text{h}$ ；

B—透视因子，无量纲。

估算出的屏蔽厚度计算公式为：

$$X = TVL \times \log B^{-1} \quad (\text{公式11-9})$$

式中，TVL—屏蔽材料什值层厚度，mm；铅的 TVL 为 1mm；

X—所需要的屏蔽材料厚度，mm；

表 11-19 淋洗、标记及分装药物过程周围环境的附加剂量率估算结果表

位置	淋洗柜前	手持真空瓶	标记、分装柜前	质控传递	质控	注射剂转移
距离(m)	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.05
屏蔽层	11mmPb	11mmPb	11mmPb	6mmPb	5mmPb	6mmPb
源项 (Bq)	1.11×10^{11}	8.88×10^{10}	8.88×10^{10}	3.7×10^8	3.7×10^7	5.92×10^9
剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	1.35E-7	1.08E-7	1.08E-7	1.25E-4	4.48E-5	7.18E-2
每天操作时间	0.1h	0.1h	1h	0.1h	30s	30s
每年操作时间	25h	25h	250h	25h	2.08h	2.08h
所受剂量($\mu\text{Sv/a}$)	3.38E-6	2.70E-6	2.70E-5	3.13E-3	9.32E-5	1.49E-1
合计($\mu\text{Sv/a}$)	0.15					

注：分装、标记、淋洗的手套箱的防护能力按照最少5mmPb计算，药物制备后贮存在6mmPb的铅传递盒内

综上估算，在没考虑外墙及门的防护屏蔽措施，仅考虑分装柜及淋洗柜铅屏蔽的情况下，本项目 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 淋洗、标记过程中所致淋洗柜、分装柜表面处的辐射剂量率

均很小，均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，因此可以得到在 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 淋洗间、质控室各墙体及门外 30cm 处的辐射剂量率均低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 操作过程中标记、分装均为手动操作，对工作人员受照剂量的影响为 $0.15\mu\text{Sv/a}$ ，小于本项目辐射工作人员的年有效剂量约束限制 5mSv 。在实际操作过程中操作人员必须严格按照要求佩戴相应的防护措施（铅衣、铅帽、防护眼镜等）所受剂量还会进一步减少。正常情况下，公众无法到达此处，因此，对环境的影响也很小。

11.2.1.4 甲癌、甲亢治疗项目辐射工作场所辐射屏蔽分析

(1) 工作场所辐射水平分析

甲癌、甲亢治疗项目患者用药采用 ^{131}I 碘自动分装仪进行分装，自动分装仪自带 40mmPb 屏蔽柜，置于碘分装室内，工作人员通过远程操作控制，定量自动分装出需要的药量，通过视频监控和语音对讲系统，指引病人服药。甲功测定用药由工作人员在分装室内 40mmPb 的通风橱内进行稀释分装，传递至给药室。当病人服药后，病人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。

甲功测定用药量与甲癌、甲亢治疗用药量相比极为微小，需人工稀释给药。由前文可知，甲功测定病人的单次最大服药量为 $1.85\times 10^6\text{Bq}$ ，每天检查人数最多为 200 人，则核素 ^{131}I 每天最大用量为 $3.7\times 10^8\text{Bq}$ 。假设分装人员每天从自动分装仪中分装出 $3.7\times 10^8\text{Bq}$ 的 ^{131}I 药物，拿到手套箱进行稀释分装，以此考虑甲功测定分装人员的辐射影响。

碘分装设置两个窗口，一个窗口作为甲功测定患者服药，一个窗口作为甲癌和甲亢患者服药，由于甲功测定的用药量较少，故甲功测定患者在服药后原路返回。甲癌患者在服药后沿通道进入指定的甲癌病房，甲亢患者沿专用通道离开核医学科甲癌病房区，部分甲亢患者服药后不适需要留观，则在病房区外的甲亢患者留观。根据西安交通大学医学院第一附属医院目前的运行情况，未出现甲亢患者留观情况。甲癌患者和甲亢患者为预约、分批、分时段进行服药，不会出现甲癌患者和甲亢患者同时服药的情况。

甲癌病人办理入院手续后，方进入核医学科甲癌治疗区，服药后立即进入甲癌病房，住院期间不得随意离开甲癌病房；每间甲癌病房设置一个屏蔽防护门，并且

对入住患者严格管理。甲癌病房、分装场所、通道防护门、铅废物桶等辅助设施均设电离辐射警告标志；服药室、甲癌病房均设有视频监控装置，值班室与给药室、甲癌病房均设置语音对讲系统，对病人进行观察和指导，医生一般不近距离直接接触病人。药物从接收到自动分装柜的转移时间很短，并且是连同铅屏蔽罐一起转移，辐射工作场所剂量率预测主要以每天在自动分装仪中的最大分装量和各房间服药患者最大服药量为源强进行估算。

本次核医学科甲癌、甲亢治疗和甲功测定项目拟使用核素的用量情况和相关参数见表11-20， ^{131}I 核素的TVL取值见表11-21。

表11-20 拟使用核素的用量及相关参数

项目	核素	周围剂量当量率常数($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)	最大用量(Bq/次)	最大用量(Bq/天)
甲功测定	^{131}I	注射前 0.0595 患者体内 0.0583	1.85×10^6	3.7×10^6
甲亢治疗	^{131}I		3.7×10^8	3.7×10^9
甲癌治疗	^{131}I		3.7×10^9	2.96×10^{10}

注：周围剂量当量率常数参考《核医学放射防护要求》（GBZ120—2020）

表11-21 使用核素TVL取值表

核素	什值层 (mm)		
	铅 ($11.3\text{g}/\text{cm}^3$)	混凝土 ($2.35\text{g}/\text{cm}^3$)	实心砖 ($1.65\text{g}/\text{cm}^3$)
^{131}I	11	170	240

注：十分之一值层厚度值参考《核医学放射防护要求》（GBZ120—2020）

本项目采用点源估算模式，本次评价参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中 I.2 估算经屏蔽后的 γ 射线剂量率（公式 11-4）进行计算，估算结果见表 11-22。

表11-22 关注点处辐射水平估算结果一览表

工作场所	关注点	预测活度 (MBq)	屏蔽措施	防护能力 (mmPb)	距离 (m)	估算结果 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率控制值 ($\mu\text{Sv/h}$)	是否符合
碘分装室	^{131}I 分装仪表面30cm	33670	40mmPb分装仪	40	0.5	1.85	2.5	符合
	^{131}I 通风橱表面30cm	370	40mmPb通风橱	40	0.5	0.02	2.5	符合
	甲癌指导服药位	3700	20mmPb铅玻璃	20	1.5	1.49	2.5	符合
	甲功指导服药位	370	10mmPb铅玻璃	10	1.5	1.21	2.5	符合
甲功测定服药	西墙外30cm	1.85	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	1.95	4.28E-04	2.5	符合
	北墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	1.42	8.08E-04	2.5	符合
	东墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	1.95	4.28E-04	2.5	符合
	南墙外30cm		370mm实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆	21.57	1.42	5.86E-04	2.5	符合
	楼上地面30m		300mm混凝土	19.41	4.9	7.72E-05	2.5	符合
	楼下地面30m		300mm混凝土	19.41	1.8	5.72E-04	2.5	符合
	防护门外30cm		8mmPb防护门	8	1.95	5.31E-03	2.5	符合
甲癌、甲亢服药	西墙外30cm	3700	370mm实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆	21.57	1.95	0.62	2.5	符合
	北墙外30cm		370mm实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆	21.57	1.48	1.08	2.5	符合
	东墙外30cm		370mm实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆	21.57	1.95	0.62	2.5	符合
	南墙外30cm		370mm实心砖墙+60mm高纯度硫酸钡砂浆	21.57	1.48	1.08	2.5	符合
	楼上地面30m		300mm混凝土	19.41	4.9	0.13	2.5	符合
	楼下地面30m		300mm混凝土	19.41	1.8	2.19	2.5	符合
	防护门外30cm		20mmPb防护门	20	1.95	0.86	2.5	符合
甲癌病房	西墙外30cm	7400	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	4.77	0.29	2.5	符合
	北墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	3.17	0.65	2.5	符合
	东墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	2.07	1.52	2.5	符合
	南墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	1.67	2.34	2.5	符合
	楼上地面30m		300mm混凝土	19.41	4.9	0.31	2.5	符合
	楼下地面30m		300mm混凝土	19.41	1.8	2.29	2.5	符合
	防护门外30cm		18mmPb防护门	18	4.77	0.44	2.5	符合
	防护窗外30cm		18mmPb防护窗	18	2.07	2.33	2.5	符合
抢救室	西墙外30cm	3700	370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	5.64	0.10	2.5	符合
	北墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	2.87	0.40	2.5	符合

	东墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	3.47	0.27	2.5	符合
	南墙外30cm		370mm实心砖墙+40mm高纯度硫酸钡砂浆	20.03	1.67	1.17	2.5	符合
	楼上地面30m		300mm混凝土	19.41	4.9	0.15	2.5	符合
	楼下地面30m		300mm混凝土	19.41	1.8	1.14	2.5	符合
	北侧防护门外30cm		12mmPb防护门	12.00	2.87	2.12	2.5	符合
	西侧防护门外30cm		12mmPb防护门	12.00	5.64	0.55	2.5	符合
取餐	传递窗外30cm	3700	20mmPb不锈钢铅防护窗	20.00	1.2	2.28	2.5	符合
甲亢留观	西墙外30cm	370	370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	18.49	1.67	0.16	2.5	符合
	北墙外30cm		370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	18.49	1.67	0.16	2.5	符合
	东墙外30cm		370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	18.49	1.67	0.16	2.5	符合
	南墙外30cm		370mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	18.49	1.67	0.16	2.5	符合
	楼上地面30m		300mm混凝土	19.41	4.9	0.02	2.5	符合
	楼下地面30m		300mm混凝土	19.41	1.8	0.11	2.5	符合
	防护门外30cm		6mmPb防护门	6.00	1.67	2.20	2.5	符合

(1) 甲癌病房核算按照最小的病房(3.8m×8.42m)预测, 甲癌病房按照每间住2位患者计算, 距离关注点的距离按照最近的床位计算; (2) 甲亢留观距离按照距离每面墙1.0m;

根据表 11-22 可知, 项目在采用设计阶段提出的屏蔽措施后, 使用 ^{131}I 治疗区域各关注点的辐射剂量率不超过本次评价剂量率控制值要求, 满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 中工作场所防护水平要求。

(2) 工作人员及公众个人剂量估算

①甲功测定

甲功测定的服碘窗口位于 ^{131}I 治疗区，周围为接受 ^{131}I 治疗的患者及核医学科的工作人员，甲功测定每天服碘 200 人，按照每人服药 10s，则全年最多服药停留时间为 138.89h。根据表 11-22，甲功测定的服碘窗口的剂量率为 $1.21\mu\text{Sv/h}$ ，则甲功测定对放射性工作人员的年有效剂量贡献值为 $168.06\mu\text{Sv/a}$ 。

甲状腺吸碘率测定的患者在口服药物后进入甲吸室进行相关测定，测定过程按照每天每人 5min 估算，测定结束后随即离开工作场所，以上过程对核素诊断工作场所的工作人员及室外公众产生外照射辐射影响。

甲功测定每天最大受检人数 200 人，按照每人 5min，计算最长工作时间约为 4167h，在甲功测定过程中，放射性工作人员距离患者约 0.5m，计算测定过程中放射性工作人员再不穿戴任何防护用品下所处位置的剂量率约为 $0.43\mu\text{Sv/h}$ ，则进行甲功测定的放射性工作人员的年有效剂量为 1.79mSv/a 。甲状腺功能测定室为 240mm 页岩实心砖，距离四周墙 0.5m，则在进行甲状腺功能测定时防护墙外 30cm 的剂量率为 $0.01\mu\text{Sv/h}$ ，甲状腺功能测定室南侧为核医学科会议室，北侧为核医学科诊室过道，西侧为敷贴室，南侧为核医学科大厅，甲状腺功能测定对周围的年有效剂量贡献值为 $41.67\mu\text{Sv/a}$ ，小于本次评价的公众剂量的贡献值 (0.1mSv/a)。

②甲亢、甲癌服药

甲亢和甲癌在同一服药窗口进行服药，甲癌治疗的患者用药量大于甲亢治疗患者的用药量，本次采用甲癌治疗的患者用药量进行预测。

甲亢治疗每天最多 10 人，甲癌治疗每天最多 8 人，服药按照每人 10s 计，全年甲亢、甲癌服药时间总计 12.5h。根据表 11-22 计算结果，甲癌服药窗口的剂量率为 $1.49\mu\text{Sv/h}$ ，对放射性工作人员的年有效剂量贡献值为 $18.63\mu\text{Sv/a}$ 。

本项目 ^{131}I 药品分装采用碘自动分装仪。碘自动分装仪安装在分装室与服药室之间隔墙处，辐射工作人员在分装室内操作计算机程序控制碘自动分装仪进行分装，分装柜屏蔽材料达到 40mmPb ，并且顶部设有独立的排风装置，分装后的药物直接在给药室内，工作人员通过语音和监控系统指导和观察患者服药，不近距离接触药品，患者服药后进入指定病房休息，住院期间不允许在病房外滞留。甲癌患者按照每天 8 位患者住院，每位患者每次取餐时间 10s，则全年取餐时间

约 16.67h，取餐位的剂量为 2.28 μ Sv/h 则取餐引起对放射性工作人员的年有效剂量为 38 μ Sv/a。

甲癌治疗区楼上为医院的地上停车场，楼下为医院的地下停车场，西侧、南侧、东侧区域为核医学科患者的离开通道，甲癌治疗区周围公众可以达到的区域为楼上及楼下区域，根据表 11-22，该区域剂量最大为 2.29 μ Sv/h（楼下地面 30cm），该处的居留因子按照无人看管的停车场取 1/40，则甲癌治疗区对周围公众剂量最大贡献值为 0.06mSv/a。

综上， ^{131}I 治疗区域运行对周围公众年有效剂量贡献值最大为 0.06mSv，小于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。假定 ^{131}I 治疗区域所有工作均由 1 名放射性工作人员完成，则甲功测量、甲亢和甲癌指导服药、患者分餐操作引起的放射性工作人员年有效剂量合计 2.01mSv，小于本项目放射性工作人员剂量约束值 5mSv/a。

以上估算是以辐射工作场所边界外 30cm 处的辐射剂量率贡献值估算公众的受照剂量，由于辐射剂量率与距离的平方成反比，对于评价范围内的距离更远的公众，可推断其受到的年有效剂量均低于以上估算值。由此可见， ^{131}I 治疗正常运行时，对周围环境中的工作人员和公众的辐射影响均能满足相关标准要求。

11.2.1.6 敷贴治疗项目辐射屏蔽分析

敷贴治疗使用 ^{90}Sr - ^{90}Y 是 β 源，核素衰变后发射 β 射线，相对于 X、 γ 射线穿透力较弱，核医学普通应用只要戴上手套和眼罩（或面罩），用镊子或其他夹具操作，手部接触 β 源，就能达到防护要求。

β 粒子穿过周围物质时产生韧致辐射（本质为 X 射线），其穿透能力比 β 粒子强得多，因此应用 β 源时不能忽视对韧致辐射的防护。屏蔽 β 粒子应选用低原子序数的材料以减少韧致辐射，外面用高原子序数的材料屏蔽韧致辐射。

（1）距敷贴器裸源不同距离处辐射剂量率

当屏蔽材料的厚度等于或大于 β 粒子在该材料中的最大射程时，即可将 β 粒子完全挡住。参考《辐射防护导论》（方杰主编、李士骏主审，P127），当 $0.01 < E_{\beta} < 2.5\text{MeV}$ 时， β 粒子在某材料的射程计算公式为：

$$R = 0.142E^{(1.265-0.0954\ln E)} \dots\dots\dots \text{（公式 11-10）}$$

$$d=R/\rho\dots\dots\dots \text{（公式 11-11）}$$

式中：R—最大射程，g/cm²；

ρ—屏蔽材料密度，g/cm³；

E—β 粒子最大能量，MeV；

d—防护厚度，cm。

⁹⁰Sr-⁹⁰Y 敷贴器含有塑料等低原子序数材料屏蔽 β 射线。核素 β 射线能量及在屏蔽物质中的射程计算见表 11-23。

表 11-23 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y P 核素的 β 射线能量及在有机玻璃中的射程

序号	核素	β 射线最大能量 (keV)	屏蔽物质	在物质中的射程 (g.cm ⁻²)	在物质中的射程对应的物质厚度 (mm)
1	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	587.4	有机玻璃	0.071	0.60
由《辐射防护导论》可知，有机玻璃密度取 1.18g.cm ⁻³ ，原子序数 5.85；					

由上表可知，敷贴器使用过程中，工作人员应穿戴低原子序数的防护服，戴橡胶手套操作敷贴器，以减少 β 射线影响。

β 射线与物质作用会产生韧致辐射，根据公式 11-12 得到距源 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 裸源不同距离的韧致辐射产生的 γ 辐射剂量率结果见表 11-24。

$$H_r = 4.58 \times 10^{-14} A \cdot Z \left(\frac{E_b}{r} \right)^2 \cdot \left(\frac{\mu_{em}}{\rho} \right) \quad (\text{公式 11-12})$$

式中：H_r—β 射线在屏蔽材料中产生的韧致辐射在 r 米处剂量当量率，Sv/h；

A—放射源活度，Bq；

Z—屏蔽材料的有效原子序数；

E_b—韧致辐射的平均能量，MeV，根据《辐射防护导论》P132“韧致辐射具有连续能谱，在实际屏蔽计算时，可以假定韧致辐射的平均能量 E_b 是入射 β 粒子的最大能量的 1/3，即 E_b≈E_{max}/3”；

r—参考点与放射源辐射源的距离，m；

μ_{em}/ρ—韧致辐射的平均能量在屏蔽材料中的质量能量吸收系数，m²·kg⁻¹；

表 11-24 距 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 裸源不同距离的韧致辐射产生的 γ 辐射剂量率

核素	源活度 A (Bq)	屏蔽材料原子序数	E _b (MeV)	距离 r (m)	μ _{em} /ρ (m ² ·kg ⁻¹)	辐射剂量率 (μGy/h)
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	1.85×10 ⁹	5.85	0.1958	0.3	2.672×10 ⁻³	0.56
				0.5		0.20
				1		0.05

注：由《辐射防护导论》可知，有机玻璃密度取 1.18g.cm⁻³，原子序数 5.85；μ_{em}/ρ 取值查《辐射防护导论》附表 1

由上表可知，按敷贴器最大活度计算，在裸源状态下，距离敷贴器 ^{90}Sr - ^{90}Y 0.3m 处 γ 辐射剂量率为 $0.56\mu\text{Gy/h}$ 。

^{90}Sr - ^{90}Y 组织内射程仅为 2~3mm，但子体 ^{90}Y 组织内最大射程为 12.9mm，因此人体组织可有效屏蔽 β 射线，对人员的影响较小。

在无防护状态下，50mCi ^{90}Sr - ^{90}Y 裸源周围 1m 处的 γ 辐射剂量率为 $0.05\mu\text{Gy/h}$ ，敷贴室实体屏蔽外表面及防护门外表面距离放射源均大于 1m 因此敷贴室外 30cm 处 γ 辐射剂量率均低于 $0.05\mu\text{Gy/h}$ ，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中工作场所防护水平要求。

（2）敷贴治疗项目对周围公众及放射性工作人员年有效剂量估算

在无防护状态下，敷贴室实体屏蔽外表面及防护门外表面 γ 辐射剂量率低于 $0.05\mu\text{Gy/h}$ 。敷贴室周围为核医学科办公、治疗场所，基本无公众人员，参考西安交通大学第一附属医院现有敷贴治疗情况，每天治疗患者按照 10 人/天计，全年治疗患者 2500 人，则敷贴治疗室周围公众因敷贴操作导致的周围剂量率贡献值为 $4.17\mu\text{Sv/a}$ ，小于本项目放射性工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

工作人员操作位按照距放射源 0.5m 计，敷贴治疗室每位患者每次治疗时间约 2min，参考西安交通大学第一附属医院现有敷贴治疗情况，每天治疗患者按照 10 人/天计，全年治疗患者 2500 人，则敷贴治疗的放射性工作人员因敷贴操作导致的周围剂量率贡献值为 $16.67\mu\text{Sv/a}$ ，小于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

11.2.1.6 放射性药物治疗项目辐射屏蔽估算及影响分析

本项目治疗用放射性药物包括 ^{177}Lu 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{188}Re 、 ^{211}At 、 ^{89}Sr 、 ^{35}S 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{46}Sc ，除 ^{211}At 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 为 α 放射性核素外其余均为 β 核素。 α 射线在空气中、人体组织中的射程均很短，穿不透皮肤表层，因此，本评价不考虑 α 射线外照射影响。

根据公式 11-10 和 11-11 计算 β 核素在塑料中的射程和对应的物质的厚度，见表 11-25。

表 11-25 核素的 β 射线在中的射程

序号	核素	β 射线最大能量 (MeV)	屏蔽物质	在物质中的射程 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	在物质中的射程对应的物质厚度 (mm)
1	^{177}Lu	0.497	塑料	0.056	0.40
2	^{153}Sm	0.804	塑料	0.107	0.77

3	¹⁸⁶ Re	1.07	塑料	0.155	1.10
4	¹⁸⁸ Re	2.12	塑料	0.348	2.49
5	⁸⁹ Sr	1.46	塑料	0.226	1.61
6	³⁵ S	0.167	塑料	0.011	0.08
7	⁴⁶ Sc	1.48	塑料	0.230	1.64
8	⁹⁰ Y	2.27	塑料	0.376	2.68

由《辐射防护导论》可知，有塑料密度取 $1.4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，原子序数 5.85；

由表 11-25 可知，注射用放射性药物衰变产生的 β 射线在塑料中射程所能穿透的最大厚度为 2.68mm，很容易被屏蔽。

以上治疗用放射性药物注射除 ¹⁷⁷Lu 在核医学科病房注射，⁹⁰Y 在 DSA 手术室进行注射外其余均在专用注射窗口进行注射， β 射线所致韧致辐射影响根据公式 11-12 进行计算，计算结果见表 11-26。

