

核技术利用建设项目

林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期- 医院新建放疗中心及核医学科项目 环境影响报告表

(公示本)

成都兴锦生态建设投资集团有限公司

二〇二五年十一月



生态环境部监制

核技术利用建设项目

林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期-医院
新建放疗中心及核医学科项目
环境影响报告表

建设单位名称：成都兴锦生态建设投资集团有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：成都市锦江区锦华路三段熙华国际商务中心
13 栋一层

邮政编码：610023

联系人：李**

电子邮箱：153**@qq.com

联系电话：156***

目 录

表 1 项目概况	4
表 2 放射源	27
表 3 非密封放射性物质	27
表 4 射线装置	31
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）	30
表 6 评价依据	33
表 7 保护目标与评价标准	39
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	113
表 11 环境影响分析	183
表 12 辐射安全管理	289
表 13 结论与建议	298

表 1 项目概况

建设项目名称		林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期-医院新建放疗中心及核医学科项目			
建设单位		成都兴锦生态建设投资集团有限公司			
法人代表		袁**	联系人	李**	联系电话 156***
注册地址		成都市锦江区工业园区创业产业商务区锦盛路 2 号 13 栋 16 楼 1601 号			
项目建设地点		成都市锦江区柳江街道潘家沟村一组、十组、十一组			
立项审批部门		/		批准文号	/
建设项目总投资 (万元)		**	项目环保投资 (万元)	**	投资比例(环保投资/总投资) **%
项目性质		<input checked="" type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它			占地面积 (m ²) 约 4608
应用 类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I类(医疗使用) <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input checked="" type="checkbox"/> V类		
	非密封放 射性物质	<input checked="" type="checkbox"/> 生产	<input checked="" 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		
	其它	/			

项目概述

一、建设单位简介及项目由来

成都兴锦生态建设投资集团有限公司(统一社会信用代码: 91**)成立于 2007 年,是成都市锦江区国有资产管理委员会办公室出资筹办的独资公司,是成都市锦江区重要的城市基础设施建设、保障性住房主要建设单位之一。锦江区作为成都的核心城区,是国务院确定的“商贸繁华区”、中国民营经济最具活力区、中国十佳投资创业城区,商贸繁荣、商务发达、国际时尚、生态优美,正抢抓成渝地区双城经济圈建设重大战略机遇,紧紧围绕“品位锦江·幸福城区”总体目标,全力构建“一核两轴三带三区”空间功能布局和“1+3+3”现代产业体系,加快建设更加美丽、更具活力、更有品位、更具幸福感的现代

化国际化锦江。

成都市锦江区人民政府招商引资四川弘凸医疗科技发展有限公司入驻林家坝 TOD 片区医疗用地，该公司拟在该片区 1#医疗综合楼打造以核医学为主的肿瘤专科医院，现已在锦江区成立了名为“成都锦江光华未来医院有限公司”的全资子公司。四川弘凸医疗科技发展有限公司与成都兴锦生态建设投资集团有限公司（后文简称“建设单位”）签订了场所租赁合同，在 1#医疗综合楼建成投用后，交由成都锦江光华未来医院有限公司（后文简称“医院”）运营、管理。

根据医院提供的设计方案，医院拟在 1#医疗综合楼新建放疗中心及核医学科工作场所。其中，放疗中心位于 1#医疗综合楼负二层东北侧，拟在放疗中心直线加速器机房内使用 2 台最大能量为 10MV 的直线加速器（Ⅱ类射线装置）和 1 台模拟 CT（Ⅲ类射线装置）；拟在负二层西北侧新建核医学制药区，在负一层北侧新建核素诊断区，在二层、三层北侧新建核素治疗区，均为乙级非密封放射性物质工作场所。医院拟在负二层核医学科制药区使用 1 台 10MeV 回旋加速器（Ⅱ类射线装置）；负一层核素诊断区使用 PET-CT、SPECT-CT 各 1 台，使用放射源进行校准（Ⅴ类放射源）；二层核素治疗区使用 1 台数字减影血管造影装置（Ⅱ类射线装置）。1#医疗综合楼及相关配套设施工期环境影响已包含在《林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期环境影响报告表》中，目前已经通过了专家评审，本次评价主要对医院在医疗综合楼内建设放疗中心及核医学科项目进行评价。

按照《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国环境影响评价法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 第449号）和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（原环境保护部令第31号，2021年1月4日修订），本项目需进行环境影响评价。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021年版）》（生态环境部 部令第16号），本项目属于“第五十五项—172 条核技术利用建设项目——制备PET用放射性药物的；使用Ⅱ类射线装置；乙级非密封放射性物质工作场所”，应编制环境影响报告表；根据四川省生态环境厅关于印发《四川省生态环境厅审批环境影响评价文件的建设项目目录（2025 年本）》的通知（川环规〔2025〕1 号），本项目环境影响报告表应报四川省生态环境厅审查批准。为此，建设单位委托四川省中栎环保科技有限公司编制该项目环境影响报告表（附件1）。

报告编制单位接受委托后，在现场踏勘、实地调查了解项目所在地环境条件和充分

研读相关法律法规、规章制度、技术资料后，在项目区域环境质量现状评价的基础上，对项目环境影响进行了预测分析，并按相应标准进行评价。同时，就项目对环境可能造成的影响、项目单位从事相应辐射活动的的能力、拟采取的辐射安全和防护措施等进行了综合分析，在此基础上提出合理可行的对策和建议，编制完成本报告表。

二、产业政策符合性

根据中华人民共和国国家发展和改革委员会发布的《产业结构调整指导目录（2024年本）》（中华人民共和国国家发展和改革委员会令 第7号）的相关规定，本项目使用非密封放射性物质、V类放射源、II类射线装置为医院医疗基础建设内容，属该指导目录中第三十七项“卫生健康”中第1款“医疗卫生服务设施建设”，属于国家鼓励类产业，符合国家产业政策。

三、项目概况

（一）项目名称、性质、地点

项目名称：林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期-医院新建放疗中心及核医学科项目

建设性质：新建

建设地点：成都市锦江区柳江街道潘家沟村一组、十组、十一组

（二）建设内容与规模

医院拟在林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期 1#医疗综合楼内（主楼 11F、高约 55m，裙楼 3F、高约 16.4m，地下 2 层）新建放疗中心和核医学科工作场所。

1、放疗中心

医院拟在 1#医疗综合楼负二层东北角新建放疗中心，在放疗中心新建 1#直线加速器机房、2#直线加速器机房、模拟 CT 室各 1 间，并分别设置 1 间控制室及其他配套用房。

（1）直线加速器机房

医院拟在 1#直线加速器机房、2#直线加速器机房内，分别使用 1 台 10MV 直线加速器（型号待定），属于 II 类射线装置，具备适形调强放射治疗（IMRT）、图像引导下的调强放疗（IGRT）、三维适形放疗（3DRT）和容积旋转调强放射治疗（VMAT）等功能，配置诊断锥体束 CBCT 图像引导模块，用于放射治疗前对患者治疗位置的验证。直线加速器每年最长出束时间约 412.5h/台（治疗出束时间约 375h，质控出束时间约

37.5h)。其中 X 射线能量最大为 10MV，X 射线治疗模式时 1m 处最大剂量率为 22Gy/min；电子束能量最大为 20MeV，电子线治疗模式时 1m 处剂量率为 22Gy/min；CBCT 图像引导模块最大管电压 150kV，最大管电流 500mA，年最大曝光时间约 125h/台。

1#直线加速器机房、2#直线加速器机房呈镜像布置，室内净空面积均为60.4m²（L×B=7.55m×8.0m，不含迷道），四面墙体、迷道、顶部和底部为混凝土结构，直线加速器主射方向均朝向机房北侧、南侧、顶部和地面。1#直线加速器机房北侧、2#直线加速器机房南侧主屏蔽墙体厚度均为2800mm、宽为5000mm，相连次屏蔽墙体厚度为1700mm；西侧迷道外墙屏蔽体厚度均为1500mm，迷道内墙屏蔽体厚度均为1800mm；东侧墙体厚度均为1500mm；1#直线加速器机房、2#直线加速器机房共用主屏蔽墙体厚度为2800mm、宽为5000mm，相连次屏蔽墙体厚度为1700mm；顶部主屏蔽墙厚度为2800mm、宽为5000mm，相连的次屏蔽墙为1700或2100mm；防护门均为15mm铅当量电动推拉门；地下无其他建筑。

（2）模拟 CT 室

医院拟在模拟 CT 室内使用 1 台模拟 CT 机（型号待定），用于模拟定位，最大管电压 150kV，最大管电流为 1000mA，属于III类射线装置，年最大曝光时间约 75h。模拟 CT 室净空面积约 31.2m²（L×B=6.8m×4.6m），南侧墙体为 300mm 厚混凝土或 370mm 厚实心砖墙，其余三侧均为 370mm 厚实心砖墙，屋顶为 300mm 厚混凝土，铅窗和防护门为 3mm 铅当量；地下无其他建筑。

2、核医学工作场所

医院拟在 1#医疗综合楼负二层西北侧新建核医学制药区、负一层北侧新建核素诊断区、二层和三层北侧新建核素治疗区，均为乙级非密封放射性物质工作场所；拟在负二层东侧（2#直线加速器机房南侧）新建 2 组衰变池，用于放射性废水暂存衰变。

（1）负二层核医学制药区

医院拟在 1#医疗综合楼负二层西北侧新建核医学制药区内，设回旋加速器制药区、放化实验室及其他配套用房，总占地面积约 811m²，核医学制药区日等效最大操作量为 1.89×10⁹Bq，为乙级非密封放射性物质工作场所。

表1-1 负二层核医学制药区核素操作情况

序号	核素名称	状态	活动种类	日最大使用/操作量 (Bq)	年最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	操作方式
1	¹⁸ F	液态	生产、使用	5.55E+10	1.39E+13	5.55E+08	简单操作

2	^{11}C	液态	生产、使用	3.70E+10	9.25E+12	3.70E+08	简单操作
3	^{13}N	液态	生产、使用	3.70E+10	9.25E+12	3.70E+08	简单操作
4	^{15}O	液态	生产、使用	2.22E+09	5.55E+11	2.22E+07	简单操作
5	^{64}Cu	液态	生产、使用	2.78E+09	6.94E+11	2.78E+07	简单操作
6	^{89}Zr	液态	生产、使用	1.33E+10	3.33E+12	1.33E+09	简单操作

1) 回旋加速器制药区

①回旋加速器机房

医院拟在回旋加速器机房（净空面积约 63m²）内安装 1 台型号为 MINITrace Qilin 的自屏蔽回旋加速器，质子能量为 10MeV，最大束流为 70μA，属于 II 类射线装置，年最大出束时间为 750h，拟打靶生产放射性核素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 。

回旋加速器机房四周墙体、顶部均为 800mm 厚混凝土，防护门为 12mm 铅板+130mm 厚含硼聚乙烯，地下无其他建筑。

②热室

医院拟在回旋加速器机房东南侧设热室（包含热室后区、热室前区），主要对回旋加速器打靶生产放射性核素进行合成、分装。热室北侧与回旋加速器机房共用墙为 800mm 厚混凝土、其余墙体均为 200mm 厚混凝土，屋顶为 300mm 厚混凝土，4 扇防护门屏蔽效能均为 5mmPb；拟在热室内设 4 个药物合成箱、1 个药物分装箱，周围屏蔽效能均为 70mm 铅当量。

2) 放化实验室

医院拟在回旋加速器制药区西南侧设放化实验室，对回旋加速器制药区内生产的放射性核素（ ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr ）进行质控。放化实验室北侧与回旋加速器机房共用墙为 800mm 厚混凝土，东侧与热室共用墙体为 200mm 厚混凝土，西侧、南侧墙体均为 240mm 厚实心砖，防护门屏蔽效能为 5mmPb，屋顶为 300mm 厚混凝土，拟在放化实验室内配置 1 个周围屏蔽效能为 10mmPb 的通风橱。

（2）负一层核素诊断区

医院拟在负一层北侧设核素诊断区，在诊断区内设源库、放射性废物暂存间、分装注射室、给药区、运动负荷室/抢救室、VIP PET 给药后候诊室（含卫生间）、PET 给药后候诊室（含卫生间）、污洗间、SPECT 给药后候诊室（含卫生间）、SPECT 检后休息室（含卫生间）、PET 检后休息室（含卫生间）、SPECT-CT 室、PET-CT 室、PET-MRI 室等，在核素诊断区内开展 SPECT-CT、PET-MRI 和 PET-CT 核素显像诊断。PET-CT/MRI

核素诊断拟使用负二层回旋加速器打靶生产的放射性核素¹⁸F、¹¹C、¹³N、¹⁵O、⁶⁴Cu、⁸⁹Zr和负一层⁶⁸Ge（⁶⁸Ga）淋洗制备的⁶⁸Ga；SPECT核素诊断拟使用⁹⁹Mo（^{99m}Tc）淋洗制备的放射性核素^{99m}Tc。在负一层核素诊断区内，日等效最大操作量为 4.64×10^8 Bq，属于乙级非密封放射性物质工作场所。

表1-2 负一层核素诊断区核素使用情况

序号	核素名称	状态	活动种类	日最大使用/操作量（Bq）	年最大操作量（Bq）	日等效最大操作量（Bq）	操作方式
1	¹⁸ F	液态	使用	1.11E+10	2.78E+12	1.11E+07	很简单操作
2	¹¹ C	液态	使用	7.40E+08	1.85E+11	7.40E+05	很简单操作
3	¹³ N	液态	使用	7.40E+08	1.85E+11	7.40E+05	很简单操作
4	¹⁵ O	液态	使用	7.40E+08	1.85E+11	7.40E+05	很简单操作
5	⁶⁴ Cu	液态	使用	4.44E+08	1.11E+11	4.44E+06	简单操作
6	⁸⁹ Zr	液态	使用	7.40E+08	1.85E+11	7.40E+07	简单操作
7	⁶⁸ Ga	液态	使用	7.77E+08	1.94E+11	7.77E+06	简单操作
8	⁹⁹ Mo（ ^{99m} Tc）	固态	使用	3.70E+10	1.85E+12	3.70E+07	源的贮存
9	⁶⁸ Ge（ ⁶⁸ Ga）	固态	使用	1.11E+09	3.33E+10	1.11E+06	源的贮存
10	^{99m} Tc	液态	使用	3.33E+10	8.33E+12	3.33E+08	简单操作

医院拟在 PET-MRI 室安装1台 PET-MRI，在 PET-CT 室安装1台 PET-CT（属于Ⅲ类射线装置，型号待定，最大管电压为150kV，最大管电流为1000mA）；使用1枚²²Na 放射源（活度为 3.70×10^8 Bq/枚×1枚）或3枚⁶⁸Ge 放射源（活度为 9.25×10^7 Bq/枚×1枚+ 4.60×10^7 Bq/枚×2枚）用于 PET-CT、PET-MRI 校准，均属于V类放射源；在 SPECT-CT 室安装1台 SPECT-CT（属于Ⅲ类射线装置），型号待定，最大管电压为150kV，最大管电流为1000mA。

负一层核素诊断区地面厚度为300mm/800mm 厚混凝土，顶部为300mm 厚混凝土。源库、分装注射室、放射性废物暂存间之间的共用墙体 及放射性废物暂存间西侧墙体均为200mm 厚实心砖墙，其余三侧墙体均为370mm 厚实心砖墙，防护门屏蔽效能为8mm 铅当量或10mm 铅当量，给药窗分别为20mm 铅当量、40mm 铅当量。运动负荷室/抢救室、给药区、VIP PET 给药后候诊室、SPECT 给药后候诊室、PET-CT 室、PET-MRI 室、SPECT-CT 室、SPECT 检后休息室、检查廊等四周墙体均为370mm/200mm 厚实心砖墙，防护门为5mm 铅当量~15mm 铅当量防护门；防护窗为5mm 铅当量/18mm 铅当量。PET 给药后候诊室、VIP PET 给药后候诊室、PET 检后休息室四周屏蔽墙体均为370mm

厚实心砖墙/370mm 厚实心砖墙+6mm 铅当量硫酸钡涂层,防护门为12mmPb/15mm 铅当量防护门。

3、二层核素治疗区

医院拟在 1#医疗综合楼二层北侧设核素治疗区,在核素治疗区内设放射性物质工作场所和介入手术室,占地面积约 566m²,在放射性物质工作场所内使用放射性核素 ¹³¹I、⁸⁹Sr、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re、²²³Ra、²²⁵Ac、^{99m}Tc、¹²⁵I 粒子源、¹⁰³Pd 种子源、⁹⁰Y 微球、¹⁸⁸Re,使用 2 枚 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 放射源(V 类),拟在介入手术室内使用 DSA-CBCT 设备 1 台,利用 DSA-CBCT 设备开展 ⁹⁰Y 微球、¹⁸⁸Re、¹⁰³Pd 种子源和 ¹²⁵I 粒子源的介入手术。

1) 放射性物质工作场所

医院拟在 1#医疗综合楼二层北侧放射性物质工作场所内设病房治疗区、门诊治疗区,在病房治疗区设源库、分装给药室、留观室、介入手术室、放射性污染被服间等各 1 间,隔离病房 6 间(¹⁸⁸Re 治疗病房 3 间,¹²⁵I 粒籽植入治疗、¹⁰³Pd 种子源植入治疗、⁹⁰Y 微球治疗病房各 1 间,均含卫生间),放射性废物暂存间 2 间,在门诊治疗区设甲吸室和敷贴室各 1 间。在病房治疗区内,使用放射性同位素 ⁸⁹Sr、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re、²²³Ra、²²⁵Ac、^{99m}Tc、¹²⁵I 粒子源、¹⁰³Pd 种子源、⁹⁰Y 微球、¹⁸⁸Re,用于肿瘤治疗。其中,注射放射性核素 ⁸⁹Sr、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re、²²³Ra、²²⁵Ac 治疗的患者留观结束后离开医院。在门诊治疗区内,甲吸室使用核素 ¹³¹I 用于甲吸检查,敷贴室使用 2 枚放射源 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y,活度为 7.40×10⁹Bq/枚×2 枚(V 类),用于皮肤病敷贴治疗。在二层核素治疗区内,各放射性物质日等效最大操作量为 3.71×10⁹Bq,为乙级非密封放射性物质工作场所。

表1-3 二层核素治疗区核素使用情况

序号	核素名称	状态	活动种类	日最大操作量(Bq)	年最大操作量(Bq)	日等效最大操作量(Bq)	操作方式
1	¹³¹ I 甲吸	液态	使用	3.70E+06	9.25E+08	3.70E+05	简单操作
2	¹³¹ I 甲吸	液态	使用	3.70E+06	9.25E+08	3.70E+03	源的贮存
3	⁸⁹ Sr	液态	使用	2.96E+08	7.40E+10	2.96E+07	简单操作
4	⁸⁹ Sr	液态	使用	2.96E+08	7.40E+10	2.96E+05	源的贮存
5	¹⁵³ Sm	液态	使用	2.96E+09	7.40E+11	2.96E+08	简单操作
6	¹⁵³ Sm	液态	使用	2.96E+09	7.40E+11	2.96E+06	源的贮存
7	¹⁸⁶ Re	液态	使用	2.22E+09	5.55E+11	2.22E+08	简单操作
8	¹⁸⁶ Re	液态	使用	2.22E+09	5.55E+11	2.22E+06	源的贮存
9	²²³ Ra	液态	使用	1.48E+07	3.70E+09	1.48E+08	简单操作

10	^{223}Ra	液态	使用	1.48E+07	3.70E+09	1.48E+06	源的贮存
11	^{225}Ac	液态	使用	1.48E+07	3.70E+09	1.48E+08	简单操作
12	^{225}Ac	液态	使用	1.48E+07	3.70E+09	1.48E+06	源的贮存
13	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	液态	使用	3.70E+08	1.85E+10	3.70E+05	很简单操作
14	^{125}I 粒子源	固态	使用	5.92E+09	1.18E+12	5.92E+06	很简单操作
15	^{125}I 粒子源	固态	使用	5.92E+09	1.18E+12	5.92E+05	源的贮存
16	^{103}Pd 种子源	固态	使用	5.92E+09	1.18E+12	5.92E+06	很简单操作
17	^{103}Pd 种子源	固态	使用	5.92E+09	1.18E+12	5.92E+05	源的贮存
18	^{90}Y 微球	液态	使用	6.00E+09	3.00E+11	6.00E+08	简单操作
19	^{90}Y 微球	液态	使用	6.00E+09	3.00E+11	6.00E+06	源的贮存
20	^{188}Re	液态	使用	2.22E+10	1.11E+12	2.22E+09	简单操作
21	^{188}Re	液态	使用	2.22E+10	1.11E+12	2.22E+07	源的贮存

在二层核素治疗区放射性物质工作场所（除介入手术室外）内，地面为300mm厚混凝土/250mm厚混凝土，顶部为300mm厚混凝土。分装给药室、源库、隔离病房（6间）、留观室、病房走道、放射性废物暂存间2、放射性污染被服暂存间等四周墙体均为240mm厚实心砖墙，防护门为2mm/5mm铅当量，分装给药室防护窗为10mm铅当量；放射性废物暂存间1、甲吸室、敷贴室四周墙体为370mm厚实心砖墙/200mm厚实心砖墙，放射性废物暂存间1防护门为5mm铅当量、甲吸室防护门为2mm铅当量。

2) 介入手术室

医院拟在1#医疗综合楼二层核素治疗区设介入手术室、控制室、污物暂存间、设备间等配套用房各1间，在介入手术室内使用DSA-CBCT设备1台，最大管电压为150kV、最大管电流为1000mA，属于II类射线装置，主要用于血管造影、放射性核素介入治疗等，主射方向由下向上。DSA部分年累计最大出束时间约155h（其中拍片约13.3h，透视约141.7h），CBCT部分年累计最大出束时间为250h。

介入手术室及配套用房占地面积约154m²，其中介入手术室净空尺寸为6.0m（长）×11.3m（宽）×2.7m（高），四周均为370mm厚实心砖墙，地面为300mm厚混凝土，顶部为400mm厚混凝土，西侧、北侧防护门均为5mmPb，东侧防护门为4mmPb，观察窗有效屏蔽厚度为4mmPb。

4、三层核素治疗区

医院拟在1#医疗综合楼三层北侧设核素治疗区，占地面积约352m²，设源库、分装给药室、配药室、甲亢室、隔离病房（ ^{131}I 治疗病房5间、 ^{177}Lu 治疗病房1间，均含卫

生间)、放射性废物暂存间 2 间及其他配套用房,在核素治疗区内使用放射性同位素 ^{131}I 、 ^{177}Lu 。其中,使用核素 ^{131}I 用于甲癌治疗和甲亢治疗,甲亢治疗患者服药留观后离开医院, ^{177}Lu 用于肿瘤治疗。在三层核素治疗区内,放射性物质日等效最大操作量为 $3.74\times 10^9\text{Bq}$,属于乙级非密封放射性物质工作场所。

表1-4 三层核素治疗区核素使用情况

序号	核素名称	状态	活动种类	日最大操作量 (Bq)	年最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	操作方式
1	^{131}I 甲亢	液态	使用	$1.85\text{E}+09$	$1.85\text{E}+11$	$1.85\text{E}+08$	简单操作
2	^{131}I 甲亢	液态	使用	$1.85\text{E}+09$	$1.85\text{E}+11$	$1.85\text{E}+06$	源的贮存
3	^{131}I 甲癌	液态	使用	$2.78\text{E}+10$	$2.78\text{E}+12$	$2.78\text{E}+09$	简单操作
4	^{131}I 甲癌	液态	使用	$2.78\text{E}+10$	$2.78\text{E}+12$	$2.78\text{E}+07$	源的贮存
5	^{177}Lu	液态	使用	$7.40\text{E}+09$	$7.40\text{E}+11$	$7.40\text{E}+08$	简单操作
6	^{177}Lu	液态	使用	$7.40\text{E}+09$	$7.40\text{E}+11$	$7.40\text{E}+06$	源的贮存

在三层核素治疗区内,地面为230mm 厚混凝土~400mm 厚混凝土,顶部为230mm 厚混凝土~400mm 厚混凝土。源库、分装给药室、配药室、放射性废物暂存间1之间、放射性废物暂存间2及放射性污染被服间之间的墙体均为200mm 厚实心砖墙,其余三侧墙体均为370mm 厚实心砖墙,防护门为8mm 铅当量/10mm 铅当量,给药窗为40mm 铅当量;隔离病房(6间)东侧、西侧两端墙体均为300mm 厚混凝土+6mm 铅当量硫酸钡涂层,其余各侧墙体均为300mm 厚混凝土墙,北侧防护窗均为15mm 铅当量;病房走道北侧墙体为300mm 厚混凝土墙,南侧及东侧墙体为370mm 厚实心砖墙/370mm 厚实心砖墙+6mm 铅当量硫酸钡涂层;甲亢室、污洗间四周墙体均为370mm 厚实心砖墙,防护门均为10mm 铅当量。

5、放射性废水衰变池

医院拟在 1#医疗综合楼负二层东侧(2#直线加速器机房南侧)新建长半衰期衰变池、短半衰期衰变池(各含 2 格降解池),其中衰变池池体四周采用 400mm 厚混凝土浇筑,池体之间分隔、顶部均采用 300mm 厚混凝土浇筑,池体内侧均采用一定厚度的防水材质抹面,顶部检修口拟采用 8mm 铅当量铅钢结构盖板进行遮盖。其中,长半衰期衰变池池体高于负二层地面,有效容积为 $125\sim 187\text{m}^3/\text{格}\times 4$ 格,长半衰期降解池有效容积为 $9.9\text{m}^3/\text{格}\times 2$ 格(1 用 1 备),用于收集二层核素治疗区、三层核素治疗区内产生的放射性废水;短半衰期衰变池池体低于负二层地面,有效容积为 $96\text{m}^3/\text{格}\times 3$ 格,短半衰期降解池有效容积为 $24\text{m}^3/\text{格}\times 2$ 格(1 用 1 备),用于收集负二层核医学制药区、负一层核

素诊断区内产生的放射性废水。

表1-5 本项目组成及主要的环境问题表

名称	科室	场所	建设内容及规模		可能产生环境问题	
					施工期	营运期
主体工程	放疗中心	直线加速器机房	使用设备	使用 2 台 10MV 医用直线加速器，型号待定，属于Ⅱ类射线装置	施工废气、施工噪声、施工废水、固体废物、生活污水、生活垃圾	X 射线、电子线、臭氧、氮氧化物、噪声、生活垃圾、生活污水
			使用场所	1#直线加速器机房、2#直线加速器机房		
			年出束时间	412.5h/台（治疗 375h/台，质控约 37.5h/台）		
			1m 处剂量率	X 射线 1m 处剂量率最大为 22Gy/min 电子束 1m 处剂量率最大为 22Gy/min		
			主射方向	机房北侧、南侧、顶部、地面		
			图像引导 (CBCT)模块	最大管电压为 150kV，最大管电流为 500mA， 年最大曝光时间约 125h		
			机房屏蔽体结构、尺寸	1#直线加速器机房、2#直线加速器机房为混凝土结构，室内净空面积均为 60.4m ² （L×B=7.55m×8.0m，不含迷道）		
		模拟 CT 室	使用设备	模拟 CT 机 1 台，型号待定，属于Ⅲ类射线装置	施工废气、施工噪声、施工废水、固体废物、生活污水、生活垃圾	X 射线、臭氧、氮氧化物、噪声、生活垃圾、生活污水
			使用场所	负二层模拟 CT 室		
			年曝光时间	75h		
			最大管电压/电流	150kV/500mA		
			机房屏蔽体结构、尺寸	模拟 CT 室净空面积约 31.2m ² （L×B=6.6m×4.6m），南侧墙体为混凝土/实心砖墙，其余三侧均为实心砖墙，屋顶为 300mm 厚混凝土		
主体工程	核医学科	负二层核医学科制药区	设备、数量	回旋加速器，1 台	施工废气、施工噪声、施工废水、固体废物、生活污水、生活垃圾	中子、β 射线、γ 射线、韧致辐射、感生放射性物质、β 表面沾污、放射性废水、放射性固体废物、臭氧、氮氧化物、生活污水、生活垃圾
			使用设备	型号为 MINITrace Qilin 的自屏蔽回旋加速器 1 台，属于Ⅱ类射线装置		
			使用场所	负二层回旋加速器机房		
			最大参数	10MeV/70μA		
			出束时间	750h/a		
			计划核素产额	¹⁸ F		
				¹¹ C		
				¹³ N		
				¹⁵ O		
				⁶⁴ Cu		

主体工程				⁸⁹ Zr	日最大操作量 1.33E+10Bq, 日等效最大操作量 1.33E+09Bq			
			非密封放射性物质工作场所		回旋加速器机房、热室(热室前区、热室后区)、放化实验室及其他配套用房			
			场所等级		日等效最大操作量 1.89×10 ⁹ Bq, 属于乙级非密封放射性物质工作场所			
	核医学科	负一层核素诊断区	使用核素及用量	使用设备		使用 1 台 SPECT-CT、1 台 PET-CT, 型号待定, 均为Ⅲ类射线装置	施工废气、施工噪声、施工废水、固体废物、生活污水、生活垃圾	X 射线、β射线、γ射线、β表面沾污、放射性废气、放射性废水、放射性固体废物、废放射源、臭氧、氮氧化物、生活污水、生活垃圾
				最大管电压/电流		150kV/1000mA		
				使用场所		负一层核医学科核素诊断区 SPECT-CT 室、PET-CT 室、PET-MRI 室		
				放射源		使用 1 枚 ²² Na 放射源(活度为 3.70×10 ⁸ Bq×1 枚)或 3 枚 ⁶⁸ Ge 放射源(活度为 9.25×10 ⁷ Bq×1 枚+4.60×10 ⁷ Bq×2 枚)用于 PET-CT、PET-MRI 校准, 均属于V类放射源		
				¹⁸ F	日最大操作量 1.11E+10Bq, 日等效最大操作量 1.11E+07Bq			
				¹¹ C	日最大操作量 7.40E+08Bq, 日等效最大操作量 7.40E+05Bq			
				¹³ N	日最大操作量 7.40E+08Bq, 日等效最大操作量 7.40E+05Bq			
				¹⁵ O	日最大操作量 7.40E+08Bq, 日等效最大操作量 7.40E+05Bq			
				⁶⁴ Cu	日最大操作量 4.44E+08Bq, 日等效最大操作量 4.44E+06Bq			
				⁸⁹ Zr	日最大操作量 7.40E+08Bq, 日等效最大操作量 7.40E+07Bq			
			⁶⁸ Ga	日最大操作量 7.77E+08Bq, 日等效最大操作量 7.77E+06Bq				
			⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc 发生器	日最大操作量 3.70E+10Bq, 日等效最大操作量 3.70E+07Bq				
			⁶⁸ Ge/ ⁶⁸ Ga 发生器	日最大操作量 1.11E+09Bq, 日等效最大操作量 1.11E+06Bq				
			^{99m} Tc	日最大操作量 3.33E+10Bq, 日等效最大操作量 3.33E+08Bq				
			非密封放射性物质工作场所		源库、放射性废物暂存间、分装注射室、给药区、运动负荷室/抢救室、VIP PET 给药后候诊室(含卫生间)、PET 给药后候诊室(含卫生间)、SPECT 给药后候诊室(含卫生间)、SPECT 检后休息室(含卫生间)、PET 检后休息室(含卫生间)、SPECT-CT 室、PET-CT 室、PET-MRI 室及其他配套用房			

主体工程	核医学科	二层核素治疗区	场所等级	日等效最大操作量 $4.64 \times 10^8 \text{Bq}$ ，属于乙级非密封放射性物质工作场所	施工废气、施工噪声、施工废水、固体废物、生活污水、生活垃圾	α 射线、 β 射线、 γ 射线、 α 表面污染、 β 表面沾污、韧致辐射、放射性废气、放射性废水、放射性固体废物、废放射源、医疗废物、臭氧、氮氧化物、生活污水、生活垃圾
			使用设备	使用 1 台 DSA-CBCT 设备，型号待定，属于 II 类射线装置		
			使用场所	二层核素治疗区介入手术室		
			最大参数	150kV/1000mA		
			年出束时间	DSA 部分拍片 13.3h、透视 141.7h，CBCT 部分 250h		
			敷贴治疗	设敷贴室 1 间，在敷贴室内使用 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源 2 枚，出厂活度为 $7.40 \times 10^8 \text{Bq/枚} \times 2$ 枚，属于 V 类放射源		
			使用核素及用量	^{131}I 甲吸		
				日最大操作量 $3.70\text{E}+06\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $3.70\text{E}+05\text{Bq}$		
				^{89}Sr		
				日最大操作量 $2.96\text{E}+08\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $2.96\text{E}+07\text{Bq}$		
				^{153}Sm		
				日最大操作量 $2.96\text{E}+09\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $2.96\text{E}+08\text{Bq}$		
				^{186}Re		
				日最大操作量 $2.22\text{E}+09\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $2.22\text{E}+08\text{Bq}$		
				^{223}Ra		
				日最大操作量 $1.48\text{E}+07\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $1.48\text{E}+08\text{Bq}$		
				^{225}Ac		
				日最大操作量 $1.48\text{E}+07\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $1.48\text{E}+08\text{Bq}$		
				$^{99\text{m}}\text{Tc}$		
				日最大操作量 $3.70\text{E}+08\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $3.70\text{E}+05\text{Bq}$		
				^{125}I 粒子源		
				日最大操作量 $5.92\text{E}+09\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $5.92\text{E}+06\text{Bq}$		
				^{103}Pd 种子源		
				日最大操作量 $5.92\text{E}+09\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $5.92\text{E}+06\text{Bq}$		
				^{90}Y 微球		
				日最大操作量 $6.00\text{E}+09\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $6.00\text{E}+08\text{Bq}$		
				^{188}Re		
				日最大操作量 $2.22\text{E}+10\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $2.22\text{E}+09\text{Bq}$		
			非密封放射性物质工作场所	源库、分装给药室、留观室、介入手术室、放射性废物暂存间、放射性污染被服间、隔离病房（6 间）及其他配套用房		
			场所等级	日等效最大操作量 $3.71 \times 10^9 \text{Bq}$ ，属于乙级非密封放射性物质工作场所		
	核医学科	三层核素治疗区	使用核素	^{131}I 甲亢	施工废气、施工噪声、施工废水、	β 射线、 γ 射线、 β 表面沾污、放射
				^{131}I 甲癌		

科	及 用 量	^{177}Lu	日最大操作量 $7.40\text{E}+09\text{Bq}$ ，日等效最大操作量 $7.40\text{E}+08\text{Bq}$	固体废物、生活污水、生活垃圾	性废气、放射性废水、放射性固体废物、生活污水、生活垃圾
	非密封放射性物质工作场所		源库、分装给药室、配药室、甲亢室、隔离病房（ ^{131}I 治疗病房 5 间、 ^{177}Lu 治疗病房 1 间）、放射性废物暂存间及其他配套用房		
	场所等级		日等效最大操作量 $3.74\times 10^9\text{Bq}$ ，属于乙级非密封放射性物质工作场所		
辅助工程	控制室、公共卫生间、水冷机房、设备间、清洁间、洁具间、空调机房、排风机房、水泵房、配套候诊区、诊室和护士站等				废水、固废
公用工程	市政水网、市政电网、配电系统、废水处理站、暖通系统				/
办公及生活设施	主任办公室、医生办公室、值班室、沐浴间、示教室、卫生间、更衣室等				生活垃圾、生活污水
环保设施	<p>废水处理设施：放疗中心的医患人员等产生的非放射性废水依托建设单位污水处理站进行处置；在 1#医疗综合楼东侧外新建 2 组地埋槽式衰变池，短半衰期衰变池收集负二层核素制药区和负一层核素诊断区内产生的含核素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O、$^{99\text{m}}\text{Tc}$、^{64}Cu、^{68}Ga、^{89}Zr 的放射性废水，长半衰期衰变池收集二层核素治疗区、三层核素治疗区内产生的含核素 ^{90}Y 微球、^{188}Re、^{177}Lu、^{131}I 的放射性废水。</p> <p>固体废物处理设施：在二层核素治疗区设置了专用污物暂存间，用于介入手术室产生的非放射性医疗废物的暂存；在核医学各场所内放射性固体废物产生点放置放射性废物暂存桶，并在各楼层分别设置放射性废物暂存间及放射性废物衰变桶/箱；含α核素放射性废物经暂存衰变超过所含核素最长半衰期的 10 倍，经监测后委托有资质的单位处置；核医学制药区产生的废靶材经收集、整备后，交由有资质的单位回收；各场所所含其余核素放射性固体废物经暂存超过 HJ1188 规定的时间，经监测达到清洁解控水平后，作为医疗废物经核素污梯转移到负二层医疗废物暂存间内由有资质的单位收运处置。</p> <p>废气处理设施：在放疗中心内设置了专用通排风系统，1#直线加速器机房、2#直线加速器机房设计排风量均为 $1200\text{m}^3/\text{h}$，每小时排风次数大于 4 次；在核医学科各楼层的各场所及衰变池区域分别设计了通排风系统，场所内排风量大于新风风量，各场所内产生的放射性废气经活性炭过滤装置处理后高于屋顶排放；在密闭设备（合成分装柜、通风橱、手套箱、自动分装柜等）设计了专用排风系统，在密闭操作设备顶壁内侧拟设高效过滤装置，核素操作产生的放射性废气经高效过滤装置过滤后，在排风井内合管后，经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放；回旋加速器自屏蔽体内放射性废气经管道引出后，经活性炭过滤装置处理后，与放化实验室内密闭设备内（顶壁内侧拟设高效过滤装置）放射性废气管道合管后，经排风井引至屋顶排放。</p>				/
<p>（三）本项目主要原辅材料及能耗情况</p> <p>本项目主要原辅材料及能耗情况见表 1-6。</p>					

表1-6 主要原辅材料及能耗情况表

名称		使用量	来源	用途
主要原辅材料	^{131}I	年使用量为 $5.56 \times 10^{12}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
		年使用量为 $3.70 \times 10^{11}\text{Bq}$	外购	甲亢治疗
		年使用量为 $1.85 \times 10^9\text{Bq}$	外购	甲吸检测
	^{18}F	年使用量为 $1.39 \times 10^{13}\text{Bq}$	回旋加速器生产	PET 肿瘤显像
	^{11}C	年使用量为 $9.25 \times 10^{12}\text{Bq}$	回旋加速器生产	PET 肿瘤显像
	^{13}N	年使用量为 $9.25 \times 10^{12}\text{Bq}$	回旋加速器生产	PET 肿瘤显像
	^{15}O	年使用量为 $5.55 \times 10^{11}\text{Bq}$	回旋加速器生产	PET 肿瘤显像
	^{64}Cu	年使用量为 $6.94 \times 10^{11}\text{Bq}$	回旋加速器生产	PET 肿瘤显像
	^{89}Zr	年使用量为 $3.33 \times 10^{11}\text{Bq}$	回旋加速器生产	PET 肿瘤显像
	^{68}Ga	年使用量为 $1.94 \times 10^{11}\text{Bq}$	^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 淋洗	PET 肿瘤显像
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	年使用量为 $8.33 \times 10^{12}\text{Bq}$	^{68}Ge (^{68}Ga) 淋洗	SPECT 骨、泌尿、内分泌、心脏、肺等器官显像等
	^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)	拟购最大规格 1Ci, 每年最多使用 50 柱	外购	制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$
	^{68}Ge (^{68}Ga)	拟购最大规格 30mCi, 每年最多 30 柱	外购	制备 ^{68}Ga
	^{89}Sr	年使用量为 $1.48 \times 10^{11}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{153}Sm	年使用量为 $1.48 \times 10^{12}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{186}Re	年使用量为 $1.11 \times 10^{12}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{223}Ra	年使用量为 $7.40 \times 10^9\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{225}Ac	年使用量为 $7.40 \times 10^9\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{125}I 粒子源	年使用量为 $2.36 \times 10^{12}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{103}Pd 种子源	年使用量为 $2.36 \times 10^{12}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{90}Y 微球	年使用量为 $6.00 \times 10^{11}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{188}Re	年使用量为 $2.22 \times 10^{12}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{177}Lu	年使用量为 $1.48 \times 10^{12}\text{Bq}$	外购	肿瘤治疗
	^{90}Sr - ^{90}Y	$7.40 \times 10^9\text{Bq/枚} \times 2$ 枚	外购	敷贴治疗
	^{22}Na	$3.70 \times 10^8 \times 1$ 枚	外购	PET-CT 和 PET-MRI 校准
	^{68}Ge	$9.25 \times 10^7\text{Bq/枚} \times 1$ 枚 $+4.60 \times 10^7\text{Bq/枚} \times 2$ 枚	外购	PET-CT 和 PET-MRI 校准
	造影剂	140L	外购	碘海醇、碘克沙醇等
能源	煤 (t)	-	-	-
	电(度)	5×10^5	市政电网	-
	气 (Nm^3)	-	-	-
水量	地表水 (m^3)	1000	-	-

	地下水	-	-	-
--	-----	---	---	---

(四) 本项目所涉及的射线装置

表1-7 本项目新增射线装置清单

序号	装置名称	数量	型号	设备参数	管理类别	使用场所	生产厂家	备注
1	直线加速器	2 台	待定	X 射线最大能量 10MV, 1m 处最高剂量率为 22Gy/min; 电子射线最大能量 20MeV, 1m 处最高剂量率 22Gy/min 图像引导(CBCT)模块最大管电压为 150kV, 最大管电流为 500mA	II类	负二层放疗中心直线加速器机房	待定	拟购
2	模拟定位 CT 机	1 台	待定	最大管电压 150kV, 最大管电流 1000mA	III类	负二层放疗中心模拟 CT 室	待定	拟购
3	回旋加速器	1 台	MINItrace Qilin	质子能量为 10MeV, 最大质子束流强度为 70μA	II类	负二层核素生产区回旋加速器机房	GE	拟购
4	PET-CT	1 台	待定	最大管电压 150kV, 最大管电流 1000mA	III类	负一层核素诊断区 PET-CT 室	待定	拟购
5	SPECT/CT	1 台	待定	最大管电压 150kV, 最大管电流 1000mA	III类	负一层核素诊断区 SPECT-CT 室	待定	拟购
6	DSA-CBCT	1 台	待定	DSA 部分: 最大管电压 150kV, 最大管电流 1000mA CBCT 部分: 最大管电压 150kV, 最大管电流 1000mA	II类	二层核素治疗区介入手术室	待定	拟购

(五) 本项目放射源及使用情况一览表

表1-8 本项目涉及放射源特性

放射源种类	活度 (Bq)	放射源类别	放射源数量	半衰期	辐射类型	辐射最大能量	备注
²² Na	3.7×10 ⁸ Bq/枚×1 枚	V类	1 枚	2.60a	β射线、γ射线	$E_{\beta}=0.5457\text{MeV}$ $E_{\gamma}=1.27455\text{MeV}$	放射源活度不能达到要求时, 联系放射源厂家更换放射源
⁶⁸ Ge	9.25×10 ⁷ Bq/枚×1 枚 +4.60×10 ⁷ Bq/枚×2 枚	V类	3 枚	270.8d	β射线、γ射线	$E_{\beta}=1.89\text{MeV}$ $E_{\gamma}=1.08\text{MeV}$	
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	7.40×10 ⁹ Bq/枚×2 枚	V类	2 枚	28.79a	β射线	$E_{\beta}=0.546\text{MeV}$	

(六) 本项目医用核素及使用情况一览表

表1-9 本项目涉及核素特性

序号	使用核素	半衰期	状态	毒性分组	衰变方式	主要射线及能量 (MeV)	周围剂量当量率常数 (裸源) (μSv·m ² /MBq.h)
1	¹⁸ F	109.8min	液态	低毒	EC、β ⁺	β:0.635(97%)、γ:0.511 (194%)	0.143
2	¹¹ C	20.39min	液态	低毒	EC、β ⁺	β:0.9608(99.8%)、γ:0.511 (200%)	0.148

3	¹³ N	9.961min	液态	低毒	β ⁺ 、EC	β:1.190(100%)、γ:0.511 (200%)	0.148
4	¹⁵ O	2.03min	液态	低毒	EC、β ⁺	β:1.723(100%)、γ:0.511 (200%)	0.148
5	⁶⁴ Cu	12.7h	液态	低毒	β ⁺ 、β ⁻ 、EC	β ⁺ :0.657 γ:0.511、1.346	0.029
6	⁶⁸ Ge	270.8d	固态	中毒	β ⁺ 、EC	β ⁺ : 1.89、γ:1.08	/
7	⁶⁸ Ga	68.3min	液态	低毒	EC、β ⁺	β:1.8991(84%)、γ:1.0774(3.0%)、0.511(178%)	0.134
8	⁸⁹ Zr	78.4h	液态	中毒	EC、β ⁺	β:0.396、γ:0.909、0.511	0.20
9	⁸⁹ Sr	50.53d	液态	中毒	β ⁻	β:1.488(m~100%)	/
10	⁹⁰ Y	2.67d	液态	中毒	β ⁻	β:2.288(~100%)	/
11	⁹⁹ Mo	2.75d	固态	中毒	β ⁻	β:1.214(84%)、0.450(14%) γ:0.7394(12.6%)、0.18107(49.9%)	0.088
12	^{99m} Tc	6.02h	液态	低毒	IT、β ⁻	γ:0.1405(89.0%)、0.1426、0.3224	0.0303
13	¹⁰³ Pd 种子源	16.96d	固态	中毒	EC	γ:0.35745(0.022%)、0.03973 (309)、0.49708 (18)、0.247(94%)、X: 20.2161	0.00021
14	¹²⁵ I 粒子源	59.4d	固态	中毒	EC	γ:0.03548(6.7%)、X:27.47	0.0165
15	¹³¹ I	8.02d	液态	中毒	β ⁻	β:0.6065(86%)、0.336(13%)、γ:0.2843 (7.46%)、0.3645(81%)、0.6369(8.94%)	0.0595
16	¹⁵³ Sm	46.44h	液态	中毒	β ⁻	β:0.810(20%)、0.710(49%)、0.640(30%)、γ:0.06967 (40.4)、0.09743 (43) X: 41.54	0.072
17	¹⁷⁷ Lu	6.73d	液态	中毒	β ⁻	β:0.4968 (90%)、0.175 (6.7%) γ:0.2084(11.0%)、X: 55.79	0.00517
18	¹⁸⁶ Re	90.64h	液态	中毒	β ⁻	β:1.0715(76.6)、0.9335(23.4)、γ:0.13716 (9.3%, 246)、0.12261 (77.6)、X: 61.140	0.0065
19	¹⁸⁸ Re	16.98h	液态	中毒	β ⁻	β:2.218(74%)、1.973(24%)、γ:0.15504 (15.2%, 930)、0.6330 (15.7)、X63.0	0.0188
20	²²³ Ra	11.43d	液态	极毒	α	α:5.716(53.7%)、5.6076(26%)、5.7478(9.1%)、γ:0.1543 (5.58)、0.2693 (14%, 13.6)	0.048
21	²²⁵ Ac	10.0d	液态	极毒	α	α:5.830(50.65%)、5.794(24.3%)、5.732 (10.1%)、γ:0.0998 (1.7%)、0.1501 (0.71%)	0.00606

表1-10 本项目使用核素诊疗用药情况

场所及诊疗项目		使用核素	年最大诊疗人数	日最大诊疗人数	单人次最大用量 Bq (mCi)	日最大使用量 (Bq)	年用量 (Bq)	给药方式
负一层核素诊断区	PET-CT、PET-MRI	¹⁸ F	7500	30	3.70×10 ⁸ Bq (10mCi)	1.11E+10	2.78E+12	静脉注射
		¹¹ C	500	2	3.70×10 ⁸ Bq (10mCi)	7.40E+08	1.85E+11	静脉注射
		¹³ N	500	2	3.70×10 ⁸ Bq (10mCi)	7.40E+08	1.85E+11	静脉注射
		¹⁵ O	500	2	3.70×10 ⁸ Bq (10mCi)	7.40E+08	1.85E+11	静脉注射
		⁶⁴ Cu	500	2	2.22×10 ⁸ Bq (6mCi)	4.44E+08	1.11E+11	静脉注射

二层核素治疗区		⁸⁹ Zr	500	2	3.7×10 ⁸ Bq (10mCi)	7.40E+08	1.85E+11	静脉注射
		⁶⁸ Ga	500	2	1.85×10 ⁸ Bq (5mCi)	3.70E+08	9.25E+10	静脉注射
	SPECT-CT	^{99m} Tc	5000	20	7.40×10 ⁸ Bq (20mCi)	1.48E+10	3.70E+12	静脉注射
	门诊检查	¹³¹ I 甲吸	2500	10	3.70×10 ⁵ Bq (0.01mCi)	3.70E+06	9.25E+08	口服
	门诊治疗	⁸⁹ Sr	500	2	1.48×10 ⁸ Bq (4mCi)	2.96E+08	7.40E+10	静脉注射
		¹⁵³ Sm	500	2	1.48×10 ⁹ Bq (40mCi)	2.96E+09	7.40E+11	静脉注射
		¹⁸⁶ Re	500	2	1.11×10 ⁹ Bq (30mCi)	2.22E+09	5.55E+11	静脉注射
		²²³ Ra	500	2	7.40×10 ⁶ Bq (0.2mCi)	1.48E+07	3.70E+09	静脉注射
		²²⁵ Ac	500	2	7.40×10 ⁶ Bq (0.2mCi)	1.48E+07	3.70E+09	静脉注射
	住院治疗	^{99m} Tc	500	2	1.85×10 ⁹ Bq (50mCi)	3.70E+09	9.25E+11	介入注射
		¹²⁵ I 粒子源	400	2	2.96×10 ⁹ Bq (80mCi)	5.92E+09	1.18E+12	籽源植入
		¹⁰³ Pd 种子源	400	2	2.96×10 ⁹ Bq (80mCi)	5.92E+09	1.18E+12	籽源植入
		⁹⁰ Y 微球	100	2	3.00×10 ⁹ Bq (81.1mCi)	6.00E+09	3.00E+11	介入注射
		¹⁸⁸ Re	100	2	1.11×10 ¹⁰ Bq (300mCi)	2.22E+10	1.11E+12	介入注射
三层核素治疗区	非住院治疗	¹³¹ I 甲亢	500	5	3.70×10 ⁸ Bq (10mCi)	1.85E+09	1.85E+11	口服
	住院治疗	¹³¹ I 甲癌	500	5	5.55×10 ⁹ Bq (150mCi)	2.78E+10	2.78E+12	口服
		¹⁷⁷ Lu	100	1	7.40×10 ⁹ Bq (200mCi)	7.40E+09	7.40E+11	静脉滴注

表1-11 核医学工作场所内制药量及参数取值

同位素药物来源	核素名称	日最多生产次数	计划日最大操作量(Bq)	综合损失倍数	日最大制药量 (Bq)	年最大制药量 (Bq)
负二层核医学制药区回旋加速器打靶生产	¹⁸ F	2	1.11E+10	5	5.55E+10	1.39E+13
	¹¹ C	2	7.40E+08	20	1.48E+10	3.70E+12
	¹³ N	2	7.40E+08	20	1.48E+10	3.70E+12
	¹⁵ O	2	7.40E+08	40	2.96E+10	7.40E+12
	⁶⁴ Cu	2	4.44E+08	5	2.22E+09	5.55E+11
	⁸⁹ Zr	2	7.40E+08	2	1.48E+09	3.70E+11
负一层核医学科诊断区淋洗制药	^{99m} Tc	⁹⁹ Mo (^{99m} Tc) 淋洗制药 (拟购最大规格 3.7E+10Bq (1Ci) , 每年最多 50 柱)			3.33E+10	8.33E+12
负一层核医学科诊断区淋洗制药	⁶⁸ Ga	⁶⁸ Ge (⁶⁸ Ga) 淋洗制药 (拟购最大规格 1.11E+09Bq (30mCi) , 每年最多 30 柱)			7.77E+08	1.94E+11

备注：①药物的合成效率 ¹⁸F 约 50%，其它核素在 10%-30%之间，不同的放射性同位素药物合成效率和衰变会造成不同的损失，针对不同的同位素药物保守地考虑了综合损耗倍数；②⁹⁹Mo (^{99m}Tc) 淋洗制药保守按照淋洗效率按 90%进行考虑；③⁶⁸Ge (⁶⁸Ga) 淋洗效率按照 70%进行考虑。

(七) 本项目使用核素及工作场所分级

根据中华人民共和国原环境保护部办公厅文件《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 3 个特点的放射性药物使用场所，应当作为一个单独场所进行日等效最大操作量核算：A、有相对独立、明确的监督区和控制区划分；B、工艺流程连续完整；C、有相对独立的辐射防护措施。

根据本项目布局特点，医院拟在 1#医疗综合楼负二层设核医学制药区，负一层北侧设核素诊断区，二层、三层北侧设核素治疗区，各楼层核医学工作场所均为相对独立、有明确的监督区和控制区划分，各个非密封放射性物质工作场所工艺流程连续完整，且各场所有相对独立的辐射防护措施，辐射工作人员也不存在交叉情况。因此，本次将负二层设核医学制药区、负一层核素诊断区、二层核素治疗区、三层核素治疗区分别作为一个非密封放射性物质工作场所进行评价。

依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 C，非密封放射性物质工作场所的分级判据如表 1-12。

表1-12 非密封放射性物质工作场所分级表

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

放射性同位素的日等效最大操作量根据其毒性组别、操作方式、放射源状态和实际日等效最大操作量确定。毒性组别和操作方式与放射源状态修正因子见表 1-13、表 1-14。

表1-13 放射性药物毒性组别修正因子表

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1-14 放射性药物操作方式修正因子表

操作方式	放射性物质状态			
	表面污染水平 较低的固体	液体、溶液、悬 浮液	表面有污染 的固体	气体、蒸汽、粉末、压 力很高的液体、固体
源的贮存	1000	100	10	1
很简单操作	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

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），非密封放射性物质工作场所应按放射性药物日等效最大操作量的大小分为甲、乙、丙三级，日等效最大操作量计算公式为：

日等效最大操作量=实际日操作量×核素毒性因子÷操作方式的修正因子

因此，根据本项目核医学科使用放射性同位素的毒性组别、操作方式和日等效最大

操作量，确定本项目核医学科工作场所级别，具体见表 1-15。

表1-15 本项目核医学科非密封放射性物质工作场所分级表

使用核素名称	用途	年操作量(Bq)	日最大操作量(Bq)	毒性组别	毒性修正因子	操作方式	操作修正因子	日等效最大操作量(Bq)	综合日等效最大操作量(Bq)	工作场所级别
负二层核医学制药区										
¹⁸ F	生产放射性药物、质控,供核医学科诊断用	1.39E+13	5.55E+10	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+08	1.89E+09	乙级
¹¹ C		9.25E+12	3.70E+10	低毒	0.01	简单操作	1	3.70E+08		
¹³ N		9.25E+12	3.70E+10	低毒	0.01	简单操作	1	3.70E+08		
¹⁵ O		5.55E+11	2.22E+09	低毒	0.01	简单操作	1	2.22E+07		
⁶⁴ Cu		6.94E+11	2.78E+09	低毒	0.01	简单操作	1	2.78E+07		
⁸⁹ Zr		3.33E+12	1.33E+10	中毒	0.1	简单操作	1	1.33E+09		
负一层核素诊断区										
¹⁸ F	PET 诊断项目	2.78E+12	1.11E+10	低毒	0.01	很简单操作	10	1.11E+07	4.64E+08	乙级
¹¹ C		1.85E+11	7.40E+08	低毒	0.01	很简单操作	10	7.40E+05		
¹³ N		1.85E+11	7.40E+08	低毒	0.01	很简单操作	10	7.40E+05		
¹⁵ O		1.85E+11	7.40E+08	低毒	0.01	很简单操作	10	7.40E+05		
⁶⁴ Cu		1.11E+11	4.44E+08	低毒	0.01	简单操作	1	4.44E+06		
⁸⁹ Zr		1.85E+11	7.40E+08	中毒	0.1	简单操作	1	7.40E+07		
⁶⁸ Ga	PET 诊断淋洗、显像	1.94E+11	7.77E+08	低毒	0.01	简单操作	1	7.77E+06		
⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc 发生器	淋洗制药	1.85E+12	3.70E+10	中毒	0.1	源的贮存	100	3.70E+07		
⁶⁸ Ge/ ⁶⁸ Ga 发生器		3.33E+10	1.11E+09	中毒	0.1	源的贮存	100	1.11E+06		
^{99m} Tc	SPECT 诊断核素淋洗、显像	8.33E+12	3.33E+10	低毒	0.01	简单操作	1	3.33E+08		
二层核素治疗区										
¹³¹ I 甲吸	门诊检查	9.25E+08	3.70E+06	中毒	0.1	简单操作	1	3.70E+05	3.71E+09	乙级
¹³¹ I 甲吸		9.25E+08	3.70E+06	中毒	0.1	源的贮存	100	3.70E+03		
⁸⁹ Sr	非住院治疗	7.40E+10	2.96E+08	中毒	0.1	简单操作	1	2.96E+07		
⁸⁹ Sr		7.40E+10	2.96E+08	中毒	0.1	源的贮存	100	2.96E+05		
¹⁵³ Sm		7.40E+11	2.96E+09	中毒	0.1	简单操作	1	2.96E+08		
¹⁵³ Sm		7.40E+11	2.96E+09	中毒	0.1	源的贮存	100	2.96E+06		
¹⁸⁶ Re		5.55E+11	2.22E+09	中毒	0.1	简单操作	1	2.22E+08		
¹⁸⁶ Re		5.55E+11	2.22E+09	中毒	0.1	源的贮存	100	2.22E+06		
²²³ Ra		3.70E+09	1.48E+07	极毒	10	简单操作	1	1.48E+08		
²²³ Ra		3.70E+09	1.48E+07	极毒	10	源的贮存	100	1.48E+06		
²²⁵ Ac		3.70E+09	1.48E+07	极毒	10	简单操作	1	1.48E+08		
²²⁵ Ac		3.70E+09	1.48E+07	极毒	10	源的贮存	100	1.48E+06		
^{99m} Tc	住院治疗	1.85E+10	3.70E+08	低毒	0.01	很简单操作	10	3.70E+05		

^{125}I 粒子源		1.18E+12	5.92E+09	中毒	0.1	很简单操作	100	5.92E+06		
^{125}I 粒子源		1.18E+12	5.92E+09	中毒	0.1	源的贮存	1000	5.92E+05		
^{103}Pd 种子源		1.18E+12	5.92E+09	中毒	0.1	很简单操作	100	5.92E+06		
^{103}Pd 种子源		1.18E+12	5.92E+09	中毒	0.1	源的贮存	1000	5.92E+05		
^{90}Y 微球		3.00E+11	6.00E+09	中毒	0.1	简单操作	1	6.00E+08		
^{90}Y 微球		3.00E+11	6.00E+09	中毒	0.1	源的贮存	100	6.00E+06		
^{188}Re		1.11E+12	2.22E+10	中毒	0.1	简单操作	1	2.22E+09		
^{188}Re		1.11E+12	2.22E+10	中毒	0.1	源的贮存	100	2.22E+07		

三层核素治疗区

^{131}I 甲亢	非住院治	1.85E+11	1.85E+09	中毒	0.1	简单操作	1	1.85E+08		
^{131}I 甲亢	疗	1.85E+11	1.85E+09	中毒	0.1	源的贮存	100	1.85E+06		
^{131}I 甲癌	甲癌治疗	2.78E+12	2.78E+10	中毒	0.1	简单操作	1	2.78E+09	3.74E+09	乙级
^{131}I 甲癌		2.78E+12	2.78E+10	中毒	0.1	源的贮存	100	2.78E+07		
^{177}Lu	前列腺癌	7.40E+11	7.40E+09	中毒	0.1	简单操作	1	7.40E+08		
^{177}Lu	治疗	7.40E+11	7.40E+09	中毒	0.1	源的贮存	100	7.40E+06		

注：①核医学制药区回旋加速器打靶每天最多打靶生产 2 种放射性同位素，选取日等效最大操作量最大的两种核素之和进行定级；②核素诊断区内每天最多使用 4 种放射性同位素显像诊断，保守叠加发生器最大淋洗制备核素日等效最大操作量进行定级；③根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）表 A.2，发生器淋洗母体（液态）操作方式界定为贮存、子体（液态）操作方式界定为简单操作；④《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）表 A.2，医疗机构使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{18}F （液态）为很简单操作、操作方式修正因子为 10；核素治疗为简单操作，操作方式修正因子为 1。

根据上表可知，本项目涉及的 4 个非密封放射性物质工作场所均为乙级非密封放射性物质工作场所。

（八）本项目外环境、选址及实践正当、兼容性分析

1、本项目外环境

本项目位于成都市锦江区国维街与泰昌路交叉口西北侧拟建 1#医疗综合楼（11F/-2F，高约 55m）。在本项目辐射工作场所边界外的评价范围内，北侧约 27m~50m 范围为拟建 2#医疗综合楼；南侧约 46m 处为已建泰昌路；东侧约 22~50m 处为已建国维街。

本项目辐射工作场所均位于医院用地范围内，不新增占地。根据外环境分析，医院周边以城市绿地、商业设施为主，距离周边居民住宅较远，周边无自然保护区、保护文物、风景名胜区等特殊环境保护目标。本项目选址所在地交通便利，无环境制约因素。

2、本项目选址合理性分析

（1）医院环评及用地手续履行情况

本项目所在 1#医疗综合楼及相关配套设施已在《林家坝 TOD 片区医疗用地项目二

期环境影响报告表》中进行了环境影响评价。本项目所在地已取得了由成都市锦江区规划和自然资源局核发的《建设项目用地预审与选址意见书》（用字第 51010***号），符合国土空间规划。本项目仅为其配套建设项目，不新增用地。因此，本项目的建设符合规划和选址的要求。

（2）屏蔽设施

本项目各辐射工作场所有良好的实体屏蔽设施和防护措施，产生的辐射经屏蔽和防护后对辐射工作人员和公众的照射剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的剂量限值要求，并满足报告表确定的剂量管理约束值的要求。

（3）放疗中心选址与“HJ 1198-2021”符合性分析

表1-16 本项目放疗中心选址符合性分析

《放射治疗辐射安全与防护要求》 (HJ1198-2021)		实施情况	是否符合
选址	5.1.1 放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	本项目在选址时充分考虑了项目对周围环境的影响，未设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	符合要求
	5.1.2 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，尽量避开儿科病房、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集中在负二层（底层的东、北角），周围没有儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，也无流动性大的商业活动区域，放射治疗和辅助工作用房为相对独立的区域，控制台与治疗设备实行了隔室操作。	符合要求

（4）核医学选址与“HJ1188-2021”选址要求符合性分析

表1-17 本项目核医学科选址符合性分析

《核医学辐射防护与安全要求》 (HJ1188-2021)		实施情况	是否符合
选址	5.1.1 核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层，设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道	本项目核医学科工作场所集中在 1#医疗综合楼内。其中，核医学制药区集中在大楼负二层西北侧，核素诊断区集中在大楼负一层西北侧，二层和三层核素治疗区均集中在大楼北侧，每个场所均独立布置。根据平面布置设计，本项目非密封放射性物质工作场所均设置有独立的人员、物流通道，无关人员禁止入内。	符合要求
	5.1.2 核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并应与非放射性工作场所有明确的分界隔离	本项目核医学科不毗邻产科、儿科和食堂等部门，同时避开了医院内人流量较大的住院区域、二层核素治疗区域，同时与周围非辐射工作场所有明确的分界隔离，并有实体屏蔽措施。	符合要求
	5.1.3 核医学工作场所排风口的的位置尽可能远离周边高层建筑	本项目核医学科各区域设有专用排风系统，在核医学科排风管道末端拟设活性炭过滤装置，回旋加速器机房、通风橱、手套箱、热室柜等密闭设备设立了独立排风系统，排风口位于 1#医疗综合楼塔楼楼顶，远离了周围其余高层建筑，对周围环境影响较小。	符合要求

（5）与周边环境的相容性分析

项目产生的生活污水、医疗废水、解控后的放射性废水依托建设单位新建的污水处理站处理后排入市政污水管网，核医学科产生的放射性废水利用新建衰变池衰变后排入建设单位污水处理站处理，不会对当地水质产生明显影响；核医学科产生的放射性气体经活性炭或其他过滤器处理后高空排放，经计算对人员的剂量贡献值很小，不会导致人员受到的辐射剂量超过管理限值；项目产生的放射性废物收集暂存于放射性废物暂存间后，定期交由有资质的医疗废物处置单位收集；项目产生的生活垃圾暂存于垃圾收集间后交由市政环卫清运；本项目产噪设备为风机，经采取降噪措施后噪声影响不大，不会改变区域声环境功能规划；本项目运行阶段产生的电离辐射经有效屏蔽后对周围环境影响较小；同时本项目建设不占用消防通道和内部公共设施，与项目所在楼内部布置及周围环境相容。

（九）实践的正当性

本项目开展是为了对患者进行医学诊疗，在采取了相应的辐射防护措施后，项目所致的辐射危害可得到有效控制，项目实施的利益大于代价，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的辐射防护“实践的正当性”原则。

（十）劳动定员及工作制度

工作制度：本项目辐射工作人员年工作天数为 250 天，实行 8 小时工作制。

劳动定员：本项目拟配置辐射工作人员共计 58 人，均为新增辐射工作人员，各工作人员定岗定责，工作类别不交叉，具体如表 1-18 所示。

表1-18 本项目工作人员构成表

场所	设备/项目	配备人员构成	配备人数
负二层核医学制药区	回旋加速器制药区	化学师（制药工作人员）3 人、 物理师 2 人 物料接收员 1 名	6
	放化实验室		
	接收室		
负二层放疗中心	直线加速器	医生 3、技师 2 人、护士 3 名、 物理师 1 名	9
	模拟定位	医生 1 名，技师 1 名	2
负一层核素诊断区	淋洗、质控、分装、注射	医生 3 人、护士 3 人	6
	扫描、摆位	技师 3 人、护士 4 人	7
二层核素治疗区	¹³¹ I 甲吸检测	医生 1 人、护士 1 人	2
	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y 敷贴治疗	医生 1 人、护士 1 人	2
	分装、标记、给药/注射、 ⁹⁰ Y 微球制备	医生 2 人、护士 4 人	6

	粒子源消毒、活度检测	同位素介入治疗医生 4 人、常规介入治疗医生 2 名、护士 4 人、技师 2 人	12
	放射性同位素介入手术治疗		
	常规介入治疗		
三层核素治疗区	¹³¹ I 甲亢治疗	医生 3 人、护士 3 人	6
	¹³¹ I 甲癌治疗		
	¹⁷⁷ Lu 前列腺癌治疗		
合计		/	58

四、原有核技术利用情况

医院为新筹建的法人机构，目前医院正在筹建中，不存在原有核技术利用情况。

五、与本项目有关的原有污染情况及主要环境问题

1、本项目依托的环保设施

本项目拟建于林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期 1#医疗综合楼内，本项目依托林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期建设项目新建的垃圾房和污水处理站，分别用于本项目产生的生活垃圾的暂存，生活污水、医疗废水及解控后的放射性废水的处理。林家坝 TOD 片区医疗用地项目包含本项目专科医院、垃圾房、污水处理站等建设内容，与本项目同时设计、同时施工、同时投入使用。

2、原有环境遗留问题

医院目前无任何辐射源使用情况，1#医疗综合楼及配套设施已经进行了环境影响评价，目前暂未开工建设。

因此，本项目无原有污染环境遗留问题。

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	²² Na	3.70×10 ⁸ Bq/枚×1 枚	V类	使用	用于 PET-CT 和 PET-MRI 校准	负一层核医学科核素诊断区	负一层核医学科核素诊断区校准源室	本次拟购
2	⁶⁸ Ge	9.25×10 ⁷ Bq/枚×1 枚+4.60×10 ⁷ Bq/枚×2 枚	V类	使用	用于 PET-CT 和 PET-MRI 校准	负一层核医学科核素诊断区	负一层核医学科核素诊断区校准源室	
3	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	7.40×10 ⁹ Bq/枚×2 枚	V类	使用	敷贴治疗	二层核医学科核素治疗区敷贴室	二层核素治疗区敷贴室	
/	/	/	/	/	/	/	/	/

注：放射源包括放射性种子源，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	备注
1	¹⁸ F	液态、低毒 T _{1/2} =109.8min	生产	5.55E+10	5.55E+08	1.39E+13	显像诊断	简单操作	负二层核医学制药区	按需生产，当日使用完毕	本项目使用
2	¹¹ C	液态、低毒 T _{1/2} =20.39min	生产	3.70E+10	3.70E+08	9.25E+12	显像诊断	简单操作		按需生产，当日使用完毕	
3	¹³ N	液态、低毒 T _{1/2} =9.961min	生产	3.70E+10	3.70E+08	9.25E+12	显像诊断	简单操作		按需生产，当日使用完毕	
4	¹⁵ O	液态、低毒 T _{1/2} =2.03min	生产	2.22E+09	2.22E+07	5.55E+11	显像诊断	简单操作		按需生产，当日使用完毕	
5	⁶⁴ Cu	液态、低毒 T _{1/2} =12.7h	生产	2.78E+09	2.78E+07	6.94E+11	显像诊断	简单操作		按需生产，当日使用完毕	
7	⁸⁹ Zr	液态、中毒	生产	1.33E+10	1.33E+09	3.33E+12	显像诊断	简单操作		按需生产，当日使用完毕	

		T _{1/2} =78.4h									
8	¹⁸ F	液态、低毒 T _{1/2} =109.8min	使用	1.11E+10	1.11E+07	2.78E+12	显像诊断	很简单操作	负一层 核素诊 断区	当日使用完毕	本项目 使用
9	¹¹ C	液态、低毒 T _{1/2} =20.39min	使用	7.40E+08	7.40E+05	1.85E+11	显像诊断	很简单操作		当日使用完毕	
10	¹³ N	液态、低毒 T _{1/2} =9.961min	使用	7.40E+08	7.40E+05	1.85E+11	显像诊断	很简单操作		当日使用完毕	
11	¹⁵ O	液态、低毒 T _{1/2} =2.03min	使用	7.40E+08	7.40E+05	1.85E+11	显像诊断	很简单操作		当日使用完毕	
12	⁶⁴ Cu	液态、低毒 T _{1/2} =12.7h	使用	4.44E+08	4.44E+06	1.11E+11	显像诊断	很简单操作		当日使用完毕	
13	⁸⁹ Zr	液态、中毒 T _{1/2} =78.4h	使用	7.40E+08	7.40E+07	1.85E+11	显像诊断	简单操作		当日使用完毕	本项目 使用
14	⁶⁸ Ga	液态、低毒 T _{1/2} =109.8min	使用	7.77E+08	7.77E+06	1.94E+11	显像诊断	简单操作		当日使用完毕	
15	^{99m} Mo	液态、中毒 T _{1/2} =2.75d	使用	3.70E+10	3.70E+07	1.85E+12	淋洗 ^{99m} Tc	源的贮存		负一层分装注射室、源库	
16	⁶⁸ Ge	液态、中毒 T _{1/2} =270.8d	使用	1.11E+09	1.11E+06	3.33E+10	淋洗 ⁶⁸ Ga	源的贮存		负一层分装注射室、源库	
17	^{99m} Tc	液态、低毒 T _{1/2} =6.02h	使用	3.33E+10	3.33E+08	8.33E+12	显像诊断	简单操作		当日使用完毕	
18	¹³¹ I _{甲吸}	液态、中毒 T _{1/2} =8.02d	使用	3.70E+06	3.70E+05	9.25E+08	甲吸检查	简单操作	二层核 素治疗 区	存放在甲吸室	本项目 使用
19	¹³¹ I _{甲吸}	液态、中毒 T _{1/2} =8.02d	使用	3.70E+06	3.70E+03	9.25E+08	甲吸检查	源的贮存		存放在甲吸室	
20	⁸⁹ Sr	液态、中毒 T _{1/2} =50.53d	使用	2.96E+08	2.96E+07	7.40E+10	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	
21	⁸⁹ Sr	液态、中毒 T _{1/2} =50.53d	使用	2.96E+08	2.96E+05	7.40E+10	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
22	¹⁵³ Sm	液态、中毒 T _{1/2} =46.44h	使用	2.96E+09	2.96E+08	7.40E+11	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	

23	^{153}Sm	液态、中毒 $T_{1/2}=46.44\text{h}$	使用	2.96E+09	2.96E+06	7.40E+11	肿瘤治疗	源的贮存	二层核 素治疗 区	存放在源库	本项目 使用
24	^{186}Re	液态、中毒 $T_{1/2}=90.64\text{h}$	使用	2.22E+09	2.22E+08	5.55E+11	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	
25	^{186}Re	液态、中毒 $T_{1/2}=90.64\text{h}$	使用	2.22E+09	2.22E+06	5.55E+11	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
26	^{223}Ra	液态、极毒 $T_{1/2}=11.43\text{d}$	使用	1.48E+07	1.48E+08	3.70E+09	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	
27	^{223}Ra	液态、极毒 $T_{1/2}=11.43\text{d}$	使用	1.48E+07	1.48E+06	3.70E+09	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
28	^{225}Ac	液态、极毒 $T_{1/2}=10.0\text{d}$	使用	1.48E+07	1.48E+08	3.70E+09	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	
29	^{225}Ac	液态、极毒 $T_{1/2}=10.0\text{d}$	使用	1.48E+07	1.48E+06	3.70E+09	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
30	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	液态、低毒 $T_{1/2}=6.02\text{h}$	使用	3.70E+08	3.70E+05	1.85E+10	肿瘤治疗	很简单操作		存放在源库	
31	^{125}I 粒子源	固态、中毒 $T_{1/2}=59.4\text{d}$	使用	5.92E+09	5.92E+06	1.18E+12	肿瘤治疗	很简单操作		存放在源库	
32	^{125}I 粒子源	固态、中毒 $T_{1/2}=59.4\text{d}$	使用	5.92E+09	5.92E+05	1.18E+12	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
33	^{103}Pd 种子源	固态、中毒 $T_{1/2}=16.96\text{d}$	使用	5.92E+09	5.92E+06	1.18E+12	肿瘤治疗	很简单操作		存放在源库	
34	^{103}Pd 种子源	固态、中毒 $T_{1/2}=16.96\text{d}$	使用	5.92E+09	5.92E+05	1.18E+12	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
35	^{90}Y 微球	液态、中毒 $T_{1/2}=2.67\text{d}$	使用	6.00E+09	6.00E+08	3.00E+11	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	
36	^{90}Y 微球	液态、中毒 $T_{1/2}=2.67\text{d}$	使用	6.00E+09	6.00E+06	3.00E+11	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
37	^{188}Re	液态、中毒 $T_{1/2}=16.98\text{h}$	使用	2.22E+10	2.22E+09	1.11E+12	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	

38	^{188}Re	液态、中毒 $T_{1/2}=16.98\text{h}$	使用	2.22E+10	2.22E+07	1.11E+12	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	
39	^{131}I 甲亢	液态、中毒 $T_{1/2}=8.02\text{d}$	使用	1.85E+09	1.85E+08	1.85E+11	甲亢治疗	简单操作	三层核 素治疗 区	存放在源库	本项目 使用
40	^{131}I 甲亢	液态、中毒 $T_{1/2}=8.02\text{d}$	使用	1.85E+09	1.85E+06	1.85E+11	甲亢治疗	源的贮存		存放在源库	
41	^{131}I 甲癌	液态、中毒 $T_{1/2}=8.02\text{d}$	使用	2.78E+10	2.78E+09	2.78E+12	甲癌治疗	简单操作		存放在源库	
42	^{131}I 甲癌	液态、中毒 $T_{1/2}=8.02\text{d}$	使用	2.78E+10	2.78E+07	2.78E+12	甲癌治疗	源的贮存		存放在源库	
43	^{177}Lu	液态、中毒 $T_{1/2}=6.73\text{d}$	使用	7.40E+09	7.40E+08	7.40E+11	肿瘤治疗	简单操作		存放在源库	
44	^{177}Lu	液态、中毒 $T_{1/2}=6.73\text{d}$	使用	7.40E+09	7.40E+06	7.40E+11	肿瘤治疗	源的贮存		存放在源库	

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	最大电流 (mA) /剂量率 (Gy/min)	用途	工作场所	备注
1	回旋加速器	II	1	MINItrace Qilin	质子	质子能量为 10MeV	质子束流强度为 70μA	核素制备	负二层回旋加速器机房内	本次拟购
2	医用直线加速器	II	2	待定	电子	最大 X 射线能量 10MV、 最大电子束能量 20MeV	X 射线模式 1m 处剂量率最大为 22Gy/min 电子线模式 1m 处剂量率最大为 22Gy/min	放射治疗	放疗中心负二层 直线加速器机房	本次拟购
						CBCT 图像引导模块： 150kV/500mA				
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(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	150	1000	影像检查与诊断	负一层核医学科核素诊断区 PET-CT 室	本次拟购
2	SPECT-CT	III	1	待定	150	1000	影像检查与诊断	负一层核医学科核素诊断区 SPECT-CT 室	本次拟购
3	DSA-CBCT	II	1	待定	DSA 部分：150	DSA 部分：1000	介入手术及检查	二层核素治疗区介入手术室	本次拟购
					CBCT 部分：150	CBCT 部分：1000			
4	模拟 CT	III	1	待定	150	1000	模拟定位	放疗中心负二层模拟 CT 室	本次拟购
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(三) 中子发生器，包括中子管，但不包括放射性种子源

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
放射性固废：一次性注射器、口罩、手套、废药瓶，擦拭废物、吸水纸、去污用纸、手术服、层析条（正电子、单光子、治疗核素），废 pH 试纸条、废样品瓶、废移液枪头、一次性卫生用品、垫料、住院生活垃圾等	固体	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{68}Ga	/	/	/	小于清洁解控水平	按不同核素和场所分别分类收集，在各层放射性废物暂存间/放射性废物库内暂存衰变超过 33 天，经监测达到清洁解控水平后，作为医疗废物进行处置	交由有资质的单位处理
		^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{90}Y 微球、 ^{188}Re	/	/	/	小于清洁解控水平	二层核素治疗区内产生的放射性废物按照所含核素种类进行分类收集，根据分类在放射性废物暂存间内暂存超过所含核素最长半衰期的 10 倍，经监测达到清洁解控水平后作为医疗废物进行处理	交由有资质的单位处理
		^{223}Ra 、 ^{225}Ac	/	/	/	/	经分类收集、暂存超过所含核素最长半衰期的 10 倍，经监测达到清洁解控水平后，定期交由有资质的单位处置	交由有资质的单位处理
		^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	/	小于清洁解控水平	在放射性废物产生点收集后，及时转移到放射性废物暂存间内暂存衰变超过 180 天，经监测达到清洁解控水平后，作为医疗废物进行处置	交由有资质的单位处理