表 11-26 距不同裸源不同距离处韧致辐射产生的 γ 辐射剂量率

核素	源活度 A (Bq)	屏蔽材料原子序数	E (MeV)	距离 r (m)	μ_{em}/ρ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	辐射剂量率 ($\mu\text{Gy}/\text{h}$)	备注
¹⁷⁷ Lu	3.70×10^9	5.85	0.497 ¹⁾	0.5	1.155×10^{-2}	1.26	病房注射
¹⁵³ Sm	9.25×10^8	5.85	0.804 ¹⁾	0.5	4.35×10^{-3}	0.31	注射窗口注射
¹⁸⁶ Re	3.70×10^9	5.85	1.07 ²⁾	0.5	3.536×10^{-3}	1.78	
¹⁸⁸ Re	1.85×10^9	5.85	2.12 ¹⁾	0.5	2.389×10^{-3}	2.37	
⁸⁹ Sr	1.85×10^8	5.85	1.46 ¹⁾	0.5	2.669×10^{-3}	0.13	
³⁵ S	3.70×10^8	5.85	0.167 ¹⁾	0.5	8.607×10^{-2}	0.11	
⁴⁶ Sc	3.70×10^8	5.85	1.48 ¹⁾	0.5	2.669×10^{-3}	0.26	DSA 机房注射
⁹⁰ Y	3.70×10^9	5.85	2.27 ¹⁾	0.5	2.39×10^{-3}	5.42	

注：1)来自于《 γ 射线屏蔽参数手册》（中国科学院工程力学研究所编）表 3-1；2)来自于相关药物说明书；Z 值取塑料的有效原子序数为 5.85， μ_{em}/ρ 取值查《辐射防护导论》附表 1

根据表 11-26 可知，在不考虑防护的情况下 ¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re、⁸⁹Sr 等在专用注射窗口进行注射的，距离注射药物 0.5m 最大辐射剂量率为 $2.37\mu\text{Gy}/\text{h}$ ，在经过注射室墙的防护后剂量还会进一步减少，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中工作场所防护水平要求。

¹⁷⁷Lu 在核医学科病房区进行注射，在不考虑防护的情况下距离注射药物 ¹⁷⁷Lu 0.5m 最大辐射剂量率为 $2.37\mu\text{Gy}/\text{h}$ ，在经过病房墙的防护后剂量还会进一步减少，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中工作场所防护水平要求。

⁹⁰Y 在 DSA6 机房进行注射，在不考虑防护的情况下距离注射药物 ⁹⁰Y 0.5m 时辐射剂量率为 $5.42\mu\text{Gy}/\text{h}$ ，DSA 6 手术室长 10.17m 宽 8.01m，注射操作位距离手术室墙外的最近距离为 4m，距离 ⁹⁰Y 注射 4m 处辐射剂量率为 $0.08\mu\text{Gy}/\text{h}$ ，则在不考虑 DSA 6 手术室防护墙的防护能力情况下，DSA6 手术室在 ⁹⁰Y 操作时能

满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中屏蔽要求控制区内屏蔽体外 30cm 处周围剂量当量率不大于 $2.5\mu\text{Gy/h}$ 的要求。

（2）公众及辐射工作人员年有效剂量估算

根据表 9-7 可知，在专用注射窗口进行注射的 β 核素有 12 人，合计全年 3000 人，每次医生接触药物注射时间约 20s，全年累积接触时间约 16.67h，按照无防护裸源最大辐射剂量率（ $2.37\mu\text{Gy/h}$ ）计算放射性工作人员年有效剂量最大约为 $39.51\mu\text{Sv}$ 。核素注射区域一般无公众人员，按最不利情况考虑在核素注射过程中周围可能有人员停留，考虑部分居留居留因子取 1/5，则公众人员年有效剂量约为 $7.90\mu\text{Sv}$ ，小于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

^{177}Lu 在核医学科病房区进行注射，每天最多治疗 1 人，全年治疗 250 人，考虑 ^{177}Lu 为静脉注射治疗，进行注射操作的时间最多为 30s/人，放射性工作人员年有效剂量最大约为 $2.63\mu\text{Sv}$ 。 ^{177}Lu 住院病区一般无公众人员居留，按最不利情况考虑在核素注射过程中周围可能有人员停留，考虑部分居留居留因子取 1/5，则公众人员年有效剂量约为 $0.53\mu\text{Sv}$ ，小于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

^{90}Y 在 DSA 6 机房进行注射，日治疗患者的人数为 1 人，全年合计 250 人，每次注射时间约 5~7min，年操作时间最长为 26.17h，按照无防护裸源辐射剂量率计算放射性工作人员年有效剂量最大约为 $158.10\mu\text{Sv}$ 。 ^{90}Y 注射区域一般无公众人员，按最不利情况考虑在核素注射过程中周围可能有人员停留，考虑部分居留居留因子取 1/5，则公众人员年有效剂量约为 $31.62\mu\text{Sv}$ ，小于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

若所有核医学科的注射均为同一放射性工作人员完成，则核素注射引起的放射性工作人员年有效剂量贡献值为 0.2mSv/a ，小于本项目放射性工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

11.2.1.7 粒籽源治疗

本项目拟使用的粒籽源有 ^{125}I 、 ^{166}Ho 、 ^{103}Pd ，其中 ^{166}Ho 为 β 源，核医学普通应用只要戴上手套和眼罩（或面罩），用镊子或其他夹具操作，手部接触 β 源，就能达到防护要求。 ^{166}Ho 产生的影响相对于 ^{125}I 和 ^{103}Pd 小，故本次粒籽源治疗过程主要考虑 ^{125}I 和 ^{103}Pd 粒籽源产生的影响。

医院粒籽源植入操作在 ECT1 检查室内进行。手术操作时，除考虑粒籽源产生的 γ 射线外照射辐射影响，还应考虑 ECT 设备（CT 部分）扫描期间产生的 X

射线影响。由于粒籽源电子俘获衰变产生的 γ 射线能量较低 (27.2~35.5keV)，其贯穿能力较弱，因此本次粒籽源植入工作场所主要考虑 ECT 的屏蔽要求，当 ECT 检查室满足 CT 设备机房屏蔽要求后，其机房内粒籽源产生 γ 射线亦能满足屏蔽要求，根据 ECT 检查机房结算结果可知，ECT1 检查室满足 CT 设备机房屏蔽要求，故不考虑粒籽源对机房外环境的影响。

根据《粒籽源永久性植入治疗放射防护要求》(GBZ 178-2017) 附录 A，粒籽源不同距离的剂量率见表 11-27。

表 11-27 距 ^{125}I 和 ^{103}Pd 粒籽源不同距离的剂量率

距离	^{125}I 粒籽源	^{103}Pd 粒籽源 (采用 ICRP98)
表面 (0.07mm)	100Sv/h	730 Sv/h
1cm	5mSv/h	35 mSv/h
1m	0.5 μ Sv/h	3.5 μ Sv/h

注： ^{125}I 粒籽源源活度：14.6MBq； ^{103}Pd 粒籽源源活度：100MBq

由表 11-27 可知，患者最大植入 ^{125}I 3700MBq 时 1m 处的剂量率为 126.72 μ Sv/h，最大植入 ^{103}Pd 3700MBq，1m 处的剂量率为 129.5 μ Sv/h，铅对 ^{125}I 的屏蔽半值层厚度为 0.025mm，铅对 ^{103}Pd 的屏蔽半值层厚度为 0.008mm。由《辐射防护手册第三册-安全手册》可知空心砖对于 50keV 的 γ 射线的十分之一层厚度为 6cm，本项目专用病房为 24cm 实心砖墙，偏保守考虑本次预测按照半值层是 6cm 考虑。

由医院提供资料可知，粒籽植入操作时工作人员穿戴铅衣 (0.25mmPb)，距粒籽源 30cm；粒籽植入患者转移至病房途中，给患者植入部位穿戴 0.5mm 铅当量的铅防护用品，转移过程中护士距病人约 30cm，时间约 5min。粒籽植入患者住院时间最长约 5~7 天，在此期间限制患者的行动，不允许公众人员进入病房，医生通过视频及对讲装置与患者沟通，也不进入病房。

经屏蔽后的剂量率的计算公式见公式 11-13，根据公式 11-13 及相关计算参数，计算结果见下表 11-28~11-29。

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{HLV}} \right)^2 \quad \text{或} \quad D = D_0 \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{HLV}} \right)^2 \quad (\text{公式 11-13})$$

式中：D——目标点的剂量率，mSv/h；

D_0 ——无屏蔽时距源 1m 处的剂量率，mSv/h；

d——源中心到目标计算点的距离，m；

S——屏蔽层的厚度，cm；

HLV——屏蔽材料对核素产生的 γ 射线的半值层厚度。

表 11-28 ^{125}I 粒籽源辐射剂量率估算结果

位置	1m 处的剂量 ($\mu\text{Sv/h}$)	距离 (m)	屏蔽物质厚度	屏蔽后的剂量 率 ($\mu\text{Sv/h}$)
植入操作位	126.72	0.3	0.25mmPb	1.38
距植入病人 30cm 处	126.72	0.3	0.5mmPb	1.34E-03
植入患者 病房外	墙体外 30cm	1.54	240mm 实心砖	5.34E-03
	防护门外 30cm	3.6	6mmPb	5.52E-72
	防护窗外 30cm	1.54	6mmPb	3.02E-71
住院病房为防护能力为 240mm 实心砖+20mm 高纯度硫酸钡砂浆, 按照 240mm 实心砖保守考虑计算				

表 11-29 ^{103}Pd 粒籽源辐射剂量率估算结果

位置	1m 处的剂量 ($\mu\text{Sv/h}$)	距离 (m)	屏蔽物质厚度	屏蔽后的剂量 率 ($\mu\text{Sv/h}$)
植入操作位	129.5	0.3	0.25mmPb	5.63E-07
距植入病人 30cm 处	129.5	0.3	0.5mmPb	2.21E-16
植入患者 病房外	墙体外 30cm	1.54	240mm 实心砖	5.46E-3
	防护门外 30cm	3.6	6mmPb	1.69E-225
	防护窗外 30cm	1.54	6mmPb	9.22E-225
住院病房防护能力为 240mm 实心砖+20mm 高纯度硫酸钡砂浆, 按照 240mm 实心砖保守考虑计算;对于 ^{103}Pd 铅的半值层只有 0.008mm 在 10mmPb 铅的防护下, 屏蔽后的剂量几乎为零。				

由表 11-28~11-29 计算结果可知, 粒籽植入项目运行过程中, 经相应屏蔽措施屏蔽后, 粒籽植入病房及 ECT1 机房在进行粒籽植入治疗时, 相应场所均能满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 中工作场所防护水平要求。

由医院提供资料可知, 粒籽源植入年手术最大量约 1500 例, 按照最大剂量考虑, 粒籽源植入引起的放射性工作人员及公众的年有效剂量见表 11-30。

表 11-30 粒籽植入项目引起的放射性工作人员及公众的年有效剂量

成员	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	时间	年有效剂量 (mSv)
手术工 作人员	植入人员	1500 例/年 \times 10min/例=250h	0.345
	护士	1500 例/年 \times 5min/例=125h	4.2E-4
公众人员	5.46E-3	250 天 \times 8h/天 \times 1/4=400h	2.18E-3

由表 11-32 可知, 工作人员年有效剂量贡献值为 0.345mSv/a, 对公众人员年有效剂量贡献值为 2.18×10^{-3} mSv/a, 均不超过本次评价的公众人员 (0.1mSv) 和放射性工作人员 (5mSv) 年有效剂量控制目标。

11.2.2 放疗科

医用电子直线加速器位于综合楼地下二层北侧, 平面布局见图 11-2。

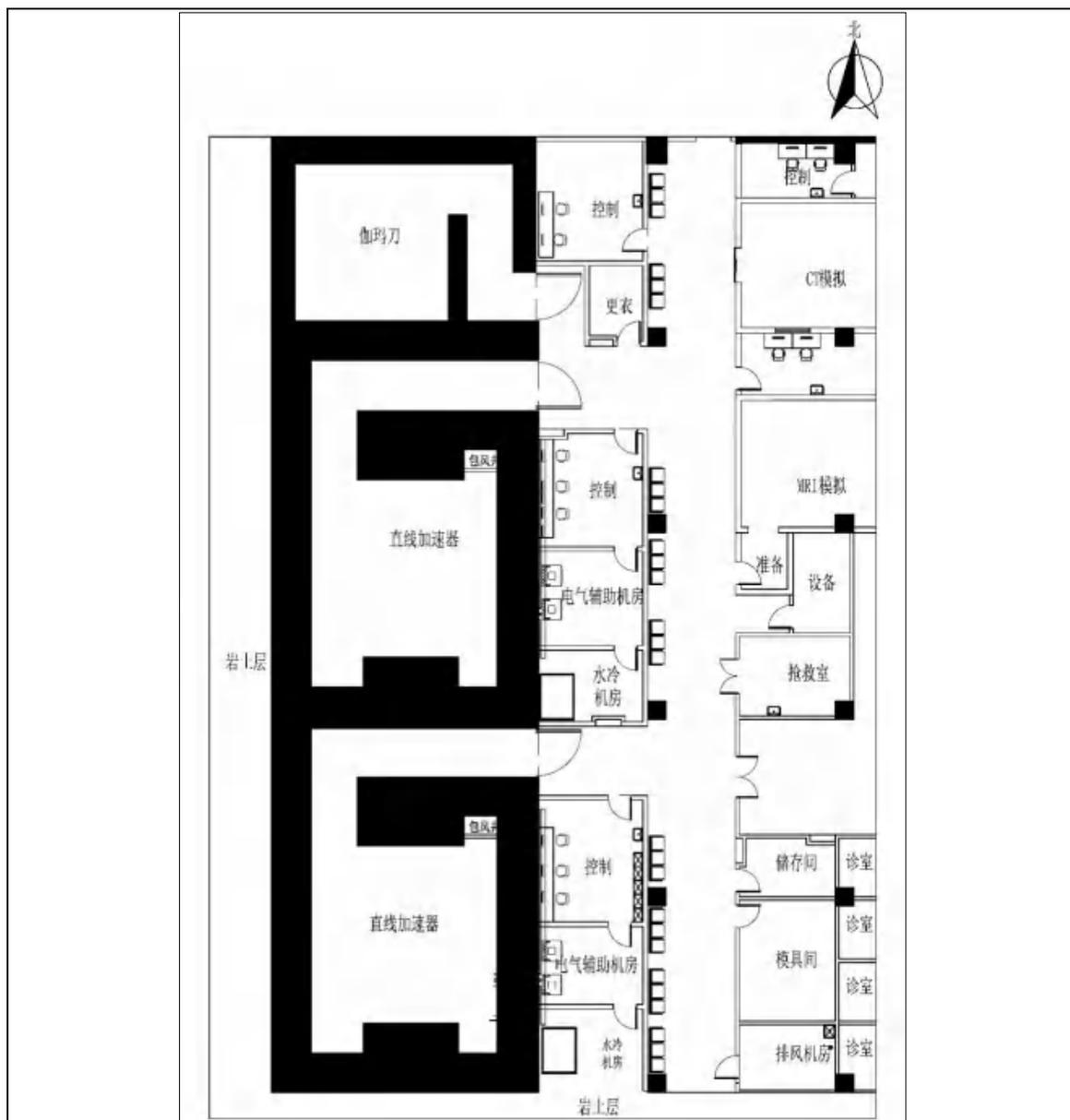


图 11-2 直线加速器机房平面布局图

11.2.2.1 医用电子直线加速器

参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范》（GBZT201.2-2011）附录C中有关内容“加速器机头外的杂散中子成为直接光中子，它来源于X射线中能量大于10MeV的管子与加速器的靶、准直器、均整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。本项目直线加速器的能量最大为10MV故本项目加速器机房不考虑中子的防护能力。

1 贯穿辐射分析

本项目配备 2 台 10MV 医用电子加速器，加速器可以产生 X 射线和电子线两种束流开展放射治疗应用。设备运行参数如下：X 射线治疗束最大能量为 10MV，

有用束最大张角为 28° ，治疗最大照射野： $40\text{cm}\times 40\text{cm}$ ；等中心（距靶 1m ）处的最大剂量率为 $2400\text{cGy}/\text{min}$ ；X 射线的泄漏率 $\leq 0.1\%$ ；等中心距离地面高度： 1295mm 。

2 电子线辐射分析

考虑到电子束治疗次数有限（工作负荷不足 X 射线治疗的 1% ），且电子束治疗过程中，电子线与机头、治疗床、人体组织等作用产生韧致辐射的能量和强度均低于电子束撞击钨靶产生的治疗 X 射线的能量和强度，所以，如果机房及其防护门能够满足 X 治疗束的屏蔽防护要求，一定能够满足电子束治疗中产生的韧致辐射的防护要求，故本评价对电子束的环境影响不做具体评价。

3 机房辐射分析

（1）有用线束主屏蔽区半宽度核算

使用 GBZ/T201.1-2007 的公式计算有用线束主屏蔽区的半宽度 Y。本项目机房由于进行了改造，主屏蔽区均内、外两侧均进行了增加，故在进行半宽计算时，按照主屏蔽区均为向机房内凸，屋顶向机房外凸（计算示意图 11-3），分别对主屏蔽区半宽度进行计算：

$$Y_p = (\alpha + \text{SAD}) \text{tg}\theta + 0.3 \quad \dots\dots\dots \text{（公式 11-14）}$$

式中 Y_p ——机房有用束主屏蔽的宽度，m；

SAD——源轴距，m；本项目取 1m ；

θ ——治疗束的最大张角（相对束中的轴线）；本项目取 14° 。

α ——等中心点至“墙”的距离，m；当主屏蔽区相机房内凸时，“墙”指与主屏蔽相连接的次屏蔽墙（或顶）的内表面；当主屏蔽区向机房外凸时，“墙”指主屏蔽区墙（或顶）的外表面；

根据医院提供的资料可知，本次评价涉及的 2 个加速器机房，分别对机房 1（南侧）和机房 2（北侧）进行计算；加速器主屏蔽墙宽度核算结果见表 11-31。

表 11-31 加速器机房主屏蔽墙宽度核算结果一览表 单位：m

项目	主屏蔽墙位置	主屏蔽墙类型	等中心点至“墙”的距离	核算宽度	设计宽度	评价及建议
加速器 机房 1	机房南侧主屏蔽墙	内凸	5.15	3.67	4.1	符合
	迷路内墙	内凸	5.15	3.67	4.6	符合
	机房屋顶主屏蔽墙	内凸	3.905	3.05	4.1	符合
加速器 机房 2	机房南侧主屏蔽墙	内凸	5.15	3.67	4.1	符合
	迷路内墙	内凸	5.15	3.67	4.6	符合

	机房屋顶主屏蔽墙	内凸	3.905	3.05	4.1	符合
--	----------	----	-------	------	-----	----

根据上述计算结果，机房 1 和机房 2 各主屏蔽墙均符合防护要求。

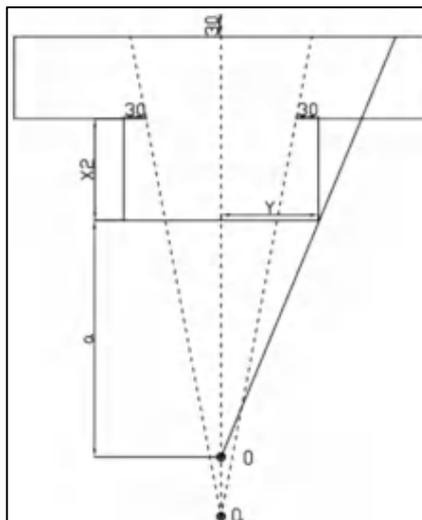


图 11-3 加速器有用线束主屏蔽区半宽度计算示意图

(2) 机房防护能力核算

①关注点剂量率参考控制水平

治疗机房墙和人口门外关注点的剂量率应不大于下述 a)、b)和 c)所确定的剂量率参考控制水平 H_c :

a) 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,可以依照附录 A,由以下周剂量参考控制水平(H_c)求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $H_{c,d}(uSv/h)$:

1)放射治疗机房外控制区的工作人员: $H_c \leq 100 uSv/周$;

2) 放射治疗机房外非控制区的人员: $H_c \leq 5uSv/周$ 。

b) 按照关注点人员居留因子的下列不同,分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $H_{c,max}(uSv/h)$:

1) 人员居留因子 $T \geq 1/2$ 的场所; $H_{c,max} \leq 2.5uSv/h$;

2) 人员居留因子 $T < 1/2$ 的场所: $H_{c,max} \leq 10uSv/h$ 。

c) 由上述 a)中的导出剂量率参考控制水平 $H_{c,d}$ 和 b)中的最高剂量率参考控制水平 $H_{c,max}$,选择其中较小者作为关注点的剂量率参考控制水平 $H_c(uSv/h)$ 。

②导出剂量率参考控制水平($H_{c,d}$)

1)单一辐射

单一有用线束与单一泄漏辐射按如下方法导出剂量率参考控制水平:

a) 有用线束

有用线束在关注点的周剂量参考控制水平为 H_c 时,该关注点的导出剂量率参考控制水平 $H_{c,d}$ ($\mu\text{Sv/h}$)见式(A.2):

$$H_{c,d}=H_c/(t \cdot U \cdot T) \dots\dots\dots(A.2)$$

式中: H_c ——周参考剂量控制水平($\mu\text{Sv/周}$),见 4.2.1 的 a);

t ——治疗装置周治疗照射时间,h;

U ——有用线束向关注位置的方向照射的使用因子;

T ——人员在相应关注点驻留的居留因子。

b) 单一泄漏辐射

泄漏辐射在关注点的周剂量参考控制水平为 H_c 时,该关注点的导出剂量率参考控制水平 $H_{c,d}$ ($\mu\text{Sv/h}$)见式(A.3):

$$H_{c,d}= H_c / (N \cdot t \cdot T)$$

式中: H_c ——周参考剂量控制水平($\mu\text{Sv/周}$),见 4.2.1 的 a);