放射性废水：制药区少量废液、质检废液、含放射性核素卫生间下水、去污废水、应急废水等	液体	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{68}Ga	/	/	约 494m ³ /a	总 $\beta \leq 10\text{Bq/L}$	未开展 ^{89}Zr 核素诊断时产生的放射性废水通过专用管道排至短半期衰变池中暂存超过 30 天后，排入建设单位污水处理站处理；开展 ^{89}Zr 核素诊断时产生的放射性废水通过专用管道排至短半期衰变池中暂存超过 33 天，经监测达到清洁解控水平，经审管部门认可后，排入建设单位污水处理站处理	排放至建设单位污水处理站
		^{90}Y 微球、 ^{188}Re 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	970m ³ /a	总 $\alpha \leq 1\text{Bq/L}$ ， 总 $\beta \leq 10\text{Bq/L}$	放射性废水通过专用管道排至长半期衰变池中暂存超过 180 天后，经监测达到清洁解控水平，经审管部门认可后，排入建设单位污水处理站	排放至建设单位污水处理站
场所内放射性气溶胶：负二层打靶生产过程及场所内产生的气溶胶	气溶胶	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr	/	/	/	/	不暂存	回旋加速器机房内放射性废气由专用管道引出后，经活性炭过滤装置过滤，再与场所内的排风管道并管后，通过排风井引至 1# 医疗综合楼屋顶，采用活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放。
放射性气溶胶：其他场所内放射性药物注射/给药、患者呼吸、放射性废物中核素挥发等过程挥发的气溶胶	气溶胶	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{90}Y 微球、 ^{188}Re	/	/	/	微量	不暂存	由各场所内排风管道收集后，经排风管道引至 1# 医疗综合楼屋顶，采用活性炭过滤装置过滤后高于屋顶排放
		^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	/	微量	不暂存	由场所内排风管道收集后，经排风管道引至 1# 医疗综合楼屋顶，采用除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后高于屋顶排放

放射性气溶胶：密闭容器（合成分装柜、手套箱、自动分装柜等）内放射性药物淋洗、分装、制备等过程挥发的 气溶胶	气溶胶	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{90}Y 微球、 ^{188}Re 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	/	微量	不暂存	分别由各场所内密闭容器顶部内侧高效过滤装置过滤，经排风管道收集后，在排风井内合管，再引至1#医疗综合楼屋顶，采用除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后高于屋顶2m 排放
放射性气溶胶：密闭容器（回旋加速器自屏蔽体、放化实验室通风橱等）打靶制药、质控/检等过程挥发的 气溶胶	气溶胶	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr	/	/	/	微量	不暂存	回旋加速器自屏蔽体内放射性废气由专用管道引出后，经活性炭过滤装置过滤，再与放化实验室内密闭容器（内壁顶部设高效过滤装置）放射性废气排风管道合管后，经排风井引至高于屋顶排放。
更换下的过滤装置滤芯	固体	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{68}Ga	/	/	/	小于清洁解控水平	更换后暂存在短半衰期放射性废物暂存间内	暂存衰变，经监测达标后，由有资质单位回收处理
		^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{90}Y 微球、 ^{188}Re 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu			/	小于清洁解控水平	更换后暂存在长半衰期放射性废物暂存间内	
臭氧	气态	/	/	/	/	/	不暂存	放疗中心产生的废气高于地面 3m 处排放
医疗废物	固体	/	/	/	/	/	在医疗废物暂存间暂存	交由有资质单位收运处置
废靶材、废发生器、废放射源等	固体	/	/	/	/	/	经整备后，在放射性废物暂存间内暂存	经监测达到清洁解控水平后，按交由有资质的单位回收处置

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/L，固体为 mg/kg，气态为 mg/m³，年排放总量用 kg。

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

表 6 评价依据

法规文件	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》（2014 年 4 月 24 日修订）；</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》（2018 年 12 月 29 日修订）；</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（2003 年 10 月 1 日实施）；</p> <p>(4) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，2020年4月29日修订；</p> <p>(5) 《建设项目环境保护管理条例》（国务院令第 682 号，2017 年 7 月 16 日修订）；</p> <p>(6) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》，生态环境部 部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日起施行；</p> <p>(8) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院第 449 号令，2019 年 3 月 2 日第二次修订）；</p> <p>(9) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（原环保部第 18 号令，2011 年 5 月 1 日实施）；</p> <p>(10) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日修订）；</p> <p>(11) 《放射性废物安全管理条例》，中华人民共和国国务院令第 612 号，2012 年 3 月 1 日起施行；</p> <p>(12) 《四川省辐射污染防治条例》（四川省十二届人大常委会第二十四次会议第二次全体会议审议通过，2016 年 6 月 1 日起实施）；</p> <p>(13) 《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评（2017）4 号）；</p> <p>(14) 《建设项目环境影响报告表（表）编制监督管理办法》（生态环境部公告 2019 年第 9 号，2019 年 11 月 1 日起施行）。</p>
------	---

技术标准	<p>(1) 《辐射环境保护管理导则核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016);</p> <p>(2) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002);</p> <p>(3) 《环境γ辐射剂量率测定技术规范》(HJ 1157-2021);</p> <p>(4) 《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021);</p> <p>(5) 《表面污染测定第一部分: β发射体($E_{\beta\max}$ > 0.15MeV)和α发射体》(GB/T14056.1-2008);</p> <p>(6) 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2019);</p> <p>(7) 《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);</p> <p>(8) 《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);</p> <p>(9) 《10MeV~20MeV 范围内固定能量强流质子回旋加速器》(GB/T34127-2017);</p> <p>(10) 《粒子加速器辐射安全与防护规定》(GB 5172-2025);</p> <p>(11) 《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020);</p> <p>(12) 《操作非密封源的辐射防护规定》(GBZ11930-2010);</p> <p>(13) 《医用放射性固废的卫生防护管理》(GBZ133-2009);</p> <p>(14) 《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020);</p> <p>(15) 《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021);</p> <p>(16) 《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》(GB11928-1989)</p> <p>(17) 《医用放射性废物管理卫生防护标准》(GBZ 133-2002);</p> <p>(18) 《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021);</p> <p>(19) 《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466-2005);</p> <p>(20) 《粒籽源永久性植入治疗放射防护要求》(GBZ 178—2017);</p> <p>(21) 《核安全导则 核技术利用放射性废物最小化》(HAD401/11-2020);</p> <p>(22) 《医疗、工业、农业、研究和教学中产生的放射性废物管理》(HAD 401/16-2023)。</p>
其他	<p>(1) 环评委托书;</p> <p>(2) 《建设项目环境影响评价信息公开机制方案》(环发[2015]162号);</p>

其他	<p>(3) 《辐射防护手册》(第一分册、第三分册), 李德平、潘自强主编, 原子能出版社;</p> <p>(4) 《辐射防护导论》(方杰主编, 李世骏主审);</p> <p>(5) 《核技术利用监督检查技术程序》(生态环境部(国家核安全局));</p> <p>(6) 《四川省核技术利用单位辐射安全工作指引(2025年版)》(川环函〔2025〕616号, 2025年11月3日);</p> <p>(7) 关于发布<放射性废物分类>的公告》(原环境保护部、工业和信息化部、国防科工局公告 2017年公告第65号公布, 自2018年1月1日起施行;</p> <p>(8) 《关于发布<射线装置分类>的公告》(原环境保护部公告、国家卫生计生委 2017年第66号);</p> <p>(9) 《关于发布放射源分类办法的公告》(原国家环保总局, 公告 2005年第62号);</p> <p>(10) 《关于建设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, 原国家环境保护总局、公安部、卫生部文件, 2006年9月26日);</p> <p>(11) 《关于进一步加强环境影响评价管理防范环境风险的通知》(环发〔2012〕77号, 原环境保护部文件, 2012年7月3日);</p> <p>(12) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》(生态环境部公告 公告 2019年第57号);</p> <p>(13) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》(生态环境部公告 公告2021年第9号);</p> <p>(14) 《RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK 2002》(Published by Nuclear Technology Publishing);</p> <p>(15) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》(HJ1326-2023);</p> <p>(16) 《钇-90 树脂微球使用过程辐射安全风险研究报告》(生态环境部核与辐射安全中心, 2021年8月23日);</p> <p>(17) 《¹⁷⁷Lu-Dotatate 治疗的放射防护评估》(中国辐射卫生 2021年12</p>
----	---

其他	<p>月第 30 卷第 6 期）；</p> <p>（18）《关于印发<四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）>的通知》（川环函[2016]1400 号）；</p> <p>（19）林家坝 TOD 项片区医疗用地项目二期建设项目专家意见；</p> <p>（20）建设单位及设计单位提供的工程设计图纸及相关技术参数资料。</p>
----	--

表 7 保护目标与评价标准

评价范围

根据本项目的特点并参照《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文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）中“核技术利用建设项目环境影响评价报告表的评价范围和保护目标的选取原则：非密封放射性物质工作场所项目评价范围，乙级取半径 50m 的范围，射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围”，确定本次评价范围为非密封放射性物质工作场所、医用射线装置所在工作场所实体屏蔽墙体外周边 50m 范围。

保护目标

根据本项目确定的评价范围，环境保护目标主要是医院辐射工作人员和周围停留的公众。由于电离辐射水平随着距离的增加而衰减，因此选取离辐射工作场所较近、有代表性的环境保护目标进行分析。具体环境保护目标见表7-1。

表7-1 本项目环境保护目标

项目	保护目标及相对位置	相对方位	与屏蔽体/辐射源最近水平距离(m)	与屏蔽体/辐射源最近垂直距离(m)	最大人数(人/d)	保护目标类型	剂量约束值(mSv)
负二层核医学制药区	回旋加速器操作间、热室、接收室、物料走道等区域内的工作人员	/	0.5	0	6	职业人员	5.0
	放化实验室内的工作人员	南侧					
	理化检验区（细胞实验室、灭菌准备间、预留实验室等）工作人员	西南侧	1.8	0	10	公众人员	0.1
	核医学制药区的其他辅助区域工作人员	南侧	0.3	0	5	公众人员	0.1
	放疗中心内的人员	东侧	3.0	0	60	公众人员	0.1
	负二层停车场内的人员	周围	6.0	0	200	公众人员	0.1
	核医学科核素诊断区	正上方	/	+4.5	22	职业人员	5.0
负二层放疗中心	1#直线加速器控制室、2#直线加速器控制室、模拟 CT 控制室	西侧	9.9	0	11	职业人员	5.0
	1#直线加速器设备间、2#直线加速器设备间等辅助用房	西侧	10.9	0	3	公众人员	0.1
	放疗中心办公区（主任室、物理计划室、抢救室、体模室等）	西侧	3.5	0	20	公众人员	0.1
	护士站、诊室、患者等候区等	西南侧	13	0	40	公众人员	0.1
	负二层停车场内的人员	周围	18	0	200	公众人员	0.1
	厨房食材加工区	正上方	/	+9.9	10	公众人员	0.1
负一层核	源库、分装注射室、放射性废物暂存间、更衣缓冲间、淋浴室等区域内的人员	/	0.5	0	13	职业人员	5.0

素诊断区	控制廊、主任室、办公室、示教会议室等区域的人员	西侧、北侧	0.3	0	20	公众人员	0.1
	接待前台、诊室内的人员	东侧	5.5	0	80	公众人员	0.1
	核素诊断区内的其他人员	/	1.0	0	3	公众人员	0.1
	核素诊断区外电梯厅、等候区、停车场等区域人员	/	1.5	0	250	公众人员	0.1
	一层放射科、室外区域内的人员	正上方	/	+5.4	80	公众人员	0.1
	核医学制药区、放疗中心内的人员	正下方	/	-4.5	200	公众人员	0.1
二层核素治疗区	介入手术室内的工作人员	/	0.5	0	12	职业人员	5.0
	控制室内的工作人员	西侧	3.6	0	11	职业人员	5.0
	敷贴室、甲吸室、分装给药室、源库、放射性废物暂存间等区域内的工作人员	/	0.3	0	9	职业人员	5.0
	值班室、示教室、胃肠镜检查等区域内的人员	西侧	1.8	0	20	公众人员	0.1
	二层门诊诊室及治疗区域内人员	南侧	7.0	0	150	公众人员	0.1
	二层护士站、候诊区及其他区域内的人员	/	7.0	0	150	公众人员	0.1
	三层核医学核素治疗区内的人员	正上方	/	+4.8	180	职业人员	5.0
	一层放射科内的人员	正下方	/	+5.1	150	公众人员	0.1
三层核素治疗区	源库、分装给药室、配药室、放射性废物暂存间、沐浴等区域工作人员	/	0.5	0	6	职业人员	5.0
	值班室、示教、办公室区域人员	西侧	1.8	0	10	公众人员	0.1
	临检区域内（值班、办公区、临检大厅、采血窗、接种室、培养室、样本制备室等区域）的人员	西南侧	0.3	0	20	公众人员	0.1
	三层门诊诊室及治疗区域内人员	南侧	20	0	150	公众人员	0.1
	护士站、等候区、电梯厅内的人员	东南侧	0.3	0	180	公众人员	0.1
	员工餐厅内的人员	东侧	8.0	0	50	公众人员	0.1
	四层检测、实验办公区内的人员	正上方	/	+4.8	20	公众人员	0.1
	二层核医学核素治疗区内的人员	正下方	/	+4.8	50	职业人员	5.0
1#医疗综合楼地下负2层~地上11层内其他人员		/	/	/	0.3	公众人员	0.1
1#医疗综合楼周围	2#医疗综合楼内的人员	北侧	35	/	1500	公众人员	0.1
	评价范围内其他流动人员	/	7.3	/	1000	公众人员	0.1
评价标准							

一、环境质量标准

- (1) 大气环境质量执行《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准；
- (2) 地表水环境质量执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类标准；
- (3) 声环境执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）2 类标准。

二、污染物排放标准

- (1) 大气污染物排放执行《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）二级标准；
- (2) 水污染物：本项目污水排入建设单位污水处理站处理后达到执行《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）中表 2（综合医疗机构和其他医疗机构）的预处理排放标准；
- (3) 噪声：①施工期执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）中标准限值；②运营期执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2 类标准；
- (4) 固废：①一般非放射性固体废物执行《四川省固体废物污染环境防治条例》；②《医疗废物处理处置污染控制标准》（GB 39707-2020）；③《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）。

三、辐射环境评价标准限值

1、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）：

表7-2 工作人员职业照射和公众照射剂量限值

对象	要求
职业照射 剂量限值	工作人员所接受的职业照射水平不应超过下述限值： ①由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量，20mSv； ②任何一年中的有效剂量，50mSv； ③四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量不超过 500mSv。
公众照射 剂量限值	实践使公众有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： ①年有效剂量，1mSv； ②特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

2、个人剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）第 4.3.2.1 条的规定，对任何工作人员，由来自各项获准实践的综合照射所致的个人总有效剂量不超过由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯平均）20mSv。

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198—2021）中“4.9 从事放射治疗的工作人员职业照射和公众照射的剂量约束值应符合以下要求：a）一般情况下，从事放射治疗的

工作人员职业照射的剂量约束值为 5 mSv/a； b) 公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a”；根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“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”。

因此，本项目确定取辐射工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a，公众照射的剂量约束值为 0.1mSv/a。

3、工作场所内外控制剂量率限值

(1) 核医学科工作场所

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021），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 μ Sv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10 μ Sv/h。

放射性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 μ 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 μ Sv/h。

放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h

放射性固体废物每袋废物的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，质量不超过 20 kg。固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 2.5 μ Sv/h。

(2) 直线加速器工作场所

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198—2021）中 6.1.4 剂量控制应符合以下要求：

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) DSA-CBCT 及Ⅲ类医用射线装置工作场所

根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 中“6.3.1 a) 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 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ”, 本项目介入手术室、SPECT-CT 室、PET-CT 室、模拟 CT 室机房屏蔽体外周围剂量当量率应不大于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

4、放射性表面污染控制水平

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002) 表 B11 工作场所的放射性表面污染的控制水平见表 7-2。

表7-2 工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型		α 放射性物质		β 放射性物质
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	极毒性	其他	40
	监督区	4	40	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4×10^{-1}	4	4
	监督区	4×10^{-1}	4×10^{-1}	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-1}	4×10^{-1}	4×10^{-1}

四、放射性固体废物清洁解控

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188—2021) 中“7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的, 经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平, α 表面污染小于 0.08Bq/cm^2 、 β 表面污染小于 0.8Bq/cm^2 的, 可对废物清洁解控并作为医疗废物处理: a) 所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天; b) 所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍; c) 含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天; 固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责, 并建立废物存储和处理台账, 详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息”。

五、放射性废水解控要求

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188—2021）中“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），监测结果经监管部门认可后，按照 GB 18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10 Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10Bq/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 GB 18871 附录 A 表 A1 的要求；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”。

六、废气排放要求

1、放射性废气排放

1、根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188—2021）中“7.4 气态放射性废物的管理”的以下规定：

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

（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；

2、参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）第 5.2.4 款，操作放射性药物所用的手套箱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5m/s，排气口应高于本建筑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。

2、非放射性废气排放

（1）根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198—2021）中“8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置”。

（2）根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中“6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风”。

表 8 环境质量和辐射现状

环境质量和辐射现状

一、项目位置、布局和周边环境

本项目位于拟建1#医疗综合楼内，现状为空地，结合设计图纸及现场踏查，本项目的周边环境关系如下：

本项目位于成都市锦江区国维街与泰昌路交叉口西北侧拟建1#医疗综合楼（11F/-2F，高约55m），锦江区疾控中心（在建）距离本项目西南侧约51m。在本项目辐射工作场所边界外的评价范围内，北侧约27m~50m范围为拟建2#医疗综合楼；南侧约46m处为已建泰昌路；东侧约22~50m处为已建国维街。

二、主要环境影响因子

本项目包括使用放射源、非密封放射性物质工作场所及医用射线装置，根据工程分析，项目主要污染因子为各工作场所运行时产生的 α 射线、 β 射线、X射线、中子射线、 γ 射线及 α 、 β 表面污染水平等。因现阶段项目暂未实施，且运营期间产生的所有放射性废水能够得到妥善处置，放射性废气产生较少。因此本次评价不对区域地表水、地下水环境质量、环境空气中核素进行监测评价。本次评价的环境监测选取中子、X- γ 辐射空气吸收剂量率和 α 、 β 表面污染水平作为监测因子。

三、监测方法及仪器

为掌握项目所在地的辐射环境现状，四川省中栎环保科技有限公司委托四川省永坤环境监测有限公司按照标准规范对本次拟建址及周边环境进行了X- γ 辐射剂量率和表面污染水平的布点监测，委托四川省瑜仁嘉卫生技术服务有限公司对拟建回旋加速器机房周围中子周围剂量当量率进行了监测，分别出具了监测报告（见附件9），其监测项目、分析方法及来源见表8-1。

表8-1 监测项目、方法及方法来源表

监测项目	监测方法	备注
γ 辐射空气吸收剂量率	《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）	探测限为本次测量使用方法和仪器的综合技术指标
α 、 β 表面污染水平	《表面污染测定第一部分： β 发射体（ $E_{\beta\max} > 0.15\text{MeV}$ ）和 α 发射体》（GB/T 14056.1-2008）	
中子周围剂量当量率	《辐射防护仪器中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T14318-2019）	

监测使用仪器及环境条件见表8-2。

表8-2 监测使用仪器表				
监测项目	监测设备			使用环境
	名称及编号	测量范围	检定/校准情况	
环境X-γ辐射剂量率	RJ32-3602 型分体式多功能辐射剂量率仪 编号： YKJC/YQ-40	1nGy/h~1.2mGy/h 20keV~3.0MeV	检定/校准单位： 中国测试技术研究院 证书编号：检定字第 202412102810 号 检定/校准有效期： 2024.12.13~2025.12.12 校准因子：0.96（校准源： ¹³⁷ Cs）	天气： 晴 温度： 28.6℃ 湿度： 53.3%
α、β表面污染	CoMo170 表面污染监测仪 编号： YKJC/YQ-06	表面发射率响应 R _α =0.36 R _β =0.44	检定/校准单位： 中国测试技术研究院 证书编号： 检定字第 202408100522 号 检定/校准有效期至： 2024.08.02~2025.08.01	
中子周围剂量当量率	RJ37-7105He3 型中子周围剂量当量率仪 编号： SCYRJ-FSWS-031	中子剂量率量程： 0.1μSv/h~100.0mSv/h 中子能量响应： 0.025eV~14MeV	校准/检定单位： 中国核动力研究设计院检测校准实验室 校准/检定有效期： 2024.10.15-2025.10.14	天气： 晴 温度： 28.6℃ 湿度： 53.3%

四、质量保证

1、监测单位资质

四川省永坤环境监测有限公司、四川省瑜仁嘉卫生技术服务有限公司均通过了四川省市场监督管理局组织的检验检测机构资质认定，具备完整、有效的质量控制体系。本次监测所用的仪器性能参数均符合国家标准方法的要求，均有有效的国家计量部门的检定合格证书，并有良好的日常质量控制程序。监测人员均参加并通过了培训考核，考核合格持证上岗。数据分析及处理采用国家标准中相关的数据处理方法，按国家标准和监测技术规范有关要求进行处理和填报，并按有关规定和要求进行三级审核。

从事监测的单位，四川省永坤环境监测有限公司于 2025 年 2 月取得了四川省市场监督管理局颁发的计量认证，证书编号为：242312051074，有效期至 2030 年 3 月 12 日，具备检验检测能力；四川省瑜仁嘉卫生技术服务有限公司于 2023 年 12 月取得了四川省市场监督管理局颁发的计量认证，证书编号为：

232303100019，有效期至 2029 年 5 月 3 日，具备检验检测能力。

2、监测单位与现行法规的符合性

四川省永坤环境监测有限公司、四川省瑜仁嘉卫生技术服务有限公司均取得了检验检测机构计量认证资质，在资质附表中批准的能力范围包含了本项目相关的监测范围和监测方法。因此，监测单位提供的监测数据能够得到保证，委托该公司进行本底监测满足相关法律法规的要求。

五、环境现状监测与评价

根据监测单位提供的监测报告，本项目拟建位置周围环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测值在 81~86nGy/h 之间，与 2024 年 6 月成都市生态环境局发布的《2023 成都生态环境质量公报》中环境 γ 辐射剂量率连续自动监测年均值范围（67.0~119nGy/h）基本一致，属于当地正常天然本底辐射水平；本项目拟建位置周围 α 、 β 表面污染水平、中子辐射剂量率低于仪器探测下限，未见异常。

表 9 项目工程分析与源项

工程设备和工艺分析

一、施工期

（一）施工阶段

本项目辐射工作场所基础施工属于林家坝TOD片区医疗用地项目二期建设项目建设内容之一，其施工期环境影响包含在《林家坝TOD片区医疗用地项目二期环境影响报告表》中。

（二）设备安装调试期阶段

本项目拟购射线装置的运输、安装和调试均由设备厂家专业人员负责，安装和调试均在辐射防护设施建设完成后进行。

1、设备安装

医院应密切配合设备厂家在设备安装调试期间的辐射安全管理，在此过程中保证各类辐射安全防护设施正常运行。设备安装完成后，医院应及时处理包装材料及其它固体废物，作为一般固体废物进行处置，不得随意丢弃。

2、设备调试

本项目射线装置在调试过程中主要环境影响为 X 射线、中子及 γ 射线。在设备调试期间，医院应要求设备厂家关闭防护门，在防护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，机房必须上锁并派人看守，禁止其他无关人员进入该区域，防止辐射事故发生。射线装置的安装和调试均在机房内进行，产生的 X、中子及 γ 射线经建筑实体屏蔽、距离衰减后，对周边的辐射影响较小。

（三）辐射防护施工要求

①穿过直线加速器、模拟 CT、回旋加速器、PET-CT、SPECT-CT、PET-MRI 及 DSA-CBCT 机房墙体的电缆应采用“U 型”或“S 型”电缆沟穿墙，并采用一定厚度的屏蔽材料进行遮盖，避免电缆沟影响到墙体的屏蔽效果；

②为防止射线泄漏，机房出入大门与屏蔽墙体的重叠宽度应至少为空隙的10倍，门的底部与地面之间的重叠宽度至少为空隙的10倍，电缆沟盖板应有足够的搭接宽度；

③防护铅窗应确保施工安全和建筑安全,采用高性能防辐射铅玻璃+相应铅当量窗框,并作相应的外装饰面。安装防护窗前,应先核对窗洞口尺寸,确保窗框距洞口间隙控制在5mm以内,窗框安装完毕,需对其进行掩口处理。

二、运营期

(一) 放疗中心

1、直线加速器工艺分析

(1) 设备组成及工作原理

本项目医用直线加速器属治疗类射线装置,主要用于肿瘤病人的放射性治疗,其治疗机理是根据肿瘤的不同情况通过模拟定位,采用 X 射线束(深部治疗)进行照射,使细胞分裂和代谢遭到破坏,杀死或者抑制细胞的繁殖生长,从而达到治疗的目的。物理师对肿瘤病人治疗计划设计时,严格按照相关标准,为病人的正常组织和医务人员的受照剂量进行计算-复核-模拟检测-实施中监测和健康监护等,并做好照射记录。根据病灶位置与性质及目的不同,给予的照射总剂量有所不同;治疗方法不同,给予的每野次剂量亦不同。

医用直线加速器的核心部位由电子枪、加速管和束流控制三个主要部分和图像引导(CBCT)模块组成,由于直线加速器结构简单、造价低、不使用放射源,目前已成为医院放射治疗的主要手段。本项目拟配置 10MV 直线加速器,属II类射线装置,其结构图见图 9-1。



图 9-1 医用直线加速器结构示意图

医院拟采购直线加速器具有 X 射线和电子线两种治疗模式。其中 X 射线治疗模式下，最大 X 射线能量为 10MV，常见有 4MV、6MV、8MV、10MV 四个档位，具有调强功能，在调强放射条件下，照射野准中心 1m 处最大辐射剂量率可达 22Gy/min，用于深层病灶治疗；电子束治疗模式下，最大电子线射线能量为 20MeV，常见标称能量有 4MeV~20MeV 多个档位，具有调强功能，在调强放射条件下，照射野准中心 1m 处最大辐射剂量率可达 22Gy/min，用于浅层病灶治疗。本项目直线加速器主要参数见表 9-1。

表9-1 10MV医用直线加速器参数

厂家、型号	待定
最大 X 射线能量	10MV
最大电子线能量	20MeV
X 射线泄漏率	≤0.1%
X 射线 1m 处最大剂量率	22Gy/min
电子束 1m 处最大剂量率	22Gy/min
治疗角	0-360°
正常治疗距离	100cm
主射线最大出束角度	28°
最大照射野（SSD=1 米）	40cm×40cm

（2）图像引导模块

本项目医用电子直线加速器自带图像引导（CBCT）模块，即锥形束 CT，其工作原理是根据人体不同组织对 X 射线的吸收与透过率的不同，应用灵敏度极高的仪器对人体进行检测，然后检测所获取的数据输入电子计算机，电子计算机对数据进行处理后，就可摄下人体被检查部位的断面或立体的图像，发现体内任何部位的细小变化。图像引导（CBCT）模块可在医用电子直线加速器治疗前以治疗体位同步进行 CT 扫描，进行实时在线配准，在治疗前纠正摆位、器官运动、肿瘤体积变化等带来的误差，实现精准放疗，在确保疗效的基础上，可大幅减轻放疗副作用，最大限度避免放疗损伤。

本项目图像引导(CBCT)模块最大管电压为 150kV，最大管电流为 500mA，用于放射治疗前对患者治疗位置的验证。

2、项目流程及产污环节

本项目拟使用的医用电子直线加速器可提供 2 种治疗模式，一种是电子治疗模式，利用电子线对浅表部位病灶照射放疗，最大电子线能量为 20MeV；一种是 X 射

线治疗模式，用于深部病灶照射，最大 X 射线能量为 10MV。医用电子直线加速器治疗流程及产污环节见图 9-2。

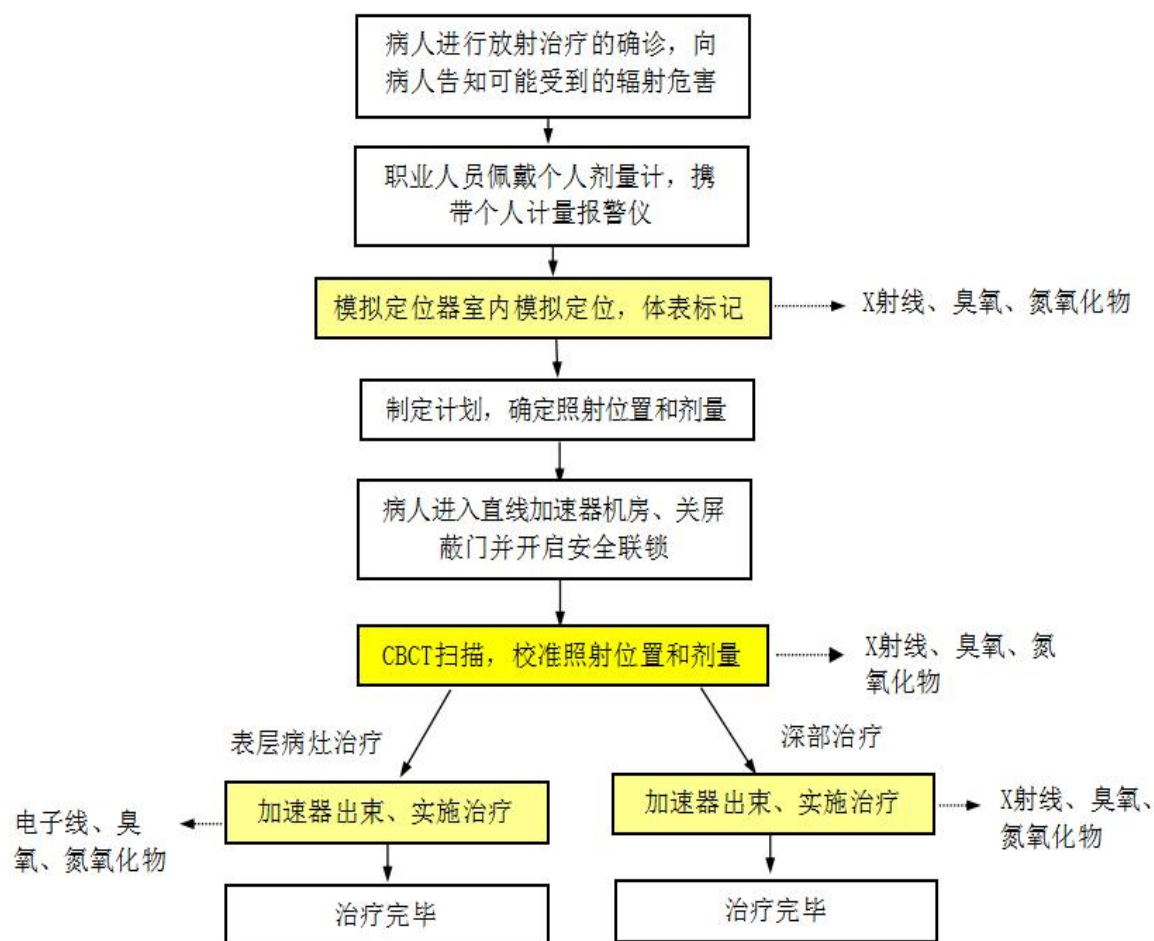


图 9-2 医用直线加速器治疗流程及产污环节图

常见直线加速器治疗流程为：

1) 患者在经诊断确诊需要进行放射治疗后，放疗医师根据病灶的部位确定定位体位，通过放疗科模拟 CT 机扫描采集影像资料，用于确定靶区位置、形状和大小，提出放射治疗方案；

2) 物理师根据放疗医生的治疗方案，完成放疗计划，并通过体模模拟对病灶部位放射治疗剂量验证。剂量验证通过后，交由临床医生审核放疗计划是否达到治疗需求精确治疗计划；

3) 患者在治疗周期内，病情会随着治疗野次而变化，因此，在治疗周期内放疗计划会随着病人治疗的情况而调整，患者在放疗前需要先经过 CBCT 诊断校准靶区位置确认放疗计划，放疗技师位于控制室内通过 CBCT 对患者进行拍片，根据校准

后的图像确定是否需要更改放疗计划；

4) 物理师确认放疗计划无误后，由技师带领患者进入机房，对患者进行摆位，确认机房内无其他人员滞留，确认各类按钮工作正常后，撤离机房并关闭防护门；

5) 定位无误后放疗技师在控制室内按照医疗方案设置参数，调整好出束时间、角度、剂量，然后进行出束治疗；

6) 治疗结束后，停止出束，解除定位，关闭系统，患者离开机房。

通过分析可知，产污环节为：模拟定位时产生的 X 射线、臭氧和氮氧化物，CBCT 照射位置校准过程中扫描产生的 X 射线、加速器质控及治疗过程中产生的 X 射线、电子线、臭氧和氮氧化物，以及风机、辅助机房水泵等产生的噪声。

3、射线装置年工作负荷

根据建设单位提供资料，医院全年每台加速器最多治疗患者约7500人次，其中采用电子线表层病灶治疗模式治疗患者约占总治疗人数的1/10，保守按照所有患者均按照X射线束治疗模式进行估算，每人次治疗时间为1~3min，则本项目直线加速器每年最长出束时间约375h；CBCT模块每人次最长扫描时间不超过60s，则出束时间为125h/a。在患者放射治疗过程中，技师主要负责操作直线加速器设备，护士协助摆位，年最大受照时间约375h；物理师在患者就诊前或周末非工作日会对直线加速器进行质量控制验证，同样会受到辐射影响，质控时间约占设备正常治疗时间的10%，物理师质控年总出束时间为37.5h/台，则本项目每台直线加速器年最大出束时间为412.5h/a(治疗375h/a，质控37.5h/a)。

4、人流路径规划

①工作人员路径：本项目放疗中心医护人员从医生廊向东直行，在抢救室门口向南分别进入放疗中心各机房控制室或进入机房内协助患者进行摆位，摆位后回到各机房控制室，待患者治疗完毕后，沿走廊原路径离开诊疗区域。

②患者路径：患者从电梯厅到达负二层后向北直行，在登记室登记签到后，在等候区等候叫号接受模拟定位扫描，模拟定位结束后，患者根据医生呼叫顺序进入对应的直线加速器机房，根据医生和物理师制定的治疗计划和方案对患者实施放射治疗，治疗完毕后，通过迷道离开加速器机房，患者沿原路径乘电梯离开放疗中心。

在放疗中心内，患者有专门的候诊区，医生有专门的辅助区域，直线加速器治

疗工作人员路径和患者就诊路径不交叉。因此，本项目人流路径规划合理。

5、气流路径规划

根据建设单位提供设计方案，拟在 1#直线加速器机房、2#直线加速器机房内各设置一套排风系统，排风量均为 1200m³/h，机房内产生的臭氧经迷道入口防护门上方引出后，向北走管，在抢救室外走道向西沿楼梯间走管，再进入采光庭院西北角排风井，经排风井引至高于地面 3m 处排放。

（二）核医学科

医院拟在核医学科工作场所内开展放射性制药、诊断和治疗项目，具体为：（1）**负二层核医学制药区**：在负二层西北侧核医学制药区使用 1 台 10MeV 自屏蔽回旋加速器（II类射线装置）生产 ¹⁸F、¹¹C、¹³N、¹⁵O、⁶⁴Cu、⁸⁹Zr，在放化实验室对生产的放射性药物进行质控、阳性对照等操作，日等效最大操作量为 1.89×10⁹Bq（属于乙级非密封放射性物质工作场所）；（2）**负一层核素诊断区**：在负一层北侧设核素诊断区，使用 ^{99m}Mo（^{99m}Tc）、⁶⁸Ge（⁶⁸Ga）淋洗制药，使用 SPECT-CT（III类射线装置）、PET-CT（III类射线装置）、PET-MRI 各 1 台，使用 ^{99m}Tc、¹⁸F、¹¹C、¹³N、¹⁵O、⁶⁴Cu、⁶⁸Ga 和 ⁸⁹Zr 用于肿瘤显像诊断，日等效最大操作量为 4.64×10⁸Bq（属于乙级非密封放射性物质工作场所），使用 3 枚活度为 4.60×10⁷Bq×2 枚+9.25×10⁷Bq×1 枚的 ⁶⁸Ge 放射源或 1 枚活度为 3.70×10⁸Bq×1 枚的 ²²Na 放射源，用于 PET-CT/MRI 设备校准，均属于V类放射源；（3）**二层核素治疗区**：在二层北侧使用 1 台 DSA-CBCT（属于II类射线装置），使用放射性同位素 ⁸⁹Sr、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re、²²³Ra、²²⁵Ac、^{99m}Tc、¹²⁵I 粒子源、¹⁰³Pd 种子源、⁹⁰Y 微球、¹⁸⁸Re，用于肿瘤治疗，在场所南侧甲吸室使用核素 ¹³¹I 用于甲吸检查，场所内日等效最大操作量为 3.71×10⁹Bq（属于乙级非密封放射性物质工作场所），在敷贴室使用 2 枚放射源 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y，最大活度为 7.40×10⁹Bq/枚×2 枚（V 类），用于皮肤病敷贴治疗；（4）**三层核素治疗区**：在三层北侧使用放射性核素 ¹³¹I、¹⁷⁷Lu 开展甲亢、肝癌和骨转移肿瘤治疗，日等效最大操作量为 3.74×10⁹Bq（属于乙级非密封放射性物质工作场所）。

1、负二层核医学制药区

（1）制药规划

回旋加速器制药区每年工作 250 天，每周工作 5 天。根据 PET 诊断的临床使用需

求，生产核素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr ，每天最多打靶 2 种核素，打靶生产 ^{18}F 为主要使用核素，在核医学制药区内日最大制药量为 $9.25 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。本项目核医学制药区拟生产放射性核素相关信息见表 9-2。

表9-2 回旋加速器打靶生产放射性药物相关信息

核素	物理状态	毒性	半衰期	日制药量 (Bq)	主要射线和能量 (MeV)	备注
^{18}F	液态	低毒	109.8min	5.55×10^{10}	0.63MeV/ β 射线 0.511MeV/ γ 射线	回旋加速器打靶生产
^{11}C	液态	低毒	20.39min	3.70×10^{10}	0.96MeV/ β 射线 511keV/ γ 射线	
^{13}N	液态	低毒	9.961min	3.70×10^{10}	1.19MeV/ β 射线 0.511MeV/ γ 射线	
^{15}O	液态	低毒	2.03min	2.22×10^9	1.72MeV/ β 射线 0.511MeV/ γ 射线	
^{64}Cu	液态	低毒	12.7h	2.78×10^9	0.65MeV/ β 射线 0.511MeV, 1.346MeV/ γ 射线	
^{89}Zr	液态	低毒	78.4h	1.33×10^{10}	0.396MeV/ β 射线 0.511MeV, 0.909MeV/ γ 射线	

(2) 回旋加速器制药

1) 回旋加速器技术参数

拟购设备数量 1 台，型号为 MINITRACE Qilin；质子能量为 10MeV，束流 $\leq 70 \mu\text{A}$ 。根据设备厂家提供的 γ 、中子剂量率等高线分布图（附件 10），回旋加速器自屏蔽体外辐射剂量率等高线距离分布见下表。

表9-3 回旋加速器自屏蔽体外辐射剂量率等高线距离分布一览表

相对位置	自屏蔽体外表面与靶点的距离 (m)	靶点到 γ 辐射剂量率 $35 \mu\text{Sv/h}$ 等高线的距离 (m)	靶点到中子辐射剂量率 $8.4 \mu\text{Sv/h}$ 等高线的距离 (m)
左侧	1.1	2.3	3.0
右侧	2.1	3.2	2.8
前侧	1.0	2.1	1.7
后侧	1.2	2.1	1.7
上方	1.0	1.7	1.9

2) 回旋加速器制药设备组成

回旋加速器一般由磁场系统、射频系统、真空系统、离子源系统、束流提取系统、诊断系统、靶系统和冷却系统等组成，本项目使用回旋加速器各系统的主要作用如下：

磁场系统：由上下磁轭、线路极片、磁场线圈、磁场电源等组成，其作用就是

提供偏转力使束流维持在上下磁极之间中心平面的准环形轨迹上。磁场线圈使束流在上下磁极之间加速。磁场非匀场，而是采用深谷设计，对束流粒子在加速的中心层面提供了强聚焦力，引导粒子返回中心层面，产生高的束流引出效率。

射频系统：包括监测与控制元件、频率合成器、中级放大器、RF 电源振幅器、共轴透射线、耦合网络和 D 型盒结构等，其作用就是对 D 型盒提供一交替的高电压电势，并将能量转至 H⁺离子。随着束流加速得到能量，其轨道半径逐渐增加，这种轨迹被称为准螺旋形。当束流到达提取半径时，其能量也将达到预定能量。正常工作时，射频频率自动受 RF 控制元件调整以维持 D 型盒结构的共振。

真空系统：包括真空室、排气泵、仪表和控制元件等。真空仪表和控制元件用于监测并显示真空室的压力以及在系统出现故障时对仪器起到保护作用。真空室需要连续不断地抽气以排除来源于离子源及真空室内表面的气体。

离子源系统：包括离子源、ARC 源、偏向电源与氢气流量控制器等。离子源产生 H⁺离子，在正常操作中不需要进行调试或干预性操作。离子源存在电势差，用于电离氢气形成等离子浓聚体。进入离子源的氢气流量由电子质流控制器调控以与变化离子源和加速器运行条件相匹配。等离子体的电源（或 ARC）由电流调节的开关型电源提供，在正常运行时，控制系统调节离子源的 ARC 电流以维持期望的靶电流。

束流提取系统：包括一个或者 2 个束流提取器，其作用就是当 H⁺通过碳提取膜时，剥离其与氢核结合松散的 2 个电子，从而使束流由负电性变成正电性。

靶系统：是完成特定核反应而产生正电子核素的装置，一般包括靶体、准直器、靶膜、管路阀门等。靶材料包括液态、气态和固态靶三种类型，本项目制备 ¹⁸F、¹⁵O、¹¹C、¹³N 使用液态靶，需要工作人员定期进入回旋加速器机房添加靶水。

冷却系统：从不同系统中将热量带出，带出的热量在二级冷却系统中进行热交换，并将热量传送到初级冷却系统。水冷却系统分为内循环冷却水系统和外循环冷却水系统。内循环冷却水系统位于屏蔽体内，通过板式换热器与外循环水冷机进行热交换；外循环冷却水系统选用的冷水机组进行冷却。

化学合成系统：该系统包括合成分装模块以及相应的仪器设备，用于合成和分装核素的药物。回旋加速器生产的放射性药品通过固体靶室打靶产生的放射性药物由屏蔽输送管道直接输送到热室内的合成分装模块中，由 1 自动合成装置进行药物合成，化学合成系统是在计算机控制下自动化完成药物的合成。

3) 回旋加速器制药原理

回旋加速器生产放射性核素，其基本原理是质子在磁场的作用下加速，当达到一定能量时引出并轰击靶材料，通过核反应而生成放射性核素。回旋加速器生产正电子示踪剂的基础理念就是利用 P/N (质子/中子)反应，用高能量的质子轰击靶原子核，将其中一个中子击出，质子留下，形成半衰期很短的新原子核。经过放化合成系统，通过化学反应，将新原子核标记到生理性代谢物质上(如葡萄糖、氨基酸、多肽、蛋白、核酸、胆碱等)，生成 PET 检查所需的示踪剂。

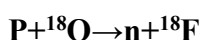
医院拟采购 GE 生产的型号为 MINTrace Qilin 的自屏蔽质子加速器共六个靶位，最多可安装 6 个靶体，最多同时生产 1 种核素。该加速器内部紧贴真空盒，靶体周围采用特殊配比混凝土/特殊配比混凝土+铅进行屏蔽，其中特殊配比混凝土主要元素氧和氢可以对打靶产生的中子进行慢化、吸收，可以有效降低打靶产生的中子直接进入环境之中，从而可以降低辐射剂量。

4) 回旋加速器制药工艺流程

回旋加速器可完成临床上所需要的 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 等放射性同位素，其中 ^{18}F 是目前临床使用标记示踪剂最多的正电子放射性核素。回旋加速器制药主要包含制药区、原料传递、核素提纯、合成及分装、药物质控、药物传递五个流程。

①制药区

医院核医学科核素诊断区提前一天根据患者预定的药物数量，向核医学制药区预定安排第二天的放射性药物生产量。回旋加速器运行期间，工作人员不进入加速器室内，仅在加速器控制室内操作。回旋加速器在每次正式制备放射性同位素前均进行预处理，先用 $^{16}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ 清洗靶并用纯氦吹干药物传递管道，然后注入靶物质，以一定的束流轰击一定时间（视所需制备量而定）后，在氦气的推动下将制备的核素通过专用防护管道输送至热室的药物合成箱内。其中 ^{18}F -FDG 制备核反应如下，生产采用液体靶。



生产前对回旋加速器进行调试，根据需要生产的放射性核素种类设置相应参数。回旋加速器运行期间，工作人员不进入回旋加速器室内，仅在控制室操作。医院每天核素生产打靶时间最多打靶 2 次，最长打靶时间为 3.0h/d，年工作时间为 750h。

产污环节：回旋加速器在生产核素的同时伴随产生大量中子，成为瞬时辐射源，

由于高能带电粒子直接轰击加速器有关部件导致有关元件被活化从而产生中子活化产物，中子在慢化吸收过程中产生高能射线和放射性废物，另外回旋加速器长期运行会产生废靶。加速器室内的空气受中子照射后生成放射性感生放射性物质，主要有 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等感生放射性物质，以及回旋加速器在开机时会产生少量的非放射性有害气体，主要是臭氧和氮氧化物。

②物料收集传输

工作人员将放射性药物合成需要的非放原材料（三氟甘露糖、乙腈、碳酸钾、氢氧化钠等）在接收间接收后，经过物料通道向北直行送入核医学制药区内。

③放射性药物提纯、合成、分装

回旋加速器机房的核素离子生产完成后，通过专门的防护管道系统传输到热室内的相应模块箱中，放射性核素在洁净靶模块中进行自动提纯，然后在热室柜模块中完成合成，再在相应模块箱中进行分装。放射性药品在提纯、合成、分装过程中，无需人员干预，均采用计算机程序自动控制。药物在自动分装模块中将根据预先设定的程序，经高效除菌过滤膜过滤后收集在安瓿瓶中，自动掉入专用的带有卡扣盖子的铅防护罐中。

产污环节：药物提纯、合成、分装过程中核素衰变发出 β^+ 射线、因发生正电子湮灭而产生的 γ 射线、合成分装模块内药物的挥发产生含放射性核素的废气。

④药物质控

放射性药物生产完成后，制药工作人员进入热室将合成分装模块内装有少量质控用药物的铅罐取出，每种核素一般小样（每次最多 $100\mu\text{Ci}$ ）分别经传递窗送至放化实验室进行质控检测。放化实验室拟配置带有专用排风系统的通风橱，质控工作人员在内通风橱将待检药物注射器吸取微量抽检样品，检验药物的 pH 值、形态、细菌内毒素、比活度、放化纯度、无菌检测等，经检验满足《中华人民共和国药品管理法》和《放射性药品管理办法》等相关法律法规要求后，方可开展后续工作，具体流程如下：

①核素鉴别：取产品瓶 1 支，在放化实验室通风橱中充分振摇使产品成混悬状态，用移液器取适量产品，置有机玻璃管中，装于铅罐中移至物理测量间。用不同核素（不同 γ 射线能量）的标准源对 γ 谱仪进行效率刻度，得到效率标准曲线。在与效率刻度相同的几何条件、测量条件下，用 γ 谱仪测定样品的 γ 射线能谱，鉴别核素

种类。

②放射性活度浓度测定：将 1 支产品装于铅罐中移至放化实验室通风橱内，直接放入经校准的放射性活度计中进行活度测量。

③pH 值测定：在通风橱中取一小块 pH 试纸在表面皿或玻璃片上，充分振摇使产品成混悬状态，用移液器取产品适量，点于试纸的中部，将试纸与标准色板相比较，即为产品的 pH 值。

④细菌内毒素测定：在通风橱内将样品与内毒素标准溶液混合制成一定浓度的内毒素溶液，分别制作标准溶液（阳性）样本、样品溶液（阴性）样本，并分别放入一定温度的恒温条件下进行水浴后，再进行对照判定是否满足规定。

⑤放射性核纯度测定：充分振摇使产品成混悬状态，用移液器（或注射器）取适量产品，置于有机玻璃管中，采用铅罐转移到放化实验室内用 γ 谱仪测定样品中核素的放射性活度，计算核素放射性活度占产品总放射性活度的百分比。

⑥放射化学纯度测定：充分振摇使产品成混悬状态，用移液器（或注射器）取适量产品，置有机玻璃管中，采用铅罐转移到放化实验室。取载体溶液适量，点于色谱滤纸上，晾干，再取产品适量，点于相同的位置，晾干。采用上行法，在放化实验室内先在层析缸内加入展开剂，盖好层析缸，待缸内展开剂饱和后，将已点样滤纸悬于缸中，并使展开剂的液面浸在点样基线下 1cm 处，一定时间后，待展开剂前缘达到滤纸上端处。展开完毕后，取出滤纸条，吹干，将滤纸按划线剪开成小纸条，按顺序测量各窄纸条的放射性活度，计算其放射化学纯度。

⑦无菌检测：充分振摇使产品成混悬状态，用移液器取适量产品，置有机玻璃管中封口，采用铅罐转移到放化实验室内，分别取供试品直接接入培养基或加入金黄色葡萄球菌，在适宜温度下培养 14 天，观察各样品中菌的生长情况。

药物质控流程见图 9-3。

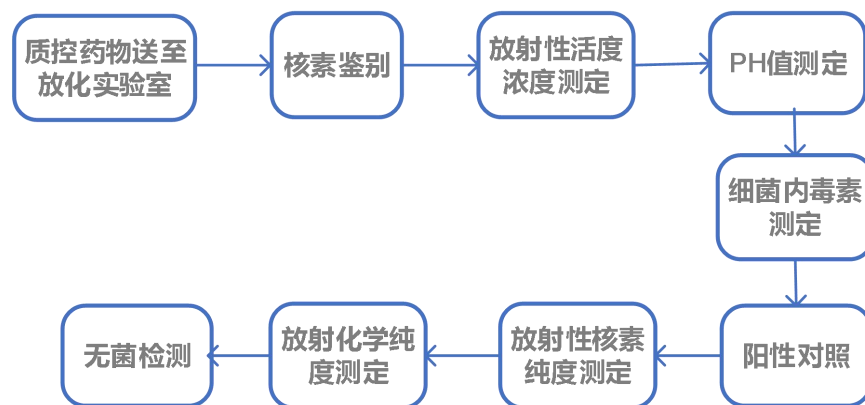


图 9-3 放射性药物质检流程示意图

产污环节：药物质控过程中核素衰变发出 β^+ 射线；因发生正电子湮灭而产生的 γ 射线；操作过程中可能会引起工作场所（工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等）产生沾污，造成放射性表面污染；发生药品泄漏后工作人员去污、应急洗消、场所清洗时可能产生少量放射性废水；药物挥发产生含放射性核素的废气；核素操作产生的废棉签、口罩、手套等放射性固废。

5) 放射性药物传递

核医学制药区药物合成分装、质控环节完成后，制药工作人员身着铅衣等进入热室前区内将合成分装热室柜内装有药物的铅罐（50mmPb）取出，将放射性药物放置到不锈钢长臂小车上（人体与手推车间的距离约 1.2m），先后通过物流通道送入核素洁梯（传药梯），经核素洁梯进入负一层核素诊断区源库内。

6) 细菌培养和阳性对照

取细菌内毒素工作标准品一支，用 1mL 细菌内毒素检查用水复溶，封口膜封口，漩涡混合仪混合 15min，再用细菌内毒素检查用水稀释并做好标记。

待放射性药品衰变一定活度后（衰变 ≥ 3 个半衰期），用移液器取适量放射性样品（约 100 μ L， $\leq 10\mu$ Ci），用水将产品稀释混匀，用除热原滤膜过滤后，取滤液作为供试品溶液。取一定体积的供试品溶液、阳性对照溶液，混合后制成供试品阳性对照溶液。准备 4 支鲎试剂，分别向每支鲎试剂中加入细菌内毒素检查用水 0.1mL 进行复溶，然后分别加入供试品溶液、阳性对照溶液、供试品阳性对照溶液、细菌内毒素检查用水各 0.1mL。用封口膜封口，垂直放入 37 $\pm 1^\circ\text{C}$ 恒温水浴锅中，保温 60 ± 2 分钟后观察结果。上述步骤由质控人员在放化实验室的生物安全柜/通风橱内完成。

7) 工艺流程汇总

以上整个过程（打靶、合成、分装）为计算机全自动控制，工作人员不进入热室内参与操作，只是监控整个过程的执行情况，质控环节由辐射工作人员在放化实验室通风橱内操作。故回旋加速器生产放射性药物的主要污染因子为： γ 射线、中子、感生放射性物质、 β 表面沾污、放射性废水、放射性废气、放射性固体废物、 O_3 、 NO_x 。回旋加速器生产场所流程及污染物产生环节见图 9-4 所示。

图 9-4 回旋加速器制药场所流程及产污环节图

（3）人流、物流路径

负二层核医学制药区及外购物料接收区人流、物流路径图见下图。

图 9-5 负二层核医学制药区人流、物流路径示意图

①人员路径：回旋加速器制药区内制药工作人员从医护电梯进入负二层，沿理化检验区东侧走道向北直行后进入控制室对回旋加速器进行操作，必要时从控制室向右转沿东侧走廊进入回旋加速器机房进行相关操作，完成相关操作后原路径离开；质控人员从医护电梯进入负二层后，从北侧门进入后，理化检验区缓冲间入口处向东经更衣检测间更衣后，向北进入放化实验室进行相关质控操作，质控操作结束后，原路径返回；合成分装人员从医护电梯进入负二层，从北侧门进入后，理化检验区缓冲间入口处向东先后经换鞋间、一更衣室、二更衣室、缓冲间、洁净走廊后，向北进入热室后区进行相关操作，操作结束后，经洁净走廊脱衣检测、一更衣室、换鞋间后，向南离开。

②放射性核素路径：回旋加速器打靶生产的放射性同位素，通过输药管进入热室内的合成分装柜自动制备完成后，经过传递间向南通过传递窗将放射性药物送入外包间，经物流走道通过核素洁梯传送放射性药物；外购核素送到负二层停车场后，经接收室登记后，送入核素洁梯传送至对应楼层源库；质控药物从热室内取药后，通过西侧传递窗送入放化实验室进行质控等操作。

③放射性废物路径：回旋加速器机房内产生的放射性废物经过收集后，进入东侧放射性废物库内暂存衰变；放化实验室内产生的放射性废物经东侧传递窗，经热室前区后，与热室前区内放射性固废一起进入南侧放射性废物暂存间内暂存衰变。

(4) 放射性废水管道路径

核医学制药区拟设 1 套排水管道，管道起于污洗间、放化实验室和淋洗间，经工具清洗间和配制间后，通过放射性废物暂存库和工具清洗间，再经外清间和传递间，与回旋加速器机房废水、二级冷水间并管后，向南走管到电梯厅后，向东经电梯厅后，穿墙进入短半衰期降解池，最后流入短半衰期衰变池进行暂存衰变，具体路径见下图。

图 9-6 负二层核医学制药区放射性废水管道路径示意图

负二层核医学制药区采用倾斜的地埋管道自流进入短半衰期衰变池内，上述措施满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“核医学科工作场所应设置槽式或推流式废水衰变池，收集放射性药物操作间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液”要求。

(5) 放射性废气管道路径

图 9-7 负二层核医学制药区通排风管道路径示意图

图 9-8 负二层衰变池排风管道路径示意图

在负二层核医学工作场所内，拟设 5 根放射性废气排风管道。其中，核医学制药区共设 4 根排风管道，衰变池区域设 1 根排风管道。核医学制药区热室内合成分装热室柜设置 1 根排风管道，核医学制药区生产、质控区域设置 1 根排风管道，核医学制药辅助区域设置 1 根排风管道，回旋加速器自屏蔽体、放化实验室手套箱、生物安全柜等密闭设备设 1 根专用排风管道。其中，合成分装热室柜排风管道（P(B2-3F)-RF-5）起于热室前区各合成分装柜，产生的含放射性核素气溶胶经各柜体顶壁内侧高效过滤装置处理后，向南先后经传递间、外包间、物流走道，进入核素洁梯北侧排风井，经排风井后在楼顶（高约 49.7m）采用除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后高于屋面 2m 排放；核医学制药生产、质控区域排风管道（P(B2)-RF-2）起于放射性废物库，分别先后通过传递间→外清间→配制间及工器具清洗间→热室后区、热室前区及放化实验室，回旋加速器机房设置了专门的通风管道和排风管道，回旋加速器排风管道采用 S 形从机房南侧穿墙后，经铅皮包裹的活性炭过滤装置处理后，向南至物流通道处与核医学制药区主管道合管，再向西进入医护电梯北侧排

风井，经排风井后在楼顶（高约 49.7m）采用活性炭过滤装置过滤后高于屋面 2m 排放；制药区辅助区域排风管道（P(B2)-RF-3）起于污物处理间及接收间→库房→试剂室 2→污洗间、医疗废物暂存间、试剂室 1 后，继续向西走管，在消防/污梯向南进入医护电梯北侧的排风井，经排风井后在楼顶（高约 49.7m）采用活性炭过滤装置过滤后高于屋面 2m 排放；放化实验室手套箱、生物安全柜等密闭设备排风管道起于放化实验室，回旋加速器自屏蔽体、放化实验室手套箱及生物安全柜等排风管道（P(B2)-RF-10）经管道引出后，回旋加速器自屏蔽体经过活性炭过滤装置处理后，穿出回旋加速器机房，再与放化实验室手套箱、生物安全柜（顶壁内侧安装高效过滤装置）排风管道并管后向南进入医护电梯北侧的排风井，经排风井后在楼顶（高约 49.7m）排放；衰变池区域排风管道（P(B2)-RF-10）起于衰变池区域内，由北向南走管，在衰变池西南侧穿墙后，进入衰变池西侧排风井，经排风井引至屋顶（高约 45m），高于屋面 2m 排放。

医院应确保负二层核医学制药区内各功能区排风量大于新风量，各放射性同位素操作场所均处于负压环境，医院应在回旋加速器机房与活性炭过滤装置周围采用铅皮包裹，并在各功能区域汇管位置设置气流止回阀，防止放射性废气及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

综上，负二层核医学制药区放射性废气处理措施满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中密闭和通风要求：“①保持工作场所负压和各区之间的压差，使得工作场所气流由清洁区流向监督区再流向控制区；②应在通风橱设计独立排风系统，在每一个密闭设备顶壁安装活性炭过滤装置，经过滤装置处理后的废气经管道在楼顶经过活性炭过滤装置处理后排放；③使用回旋加速器制备放射性药物的场所设有单独的通风系统，加速器屏蔽区内有单独的排气管道，并呈负压状态”等相关要求；④通风系统排气口高于本建筑物屋顶，尽可能的远离附近高层建筑。

2、负一层核素诊断区

在负一层核素诊断区内，拟采用锗镓发生器、 ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）分别用于淋洗制备放射性同位素 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，其余放射性核素均通过负二层回旋加速器打靶生产得到。

（1）淋洗制药

1) 钼镓发生器

本项目使用的 ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）为医院向有资质的药物供应商购买。拟购钼镓发生

器最大规格为 1Ci，由供货商在医院上班前负责配送至负二层核医学制药区接收室，交给医院物料接收人员，由物料接收人员采用核素洁梯送至负一层核素诊断区源库内暂存，根据需要，由医护人员从源库转移至分装注射室手套箱内进行暂存。

图 9-9 发生器的内部结构及实景图

①钼铈发生器淋洗原理

^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 属于裂变色层发生器，基本部件是钼酸锆柱/活化氧化铝柱、淋洗系统和用于保护工作人员的辐射屏蔽套。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 由钼酸锆柱内 ^{99}Mo 不断衰变产生，并被钼酸锆柱吸附，当加入适当的淋洗剂时， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 便以 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 的形式被淋洗出来，整个过程称为“挤奶”。为了方便，一套发生器除基本部件外，常附加子体核素溶液接收瓶（即负压瓶）和一定量的淋洗剂（生理盐水）。由于母体核素的不断衰变就不断地产生子体核素，因而核素发生器可以反复淋洗制得子体核素，本项目钼铈发生器一天最多淋洗 1 次/柱，发生器的内部结构及实景见图 9-13。

②工作流程及产污环节

A、发生器转移：外购获得的 ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 从源库取出，连同货包转移到手套箱内进行暂存。

B、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （淋洗）：淋洗操作在核医学科影像中心手套箱内进行。先把生理盐水瓶插入 ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 的双针，一分钟后整体拔下外有防护罐的负压瓶，即制得淋洗液，制得的淋洗液贮存于外有防护罐的负压瓶之中。

C、测量活度： $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （淋洗）测量活度在手套箱内进行，由负责标记的工作人员完成。工作人员用注射器吸取上一步制得的少量淋洗液，垂直放入活度计中，测量其放射性活度，得出该瓶淋洗液的比活度，同时可测量淋洗液的纯度。淋洗和活度测量需要 5min。

D、标记：标记在同一手套箱内进行，与测量活度的为同一人，用于标记的冻干药盒在标记操作前经完整性检查后传递至手套箱，进行手动标记，同位素标记过程约 30min。

E、质检：根据需要，在手套箱内将质检需要的放射性药物用注射器抽取少量滴在专用 PH 纸条上或者层析条上进行质检、质控；

F、分装：医护人员根据患者用药需求，在专用手套箱内，对标记、质检后的放

射性药物进行分装，再将盛有放射性药物的注射器置入转移铅盒，并转移到注射窗。
淋洗制药工作流程及产污环节见图 9-10。

图 9-10 锝-99m 淋洗工作流程及产污环节示意图

2) 锝发生器

本项目使用锝发生器 (^{68}Ge (^{68}Ga)) 为医院向有资质的供应商采购，拟购锝发生器最大规格为 30mCi，由供货商在医院上班前负责配送至负二层核医学制药区接收室，交给医院物料接收人员，由物料接收人员采用核素洁梯送至负一层核素诊断区源库暂存。

① 锝发生器淋洗原理

^{68}Ge (^{68}Ga) 是由母体核 SGe(半衰期为 287 天)和子体核 SGa(半衰期为 63.8 分钟)组成。它具有母体半衰期长，便于长期使用，子体核是正电子发射，在医学诊断中可采用正电子扫描、提高确诊率，以及子体核半衰期短，降低病人所受的辐射剂量等优点。

锝发生器的内部结构及实景与钼发生器类似，锝发生器属于色谱柱 (Chromatographic column) 型发生器，基本部件是活化氧化铝柱、淋洗系统和用于保护工作人员的辐射屏蔽套。 ^{68}Ga 由活化氧化铝柱内 ^{68}Ge 不断裂变产生，并不被活化氧化铝柱吸附，当加入适当的淋洗剂时， ^{68}Ga 便以 $^{68}\text{GaO}^{4-}$ 的形式被淋洗出来，称之为“挤奶”。为了使用方便，一套锝发生器除基本部件外，常附加子体核素溶液接收瓶 (即负压瓶) 和一定量的淋洗剂 (0.05~0.15NaCl)。由于母体核素的不断衰变就不断地产生子体核素，因而核素发生器可以反复淋洗制得子体核素。但为了保证有效的使用量，两次淋洗之间必须有一定的时间间隔，以保证子体核素在分离柱上的再积聚。一般情况下，锝发生器每隔数小时可淋洗一次。

② 淋洗操作流程及产污环节

A、发生器转移：外购获得的 ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 从源库取出，经检查合格后，连同货包转移到手套箱内进行暂存；

B、淋洗操作：在负一层分装注射室手套箱内对发生器进行淋洗操作。具体的淋洗操作如下：

a)准备：开负压瓶、0.9%生理盐水瓶，把负压瓶装入铅制的防护罐。

b)消毒：用 75%酒精擦拭负压瓶、0.9%生理盐水瓶。

c)淋洗：先把 0.9%盐酸瓶插入发生器的双针，然后把外有防护罐的负压瓶插入发生器的单针，直至 0.9%盐酸被吸干，1 分钟后整体拔下外有防护罐的负压瓶，制得的淋洗液贮存于外有防护罐的负压瓶之中。通常整个淋洗过程约需 5min。

C、测量活度：淋洗制得的放射性核素测量活度在手套箱内进行，由负责标记的工作人员完成。工作人员用注射器吸取上一步制得的少量淋洗液（约 0.1mL），竖直放入手套箱内的活度计中，测量其放射性活度，得出该瓶淋洗液的比活度，同时可测量淋洗液的纯度。

D、标记：标记在同一手套箱内进行，与测量活度的为同一人，用于标记的冻干药盒在标记操作前经完整性检查后传递至手套箱，进行手动标记，同位素标记过程约 30min；

F、质检：根据需要，在手套箱内将质检需要的放射性药物用注射器抽取少量滴在专用 PH 纸条上、或者层析条上进行质检，质检结束后再送至注射窗。

淋洗制药工作流程及产污环节图见图 9-11。

图 9-11 镓-68 淋洗制药工作流程及产污环节示意图

（2）SPECT-CT 诊断工艺分析

1) 设备组成及工作原理

SPECT-CT（Single Photon Emission Computed Tomography，单光子发射型计算机断层显像），是一种利用放射性同位素的检查方法。基本原理是：受检者注射含放射性核素的药物，放射性核素在特定器官或组织发射出 γ 射线，穿过组织器官后到达 SPECT 探测器。SPECT 使用低能准直器对 γ 射线进行准直，通过闪烁体将 γ 射线能量转换为光信号，再通过光电倍增管将光信号转化为电信号并进行放大，得到的测量值代表在该投影线上放射性大小，再利用计算机从投影求解断层图形。功能特点是：除了显示脏器形态结构外，更重要的是可观察到脏器血流灌注、功能和代谢的变化。临床主要应用于骨骼显像、心脏灌注断层显像、甲状腺显像、肾动态显像等。

SPECT-CT 主要由三部分（探头、旋转运动机架、计算机、CT 及其他辅助设备

等)组成。探头部分主要由准直器、晶体、光导、光电倍增管、模拟定位计算电路等组成。SPECT 自身带有一个 CT 球管,在 SPECT 核素扫描的基础上,可以同时获得 CT 解剖图像,从而更有利于对疾病作出全面、准确的判断。常见的 SPECT-CT 外观图见图 9-12。

图 9-12 常见 SPECT-CT 外观图

2) 工作流程

①诊断规划

SPECT 诊断项目正式开展后,拟使用 1 台 SPECT-CT 开展核素显像,每年工作 250 天,每周工作 5 天,每天工作 8h,使用放射性核素 ^{99m}Tc ,平均每日诊断最多 20 人。

②工作流程

A、注射前准备

SPECT 诊断使用的放射性核素 ^{99m}Tc 在负一层分装注射室手套箱内制备、质检完成后,工作人员根据所需用量在屏蔽效能为 10mmPb 的手套箱内进行分装、标记和测活。在分装过程中,工作人员双手通过手套孔进入屏蔽体内进行分装标记,手套箱内始终负压通风,能够有效避免人员吸入放射性药物造成内照射。

B、注射

患者给药采用注射方式进行给药,工作人员(做好防护措施,穿铅衣、铅手套等)将装有放射性药物的铅罐转移至注射室注射窗口操作台,注射室内的注射窗口操作台安装 20mmPb 的防护窗,注射药物时,工作人员从铅罐内用配有铅防护套筒的注射器吸出药物,护士与患者分别位于铅玻璃两侧,通过注射防护窗对患者进行注射,注射时间约为 1min 每人次,护士距患者约 50cm。

C、扫描诊断

患者注射后在 SPECT 注射后等候室内静躺候诊(时间为 15min),待药物充分代谢后,通过语音呼叫,进入 SPECT-CT 室。技师在控制室内进行语音提示摆位,必要时进入机房指导(个别患者需护士进入机房进行现场摆位,摆位时间 0.5min),摆位完成后离开机房返回控制室。技师在控制室通过隔室操作对患者进行 SPECT 扫描诊断,SPECT-CT 室平均每次扫描 15min。扫描完成后患者在 SPECT 检后休息室

等候 15min 后，确定无不良反应后，从患者专用电梯离开核医学科。

3) 产污环节

在 SPECT-CT 显像检查过程中，主要的环境影响为分装、给药等操作过程对工作人员产生外照射和对工作台面、地面等造成的表面污染；操作过程产生的放射性固体废物，如放射性药物的注射器、注射针头、可能沾染放射性药物的试管、棉签、手套、口罩、污染擦拭或清洗物、废铅钨发生器等放射性固体废物；操作过程产生的放射性废水，如洗涤废水、使用放射性药物患者的排泄物；分装操作过程、给药后患者呼吸、放射性固体废物等产生的放射性废气；CT 扫描时产生的 X 射线、臭氧等。

SPECT-CT 诊断工作流程与产污环节详见图 9-13：

图 9-13 SPECT-CT 诊断工作流程及产污环节分析示意图

(3) PET-CT/MRI 诊断工艺分析

1) 设备组成及工作原理

本项目配置 PET-CT 和 PET-MRI 各 1 台用于进行正电断层扫描（Positron Emission Tomography, PET）设备，其工作原理是通过正电子核素或其标记的示踪剂，示踪人体内特定生物物质的生物活动，采用多层、环形排列于发射体周围的探头，由体外探测正电子示踪剂湮灭辐射所产生的光子，然后将获得的信息，通过计算机处理，以解剖影像的形式及其相应的生理参数，显示靶器官或病变组织的状况，借此诊断疾病，又称为生化显像或功能因子显像，是目前唯一可以在活体分子水平完成生物学显示的影像技术。

PET-CT 是将 PET 和 X 线计算机断层扫描（Computer Tomography, CT）组合而成的多模式成像系统，是目前全球最高端的医学影像设备，同时也是一种可以在分子水平成像的影像技术。PET-CT 将 PET 与 CT 融为一体，使两种成像技术优势互补，PET 图像提供功能和代谢等分子信息，工作时，其 CT 球管发射 X 射线，穿透人体组织，其探测器获得的数据不仅用于重建 CT 图像，同时提供给 PET 作为衰减校正的参数，在此基础上再进行 PET 图像的重建。所显示的图像为两者图像融合的结果，即细胞的代谢显像和所处的解剖位置。

PET-CT/MRI 结构示意图见图 9-14。

图 9-14 PET-CT/MRI 结构示意图

PET-MRI 是结合正电子扫描（PET）和磁极共振照影术（MRI）的检验方法。MRI 可显示人体内部器官的精确结构图像，而 PET 则显示人体的代谢活动情况。利用 PET-MRI 照影技术，只需进行一次检查即可同时获取 MRI 和 PET 的图像。该设备可进行全身和特定身体部位的检查。

2) PET-CT/MRI 诊断流程与产污环节

①诊断规划

PET-CT/MRI 利用回旋加速器打靶生产的 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 和淋洗制备的 ^{68}Ga 进行显像诊断，每年工作 250 天，每周工作 5 天，每天工作 8h，每天最多诊断 30 人。

②工作流程

A、药物分装

本项目工作人员根据影像诊断所需的药物用量在分装注射室手套箱（60mmPb）内进行分装和测活。在分装过程中，工作人员双手通过手套孔进入屏蔽体内进行分装，手套箱内始终负压通风，能够有效避免人员吸入放射性药物造成内照射。

B、注射

患者给药采用注射方式进行给药，工作人员（做好防护措施，穿铅衣、铅手套等）将分装后的放射性同位素药物放入 20mmPb 注射器提盒内，再转移到注射窗口，注射窗口操作台拟安装 40mmPb 防护窗，注射药物时，工作人员与患者分别位于铅玻璃两侧，通过注射防护窗对患者进行注射，注射时间约为 1min 每人，护士距患者约 50cm。

C、扫描

患者注射完成后，接受注射的患者在注射后等候室观察 5-25min。待药物在体内有一定程度的代谢后，护士通过语音呼叫，进入 PET-CT 或 PET-MRI 室。技师在控制室内进行语音提示摆位，必要时进入机房指导（个别患者需护士进入机房进行现场摆位，每次摆位时间约 0.5min），摆位完成后离开机房返回控制室。技师隔室操作对患者进行扫描诊断，平均每次扫描约 25min。

D、离开核医学科

扫描完成后患者在留观室等候 30min，无不良反应后从患者出口离开核医学科。

③产污环节

PET-CT/MRI 显像诊断的主要环境影响为：分装、给药过程对工作人员产生外照射；分装、给药过程对工作台面、地面等造成的表面污染；操作过程产生的放射性固体废物，如使用放射性药物的注射器、注射针头、药物的服药杯、可能沾染放射性药物的试管、棉签、手套、口罩、污染擦拭或清洗物等放射性固体废物；操作过程产生的放射性废水，如洗涤废水、使用放射性药物患者的排泄物；分装过程中产生的放射性废气；CT 扫描时产生的 X 射线、臭氧。

在核素显像检查过程中，主要的环境影响为注射、检前休息观察过程对工作人员产生外照射；注射过程对工作台面、地面等造成的表面污染；操作过程产生的注射器、注射针头、可能沾染放射性药物的棉签、手套、口罩、污染擦拭或清洗物等放射性固体废物；操作过程产生的洗涤废水、使用放射性药物患者的排泄物等放射性废水。

图 9-15 PET-CT 诊断流程及产污环节示意图

图 9-15 PET-MRI 诊断流程及产污环节示意图

(4) 负一层核素诊断区路径规划

1) 人员路径

①**工作人员路径:**分装给药人员从核素诊断区西南角进入医生廊，再沿东侧走道直行，经更衣缓冲间更衣后进入分装注射室，进行淋洗、质控、分装、注射药物等操作，操作结束后原路径离开核医学核素诊断区；核素诊断区设备操作及摆位工作人员从核素诊断区进入西南角进入医生廊，再沿北侧走道直行到底后，向西直行分别到达设备控制廊和设备机房内进行摆位，患者诊断扫描结束后，沿原路径离开。

②**患者路径:**患者根据预约到负一层核医学诊断区接待台签到，进行预埋针后到等候区等候叫号。听到广播叫号通知后，分别前往对面的 SPECT、PET 注射窗口接受核素静脉注射，注射完毕后分别进入 SPECT、PET/VIP PET 给药后候诊室等待，听到广播叫号后分别进入 SPECT-CT、PET-CT 或 PET-MRI 室进行扫描成像检查；扫描完毕分别进入 SPECT 检后休息室、PET 检后休息室休息留观，留观结束后患者经专用电梯厅患者专用电梯离开。

2) 物流路径

①**放射性药物路径**：PET 诊断所用回旋加速器打靶生产的药物由负二层核素制备区制备后，经核素洁梯传送到负一层源库，再转移到分装注射室手套箱内进行分装；PET 诊断所用外购发生器淋洗药物和 SPECT 诊断所用核素，由供货商提供发生器并配送至负二层接收室后，经核素洁梯送入负一层核素诊断区源库，再分别转移到手套箱内进行淋洗、质控、标记、分装等操作后，再送到对应的注射窗，由注射人员隔窗为患者注射给药。

②**放射性固体废物路径**：在核素诊断区分装注射室、给药区、给药后候诊室、检后休息室内拟放置放射性废物桶，用于收集操作过程和患者等候留观期间产生的放射性固体废物。放射性固体废物经暂存桶收集后均送入同层的源库西侧放射性废物暂存间暂存衰变处理，达到清洁解控水平后经核素污梯运出，作为医疗废物最终交由有资质的单位处理。

图 9-16 负一层核素诊断区人流、物流路径图

因此，上述人流、物流均有独立的路径，满足 HJ1188-2021 中关于“核医学设置相应物理隔离和单独的人员、物流通道”要求。

3) 放射性废水路径

根据设计图，医院拟在核素诊断区设置 1 套放射性废水管道，管道起于 PET 检后休息室和 SPECT 检后休息室，经过合管后向东走管，再与放射性核素操作区（医护人员沐浴→分装注射室→SPECT 给药后候诊室（卫生间））合管后，经污洗间→PET 给药后候诊室（卫生间）后，向南走管至分装注射室东侧时，向下穿过楼板，在负二层屋顶采用一定坡度向东自流走管，经管道牵引至短半衰期降解池后，进入短半衰期衰变池进行暂存衰变，具体路径见下图。

图 9-17 负一层核素诊断区放射性废水管道路径示意图

负一层核素诊断区采用倾斜的管道自流进入短半衰期衰变池内，上述采取的措施满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“核医学科工作场所应设置槽式或推流式废水衰变池，收集放射性药物操作场所、给药后患者卫生间、卫生

通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液”的要求。

4) 放射性废气路径

根据设计图，医院拟在负一层核素诊断区内设 2 套排风管道、共 2 根排气筒，1 套通风管道，该区域内各功能用房内通风量均小于排风量，排风口均位于项目所在楼屋顶。其中，排风管道分别为核素诊断区、手套箱专用排风管道。

负一层核素诊断区排风管道（P(B1)-RF-4）共设 4 条排风管道路径分支，管道路径由东向西、北向南走管，最后合管为 1 根排风管道进入场所西南侧医护电梯北侧排风井内，最终引至屋面（高约 49.7m）经活性炭过滤装置过滤后，高于屋面 2m 处排放；负一层核素诊断区 PET 手套箱和 SPECT 手套箱设 1 套独立的排风管道（P(B2-3F)-RF-5），排风管道经分装注射室内手套箱（顶壁内侧设高效过滤装置）引出后，向南进入核素洁梯北侧排风井，在排风井内与其他场所密闭设施排风管道合管后，最终引至屋面（高约 49.7m）经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋面 2m 处排放。负一层核素诊断区通排风管道路径详见下图。

图 9-18 负一层核素诊断区通排风管道路径图

医院应确保负一层核素诊断区内各功能用房排风量大于新风量，各使用放射性同位素场所均处于负压环境，并应在排风管道内设止回阀，防止放射性废气及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

综上，负一层核素诊断区放射性废气处理措施满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中密闭和通排风要求：“①保持工作场所负压和各区之间的压差，使得工作场所气流由清洁区流向监督区再流向控制区；②应在手套箱设计独立排风系统，在每一个密闭设备顶壁安装高效过滤装置，经过滤装置处理后的废气经管道在楼顶经过活性炭过滤装置处理后排放等相关要求；③通风系统排气口高于本建筑物屋顶，尽可能的远离附近高层建筑。

3、二层核素治疗区

(1) 工作原理及产污环节

1) DSA-CBCT 设备组成及工作原理

DSA（*digital subtraction angiography*，数字减影血管造影装置）是影像增强器技术、电视技术和计算机科学技术相结合的产物，是应用最多的数字化 X 射线透视

设备。DSA 主要由带有影像增强器电视系统的 X 射线诊断机、高压注射器、电子计算机图像处理系统、治疗床、操作台、磁盘或磁带机和多幅照相机组成。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。两次数值相减，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。且对比度分辨率高，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。通过医用血管造影 X 射线机处理的图像，使血管的影像更为清晰，在进行介入手术时更为安全。

CBCT（Cone Beam Computed Tomography，锥形束 CT）是一种医学影像技术，它通过锥形 X 射线束扫描结合计算机重建算法生成高分辨率三维图像。通过计算机处理扫描得到的数据生成身体内部横断面、冠状面或矢状面的高分辨率图像。CBCT 图像以不同的灰度反映器官和组织对 X 线的吸收程度，具有高密度分辨力，能够清晰地显示软组织和骨骼结构。CBCT 广泛应用于临床各种疾病诊断、治疗规划和疾病监测，尤其在肿瘤、血管病变、创伤和感染的三维诊断图像上显示出极高的价值。

本项目拟使用的 DSA-CBCT 设备是集 DSA 和 CBCT 为一体的国际先进高新大型医疗设备，主要由 X 射线管、高压发生器、床体系统、控制 X 射线质量和曝光时间的控制装置、影响采集装置、为满足诊断需要而配置的机械装置和辅助装置组成，该设备同时具备 DSA 和 CBCT 的成像功能，拥有多模式成像系统，可适应多种复杂环境下的手术，DSA 部分和 CBCT 部分不能同时出射线。在介入手术室内，医生可根据需要，取用成像设备在固定位置开展介入手术诊疗。