N ——调强治疗时用于泄漏辐射的调强因子,通常 $N=5$;

r ——治疗装置周治疗照射时间,h;

T ——人员在相应关注点驻留的居留因子

2)复合辐射

与主屏蔽直接相连的次屏蔽区,需要考虑加速器的泄漏辐射和有用线束水平照射的患者散射辐射:

a) 以4.2.1b)、4.2.2a)或4.2.2b)中的 $H_{c,max}$ 的一半,作为关注点的导出剂量率参考控制水平,依5.2.2估算屏蔽患者散射辐射所需要的屏蔽厚度;

b) 将A.2.1b)的(A.3)式中的 H_c 以 $0.5H_c$ 代替,作为关注点的导出剂量率参考控制水平,依5.2.1估算屏蔽泄漏辐射所需要的屏蔽厚度;

c) 取上述a)和b)中屏蔽厚度较厚者为该关注点的屏蔽设计。相应屏蔽下,泄漏辐射和有用线束患者散射辐射在关注点的剂量率之和为该处的剂量率控制值。

b、估算结果

关注点剂量率参考控制水平详见表11-32。

表11-32 关注点剂量率参考控制水平一览表

机房	关注点位	射线类型	使用因子U	强调因子N	居留因子T	周治疗照射时间t	周参考剂量控制水平H ($\mu\text{Sv/周}$)	导出剂量率参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	关注点最高剂量率参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
机房1	南侧 a	有用线束	1/4	/	1/40	2.25h	5	355.56	10	10
		泄露	/	5	1/40	2.25h	5/2	8.89	/	8.89

	北侧 b	辐射一次散射	/	/	1/40	2.25h	/	/	10/2	5	
		有用线束	1/4	/	1/8	2.25h	100	1422.22	10	10	
		泄露辐射	/	5	1/8	2.25h	100/2	35.56	/	35.56	
	西侧 e	辐射一次散射	/	/	1/8	2.25h	/	/	10/2	5	
		漏射射线	/	5	1/40	2.25h	5	17.78	10	10	
		东侧 f	漏射射线	/	5	1(控制室)	2.25h	100	8.89	2.5	2.5
	漏射射线		/	5	1/20(电气辅助机房)	2.25h	5	8.89	10	8.89	
	漏射射线		/	5	1/20(水冷机房)	2.25h	5	8.89	10	8.89	
	屋顶 m	有用线束	1/4	/	1/20	2.25h	5	177.78	10	10	
		泄露辐射	/	5	1/20	2.25h	5/2	4.44	/	4.44	
		辐射一次散射	/	/	1/20	2.25h	/	/	10/2	5	
	机房 2	南侧	有用线束	1/4	/	1/8	2.25h	100	1422.22	10	10
			泄露辐射	/	5	1/8	2.25h	100/2	35.56	/	35.56
			辐射一次散射	/	/	1/8	2.25h	/	/	10/2	5
		北侧	有用线束	1/4	/	1/8	2.25h	100	1422.22	10	10
泄露辐射			/	5	1/8	2.25h	100/2	35.56	/	35.56	
辐射一次散射			/	/	1/8	2.25h	/	/	10/2	5	
西侧		漏射射线	/	5	1/40	2.25h	5	17.78	10	10	
		东侧	漏射射线	/	5	1(控制室)	2.25h	100	8.89	2.5	2.5
			5		1/20(水冷机房)	2.25h	5	8.89	10	8.89	
5			1/5(更衣室)		2.25h	5	2.22	10	2.22		
屋顶		有用线束	1/4	/	1/20	2.25h	5	177.78	10	10	
		泄露辐射	/	5	1/20	2.25h	5/2	4.44	/	4.44	
		辐射一次散射	/	/	1/20	2.25h	/	/	10/2	5	

③机房屏蔽墙体周围剂量当量率估算

机房防护能力估算计算点位见图 11-4、11-5。本项目防护墙采用标准混凝土密度不小于 2.35g/cm³。

1) 主屏蔽区、侧屏蔽墙及迷路外墙防护能力核算(即 a、b、e、f、m 计算点

的处的剂量率计算。

本项目给定屏蔽墙厚度，按 GBZ/T201.2-2011 公式计算辐射在屏蔽体关注点的剂量率 \dot{H} ($\mu\text{Sv/h}$)。

$$\dot{H} = \frac{H_0 \cdot B \cdot f}{R^2} \cdot 10^{-X_e/TVL} \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-15)}$$

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-16)}$$

$$X_e = X \cdot \sec\theta \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-17)}$$

式中： \dot{H}_0 ----加速器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， $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ ；

B----屏蔽投射因子；

f----对有用束为 1，对 90°泄漏辐射为 1.0×10^{-3} ；

R----辐射源点至关注点的距离，m；

X_e ----有效屏蔽厚度，cm；

θ ----入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角；

本项目加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶(以下简称“靶”)1m 处的常用最高剂量率为 $2400\text{cGy}/\text{min}$ ，即 $1.44 \times 10^9 \mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ 。根据 GBZ 201.2-2011 附表 B.1，有用束在混凝土中的什值层：10MV 时， $TVL_1=41\text{cm}$ ， $TVL=37\text{cm}$ ；泄漏辐射在混凝土中的什值层：10MV 时， $TVL_1=35\text{cm}$ ， $TVL=31\text{cm}$ ；根据 GBZ201.2-2011 附表 B.4，患者散射辐射在混凝土中的什值层：10MV 时，30°散射角时 $TVL=28\text{cm}$ ， $TVL_1=28\text{cm}$ ；根据 NCRP No.151 附表 B，有用束在铅中的什值层：10MV 时， $TVL_1=5.7\text{cm}$ 。

2) 与主屏蔽区相连的次屏蔽区防护能力核算 (即 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 、 m_1 、 m_2 计算点的处的剂量率计算)

按照公式 11-17 计算有效屏蔽物质厚度，再按公式 11-16 计算屏蔽物质的屏蔽投射因子，并按公式 11-18 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率 \dot{H} ($\mu\text{Sv/h}$)。

$$\dot{H}_p = \frac{\dot{H}_0 \cdot B \cdot f \cdot (F/400)}{R^2} \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-18)}$$

式中： α 与 X 射线的 MV 值及散射角有关，取患者散射角为 30°， α_{ph} 取

3.18×10^{-3} 。

次屏蔽外关注点的剂量率由泄漏辐射和患者的散射辐射经屏蔽后在关注点的剂量率共同组成，即由公式 11-15、11-18 计算得出剂量率之和为次屏蔽外关注点的总剂量率。

3) 直线加速器机房核算结果

表 11-33 直线加速器机房 1 核算结果

位置		混凝土防护厚度 (m)	辐射源点至关注点的距离 (m)	计算点空气比释动能率 ($\mu\text{Sv/h}$)	计算点参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	备注
主屏蔽区	南侧 a(机房主照射区)	3.0	8.15	0.22	10	符合评价限值
	北侧 b 点(机房主照射区)	6.1	13.25	3.43×10^{-10}	10	
	m 点(屋顶)	3.0	6.905	0.30	10	
侧屏蔽区	西侧 e 点	1.7	6.3	0.16	10	
	东侧 f 点(迷路外墙)	1.8	5.8	0.09	2.5	
次屏蔽区	南侧 c_1 、 c_2 (与 a 侧相连的次屏蔽)	1.7	8.1	0.03 (散)	5	
			8.1	$1.37\text{E-}2$ (漏)	8.89	
	北侧 d_1 、 d_2 (与 b 侧相连的次屏蔽)	1.8	12.76	$4.25\text{E-}3$ (散)	5	
			12.76	$2.35\text{E-}3$ (漏)	35.56	
	屋顶 m_1 、 m_2 (与 l 侧相连的次屏蔽)	1.7	7.49	0.03 (散)	5	
			7.49	$1.61\text{E-}2$ (漏)	4.44	

表 11-34 直线加速器机房 2 核算结果

位置		混凝土防护厚度 (m)	辐射源点至关注点的距离 (m)	计算点空气比释动能率 ($\mu\text{Sv/h}$)	计算点参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	备注
主屏蔽区	南侧 a(机房主照射区)	3.1	8.25	0.11	10	符合评价限值
	北侧 b 点(机房主照射区)	4.7	12.05	2.52×10^{-6}	10	
	m 点(屋顶)	3	6.95	0.30	10	
侧屏蔽区	西侧 e 点	1.7	6.3	0.16	10	
	东侧 f 点(迷路外墙)	1.8	5.8	0.09	2.22	
次屏蔽区	南侧 c_1 、 c_2 (与 a 侧相连的次屏蔽)	1.8	8.1	0.03 (散)	5	
			8.1	$1.37\text{E-}2$ (漏)	35.56	
	北侧 d_1 、 d_2 (与 b 侧相连的次屏蔽)	1.7	12.76	$4.25\text{E-}3$ (散)	5	
			12.76	$2.35\text{E-}3$ (漏)	35.56	
	屋顶 m_1 、 m_2 (与 l 侧相连的次屏蔽)	1.7	7.49	0.03 (散)	5	
			7.49	$1.61\text{E-}2$ (漏)	4.44	

4 防护门防护能力估算

(1) 迷路入口处的辐射剂量估算

由于项目电子直线加速器有用线束向迷路内墙照射，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/T201.2-2011)，有用线束向迷路内墙照射时，迷路入口处的辐射剂量率应考虑以下三方面：

①核算穿过迷路内墙的有用线束受迷路外墙散射至“g点”的辐射剂量率（见图11-4中 o_2-i-g ）。此项值应为“g点”的参考控制水平的一个分数（一般小于1/4）。若此辐射剂量值较高，应增加迷路内墙的屏蔽厚度。

有用线束穿过患者或迷路内墙，垂直射入屏蔽墙并散射至计算点的辐射剂量率按公式11-19计算。

$$H = H_0 \cdot \frac{(F/10^4)}{R^2} \cdot a_w \cdot B_p \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-19)}$$

式中：H—计算点的辐射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

H_0 —加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶1m处的最高剂量率，项目取 $1.44 \times 10^9 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ；

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积， cm^2 ；项目治疗最大照射野为 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ ，则F取值 1600cm^2 ；

10^4 —将 1m^2 面积转换为 10^4cm^2 ；

R—散射体中心点（有用线束在屏蔽墙上的投影点）与计算点的距离，m，项目机房1取 5.812m ，机房2取 5.816m ；

a_w —散射因子，单位面积（ 1m^2 ）散射体散射到距其1m处的散射辐射剂量率与该面积上的入射辐射剂量率的比，参照GBZ/T201.2-2011附录B中表B.5，路径 o_2-i-g 为 0° 入射、 75° 散射，两个机房散射因子均取 2.1×10^{-3} ；

B_p —有用线束射入散射体（屏蔽墙）前的屏蔽透射因子，项目两个机房迷路内墙厚 3.0m ，则透射因子 B_p 均取 1.0×10^{-8} 。

经计算，项目有用线束穿过迷路内墙，垂直射入迷路外墙并散射至计算点g点的辐射剂量率机房1为 $1.43 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ ，机房2为 $1.43 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ 。

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/T201.2-2011），在按式11-19估算该项散射时，有用线束边缘距g点可能较近，并且还可能存在迷路内墙的杂散辐射，该项散射辐射剂量率可能为单个计算点理论值的2倍，因此，两个机房该项散射辐射剂量率保守取值 $2.86 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ ，小于g点参考控制水平的1/4（ $0.625 \mu\text{Sv/h}$ ）。

②入射至“i墙”的散射辐射至g点的辐射中，“i点”的入射辐射可能来自：泄漏辐射（见图中 o_1-i-g ）；患者散射辐射（见图中 $o_2-o-i-g$ ）；向“o点”有用线束穿过

患者身体并射入屏蔽墙内表面“h点”的散射辐射（见图中o₁-h-i-g）。下面分别对以上三种散射辐射情形进行分析：

- a. 射入屏蔽墙上的泄漏辐射被散射至g点的辐射剂量率按式11-20计算。

$$\dot{H} = \frac{J \cdot H_0 \cdot A \cdot a_w}{R_L^2 \cdot R^2} \dots\dots\dots \text{（公式 11-20）}$$

式中：H—计算点的辐射剂量率，μSv/h；

H₀—加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶1m处的最高剂量率，项目取1.44×10⁹μSv·m²/h；

f—加速器的泄漏辐射比率，项目取0.1%；

A—散射面积，自泄漏辐射始点和计算点共同可见的散射体区域面积m²，项目机房1取4.61m²（长度0.886m、机房高度5.2m），机房2取4.74m²（长度0.912m、机房高度5.2m）；

a_w—散射体的散射因子，项目保守都取6.4×10⁻³；

R_L—泄漏辐射始点至散射体中心点的距离，机房1取8.38m（o-i），机房2取8.38m（o-i）；

R—散射体中心点至计算点的距离，机房1取10.112m（i-g），机房2取11.116m（i-g）。

经计算，机房1射入屏蔽墙上的泄漏辐射被散射至计算点g点的辐射剂量率为0.01μSv/h，机房2射入屏蔽墙上的泄漏辐射被散射至计算点g点的辐射剂量率为0.01μSv/h。

- b. 患者散射至机房g点辐射剂量率按公式11-21计算。

$$\dot{H}_g = \frac{a_{ph} \cdot (F / 400)}{R_1^2} \cdot \frac{a_2 \cdot A}{R_2^2} \dot{H}_o \dots\dots\dots \text{（公式11-21）}$$

式中：H_g—g处的散射辐射剂量率，μSv/h；

H_o—加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶1m处的最高剂量率，项目取1.44×10⁹μSv·m²/h；

a_{ph}----患者400cm²面积上的散射因子，项目患者散射角按45°保守取值，即a_{ph}取1.35×10⁻³；

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积， cm^2 ；项目治疗最大照射野为 $40\text{cm}\times 40\text{cm}$ ，则F取值 1600cm^2 ；

a_2 —砼墙入射的患者散射辐射的散射因子，项目按混凝土墙 45° 入射、 0° 散射、 1m^2 散射面积、 0.5MeV 栏的散射因子保守取值，即 $a_2=22\times 10^{-3}$ ；

R_1 —等中心点到一次散射的距离，m，机房1取 8.38m （o-i），机房2取 8.38m （o-i）；

R_2 —一次散射到迷路口的距离，m，机房1取 10.112m （i-g），机房2取 11.116m （i-g）；

A—一次散射的散射面积， m^2 ，项目机房1取 4.61m^2 （长度 0.886m 、机房高度 5.2m ），机房2取 4.74m^2 （长度 0.912m 、机房高度 5.2m ）。

经计算，患者散射至计算点g点的辐射剂量率机房1为 **$109.83\mu\text{Sv/h}$** ，机房2为 **$112.84\mu\text{Sv/h}$** 。

c.有用线束穿过患者身体并射入屏蔽墙内表面h点的射线散射至机房迷路入口g点的辐射剂量率按公式11-22计算。

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \times \frac{a_w \times (F/10^4)}{R^2} \times B_p \times \frac{a_2 \times A}{R_1^2} \quad \dots\dots \text{（公式11-22）}$$

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

\dot{H}_0 —加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶 1m 处的最高剂量率，项目取 $1.44\times 10^9\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ ；

a_w —散射因子，单位面积（ 1m^2 ）散射体散射到距其 1m 处的散射辐射剂量率与该面积上的入射辐射剂量率的比，项目保守取 4.1×10^{-3} ；

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积， cm^2 ；项目治疗最大照射野为 $40\text{cm}\times 40\text{cm}$ ，则F取值 1600cm^2 ；

R—散射体中心点h点（有用线束在屏蔽墙上的投影点）与i点的距离，m，项目取机房1取 11.86m ，机房2取 11.86m ；

B_p —有用线束射入散射体（屏蔽墙）前的屏蔽透射因子，对于患者取0.34。

a_2 —散射辐射的散射因子，项目按混凝土墙 45° 入射、 0° 散射、 0.5MeV 栏， 1m^2 散射面积的散射因子保守取值，即 $a_2=22\times 10^{-3}$ ；

A — i 点处的散射面积, m^2 , 项目机房1取 $13.72m^2$ (长度 $2.638m$, 机房高度 $5.2m$), 机房2取 $14.37m^2$ (长度 $2.764m$, 机房高度 $5.2m$);

R_2 — i 点至 g 点之间的距离, m , 项目机房1取 $10.112m$ ($i-g$), 机房2取 $11.116m$ ($i-g$);

经计算, 有用线束穿过患者身体并射入屏蔽墙内表面 h 点的射线散射至机房迷路入口 g 点的辐射剂量率机房1为 $6.74\mu Sv/h$, 机房2为 $7.05\mu Sv/h$ 。

d. 入射至“ i 墙”的散射辐射至 g 点的辐射剂量率

项目入射至 i 点的辐射散射至 g 点的辐射剂量率共计 $64.07\mu Sv/h$ 。

③漏射线贯穿迷路内墙所致 g 点的辐射

漏射线贯穿迷路内墙所致的辐射剂量率按式11-20计算。当泄漏辐射路径为 o_1-g (见图11-4), 屏蔽墙有效厚度为 $1.7m$, 漏射线到 g 点的距离机房1保守取值 $8.78m$, 机房2保守取 $8.82m$, 则迷路内墙对泄漏射线的屏蔽透射因子 B 为 4.42×10^{-6} , 经迷路内墙屏蔽后对 g 点的贡献值机房1和机房2均为 $0.08\mu Sv/h$, 小于 g 点参考控制水平的 $1/4$ ($0.625\mu Sv/h$)。

(2)防护门X射线屏蔽效果估算

在给定防护门的铅屏蔽厚度 X (cm) 时, 防护门外的辐射剂量率按公式11-23计算:

$$\dot{H} = \dot{H}_i \cdot 10^{-0.114 \cdot TVL} + \dot{H}_{sc} \quad \dots \text{(公式11-23)}$$

式中 $TVL=5mm$, 本项目加速器机房防护门设计机房1和机房2均为 $16mmPb$, 经计算防护门外 $30cm$ 处的剂量率为:

$$H=119.90 \times 10^{- (16/5)} + 0.08 = 0.156\mu Sv/h。$$

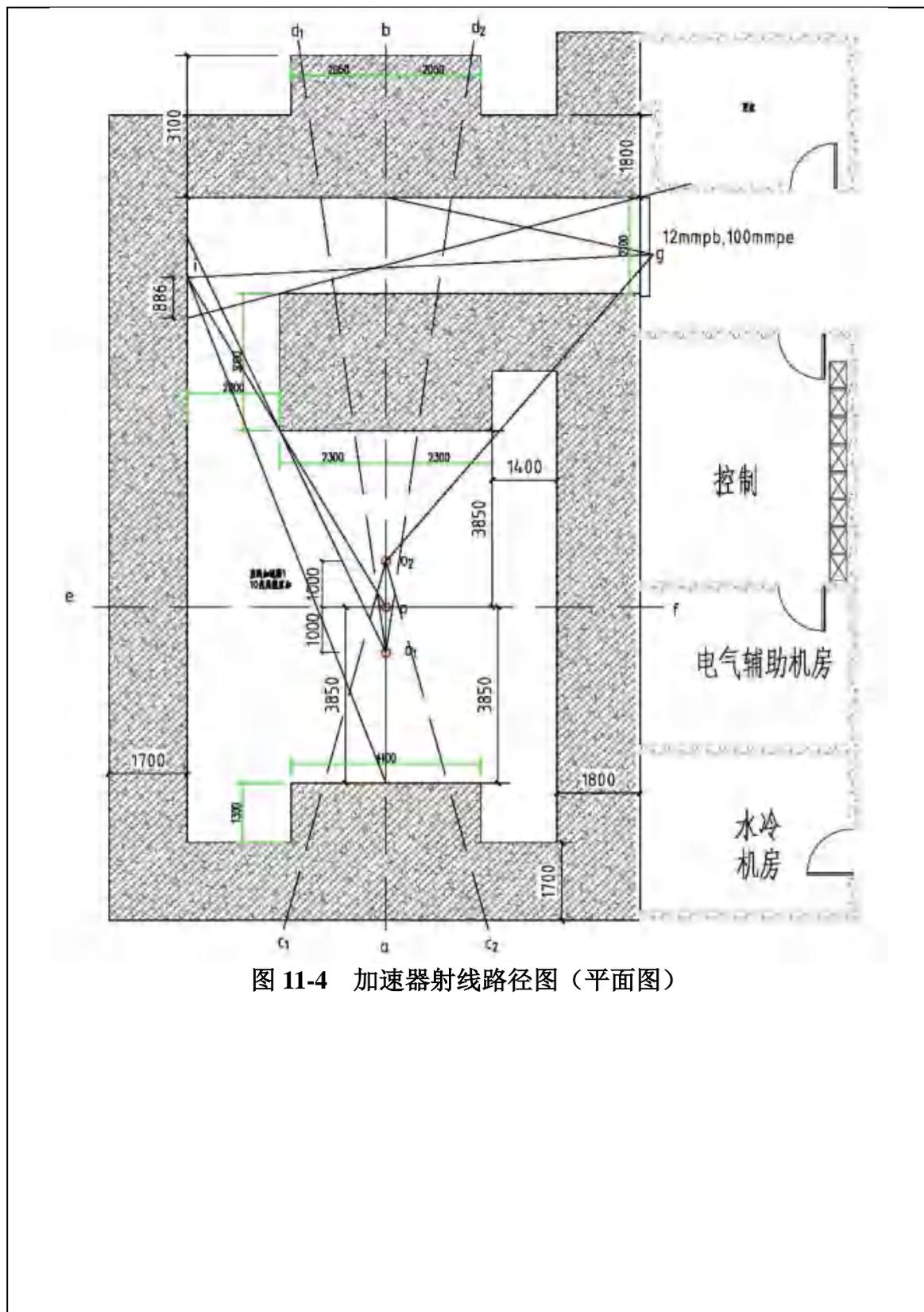


图 11-4 加速器射线路径图 (平面图)