图 9-19 X 射线装置基本原理示意图

2) 设备主要信息及参数

本项目使用的射线装置型号待定，根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)“5.1 一般要求 c)除牙科摄影和乳腺摄影用 X 射线设备外，X 射线有用线束中的所有物质形成的等效总过滤，应不小于 2.5mmAl”可知，标准要求 X 射线管/准直器的最低固有过滤当量是 2.5mmAl，结合 ICRP33 号报告 P55（图 2），该报告中无

过滤材料为 2.5mmAl 的相关数据，为进行保守预测，本次分析按照过滤材料按 2mmAl 进行考虑，即本项目 DSA 在透视模式（90kV）下，距离靶 1m 处发射率约为 8mGy/(mA·min)，拍片模式（100kV）下，距离靶 1m 处发射率约为 9.5mGy/(mA·min)。

根据《医用电气设备第 1-3 部分:基本安全和基本性能的通用要求 并列标准:诊断 X 射线设备的辐射防护》(GB 9706.103-2020)中“X 射线管组件和 X 射线源组件在加载状态下的泄漏辐射，当其在相当于基准加载条件下以标称 X 射线管电压运行时，距焦点 1m 处，1 小时内在任一 100cm²区域(主要线性尺寸不大于 20cm)的空气比释动能不应超过 1.0mGy。专用标准可对不同 X 射线设备的泄漏辐射规定不同的限值”。因此综合考虑，本项目射线装置在 1m 处泄漏射线的空气比释动能率保守取 1.0mGy/h。

3) 常规介入诊疗工艺流程及产污环节

介入诊断及治疗射线装置曝光主要分为拍片和透视两种情况。

①拍片检查

拍片检查均采用隔室操作方式，通过控制射线装置的 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，然后进入控制室，关好防护门。医生、操作人员通过控制室的计算机系统控制射线装置 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介入治疗

介入治疗通常采用近台同室操作方式。通过控制射线装置 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，距射线装置的 X 线管 0.5~1m 处，在非主射束方向。医护人员在进入介入手术室前穿戴个人防护用品（如铅防护衣、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、铅内裤、介入防护手套等），手术床旁设有屏蔽挂帘和移动式防护帘，介入手术医生位于屏蔽铅帘和移动式防护帘后方。介入治疗中，手术医生根据操作需求，踩动手术床下的脚踏开关启动射线装置 X 线系统进行透视，通过悬挂显示屏上显示的连续画面，完成介入手术操作。每台手术射线装置 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，病人离开介入手术室。

③治疗完毕关机

介入手术治疗或拍片检查结束，应及时关闭设备后，再对介入手术室进行清洁、灭菌等处理。

④产污环节

在注入造影剂之前拍片产生的 X 射线和臭氧，注入造影剂之后拍片产生的 X 射线和臭氧，介入治疗过程中间歇透视产生的 X 射线和臭氧。在手术时，产生医疗包装物和容器和药棉、纱布、手套等医疗废物。注入的造影剂不含放射性，同时射线装置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。

介入诊疗流程及产污图见图 9-20。

图9-20 介入诊疗流程及产污环节示意图

4) ^{188}Re 介入注射治疗

①工作原理

^{188}Re 介入注射治疗是利用硝基咪唑基与 ^{188}Re 核素标记的靶向性探针，该靶向性探针包括靶向乏氧肿瘤细胞的硝基咪唑以及 ^{188}Re 核素。硝基咪唑有选择性结合乏氧细胞的能力，其原理为：硝基咪唑类化合物因其亲脂性，很容易从血液扩散到组织内；当硝基咪唑类化合物进入细胞后，在细胞内硝基还原酶的作用下，有效基团（ RNO_2 ）发生还原，产生自由基阴离子（ RNO_2^- ）；在正常氧水平的细胞中，还原基团可重新被氧化为原有物质，后者可扩散到细胞外，而在乏氧细胞中，由于缺氧不能发生再氧化，此时还原产物被进一步还原为 RNHOH 或 RNH_2 而滞留在乏氧细胞内；肿瘤细胞（尤其是肿瘤中心部位）是乏氧细胞，进而使探针具有嗜肿瘤特性，而不易扩散至正常组织中。

^{188}Re 半衰期为 17h，发射高能 β 粒子（ $E_{\max}=2.1\text{MeV}$ ），同时有概率放出光子，子体为稳定核素 ^{188}Os ，主要射线能量为 155keV（15%），较低比例的 γ 射线利于辐射防护。

②工艺流程与产污环节

肿瘤科医生接诊患者，通过检查，筛选预期可开展 ^{188}Re 介入注射治疗的患者。检查结果证明符合条件后，肿瘤科医生确定注射剂量、治疗时间，通知患者来院时

间，通知核素治疗区进行 ^{188}Re 核素靶向性探针标记准备。

根据患者治疗计划，向有资质的单位预定 ^{188}Re 核素。核医学科标记靶向性探针，用铅罐（内侧为轻质材料）将注射器转运至二层核素治疗区介入手术室，工作人员取出注射器，注入患者体内。术后 48 小时内进行 SPECT-CT 检查核素分布情况，在二层核素治疗区北侧隔离住院病房内住院留观。治疗结束后，转移至原病房接受其它治疗。具体操作流程如下：

A、医院肿瘤科医生为患者做检查，筛选符合条件的患者，开展肿瘤标志物、血常规、尿/大便常规、凝血功能、血生化、妊娠实验等；

B、结合影像诊断情况，判断患者适应症；

C、明确可开展 ^{188}Re 介入注射治疗的患者，核医学科向有资质的供方订购已经淋洗、分装好的 ^{188}Re 核素；

D、供药方安排专人派送 ^{188}Re 核素至负二层接收室，由医院安排的对接人员将 ^{188}Re 核素连同屏蔽容器转移至核素洁梯内，传送至二层核素治疗区源库；

E、二层核素治疗区工作人员入库登记后，将放射性核素 ^{188}Re 取出后，转移至手套箱标记靶向性探针，其中近距离接触放射性同位素的时间约 5min；

F、根据治疗计划安排，将 ^{188}Re 介入注射治疗核素装入铅容器（内层轻质材料），转移至介入手术室内；

G、在 CBCT 引导下，医生将刺针在患者患处作穿刺。CBCT 扫描期间，工作人员撤离机房；

H、借助穿刺针，工作人员将“ ^{188}Re ”注射入患处。注射时，工作人员穿戴 0.5mmPb 防护用品位于 2mmPb 移动注射车/铅屏风后，注射针筒外套 2mmPb 屏蔽套（内层为轻质材料），每次治疗注射时间约 20s；

I、注射完成后，移除穿刺针。将患者转移至病房治疗区隔离病房住院留观；

J、注射治疗后 48h 内，根据医院安排，通过患者电梯到负一层诊断区 SPECT-CT 上扫描检查药物分布情况（利用 ^{188}Re 衰变放出的光子，不需再注射放射性核素）。

K、患者离开核医学科隔离病房，回原病房接受其它治疗。

图 9-21 ^{188}Re 介入注射治疗工作流程和产污环节示意图

5) ^{90}Y 微球介入治疗

① ^{90}Y 微球介入治疗工作原理

^{90}Y 发出的 β 射线最大能量为 2.284MeV，平均能量为 0.935MeV，在人体组织中的最大射程为 11mm，其半衰期为 2.67 天，是通过化学方法从锆-90 中提取，将其离子键结合在微球上制成的微小颗粒，药物为悬浮液形式，通过选择性动脉插管的方法将载有 ^{90}Y 放射性核素的颗粒注入肿瘤血管，使 ^{90}Y 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栓塞的特点。

目前常见 ^{90}Y 微球主要有 ^{90}Y 树脂微球、 ^{90}Y 玻璃微球和 ^{90}Y 炭微球三种，其中 ^{90}Y 玻璃微球和 ^{90}Y 炭微球不需要进行二次分装。

表9-4 常见的几种 ^{90}Y 微球特性一览表

项目	^{90}Y 玻璃微球	^{90}Y 炭微球	^{90}Y 树脂微球
半衰期	2.67d	2.67d	2.67d
形态	悬浮液	悬浮液	悬浮液
直径	20 μm ~30 μm	20 μm ~45 μm	20 μm ~60 μm
微球密度	3.6g/cm ³	1.8g/cm ³	1.6g/cm ³
微球数量/3GBq 剂量瓶	1.2 $\times 10^6$	2.7 $\times 10^6$	4 $\times 10^8$ ~8 $\times 10^8$
产品规格	3GBq~13GBq	3GBq~13GBq	3GBq
剂量可调整性	医院确定所需用量，再向药物生产厂家进行订购（不进行二次分装）		根据患者需求进行抽取确定活度剂量（需进行二次分装）

以 ^{90}Y 树脂微球为例， ^{90}Y 树脂微球是一款靶向放射治疗产品，由含有 ^{90}Y 的生物相容性树脂微球组成。该产品被广泛应用于肝癌的选择性体内放射治疗（SIRT）中，即在肝脏病灶处，通过靶向的大剂量高能量 β 辐射起到杀死癌细胞的目的，同时不伤害健康肝脏组织，被广泛用于手术治疗不可切除的肝癌。

②工作流程及产污环节

^{90}Y 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。在 ^{90}Y 微球介入治疗流程之前，医院核医学科开展病患前期评估及 ^{90}Y 微球用量的核算、订购放射性药品、放射性药品分装（仅 ^{90}Y 微球树脂微球需分装， ^{90}Y 微球炭微球和 ^{90}Y 微球玻璃微球不需分装）等工作，本项目保守按 ^{90}Y 树脂微球进行分析评价。

⁹⁰Y 微球介入治疗分为 2 个阶段，疗程周期约 14 天，工作流程如下：

A、第一阶段：放射性药物 ^{99m}Tc 的前期检查

在治疗前 7~14 天需使用锝标记聚合白蛋白（^{99m}TcMAA）注入肝动脉，以评估患者是否适合此项治疗。该阶段锝标记聚合白蛋白（^{99m}TcMAA）注射过程在二层核医学科治疗区介入手术室内完成，其原理为：锝标记聚合白蛋白（^{99m}Tc-MAA）为一种对人体无害的诊断用蛋白，分子大小近似 ⁹⁰Y 微球，可模拟 ⁹⁰Y 微球于体内分布的状态，确保 ⁹⁰Y 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。该阶段拟使用的锝标记聚合白蛋白（^{99m}TcMAA）为注射针剂。

⁹⁰Y 微球治疗在第一阶段放射性核素 ^{99m}Tc 单人次使用最大量约 $1.85 \times 10^8 \text{Bq}$ ，放射性核素由负一层核素诊断区 ⁹⁹Mo（^{99m}Tc）淋洗制备得到，经过标记、分装、质控后，由核素洁梯传送到二层核素治疗区源库。

⁹⁰Y 微球介入治疗工作流程及产污环节分析如图 9-22 所示。

图 9-22 ⁹⁰Y 微球介入治疗工作流程及产污环节

第一阶段具体工作流程如下：

- a、提前 1 天填写血管摄影同意书，并通知禁食 6~8 小时，送检前排空尿液；
- b、患者至二层核医学科治疗区介入手术室进行血管造影，确定肿瘤供血血管、必要时栓塞胃肠侧枝血管，微导管到达靶血管，由手术医生进行 ^{99m}Tc-MAA 缓慢注射，手术期间需要不间断的进行透视和拍片观察导管和药物的位置，拍片时医护人员均位于控制室内；
- c、注射完成后，生理盐水冲洗导管，撤出导管（需借助 DSA 出束照射），完成后续手术，评估患者状态；
- d、2h 内将患者转移至负一层 SPECT-CT 室，接受 SPECT-CT 扫描检查。扫描完成后，若无其他情况，患者即可从患者专用通道离开。
- e、医生根据显像结果，了解锝标记聚合白蛋白（^{99m}TcMAA）在人体分布情况，确定患者是否适合 ⁹⁰Y 微球治疗。

B、第二阶段：⁹⁰Y 微球介入注射治疗

在第一阶段，若确定患者适合 ⁹⁰Y 微球治疗，则需在 ^{99m}Tc-MAA 模拟手术后 7~10 天内完成 ⁹⁰Y 微球输注，医院根据患者具体情况医院将根据病人实际情况制定治疗

方案，并向放射性药物生产厂家订购 ^{90}Y 微球，单个病人订购 1 瓶 ^{90}Y 微球，订购的 ^{90}Y 微球最早在手术前 1 天送达医院，经负二层外购源/物料接收人员核对放射性药物名称、活度，检查药品包装和外观质量，与供药公司办理交接手续并进行台账登记后，经核素洁梯传送至二层核素治疗区源库，由医护人员转移至手套箱内（ ^{90}Y 微球剂量瓶外含 1 个透明的有机玻璃瓶防护罩，被放置在 1 个 6.4mmPb 铅罐内）。

本项目使用的 ^{90}Y 微球单支活度为 3GBq 盛放在西林瓶中，工作人员应提前根据患者情况确定需要的放射性药物活度（平均每位患者仅需注射 1.5~2.5GBq 的 ^{90}Y 微球，即可满足治疗需求），每位患者对应 1 瓶 ^{90}Y 树脂微球，剩余 ^{90}Y 树脂微球及分装操作中产生的废物统一收集后按放射性废物处置。

该阶段涉及的 ^{90}Y 微球操作过程包括放射性药物活度测量和分装等上述过程均在二层核素治疗区分装给药室的手套箱内进行。

手术前 1 天对 ^{90}Y 微球进行测量与分装：通过活度计测量活度值，计算需要抽取的 ^{90}Y 树脂微球的体积以及抽取后西林瓶内剩余活度。分装时摇晃 ^{90}Y 树脂微球西林瓶，重新悬浮 ^{90}Y 树脂微球，确认抽取准确活度后，将 ^{90}Y 树脂微球从注射器注入事先准备好的 V 瓶内，若剩余活度处于计算得剩余活度范围内，则认为抽取量准确。如抽取量不准确，需将注射器中的 ^{90}Y 树脂微球重新注入西林瓶中，重新抽取至抽取量准确。

第二阶段具体工作流程如下：

a、提前 1 天填妥血管摄影同意书，并通知禁食 6~8 小时，送检前排空尿液。

b、术前准备工作：在介入手术室手术床面铺设一次性防水垫巾，地面铺设一次性防水铺巾，并覆盖易洒落药品的所有区域，避免药物洒落区域污染；在 DSA 手术台和放置 ^{90}Y 微球推车之间的地板上放置一次性铺巾，导管接头下方需放置双层铺巾，以防术中发生放射性污染；同时在手术室内放置放射性废物桶及其他相关物资，手术医生穿戴好相应个人防护用品及一次性防污染服；

c、插管操作：患者至 2 层介入手术室进行血管造影，放置导管并栓塞胃肠侧枝血管；

d、给药装置准备：术中需保持输送系统的密闭性和无菌操作。若组装过程中出现任何故障，应及时更换给药装置。严禁在给药装置和微导管之间使用任何装置。输注前介入医师与物理师共同核对 ^{90}Y 微球产品和剂量是否准确，所有装置是否连

接正确。确认后方可将微导管连接到 ^{90}Y 微球容器的输出管。

e、药物注射：将 ^{90}Y 微球药品分批次缓慢输注，并且在输注过程中注入造影剂以确认血管内液体流动情况，避免返流和血管堵塞情况的发生。医师操作期间的躯干部位距离盒子应超过 50cm，本步骤持续时间约为 20min，操作期间需交替进行 DSA 透视操作 2 到 3 次，观察药品注入情况。

f、拔管操作：注入结束后，使用无菌注射用水或 5%右旋糖苷冲洗导管，确认导管内无微球残留后，抽离患者体内的导管，使用无菌布包裹导管，断开导管与输液管之间的连接，直接将所有管线及 V 瓶弃置于专用的放射性废物桶内。拔管过程最多持续 5min，拔管期间医护人员将受到来自患者体内放射性核素所致轫致辐射的照射。从药品注入前准备到注入后拔管，持续时间约 30min。

g、成像检查：完成 ^{90}Y 微球注入后，辐射工作人员将再次进行透视和摄影检查，查看微球注入部位是否达到预期部位，防止微球错位对病人造成风险，同时取出放置的注入导管。

h、患者转运：在病人身上遮盖 0.5mm 铅当量的铅方巾，按照患者路径送至核素治疗区北侧隔离病房内住院留观。

i、术后监测及解控：手术结束后对所有辐射工作人员体表、手术床、工作台面、工作椅及地面等区域进行表面污染水平检测，根据 GB18871-2002：“工作台、设备、墙壁、地面的 β 表面污染应小于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，辐射工作人员工作服、手套、工作鞋的 β 表面污染应小于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，手、皮肤、内衣、工作袜的 β 表面污染应小于 $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ”。若表面污染水平超过控制水平，应采取相应的去污措施，并将相关非解控物品作为放射性固体废物收集至放射性废物桶内。待表面污染水平监测合格且污物转运完毕后，对介入手术室进行解控。

j、住院隔离治疗 24h 内安排给药后患者至 SPECT-CT 室进行扫描，扫描时间约为 20min，确定 ^{90}Y 微球在患者体内的滞留位置，患者检查完成后即可出院或接受其他治疗。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）附录 B，表 B.1 放射治疗患者出院时体内放射性核素活度的要求， ^{90}Y 植入患者出院时体内放射性活度应 $\leq 2500\text{MBq}$ ，本项目对单个患者的 ^{90}Y 最大植入量为 2.5GBq （ 2500MBq ），满足出院活度限值要求，患者术后留观属于医学留观。

③工作负荷

根据医院提供资料,接受 ^{90}Y 介入微球治疗患者约100例/年,每台手术注射药物前插管操作拍片约0.5min,透视约5min, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及 ^{90}Y 核素药物输注均需利用DSA部分进行,本项目保守考虑单台介入手术平均透视模式各运行15min,拍片模式各出束0.5min;放射性药物 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 前期检验阶段及 ^{90}Y 微球的介入注射阶段的显像扫描均依托负一层SPECT-CT室进行,保守考虑单次显像扫描20min。

6) ^{125}I 粒籽源、 ^{103}Pd 种子源 植入治疗

①工作原理

^{125}I 粒籽源和 ^{103}Pd 种子源一般由高纯钛合金管内置全杆标记的银棒/经激光焊制而成,通常采用外径为0.8mm、长为4.5mm的钛管密封而成(详见图9-28),一般是在B超、CT及计算机三维立体定向计划系统精确指导下将 ^{125}I 和 ^{103}Pd 籽源通过手术或采用特殊防辐射植入器,将籽源一次性永久植入肿瘤组织或植于手术切除肿瘤的残存癌床内,籽源能持续低剂量的释放 γ 射线,通过直接作用于肿瘤细胞的DNA,造成DNA的双链断裂,另外还可间接使体内水分子的电离,产生自由基,促进肿瘤细胞的凋亡,使敏感的肿瘤细胞迅速死亡,不敏感的静止期细胞一旦进入分裂期,在 γ 射线的持续作用下又迅速凋亡。本项目粒籽植入手术利用介入手术室内DSA-CBCT设备开展,植入粒子经过足够半衰期和足够的剂量,使肿瘤细胞无法繁殖,从而达到治疗肿瘤的目的,持续有效地杀灭肿瘤细胞。

图 9-23 ^{125}I 粒籽源、 ^{103}Pd 种子源 结构示意图

②工作流程及产污环节

在整个籽源植入治疗流程中,二层核素治疗区涉及的 ^{125}I 和 ^{103}Pd 籽源在源库内暂存,之后根据需要在分装给药室内进行质检、消毒,再送至介入手术室,在CBCT扫描定位后,进行粒籽植入手术,手术完成后再次利用CBCT扫描,确定植入粒籽植入位置及数量后,将病人转移至隔离病房内住院留观,手术过程及住院期间的产污主要为X射线、 γ 射线、废粒籽源等。治疗流程及污染物产生位置简单地如图9-29所示。

图 9-24 密封籽源植入手术及产污环节示意图

7) 敷贴治疗

①工作原理

放射性药物敷贴治疗主要用于某些皮肤病和眼科疾病，本项目治疗用敷贴器的放射源为 ^{90}Sr - ^{90}Y 。

放射性药物敷贴治疗的原理是将一定活度的 ^{90}Sr 放射性核素，通过一定的方式密封一起，制成具有不同形状和面积的面状源，作为敷贴用的放射源。 ^{90}Sr 皮肤敷贴器是将 ^{90}Sr 不溶性化合物均匀滚轧在银底与金面之间，装在铝合金壳内，制成一定尺寸标准的敷贴放射源。 ^{90}Sr 敷贴器除铝合金外壳外，还配有铝合金手柄和有机玻璃防护屏，使用时将手柄插入有机玻璃防护屏中心孔内，并拧入铝合金源壳螺栓孔中。 ^{90}Sr 具有较长半衰期，核医学科医生诊断后，根据患者患处的实际情况，设置敷贴治疗时间，敷贴治疗完成后，收回敷贴源，经过消毒处理后再供其他患者使用。

②工艺流程

A、接诊患者，确认需要实施敷贴治疗；

B、根据诊断情况，核算敷贴治疗时间；

C、医生告知患者可能受到的辐射危害后，采用防护材料（如橡皮或塑料等）将病灶周围正常皮肤覆盖，避免受到不必要的照射。然后再取出敷贴器，用胶布或绷带将敷贴器固定于病变处，再将敷贴器上面放置大于敷贴器面积的防护材料并固定，记录敷贴时间。

D、医生为患者完成敷贴，医生收回敷贴源，患者沿就诊路线离开医院。

图 9-25 敷贴治疗的工作流程与产污环节图

8) ^{131}I 甲状腺吸碘功能测定（甲吸检测）

①工作原理

甲状腺吸 ^{131}I 功能试验是了解甲状腺碘代谢的常用方法。甲状腺具有摄取和浓聚碘的能力，碘参与甲状腺激素合成、分泌的全过程。在空腹条件下，口服放射性 ^{131}I 后，经胃肠吸收并随血流进入甲状腺，并迅速被甲状腺滤泡上皮细胞摄取，其摄取量与速度与甲状腺的功能密切相关。因此，利用甲状腺功能测定仪获得不同时间的甲状腺摄碘率，以此来评价甲状腺的功能状态。

②工作流程、产污环节及污染因子

医院根据与病人预约情况提前向药物供货商订购放射性核素 ^{131}I ，由药物供货商负责将药物运输至负二层接收室，通过核素洁梯传送至二层源库，由医生从源库取出后送到甲吸室。医生通知患者进入甲吸室，按开单的药物用量直接给每个病人口服。患者用药后便离开甲吸室，每隔一段时间回到甲吸室进行甲吸检测，检测后就可以离开医院。甲状腺吸碘功能测定流程及产污环节见图 9-26。

图 9-26 ^{131}I 甲吸检测工作流程及产污环节分析示意图

9) ^{89}Sr 治疗骨转移项目

①工作原理

常见的恶性肿瘤中乳腺癌、肺癌和前列腺癌等常发生骨转移。它们发生骨转移时，肿瘤细胞释放破骨细胞激活因子，后者刺激破骨细胞对骨质的吸收，导致骨溶解破坏的发生。同时，肿瘤细胞能分泌一些致病介质，如前列腺素、乳酸等，导致顽固性疼痛。

目前，骨转移癌引起的疼痛一般利用放射性药物治疗，如 ^{89}Sr 核素注射液。 ^{89}Sr 是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，发射出 β 射线，利用其辐射效应杀伤癌细胞，缩小病灶，起到良好的镇痛作用。

②工艺流程及产污环节

医院根据与病人预约情况提前向药物供货商订 ^{89}Sr 注射液，由药物供货商负责将药物运输至负二层接收室内，由核素洁梯传送至二层核素治疗区， ^{89}Sr 注射液按需订购暂存在源库储源柜中，不用稀释分装。患者先在护士站登记并提前如厕，然后医生广播通知患者前往核医学科治疗区域注射给药窗口，医护人员将配送的药物直接给每个患者注射。患者注射药物后，在留观室进行一定时间的观察，如无异常情况，患者随即就可以离开医院。 ^{89}Sr 治疗流程及产污环节见图 9-27。

图 9-27 ^{89}Sr 治疗骨转移项目工作流程及产污环节分析示意图

10) 其他核素治疗项目

①工作原理

^{225}Ac 治疗： ^{225}Ac 为 α 治疗核素，半衰期为 10 天。主要发射 α 辐射，具有较 β 射

线更高的传能线密度，可以直接损伤细胞的 DNA，具有极强的细胞杀伤能力，其在组织中的穿透距离为 50~90 μm ，是细胞直径的尺度，在 ^{225}Ac 的衰变过程中，可以高效地释放 α 射线，可对周围病变细胞造成电离辐射，进而抑制病变细胞的生长甚至杀死病变细胞。 ^{225}Ac 可根据不同载体治疗不同类型肿瘤，如用于前列腺癌、神经内分泌、肾上腺或肾上腺外的嗜铬组织肿瘤等。

^{223}Ra 治疗： ^{223}Ra 为 α 治疗核素，半衰期为 11.43 天，主要利用核素衰变产生射线进行疾病治疗，原理是利用放射性核素参与人体代谢高浓度聚集在特定组织内，其发射的 α 射线可对周围病变细胞造成电离辐射，进而抑制病变细胞的生长甚至杀死病变细胞，主要用于肿瘤骨转移治疗。

^{153}Sm 治疗：含放射性核素的 ^{153}Sm 治疗药物，主要适用于成骨性骨转移且核素骨扫描显示放射性浓聚灶患者的疼痛治疗，尤其对前列腺癌伴广泛骨转移患者具有针对性，该药物通过静脉注射进入体内后， ^{153}Sm 与骨骼中的羟基磷灰石结合，形成放射性螯合物。由于骨转移灶区域对放射性物质的吸收能力显著高于正常骨组织（摄取比值可达 17:1），药物会优先在成骨性骨转移灶部位浓聚，通过 β 射线释放的能量破坏癌细胞代谢，达到缓解疼痛的目的。此外，药物在体内清除较快，约 6 小时后全身存留稳定在 40%左右，其中 90%被骨骼摄取。其半衰期为 3.7 小时，主要通过肾脏排泄（8 小时内排出 56%）。这种特性使其能在短时间内定位到骨转移灶，减少对正常组织的辐射损伤。

^{186}Re 治疗： ^{186}Re 是一种治疗性放射性核素，其治疗原理基于其物理特性和靶向递送机制，主要应用于中枢神经系统肿瘤（如脑膜转移、胶质母细胞瘤）及骨转移癌的治疗。该核素衰变产生 β 射线能量较低，能在局部高效破坏癌细胞 DNA，诱导肿瘤细胞凋亡，同时减少对周围健康组织的损伤； ^{186}Re 核素药物采用 "纳米脂质体包裹技术"封装在脂质体（纳米级脂肪球）内后，可实现结合载体实现精准投送到脑膜、中枢神经系统和骨转移病灶。半衰期较短（约 3.7 天），释放 γ 射线，可通过影像技术实时追踪药物分布，辅助医生调整剂量和定位，提升治疗精准度能够确保辐射剂量快速衰减，降低长期副作用风险半衰期。

②核素衰变子体

本项目使用的大多数核素经过一次衰变后能够达到稳定状态，但是 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac （ α 核素）及其子体需要多级衰变后才能达到稳定状态，本项目使用的 α 核素衰变

链及子体特征性质如下。

A、²²³Ra 衰变链

核素 ²²³Ra 半衰期为 11.43d，衰变产生的子体有 ²¹⁹Rn、²¹⁵Po、²¹¹Pb、²¹¹Bi、²¹¹Po、²⁰⁷Tl。²²³Ra 经过多次 α 衰变，最终生成稳定的 ²⁰⁷Pb。²²³Ra 经 α 衰变，放出 5.7MeV 的能量，产生半衰期为 3.96s 的子体 ²¹⁹Rn。²¹⁹Rn 经 α 衰变，放出 6.8MeV 的能量，生成半衰期为 1.78ms 的子体 ²¹⁵Po。²¹⁵Po 经 α 衰变，放出 7.4MeV 的能量，生成半衰期为 36.1min 的子体 ²¹¹Pb。²¹¹Pb 为 β^- 发射体，经过衰变后产生半衰期为 2.14min 的子体 ²¹¹Bi。²¹¹Bi 最主要的衰变是通过 α 衰变，放出 6.6MeV 的能量，生成半衰期为 4.77min 的 ²⁰⁷Tl。²⁰⁷Tl 最后经过 β^- 衰变产生稳定的 ²⁰⁷Pb。²¹¹Bi 另一条次要的衰变途径是先经 β^- 衰变产生半衰期为 516ms 的子体 ²¹¹Po。最后 ²¹¹Po 经 α 衰变，生成稳定状态的 ²⁰⁷Pb，本项目使用的核素 ²²³Ra 主要衰变链见图 9-44。

B、²²⁵Ac 衰变链

核素 ²²⁵Ac 半衰期为 10.0d，产生的放射性同位素子体有 ²²¹Fr、²¹⁷At、²¹⁷Ra、²¹³Bi、²¹³Po、²⁰⁹Pb、²⁰⁹Tl 和 ²⁰⁹Bi。²²⁵Ac 经过多次 α 衰变和 β^- 衰变后，最终生成稳定的 ²⁰⁹Bi。²²⁵Ac 首先经 α 衰变，生成半衰期为 4.8min 的子体 ²²¹Fr。²²¹Fr 经 α 衰变，产生半衰期为 32ms 的子体 ²¹⁷At。²¹⁷At 中 99.9%经 α 衰变，生成半衰期为 45.6min 的子体 ²¹³Bi。²¹³Bi 子体中 98%进行 β^- 衰变后，产生半衰期 4.2us 的 ²¹³Po，²¹³Po 经过 α 衰变、产生半衰期 3.3h 的 ²⁰⁹Pb。²¹⁷At 另一条衰变经过 β^- 衰变后，产生半衰期为 0.5ms 的子体 ²¹⁷Ra，²¹⁷Ra 经 α 衰变，产生半衰期 4.2us 的 ²¹³Po。²¹³Bi 子体另一条衰变经 α 衰变后，产生半衰期 2.2min 的 ²⁰⁹Tl，经过 β^- 衰变后，产生半衰期为 3.3h 的 ²⁰⁹Pb，²⁰⁹Pb 经过 β^- 衰变后，生成稳定状态的 ²⁰⁹Bi。本项目使用的核素 ²²⁵Ac 主要衰变链见下图。

图 9-28 本项目 α 核素主要衰变链

C、主要子体核素特性及理化性质

表 9-5 ²²³Ra 主要衰变子体核素特征表

母体/核素 (衰变分支)	半衰期	毒性	α 粒子能量 (MeV)	β 射线能量 (MeV)	主要 γ 射线能 量 (MeV)	剂量率常数 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)
²²³ Ra (100%)	11.43d	极毒	5.716	/	0.270	8.789E-02

²¹⁹ Rn (100%)	3.96s	极毒	6.819	/	0.271	1.419E-02
²¹⁵ Po (100%)	1.78ms	极毒	7.381	/	0.439	2.861E-05
²¹¹ Pb (100%)	36.1min	中毒	/	0.47	0.405	9.836E-03
²¹¹ Bi (100%)	2.14min	高毒	6.622	0.579	0.351	1.274E-02
²⁰⁷ Tl (100%)	4.77min	高毒	/	1.43	0.898	3.524E-04
²⁰⁷ Pb (100%)	稳定					

注：①未列入衰变分支<1%的核素；②数据来源于“IAEA Nuclear Data Section 数据库”；③剂量率常数来源于《Health Physics and Radiological Health》。

表 9-6 ²²⁵Ac 主要衰变子体核素特征表

母体/核素 (衰变分支)	半衰期	毒性	α粒子能量 (MeV)	β射线能 量(MeV)	主要γ射线能 量(MeV)	剂量率常数 (μSv·m ² /MBq·h)
²²⁵ Ac	10.0d	极毒	5.830	/	0.0998	5.172E-02
²²¹ Fr (100%)	4.8min	极毒	6.341	/	0.218	1.193E-02
²¹⁷ At (100%)	32ms	极毒	7.067	/	0.258	4.331E-05
²¹³ Bi (100%)	45.6min	高毒	5.875	1.42	0.441	3.140E-02
²¹³ Po(98%)	4.2μs	极毒	8.376	/	/	5.146E-06
²⁰⁹ Tl(2%)	2.2min	高毒	/	1.80	1.567	3.496E-01
²⁰⁹ Pb (100%)	3.234h	低毒	/	0.20	/	/
²⁰⁹ Bi (100%)	稳定					

注：①未列入衰变分支<1%的核素；②数据来源于“IAEA Nuclear Data Section 数据库”；③剂量率常数来源于《Health Physics and Radiological Health》。

由上表可知，本项目使用的核素 ²²³Ra、²²⁵Ac 主要子体半衰期较短，衰变过程中主要产生α粒子、β射线、γ射线。

③工艺流程

医院根据与病人预约情况提前向药物供货商订购 ²²⁵Ac、²²³Ra、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re 已分装好的注射液，由药物供货商负责将药物运输至负二层接收室内，经核素洁梯传送到二层核素治疗区。患者先在护士站登记并提前如厕，然后医生通知患者进入注射室需要 ²²⁵Ac、²²³Ra、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re 治疗的患者在二层核医学核素治疗区给药窗口接受注射/口服药物，给药完毕后患者进入留观室内留观一定时间无异常后，离开医院，不进行住院治疗。治疗流程及产污环节见图 9-29。

图 9-29 ²²⁵Ac、²²³Ra、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re 治疗工艺流程及产污环节示意图

(2) 二层核素治疗区路径规划

1) 工作人员路径

①分装给药区工作人员路径:分装给药区工作人员从二层核素治疗区西南侧医

护电梯处分别进入分装给药室和介入手术室控制室进行相关操作，操作完成后沿原路径离开。

②门诊治疗工作人员路径:门诊治疗区工作人员从二层核素治疗区南侧分别进入敷贴室和甲吸室，为患者给药/检测工作完成后原路离开。

③患者路径主要包括非住院核素治疗患者路径、住院核素治疗患者路径和门诊治疗患者路径。

非住院核素治疗患者路径:患者从南侧大门进入二层核素治疗区，在护士站签到登记后，在患者等候区等候叫号，听到广播叫号后，从护士站向北直行，经缓冲区后进入隔离病房区走道再向西直行，在给药注射窗口接受注射后，进入留观室进行留观，留观一定时间后无异常则向西进入专用电梯厅，经患者电梯离开核素治疗区。

住院核素治疗患者路径:患者从南侧大门进入二层核素治疗区，在护士站登记后，在护士陪同下从护士站向北直行，在准备间内做好手术前的准备后，进入介入手术室接受手术植入/注入治疗，手术结束后由护士陪同下，经手术室东侧缓冲间向北直行，进入对应病房进行住院治疗，达到出院标准后，向西进入专用电梯厅，经患者电梯离开核素治疗区。

非核素治疗患者路径:患者从南侧大门经护士站登记后，在护士陪同下从护士站向北直行，在准备间内做好手术前的准备后，进入介入手术室接受介入手术治疗，手术结束后由护士陪同下，经手术室东侧准备间向南进入苏醒间苏醒后，在护士陪同下经护士站离开介入手术室。

门诊治疗患者路径:患者从南侧大门进入核素治疗区，先在护士站签到后，在候诊大厅等候，听到语音广播通知后向西分别进入甲吸室和敷贴室，经服药检测/治疗后，分别沿原路径离开。

④物流路径主要包括放射性药物进入二层核素治疗区路径、固体废物路径。

放射性药物路径:二层核素治疗区所有核素由供货商配送至负二层接收室后，经核素洁梯送入二层核素治疗区源库，再转移到手套箱内进行检测、配药、分装等操作后，再分别送到注射窗或介入手术室内进行注射给药。

放射性固体废物路径:拟在二层核素治疗区分装给药室、注射给药区、留观室、隔离病房内分别放置放射性废物桶，用于收集操作过程和患者住院/留观期间产生的放射性固体废物。分装给药区（源库、分装给药室、手套箱等）及介入手术室内产

生的放射性固体废物经暂存桶收集后送入同层源库西侧放射性废物暂存间 1 暂存衰变处理，达到清洁解控水平后经核素污梯运出，作为医疗废物最终交由有资质的单位处理；隔离病房内产生的放射性固体废物经过各房间废物暂存桶收集后，向西经专用电梯厅转运至患者出口旁的放射性废物暂存间暂存衰变，达到清洁解控水平后经核素污梯运出，作为医疗废物最终交由有资质的单位处理。

非放射性固体废物：介入手术室内产生的非放射性手术固体废物和甲吸室、敷贴室内产生的固体废物经收集后，进入手术室西南角污物暂存间内暂存，作为医疗废物进行处理；粒籽植入（ ^{125}I 、 ^{103}Pd ）隔离病房内产生的固体废物收集后，经监测未受到核素污染，由专用电梯厅污梯运出，作为医疗废物最终交由有资质的单位处理。

图 9-30 二层核素诊断区人流、物流路径示意图

根据上图可知，二层核素治疗区内有独立的人员、物流通道，并有明确物理隔离，能够满足 HJ1188-2021 中关于“核医学设置相应物理隔离和单独的人员、物流通道”要求。

④放射性废水路径

根据设计图，二层核素治疗区设计了一条专用管道收集病房区和核素操作区内产生的放射性废水，管道起于场所西侧污洗间、先后经病房、介入手术室区（淋浴室→分装给药室）合管后向东走管，在配餐室东北角外下穿至负一层楼顶向东采用坡度敷设，自流进入长半衰期降解池，最终进入 1#医疗综合楼负二层东侧（2#直线加速器机房南侧）长半衰期衰变池暂存衰变。放射性废水排水管道应采用防腐、管道内壁光滑的材质，具体见下图。

图 9-31 二层核素诊断区放射性废水管道路径示意图

二层核素治疗区排水满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“核医学科工作场所应设置槽式或推流式废水衰变池，收集放射性药物操作、病房、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液”的要求。

⑤放射性废气路径

根据设计方案，医院拟在二层核素治疗区内设 2 根新风管道，3 根放射性废气

排风管道，分别为核素治疗病房区、核素治疗操作区、密闭操作设备排风，排风口均位于项目所在楼屋顶。其中，核素治疗病房区排风管道（P(2F)-RF-7）起于东侧隔离病房，管道由西至东走管，与放射性污染被服暂存间→放射性废物暂存间→污洗间合管后，在大楼二层西侧进入排风井，最终引至屋面（约 49.7m）经活性炭过滤装置处理后，高于屋面 2m 处排放；核素治疗操作区内的排风管道（P(2F)-RF-6）起于源库，先后经放射性废物暂存间 1 及分装给药室，再与缓冲间→介入手术室→淋浴室合管后，经留观室继续向西走管，在大楼二层西侧进入排风井，最终引至屋面（约 49.7m）经活性炭过滤装置处理后，高于屋面 2m 处排放；分装给药室内密闭操作设备（手套箱、自动分装柜）设计了一套单独的排风管道（P(B2-3F)-RF-5），排风管道从密闭操作设备顶部（顶壁内侧设高效过滤装置）引出后，向南进入核素洁梯北侧排风井，与其他场所密闭设备排风管道合管后，最终引至屋面（约 49.7m），经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋面 2m 处排放。

图 9-32 二层核素治疗区通排风管道路径示意图

医院应确保二层核素治疗区内各功能区排风量大于新风量，各使用放射性同位素场所均处于负压环境，医院应在排风管道内设置气流止回阀，防止放射性废气及气溶胶回流对工作场所造成交叉污染。

综上，二层核素治疗区放射性废气处理措施满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中密闭和通排风要求：“①保持工作场所负压和各区之间的压差，使得工作场所气流由清洁区流向监督区再流向控制区；②应在手套箱设计独立排风系统，在每一个密闭设备顶壁安装活性炭过滤装置，经过滤装置处理后的废气经管道在楼顶经过活性炭过滤装置处理后排放等相关要求；③通风系统排气口高于本建筑物屋顶，尽可能的远离附近高层建筑。

4、三层核素治疗区

本项目拟在三层核医学核素治疗区内开展¹⁷⁷Lu前列腺癌治疗、¹³¹I甲亢治疗和甲癌治疗。

（1）¹⁷⁷Lu 前列腺癌治疗

1) 工作原理

¹⁷⁷Lu 专门用于所谓的肽受体放射性药物治疗，用于治疗晚期前列腺癌的药物包

含同位素 ^{177}Lu 和前列腺癌细胞表面上的前列腺特异性膜抗原(PSMA)结合的蛋白质，可以识别位于癌细胞表面并与之结合的靶向受体，放射性成分附着在这种蛋白质载体上，从而将放射性药物靶向递送至恶性细胞。 ^{177}Lu 为 β 治疗核素，根据其载体的不同治疗不同类型的肿瘤，如神经内分泌肿瘤、前列腺癌、骨转移瘤及其他各种实体肿瘤等。

2) 工艺流程

①医院根据患者预约情况提前向药物供货商订 ^{177}Lu 注射药物，由药物供货商负责药物运输至负二层接收室，经核素洁梯送入三层核素治疗区源库；

②患者根据预约情况，办理住院核素治疗手续，医护人员履行告知义务；

③医护人员从源库取出药物后，在手套箱中对放射性药物进行分装和配制；

④医生通过广播系统，通知患者到药物注射窗口接受放射性药物注射，或；

⑤患者接受药物注射后，回到住院隔离病房内接受住院观察，每名患者一般住院 2~3 天即可出院。

⑥患者达到出院要求，办理相关出院手续，医护人员告知相关注意事项。

^{177}Lu 前列腺癌治疗流程见图 9-33。

图9-33 ^{177}Lu 前列腺癌治疗流程图

(2) ^{131}I 甲亢治疗

1) 工作原理

甲状腺具有高度选择性摄取 ^{131}I 的能力，功能亢进的甲状腺组织摄取量将更多，可高达血浆的几百倍，且在甲状腺内停留的时间较长，有效半衰期可达 3.5~5.5 天。在患者服用 ^{131}I 后，90%以上的 ^{131}I 都会聚集到患者的甲状腺，其余的 ^{131}I 随代谢排出体外。 ^{131}I 衰变为 ^{131}Xe 时放射出 95%的 β 射线，该射线能量低，在甲状腺内的平均射程仅有 0.5mm，一般不会造成甲状腺周围组织例如甲状旁腺、喉返神经等的辐射损伤。因此， ^{131}I 治疗可使部分甲状腺组织受到 β 射线的集中照射，使部分甲状腺细胞发炎症、萎缩、直至功能丧失，从而减少甲状腺激素的分泌，使亢进的功能恢复正常，达到治疗的目的。

2) 工作流程与产污分析

医院根据医生开单情况提前向药物供货商订购放射性核素 ^{131}I ，由药物供货商负责药物运输至负二层接收室，放射性药物经核素洁梯送入三层核素治疗区源库；医护人员在源库取出药物后，转入自动分装柜内，医护人员按照开单情况控制自动分装柜为患者对药物进行分装；药物分装好后，通过广播系统通知患者按照叫号顺序到自动分装窗口服药；患者服药后在甲亢室内进行一定时间的观察，如无异常情况，患者就可以离开医院。

图 9-34 ^{131}I 甲亢治疗工作流程及产污环节分析示意图

(3) ^{131}I 甲癌治疗

1) 工作原理

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

2) 工作流程、产污环节及污染因子

①医院根据患者预约情况提前向药物供货商订 ^{131}I 药物，由药物供货商负责药物运输至负二层接收室，放射性药物经核素洁梯送入三层核素治疗区源库；

②患者根据预约情况，办理住院核素治疗手续，医护人员履行告知义务；

③医护人员从源库取出药物后，将放射性药物装入自动分装柜；

④医生通过广播系统，通知患者到自动分装柜窗口取用放射性药物，医护人员通过控制终端控制自动分装柜按患者需求分装药物；

⑤患者服药后，回到住院隔离病房内接受住院观察，每名患者一般住院 3~5 天即可出院；

⑥达到出院要求，患者办理相关出院手续，医护人员告知相关注意事项。

^{131}I 甲癌治疗流程及产污环节见图 9-35。

图 9-35 ^{131}I 甲癌治疗工作流程及产污环节分析示意图

(5) 三层核素治疗区路径规划

1) 工作人员路径

工作人员路径:工作人员从三层核素治疗区西南侧更衣室进入分装给药室进行药物配置、分装、给药/注射等操作,分装、给药/注射操作完成后沿原路径离开。

2) 患者路径

①住院患者 (^{177}Lu 前列腺癌、 ^{131}I 甲癌) 路径:患者从三层核素治疗区护士站登记后,从该区域东南角入口经缓冲区进入隔离病房走道,在自动分装柜窗口领药服用或分装给药室窗口接受药物注射后,分别进入隔离病房内进行住院治疗,达到出院标准后,向西进入专用电梯厅,经患者电梯离开核素治疗区。

②非住院患者 (甲亢) 路径:患者从三层核素治疗区护士站登记后,从该区域东南角入口经缓冲区进入隔离病房走道,在自动分装柜窗口/分装给药室窗口领药服用后,向西直行进入甲亢室内进行留观,留观一定时间后如无异常,即可向北进入专用电梯厅,经患者电梯离开核素治疗区。

3) 物流路径主要包括放射性药物进入三层核素治疗区路径、放射性固体废物路径。

①放射性药物路径:三层核素治疗区所有核素由供货商配送至负二层接收室后,经核素洁梯送入三层核素治疗区源库,再转移到手套箱/自动分装柜内进行分装等操作。

②放射性固体废物路径:拟在三层核素治疗区分装给药室、注射给药区、甲亢室、隔离病房内分别放置放射性废物桶,用于收集操作过程和患者住院/留观期间产生的放射性固体废物。源库、分装给药室、手套箱等区域产生的放射性固体废物经暂存桶收集后送入同层源库西侧放射性废物暂存间暂存衰变处理,达到清洁解控水平后经核素污梯运出,作为医疗废物最终交由有资质的单位处理;隔离病房内产生的放射性固体废物经过各房间废物暂存桶收集后,向西经专用电梯厅转运至患者出口旁的放射性废物暂存间暂存衰变,达到清洁解控水平后经核素污梯运出,作为医疗废物最终交由有资质的单位处理。

图 9-36 三层核素治疗区人流、物流路径示意图

三层核素治疗区具有独立的人员、物流通道,并有明确物理隔离,满足 HJ 1188-2021 中关于“核医学设置相应物理隔离和单独的人员、物流通道”要求。

4) 放射性废水路径

三层核素治疗区设计了 1 根专用管道,用于收集隔离病房、甲亢留观、卫生通

过间、紧急淋浴等位置产生的放射性废水。三层核素治疗区放射性废水管道采用坡度设计，起于放射性污染被服间，先后经放射性废物暂存间 2、隔离病房、污洗间、淋浴室后，在配餐室东北角外侧穿过楼板至负一层楼顶向东走管，最终自流进入 1# 医疗综合楼负二层东侧（2#直线加速器机房南侧）的长半衰期衰变池内进行暂存衰变。放射性废水排水管道应采用防腐、管道内壁光滑的材质，具体见下图。

图 9-36 三层核素治疗区放射性废水管道路径示意图

三层核素治疗区排水能满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中“核医学科工作场所应设置槽式或推流式废水衰变池，收集放射性药物操作、病房、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液”的要求。

5) 放射性废气路径

根据设计方案，医院拟在三层核素治疗区内设 2 条新风管道，3 根排风管道分别为核素治疗病房区、核素治疗操作区、密闭操作设备排风，排风口均位于项目所在楼屋顶。其中，核素治疗病房区排风管道（P(3F)-RF-9）起于东侧隔离病房，管道由西至东走管，在专用电梯东侧向南进入医护电梯北侧的排风井，最终引至屋面经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋面 2m 处排放；核素治疗操作区排风管道（P(3F)-RF-8）起于患者入口缓冲区，先后经源库→放射性废物暂存间 1 及分装给药室→沐浴、更衣配药室及污洗间→放射性污染被服暂存间及放射性废物暂存间 2、甲亢室后向南进入医护电梯北侧的排风井，最终引至屋面经活性炭过滤装置处理后，高于屋面 2m 处排放；分装注射室内密闭操作设备（手套箱、自动分装柜）设计了一套单独的排风管道（P(B2-3 F)-RF-5），排风管道从密闭操作设备顶部（顶壁内侧设高效过滤装置）引出后，向南进入核素洁梯北侧排风井，与其他场所密闭设备排风管道合管后，最终引至屋面（约 49.7m），经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋面 2m 处排放。

图 9-37 三层核素治疗区通排风管道路径示意图

医院应确保三层核素治疗区内各功能区排风量大于新风量，各使用放射性同位素场所均处于负压环境，在排风管道内设置排风止回阀，防止放射性废气及气溶胶

对工作场所造成交叉污染。

综上，三层核素治疗区放射性废气处理措施满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中密闭和通排风要求：“①保持工作场所负压和各区之间的压差，使得工作场所气流由清洁区流向监督区再流向控制区；②应在手套箱设计独立排风系统，在每一个密闭设备顶壁安装活性炭过滤装置，经过滤装置处理后的废气经管道在楼顶经过活性炭过滤装置处理后排放等相关要求；③通风系统排气口高于本建筑物屋顶，尽可能的远离附近高层建筑”。

污染源项描述

（一）施工期

1、污染源项

本项目施工期没有辐射污染源项，施工内容主要为防护施工、场所装修和设备调试，施工期间产生的环境影响因子主要为固体废物、废气、废水、噪声和 X 射线。本项目防护施工、场所装修工程量校小，施工时间短，非放射性物质产生量较小。

2、非放环境影响因子

施工期非放环境影响因子主要是：废气、废水、噪声和固体废物。

（二）运行期

1、放疗中心

（1）直线加速器源项

本项目拟使用医用电子直线加速器X射线最大能量为10MV，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)中4.3.2.5规定，当加速器X射线 $\leq 10\text{MV}$ 时，中子的影响可忽略，对外环境的影响主要考虑韧致辐射发射的X射线。因此本项目电离辐射防护不需考虑中子和感生放射性防护。

①电子线

直线加速器在按电子束模式工作时，会产生高能电子束，电子束在屏蔽物质中穿透力较弱，对周围环境的影响较小。

②X射线

加速器运行期间高能电子束与靶物质相互作用时将产生高能X射线，X射线随机

器的开、关而产生和消失。

③废气

直线加速器在运行过程中，X射线作用于空气以及次级辐射等因素，可产生少量臭氧及微量氮氧化物，其中氮氧化物的产率仅为臭氧产率的三分之一，且以臭氧的毒性最高，同时国家对空气中臭氧浓度的标准严于氮氧化物。因此，本项目产生的废气主要考虑臭氧。

④废靶件

直线加速器的金属靶件更换时会有废靶件产生，废靶件作为放射性固体废物，废靶件由有资质的单位回收处置。

综上，项目运营期间，直线加速器主要污染因子为电子线、X射线、臭氧、废靶件等。

(2) 模拟定位装置源项

本项目涉及模拟CT机属于Ⅲ类医用射线装置，射线装置采用数字成像，无废显定影液及废胶片产生，其主要危害为设备工作时产生的X射线、臭氧。

2、核医学工作场所

(1) 核医学制药区污染源项分析

1) 质子

回旋加速器将 H⁺ 离子加速至 10MeV，H⁺ 离子通过碳箔脱离电子后成为质子。质子的穿透性很弱（在物质中的射程很短，仅为同等能量电子射程的几十分之一到百分之一），很容易被物质阻挡。

2) 中子

中子是回旋加速器的主要污染因子之一，主要由两部分组成：一部分为质子加速过程和通过准直器时损失打在铝质真空管壁和铝质准直器上发生 $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{n})^{27}\text{Si}$ 核反应的中子；一部分为质子射束轰击靶材料时发生 $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ 核反应，在生成 ^{18}F 的同时产生中子。

3) γ 射线

回旋加速器生产放射性核素（p，n）反应所释放的大量中子与靶周围部件、准直器、自屏蔽体等物质相互作用将释放出 γ 射线（根据加速器设备厂商提供的资料， γ 射线平均能量为 1.13MeV）。俘获反应有（n， γ ）、（n， α ）、（n，p）等，但以

释放 γ 射线为主。

回旋加速器生产的药物 (^{18}F) 发生 β^+ 衰变经湮灭反应后产生 γ 射线能量为 0.511MeV，对工作人员和公众造成外照射。

4) β 射线

回旋加速器生产的药物 (^{18}F) 为 β^+ 衰变， β^+ 射线在水中和人体组织之中的射程很短，较容易防护，不会对环境产生明显影响。此外，回旋加速器运行过程中产生的感生放射性核素多为 β 或 (β^+) 衰变，由于 β 或 (β^+) 穿透能力较弱，影响范围仅限于回旋加速器自屏蔽体内，对外环境不会产生明显的影响。

5) 感生放射性物质

项目使用的回旋加速器加速质子能量为 10MeV，质子及次生中子与加速器部件相互作用使部件活化，且感生放射性核素活度随运行时间的增长而增加。因此，在打开加速器自屏蔽时，将对工作人员造成外照射。

6) 放射性废气

①感生感生放射性物质

当加速器主机室内空气受到达到或超过产生(γ , n)反应阈能量的 γ 射线照射时，将产生 ^{15}O (半衰期 2.1min)、 ^{13}N (半衰期 10min)、 ^{11}C (半衰期 20.4min)、 ^{41}Ar (半衰期 110min)等放射性气体。 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{11}C 等产生率相当低，关键核素是 ^{41}Ar ，其主要特性参数见下表。

表 9-5 屏蔽体内的空气活化核素

核素	半衰期 (比活度, Ci/g)	衰变方式 (分支比, %)	粒子和 γ 辐射总能量 MeV/衰变	来源
^{41}Ar	1.83 h, 4.18×10^7	β^- (100)	ϵ (β^-) 0.464 ϵ (γ) 1.28	$^{40}\text{Ar}(n, \gamma) \rightarrow ^{41}\text{Ar}$

②含 ^{18}F 等核素气溶胶

回旋加速器打靶生产放射性药物过程中，靶产物 $^{18}\text{F}\text{-F}$ 在合成热室制备 FDG 时，放射性核素可能会被载带至极小的颗粒，并进入大气环境，形成含放射性核素气溶胶。

7) 放射性废水

①回旋加速器活化循环冷却水

本项目仅内循环冷却水系统位于回旋加速器的屏蔽体内，该系统循环冷却水会在回旋加速器运行期间受照而产生感生放射性核素，核素主要为 ^{15}O ($T_{1/2}=2.03\text{min}$)、

^{13}N ($T_{1/2}=9.961\text{min}$) 及 ^{11}C ($T_{1/2}=20.39\text{min}$)，其半衰期都很短。并且，正常工况下，内循环冷却水沿闭合回路在自屏蔽体内循环使用，不外排。仅在特殊情况下（如检修时发现循环冷却水漏水等事故），可能会排放，内循环冷却水系统总循环水量为 0.2m^3 。

②工作人员去污冲淋废水

辐射工作人员每日离开合成质检工作区时需进行表面沾污监测，若监测不达标需进行去污清洁，此时手部清洗废水或淋浴废水为放射性废水。

③去污时洁具清洗废水

每批次生产任务结束后需对场所进行去污监测，若监测不达标需进行去污清洁，清洁方式优先采用擦拭去污，产生的沾污擦拭用具作为放射性固废处理，在污物达标后再用洁具进行拖地，此时洁具清洗产生的废水偏安全视同放射性废水管理。

8) 放射性固体废物

回旋加速器运行期间，制药区产生的放射性固体废物主要为更换靶腔两侧的靶膜（钛膜和 HAVER 膜）、废靶件等。

热室前区内制药过程中产生的放射性固体废物主要为少量的废液、废试纸、少量的沾污放射性核素的滤膜等，工作人员进入药物热室前区佩戴的一次性手套，放化实验室内质检过程中产生的少量废样品，放射性废气过滤装置更换的滤芯等。

9) β 表面污染

药物合成、分装在对含有放射性同位素 ^{18}F 的操作中，会引起工作台、工作服和手套等产生放射性沾污，造成小面积的 β 放射性表面污染。

(2) 核素诊断、核素治疗污染源项分析

1) 放射性污染物源项

① α 、 β 及 X- γ 射线

药物在淋洗、质控、分装、测活、注射、注射后候诊、粒子质检及植入、扫描检查、留观、病房住院等过程中产生的 α 射线、 β 射线及 γ 射线，在介入手术治疗过程中复合射线装置间歇透视及拍片产生的 X 射线。

② α 、 β 放射性表面污染

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

③放射性废气

在场所内进行放射性药物淋洗、质控、分装、测活、注射、介入治疗药物的制备等操作过程中，在患者呼吸、放射性废物暂存期间，均会产生的含放射性核素废气。

④放射性废水

含有放射性同位素的患者排泄物、工作场所清洗废水等。

⑤放射性固废

本项目放射性固废主要为工作人员操作过程产生的服药杯子、污染物的注射器、针头、手套、棉签、纱布、破碎杯皿、擦拭污染物地面的物品、废发生器、更换的废活性炭等滤芯、垫纸等；放射性核素介入手术过程中，产生的放射性污染物如穿刺针、注射器、手套、纱布、一次性铺巾、去污固废等。

2) 非放射性污染源项

本项目非放射性污染物主要为电离辐射产生的 O_3 、 NO_x 等废气；工作人员产生的生活污水、医疗废水、衰变池内解控后的废水；工作人员产生的办公垃圾和生活垃圾、医疗废物等；主要设备运行过程中产生的噪声以及排风风机产生的噪声。

①废水

本项目运行后，废水主要为辐射工作人员和患者产生的生活污水，患者手术过程中产生的少量医疗废水和衰变池内解控后的废水，项目核医学工作场所产生的生活污水、医疗废水和解控后的废水依托建设单位新建的污水处理站处理，项目产生的废水经过污水处理站处理达《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）表2中预处理标准后，外排市政污水管网。

②废气

DSA-CBCT曝光过程中臭氧产生量很小，医院拟在核素治疗区设专用通排风系统，产生的臭氧通过排风管道引出后进入排风井，经排风井引至楼顶排放，经自然分解和稀释后对环境影响较小。

③固体废物

本项目使用的各类型射线装置均采用数字成像，不打印胶片，因此不会有废胶片产生，产生的非放射性固体废物主要为医疗废物和生活垃圾。其中医疗废物主要为非放射性手术时产生一定量的医用器具和药棉、纱布、手套、废造影剂、废造影

剂瓶等医用辅料及手术垃圾等，清洁解控后的放射性废物。本项目产生的医疗废物经收集后严格按照《医疗废物管理条例》的要求分类转运至医疗废物暂存间，统一收集后交由有资质的单位处置。患者产生的生活垃圾较少，辐射工作人员产生的办公垃圾和生活垃圾均不属于医疗废物，医院应按照当地管理部门要求，进行统一收集后交由环卫部门统一定期清运。

④噪声

本项目所有设备选用低噪声设备，噪声主要为通排风系统噪声，最大源强不超过 65dB（A），通过建筑墙体隔声及距离衰减后，运行期间厂界噪声可满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2 类标准要求。

表 10 辐射安全与防护

项目安全设施

一、工作场所布局与分区

医院拟在 1#医疗综合楼内新建放疗中心及核医学科工作场所，其中放疗中心位于负二层东北侧，核医学制药区位于负二层西北侧、核素诊断区位于负一层北侧、核素治疗区位于二层和三层北侧区域，负二层制药区与负一层核素诊断区、二层和三层核素治疗区通过核素洁梯及核素污梯连通，负一层核素诊断区、二层和三层核素治疗区涉及了上下连通的患者专用电梯。

1、负二层平面布局

在 1#医疗综合楼负二层内，放疗中心位于负二层东北侧，核医学制药区位于负二层西北侧，区域其余为地下停车区，负二层平面布局见附图 3。

放疗中心呈现回字形布置，中间为采光井，2 台直线加速器室及控制室、弱电设备间由南向北布置在放疗中心东侧，南侧为模拟 CT 室及控制室、候诊区等辅助区域，西侧和北侧为护士站、更衣室、医生办公区等辅助用房区域；正上方为一层医院食物加工区。

在核医学制药区内，东西方向的物流走道和医护电梯区域将其分为南、北 2 个部分。回旋加速器机房、热室（热室后区、热室前区）、放化实验室集中布置在核医学制药区北侧，周围布置了放射性废物暂存库、设备间、控制室、理化实验室区、清洗间、更衣间等辅助区域；物料走道、接收室、库房、核素洁梯、核素污梯、放射性废物库、污物处理间及污洗等位于核医学制药区南部；正上方为负一层核医学科核素诊断区。

2、负一层平面布局

在 1#医疗综合楼负一层内，核医学核素诊断区位于大楼北侧，西侧为医护活动及地下停车场坡道；东侧为放疗中心顶部回填及消防水池区域，南侧地下停车场区域。在核素诊断区外西侧为医生办公区，分布了主任及医生办公室、示教会议室等；北侧为控制廊；西南侧为医护通道及地下停车场；东侧为患者接待及等候区，患者电梯厅、预留诊室等。在核素诊断区内，源库、放射性废物暂存间、分装注射室、给药区、运

动负荷室及医护人员更衣、沐浴等辅助区域位于核素诊断区南部；自西向东依次为 SPECT 检后休息室（含卫生间）、SPECT 给药后候诊室（含卫生间）、VIP PET 给药后候诊室（含卫生间）、PET 给药后候诊室（含卫生间）；北侧自东向西依次为 PET-CT 室、PET-MRI 室（含准备间、设备间）、SPECT-CT 室、PET 检后休息室（含卫生间），专用电梯厅（含患者电梯）位于 SPECT-CT 检后休息室与 PET-CT 检后休息室之间；正上方为放射科影像检查区；正下方为核医学制药区。负一层平面布局见附图 4。

3、二层平面布局

在 1#医疗综合楼二层内，北侧为“T”形布局的核医学核素治疗区，南侧为门诊治疗区。在二层核医学核素治疗区外，西南侧为医护通道及预留诊疗用房；南侧为门诊患者走道；东侧主要为患者通道（电梯厅、扶梯等）、公共卫生间、库房等。在核医学核素治疗区内，病房走道及医护走道将其分为南北 2 个部分，北侧区域自东向西依次为隔离病房（6 间）、专用电梯厅（含患者电梯等）、放射性废物及污染被服暂存间、污洗间等、医护办公区（值班室、更衣室、示教/办公室等），南部区域主要为源库、核素洁梯及污梯、分装给药室、放射性废物暂存间、留观室、介入手术室及控制室、甲吸室、敷贴室及其他配套用房；正上方为核素治疗区；正下方为放射科影像检查区。二层平面布局见附图 6。

4、三层平面布局

在 1#医疗综合楼三层内，北侧为核医学核素治疗区，中部为临检大厅及样本分析实验区，南侧为门诊治疗区，东侧为患者电梯厅、员工餐厅等。在核素治疗区外，南侧自西向东依次为污物暂存间、医护电梯厅（含医护电梯及楼道间等）、临检办公区、护士站、患者电梯厅（含患者电梯等）等，东侧为公共卫生间。在核素治疗区内，在核医学核素治疗区内，病房走道及医护走道将其分为南北 2 个部分，北侧区域自东向西依次为隔离病房（6 间）、专用电梯厅（含患者电梯等）、放射性废物及污染被服暂存间、甲亢室（含卫生间）、医护办公区（值班室、更衣室、示教/办公室等），南部区域主要为源库、核素洁梯及污梯、分装给药室、放射性废物暂存间、配药室、污洗间、更衣室及其他配套用房；正上方为检测、实验办公区；正下方为核素治疗区。三层平面布局见附图 7。

二、辐射工作场所两区划分

1、控制区和监督区的划分

为了便于加强管理，切实做好辐射安全防范和管理工作的，项目应当按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求在辐射工作场所内划出控制区和监督区，同时在地面设置行走箭头标识，严格规定各类人员的活动路径。

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

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

本项目控制区和监督区划分情况见表 10-1，两区划分示意图见图 10-1~10-5。

表 10-1 项目控制区和监督区划分情况

项目		控制区	监督区
放疗中心		1#直线加速器机房（含迷道）、2#直线加速器机房（含迷道）、模拟 CT 室	控制室及弱电设备间（1#直线加速器）、控制室及弱电设备间（2#直线加速器）、缓冲间、控制室（模拟 CT 机）
核医学科	负二层核医学制药区	回旋加速器机房、放化实验室、热室（热室前区、热室后区）、放射性废物库、放射性废物暂存间、短半衰期衰变池	控制室、洁具间、空调机房、设备间、备品备件间、脱衣检测间（2 间）、一更室、二更室、换鞋间、洁净走廊、配制间、传递间、外清间、外包间、气瓶间、二级水冷间、核素洁梯、核素污梯、医疗废物暂存间、污洗间、污物处理间、接收室、库房、物流走道等
	负一层核素诊断区	源库、放射性废物暂存间、分装注射室、给药区、运动负荷室/抢救室、VIP PET 给药后候诊室（含卫生间）、PET 给药后候诊室（含卫生间）、污洗间、SPECT 给药后候诊室（含卫生间）、SPECT 检后休息室（含卫生间）、PET 检后休息室（含卫生间）、SPECT-CT 室、PET-CT 室、PET-MRI 室、校准源室、检查廊、短半衰期衰变池	缓冲区、沐浴间、洁具间、更衣缓冲间、核素洁梯、核素污梯、专用电梯厅、患者电梯、污梯、控制廊、设备间、主任室、办公室、示教室、补风机房、排烟机房、医生廊、更衣室（2 间）、卫浴室（2 间）、处置室等
	二层核素治疗	源库、放射性废物暂存间 1、分装给药室、留观室、介入手术室、隔离病房（6 间含卫生间）、	缓冲区、准备间、设备室、缓冲间、配餐室、强电井、医气井、排烟井、控制

区	病房走道、放射性污染被服暂存间、放射性废物暂存间 2、污洗间、甲吸室、敷贴室、长半衰期衰变池	室、沐浴间（2 间）、更衣室、耗材库、污物通道、污物暂存间、专用电梯厅、患者电梯、污梯等
三层核素治疗区	源库、放射性废物暂存间 1、分装给药室、配药室、污洗间、隔离病房（6 间含卫生间）、病房走道、放射性污染被服暂存间、放射性废物暂存间 2、甲亢室（含卫生间）、长半衰期衰变池	缓冲区、配餐室、强电井、沐浴室、更衣间、核素污梯、核素洁梯、专用电梯厅、患者电梯、污梯等

图 10-1 放疗中心两区划分示意图

图 10-2 负二层核医学制药区两区划分示意图

图 10-3 负一层核医学诊断区两区划分示意图

图 10-4 二层核素治疗区两区划分示意图

图 10-5 三层核素治疗区两区划分示意图

2、控制区防护手段与安全措施

①控制区进出口及其它适当位置处设立醒目的警告标志，见图 10-6。

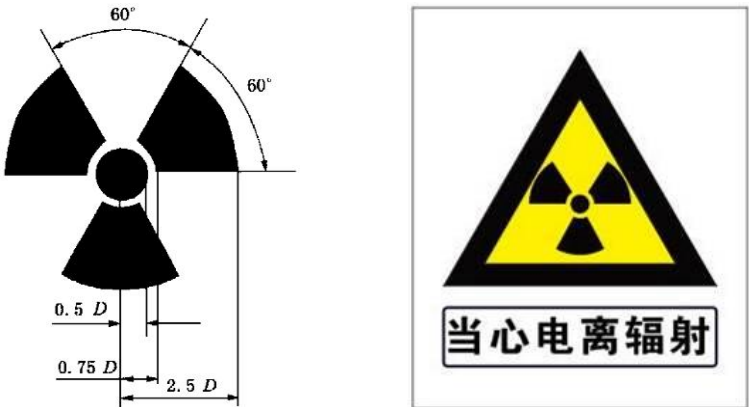


图 10-6 电离辐射标志和电离辐射警告标志

②制定职业防护与安全管理措施，包括适用于控制区的规则和程序。

③运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可制度）和实体屏障（包括门禁）

限制进出控制区。

④在卫生通过区域配备个人防护用品、工作服、污染监测仪和被污染防护衣具的贮存柜等。

⑤核医学工作场所应采取门禁系统、门锁控制、单向门等合适的措施，限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。

⑥核医学科工作场所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。

⑦定期审查控制区的实际状况，以确保是否有必要改变该区的防护手段、安全措施。

3、监督区防护手段与安全措施

①以黄线警示监督区为边界；

②在监督区的入口处的适当位置设立明显的监督区标牌；

③定期检查该区的条件，以确定是否需要采取防护措施和做出安全规定，或是否需要更改监督区的边界。

三、辐射防护设施

（一）放疗中心

1、医用直线加速器机房

（1）辐射屏蔽措施

本项目放疗中心 1#直线加速器机房、2#直线加速器机房为由南向北呈镜像布置，防护墙体均为混凝土。放疗中心直线加速器机房平面布局见图 10-7，具体屏蔽防护设计见表 10-2。

表 10-2 直线加速器机房屏蔽防护设计

场所	机房面积	辐射防护建筑情况
放疗中心直线加速器机房	60.4m ² (不含迷道)	1#直线加速器机房、2#直线加速器机房呈镜像布置，四面墙体、迷道、顶部和底部为混凝土结构，直线加速器主射方向均朝向机房北侧、南侧、顶部和地面。1#直线加速器机房北侧、2#直线加速器机房南侧主屏蔽墙体厚度均为2800mm、宽为5000mm，相连次屏蔽墙体厚度为1700mm；西侧迷道外墙屏蔽体厚度均为1500mm，迷道内墙屏蔽体厚度均为1800mm；东侧

		墙体厚度均为1500mm；1#直线加速器机房、2#直线加速器机房共用主屏蔽墙体厚度为2800mm、宽为5000mm，相连次屏蔽墙体厚度为1700mm；顶部主屏蔽墙厚度为2800mm、宽为5000mm，相连的次屏蔽墙为1700或2100mm；防护门均为15mm铅当量电动推拉门。
--	--	--

注：机房下方无其他建筑设计，人员无法进入，故不考虑辐射防护设，混凝土密度 $2.35\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

图 10-7 放疗中心直线加速器机房平面布局图

图 10-8 放疗中心直线加速器机房剖面图

(2) 对 X 射线的防护措施

①穿过直线加速器机房屏蔽墙的各种管道和电缆沟采用斜穿或 U 形穿墙，不正对工作人员经常停留的地点，如下图；

图 10-9 直线加速器机房预埋管线穿墙位置图

图 10-10 直线加速器机房管线穿墙做法大样图

本项目直线加速器机房内的管线穿墙位置见上图，穿墙电缆沟采用 U 型穿墙，固定式辐射剂量报警仪（物理测量管）采用预埋套管孔采用斜向穿墙，均在非主射方向斜向穿进入控制室或设备间内。本项目管线穿墙未也正对工作人员，因此，本项目管线穿墙位置设计符合要求，管线穿墙方案合理，穿墙屏蔽措施可行。

②为防止辐射泄漏，防护门与墙的重叠宽度至少为空隙的 10 倍，门的底部与地面之间的重叠宽度至少为空隙的 10 倍；

③为防止排风口排出的气体反流污染进气口，进风口和排风口应对角线布置。进、排风口附近应尽量禁止有人员活动；

④操作人员采取隔室操作方式，控制室与直线加速器机房之间以墙体隔开，通过监控图像观察病人情况，通过对讲机与病人交流；

⑤通过制定最优化的治疗、诊断方案尽量减少射线装置的照射时间。尽量减少人员与机房的近距离接触时间；

⑥操作加速器的辐射工作人员每人佩戴个人剂量计；

⑦治疗前对放疗计划剂量进行核对，每次照射时体位都须一致。采用恰当的个人防护用品（如铅衣、铅围裙、三角巾等）屏蔽肿瘤周围的健康组织。

⑧本项目 2 间直线加速器机房内拟设负压通风方式进行排风，新风量为 1000m³/h，排风量为 1200m³/h，直线加速器机房内排风管道在防护门上方采用“S”形穿墙引出，然后经排风井引至高于地面 3m 处进行排放。直线加速器机房内通排风均采用“自然送风、下排风”的方式。

（3）设备固有安全性

①加速器只有在通电开机时才有 X 射线、电子线产生，断电停机即停止出束；通过多叶准直器定向出束，其他方向的射线被自带屏蔽材料所屏蔽。

②条件显示联锁：当射线能量、吸收剂量选值、照射方式和过滤器的规格等参数选定，并当机房与控制台等均满足预选条件后，照射才能进行。

③控制台上设有蜂鸣器，在加速器工作时发出声音以警示人员防止误入。

④治疗床旁、加速器主机和控制台上安装紧急制动按钮。

⑤设备配有超剂量联锁装置，当剂量超过预选值时，可自动终止照射。

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

⑦有时间控制联锁，当预选照射时间定时，定时器能独立地使照射停止。

⑧有防止非工作人员操作的锁定开关。

从加速器固有安全性能可以看出，加速器在防止事故发生方面，设有相应措施，只要操作人员按照加速器说明书要求严格执行，就能够减少 X 射线、电子线对人员的辐射危害和降低辐射事故的发生率。

（4）场所辐射防护措施

①操作人员隔室操作：本项目直线加速器控制室与机房之间以墙体隔开，机房内拟安装视频监控系统、对讲装置，控制室能通过视频监控系统观察机房内患者治疗的情况，并通过对讲机与机房内患者沟通。在机房内墙体交叉口、迷道口处安装有监控装置，确保机房内监控全覆盖。

②门灯联锁：加速器防护门与工作状态指示灯联锁，门关严指示灯亮，防护门打开时指示灯熄灭。

③门机联锁装置：加速器与屏蔽门之间拟设联锁装置。屏蔽门未关好，加速器不能出束；

加速器工作期间屏蔽门不能打开。

④紧急停机装置和紧急开门按钮：除了加速器治疗床、加速器主机上以及控制台上自带的紧急停机按钮外，机房内墙非主射线位置上设置有紧急停机按钮，以使误入人员按动紧急停机按钮就能使加速器停机；迷道出口处设置了紧急开门按钮。

⑤工作状态显示及警示标识：加速器治疗室防护门外顶部拟设置工作状态指示灯箱。加速器处于出束状态时，指示灯为红色，以警示人员注意安全；当加速器处于非出束状态，指示灯为绿色；并在灯箱显示中文工作状态。加速器机房屏蔽门上设置明显的电离辐射警告标志。

⑥防护门与固定式剂量率联锁（带剂量显示功能）：探头安装在机房迷道内墙上（靠近防护门），只要迷道内的剂量超过预设的剂量阈值，就会报警提示人员不能进入机房，以防人员误入。

⑦视频监视系统、对讲系统：直线加速器机房配备有视频监控系统、对讲装置。

⑧钥匙开关：直线加速器机房配备专用钥匙开关，未插入控制钥匙，加速器不能开机。

⑨个人防护：加速器治疗室的辐射工作人员每人佩戴个人剂量计和预定剂量率阈值自动报警仪。

⑩加速器将由生产厂家进行质保维修，医院设备维护人员仅对加速器进行日常维护（如电路、开关、机电等维护）。

本项目直线加速器具有安全联锁逻辑如下图所示：

图 10-11 直线加速器工作场所安全联锁系统逻辑示意图

（4）其他防护措施

①直线加速器机房拟配备个人剂量报警仪，每名辐射工作人员均应配备个人剂量计；

②控制室上张贴相应的辐射安全管理要求、操作规程、岗位职责等；

③机房受检者出入口门外 1m 处应设置黄色警戒线，告诫无关人员请勿靠近；

④直线加速器机房内拟安装通排风系统，产生废气通过专用排风管道引出后至楼顶排放。

综上所述，本项目直线加速器机房辐射防护措施合理可行，能够有效防止本项目对外环境的影响，本项目直线加速器的防护措施、设备的配备符合《核技术利用监督检查

技术程序》（生态环境部（国家核安全局））的相关要求和其他相关标准的要求。

2、模拟 CT 室

根据本项目使用的模拟 CT 室屏蔽设计见下表。

表 10-3 模拟 CT 室屏蔽防护设计

机房	面积 (m ²)	四周墙体	屏蔽门	观察窗	楼顶	地面
模拟 CT 室	31.2m ² (最小 单边长度 4.6m)	南侧墙体为 300mm 厚混凝土或 370mm 厚实心砖墙, 其余三侧均为 370mm 厚实心砖墙	4mm 铅当量	4mm 铅当量	300mm 厚混凝土 (>3mm 铅当量)	机房地下无建筑, 不考虑辐射防护设计
放射诊断放射防护要求	最小有效使用面积 30m ² , 最小单边长度 4.5m	有用线束方向 2.5mmPb, 非有用线束方向 2.5mmPb				
是否满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

注: 混凝土密度为 2.35g/cm³。

(1) 辐射安全防护措施

①设备本身具有安全警示, 当设备出现错误或故障时, 能中断照射, 并有相应故障显示。

②正常情况下, 必须按规定程序并经控制台确认验证设置无误时, 才能由"启动"键启动照射。

③紧急止动装置: 控制台设置紧急止动按钮 (各按钮分别与 X 射线系统连接)。X 射线系统出束过程中, 一旦出现异常, 按动紧急止动按钮, 可停止 X 射线系统出束。

④门灯连锁: 机房防护门外顶部设置工作状态指示灯。指示灯为红色, 以警示人员注意安全; 当防护门打开时, 指示灯灭。

⑤警告标志: 机房的防护门外的醒目位置, 设置明显的电离辐射警告标志。

⑥对讲装置: 射线装置采用隔室操作, 机房内拟配对讲装置。

⑦防夹装置: 机房防护门门口拟设红外防夹传感器, 当门体关闭时遇到障碍物自动打开, 直至障碍物消除才能关闭门体。

(2) 其他防护措施

①机房控制室上张贴相应的岗位规章制度、操作规程;

②机房门外应有电离辐射警告标志、醒目工作状态指示灯, 灯箱处应设警示语句;

③射线装置应有“紧急止动”按钮, 机房门应有闭门装置, 工作状态指示灯与机房

门联锁等安全设施；

④机房受检者出入口门外应设置黄色警戒线，告诫无关人员请勿靠近；

⑤辐射工作人员必须配备个人剂量计。

（二）核医学科辐射防护屏蔽设计

1、负二层核医学制药区辐射防护屏蔽设计

（1）回旋加速器机房及配套用房

本项目回旋加速器机房室内净空面积约 63m²（净空尺寸长 9.0m×宽 7.0m×高 4.0m），四周墙体及顶部厚度均为 800mm 厚的现浇混凝土，防护门材质为 12mmPb 铅钢结构+13cm 含硼聚乙烯。热室后区/热室前区、放化实验室与回旋加速器机房为紧邻的房间，其中热室后区、放化实验室北侧与回旋加速器机房南侧共用墙体（800mm 厚混凝土）。放化实验室西侧、南侧墙体均为 240mm 厚实心砖墙，东侧与热室后区/热室前区共用墙体为 200mm 厚混凝土；热室后区/热室前区西侧、南侧、东侧墙体均为 200mm 厚混凝土，热室后区/热室前区、放化实验室屋顶均为 300mm 厚混凝土。整个负一层地下无房间，地面不做特殊防护。回旋加速器机房送风口和排风口均位于机房顶部采用 S 型设计，电缆、水管均采用 U 型地沟设计，机房外侧采用 10mm 铅盖板进行遮挡；放射性药物传输管道采用地沟设计，屏蔽层为 3mm 铅套管+50mm 铅砖+10mm 铅盖板。

图10-12 回旋加速器机房平面布局图

图10-13 回旋加速器机房剖面图

（2）负二层核医学制药区墙体防护

表 10-4 负二层核医学制药区墙体防护屏蔽设计

功能用房	屏蔽体位置	屏蔽材质及厚度	备注
回旋加速器机房	四周屏蔽墙体	800mm 厚混凝土	/
	防护门（东北侧）	12mmPb 铅钢结构+130mm 含硼聚乙烯	/
	正上方区域	800mm 厚混凝土	SPECT-CT 室等
热室（热室后区、热室前区）	北侧墙体	800mm 厚混凝土/200mm 厚混凝土	回旋加速器机房、二级冷水间
	其余三侧墙体	200mm 厚混凝土	/
	防护门	5mmPb 防护门	/