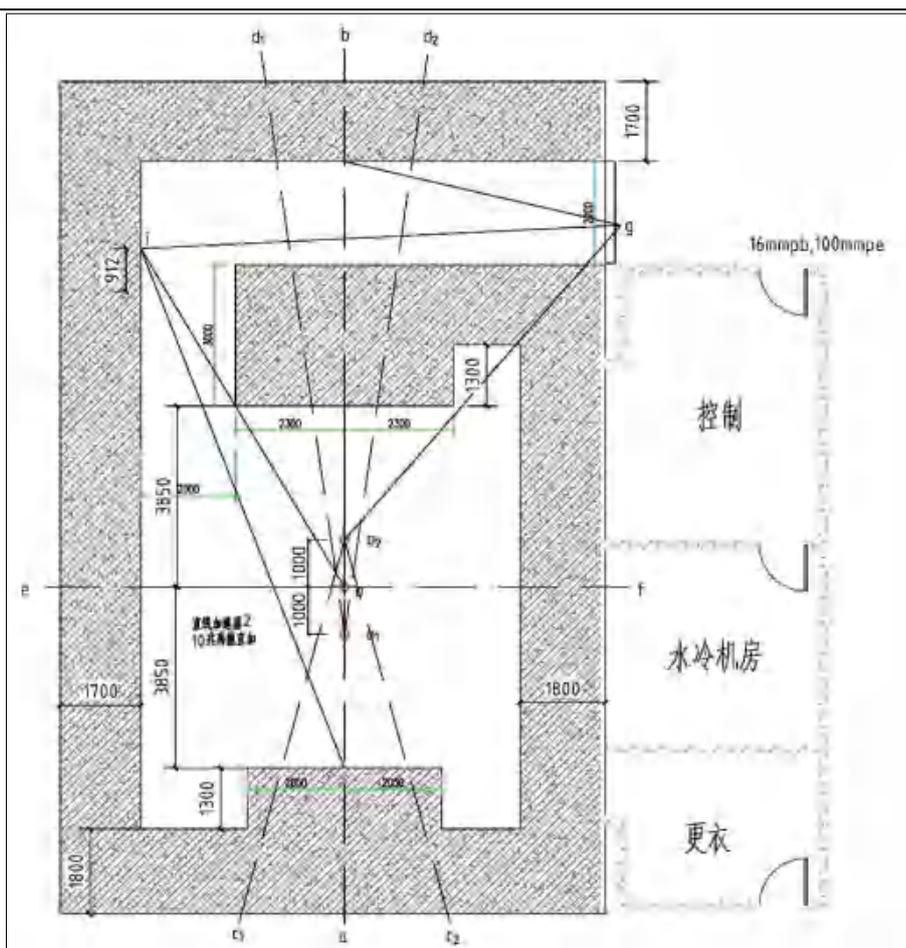


图 11-4 加速器射线路径图（平面图）

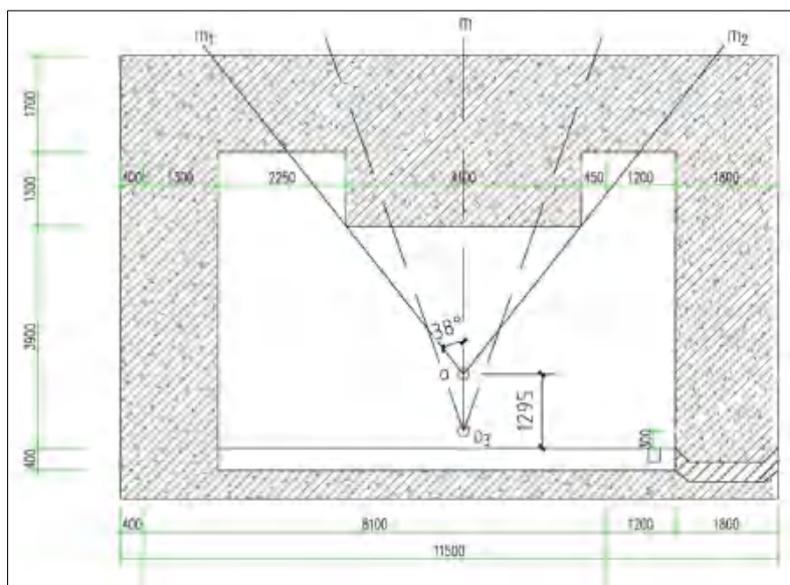


图 11-5 加速器射线路径图（剖面图）

5 辐解有害气体

(1) 臭氧

在加速器开机运行时，产生的X射线与空气相互作用可产生少量臭氧和氮氧

化物，辐照所指有害气体以O₃为主，在考虑通风情况下，空气中的O₃的平衡浓度由下式估算：

$$Q = \frac{Q_0}{T} + V \dots\dots\dots \text{(公式11-24)}$$

式中：Q----加速器治疗室内O₃平衡浓度，mg/m³；

Q₀----O₃的化学产额，mg/m³；

T----有效清除时间，h；

V----治疗室体积，m³；

加速器治疗室内的O₃产额由公式11-25估算：

$$Q_0 = 0.39D_0SRG \dots\dots\dots \text{(公式11-25)}$$

中：D₀----距靶1m处的输出量，取值1000cGy/min；

S----照射野面积，0.16m²；

R----X射线束靶点到屏蔽物（墙）的距离（最远距离），10.04m；

G----空气吸收100eV辐射能量产生的O₃分子数，一般为6~10，为留有安全系数取值为10；

有效清洗时间T由下式计算：

$$T = \frac{1}{6} \dots\dots\dots \text{(公式11-26)}$$

式中：T_d----臭氧的有效分解时间，（取0.83h）；

T_v----换气一次所需时间，按照设计参数通风系统换气次数为6次/h，即T_v=0.17h/次。

加速器治疗室体积最大约为455.13m³，上式计算得出换气6次/h，加速器机房内臭氧平衡浓度约为0.05mg/m³。如果考虑漏射线与散射线的影响，将上述计算值增加10%，治疗室内臭氧浓度约为0.055mg/m³，低于工作场所中O₃浓度限值(0.3mg/m³)。

(2) 氮氧化物

在多种氮氧化物（NO_x）中，以NO₂为主，其产额约为O₃的一半。《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准对空气中NO₂一小时平均浓度限值为

200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与 O_3 限值相同。因而， NO_x 产生和排放对周围大气环境的影响也很小。

6 直线加速器工作人员个人剂量估算

辐射工作人员与公众所照射的辐射年剂量按下式计算：

$$H = t \cdot T \cdot D \cdot U \quad \dots\dots\dots(\text{公式11-27})$$

式中：H—辐射工作人员与公众受照射的辐射年剂量，mSv/a；

t—受照射时间（h），根据院方提供的资料，直线加速器全年运行1250h；

T—居留因子；

D—受照射的剂量率（ $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ）；

U—使用因子。

本项目机房估算年受照剂量，计算结果见表11-35。

表11-35 直线加速器辐射工作人员及公众年受照剂量估算结果

机房名称	点位	最大辐射剂量率($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	年工作时间	居留因子	年受照剂量(μSv)	约束限制(mSv)
机房1	西侧防护墙	0.16	112.5h	1/40	0.45	0.1
	东侧防护墙	0.09		1	10.13	5
				1/20(水冷机房、电气辅助机房)	0.51	0.1
	北侧防护墙	6.6E-3		1/8	0.093	0.1
	屋顶	0.3		1/40	0.84	
				1/20(-1F强电进线间、保洁、污物、清洗间、污染被服)	1.69	0.1
南侧防护墙	0.22	1/40	0.62	0.1		
机房2	西侧防护墙	0.16	112.5h	1/40	0.45	0.1
	东侧防护墙	0.09		1	10.13	5
				1/20（水冷机房）	0.51	0.1
	北侧防护墙	6.6E-3		1/5（更衣室）	2.03	0.1
				1/8	0.093	0.1
	屋顶	0.30		1/20(-1F防护器材、仪器、厕所、污水间、固废、污染被服)	1.69	0.1
1/8			1.55	0.1		
南侧防护墙	0.11					

由上表估算结果可知，加速器工作人员及机房周围公众年受照剂量均低于项目剂量约束值（工作人员不超过5mSv/a，公众人员不超过0.1mSv/a）。

7.电子线的环境影响分析

本项目10MV医用直线加速器在按电子模式工作时，最大电子线能量为

18MeV，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，在低Z物质中的射程（单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）约为能量（单位为MeV）的0.6倍。本项目10MV直线加速器以电子档工作时最大电子线能量为18MeV，射程为 $18\times 0.6=10.8\text{g}/\text{cm}^2$ ，可以估算出18MeV的电子在密度为 $2.35\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的混凝土中的深度约为4.6cm，而本项目屏蔽体厚度最小的为170cm混凝土，对电子线能产生完全屏蔽，可不再作特殊的防护要求，可不考虑对电子模式产生的X射线的屏蔽。

11.2.2.2 后装治疗机

本项目拟新增的后装机位于地下一层，周围平面布局见图 11-6。

（1）辐射环境影响分析

项目拟在后装治疗机房内配置一台 ^{192}Ir 后装治疗机，含 ^{192}Ir 放射源 1 枚，最大装源活度为 $3.7\times 10^{11}\text{Bq}$ ，源距地面高度约 1.0m。

① 关注点的选取

项目后装治疗机房辐射影响分析共设置 6 个关注点，详见图 11-7 至 11-8。

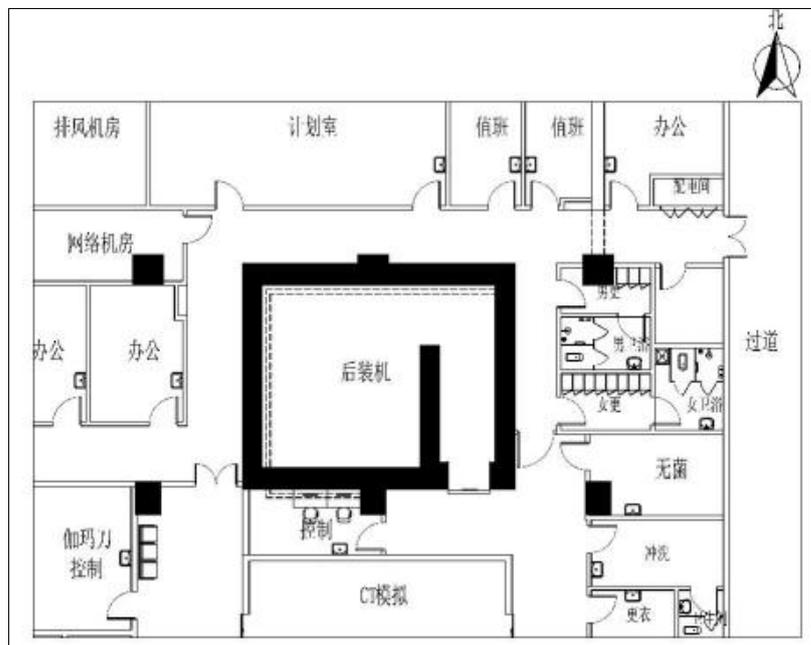


图 11-6 后装机机房平面布局

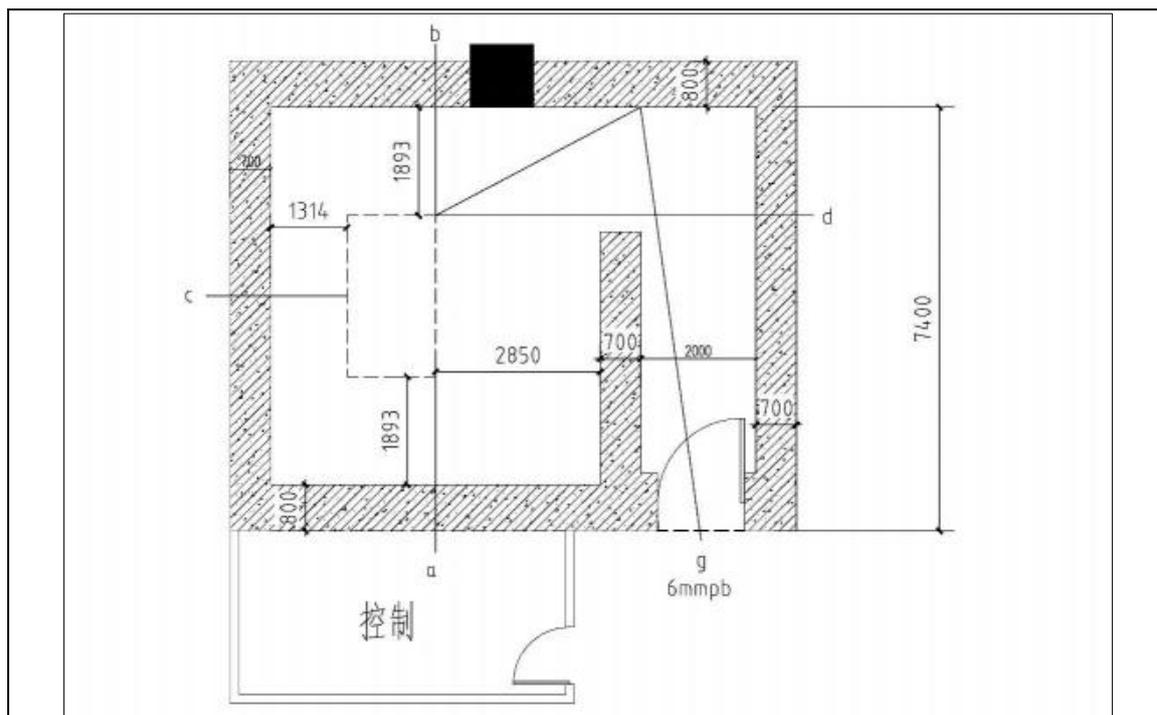


图 11-7 后装治疗机 2 射线路径图（平面图）

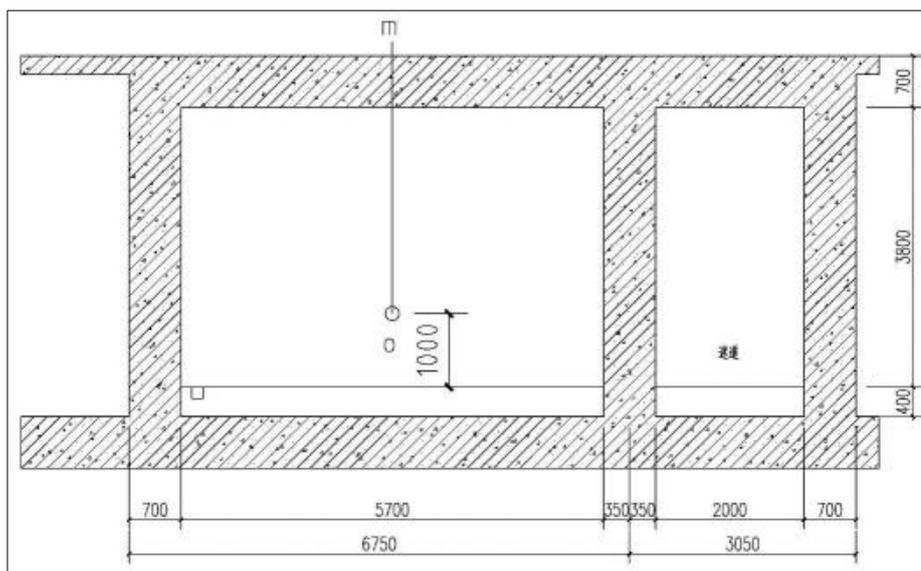


图 11-8 后装治疗机射线路径图（剖面图）

②关注点剂量率参考控制水平

a、估算公式

根据 GBZ/T201.3-2014 中 4.1 剂量控制要求及附录 A，关注点的周剂量参考控制水平为 H_c 时，该关注点的导出剂量率控制水平按公式 11-28 计算。

$$H_{c,d} = H_c / (t \cdot U \cdot T) \quad (\text{公式 11-28})$$

式中： H_c —周参考剂量控制水平， $\mu\text{Sv}/\text{周}$ ，取值参考 GBZ/T201.3-2014 中 4.1.1a)；

t—治疗装置周治疗照射时间，h；每天工作 3.34h，每周工作 5d，每年 50 周；

U—关注位置方向照射的使用因子；

T—人员在相应关注点驻留的居留因子，取值参考GBZ121-2020附录A表 A.1。

按照关注点人员居留因子（T）的不同，确定关注点的最高剂量率参考控制水平按以下情况取值：

人员居留因子 $T \geq 1/2$ 的场所：最高剂量率参考控制水平 $\leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；

人员居留因子 $T < 1/2$ 的场所：最高剂量率参考控制水平 $\leq 10 \mu\text{Sv/h}$ 。

项目关注点剂量率参考控制水平应根据关注点的导出剂量率控制水平和最高剂量率参考控制水平从严取值。

b、估算结果

关注点剂量率参考控制水平详见表11-36。

表11-36 关注点剂量率参考控制水平一览表

关注点 点位	射线 类型	使用 因子U	居留 因子T	周治疗 照射时 间t	周参考剂量 控制水平H ($\mu\text{Sv/周}$)	导出剂量率 参考控制水 平($\mu\text{Sv/h}$)	关注点最高 剂量率参考 控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率参 考控制水 平 ($\mu\text{Sv/h}$)
南侧 a	有用 线束	1	1(控制室)	16.7h	100	5.99	2.5	2.5
			1/5(过道)	16.7h	5	1.50	10	1.50
北侧 b	有用 线束	1	1/5(过道)	16.7h	5	1.50	10	1.50
东侧 d	有用 线束	1	1/5(过道)	16.7h	5	1.50	10	1.50
西侧 c	有用 线束	1	1/5(过道)	16.7h	5	1.50	10	1.50
屋顶	有用 线束	1	1/5(值班 室、走廊)	16.7h	5	1.50	10	1.50
			1(碘分 装、一 更、二 更、医 办、护办)	16.7h	100	5.99	2.5	2.5
			1/20(库、 干净被 服、厕所)	16.7h	5	5.99	10	5.99

③机房屏蔽墙体周围剂量当量率估算

项目治疗时假设放射源全部被传送至施源器，则辐射环境影响预测时保守将其视为点源来预测计算，本评价主要考虑放射源产生的 γ 射线（即初级辐射）对

墙和治疗机房顶的直接照射及其散射辐射在机房入口处的照射，采用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第3部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）中推荐的公式进行辐射屏蔽估算。

a、估算公式

1)初级辐射的屏蔽计算

在给定屏蔽物质厚度 X (mm) 时，按（公式 11-29）计算有效厚度 X_e (mm)，按（公式 11-30）计算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B ，再按（公式 11-30）计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)。

$$X_e = X \cdot \sec\theta \quad \dots \text{（公式 11-29）}$$

式中： X_e —有效屏蔽厚度，cm；

X —屏蔽厚度，cm；

θ —入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角。

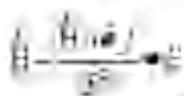
$$B = 10^{-(X_e + \text{TVL} - \text{TVL}_1) / \text{TVL}} \quad \dots \text{（公式 11-30）}$$

式中： B —辐射屏蔽透射因子；

X_e —有效屏蔽厚度，cm；

TVL_1 —辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度；

TVL —平衡什值层。



$$\dots \dots \text{（公式 11-31）}$$

式中： \dot{H} —关注点的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

\dot{H}_0 —活度为 A 的放射源在距其 1m 处的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ； $\dot{H}_0 = AK$ ， K_g

放射源的空气比释动能率常数， ^{192}Ir 为 $0.111\mu\text{Sv}/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ，源活度 $3.7 \times 10^{11}\text{Bq}$ ；

R —辐射源点至关注点的距离，m；

B —屏蔽透射因子；

f —对有用线束为 1。

2) 散射辐射的屏蔽计算

防护门处经屏蔽后的散射辐射剂量率计算公式见公式 11-32。

$$\dot{H} = \frac{A \cdot S_w \cdot a_w}{R_1^2 \times R_2^2} \cdot B \quad \dots \quad \cdot \text{ (公式 11-32)}$$

式中： \dot{H} —关注点的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

\dot{H}_0 —活度为 A 的放射源在距其 1m 处的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ； $\dot{H}_0 = A \times K$ ，

K 为放射源的空气比释动能率常数， ^{192}Ir 为 $0.111\mu\text{Sv}/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ，源活度 $3.7 \times 10^{11}\text{Bq}$ ；

R_1 —辐射源点至散射体中心的距离，m；

R_2 —散射体中心至关注点的距离，m；

B—屏蔽透射因子，散射辐射在防护门处的能量约 0.2MeV ， $\text{TVL}_{\text{铅}} = 5\text{mm}$ ；

S_w —迷道内口墙的散射面积，其为辐射源和机房入口共同可见的墙区面积， m^2 ；

a_w —散射体的散射因子， m^2 ，取表 C.4 中 0.25MeV 时 45° 入射 0° 散射因子 3.39×10^{-2} 。

b、估算结果

根据后装治疗机房的平面布置图，得出放射源到各关注点的距离 R。根据公式 11-29~11-31 计算出治疗机房外各关注点的初级辐射剂量率水平，计算参数和结果见表 11-37；根据式 11-32 计算出防护门外散射辐射剂量率水平，计算参数和结果见表 11-38。

表 11-37 后装治疗机房各关注点初级辐射剂量率预测结果

点位描述	辐射类型	混凝土厚度(m)	Θ (°)	R (m)	f	TVL_1 (cm)	TVL (cm)	预测值 ($\mu\text{Sv/h}$)	本次评价要求	
南侧 a	初级	0.8	0	2.993	1	15.2	15.2	0.03	1.5	
北侧 b	初级	0.8	0	2.993	1	15.2	15.2	0.03	1.5	
西侧 c	初级	0.7	0	2.314	1	15.2	15.2	0.19	1.5	
东侧 d	初级	0.7	0	6.55	1	15.2	15.2	0.02	1.5	
屋顶 m	值班室、走廊	初级	0.7	0	3.8	1	15.2	15.2	0.07	1.5
	碘分装、一更、二更、医办、护办			0	3.8	1	15.2	15.2	0.07	2.5
	库、干净被服、厕所			0	3.8	1	15.2	15.2	0.07	5.99

表 11-38 后装治疗机房防护门外处散射辐射剂量率预测结果

点位描述	辐射类型	铅板厚度(m)	R ₁ (m)	R ₂ (m)	S _w (m ²)	a _w	B(透射系数)	预测值(μSv/h)
机房防护门外 30cm 处 g	散射	6mmPb	4.023	7.7	10.26	3.39×10 ⁻²	6.31×10 ⁻²	0.94

根据表 11-37 和表 11-38 可知,项目后装治疗机房实体屏蔽外 30cm 处的周围剂量当量率最大值为 0.19μSv/h,防护门外 30cm 处的周围剂量当量率最大值为 0.94μSv/h,小于上述各关注点的剂量率参考控制水平,符合《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分:γ 射线源放射治疗机房》(GBZ/T 201.3-2014)、《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)相关要求。

(2) 个人剂量估算

① 治疗机房外人员受照剂量

项目后装治疗机房外关注点处的人员年有效剂量按式 11-28 计算,计算参数和计算结果见表 11-39。

表 11-39 项目放射工作人员及周边环境公众年附加剂量估算结果

机房名称	点位描述	关注人员类型	最大周围剂量当量率 D(μSv/h)	年出束时间 h	居留因子 T	使用因子 U	年受照剂量(mSv/a)	约束限值(mSv/a)
后装 机房	北侧	公众	0.03	835	1/5	1	0.005	0.1
	南侧	职业人员	0.03	835	1	1	0.025	5
		公众	0.19		1/5	1	0.032	0.1
	东侧	公众	0.02	835	1/5	1	0.003	0.1
	西侧	公众	0.07	835	1/5	1	0.012	0.1
	屋顶	公众	0.03	835	1/5(值班室、走廊)	1	0.005	0.1
		职业人员			1(碘分装、一更、二更、医办、护办)	1	0.025	5
		公众			1/20(库、干净被服、厕所)	1	0.001	0.1

根据表 11-39 可知,项目正常运行期间,按最不利情况考虑,控制室内放射工作人员年附加剂量为 0.025mSv/a,远小于项目放射工作人员的年附加剂量约束值(5mSv/a);项目周边环境公众年附加剂量最大为 0.032mSv/a,低于项目周边环境公众的年附加剂量约束值(0.1mSv/a)。因此,项目后装治疗机运行期间,对周边工作人员和公众的辐射影响满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)要求。

② 进入治疗机房内的工作人员受照剂量

由于放射治疗前,放射工作人员需要进入后装治疗机房内协助患者进行摆位,

在摆位过程会受到放射源的照射。

放射工作人员进入后装治疗机房之前，必须确保放射源处于后装治疗机的贮源器中，并穿戴防护用品、佩戴个人剂量报警仪进入机房。放射工作人员协助患者摆位时在机房内停留时间按每天 30min 计，与工作贮源器的平均距离按 1m 考虑。根据《后装 γ 源近距离治疗卫生防护要求》（GBZ121-2017）中“4.2.2 工作贮源器内装载最大容许活度时，距离贮源器表面 100cm 处的球面上，任何一点的泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 $5\mu\text{Gy/h}$ ”要求，本次评价以该泄漏辐射的剂量率限值作为辐射工作人员工作位的最大辐射剂量率进行计算，则辐射工作人员全年摆位过程所受的个人剂量： $5\mu\text{Gy/h}\times 30\text{min}\times 250\text{天}\times 1/60=0.625\text{mSv/a}$ 。

由表 11-39 可知，放射工作人员在控制室操作所受照射剂量最大为 0.025mSv/a ，考虑到摆位和控制室工作人员可能为同人，因此项目放射工作人员所受照射年附加有效剂量为 $0.025+0.625=0.65\text{mSv}$ ，低于项目放射工作人员年附加剂量约束值（ 5mSv/a ），满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求。

（3）非放射性废气环境影响

项目后装治疗机房设置动力送排风装置，其中送风口（2个）排风口（2个）对向布设；送、排风管道在机房防护门洞口上方呈“Z”字型穿过屏蔽墙体，通过折叠设计，增加管道中的射线的散射次数，尽可减弱对墙体屏蔽效果的影响。后装治疗机机房内换气次数为6次/h，大于《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中要求的4次/h，满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中“通风要求”的规定。

（4）更换放射源过程中的环境影响

项目后装机使用 1 枚放射源 ^{192}Ir ，其半衰期为 74 天。根据医院诊疗计划，项目放射源使用达到 1.5 个半衰期时需更换，即 111 天更换一次，每年更换 3 次，产生 3 枚废放射源。更换放射源之前医院先向生态环境主管部门提出放射源准购、转移申请，获得批准后再联系厂家进行放射源的更换，由厂家安排换源及换源后的整机调试。贮源容器供运输和使用贮存放射源，更换放射源时，厂家使用新的贮源容器运输放射源至医院后装治疗机房内，连同贮源容器一起置换，即换源的过程就是贮源容器的置换过程，退役的放射源连同原贮源容器一起运输

至设备厂家进行回收处置。更换放射源全程由厂家专业人员按国家相关规定负责操作完成，医院工作人员不直接参与放射源的更换操作，仅监督辅助厂家专业人员按国家相关规定进行更换操作。

(5) 固体废物环境影响

项目更换的废¹⁹²Ir放射源由供源单位回收，不在项目工作场所内存放，不存在废放射源对周边环境的影响。

11.2.2.3 伽玛刀

本项目伽玛刀机房位于地下二层的北部，东侧为控制机房及楼梯间，南侧为配套的检查 and 定位机房，西侧为空置用房，北侧为岩土层，伽玛刀机房四邻关系见图 11-9。

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 3 部分： γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）对本项目伽玛刀机房进行计算。由于伽玛刀机房西侧为岩土层，故该侧墙体的防护本次计算不考虑。伽玛刀机房辐射屏蔽防护及估算点位示意图见图 11-10~11-11。

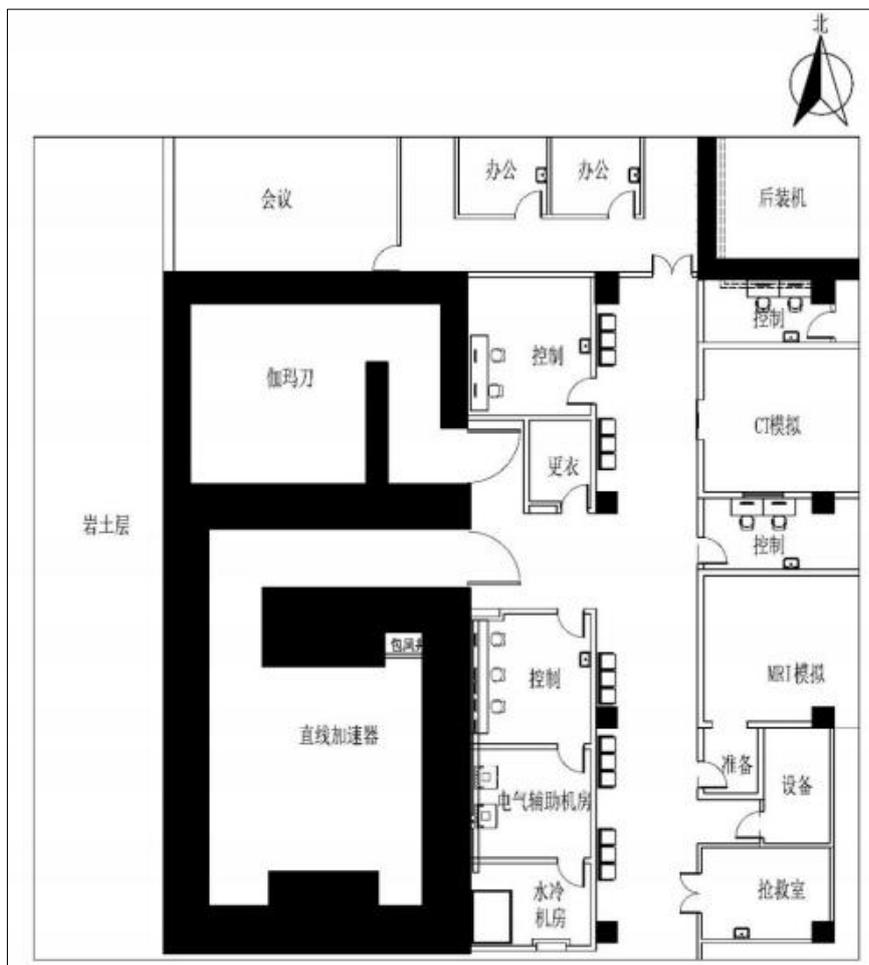


图 11-9 伽玛刀机房四邻关系图

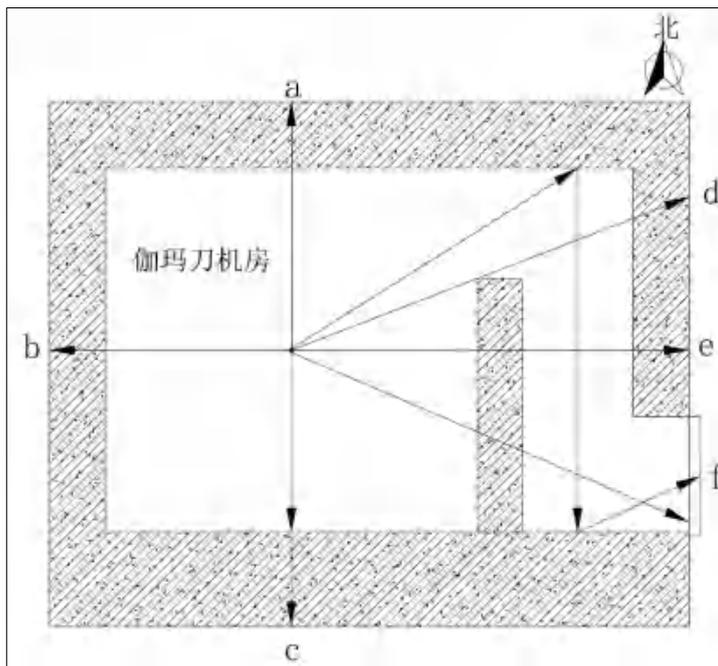


图 11-10 伽玛刀机房计算点位示意图 (1)

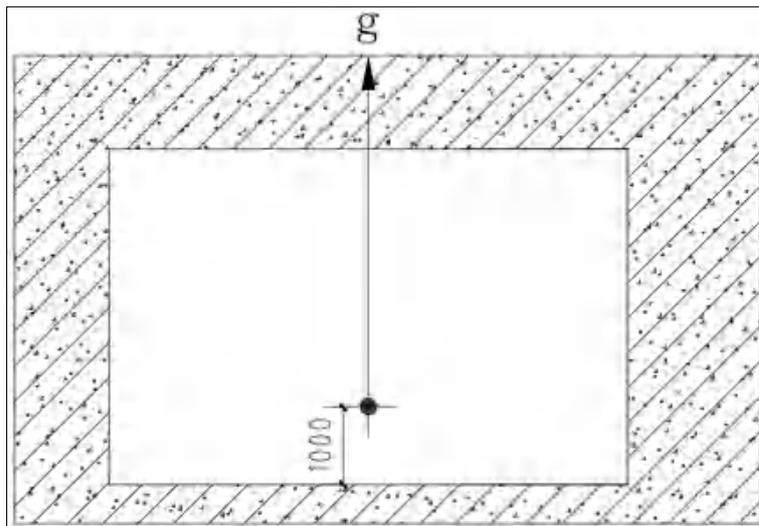


图 11-11 伽玛刀机房计算点位示意图 (2)

(1) 关注点剂量率参考控制水平

根据 GBZ/T201.3-2014, 机房墙外 30cm 处各计算点的剂量率参考控制水平

H_e 由以下方法确定

①使用放射治疗年工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子, 求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $H_{c,d}$;



(公式 11-33)

$H_{c,d}$ —导出剂量率参考控制水平;

H_a —周剂量参考控制水平，其值按如下方式取值：放射治疗机房外控制区的工作人员： $\leq 100\mu\text{Sv}/\text{周}$ ；放射性治疗机房外非控制区的人员： $\leq 5\mu\text{Sv}/\text{周}$ ；

U —主射线束向关注位置的方向照射的使用因子，保守取 1；

T —人员在关注点的居留因子，参考（GBZ121-2020）经常有人员停留的地方取 1，相邻治疗室取 1/5，防护门口取 1/8；

t —年治疗照射时间，根据医院提供资料，伽玛刀周工作时间 10h。

②关注点的最高剂量率参考控制水平 $H_{c,\max}$ ：

人员居留因子 $T \geq 1/2$ 的场所， $H_{c,\max} \leq 2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

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

③治疗室楼顶无建筑物，但是可能具有人员驻留， $H_{c,\max} \leq 2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

④取①、②、③中较小者作为关注的剂量率参考控制水平（ H_c ）。

由此确定的各关注点的剂量率参考控制水平和主要考虑的辐射束见表 11-4

0:

表 11-40 伽玛刀机房周围计算点剂量率参考控制水平表

关注点	居留因子	周照射时间	周剂量参考控制水平	导出剂量率参考控制水平	最高剂量率参考控制水平	剂量率参考控制水平
a(北侧)	1	10h	$5\mu\text{Sv}/\text{周}$	$0.5\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$	0.5
b(西侧)	/	10h	/	/	/	/
c(南侧)	1/2	10h	$100\mu\text{Sv}/\text{周}$	$20\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$
e(东侧)	1	10h	$100\mu\text{Sv}/\text{周}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$
d(东侧)	1	10h	$100\mu\text{Sv}/\text{周}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$
f(门口)	1/8	10h	$5\mu\text{Sv}/\text{周}$	$4\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$4\mu\text{Sv}/\text{h}$
m(屋顶)	1/40	10h	$5\mu\text{Sv}/\text{周}$	$20\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$

伽玛刀机房位于地下二层，机房上方无构筑物

(2) 预测模式

本项目拟使用的伽玛刀的型号及具体参数已确定（Elekta Leksell Gemma Knife），故根据设备厂家提供的设备机房内的辐射水平矩阵图，进行机房治疗室屏蔽防护能力预测。

①计算模式

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 3 部分： γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）在给定屏蔽物质厚度 X （cm）时，首先按照公式 11-34 计算有效厚度 X_e （cm），按照公式 11-35 计算屏蔽物质的屏蔽投射因子 B ，依据设备厂家提供的辐射水平矩阵图，选取最靠近机房墙内表面的最大剂量率考虑距

离衰减后再按照公式 11-36 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)。

$$X_e = X \cdot \sec\theta \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-34)}$$

式中: X —屏蔽物质厚度;

θ —斜射角, 即入射线与物质平面的法线的夹角。

$$B = 10^{-(X_e + \text{TVL} - \text{TVL}_1) / \text{TVL}} \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-35)}$$

式中: TVL (cm)、 TVL_1 (cm) 为辐射在屏蔽物质中的平衡什值层厚度和第一个什值层厚度。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 R_0}{R^2} \cdot B \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-36)}$$

式中: \dot{H}_0 —依据设备厂家提供的辐射水平矩阵图, 选取最接近机房墙内表面的最大辐射剂量率, 单位为 $\mu\text{Sv/h}$;

R_0 —依据设备厂家提供的辐射水平矩阵图, 选取的点位距辐射源点的距离, 单位为 m;

R —辐射源点至关注点的距离, 单位为 m, 本项目参考点均为相应墙外 30cm。

闭束状态下泄露辐射的剂量估算见公式 11-37

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0}{r^2} \cdot B \cdot f \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11-37)}$$

式中: \dot{H}_0 —关束状态下 1m 处的杂散辐射水平;

R ---辐射源点至关注点的距离, m;

B ---屏蔽透射因子;

f ---对 γ 射线远距离治疗装置的泄露辐射为泄露辐射比率, 取 10^{-3} ;

②依据设备厂家提供的辐射水平矩阵图, 选取最接近机房墙体表面、距地面 1m 高度处的辐射水平最大值预测四侧墙体及防护门外关注点的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$), 选取垂直矩阵图中相应高度的辐射水平最大值预测顶部及地板墙体外关注点的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)。

准直仪尺寸为 16mm 时, 射束打开和屏蔽门打开状态下, 地面上 1m 的辐射能级见图 11-12。沿着高于此平面的墙体, 不存在有剂量率的其他水平平面。带

下划线的值为测量值，斜体形式的值为推断值。

图 11-13 为准直仪尺寸 16mm 时，射束打开和屏蔽门打开状态下的辐射能级，能级为在穿过设备中心的垂直平面。沿着高于此平面的墙体、天花板或其他地面，不存在有剂量率的其他垂直平面。带下划线的值为测量值，斜体形式的值为推断值。

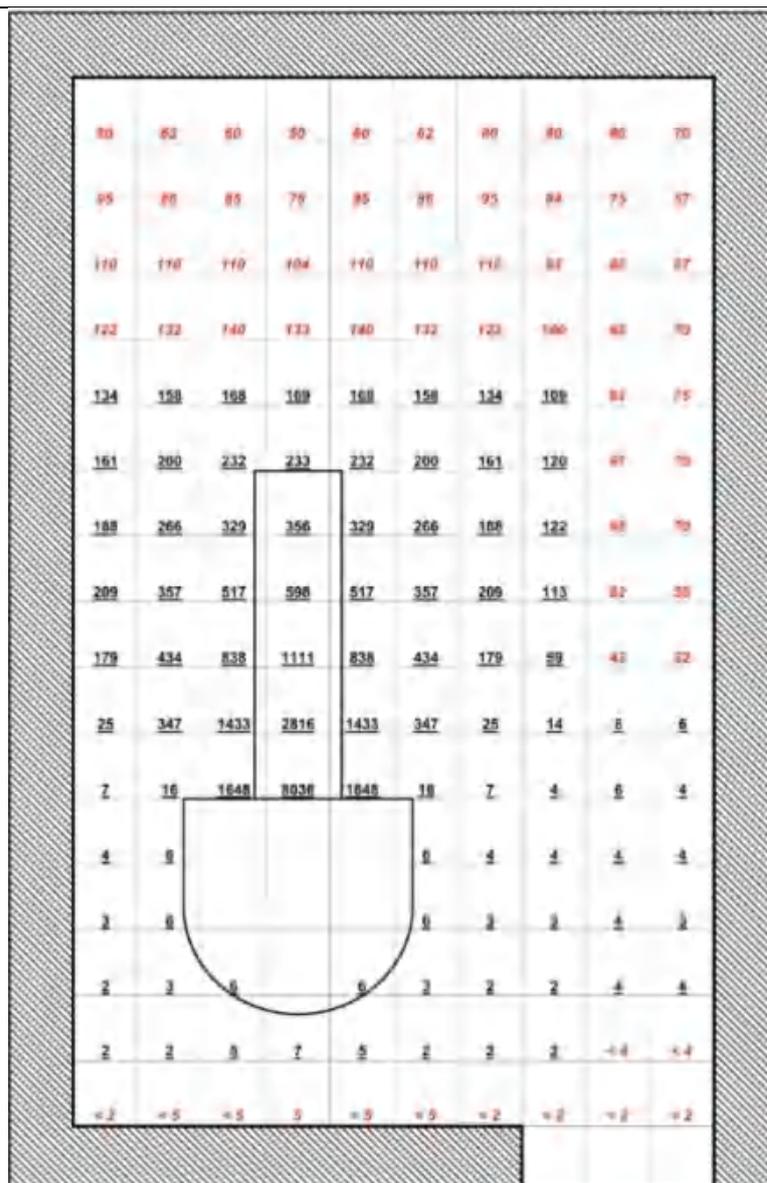


图 11-12 出束状态下距地面 1m 高度、测量间隔为 0.5m 的辐射水平矩阵图(单位 $\mu\text{Sv/h}$)

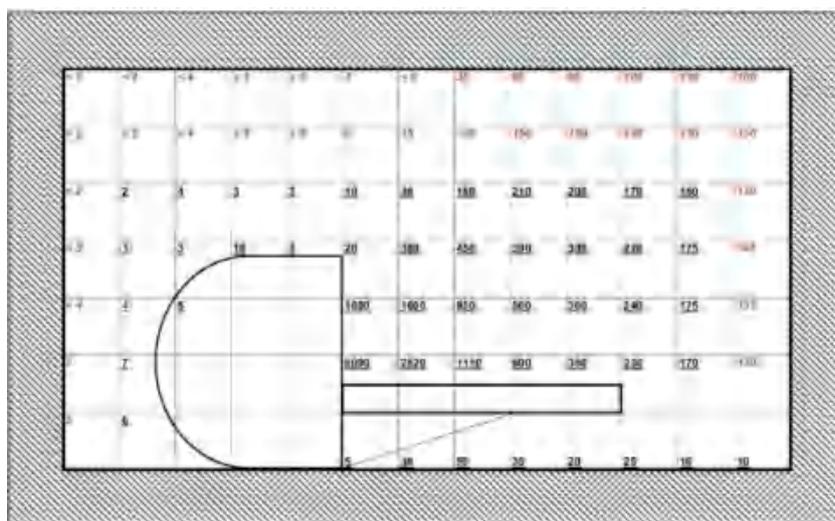


图 11-13 出束状态下测量间隔为 0.5m 的辐射水平垂直矩阵图(单位 $\mu\text{Sv/h}$)

③预测结果计算

依据设备厂家提供的辐射水平矩阵图，选取最靠近机房墙内表面的最大剂量率在考虑距离衰减后，将相应屏蔽厚度得出的辐射屏蔽投射因子 B 值代入，按照公式 11-36 得到相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)，计算结果见表 11-41。

表 11-41 伽玛刀机房出束状态下参考点处的辐射剂量率核算值

预测位置	距离 R(m)	厂家提供机房内表面辐射剂量 H ($\mu\text{Sv/h}$)	厂家剂量选取点距源点的距离 $R_{\text{取}}$ (m)	屏蔽厚度 X(mm)	辐射屏蔽透射因子	剂量率估算值 H($\mu\text{Sv/h}$)	是否符合
a(北侧)	4.9	104	4.5	1200 砵	4.16E-06	3.65E-04	符合
b(西侧)	4.6	104	4.5	1000 砵	3.44E-05	3.42E-03	/
c(南侧)	5.4	76	5.0	1700 砵	2.12E-08	1.38E-06	符合
e(东侧)	7.4	50	5.5	1800 砵	7.36E-09	2.03E-07	符合
d(东侧)	7.4	50	5.5	1000 砵	3.44E-05	9.50E-04	符合
f(门口)	7.4	50	5.5	800 砵 10mmPb	4.18E-05	1.15E-03	符合
m(屋顶)	4.4	150	2.5	1200 砵	4.16E-06	2.02E-04	符合

d 点距离按照最不利考虑等同于等中心到 e 点的距离；f 点距离按照最不利考虑等同于等中心到 e 点的距离；屏蔽厚度均不考虑斜射角；门口处铅的平衡什值层保守取 12mm，等效混凝土厚度约为 181.67mm