	药物传输管道地沟		管道+3mm 铅套管+50mm 铅砖+10mm 铅盖板	铅套管+铅砖+铅盖板
	防护门		5mmPb 防护门	/
	合成柜		70mmPb 铅钢+铅玻璃结构	/
	分装柜		70mmPb 铅钢+铅玻璃结构	/
	正上方区域		300mm 厚混凝土	检查廊、PET 给药后候诊区等
放化实验室	东侧墙体		200mm 厚混凝土	热室
	南侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	更衣室等
		防护门	5mmPb 防护门	脱衣检测间
	西侧墙体		240mm 厚实心砖墙	通道
	北侧墙体		800mm 厚混凝土	回旋加速器机房
	正上方区域		300mm 厚混凝土	检查廊、SPECT 给药后候诊室
核素通道	南侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	库房
		防护门	普通门	外购源通道
	东侧	墙体	200mm 厚实心砖	患者等候区
		防护门	普通门	患者等候区
	正上方区域		300mm 厚混凝土	分装注射室、源库等
核素洁梯 (传药梯)	四周墙体		200mm 厚实心砖墙	/

(3) 核医学制药区穿墙管线

穿过回旋加速器机房、热室（前区、后区）屏蔽墙的各种管道和电缆线弯成S形或U形，不正对工作人员经常停留的地点，具体见下图

图10-14 回旋加速器机房穿墙管线布置示意图

图10-15 回旋加速器机房管线穿墙剖面大样图

2、负一层核素诊断区墙体防护

表 10-5 负一层核素诊断区屏蔽设计

功能用房	屏蔽体位置		屏蔽材质及厚度	备注
源库	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	给药前患者走道
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	医生通道
	西侧墙体		200mm 厚实心砖	放射性废物暂存间
	北侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	分装注射室
		防护门	10mmPb 铅防护门	

	屋顶		300mm 厚混凝土	CT 机房、走道
	地面		300mm 厚混凝土	外购源通道、接收室
分装注射室	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	给药前患者走道
	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	淋浴室
		墙体	200mm 厚实心砖墙	放废暂存间
		防护门	8mmPb 防护门	放废暂存间
	西侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	医生走廊
		防护门（2 扇）	10mmPb 防护门	更衣缓冲间、运动负荷/抢救室
	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	给药区
		给药窗口	PET 核素注射窗为 40mmPb、SPECT 核素注射窗为 20mmPb	
	屋顶		300mm 厚混凝土	患者候诊、接待及登记等
	地面		300mm 厚混凝土	物流通道、工具清洗间等
给药区	东侧防护门		15mmPb 防护门	患者入口缓冲区
	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	分装注射室
		给药窗口	40mmPb 防护窗	
	西侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	医生走廊
		防护门	10mmPb 防护门	运动负荷/抢救室
	北侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	给药后候诊室
		SPECT 防护门	12mmPb 防护门	
		VIP PET 给药后候诊防护门	12mmPb 防护门	
		PET 给药后候诊防护门	12mmPb 防护门	
	屋顶		300mm 厚混凝土	患者候诊区、CT 机房
	地面		300mm 厚混凝土	放射性废物暂存间、配制间等
VIP PET 给药后候诊室	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	PET 给药后候诊室
	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	给药区
		防护门	12mmPb 防护门	
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙	污洗间
	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	检查廊
		防护门	12mmPb 防护门	
	屋顶		300mm 厚混凝土	DR 机房
	地面		300mm 厚混凝土	放化实验室、脱衣检测间等
PET 给药后候	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	候诊区

诊室)	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	缓冲区、给药区
		防护门	12mmPb 防护门	给药区
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	VIP PET 给药后候诊室
	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	检查廊
		防护门	12mmPb 防护门	检查廊
	屋顶		300mm 厚混凝土	走道、DR 室等
	地面		300mm 厚混凝土	热室、配制间等
运动负荷/抢救室	东侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	给药区
		防护门（2 扇）	10mmPb 防护门	/
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	更衣缓冲间
	西侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	医生廊
		防护门	10mmPb 防护门	医生廊
	北侧墙体		200mm 厚实心砖墙	SPECT 给药后候诊室
	屋顶		300mm 厚混凝土	控制廊等
	地面		300mm 厚混凝土	走道、脱衣检测间等
检查廊	东侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	采光庭院
		防护窗	15mmPb 防护窗	
	南侧墙体		200mm 厚实心砖墙	/
	西侧墙体		200mm 厚实心砖墙	专用电梯厅
	屋顶		300mm 厚混凝土	放射科患者走道
	地面		300mm 厚混凝土	放化实验室、热室后区
PET-CT 室	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	通道
	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	检查廊
		患者进出门	10mmPb 防护门	
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙	PET-MRI 室
	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	控制廊
		防护窗	18mmPb 防护窗	
		医生进出门	15mmPb 防护门	
	屋顶		300mm 厚混凝土	室外空地
地面		300mm 厚混凝土	更衣室、走道等	
PET-MRI 室	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	PET-CT 室
	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	检查廊
		患者进出门	10mmPb 防护门	
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙	设备间、SPECT 室

	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	控制廊
		防护窗	18mmPb 防护窗	
		医生进出门	15mmPb 防护门	
	屋顶		300mm 厚混凝土	室外空地
	地面		300mm/800mm 厚混凝土	气瓶间、二级冷水间等
PET 检查后休息室	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	SPECT-CT 室
	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	专用电梯厅
		防护门	15mmPb 防护门	检查廊
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	医生廊
	北侧墙体		370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	控制廊
	屋顶		300mm 厚混凝土	室外空地
	地面		300mm 厚混凝土	控制室、设备间等
SPECT 给药后候诊室	东侧墙体		200mm 厚实心砖墙	VIP PET 给药后候诊室
	南侧	墙体	200mm//370mm 厚实心砖墙	运动负荷/抢救室、医生廊
		防护门	12mmPb 防护门	给药区
	西侧墙体		200mm 厚实心砖墙	SPECT 检后休息室
	北侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	检查廊
		防护门	12mmPb 防护门	检查廊
	屋顶		300mm 厚混凝土	CT 机房、读片办公室
SPECT-CT 室	地面		300mm 厚混凝土	脱衣检测、一更、二更等
	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	设备间
	南侧		370mm 厚实心砖墙	检查廊
			10mmPb 防护门	
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙	检查廊
	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	控制廊
		防护窗	5mmPb 防护窗	
		防护门	5mmPb 防护门	
SPECT 检后休息室	屋顶		300mm 厚混凝土	室外空地
	地面		800mm 厚混凝土	回旋加速器机房
	东侧墙体		200mm 厚实心砖墙	SPECT 给药后候诊室
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	医生廊
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙	医生廊
	北侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	患者电梯
		防护门	15mmPb 防护门	检查廊

放射性 废物暂 存间	屋顶		300mm 厚混凝土	专用电梯厅
	地面		300mm 厚混凝土	理化检验区
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	医生走廊
	其余三侧墙体		200mm 厚实心砖墙	/
	防护门		10mmPb 防护门	分装注射室

3、二层核素治疗区墙体防护

表 10-6 二层核素治疗区防护屏蔽设计

功能用房	屏蔽体位置		屏蔽材质及厚度	备注
源库	东侧墙体		240mm 厚实心砖墙	患者入口缓冲区
	南侧墙体		240mm 厚实心砖墙	手术室缓冲间
	西侧墙体		200mm 厚实心砖墙	手术室缓冲间
	北侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	分装给药室
		防护门	5mmPb 防护门	
	屋顶		300mm 厚混凝土	源库
	地面		250mm 厚混凝土	通道
分装给 药室	东侧墙体		240mm 厚实心砖墙	患者入口缓冲区
	南侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	放射性废物暂存间、源库
		墙体	370mm 厚实心砖墙	介入手术室
		防护门	5mmPb 防护门	缓冲间
		防护门	2mmPb 防护门	沐浴间
	西侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	留观室
		防护门	2mmPb 防护门	更衣室
	北侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	病房走道
		给药窗口	10mmPb 防护窗	
		防护门	5mmPb 防护门	
	屋顶		300mm 厚混凝土	分装给药室
	地面		250mm 厚混凝土	走廊
介入手 术室	东侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	设备间、护士站等
		防护门（2 扇）	4mmPb 防护门	准备/缓冲间
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	甲吸室、敷贴室
	西侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	控制室、沐浴间等
		防护窗	4mmPb 防护窗	
		防护门（2 扇）	5mmPb 防护门	

	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	放射性废物暂存间
		防护门	5mmPb 防护门	分装给药室
	屋顶		400mm 厚混凝土	临建大厅、采血窗口等
	地面		300mm 厚混凝土	CT 室、接待室等
留观室	东侧墙体		240mm 厚实心砖墙	分装给药室
	南侧墙体		240mm 厚实心砖墙	更衣室
	西侧墙体		240mm 厚实心砖墙	医护走道
	北侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	病房走道
		防护门	5mmPb 防护门	
	屋顶		300mm 厚混凝土	污洗室、配药室
	地面		250mm 厚混凝土	更衣室、走廊等
隔离病房	东侧墙体		240mm 厚实心砖墙	/
	南侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	/
		防护门	5mmPb 防护门	/
	西侧墙体		240mm 厚实心砖墙	/
	北侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	/
		防护窗	5mmPb 防护窗	/
	屋顶		400mm 厚混凝土	治疗病房
病房走道	地面		300mm 厚混凝土	放射科机房、操作室等
	东侧墙体		240mm 厚实心砖墙	公共卫生间
	南侧	墙体	240mm 厚实心砖墙	配餐室、医护走道等
		防护门	5mmPb 防护门	患者入口
		防护传递窗	5mmPb 铅玻璃	配餐室
	西侧防护门		5mmPb 防护门	专用电梯厅
	北侧墙体		240mm 厚实心砖墙	隔离病房
	屋顶		400mm 厚混凝土	/
甲吸室	地面		300mm 厚混凝土	/
	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	护士站
	南侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	人员走道
		防护门	2mmPb 防护门	
	西侧墙体		200mm 厚实心砖墙	敷贴室
	北侧墙体		370mm 厚实心砖墙	介入手术室
	屋顶		150mm 厚混凝土	临检大厅、体液接收采室等
放射性废物暂	地面		150mm 厚混凝土	准备间、MR 机房等
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	介入手术室
	北侧墙体		240mm 实心砖墙	

存间 1	其余两侧墙体	200mm 厚实心砖墙	/
	防护门	5mmPb 防护门	分装给药室
放射性 废物暂 存间 2	四周侧墙体	240mm 厚实心砖墙	/
	防护门	5mmPb 防护门	专用电梯厅

4、三层核素治疗区墙体防护

表 10-7 三层核素治疗区防护屏蔽设计

功能 用房	屏蔽体位置		屏蔽材质及厚度	备注
源库	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	患者入口
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	护士站
	西侧墙体		200mm 厚实心砖	放射性废物暂存间
	北侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	分装给药室
		防护门	10mmPb 防护门	
	屋顶		350mm 厚混凝土	家属等候间
	地面		300mm 厚混凝土	源库
分装给 药室	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙	缓冲区
	南侧	墙体	200mm/370mm 厚实心砖墙	放射性废物暂存间、源库、沐浴间
		防护门	8mmPb 防护门	沐浴间、更衣室
	西侧	墙体	200mm 厚实心砖墙	配药室
		防护门	8mmPb 防护门	
	北侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	病房走道
		给药窗口	40mmPb 防护窗	
		防护门	8mmPb 防护门	
	屋顶		350mm 厚混凝土	人员通道
	地面		300mm 厚混凝土	分装给药室
隔离病 房	东侧	墙体	300mm 厚混凝土+6mmPb 硫酸钡涂层	靠公共卫生间侧
		墙体	300mm 厚混凝土	/
	南侧	墙体	300mm 厚混凝土	/
		防护门	15mmPb 防护门	/
	西侧	墙体	300mm 厚混凝土	/
		墙体	300mm 厚混凝土+6mmPb 硫酸钡涂层	靠患者电梯侧
	北侧	墙体	300mm 厚混凝土	外墙
		防护窗	15mmPb 防护窗	

	屋顶		400mm 厚混凝土	检测、实验办公区
	地面		400mm 厚混凝土	病房区
病房走道	东侧墙体		370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	公共卫生间
	南侧	墙体	370mm 厚实心砖墙/370mm 厚实心砖墙+6mmPb 硫酸钡涂层	配餐室、患者入口、医护走道等
		防护门	15mmPb 防护门	患者入口
	西侧防护门		15mmPb 防护门	专用电梯厅
	北侧墙体		300mm 厚混凝土	病房
	屋顶		400mm 厚混凝土	疏散走道
	地面		400mm 厚混凝土	病房走道
甲亢室	东侧	墙体	370mm 厚实心砖墙	专用电梯厅
		防护门	10mmPb 防护门	
	南侧墙体		370mm 厚实心砖墙	医护走道
	西侧墙体		370mm 厚实心砖墙	医护走道
	北侧墙体		370mm 厚实心砖墙	专用电梯厅
	屋顶		400mm 厚混凝土	污物通道
	地面		400mm 厚混凝土	污洗间、电梯厅
放射性废物暂存间 1	四周墙体		200mm 厚实心砖墙	办公区
	防护门		8mmPb 防护门	分装给药室
放射性废物暂存间 2	南侧、西侧墙体		370mm 厚实心砖墙	/
	北侧、东侧墙体		200mm 厚实心砖墙	/
	防护门		8mmPb 防护门	专用电梯厅

5、III类射线装置机房设计与标准的符合性

表 10-8 III类射线装置机房屏蔽防护设计

机房	面积 (m ²)	最短边 长 (m)	四周墙体	屏蔽门	观察窗	楼顶	地面
			结构及厚度			结构及厚度	
SPECT-CT 室	45.2	5.65	370mm 厚实心砖墙 (约 3mmPb)	5mmPb/10mmPb	5mmPb	300mm 厚混凝土 (>3mmPb)	800mm 厚混凝土 (>3mmPb)
PET-CT 室	43.2	5.4	370mm 厚实心砖墙 (约 3mmPb)	10mmPb~15mmPb	18mmPb	300mm 厚混凝土 (>3mmPb)	300mm 厚混凝土 (>3mmPb)
放射诊断放射防护要求	最小有效使用面积30m ² , 最小单边长度4.5m		有用线束方向2.5mmPb, 非有用线束方向2.5mmPb				
是否满足	满足		满足	满足	满足	满足	满足

6、介入手术室辐射防护屏蔽设计

根据医院提供防护设计方案，二层核医学科治疗区介入手术室（净空尺寸为6.0m×11.3m×2.7m）内使用的射线装置最大管电压为150kV、最大管电流为1000mA。根据医院反馈，在DSA拍片和CBCT扫描时，常用管电压60~100kV，常用管电流为100~500mA，在DSA透视时常用管电压为70~90kV，常用管电流为6~20mA。根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020），在折合铅当量时，均按照主射线辐射衰减拟合参数（125kV）进行铅当量考虑，根据最大工况下管电压和不同屏蔽体材料铅当量厚度，介入手术室实体屏蔽防护情况与标准屏蔽措施对照，保守折算结果见表10-9。

表 10-9 介入手术室实体防护设施铅当量折合对照表

位置	实体结构	折合铅当量*
四周墙体	370mm 厚实心砖墙	4.5mmPb
屏蔽门	4/5mm 铅当量防护门	4.0/5.0mmPb
观察窗	4mm 铅当量防护玻璃	4.0mmPb
屋顶	400mm 厚混凝土	6.5mmPb
地面	300mm 厚混凝土	4.8mmPb

注：*—折合铅当量厚度按照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中表 C.4~C.7 中管电压为 100kV 有用线束下，不同材质的铅当量外推法得到。

表 10-10 介入手术室的实体防护设施对照表

机房	机房规格	四周墙体结构及厚度	屏蔽门结构及厚度	观察窗结构及厚度	楼顶结构及厚度	地面结构及厚度
介入手术室	手术室净空面积 67.8m ² ，介入手术室内最小单边长度6.0m	370mm厚实心砖墙（4.5mmPb）	4/5mm铅当量防护门	4mm铅当量防护玻璃	400mm厚混凝土（6.5mmPb）	300mm厚混凝土（4.8mmPb）
放射诊断放射防护要求	最小有效使用面积 30m ² ，介入手术室内最小单边长度4.5m	有用线束 2.5mmPb，非有用线束 2.5mmPb				
备注	满足要求	满足要求	满足要求	满足要求	满足要求	满足要求

注：①表中楼板使用材料为混凝土（密度为 2.35g/cm³），砖的密度为 1.65g/cm³；②本项目射线装置同时具备 DSA 和 CBCT 功能，保守按照 CT 机房的使用面积、最小单边长度及屏蔽防护要求进行考虑。

四、辐射安全防护措施

（一）核医学科工作场所

1、负二层核医学制药区

(1) 回旋加速器机房安全设施

1) 自身安全设施

在回旋加速器出束前，会对磁铁电流、高频腔压、靶压、冷却氦气气压进行测量，如果实测值达不到预设值，或者各个设备冷却水单独一路的流量达不到最低值，此时系统将无法开启离子源，从而预防事故的发生。

回旋加速器运行时，系统实时监控靶压以及冷却氦气气压，在正常运行情况下，靶压和冷却氦气气压保持在一定范围内，如果一旦靶膜破裂或氦冷却循环回路泄漏（表现为压力骤降），此时系统将立刻关闭离子源电源、高频功率源输出及磁铁电源输出，从而停止打靶，防止产生过量的感生放射性或避免对加速器内部器件构成破坏。

回旋加速器用户操作控制界面设有密码，只有被专门授权许可的操作人员才能实现回旋加速器的开机操作。

2) 机房安全设施配置

为满足辐射防护的冗余性、多元性和独立性的要求，回旋加速器机房设置有其它安全装置，见表 10-11，辐射安全装置布设见附图 10。

表 10-11 回旋加速器机房安全装置配置一览表

装置名称	功能描述
门与加速器高压触发/束流联锁	防护门与回旋加速器离子源系统及束流阻挡器联锁。当防护门处于开启状态时，加速器高压装置、离子源系统无法开启；运行过程中防护门意外打开时，加速器高压装置、离子源系统停止工作，同时加速器束流阻挡器落下，束流不能进入靶腔。在回旋加速器开机运行前，防护门未正常关闭，回旋加速器不能正常开机出束。
门-灯联锁（工作状态指示灯）	回旋加速器机房入口设置工作状态指示灯，当防护门关闭时，工作状态指示灯亮起，并进行 LED 中文提示，如：正在工作/正在出束。
声光报警及语音广播	防护门入口均安装声光报警装置，其中灯光提示分绿、黄、红 3 种颜色。绿灯亮，指示加速器不工作，辐射水平处于安全水平；黄灯亮，指示加速器准备进入工作状态，并进行语音提示“准备出束”；红灯亮，指示加速器正在工作，红灯闪烁则表明此时加速器机房的辐射剂量超过安全水平。加速器准备出束时，语音提示无关人员撤离机房，运行过程中语音提示会持续响。
门-剂量联锁	机房内安装固定式 γ 剂量监测探头，监测剂量与防护门联锁，当剂量率超过设定阈值时（具体阈值由实际运行调试情况进行设定），防护门无法从外部正常开启。
视频监控系统	机房内和机房外入口设置红外视频监控系统，24h 实时监控机房内状况。
紧急开门装置	防护门内侧设置紧急开门按钮并进行中文标识，当人员误留房间内可通过该按钮实现防护门从内部打开，进行紧急逃逸，同时加速器停止运行。

清场巡更按钮	机房内设置巡检开关。当防护门打开后巡检开关自动复位，工作人员在关闭防护门前，需先进行巡检，并按下所有巡检开关后，防护门才能正常关闭。若巡检开关未被按下，加速器将无法启动，同防护门也不能正常关闭。清场巡更按钮具有一定的响应时间，超过响应时间需重新清场。
紧急停机按钮	在机房内四周墙面和控制台人员易接触的位置设置紧急停机按钮并进行中文标识，所有按钮进行串联，当任意紧急停机按钮按下，加速器高压功率源、离子源均停机，同时束流阻挡器落下。当紧急停机按钮被按下后，重新启用时，需进行人工复位。
延时开门联锁	机房内安装延时开门联锁，加速器停机后需进行一段时间排风后，防护门才能从外部正常开启，防止机房内感生放射性气溶胶对工作人员形成照射。
固定式 γ 辐射剂量率报警（带中子监测功能）仪	加速器机房外墙墙面设置固定式剂量监测探头并带有报警提示，对外围场所进行实时监测，当出现剂量率超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 时，将进行报警提示。
控制台和大厅门钥匙控制	控制台设置钥匙控制，当取出钥匙，加速器不能正常开启出束，只有获得资格且单位授权运行人员才能使用该钥匙。防护门入口设置钥匙控制，只有插入正确的钥匙，防护门才能正常打开。
紧急出口标志及应急照明	加速器出入口处粘贴紧急出口标志并有夜光显示或应急照明。

3）安全联锁运行逻辑

本项目加速器安全联系系统分为：加速器设备自带安全控制系统（Accelerator Control System-ACS）和场所安全联系系统（Building Safety System-BBS），其中设备自带安全控制系统在设备电气装配时已被设定入加速器联锁控制程序（PLC 系统）中，场所安全联锁系统由 PLC 系统预留可编辑逻辑输入扩展模块，输入扩展模块主要负责将：搜索按钮、急停按钮和钥匙面板等输入设备的状态发送给 PLC。输出扩展模块主要负责将 PLC 的控制信号发送给加速器安全设备，以及警铃警灯等输出设备。LED 显示屏用于显示放射性工作区域的状态信息，其与 PLC 通过 TCP/IP 网络通讯。

所有安全相关功能都通过故障安全 PLC 核心控制器执行。安全相关功能的外围线缆采用双通道冗余设置。除了负责警铃警灯部分的输出扩展模块之外，其它输入输出扩展模块与核心控制器之间的通信均采用满足故障安全协议的总线系统，以保证系统的可靠性。采用自动化技术的安全联锁系统最重要的功能就是有效地防止运行过程人员受到辐射损伤。为此，将对运行过程中安全设备设计故障安全的联锁信号，并由安全联锁系统直接控制。当联锁被破坏时，核心控制器将根据事先定义好的逻辑，最优切断功率源系统。

本项目 BBS、ACS 与加速器输入/输出逻辑关系如下：

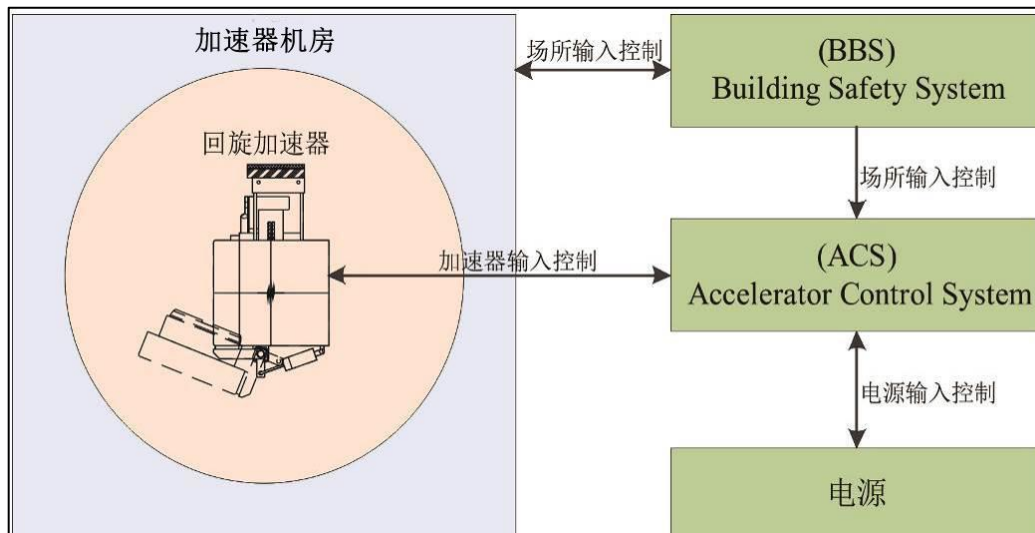


图10-16 ACS和BBS联锁控制关系示意图

4) 加速器运行逻辑

加速器若需正常开机需要 BBS 和 ACS 同时正常才能正常开机，即需满足下面所有条件：

①ACS 正常需具备条件：磁场系统正常、离子源正常、射频系统正常、真空系统正常、冷却系统正常、束流系统正常、靶系统温度正常、控制系统正常、控制钥匙插入。

②BBS 正常需具备条件：巡检按钮拍下、急停按钮未触动、活门门正常关闭、紧急开门按钮未触动。

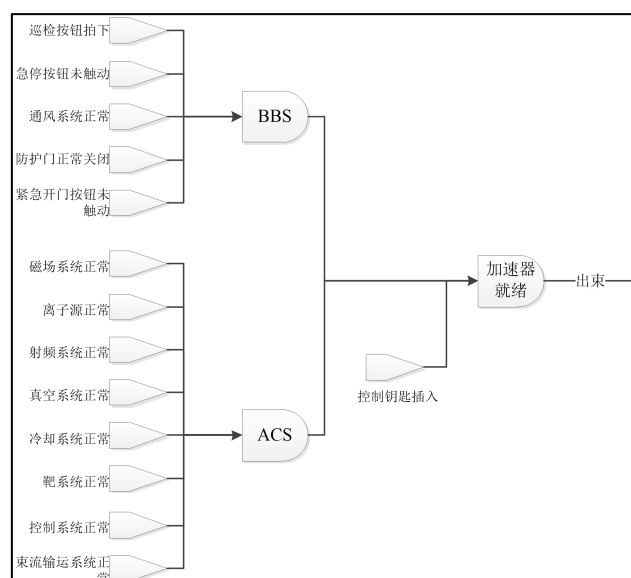


图10-17 回旋加速器正常开机逻辑关系图

5) 加速器急停逻辑

BBS 和 ACS 中若任意条件被破坏将触发加速器断电停机（冗余性和独立性，不存

在逻辑先后关系)如下:

①ACS 破坏条件: 磁场系统异常、离子源异常、射频系统异常、控制系统异常、真空失效、温度异常、靶位偏移、束流异常或偏转、控制钥匙拔出。

②BBS 破坏条件: 急停按钮触动、活塞门打开、紧急开门按钮触动。

③本项目场所安全联锁(BBS)建立及运行流程如下:

A、在其他系统就绪后, 辐射工作人员进入控制区域准备清场, 当插入授权钥匙并按下授权按钮后, 语音警示器和警铃响起, 通知滞留人员离开控制区, 并且 LED 电子屏显示“无关人员请勿进入”, 再次提示无关工作人员离开控制区, 同时辐射工作人员按照既定的路线巡查清场, 清空滞留人员;

B、巡查清场结束后关闭联锁门, 归还授权钥匙, 安全联锁建立完成。

C、测试控制系统给出“准备”信号, 在准备阶段, 控制区域进行一定时间的报警, 再次提醒误留控制区人员按下紧急停机按钮, 保证人身安全;

D、准备阶段结束后, 安全联锁系统允许进入运行状态, 并启动功率源系统, 同时实时监测可能触发停机或紧急停机的各项信号;

E、运行过程中, 安全联锁系统建立切束联锁状态, “禁止进入控制区”状态启动;

F、接收到“停机”信号并停机后, 如果有进入控制区需求, 必须等待剂量率衰减到指定阈值后, 且通风时间足够的情况下进入。出现异常情况时, 可通过紧急停机按钮、联锁门禁触发紧急停机动作, 待异常解除后才可重新复位开机。

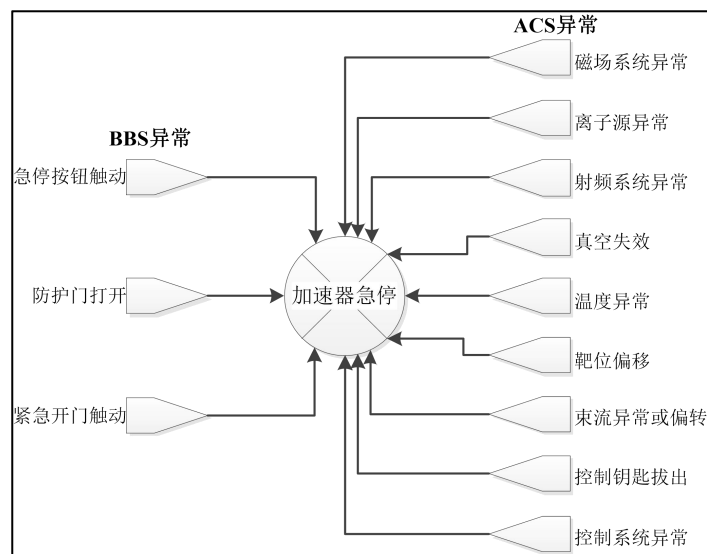


图 10-18 回旋加速器急停逻辑关系图

(2) 热室辐射防护设施

①**电离辐射警告标志**：拟在热室入口醒目位置设置电离辐射警告标志。

②**热室门与加速器药物传输系统联锁**：当回旋加速器室制备出核素之后，放射性核素传输之前，热室设备将根据程序设定，自动检测热室的门是否已经关闭，热室的压力是否满足负压要求；只有这两项条件均满足的情况下，放射性核素才能通过管道进行传送，同时在控制室内操作台上有相应的核素传输工作状态指示灯。

③**固定式剂量率报警仪**：拟在热室内安装固定式辐射剂量率报警仪，当探测到剂量率超过设置阈值时，则有声光报警，人员马上撤离。

④**视频监控系统**：拟在热室内安装视频监控系统，便于辐射工作人员观察操作场所内及周边的情况。

(3) 放化实验室辐射防护设施

①**电离辐射警告标志**：拟在放化实验室入口醒目位置设置电离辐射警告标志。

②**固定式剂量率报警仪**：在放化实验室内安装固定式多探头辐射剂量率仪，当探测到剂量率超过设置阈值时，则有声光报警，人员马上撤离。

(3) 放射性核素的存放控制措施

医院拟使用的正电子放射性核素（ ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu ）均为医院回旋加速器打靶制备，制药完毕后自动进入转运铅罐，工作人员使用长柄转运小推车进行药物转运，通过南侧核素洁梯传送至负一层核素诊断区源库内。

医院应配备专(兼) 职人员负责放射性药物的管理，并建立放射性物质的保管、领用、注销登记、定期检查等制度。按照要求建立专门的放射性同位素台账，加强对放射性药物的管理，严防丢失。暂存含放射性核素的容器，必须容易开启和关闭，容器外必须有明显的标签(注明核素名称、理化状态、射线类型、活度水平、存放起止时间、存放负责人等)。放射性药物暂存场所应有专门可靠的防火、防盗等安全要求，应单独存放，不得与其他易燃、易爆危险品存放在一起。

(4) 放射性“三废”辐射防护设施

①**放射性废水**：核医学制药区放射性废水排水管应采用内壁光滑、少弯曲、扭拐等的铸铁管道，管道在降板空间内采用斜坡地埋走管，埋深不低于 30cm。医院拟新建地埋短半衰期核素衰变池，位于 1#医疗综合楼的一端，衰变池池体四周具有物理隔离，无关人员无法靠近和停留。

②**放射性废气排风系统**：核医学制药区内拟设专用通排风系统，其中，在回旋加

速器机房排风管道穿墙外侧至活性炭过滤装置（含）段裸露部分采用 3~5mm 铅皮进行包裹；热室内合成分装柜、放化实验室内通风橱等顶壁内侧拟设高效过滤装置对放射性废气进行吸附处理，合成分装柜体、手套箱、通风橱等具有足够的铅防护。

③**放射性固体废物**：在核医学制药区产生的放射性固体废物经场所内布置的一定厚度的铅桶进行收集，然后暂存于放射性废物暂存间、放射性废物库内铅桶进行衰变处置。

（5）核医学制药区拟配防护用品

表 10-12 核医学制药区拟配防护设施一览表

序号	防护用品名称	配置场所	数量	铅当量
1	热室柜	合成分装热室柜	1 组	70mmPb
2	通风橱	放化实验室	1 个	10mmPb
3	转运药品铅罐	热室	2 个	50mmPb
			2 个	5mmPb
4	放射性废物暂存桶	回旋加速器机房、热室、放化实验室	3 个	10mmPb
	放射性废物衰变桶/箱	放射性废物暂存间	2 个	10mmPb
			1 个	5mmPb
5	去污工具	洁具室	1 套	/
6	一次性工作服、工作帽、工作鞋、手套、口罩等	更衣室	若干	/
7	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	回旋加速器操作室、放化实验室	3 套	0.5mmPb
8	固定式辐射剂量率仪	回旋加速器机房	1 个	/
9	表面污染监测仪	脱衣检测间（2 间）、接收室	3 台	/
10	便携式 X-γ 辐射监测仪	核医学制药区	1 台	/
11	便携式中子剂量监测仪	核医学制药区	1 台	/
12	个人剂量报警仪	辐射工作人员随身携带	4 台	/
13	个人剂量计	辐射工作人员随身携带	6 套	/
14	防护门	回旋加速器制药区、放化实验室	若干	/

2、负一层核素诊断区

（1）核素诊断场所辐射安全防护措施

①**门禁系统**：拟在患者出入口设置专用门禁系统，对患者的出入进行限制。

②**电离辐射警告标志**：拟在负一层核素诊断区控制区各房间防护门外设置明显的

电离辐射警告标志，警示人员注意安全。

③**门灯联锁及工作状态指示灯**：拟在 PET-CT 室和 SPECT-CT 室防护门上方设置工作状态指示灯，并与防护门联锁，防护门关闭时指示灯为红色，防护门打开时，指示灯灭。

④**紧急止动装置**：在控制台上、射线装置机房内、治疗床上安装供紧急情况使用的强制终止照射的紧急止动按钮。一旦在检查过程中出现紧急情况，工作人员按动紧急止动按钮即可令射线装置立即停止运行。

⑤**操作警示装置**：PET-CT 和 SPECT-CT 扫描时，控制台上的指示灯变亮，警示装置发出警示声音。

⑥**视频监控系统和对讲装置**：在工作场所范围内拟设视频监控系统，便于观察患者的情况、核医学科工作场所进出入口情况；PET-CT、PET-MRI 和 SPECT-CT 室与对应控制室之间拟安装对讲装置，便于工作人员通过对讲装置与机房内受检者联系。

⑦**表面沾污监测**：拟配置表面沾污仪，从控制区离开的人员和物品均进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，应采取相应的去污措施。

(2) 核素诊断区表面污染防治措施

①放射性药物有良好的外包装，送入后要妥善储存及转移，防止意外撒漏；

②操作放射性药物时，在有负压的手套箱内进行，防止放射性物质飞散；

③放射性药物操作人员定期参加相关专业培训，具备相应的技能与防护知识，并配备有适当的防护用品；

④操作台、地面选用易于清污和防污染的材料或材质，并且每天操作完成后使用表面污染监测仪器对操作台、地面、个人防护用品等进行表面污染监测，并购买放射性表面去污用品和试剂进行去污，以满足《电离辐射防护源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的标准值。注射/给药窗口操作台上放置托盘，在操作过程中垫上一次性、容易吸附溅洒液体的厚纸，每次完成注射工作后，将其放入放射性废物桶内，防止操作台放射性沾污。

(3) 核素准备过程中的辐射安全防护设施

①淋洗、药物分装过程防护措施

本项目核素诊断使用的放射性核素 ^{99m}Tc 、 ^{68}Ga 采用发生器淋洗制得，其他放射性核素（ ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu ）均由负二层核医学制药区回旋加速器打靶制

得，放射性核素淋洗、标记、质控及其他放射性核素的分装均在负一层。医护人员在进行核素分装、标记及淋洗、质控等操作时，首先做好个人防护，包括穿铅衣，戴铅眼镜、铅手套、口罩、工作帽等，佩戴好个人剂量计，将药物储存罐或发生器转移至手套箱内，再进行相关操作。手套箱操作面下方设有 2 个活动式铅门作为操作口，医护人员通过此操作口进行操作。

②发生器的存储管理措施

本项目拟外购的 ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)、 ^{68}Ge (^{68}Ga) 规格分别为 1Ci、30mCi，发生器货包出厂前均按《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）规定货包的要求进行包装，货包表面任意一点的最高辐射水平为 $0.005\text{mSv/h} < H \leq 0.5\text{mSv/h}$ ，同时发生器设计分别满足相关标准的要求。医院订购的发生器货包由生产厂家运至负二层的接收室，再通过核素洁梯将发生器送入负一层核素诊断区源库待使用。废发生器暂存在负一层核素诊断区放射性废物暂存间铅废物箱内，最终由有资质单位回收。

（4）诊疗过程中的辐射安全防护设施

1）PET 核素诊断过程的辐射安全防护设施

PET 核素诊断使用的 ^{68}Ge (^{68}Ga) 淋洗、标记质控及打靶制备的药物分装等操作均在分装注射室手套箱内完成，该手套箱有效屏蔽效能为 60mmPb，手套箱内设活度计，分装注射室内拟设固定式辐射剂量监测仪和视频监控系统。分装后的 PET 核素诊断药物先装于具有铅套的注射器内，再将注射器置于 10mmPb 的铅盒并转移至注射窗，注射时医生和病人间隔有 40mmPb 的注射窗。核素诊断过程中各区域产生的放射性废物采用一定屏蔽厚度的铅桶收集，然后转入放射性废物间内放射性固废暂存箱进行衰变。医生在核素诊疗过程中穿有铅衣、铅帽、铅围领、铅手套、铅眼镜等（防护铅当量为 0.5mm）个人防护用品，并佩戴个人剂量报警仪。

2）SPECT 核素诊断过程的辐射安全防护设施

SPECT 核素诊断药物淋洗、标记、质控、分装等操作均在分装注射室手套箱内完成，手套箱屏蔽效能为 10mm 铅当量，手套箱内设活度计，分装注射室内拟设固定式辐射剂量监测仪和视频监控系统。分装后的 PET 核素诊断药物先装于具有铅套的注射器内，再将注射器置于 10mmPb 的铅盒并转移至注射窗，注射时医生和病人间隔有 20mmPb 的注射窗。核素诊断过程中各区域产生的放射性废物采用一定屏蔽厚度的铅桶收集，然后转入放射性废物间内放射性固废暂存箱进行衰变。医生在核素诊疗过程

中穿有铅衣、铅帽、铅围领、铅手套、铅眼镜等（防护铅当量为 0.5mm）个人防护用品，并佩戴个人剂量报警仪。

（5）药物存储过程的辐射安全防护设施

本项目核素诊断区药物由回旋加速器打靶生产、淋洗制备或外购获得，获得的放射性核素由负二层核素洁梯传送至负一层核素诊断区源库，药物均当天用完，不贮存。核素诊断区源库内拟配置双人双锁储源柜，未用完放射性药物、发生器或暂时不用的放射性药品由医护人员存放在源库保险柜中暂存，日常工作期间由值班人员巡视检查，源库出入口拟安装监控摄像头、红外报警系统，一旦发现异常立即报警。

核素诊断区源库具有足够的屏蔽防护，医院应采取防火、防水、防盗、防丢失、防破坏、防射线泄漏的“六防”安全措施，应采取以下措施进一步加强：

①放射性药物的存储容器要有适当的屏蔽。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；

②源库要有专人进行管理，并定期进行辐射剂量的监测，无关人员不准许进入；

③储放放射性药物要有进出登记，包括生产日期、核素种类、理化性质、活度和使用情况的详细记录等，建立放射性同位素台帐制度；

④医院有完善的放射性核素存储、领取、使用、归还登记和检查制度，做到交接账目清楚、账物相符，记录资料完整。

（6）人员防护措施

1）给药后患者的防护措施

1#医疗综合楼负一层核素诊断区内，医护人员通过一定铅当量的注射给药窗为患者注射核素，接受药物注射后的患者在专用注射后等候室内进行等候 SPECT 或 PET 扫描成像检测，扫描完成后再进入检后休息室内进行休息留观，最后经过专用电梯厅离开核素诊断区。核素诊断区内各功能用房具有足够的墙体、防护门窗等进行防护，等候、休息的患者之间采用铅屏风进行分隔，给药后患者与给药前患者路径不交叉，患者就诊路径流畅。