根据表 11-41 可知，伽玛刀正常运行工况下机房周围的辐射剂量率为 $2.03 \times 10^{-7} \sim 1.15 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/h}$ ，满足本次确定的伽玛刀机房周围计算点剂量率参考控制水平要求。

图 11-14 表示射束关闭状态下，地面上 1m 的辐射能级。沿着高于此平面的墙体，不存在有剂量率的其他水平平面。带下划线的值为测量值，斜体形式的值为推断值，在没有特定值的位置上，剂量率小于 $2 \mu\text{Sv/h}$ 。

图 11-15 表示当射束关闭状态下，地面上 1m 的辐射能级。沿着高于此平面的墙体，不存在有剂量率的其他水平平面。带下划线的值为测量值，斜体形式的值为推断值，在没有特定值的位置上，剂量率小于 $2 \mu\text{Sv/h}$ 。

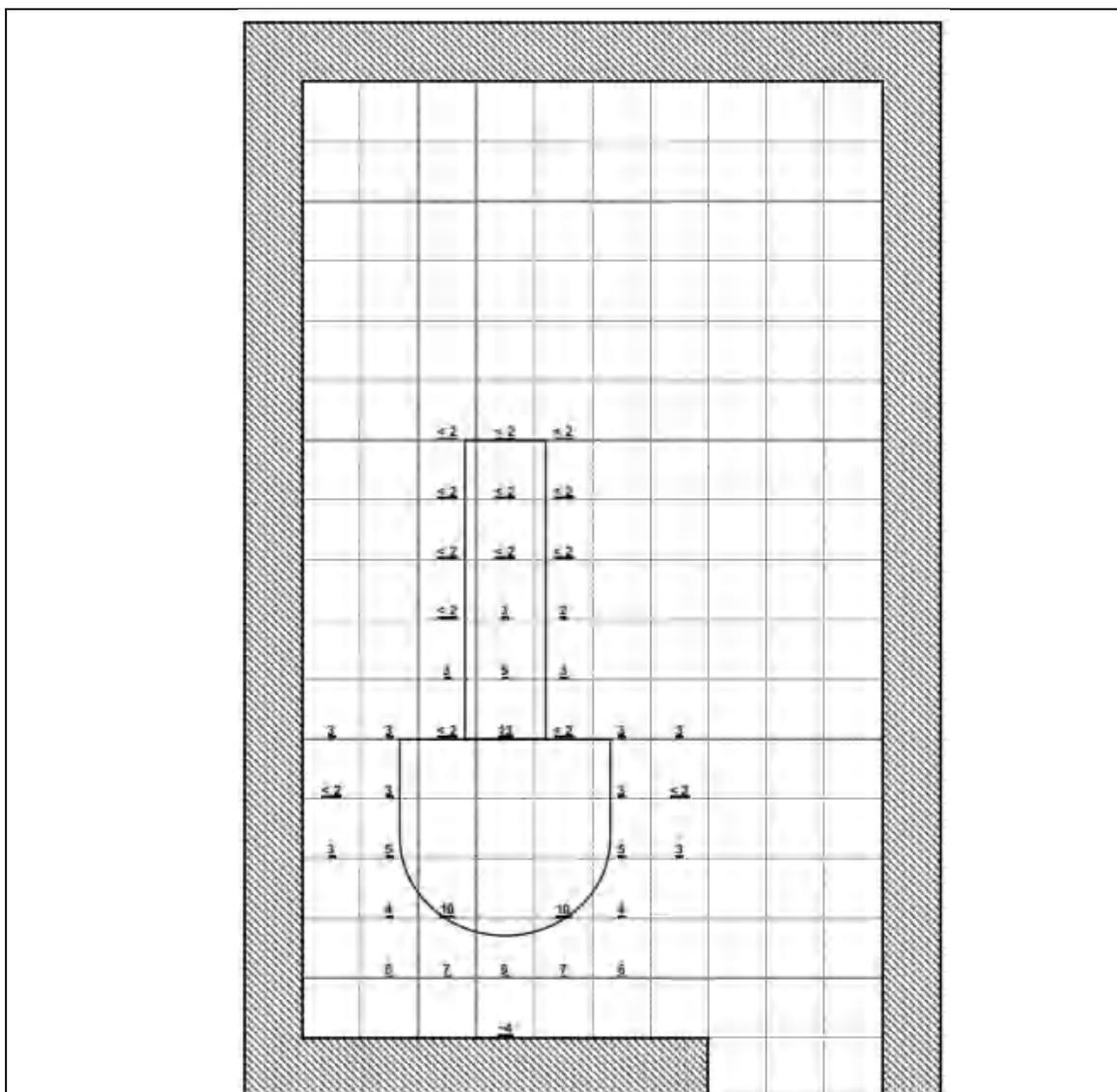


图 11-14 闭束状态下距地面 1m 高度、测量间隔为 0.5m 的辐射水平矩阵图(单位 $\mu\text{Sv/h}$)

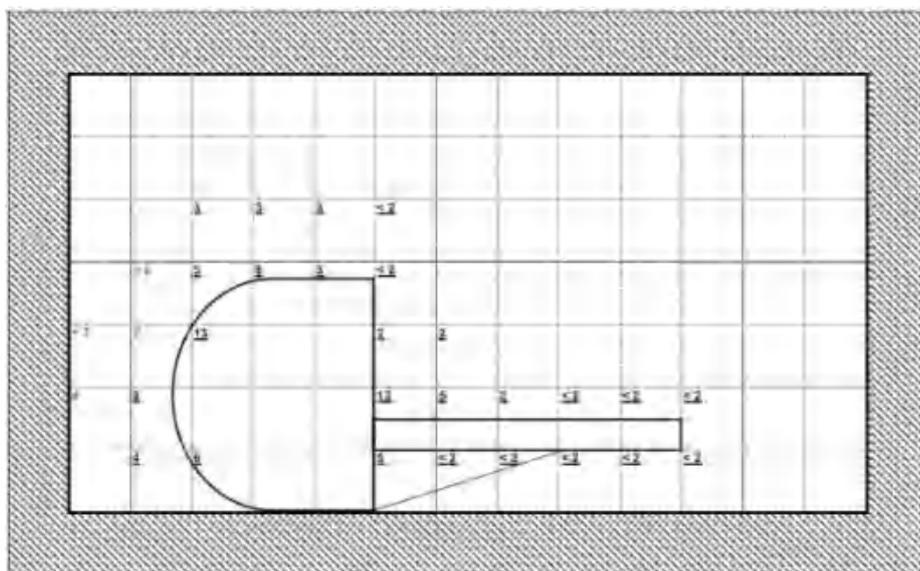


图 11-15 闭束状态下测量间隔为 0.5m 的辐射水平垂直矩阵图 (单位 $\mu\text{Sv/h}$)

依据设备厂家提供资料,可知在关束状态下距伽玛刀 0.5m 处的杂散辐射水平不大于 $13\mu\text{Gy/h}$, 则贮源状态下屏蔽体外关注点的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$) 计算结果见表 11-42。

表 11-42 伽玛刀机房贮源状态下参考点处的辐射剂量率核算值

预测位置	距离 R(m)	厂家提供机房内表面辐射剂量 H ($\mu\text{Sv/h}$)	厂家剂量选取点距源点的距离 R _取 (m)	屏蔽厚度 X(mm)	辐射屏蔽透射因子	剂量率估算值 H($\mu\text{Sv/h}$)	是否符合
a(北侧)	4.9	13	0.5	1200 砼	4.16E-06	5.63E-07	符合
b(西侧)	4.6	13	0.5	1000 砼	3.44E-05	5.29E-06	符合
c(南侧)	5.4	13	0.5	1700 砼	2.12E-08	2.36E-09	符合
e(东侧)	7.4	13	0.5	1800 砼	7.36E-09	4.37E-10	符合
d(东侧)	7.4	13	0.5	1000 砼	3.44E-05	2.04E-06	符合
f(门口)	7.4	13	0.5	800 砼 10mmPb	4.18E-05	2.48E-06	符合
m(屋顶)	4.4	13	0.5	1200 砼	4.16E-06	6.99E-07	符合

d 点距离按照最不利考虑等同于等中心到 e 点的距离; f 点距离按照最不利考虑等同于等中心到 e 点的距离; 屏蔽厚度均不考虑斜射角; 门口处铅的平衡什值层保守取 12mm, 等效混凝土厚度约为 181.67mm

根据表 11-42 可知, 在伽玛刀闭束状态下机房四周墙体及防护门个关注点的剂量为 $4.38\times 10^{-10}\sim 5.29\times 10^{-6}\mu\text{Sv/h}$, 伽玛刀闭束状态下, 对机房周围基本无影响。

11.2.2 人员受照剂量分析

(1) 伽玛刀机房外人员受照剂量

根据建设单位提供的数据, 伽玛刀投入运行后, 每周工作约 10h, 全年工作 50 周, 总工作时间为 500h。根据前文关注点处剂量率的计算结果, 可预测伽玛刀机房周围的工作人员和公众的年吸收有效剂量, 见表 11-43。

表 11-43 伽玛刀机房四周人员年有效剂量计算结果

关注点	关注点处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	居留因子	年受照时间 (h)	年有效剂量 (mSv)	剂量约束值 (mSv)	是否符合
a(北侧)	3.65E-04	1	500	1.83E-04	0.1	符合
b(西侧)	3.42E-03	/	500	/	/	符合
c(南侧)	1.38E-06	1/2	500	3.45E-07	5	符合
e(东侧)	2.03E-07	1	500	1.02E-07	5	符合
d(东侧)	9.50E-04	1	500	4.75E-04	5	符合
f(门口)	1.15E-03	1/8	500	7.19E-05	0.1	符合
m(屋顶)	1.21E-04	1/40	500	1.51E-06	0.1	符合

由表 11-43 计算结果可知, 伽玛刀机房周围关注点处放射工作人员年有效剂量最大为 $4.75\text{E-}4\text{mSv}$, 公众年有效剂量最大为 $1.83\text{E-}4\text{mSv}$, 能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 和本项目提出的管理目标剂量约束值要求: 工作人员年有效剂量不超过 5mSv , 公众人员年有效剂量不超过 0.1

mSv。

(2) 进入伽玛刀机房的工作人员受照剂量

由于放射治疗前，放射工作人员需要进入伽玛刀机房内协助患者进行摆位，在摆位过程会受到放射源的照射。

放射工作人员进入伽玛刀机房之前，必须确保放射源处于伽玛刀的贮源器中，并穿戴防护用品、佩戴个人剂量报警仪进入机房。放射工作人员协助患者摆位时在机房内停留时间按 1min 计，与伽玛刀的平均距离按 0.5m 考虑。依据设备厂家提供资料，在关束状态下距伽玛刀 0.5m 处的杂散辐射水平不大于 $13\mu\text{Gy/h}$ ，本次评价以该泄漏辐射的剂量率限值作为放射工作人员工作位的最大辐射剂量率进行计算，则放射工作人员全年摆位过程所受的个人剂量： $13\mu\text{Gy/h}\times 1\text{min}\times 15\text{人/天}\times 250\text{天}\times 1/60=0.81\text{mSv/a}$ 。

由表 11-43 可知，放射工作人员在操作室所受照射剂量为 $4.75\times 10^{-4}\text{mSv/a}$ ，考虑到摆位和操作室工作人员可能为同一人，因此项目放射工作人员所受照射年附加有效剂量为 $10.75\times 10^{-4}+0.81=0.81\text{mSv}$ ，低于项目放射工作人员年附加剂量约束值（ 5mSv/a ），满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求。

11.2.3 DSA

11.2.3.1 机房空间符合性分析

项目 DSA 机房使用面积及最小单边长度符合性分析详见表 11-44。

表 11-44 机房使用面积及最小单边长度符合性分析一览表

机房名称	参数	设计值	评价标准 ^注	是否符合
DSA1	使用面积	72.52m ²	≥20m ²	符合
	最小单边长	8.04m	≥3.5m	符合
DSA2	使用面积	72.52m ²	≥20m ²	符合
	最小单边长	8.04m	≥3.5m	符合
DSA3	使用面积	56.10m ²	≥20m ²	符合
	最小单边长	6.22m	≥3.5m	符合
DSA4	使用面积	49.34m ²	≥20m ²	符合
	最小单边长	6.27m	≥3.5m	符合
DSA5	使用面积	83.29m ²	≥20m ²	符合
	最小单边长	8.19m	≥3.5m	符合
DSA6	使用面积	81.46m ²	≥20m ²	符合
	最小单边长	8.01m	≥3.5m	符合
杂合手术室 DSA	使用面积	57.2m ²	≥20m ²	符合
	最小单边长	6.5m	≥3.5m	符合

注：评价标准依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）。

根据表11-44可知，项目DSA手术室使用面积及最小单边长度满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中单管头X射线设备机房相关要求。

11.2.3.2 机房防护屏蔽设计符合性分析

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）项目DSA机房X射线防护屏蔽措施符合性分析见表11-45。

表11-45 机房屏蔽设计参数

机房名称	屏蔽部位	屏蔽材料及规格	等效屏蔽	标准要求	是否符合
介入手术室 DSA1~6	四侧墙体	240mm实心砖墙+20mm高纯度硫酸钡砂浆	3.6mmPb	≥2mmPb	符合
	顶棚	250mm混凝土	3.36mmPb	≥2mmPb	符合
	底板	250mm混凝土	3.36mmPb	≥2mmPb	符合
	患者进出防护门	4mmPb防护门	4mmPb	≥2mmPb	符合
	医生进出防护门	4mmPb防护门	4mmPb	≥2mmPb	符合
	污物进出防护门	4mmPb防护门	4mmPb	≥2mmPb	符合
	观察窗	4mmPb观察窗	4mmPb	≥2mmPb	符合
杂合手术室 DSA	四侧墙体	轻质隔墙+3mm高纯度防护铅板	3mmPb	≥2mmPb	符合
	顶棚	150mm混凝土+2mm高纯度防护铅板	3.9mmPb	≥2mmPb	符合
	底板	250mm混凝土	3.36mmPb	≥2mmPb	符合
	患者进出防护门	4mmPb防护门	4mmPb	≥2mmPb	符合
	医生进出防护门	4mmPb防护门	4mmPb	≥2mmPb	符合
	污物进出防护门	4mmPb防护门	4mmPb	≥2mmPb	符合
	观察窗	4mmPb观察窗	4mmPb	≥2mmPb	符合

注：实心砖密度不小于 1.65g/cm^3 ，根据《放射诊断放射防护要求》GBZ130-2020，中附录C,对于 125kV 管电压（有用束下）状态下产生的 X 射线，158mm 混凝土相当于 2mmPb，223mm 混凝土相当于 3mmPb，217mm 实心砖相当于 2mmPb，则保守考虑 150mm 混凝土相当于 1.9mmPb，250mm 混凝土相当于 3.36mmPb，240mm 实心砖相当于 2.2mmPb；根据防护设计单位提供资料 125kV 下 10mm 高纯度硫酸钡砂浆相当于 0.7mmPb；

根据表 11-45 可知，本项目 DSA 机房的防护能力指标均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）“C 型臂 X 射线设备机房有用线束方向铅当量不小于 2mmPb，非有用线束方向铅当量不小于 2mmPb”的要求。

11.2.3.3 辐射环境影响分析

(1) 关注点选取

关注点的选取主要考虑可能对放射工作人员或公众产生影响的区域，项目各关注点分布示意简图见图 11-16。

本项目拟建的 7 间手术室配置的 DSA 设备参数均按照最大管电压为 125kV，最大管电流为 1250mA 进行屏蔽能力核算。6 间手术室的墙体、顶棚、地板和防护门窗等屏蔽设计参数一致，其中 DSA4 机房的有效使用面积最小，因此本次 DSA

机房辐射环境影响分析选取 DSA4 机房和杂交手术室作为代表进行分析评价。

(2) 各关注点剂量

DSA 包括透视和采集两种工作模式，根据 ICRP 33《医用外照射源的辐射防护》P55 图 2，管电压 125kV 时，2mmAl 滤过下，离靶 1m 处的剂量率约为 11mGy/mA·min。项目 DSA 透视时最大管电流取 25mA，距靶点 1m 处的最大剂量率为 $1.65 \times 10^7 \mu\text{Gy/h}$ ；采集时管电流取 520mA，距靶点 1m 处的最大剂量率为 $3.43 \times 10^8 \mu\text{Gy/h}$ ，项目射线装置主束照向患者，各关注点处仅考虑泄漏线和散射线影响，一般射线泄漏率按 0.1% 估算。

① 泄漏辐射剂量率估

1) 估算方法

泄漏辐射剂量率计算公式参考《辐射防护手册第一分册 辐射源与屏蔽》（李德平、潘自强主编，原子能出版社，1987）。对于给定的屏蔽物质，屏蔽透射因子依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）附录 C 计算。

$$H = \frac{f \cdot H_0 \cdot B}{R^2} \quad \dots\dots\dots (11-38)$$

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \dots\dots\dots (11-39)$$

式中：H—关注点处的泄漏辐射剂率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

f—泄漏射线比率，取 0.1%；

H_0 —距靶点 1m 处的最大剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

R—靶点至关注点的距离，m；

B—屏蔽透射因子；

X—铅厚度，mm；

α 、 β 、 γ 为铅对 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数见表 11-46。

表 11-46 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

电压	材料	α	β	γ
125kV	铅	2.219	7.923	0.5386

注： α 、 β 、 γ 取值参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）附录 C。

2) 估算结果

本项目防护门、观察窗、四周墙壁、房顶、地板等各关注点的泄漏辐射剂量率估算见表 11-47。

表 11-47 各关注点泄露辐射剂量率估算结果

机房	点位描述	X (mmPb)	f	d (m)	B	H _L (μGy/h)	
						采集	透视
DSA4	北侧墙外0.3m	3.6	0.1%	4.48	2.06E-05	0.55	0.026
	南侧墙外0.3m	3.6	0.1%	4.48	2.06E-05	0.55	0.026
	东侧墙外0.3m	3.6	0.1%	3.68	2.06E-05	0.55	0.026
	西侧墙外0.3m	3.6	0.1%	3.68	2.06E-05	0.55	0.026
	医护人员进出防护门外0.3m	4	0.1%	4.48	8.42E-06	0.18	0.009
	病人进出防护门外0.3m	4	0.1%	4.48	8.42E-06	0.18	0.009
	污物进出防护门外0.3m	4	0.1%	3.68	8.42E-06	0.18	0.009
	观察窗外0.3m	4	0.1%	4.48	8.42E-06	0.18	0.009
	顶棚上1m	3.36	0.1%	5.25	3.53E-05	1.07	0.052
	地面下方1.7m	3.36	0.1%	2.75	3.53E-05	1.07	0.052
杂合手术室	北侧墙外0.3m	3	0.1%	5.25	7.97E-05	6.20	0.298
	南侧墙外0.3m	3	0.1%	5.25	7.97E-05	6.20	0.298
	东侧墙外0.3m	3	0.1%	4.55	7.97E-05	6.20	0.298
	西侧墙外0.3m	3	0.1%	4.55	7.97E-05	6.20	0.298
	医护人员进出防护门外0.3m	4	0.1%	5.25	8.42E-06	0.18	0.009
	病人进出防护门外0.3m	4	0.1%	4.55	8.42E-06	0.18	0.009
	污物进出防护门外0.3m	4	0.1%	5.25	8.42E-06	0.18	0.009
	观察窗外0.3m	4	0.1%	4.55	8.42E-06	0.18	0.009
	顶棚上1m	3.9	0.1%	5.25	1.05E-05	0.33	0.016
地面下方1.7m	3.36	0.1%	2.75	3.53E-05	1.07	0.052	

注：医生进出防护门、患者进出防护门、防护窗的距离均按照最不利考虑等中心到同侧墙的直线距离计算；手术室床位按照 0.8m 计算；

(2) 散射辐射剂量率估算

① 估算方法

对于病人体表的散射 X 射线可以用反照率法估计。散射剂量率计算公式参考《辐射防护手册第一分册—辐射源与屏蔽》（[M]北京：原子能出版社，1987）P437：

$$H = \frac{H_0 \cdot \alpha \cdot B \cdot (S/400)}{(d_0 \cdot d_s)^2} \quad (11-40)$$

式中：

H_s —关注点处的患者散射剂量率，μGy/h；

H₀ —距靶点 1m 处的最大剂量率，μGy/h；

α—患者对 X 射线的散射比，取自《辐射防护手册 第一分册》P437 表 10.1，125kV 射线散射与入射 X、γ 射线照射量之比值 a 为 0.0015（90°散射，相对于 400cm² 散射面积）；

S—散射面积，取典型值 400cm²；

d_0 一源与患者的距离，一般取 0.5m；

d_s 一患者与关注点的距离，m；

B—屏蔽透射因子，按式 11-39 计算。

② 估算结果

本项目防护门、观察窗、四周墙壁、房顶等各关注点的泄漏辐射剂量率估算见表 11-48。

表 11-48 各关注点散射剂量率估算结果

机房	点位描述	X (mmPb)	α	ds (m)	d ₀ (m)	B	H _L (μGy/h)	
							采集	透视
DSA4	北侧墙外0.3m	3.6	0.0015	4.48	0.5	2.06E-05	3.27	0.16
	南侧墙外0.3m	3.6	0.0015	4.48	0.5	2.06E-05	3.27	0.16
	东侧墙外0.3m	3.6	0.0015	3.68	0.5	2.06E-05	3.27	0.16
	西侧墙外0.3m	3.6	0.0015	3.68	0.5	2.06E-05	3.27	0.16
	医护人员进出防护门外0.3m	4	0.0015	4.48	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	病人进出防护门外0.3m	4	0.0015	4.48	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	污物进出防护门外0.3m	4	0.0015	3.68	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	观察窗外0.3m	4	0.0015	4.48	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	顶棚上1m	3.36	0.0015	5.25	0.5	3.53E-05	6.44	0.31
	地面下方1.7m	3.36	0.0015	2.75	0.5	3.53E-05	6.44	0.31
杂合手术室	北侧墙外0.3m	2.1	0.0015	5.25	0.5	7.97E-05	37.17	1.79
	南侧墙外0.3m	2.1	0.0015	5.25	0.5	7.97E-05	37.17	1.79
	东侧墙外0.3m	2.1	0.0015	4.55	0.5	7.97E-05	37.17	1.79
	西侧墙外0.3m	2.1	0.0015	4.55	0.5	7.97E-05	37.17	1.79
	医护人员进出防护门外0.3m	4	0.0015	5.25	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	病人进出防护门外0.3m	4	0.0015	4.55	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	污物进出防护门外0.3m	4	0.0015	5.25	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	观察窗外0.3m	4	0.0015	4.55	0.5	8.42E-06	1.08	0.05
	顶棚上1m	3.3	0.0015	5.25	0.5	1.05E-05	1.99	0.10
地面下方1.7m	3.36	0.0015	2.75	0.5	3.53E-05	6.44	0.31	

注：医生进出防护门、患者进出防护门、防护窗的距离均按照最不利考虑患者到同侧墙的直线距离计算；

(3) 辐射有效剂量率

本项目防护门、观察窗、四周墙壁、楼上等各关注点的辐射剂量率估算见表 11-49。

表 11-49 各关注点辐射剂量率估算结果

机房	点位描述	采集状态 (单位: μGy/h)			透视状态 (单位: μGy/h)		
		泄露辐射剂量率H _L	散射辐射剂量率H _S	总有效剂量率H _R	泄露辐射剂量率H _L	散射辐射剂量率H _S	总有效剂量率H _R
DSA4	北侧墙外0.3m	0.55	3.27	3.82	0.03	0.16	0.18
	南侧墙外0.3m	0.55	3.27	3.82	0.03	0.16	0.18
	东侧墙外0.3m	0.55	3.27	3.82	0.03	0.16	0.18
	西侧墙外0.3m	0.55	3.27	3.82	0.03	0.16	0.18
	医护人员进出防	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06

	护门外0.3m						
	病人进出防护门外0.3m	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06
	污物进出防护门外0.3m	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06
	观察窗外0.3m	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06
	顶棚上1m	1.07	6.44	7.51	0.05	0.31	0.36
	地面下方1.7m	1.07	6.44	7.51	0.05	0.31	0.36
杂合手术室	北侧墙外0.3m	6.20	37.17	43.37	0.30	1.79	2.09
	南侧墙外0.3m	6.20	37.17	43.37	0.30	1.79	2.09
	东侧墙外0.3m	6.20	37.17	43.37	0.30	1.79	2.09
	西侧墙外0.3m	6.20	37.17	43.37	0.30	1.79	2.09
	医护人员进出防护门外0.3m	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06
	病人进出防护门外0.3m	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06
	污物进出防护门外0.3m	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06
	观察窗外0.3m	0.18	1.08	1.26	0.01	0.05	0.06
	顶棚上1m	0.33	1.99	2.32	0.02	0.10	0.11
	地面下方1.7m	1.07	6.44	7.51	0.05	0.31	0.36

由表 11-49 可知，在透视状态下，DSA4 手术室各屏蔽体外表面 0.3m 处的周围剂量当量率最大为 $0.36\mu\text{Sv/h}$ ，DSA 杂合手术室各屏蔽体外表面 0.3m 处的周围剂量当量率最大为 $2.09\mu\text{Sv/h}$ ，能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“具有透视功能的 X 射线机在透视条件下检测时，周围剂量当量率控制目标值应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ”的要求。另外 5 间 DSA 机房和 DSA4 手术室屏蔽防护措施一致，因此也能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“具有透视功能的 X 射线机在透视条件下检测时，周围剂量当量率控制目标值应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ”的要求。

在采集状态下，DSA 机房各屏蔽体及防护门外 0.3m 处、楼上及楼下人员停留位置处的总附加剂量率最大为 $43.37\mu\text{Sv/h}$ ，根据 GBZ130-2020 附录 B 中“采集机房屏蔽外的周围剂量当量率不大于 $25\mu\text{Sv/h}$ 为曝光管电流 100mA 时的限值，若管电流不是 100mA，则应将测量值归一至 100mA”，本项目采集时管电流取 520mA，采集状态下将电流值归一至 100mA 时（距靶点 1m 处的最大剂量率为 $6.6\times 10^7\mu\text{Sv/h}$ ），DSA 机房各屏蔽体及防护门外 0.3m 处、楼上及楼下人员停留位置处的总附加剂量率最大为 $8.34\mu\text{Sv/h}$ ，其结果满足相关标准限值要求，机房各屏蔽体的防护效果较好。

（4）个人剂量估算

根据医院提供资料，DSA 手术每年最多进行手术 1000 台，每台手术一般采集 1min，透视 10min，则每台设备透视出束时间约 166.67h/a，采集出束时间 16.67h/a。

①放射性工作人员

在采集模式下，操作间放射工作人员采取隔室操作的方式，通过观察窗和操作台上监控系统观察手术室内病人情况；在透视模式下，手术医生和护士在 DSA 手术室内对患者进行手术。介入手术时第一术者位医生穿戴铅衣、头戴铅帽、铅眼镜等防护用品，位于铅吊屏和床侧铅帘后；第二术者位护士/助手穿戴铅衣等防护用品，位于移动铅屏风后。

A.第一术者位（医生）、第二术者位（护士）年附加有效剂量估算：

根据《医用 X 射线诊断设备质量控制检测规范》（WS76-2020）附录 B 中表 B.1 X 射线透视设备的检测项目及技术要求“7、非直接荧光屏透视设备透视防护区检测平面上周围剂量当量率不大于 $400\mu\text{Gy/h}$ ”，因此本次评价保守按照 X 射线设备在确保铅屏风和床侧铅挂帘等防护设施正常使用的情况下，手术医生和护士铅衣外按照在透视防护区测试平面上的空气比释动能率为 $400\mu\text{Gy/h}$ 进行计算。

根据公式 11-39 计算可知，管电压 125kV 时，手术医生穿 0.5mm 厚铅衣的辐射透射因子 B 为 5.57×10^{-2} ，护士穿 0.5mm 厚铅衣与采用 2mm 厚移动铅屏风的辐射透射因子 B 为 2.50×10^{-4} 。项目 DSA 手术透视情况下年累积出束时间 166.67h，则介入手术所致手术室内操作医生年剂量为 3.71mSv，护士年剂量为 0.02mSv，介入手术医生和护士受到的附加年有效剂量低于本次评价所取的年剂量约束限值（职业人员 5.0mSv）。

事实上，上述估算偏保守，忽略了 DSA 设备材料的衰减作用和人体的吸收作用，此外项目 DSA 设备床边操作系统、床边剂量控制系统等防护设施可实时显示剂量率、调节运行档位。因此，项目 DSA 在正常运行情况下，医护人员实际受到的年附加剂量率小于理论计算值。

B.控制室内操作人员年附加有效剂量估算

在采集模式下，放射工作人员采取隔室操作的方式，通过观察窗和操作台上监控系统观察手术室内病人情况，并通过对讲系统与病人交流；根据表 11-49，估算介入手术室和杂合手术室 DSA 机房运行期控制室内职业人员的年附加有效剂量，估算结果如表 11-50。

表11-50 介入手术室和杂合手术室各DSA机房放射性工作人员的年附加有效剂量

关注点位置描述		采集状态		透视状态		人员居留因子	年附加有效剂量 (mSv/a)	年有效剂量约束值 (mSv/a)
		总有效剂量率 Hr(μSv/h)	年曝光时间 (h/a)	总有效剂量率 Hr(μSv/h)	年曝光时间 (h/a)			
介入手术	DSA4 机房控制室	3.27*	16.67	0.18	166.67	1	0.08	5
杂合手术室	杂合手术室控制室	37.17*	16.67	2.09	166.67	1	0.97	5

备注：*表示从保守角度考虑取值，介入手术室中 DSA2 和 DSA3 共用 1 间控制室，则按照最不利情况考虑，控制室内放射性工作人员的年有效剂量最大为 0.16mSv

根据表 11-50 可知，介入手术室和杂合手术室控制室的放射性工作人员的年附加有效剂量为 0.97mSv，低于本次评价所取的年剂量约束限值（职业人员 5.0mSv）。

②公众年附加剂量估算

介入手术室（DSA1~DSA6）位于 1#综合楼三层北侧介入科，该区域为相对独立区域，除 DSA 手术区域工作人员及患者外，其余公众均不能进入该区域。DSA 手术室楼下为住院配药区域、实验分析室，楼上为 ICU 病房，楼上、楼下均存在人员居留情况，因此需考虑 DSA 手术室运行产生的辐射影响。

杂合手术室位于 1#综合楼四层中部手术室，手术室区域为专用区域除工作人员及患者外，无其他人员进入，楼下为三层介入手术的手术辅助的更衣区，楼上为医院大楼的屋顶，楼下均存在人员居留情况，因此需考虑 DSA 手术室运行产生的辐射影响。

介入手术室和杂合手术室运行对周围公众产生的影响见表 11-51。

表11-51 公众年附加剂量估算结果

机房名称	关注点位置	透视剂量率 (μSv/h)	透视时间 (h)	采集剂量率 (μSv/h)	采集时间 (h)	居留因子	年剂量 (μSv)
DSA1~DSA6	楼上	0.36	166.67	7.51	16.67	1/5	37.04
	楼下	0.36	166.67	7.51	16.67	1/5	37.04
DSA 杂合手术室	楼上	0.11	166.67	2.32	16.67	1/20	2.85
	楼下	0.36	166.67	7.51	16.67	1/5	37.04

注：ICU 病房、手术辅助更衣区、住院配药区域、实验分析室居留因子取 1/5

根据表 11-51 可知，介入手术室和杂合手术室运行对周围公众人员的年附加有效剂量最大为 0.04mSv，低于本次评价所取的年剂量约束限值（公众 0.1mSv）。

DSA6 手术室在 ⁹⁰Y 介入操作对外环境的的叠加影响，⁹⁰Y 介入操作引起的放射性工作人员年有效剂量贡献值为 158.10μSv，公众人员年有效剂量贡献值为 31.62μSv，综合考虑 DSA6 介入手术所致手术室内操作医生年剂量为 3.87mSv，护

士年剂量为 0.18mSv，介入手术室控制室的放射性工作人员的年附加有效剂量为 1.0mSv，周围公众的年附加有效剂量为 68.66 μ Sv，均低于本次评价所取的放射性工作人员及公众年剂量约束限值（放射性工作人员：5mSv，公众 0.1mSv）。

11.2.4 放疗和核医学科运行的复合影响

本项目介入科、核医学科、放疗科均在独立的楼层，并且有独立的操作区域，且本项目为新增建院区，所有放射性工作人员均为该科室独立人员，但放疗科位于核医学科楼下，核医学科与放疗科的工作人员可能会相互影响。放疗科各装置运行对周围公众年有效剂量贡献最大为0.014mSv(后装机运行)，辐射工作人员年有效剂量贡献最大0.81mSv（伽玛刀运行），核医学科对周围公众的年有效剂量贡献最大为0.06mSv(甲癌治疗)，辐射工作人员年有效剂量贡献最大2.01mSv(¹³¹I操作)，综合考虑放疗和核医学科的相互影响，考虑最不利情况下以上两个科室的放射性工作人员年有效剂量最大不超过2.82mSv/a，对周围公众的影响最大不超过0.074mSv，以上结果仍能满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和本项目提出的管理目标剂量约束值要求，放射性工作人员年有效剂量不超过5mSv,公众人员年有效剂量不超过0.1mSv。

11.3 事故影响分析

本项目事故风险评价目的是分析、预测放射性同位素、放射源及射线装置在使用过程中存在的潜在危险和有害因素，可能发生的突发性事件或事故（一般不包括人为破坏及自然灾害），引起电离辐射泄漏，所造成的人身安全与环境的影响和损害程度，提出合理可行的防范、应急与减缓措施，以防止辐射事故发生，尽量降低辐射事故后果的负面影响。

11.3.1 核医学科

1.可能发生的事故

- (1) 由于管理不善，放射性药物或放射源被盗、丢失。
- (2) 在核素使用过程中，由于操作人员违反操作规程或误操作引起的意外泄露，造成台面、地面辐射污染。
- (3) 工作人员未按要求穿戴个人防护用品等，造成额外附加照射剂量。
- (4) 核素治疗患者用药后未经允许离开核医学科，尤其是在用药初期离开候

诊室或病房，可能对接近患者的人员造成额外照射。

(5) 放射性废水或放射性固废未达到排放标准或解控水平即进行处理。

(6) PET-CT 或 SPECT-CT 中 CT 部分射线装置失控、损坏，或者工作状态指示灯、紧急开关、电离辐射警告标志等防护设施不完善或失灵，或者防护门发生故障，导致人员误入或误停留在 CT 机房内而超剂量照射。

2.事故防范措施

(1) 制定并落实放射性核素与放射源安全管理制度，设专人负责，做好核素与放射源的领取、使用登记工作，确保放射性药物的安全。应设置防盗门、防盗窗及报警装置等设施，做好防盗工作。

(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，减少药物洒漏事故的发生。

(3) 加强工作人员自身防护安全意识，定期组织培训，使工作人员明确配备的防护用品（铅衣、铅手套、铅围裙、铅围脖、铅眼镜等）及存放位置。工作人员进入监督区必须穿戴放射防护用品，个人计量仪佩戴于铅衣内部左胸前。在进行分装及注射放射性药物时穿铅衣、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。专人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。

(4) 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。

(5) 加强对服药患者的管理，为离开医院的服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。

(6) 放射性固体废物衰变箱外应标注内含核素种类、封存时间。医院应加强放射性废水和固体废物排放处理管理，按照本环评要求的衰变时间停留衰变，处理前进行监测，达到解控水平后方可进行进一步处理。

(7) 制定自检制度且严格进行经常性自检，如 PET-CT 或 SPECT-CT 机房发现门-灯联锁、监视器、工作状态指示灯、电离辐射警告标志不够完善或失灵，或者防护门出现故障，应立即补充、修复。

3 事故应急措施

(1) 发生射线装置事故时，第一时间按下紧急停止开关或切断电源，停止射线装置的运行。

(2) 发生放射性物质泄漏时，医院核医学科应采取的应急处置措施如下：

①防止再漏，将剩余溶液转移到别的安全容器中，迅速用干的脱脂棉或其他吸水材料将洒出的放射性溶液吸干，控制污染的扩散。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。用药棉或纸巾擦抹时，应注意从污染区的边沿向中心擦抹，直到擦干污染区。用表面污染监测仪测量污染区，如果 β 表面污染控制区大于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，监督区大于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，表明该污染区未达到控制标准，这时应用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，直到该污染区 β 表面污染小于控制值为止。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做好警示标识，及时隔离现场并限制人员进入，立即报告医院及核医学科的辐射安全相关负责人，同时要求未受到污染的辐射工作人员及患者等立即离开。辐射工作人员可锁上核医学科各出入口的大门以防无关人员误入。

③对于受表面沾染的辐射工作人员，不要随意走动或触摸其他物品，可自行对表面污染作简单去污处理，并将可能受污染的工作服等脱下另行放置，如果怀疑摄入过量放射性物质时，要及时进行医学观察，用药物促排、治疗或做其他处理。去污过程中若有不幸受伤，应立即洗净并进行外科处理，防止放射性物质由伤口进入体内。

④联络当地生态环境主管部门及卫生、公安等相关部门报告事故情况，并接受生态环境主管部门的辐射安全专业人员对该辐射事故应急处置工作的监管和指导；

(3) 当发生放射源丢失事故时，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，设置警戒区及警示标志；向当地环境保护主管部门、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、环保和卫生

主管部门对丢失放射源进行侦查和追缴，力争在最短时间内将放射性物品找回。

(4) 事故处理后应收集资料，及时总结报告。医院对于辐射事故进行记录：包括事故发生的时间和地点，所有涉及的事故责任人和受害者名单；对任何可能受到照射的人员所做的辐射剂量估算结果；所做的任何医学检查及结果；采取的任何纠正措施；事故的可能原因；为防止类似事件再次发生所采取的措施。

4. 应急预案的启动

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

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

(3) 各应急救助物资应准备充分、调配及时。

(4) 发生事故后应在 2 小时内上报生态环境部门及卫健、公安等相关部门，减少和控制事故的危害影响，并配合、接受监督部门的处理。总结事故原因，写出事故报告，及时修改应急预案，避免事故再次发生。医院应加强管理，严格要求放射工作人员按照操作规程开展工作，并在实际工作中不断对辐射安全管理制度进行完善，加强辐射防护知识的培训，定期检查射线装置及各项安全防护装置的性能，尽可能避免辐射事故的发生。

11.3.2 放疗科

1. 直线加速器事故影响分析

(1) 事故类型

①安全联锁装置发生故障情况下，人员误入正在运行的机房而造成 X 射线误照射；

②除接受治疗的患者以外，机房内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内环境便运行加速器，则会造成机房内人员误照射；

③加速器控制系统出现故障，照射治疗不能及时停止，病人受到计划外照射。

(2) 加速器事故处理方案

①事故发生后，应立即切断电源并通知同工作场所的工作人员离开，通知医院辐射安全防护管理机构；

②应急处理领导小组启动应急处理预案，小组讨论及确定隔离区，疏散人群，保护好现场。同时，检查、估算受照人员的受照剂量，如果受照剂量较高，应及时安置受照人员就医检查；

③及时报告卫生、生态环境主管部门；

④配合上级有关部门对现场进行勘查以及环保安全技术处理、检测等工作，查找事故发生原因，进行调查处理和责任追究；

⑤当发生故障的射线装置修复后，必须经有资质的机构进行检测合格并报生态环境、卫生等行政主管部门批准后方可解除应急状态；

⑥恢复正常的工作秩序，召集相关人员总结事故的经验教训，及时修订相关的管理体系和文件，杜绝同类事故的再次发生。

(3) 加速器事故预防措施

(1) 制定有自检制度，且严格进行经常性自查，如发现门机联锁、监视器、工作状态指示灯失灵，以及防护门出现故障，应立即进行维修。定期进行门机联锁装置、工作指示灯检查，防止人员误入。

(2) 加强人员培训，制定规范的操作规程并落实。

(3) 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，实施照射前控制台工作人员应先观察监控确保机房内摆位工作人员已撤出。

(4) 做好设备保养维护工作，定期对设备开展维护维修。

(5) 医院应联系有维修资质的人员前来对设备进行维护，不得私自拆卸维修射线装置。

2. 后装机及伽玛刀事故影响分析

(1) 事故类型

①治疗机处于运行状态时，门机联锁装置故障，导致人员误入处于运行状态的机房，受到不必要的辐射照射。

②摆位工作人员尚未撤离机房，控制台处操作人员误操作，后装机或伽玛刀出源，对工作人员造成照射。

③后装机设备故障，在使用过程中卡源；治疗结束后，放射源源闸开关出现故障不能收回或放射源安装不到位。

④放射源丢失或被盗，屏蔽罐被打开，对局部环境产生污染，并可能使部分公众受到照射。

(2) 事故处理方案

①定期验证安全装置与设施的有效性，保证门机联锁装置有效。

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，进行源照射前控制台工作人员应观察监控确保机房内摆位工作人员已撤出。

③当发生停电、卡源或意外中断照射时，后装机或伽玛刀本身设计具有应急自动返回工作贮源器的功能，放射源能自动返回工作贮源器。当自动回源装置功能失效时，辐射工作人员通过操作台按下“手动回源”按钮。发生时机房无病人的状态，立即报告放疗机房技术组长和设备科，进行设备故障排除或联系厂家维修，并做好记录。若以上措施均失效，或同时发生机房内有病人的治疗中机外卡源事件时，应立即采取以下措施：

a) 第一时间由在场工作人员佩戴好个人剂量计和铅衣、铅裙、铅目镜等个人防护措施，以最短时间抢救出病人并以最快的速度关闭后装治疗室防护门。

b) 记录卡源时间和病人暴露时间。

c) 立即报告机房管理技术人员、科室负责人和设备科。

d) 科室负责人立即组织处理，进行初步评价，迅速估算受照人员和进入人员的照射剂量，及时按程序上报。

e) 设备科进行设备故障排除或联系厂家维修等。

④发生放射源被偷盗、丢失事件时，首先要查证密封源的核素名称、数量、活度，被偷盗、丢失的可能事件、地点和嫌疑人等；并及时向环保、卫生部门报告，积极配合公安部门的调查；最后写出事件处理结果报告，查找事件发生的原因及可能的环节，及时修订相关的管理体系和文件，杜绝同类事故的再次发生。

(3) 事故预防措施

①换源事宜由供源厂家专业人员负责，严禁私自拆卸。做好设备日常维护，经常对设备的性能进行检查，防止卡源事故发生。

②定期验证安全装置与设施的有效性，保证门机联锁装置有效。

③放射源贮存在机房的设备内，并限制人员进入，做好防盗措施，设置防盗

门及报警装置等。制定并落实放射源安全管理与台账制度，设专人负责。

④制定完善的操作规程，对操作人员定期培训，使之熟练操作，严格按照操作规程操作，实施照射前控制台工作人员应观察监控确保机房内摆位工作人员已撤出。

11.3.3 介入手术室

1. 风险识别

结合 DSA 装置工艺流程，事故风险主要来自于设备工作状态环节。其潜在的危害因素主要有：屏蔽厚度不能满足辐射安全需求，造成工作人员和公众受照；DSA 装置不能正常关机；监视器、工作状态指示灯、电离辐射警告标志等防护设施不完善或失灵，导致人员误入射线装置室内而受照；工作人员不按要求佩戴个人防护用品，造成超剂量照射。

2. 风险评价

上述风险如发生，可能导致以下潜在辐射危害。

(1) 屏蔽厚度不能满足辐射安全需要，在此情况下，可使得工作人员控制室、屋顶外、地板下及周围相邻房间和室外环境辐射水平较高，因而造成工作人员和公众受到照射。由于误入人员不会处在有用线束范围内，其受照剂量较低，不至于导致急性放射病的发生。

(2) DSA 装置不能正常关机，可导致工作人员和误入的公众成员受到照射。

(3) 监视器、工作状态指示灯、电离辐射警示标志等防护设施不完善或失灵，导致工作人员和公众误入导管室而受到照射。由于误入人员不会处在有用射束范围内，其受照剂量较低，不至于导致急性放射病的发生。

(4) 工作人员不按要求佩戴个人防护用品，可使工作人员受到超剂量照射。

3. 风险管理

本项目风险防范管理如下：

(1) 配备必要的辐射监测仪器，对工作场所实施必要辐射环境监测，及时发现使用过程中可能存在的射线的泄露；

(2) 射线装置设计有紧急停止按钮，医院应定期进行射线装置维修和维护，及时发现问题；

(3) 制定规范的操作规程，定期进行门灯联动装置、工作指示灯检查，防止

人员误入；定期对监视器、工作状态指示灯等进行检修。

(4) 完善 DSA 的安全操作规程，加强人员辐射安全防护知识培训；配备必要的铅衣、铅屏风及铅帘等防护用品。

11.4 辐射环境影响评价

本项目正常运行时，其工作场所采取相应辐射屏蔽措施后，项目对周边的辐射环境影响满足相关标准限值要求；项目正常运行所致工作人员、公众年附加有效剂量分别满足本次评价 5mSv、0.1mSv 剂量约束值要求；核医学科、放疗科、DSA 手术室选址可行、平面布置基本合理。评价认为：西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院核技术利用项目，对周围环境的辐射影响在可接受范围之内。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

医院辐射安全防护管理机构应切实根据《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》管理要求开展工作。

西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院应按照陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》的通知（陕环办发〔2018〕29号）的相关规定要求，对核技术利用项目进行辐射安全管理标准化建设工作。

医院应成立以主管院长为组长，相关科室负责人等为组员的辐射防护与安全管理机构小组，领导小组职责：

（一）组长职责：领导整个应急工作，协调各部门的工作，为应急工作提供资金保障。并向当地环保、卫生、公安等主管部门报告。负责全院辐射安全防护工作的指导、监督、检查和管理，负责收集、整理、分析全院辐射防护的有关资料，及时制定并采取防护措施。

（二）副组长职责：配合组长工作，当组长不在时，行使组长权利。

（三）救护职责：当事故发生后，迅速与医疗救护单位联系，配合协助其工作。

（四）物质供应职责：为事故的救助提供必要的物质保障。

12.2 辐射安全管理规章制度

医院应按照相关规定制定辐射安全管理制度，这些制度包括操作规程、岗位职责、辐射防护制度、安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训制度、台账管理制度、监测方案及应急响应预案和应急人员的培训演习制度，相关制度见表12-1。

表 12-1 医院应建立的管理制度

序号	医院成立的管理制度	内容
1	辐射防护和安全管理制度	制定相关管理制度，对医院辐射工作人员职责、工作程序和个人防护作出要求
2	辐射事故应急预案	制定应急预案，规定发生辐射事故时医院相关人员对策和处理程序，将辐射事故的影响减少到最小

3	岗位职责	制定相关工作制度及岗位职责，明确辐射工作人员和管理人员在辐射工作中各自的职责
4	监测计划	制定相关日常监测计划，规定委托监测和日常监测的频率和内容，并要求对监测结果存档保留
5	培训计划	制定相关辐射安全与防护专业知识人员培训计划，规定放射性工作人员必须参加生态环境部门认可的单位组织的辐射安全与防护培训，并持证上岗
6	操作规程	制定相关的操作规程，规定了放射性工作人员操作的详细流程，能减少辐射事故的发生
7	设备检修维护制度	制定设备维修管理制度，提出对机房安全防护设备和射线装置的定期检修和维护要求，防止因设备损坏造成辐射事故
8	职业健康监护制度	制定健康管理和人员防护监测，提出对辐射工作人员个人剂量监测和体检的要求，并要求健康档案的保存期限为终身
9	辐射工作人员个人剂量档案制度	

医院应严格执行辐射安全管理规章制度，并根据发展及时对辐射安全管理规章制度进行补充完善。

本项目所有放射性核素、射线装置及放射源投入运行后，医院应及时组织验收，编制竣工验收监测报告。

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，可以分析判断并预估电离辐射水平，防止人员受到过量的照射。根据实际情况，项目单位需建立辐射剂量监测制度，包括工作场所监测和个人剂量监测。

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）有关要求，医用电子直线加速器机房、伽玛刀机房、后装机机房应配置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，伽玛刀机房、后装机机房还应配备便携式个人剂量报警仪和1台环境辐射巡测仪，核医学科检查、治疗场所应至少配置1台环境辐射巡测仪和1台表面污染监测仪，介入手术室还应配备1台环境辐射巡测仪，每个辐射工作人员均应配备个人剂量计。

（1）个人剂量监测和职业健康检查

个人监测主要是利用个人剂量计进行外照射个人累积剂量监测，每名辐射工作人员需佩戴个人剂量计，监测周期为1次/季（每季度将个人剂量片送往有资质的检测机构进行检测）。辐射工作人员职业健康检查应至少每2年进行1次，并建立职业健康监护档案且长期保存。

(2) 辐射工作场所及周围环境监测

①年度监测

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；年度检测报告应作为《年度评估报告》的重要组成部分一并提交给发证机关。

②日常自行监测

定期自行开展辐射监测（也可委托有资质的单位进行自行监测），制定各工作场所的定期监测制度，监测数据应存档备案，监测周期至少1次/月。

③监测内容和要求

A、监测内容：X- γ 空气吸收剂量率、 α 、 β 表面污染水平等。

B、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（表12-2）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12-2 辐射工作场所监测计划建议

项目	监测点位	监测频次	备注
X- γ 辐射空气吸收剂量率	注射室：通风柜手孔位、通风柜表面、观察窗或注射窗表面、工作人员操作位	每月至少监测一次	
	ECT、PET 检查室、DSA 手术室、直线加速器机房、伽玛刀机房、后装机机房：机房屏蔽墙体外表面 30cm 处、防护门窗及缝隙外表面 30cm 处、机房顶棚 30cm 处，工作人员操作位（含指导摆位位置），管线洞口及通风口；核医学科其他场所：屏蔽墙体外表面 30cm 处、防护门及缝隙 30cm 处、顶棚以及地坪人员可达区域等		
	注射室的工作台面、地面、洗手池表面，候诊区、患者卫生间地面；		
	ECT1 机房在籽源植入手术结束后应对手术床及周边区域进行辐射水平监测，以排除籽源在手术植入过程中遗漏或丢失	每次籽源植入手术后	
	放射性废物桶表面、核医学科附近环境	每月至少监测一次	
α 、 β 表面污染	放射性药物分装、给药、注射后候诊等场所：工作台面、地面、洗手池表面、座椅表面、患者卫生间地面、床面以及可能受到污染位置	每月至少监测一次	
	核医学科工作人员手、皮肤暴露部分以及工作服、手套、鞋表面等	每次人员离开前	

(3) 放射性废物处理前监测

放射性废物在放射性废物暂存间放置一定时间，经对其进行监测辐射剂

量率及表面沾污，按照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）规定的放射性固体废物处理要求进行处置。

本项目放射性废水在排放前应自行或委托有资质的单位开展监测，保证排出水中放射性总活度不超过《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）规定的放射性废液排放要求。

12.4 还应采取的辐射安全管理措施

作为新建院区，院区内配备的放射性工作人员，应按照相关要求参加环保部门认可的单位组织的辐射防护与安全培训并满足相应的上岗条件，接受辐射防护安全知识和法律法规教育，提高守法和自我防护意识。

12.5 辐射事故应急

1 辐射事故应急预案规定内容

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环保护部令第18号）第六章 第四十三条规定：“生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当根据可能发生的辐射事故的风险，制定本单位的应急方案，做好应急准备。”辐射事故应急预案应当包括下列内容：

- （一）应急机构和职责分工；
- （二）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；
- （三）辐射事故分级与应急响应措施；
- （四）辐射事故的调查、报告和处理程序；
- （五）辐射事故信息公开、公众宣传方案。

2 现有管理情况

西安交通大学医学院第一附属医院已成立辐射事件应急处理委员会，西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院也应参照西安交通大学医学院第一附属医院成立辐射事件应急处理委员会，明确具体职责，制定了辐射事故应急预案，应急预案包括辐射事故处理程序，辐射事故应急处理原则、应急事故报告制度、人员救助和现场控制等有关内容。上述制定各项内容措施，对辐射事故应急处置将会起到积极作用。

12.6 环境保护投资与“三同时”环保验收一览表

1 环境保护投资

本项目总投资 251331.65 万元，计划环保工程投资 218 万元，占项目总投资的 0.09%，环保投资主要为辐射安全设施购置费、辐射环境监测仪器购置费、“三废”污染防治措施费、个人防护用品配置费、人员培训费、个人剂量及职业健康检查费、辐射环境监测费等。环保投资估算表见表 12-3

表 12-3 环保投资估算表

项目	污染防治措施或设施	费用 (万元)
辐射安全与防护措施	门机联锁、门灯联锁、视频监控及对讲设施、紧急停机按钮、工作状态指示灯、警示标识、防夹装置、门禁系统等	90.0
监测设备	X-γ 剂量率监测仪	5
	辐射工作人员配备个人剂量计	15
	α、β 表面污染监测仪	5
个人防护用品	铅橡胶衣、铅橡胶围裙、防护服、铅玻璃眼镜、铅橡胶帽、放射性污染防护服、远距离操作工具、有机玻璃眼镜或面罩、不小于 3mm 厚的橡皮泥或橡胶板等	20.0
辅助防护设施	转运铅防护罐、注射器、镅-68 淋洗铅防护罐、锎-99 淋洗铅防护罐、碘-131 铅防护罐、储源铅箱、一体化防护注射装置、放射性废物桶、铅屏风、淋洗分装通风柜、通风柜、分装热室等	50.0
通排风系统	专用的通风系统，核医学科废气经活性炭吸附后，引至楼顶排放，放疗科满足相关通风次数要求；	10.0
环境监测	工作场所监测费用	8.0
应急设备	应急和救助的物资准备	5.0
人员管理	辐射工作人员个人剂量检测，至少每 2 年进行一次职业健康体检，定期组织培训等	10.0
合计		218.0

2 “三同时”环保验收一览表

根据《建设项目环境保护管理条例》，工程建设执行污染治理设施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的“三同时”制度。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）规定，在项目竣工后，建设单位应自主进行竣工环保验收工作，验收合格后方可投入使用，该项目“三同时”措施一览表如表 12-4。

表 12-4 “三同时”环保验收一览表

序号	项目	“三同时”措施	效果和环境预期目标
1	辐射安全管理机构	设立辐射安全管理机构	成立专门的辐射防护管理小组，指定专人专职负责辐射安全与环境保护管理工作，并以文件形式明确辐射防护管理小组的主要职责。
2	控制及日常辐射监测	配备有 X-γ 辐射剂量率仪、表面沾污仪，并	掌握辐射环境状况、保护人员免受不必要的辐射。

	测	建立有日常监测记录	
3	剂量限值	/	根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），公众、职业照射剂量约束值执行 0.10mSv/a 和 5mSv/a；
4	剂量率限值	/	屏蔽墙体外表面 30cm 处、防护门表面及缝隙 30cm、管线穿墙孔洞处空气吸收剂量率能满足本次环评提出的要求
5	表面污染限值	/	控制区、监督区工作台面、地面、墙体、洗手池等 β 表面污染水平满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定限值
6		屏蔽措施	核素诊疗工作场所建设和布局与环评报告表描述一致。经屏蔽墙和防护门的屏蔽能力满足辐射防护的要求。通风设施运行正常，通风能力满足设计要求。
7	辐射安全和防护措施	安全措施（连锁装置、警示标志、工作指示灯等）	核医学科相关场所出入口、机房、候诊室注射室等涉及放射性核素场所，门外设置放射性警告标识和中文警告说明。放射性核素诊疗工作区出入口安装电子门禁；注射室采用实体屏蔽措施，安装防盗门、电视监控系统和防盗窃报警装置。放射源有专用贮存场所，设置有监控等安全管理措施。放疗设备机房进行机房安全连锁、门灯连锁、急停装置、报警、监控等装置；伽玛刀和后装机安装放射源在线监控装置。DSA 机房进行机房安全连锁、门灯连锁、急停装置、报警、监控等装置
8		“三废”处置设施	配备满足需要的放射性废物贮存设施；建设有满足环境管理要求的放射性废水衰变池，且有运行管理记录；有独立排风系统，排风口设置在所在建筑物顶部高处，排风速率满足辐射安全需要
9		辐射防护与安全培训和考核	从事管理工作和辐射工作的所有辐射工作人员上岗前均应参加辐射安全和防护专业知识的培训并考核合格。
10	人员配备	个人剂量监测人员职业健康监护	项目运行后辐射工作人员应进行个人剂量监测，定期组织工作人员进行职业健康体检，并按相关法规要求建立工作人员个人剂量档案和职业健康监护档案。
11	防护用品	按照辐射工作场所要求配备的防护用具，及防护用品	确保放射性工作人员及公众人员安全
12	辐射安全管理	制定操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案，辐射事故应急措施等规章制度	根据环评要求以及陕环办发[2018]29号文件要求，按照项目的实际情况，建立完善、内容全面、具有可操作性的辐射安全规章制度。针对使用的放射性同位素和射线装置使用过程中可能存在的风险，建立应急预案，落实必要的应急物质。定期进行辐射事故应急演练。
13	辐射安全管理标准化	按照陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》的通知（陕环办发[2018]29号）进行验收	

表 13 结论与建议

13.1 结论

1. 西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院作为大型综合类医院，诊断和治疗是医院的重点发展方向，随着医院放疗楼中核医学科、介入、放疗的建设，医院可为病人提供一个更加优越的诊疗环境，具有明显的社会效益，同时对提高医院肿瘤、神经疾患和心脏疾病的诊断水平放疗具有重大意义，，提高了医院的档次和服务水平，吸引更多的就诊人员，在保障病人健康的同时也为医院创造了更大的经济效益。因此西安交通大学医学院第一附属医院陆港医院核技术利用项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）“实践的正当性”的要求。

2. 本项目建于西安交通大学医学院第一附属医院国际陆港医院院内，项目无新征用地，医院用地为医疗用地，医院位于西安市国际港务区港务西路以西、秦汉大道以南区域，西侧和南侧均为待建用地。医院周边主要为待建用地，场址周围无明显环境制约因素，本项目选址基本合理。

本次评价涉及核医学科、放疗科、介入科及杂合手术室，核医学科和放疗科位于 1#综合楼西南角，放疗科位于地下二层，核医学科位于地下一层，放疗科周围北侧为医院配电室和控制室等附属用房，核医学科北侧为配电室，东侧均为地下停车场区域，地上为医院绿化区域。介入手术室位于 1#综合楼北侧区域，周围为手术配套的准备用房及住院病房。杂合手术室位于四层手术室中部，西侧为产房，北侧为 ICU，东侧为行政报告厅及口腔诊室，布局合理，既有便于医疗工作，又便于对核素、射线装置及放射源的集中管理，有利于辐射防护和环境保护。

3. 本项目是在固定的有实体边界的射线机房内使用射线装置、密封放射源、非密封放射性物质工作场所，本次评价确定为以肿瘤病房综合楼的边界外 50m 的区域，该范围内主要为医院的工作人员及公众。

4. 本次评价委托陕西省放射性物质监督检查站对项目拟建地 γ 辐射空气吸收剂量率进行本底监测，检测结果表明本项目拟建地 γ 辐射空气吸收剂量率在 0.04~0.06 μ Sv/h，基本与《中国环境天然放射性水平》（2015 年 7 月）中西安市辐射剂量率监测结果在同一水平。

5.环境影响评价结论

(1) PET-CT、SPECT-CT、DSA机房使用面积、最小单边长度及机房的屏蔽防护均能满足《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中相关要求。

(2) 核医学科本评价报告中工作场所控制区外人员可达处,各关注点周围剂量当量率均满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)中相关的屏蔽要求。

(3) 放疗科医用电子直线加速器、后装机、伽玛刀机房的防护能力能满足本次评价确定的剂量率参考控制水平。

(4) DSA机房的防护能力能满足《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中“具有透视功能的X射线设备在透视条件下检测时,周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ”的要求。

(5) 核医学科运行所致周围工作人员年有效剂量最大为 2.01mSv ,公众人员年有效剂量贡献值为 0.06mSv/a ,放疗科运行所致周围工作人员年有效剂量最大为 0.81mSv ,公众人员年有效剂量贡献值为 0.032mSv/a ,DSA运行所致周围工作人员年有效剂量最大为 3.87mSv ,公众人员年有效剂量贡献值为 $68.66\mu\text{Sv/a}$,均低于本次评价确定的职业工作人员年有效剂量约束限值 5mSv 和公众成员年有效剂量约束限值 0.1mSv 的要求。

4.由于本项目为新建院区所有放射性工作人员也应按照相关要求参加环保部门认可的单位组织的辐射防护与安全培训并满足相应的上岗条件,接受辐射防护安全知识和法律法规教育,提高守法和自我防护意识。

5.三废处置情况

(1) 废气

核医学科辐射工作场所设置有独立的排风系统,分别用于不同活度区,放射性药物分装的分装柜和通风橱设置单独的排风管道引至建筑物屋顶,经过高效活性炭吸附装置过滤后高空排放;活性区废气也通过专门的排风管道引至建筑物屋顶,经过高效活性炭吸附装置过滤后高空排放;其它活性区废气经专门的排风管道引至建筑物屋顶集中高空排放,符合《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)中的相关要求。

放疗科及介入科的医用电子直线加速器机房、后装机机房、伽玛刀、DSA 机房废气主要为臭氧及氮氧化物，分别设置通风系统通过独立管道引至医院排风井排放。

(2) 固体废物

放疗科和敷贴使用的放射源，当活度不能满足放疗治疗工作或因医院不再进行放射治疗时放射源将进行更换或报废，放疗科的放射源的更换由专业技术人员进行，所有更换或报废的放射源由厂家进行回收。

核医学科配备放射性废物衰变桶，污物桶内拟放置专用塑料袋直接收纳废物，装满后的废物袋密封，废物衰变桶收集放射性固体废物后，将放射性固体废物转移至放射性废物暂存间的放射性废物柜内。对注射器和玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入硬纸盒或其它包装材料中，然后装入专用塑料袋内。每袋废物的表面剂量率不超过 0.1mSv/h ，重量不超过 20kg ，并在污物衰变桶上标有废物类型、核素种类、比活度水平和存放日期等内容。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 表面污水小于 0.8Bq/cm^2 ，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。

直线加速器靶物质经常长期照射后，也可积累一定量的感生放射性核素，因此，退役的废靶件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，最终交加速器生产厂家或有资质的单位收贮。

本项目产生的办公、生活垃圾依托医院大楼拟建设的收集系统进行回收后由当地环卫部门清运。

(3) 废液

核医学科放射性废液经专用排污管道进入到衰变池，在贮存衰变后，总 β ，总 α 满足《医疗机构水污染排放标准》（GB18466-2005）中规定的要求后经审管部门核准后，可作普通医疗废液处理。

核医学科按照使用的核素的半衰期用于贮存含有核医学科其他核素的放射性废水，A 类衰变池的容积为 150m^3 ，B 类衰变池的容积为 328m^3 ，C 类衰变池的容积为 50m^3 ，经环评核算，各类衰变池的容积能满足放射性废水的暂存要求。

加速器设备中使用的内循环冷取水可能产生感生放射性。冷却水中被活化形成的放射性核素主要为 ^{15}O 、 ^{13}N ，它们的半衰期分别是2.1min和7.3s，半衰期较短，只需放置一定时间后其活度就可以衰减到较低水平。

医护人员产生的生活污水经医院污水管网收集后排入医院污水处理站处理达标后排入市政污水管网。

6. 总结论

本评价项目拟建的射线装置机房及核医学科核素治疗用房的建设方案中已按照环境保护法规和有关辐射防护要求进行设计，建设过程如能严格按照设计方案建筑施工质量能达到要求时，并且完善本次评价对该项目提出的各项要求及措施，则本项目正常运行时，对周围环境的影响能符合辐射环境保护的要求，从环境保护和辐射防护角度论证，本项目是可行的。

13.2 建议和承诺

建议单位认真做好以下几项工作：

1. 西安交通大学医学院第一附属医院陆港医院核技术应用项目必须在环评审批通过，医院按照环境保护行政主管部门规定的标准和程序，对配套建设的环境保护设施进行验收，并编制验收报告，验收合格并取得辐射安全许可才能正式投入使用。

2. 严格执行本报告提出的各项辐射防护要求。

3. 放射工作人员应提高熟练程度，减少医护人员停留机房及操作放射性药品的时间，尽可能地降低工作人员年有效剂量。放射工作人员（含以后新增放射工作人员）和直接负责辐射管理人员，应进行辐射防护培训，必须通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台进行培训。应为放射工作人员建立完善的个人剂量档案和职业健康档案。

4. 不断完善辐射事故应急预案，加强日常演练，做到有备无患，加强放射性工作人员的核与辐射安全知识培训，增强医护人员个人防护意识，最大限度的降低放射诊疗作业造成的有效剂量。

5. 按照《陕西省环境保护厅办公室关于开展核技术利用单位辐射安全管理标准化建设工作的通知》要求，规范管理与操作，建立健全核技术利用项目各项档案管理，认真开展自查自评工作，发现问题及时整改，竣工验收时同时达到标准化指标要求。

表 14 审批

下一级环保部门预审意见：

公 章

经办人：

年 月 日

审批意见：

公 章

经办人：

年 月 日