2）辐射工作人员的防护

为减少辐射工作人员受到的照射剂量，普遍采用屏蔽防护、时间防护和距离防护。

①**屏蔽防护：**负一层核素诊断区内具有足够、有效的实体屏蔽，能够有效减小核素产生的辐射危害；为核素操作人员配备了铅防护手套、铅衣等个人防护用品，注射

器配备注射防护套和注射器防护提盒，本项目所有拟配备的防护用品和辅助防护设施的铅当量不低于 0.25mmPb。

②**时间防护**：在满足工作质量的前提下，尽量减少工作时间，使照射时间最小化。

③**距离防护**：在不影响工作质量前提下，保持与辐射源尽可能大的距离。

④**表面沾污监测**：设置了淋浴卫生通过间，辐射工作人员操作后离开辐射工作场所前洗手和进行表面污染监测，如污染水平超过规定值要求，采取相应的去污措施。

⑤**个人剂量检测**：医院拟为辐射工作人员配备个人剂量计，并要求上班期间必须正确佩戴，并定期送检，且定期开展职业健康体检，建立个人剂量档案和个人职业健康监护档案。

3) 其他人员防护

a、**屏蔽防护**：辐射工作场所外围环境中的其他人员主要利用辐射场所墙体、顶棚、楼板、防护门窗等实体屏蔽防护。

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

c、**距离防护**：设置必要的防护、隔离、警示措施，尽可能增大人员与辐射场所之间的防护距离。

(7) 放射性“三废”辐射防护设施

①**放射性废水**：负一层核素诊断区放射性废水排水管拟采用内壁光滑、少弯曲、扭拐等的铸铁管道，医院拟在放射性废水管道裸露部分增加 3~5mm 铅皮包裹。医院拟新建地埋短半衰期核素衰变池，位于 1#医疗综合楼的一端，衰变池池体四周具有物理隔离，无关人员无法靠近和停留。

②**放射性废气排风系统**：负一层核素诊断区内拟设专用通排风系统，其中分装注射室内手套箱顶壁内侧拟设高效过滤装置对放射性废气进行吸附处理后，经管道引至排风井内合管后，在屋顶经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放，手套箱具有足够的铅防护；工作场所内设有专用通风系统，新风量大于排风量，各功能场所处于负压，场所内产生的放射性废气经管道引至排放井后，经排风井引至屋顶经活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放。

③**放射性固体废物**：在负一层核素诊断区内产生的放射性固体废物经场所内布置的一定厚度的铅桶进行收集后，暂存于源库西侧的放射性废物暂存间铅桶内进行衰变

处置。

(8) 核素诊断区拟配防护设施

表 10-13 负一层核素诊断区内拟配防护设施一览表

序号	配置场所	防护用品名称	数量	备注
1	源库	保险柜	1 个	双人双锁
2	校准源室	保险柜	1 个	双人双锁
3	分装注射室	SPECT 手套箱	1 个	10mmPb
		PET 手套箱	1 个	60mmPb
		SPECT 注射窗	1 个	20mmPb
		PET 注射窗	1 个	40mmPb
		SPECT 注射器屏蔽套	若干	2mmPb
		PET 注射器屏蔽套	若干	8mmPb
		SPECT 注射器防护提盒	1 个	5mmPb
		PET 注射器防护提盒	1 个	20mmPb
		放射性核素防护铅罐	1 个	PET 核素 50mmPb
			1 个	PET 核素 10mmPb
4	分装注射室、给药区、VIP PET 给药后候诊室、PET 给药后候诊室、SPECT 给药后候诊室、SPECT 检后休息室、PET 检后休息室	放射性废物暂存铅桶	7 个	10mmPb
5	放射性废物暂存间	放射性废物衰变铅箱/桶	4 个	10mmPb
6	PET 给药后候诊室	铅屏风	3 个	10mmPb
	SPECT 给药后候诊室		3 个	5mmPb
7	SPECT-CT 室	防护窗	1 个	5mmPb
	PET-CT 室、PET-MRI 室		2 个	18mmPb
	检查廊与采光庭院之间		1 个	15mmPb
8	洁具间、污洗间	去污工具组	2 套	/
9	分装注射室	防护门	5 扇	8/10mmPb
	源库、放射性废物暂存间		2 扇	10mmPb
	给药区东侧		1 扇	10mmPb
	运动负荷室/抢救室		3 扇	10mmPb
	PET 给药后候诊室、VIP PET 给药后候诊室、SPECT 给药后候诊室		6 扇	12mmPb

	SPECT 给药后候诊室		2 扇	给药区侧 15mmPb, 检查廊侧 5mmPb
	PET-CT、PET-MRI 室		4 扇	10/15mmPb
	SPECT-CT 室		2 扇	5/15mmPb
	SPECT 检后休息室、PET 检后休息室		2 扇	15mmPb
	专用电梯厅出口防护门		1 扇	15mmPb
10	更衣缓冲间	一次性工作服、工作帽、工作鞋、手套、口罩等	若干	/
		铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	5 套	0.5mmPb
11	控制廊	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	3 套	0.5mmPb
12	分装注射室、检查廊末端	表面污染监测仪	2 台	/
13	核素诊断区负一层	便携式 X-γ 辐射监测仪	1 台	/
14	核素分装、标记、注射人员和摆位护士随身佩戴	个人剂量报警仪	4 台	/
15	辐射工作人员随身佩戴	个人剂量计	12 套	每人 1 套

3、二层核素治疗区

(1) 放射性核素使用场所辐射安全措施

①**门禁系统**：拟在患者出入口设置专用门禁系统，对患者的出入进行限制。

②**电离辐射警告标志**：拟在二层核素治疗区控制区各房间防护门外设置明显的电离辐射警告标志，警示人员注意安全。

③**门灯联锁**：拟在介入手术室防护门上方设置工作状态指示灯，并与防护门联锁，防护门关闭时指示灯为红色，防护门打开时，指示灯灭。

④**紧急止动装置**：在控制室控制台、射线装置机房内、治疗床上设强制终止照射的紧急止动按钮。在检查过程中一旦出现紧急情况，医护人员按动紧急止动按钮即可令射线装置立即停止运行。

⑤**操作警示装置**：CBCT或DSA的X线系统出束时，控制台上的指示灯变色，同时蜂鸣器发出声音。

⑥**闭门、防夹装置**：本项目患者进出手术室拟采用电动平开式防护门，医生进出门、污物进出门、分装给药室与手术室之间拟设手动推拉式门。拟在电动平开式防护门设置红外线防夹人设备（防止电动门在运行过程中发生挤伤人员），拟安装自动闭

门装置。

⑦**视频监控系统和对讲装置**：在工作场所范围内拟设视频监控系统，便于观察患者的情况、核医学科工作场所进出入口情况；介入手术室与控制室、给药窗口外侧与给药窗内侧之间拟安装对讲装置，便于医护人员通过对讲装置与患者交流。

⑧**表面沾污监测**：拟分别配置表面沾污仪，从控制区离开的人员和物品均进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，应采取相应的去污措施。

(2) DSA-CBCT 固有辐射安全防护设施

①**采用栅控技术**：在每次脉冲曝光间隔向旋转阳极加一负电压，抵消曝光脉冲的启辉与余辉，起到消除软 X 射线、提高有用射线品质并减小脉冲宽度作用。

②**采用光谱过滤技术**：在 X 射线管头或影像增强器的窗口处放置合适铝滤过板，以多消除软 X 射线以及减少二次散射，优化有用 X 射线谱。设备提供适应不同应用时所可以选用的各种形状与规格的准直器隔板和铝滤过板。

③**采用脉冲透视技术**：在透视图像数字化基础上实现脉冲透视（如每秒 25 帧、12.5 帧、6 帧等可供选择），改善图像清晰度；并能明显地减少透视剂量。

④**采用图像冻结技术**：每次透视的最后一帧图像被暂存并保留于监视器上显示，即称之为图像冻结（last image hold, LiH）。充分利用此方法可以明显缩短总透视时间，达到减少不必要的照射。

⑤**配备相应的表征剂量的指示装置**：配备能在线监测表征输出剂量的指示装置，例如剂量面积乘积（DAP）仪等。

⑥**配备辅助防护设施**：DSA 配备床下铅帘（0.5mmPb）和悬吊铅帘(0.5mmPb)等辅助防护用品与设施，则在设备运行中可用于加强对有关人员采取放射防护与安全措施。

⑦**正常情况下**，必须按规定程序并经控制台确认验证设置无误时，才能由“启动”键启动照射；同时在操作台和介入手术床体旁上均设置“紧急止动”按钮，一旦发生异常情况，工作人员可立即按下此按钮来停止照射。

(3) 药物存储过程的辐射安全防护设施

1#医疗综合楼二层核素治疗区内使用的放射性核素 ^{99m}Tc 为负一层发生器淋洗制得，随转运铅盒一起转移到二层核素治疗区源库内；敷贴治疗用 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源为外购放射源，医院拟在购得敷贴放射源后暂存在敷贴室保险柜内，每天根据患者情况随

去随用，治疗后经消毒后再存入保险柜内；甲吸检查用 ^{131}I 通过采购已分装好的核素，采购的 ^{103}Pd 种子源、 ^{125}I 粒子源通过负二层核医学制药区内核素洁梯送到二层核素治疗区库房储源柜内暂存，医护人员按需取用； ^{90}Y 微球每瓶活度约为 3.0GBq，放置在 6.4mm 铅防护罐中， ^{90}Y 微球一般于手术前 1 天由供货商送达，经接收人员核对放射性药物名称、活度，检查药品包装和外观质量，再与供药公司办理交接手续；其他放射性核素均由医院外购通过负二层核素洁梯传送至二层核素治疗区源库内。在二层核素治疗区内，医院拟采取以下措施对放射性核素进行管理：

①建立放射性核素交接、存储、领取、使用、归还登记和检查制度台账，做到交接账目清楚、账物相符，记录资料完整；

②储存放射性核素要有进出登记，包括生产日期、核素种类、理化性质、活度和使用情况的详细记录等；

③在二层核素治疗区内配置门禁系统，非授权人员不能进入核医学工作场所，放射性核素台账及源库由专人进行管理，并定期进行辐射剂量的监测，无关人员不准许进入；

④源库内拟配置双人双锁储源柜，未用完放射性药物或暂时不用的放射性药品（如 ^{90}Y 、 ^{89}Sr 等外购成品药物）由医护人员存放在源库保险柜中暂存，日常工作期间核素治疗区拟安排值班人员巡视检查；

⑤源库出入口拟安装监控摄像头、红外报警系统，一旦发现异常立即报警；

⑥源库具有足够的屏蔽防护，为放射性物质暂存专用场所，核素屏蔽容器与放射性核素一起存入储源柜，源库具备防火、防水、防盗、防丢失、防破坏、防射线泄漏的“六防”安全措施。

（4）药物分装、制备过程辐射防护措施

二层核素治疗区内使用的放射性核素中甲吸检查、敷贴治疗不涉及放射性核素分装，涉及分装操作的放射性核素均在二层核素治疗区手套箱内进行。医院拟配置有效屏蔽效能为 15mmPb 的手套箱，手套箱内设活度计，场所内拟设视频监控系统。医护人员在进行核素分装操作时首先做好个人防护，包括穿铅衣，戴铅眼镜、铅手套、口罩、工作帽等，佩戴好个人剂量计，将药物储存罐或发生器转移至手套箱内，再进行相关操作。手套箱操作面下方设有 2 个活动式铅门作为操作口，医护人员通过此操作口进行操作。

(5) 治疗过程中的辐射安全防护措施

1) 手术室内表面污染防治措施

在介入核素治疗前，先在手术室手术床面铺设一次性防水垫巾，地面铺设一次性防水铺巾，并覆盖易洒落药品的所有区域，避免药物洒落区域污染；在手术床面和移动注射车之间的地板上放置一次性铺巾，导管接头下方需放置双层铺巾，以防术中发生放射性污染。

2) 其他区域表面污染防治措施

①放射性药物有良好的外包装，送入后要妥善储存及转移，防止意外撒漏；

②操作放射性药物时，在有负压的手套箱内进行，防止放射性物质飞散；

③放射性药物操作人员定期参加相关专业培训，具备相应的技能与防护知识，并配备有适当的防护用品；

④操作台、地面选用易于清污和防污染的材料或材质，并且每天操作完成后使用表面污染监测仪器对操作台、地面、个人防护用品等进行表面污染监测，并购买放射性表面去污用品和试剂进行去污，以满足《电离辐射防护源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的标准值。注射/给药窗口操作台上放置托盘，在操作过程中垫上一次性和容易吸附溅洒液体的厚纸，每次完成注射工作后，将其放入放射性废物桶内，这样便于保持操作台免受放射性沾污。

3) 非住院核素治疗过程的辐射安全防护措施

①敷贴治疗过程辐射安全防护措施

^{90}Sr - ^{90}Y 皮肤敷贴器是将 ^{90}Sr - ^{90}Y 不溶性化合物均匀滚轧在银底与金面之间，装在铝合金壳内，制成 30mm×30mm 的敷贴放射源。 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器除铝合金外壳外，还配有铝合金手柄和有机玻璃防护屏，使用时将手柄插入有机玻璃防护屏中心孔内，并拧入铝合金源壳螺栓孔中。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，使用后及时存入保险柜内。

②甲吸检查过程辐射安全防护措施

本项目 ^{131}I 甲吸检测购买已分装好的碘[^{131}I]化钠药品，由医护人员取药后供患者口服。医护人员将放射性药物递给患者，在医护人员的注视下完成服药，服药后患者离开甲吸室，定时回到甲吸室进行监测。

③其他核素治疗过程辐射安全防护措施

在二层治疗区内,其他非住院核素治疗的患者使用放射性核素为 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{223}Ra 和 ^{225}Ac , 放射性核素经手套箱内分装后放入转移铅盒中, 再转移到给药窗口, 给药窗内侧医护人员和病人间隔有 5mmPb 的给药窗, 患者接受注射/服药后进入留观室进行留观, 一定时间后无异常, 则通过专用电梯厅离开核素治疗区。核素治疗过程中各区域产生的放射性废物采用一定屏蔽厚度的铅桶收集, 然后转入放射性废物暂存间放射性固废暂存箱进行衰变。

4) 住院核素治疗过程的辐射安全防护设施

给药装置须保持输送系统的密闭性和无菌操作。对 ^{90}Y 微球手术先将含 ^{90}Y 树脂微球的无菌 V 瓶放置于注射防护盒 (6mm 有机玻璃) 中, 对“ ^{188}Re 靶向探针”手术给药先将含“ ^{188}Re 靶向探针”的无菌 V 瓶放置于防护盒 (铅玻璃材质), 将注射器套上防护套, 再连接输液管、三通旋阀等, 输液管接管处使用双重卡扣, 连接后介入医生确认连接是否正确, 并在输注前再次确认, 在床旁 (临近导管连接处) 放置 1 台个人剂量报警仪进行实时监控。

图10-19 手术给药过程辐射防护设施

① ^{188}Re 介入注射治疗过程

A、核素注射过程

在开展 ^{188}Re 核素注射前, 医护人员在屏蔽效能为 15mmPb 的手套箱内使用放射性核素 ^{188}Re 标记靶向探针; 标记完毕后, 放置到内层为轻质材料的铅容器内, 再将内含靶向探针的铅容器转移到介入手术室内对患者患处进行注射。 ^{188}Re 标记的靶向探针注射过程中, 医护人员位于 2mmPb 的移动注射车/铅屏风后, 穿戴 0.5mmPb 个人防护用品。

B、核素分布检查

手术注射 ^{188}Re 靶向探针后 48h 内, 根据核医学科诊疗安排, 患者在穿戴个人防护用品的医护人员陪同下, 经患者专用电梯到负一层核素诊断区 SPECT-CT 室进行扫描检查核素分布情况 (利用 ^{188}Re 衰变放出的光子, 不需再注射放射性核素)。

② ^{90}Y 微球治疗过程

A、核素注射过程

第一阶段：放射性药物 ^{99m}Tc 经核素洁梯传送到二层核素治疗区后，医护人员穿戴 0.5mmPb 个人防护用品，将放射性药物 ^{99m}Tc 连同转移铅盒一起转移到介入手术室内，按照手术流程为患者插入导管后，通过导管向患者输注放射性药物 ^{99m}Tc ，医护人员位于 2mmPb 的移动注射车后，在插管和拔管时才靠近患者。

第二阶段：在手套箱内用注射器抽取合适剂量的 ^{90}Y 微球注入 V 瓶，放置于注射防护盒（6mm 有机玻璃）内，防护盒置于防护铅罐中送入介入手术室，再连接输液管、三通旋阀等，输液管接管处使用双重卡扣，连接后介入医师确认所有装置是否连接正确；医生按照手术流程为患者插入导管后，通过导管向患者输注放射性药物 ^{90}Y 微球。

B、核素分布检查

治疗结束后将患者送至二层核素治疗区北侧隔离病房进行住院观察；住院期间根据核医学科诊疗安排，患者在穿戴个人防护用品的医护人员陪同下，经患者专用电梯到负一层核素诊断区 SPECT-CT 室进行扫描检查核素分布情况，并进行剂量学评估。

③粒籽植入治疗

A、粒籽植入过程

在开展核素 ^{103}Pd 种子源或 ^{125}I 粒子源植入治疗前，先对粒子源采用镊子等长柄夹具按照规范要求消毒、质检等操作，再将粒子源放入铅盒中进行转移；在对患者进行植入手术时，先将粒子源装入粒子枪中，通过穿刺针植入患者患处。在粒籽植入过程中，医护人员身穿 0.5mmPb 个人防护用品。

B、住院治疗过程

a、医院对粒籽植入患者，分别设置了 ^{125}I 和 ^{103}Pd 粒籽植入患者专用病房，其墙体、天棚、地板和门窗应符合防护要求，门外应有电离辐射警示标识，病房内除患者和医务人员外，其他无关人员不得入内。

b、医院有供患者专用卫生间和浴室；治疗住院期间病房内无需清扫，除食物盘外，房内其他物品均不会带出病房；

c、医护人员应告知治疗患者 ^{125}I 和 ^{103}Pd 粒子源产生的 γ 射线的影响。

d、隔离病房内患者每次排出的尿液应进行过滤，以防粒子随尿液排出而丢失；医院拟为此类患者病房内准备符合防护要求的拾源器具和贮源容器，并告知患者拾取和存贮粒子源的安全操作方法，如发现此类事件及时通知医护人员回收；

e、病人回家后，家庭成员或其他密切接触者长时间与患者接触时，其距离应保持

在 1m 以上。儿童和孕妇不能与病人同住一室，患者也不能接触儿童；对于植入高活度粒子源的患者，医护人员应告知出院后的 2 月内应与配偶分床居住。

C、手术植入结束后

a、粒籽植入手术完成后，医护人员应检查工作场所，清点未植入的粒子数量。利用便携式 γ 辐射剂量率监测仪查找是否有遗漏的粒子源，任何情况下发现脱落于人体外的粒子源均用镊子或长柄夹具类工具拾取后放置到铅制防护罐中，暂存在源库储源柜废弃粒子源铅罐中，统一返回粒子源生产厂家进行处理或暂存十个半衰期后作为医疗废物进行处理；

b、医护人员在规定的时间内完成手术记录，特别是植入粒子数量，做好粒子源领用、使用台账记录；

c、粒籽植入后应进行质量评估，包括粒子及剂量重建。植入后 30 天内应返回医院进行 CBCT 检查，确认植入的粒子数目，观察肿瘤的体积改变，了解疗效；

d、粒籽植入后，根据粒籽植入部位，结合 CBCT 检查结果，利用 TPS 系统计算靶区及相邻正常组织的剂量分布，根据评价结果必要时补充。

5) 其他辐射安全管控措施

①人员的防护措施

A、给药后患者的防护措施

非住院治疗患者服药、敷贴或者注射完成短暂观察后，可直接出院；住院治疗患者给药/服药后在医护人员的协助下，进入北侧单人隔离病房内。根据设计方案，本项目给药后患者采用隔离管理，候诊、留观、住院路径不交叉，住院治疗期间人员不在患者通道随意走动，隔离病房内的患者采用专用厕所进行大小便，在观察结束后按指定线路离开核医学科，避免了给药后患者与给药前患者路径的交叉。

B、辐射工作人员的防护

为减少辐射工作人员受到的照射剂量，普遍采用屏蔽防护、时间防护和距离防护。

a、屏蔽防护：二层核素治疗区具有足够、有效的实体屏蔽，能够有效减小核素产生的辐射危害；注射器拟配备注射防护套和注射器防护提盒，为核素操作人员配备了铅防护手套、铅衣等个人防护用品，拟配备的个人防护用品和辅助防护设施的铅当量不低于 0.25mmPb。

b、时间防护：在满足工作质量的前提下，尽量减少工作时间，使照射时间最小化。

c、距离防护：在不影响工作质量前提下，保持与辐射源尽可能大的距离。

d、表面沾污监测：辐射工作人员操作核素后，离开核医学工作场所前应洗手和进行表面污染监测，如污染水平超过规定值要求，采取相应的去污措施。

e、个人剂量检测：医院拟为辐射工作人员配备个人剂量计，并要求上班期间必须正确佩戴，并定期送检，且定期开展职业健康体检，建立个人剂量档案和个人职业健康监护档案。

C、其他人员防护

a、屏蔽防护：辐射工作场所外围环境中的其他人员主要依托辐射场所墙体、顶棚、楼板、防护门窗等实体进行屏蔽防护。

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

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

②时间、空间的管控

1#医疗综合楼二层核素治疗区介入手术室内，每1台核素介入手术结束后均先将患者转移到隔离病房内，再对介入手术室进行打扫、消杀、检测解控后，再安排下1名患者进入介入手术室内接受手术治疗，手术前患者与手术后患者路径不交叉；接受核素手术治疗前的患者与完成核素手术注入/粒籽植入治疗患者通道不同，且放射性通道与非放射性通道设有专门的防护门进行空间的隔断，能有效增加给药后患者与周围保护目标的距离，减小对保护目标的辐射影响。

③药物转运的管控

1#医疗综合楼二层核素治疗区内使用的放射性核素均放置在转运铅罐/盒内，通过核素洁梯转移到源库内储源柜待用，根据需要从储源柜中取药后再连同转运铅罐/盒一起转移到手套箱/自动分装柜中进行操作，能够尽可能的减小核素衰败产生的射线对公众的影响。

④患者转移管理

患者手术期间周围没有无关人员逗留，接受核素手术治疗的患者经过专用通道，在医护人员的协助下，进入北侧隔离病房进行住院留观，转移路径较短，转移过程中无其他保护目标，故患者在完成核素手术治疗转移过程中对周围公众造成辐射影响较

小；对于常规介入手术，患者接受介入手术后，在护士的协助下经准备间向南进入苏醒间，患者苏醒后在患者家属陪同下，自行离开。

⑤住院核素介入治疗和常规介入手术的交叉管理措施

A、介入手术统一安排

医院二层核素治疗区根据各业务科室介入手术需求，安排核素介入治疗和常规介入手术治疗时间段，结合患者手术预约情况，将核素介入治疗和常规介入手术治疗分别集中安排，杜绝同一天内核素介入手术治疗与常规介入手术反复交叉、随机安排的情况。

B、固体废物分类收集、处置

在介入手术室每台手术结束后，立即对介入手术室内的固体废物进行清理和场所清洁，手术过程中产生的固体废物按照放射性固体废物与非放射性固体废物进行分类收集、处理。

C、术后场所及时监测与解控

介入手术室每台次核素介入治疗后，均应采用北侧分装给药室内的便携式辐射巡测仪和表面污染仪对工作场所进行监测，手术结束后对所有辐射工作人员体表、手术床、工作台面、移动注射车及地面等进行表面污染水平监测，重点监测术前铺设铺巾区域及人员频繁走动路径。根据 GB18871-2002：“工作台、设备、墙壁、地面的 β 表面污染应小于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，辐射工作人员工作服、手套、工作鞋的 β 表面污染应小于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，手、皮肤、内衣、工作袜的 β 表面污染应小于 $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ”。

若表面污染水平超过控制水平，应采取相应的去污措施，在清洁后须用表面污染监测仪测量污染区，如果 β 表面污染大于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，该污染区未达到控制标准，使用专用放射性去污剂配合吸附材料（药棉或纸巾），由外向内螺旋式擦拭污染区域，避免污染扩散，直到该污染区 β 表面污染小于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ 为止，擦拭物收集至放射性固体废物废弃物衰变桶中，作为放射性固体废物进行处理。对污染严重的物品，按放射性废物管理规定进行收集、暂存和处置。

待表面污染水平监测合格且污物转运完毕后，可对介入手术室进行解控，安排下一名患者进入手术室进行治疗。

（6）放射性“三废”辐射防护设施

①放射性废水：二层核素治疗区放射性废水排水管拟采用内壁光滑、少弯曲、扭

拐等的铸铁管道采用倾斜自流的方式，进入医院新建长半衰期核素衰变池，衰变池池体采用钢筋混凝土浇筑，具有足够的屏蔽防护，衰变池四周均设有物理隔离，位于 1# 医疗综合楼的一端，无关人员无法靠近和停留。

②**放射性废气排风系统：**二层核素治疗区内拟设专用通排风系统，其中分装给药室手套箱及自动分装柜顶壁内侧拟设高效过滤装置对放射性废气进行吸附处理后，经管道引至排风井内合管后，在屋顶经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放，手套箱具有足够的铅防护；工作场所内设有专用通风系统，新风量大于排风量，各功能场所处于负压，场所内产生的放射性废气经管道引至排放井后，经排风井引至屋顶经活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放。

③**放射性固体废物：**在二层核素治疗区产生的放射性固体废物分类收集后，病房区和留观室内产生的放射性固体废物经收集后，在放射性废物暂存间 2 铅箱内暂存衰变；分装给药室、注射给药区、介入手术室等位置产生的放射性固体废物经过分类收集后，在放射性废物暂存间 1 铅箱内暂存衰变。

8) 二层核素治疗区拟配防护设施

表 10-14 二层核素治疗区内拟配防护设施一览表

序号	配置场所	防护用品名称	数量	备注
1	源库	保险柜	1 个	双人双锁
2	分装给药室	手套箱	1 个	15mmPb
		自动分装柜	1 个	15mmPb
		注射、给药铅窗	2 个	5mmPb
		转运铅罐/盒	3 个	10mmPb
		无菌 V 瓶	2 个	有机玻璃材质
		注射器屏蔽套	若干	^{188}Re 及其他核素治疗 2mmPb (内层为轻质材料)
			若干	^{90}Y 微球治疗 15mm 有机玻璃
		注射防护盒	若干	^{188}Re 介入注射治疗 2mm 铅当量防护玻璃
			若干	^{90}Y 微球治疗 6mm 有机玻璃
		对讲装置	1 套	给药窗
3	隔离病房 (6 间)	铅防护窗	6 扇	5mmPb
4	介入手术室	移动注射车	1 台	2mmPb
		移动铅屏风	1 扇	2mmPb

		防护窗	1 扇	4mmPb
		铅悬挂防护屏/铅防护吊帘	1 副	0.5mmPb
		床侧防护帘/床侧防护屏 (0.5mmPb)	1 副	0.5mmPb
		紧急制动装置	2 个	/
		自动闭门、防夹装置	2 个	/
		工作状态指示灯	2 个	/
		对讲装置	1 套	/
5	敷贴室	保险柜	1 个	/
6	甲吸室	铅盒	1 个	5mmPb
7	分装给药室、留观室、病房 走道、隔离病房 (6 间)	放射性废物暂存铅桶	9 个	5mmPb
8	放射性废物暂存间 1	放射性废物衰变铅箱/桶	2 个	5mmPb
	放射性废物暂存间 2		4 个	5mmPb
9	污洗间	去污工具组	1 套	/
10	分装给药室	防护门	5 扇	5mmPb
	源库、放射性废物暂存间 1、放射性废物暂存间 2		2 扇	5mmPb
	病房走道		2 扇	5mmPb
	隔离病房 (6 间)、留观室		7 扇	5mmPb
	介入手术室		5 扇	4/5mmPb
	专用电梯厅与病房走道出 口之间防护门		1 扇	5mmPb
	敷贴室、甲吸室		2 扇	2mmPb
11	更衣室	一次性工作服、工作帽、 工作鞋、手套、口罩等	若干	/
		铅防护衣、铅橡胶颈套、铅 橡胶帽子、铅防护眼镜	6 套	0.5mmPb, 分装给药室最多 3 人 介入手术治疗最多同时工作 3 人
12	分装给药室、病房走道末端	表面污染监测仪	2 台	/
13	二层核素治疗区	便携式 X-γ 辐射监测仪	1 台	/
14	手术医生、分装、标记和注 射人员, 介入护士随身佩戴	个人剂量报警仪	4 台	介入手术 3 台, 分装给药室 1 台
15	辐射工作人员随身佩戴	个人剂量计	22 套	每人 1 套

4、三层核素治疗区

(1) 表面污染防治措施

①放射性药物有良好的外包装，送入后要妥善储存及转移，防止意外撒漏；

②操作放射性药物时，在有负压的手套箱内进行，防止放射性物质飞散，对甲癌使用的 ^{131}I 核素采用密闭自动分装柜进行分装；

③放射性药物操作人员定期参加相关专业培训，具备相应的技能与防护知识，并配备有适当的防护用品；

④操作台、地面选用易于清污和防污染的材料或材质，并且每天操作完成后使用表面污染监测仪器对操作台、地面、个人防护用品等进行表面污染监测，并购买放射性表面去污用品和试剂进行去污，以满足《电离辐射防护源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的标准值。注射/给药窗口操作台上放置托盘，在操作过程中垫上一次性和容易吸附溅洒液体的厚纸，每次完成注射工作后，将其放入放射性废物桶内，这样便于保持操作台免受放射性沾污。

(2) 放射性核素使用场所辐射安全措施

①门禁系统：拟在患者出入口设置专用门禁系统，对患者的出入进行限制。

②电离辐射警告标志：拟在三层核素治疗区控制区各房间防护门外设置明显的电离辐射警告标志，警示人员注意安全。

③视频监控系统和对讲装置：在工作场所范围内拟设视频监控系统，便于观察患者的情况、核医学科工作场所进出入口情况；给药窗口外侧与给药窗内侧之间拟安装对讲装置，便于医护人员通过对讲装置与患者交流。

④表面沾污监测：在专用电梯厅入口（患者出口）和分装给药室拟分别配置 1 台表面沾污仪，从控制区离开的人员和物品均进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，应采取相应的去污措施。

(3) 药物存储过程的辐射安全防护设施

1#医疗综合楼三层核素治疗区内使用的放射性核素 ^{177}Lu 、 ^{131}I 均为外购获得，医院采购的放射性药物在供药商送到负二层核医学制药区接收室后，由交接人员通过北侧核素洁梯送到三层核素治疗区库房储源柜内暂存，医院拟采取以下措施对放射性核素进行管理：

①建立放射性核素交接、存储、领取、使用、归还登记和检查制度台账，做到交

接账目清楚、账物相符，记录资料完整；

②源库内拟配置双人双锁储源柜，未用完放射性药物或暂时不用的放射性药品由医护人员存放在源库保险柜中暂存，日常工作期间拟安排值班人员巡视；

③储存放射性核素要有进出登记，包括生产日期、核素种类、理化性质、活度和使用情况的详细记录等；

④在三层核素治疗区内配置门禁系统，非授权人员不能进工作场所，放射性核素台账及源库由专人进行管理，并定期进行辐射剂量的监测，无关人员不准许进入；

⑤源库出入口拟安装监控摄像头、红外报警系统，一旦发现异常立即报警；

⑥源库具有足够的屏蔽防护，为放射性物质暂存专用场所，核素屏蔽容器与放射性核素一起存入储源柜，具备防火、防水、防盗、防丢失、防破坏、防射线泄漏的“六防”安全措施。

（4）分装过程辐射防护措施

三层核素治疗区内使用的放射性核素均在分装给药室手套箱内进行，医院拟配置屏蔽效能为 40mmPb 的手套箱和自动分装柜，分装给药室内拟设固定式辐射剂量监测仪和视频监控系统。医护人员在进行核素分装操作法人时首先做好个人防护，包括穿铅衣，戴铅眼镜、铅手套、口罩、工作帽等，佩戴好个人剂量计，将药物储存罐转移至手套箱内，再进行相关操作。

（5）核素给药治疗过程防护措施

在三层治疗区内，甲亢患者使用放射性核素为 ^{131}I ，放射性核素经手套箱内分装后放入转移铅盒中，再转移到给药窗口，给药窗内侧医护人员和患者之间间隔 40mmPb 的给药窗，患者服药后进入甲亢室进行留观，一定时间后无异常，则通过专用电梯厅离开核素治疗区； ^{131}I 甲癌治疗和 ^{177}Lu 肿瘤治疗的患者药物通过自动分装柜(40mmPb)分装药物后，患者在自动分装柜取药窗口取药服用后，分别进入对应隔离病房内接受隔离治疗。核素治疗过程中，病房内、给药窗外侧（病房走道）及甲亢室产生的放射性固体废物经一定屏蔽厚度的铅桶收集后，转入放射性废物暂存间 2 铅箱内进行暂存衰变后处置；分装给药室、配药室、源库等产生的放射性固体废物经一定屏蔽厚度的铅桶收集后，转入放射性废物暂存间 1 铅箱内进行暂存衰变后处置。

（6）其他辐射安全管控措施

1) 给药后患者的防护措施

①人流路径规划

甲亢治疗患者服药后经过一定时间的留观后，可直接出院；住院治疗患者注射药/服药后，进入北侧单人隔离病房内接受隔离治疗。根据设计方案，本项目给药后患者采用隔离管理，服药前、留观、住院患者路径不交叉，住院治疗期间人员不在病房通道随意走动，隔离病房内的患者采用专用厕所进行大小便，在甲亢患者留观结束、住院患者出院后，按指定线路离开核素治疗区，避免了给药后患者与给药前患者路径的交叉。

②时间、空间的管控

1#医疗综合楼三层核素治疗区仅开展 ^{131}I 和 ^{177}Lu 核素治疗，医院通过安排患者治疗时序，如上午收治 ^{131}I 核素治疗患者，下午收治 ^{177}Lu 核素治疗患者，避免服用低活度核素与高活度核素的患者交叉，确保病房通道上（含给药窗）有且仅有 1 名患者；住院患者服药后，进入对应的隔离病房接手隔离治疗，服药窗口距离病房较近，周围无其他保护目标，且放射性通道与非放射性通道设有专门的防护门进行空间的隔断，能有效增加给药后患者与周围保护目标的距离，减小对保护目标的辐射影响。

2) 辐射工作人员的防护

为减少辐射工作人员受到的照射剂量，普遍采用屏蔽防护、时间防护和距离防护。

①屏蔽防护：三层核素治疗区有足够、有效的实体屏蔽，能够有效减小核素产生的辐射危害；为核素操作人员配备了铅防护手套、铅衣等个人防护用品，注射器拟配备注射防护套和注射器防护提盒，所有拟配备的个人防护用品和辅助防护设施的铅当量不低于 0.25mmPb。

②时间防护：在满足工作质量的前提下，尽量减少工作时间，使照射时间最小化。

③距离防护：在不影响工作质量前提下，保持与辐射源尽可能大的距离。

④表面沾污监测：辐射工作人员操作核素后，离开核医学工作场所前应洗手和进行表面污染监测，如污染水平超过规定值要求，采取相应的去污措施。

⑤个人剂量检测：医院拟为辐射工作人员配备个人剂量计，并要求上班期间必须正确佩戴，并定期送检，且定期开展职业健康体检，建立个人剂量档案和个人职业健康监护档案。

3) 其他人员防护

①屏蔽防护：辐射工作场所外围环境中的其他人员主要依托辐射场所墙体、顶棚、

楼板、防护门窗等实体进行屏蔽防护。

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

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

4) 药物转运的管控

1#医疗综合楼三层核素治疗区内使用的放射性核素均放置在转运铅罐/盒内，通过核素洁梯转移到源库内储源柜待用，根据需要从储源柜中连同转运铅罐/盒与核素药物一起转移到手套箱/自动分装柜中进行操作，能够尽可能的减小核素衰败产生的射线对公众的影响。

(7) 放射性“三废”辐射防护设施

①**放射性废水**：三层核素治疗区放射性废水排水管应采用内壁光滑、少弯曲、扭拐等的铸铁管道采用倾斜自流的方式，进入医院新建长半衰期核素衰变池，衰变池池体采用钢筋混凝土浇筑，具有足够的屏蔽防护，衰变池四周均设有物理隔离，位于 1#医疗综合楼的一端，无关人员无法靠近和停留。

②**放射性废气排风系统**：三层核素治疗区内拟设专用通排风系统，其中分装给药室手套箱及自动分装柜顶壁内侧拟设高效过滤装置对放射性废气进行吸附处理后，经管道引至排风井内合管后，在屋顶经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放，手套箱具有足够的铅防护；工作场所内设有专用通风系统，新风量大于排风量，各功能场所处于负压，场所内产生的放射性废气经管道引至排放井后，经排风井引至屋顶经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放。

③**放射性固体废物**：在三层核素治疗区产生的放射性固体废物分类收集后，病房区、患者服药处和甲亢室内产生的放射性固体废物经分类收集后，暂存在放射性废物暂存间 2 铅箱内进行暂存衰变处置；分装给药室、配药室等位置产生的放射性固体废物经过分类收集后，暂存在放射性废物暂存间 1 铅箱内进行暂存衰变处置。

(8) 三层核素治疗区拟配防护用品

表 10-15 三层核素治疗区内拟配防护设施一览表

序号	配置场所	防护用品名称	数量	备注
1	源库	保险柜	1 个	双人双锁
2	分装给药室	手套箱	1 个	40mmPb

		自动分装柜	1 个	40mmPb
		储源铅罐	2 个	¹³¹ I 核素 40mmPb ¹⁷⁷ Lu 核素 10mmPb
		转移铅罐/盒	1 个	20mmPb
		对讲装置	1 套	给药窗
3	配餐室	防护窗	1 扇	20mmPb
	分装给药室		1 扇	40mmPb
	隔离病房		6 扇	15mmPb
4	分装给药室、病房走道、 甲亢室、隔离病房(6 间)	放射性废物暂存铅桶	9 个	10mmPb
5	放射性废物暂存间1、放 射性废物暂存间2	放射性废物衰变铅箱/桶	5 个	10mmPb
			1 个	5mmPb
6	污洗间	去污工具组	1 套	/
7	分装给药室	防护门	6 扇	8/10mmPb
	源库、放射性废物暂存 间 1、放射性废物暂存间 2、甲亢室		6 扇	10mmPb
	隔离病房(6 间)		6 扇	15mmPb
	病房走道两端防护门		2 扇	15mmPb
8	更衣室	一次性工作服、工作帽、工作鞋、 手套、口罩等	若干	/
		铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽 子、铅防护眼镜	6 套	0.5mmPb
9	分装给药室、病房走道 末端	表面污染监测仪	2 台	/
10	三层核素治疗区	便携式 X-γ辐射监测仪	1 台	/
11	分装、标记和注射人员， 技师和护士随身佩戴	个人剂量报警仪	2 台	巡检医生、分装给药 操作人员各 1 台
12	辐射工作人员随身佩戴	个人剂量计	6 套	每人 1 套

5、小结

综上所述，本项目核医学科按照上述辐射安全与防护措施落实后，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的相关要求。放射性废水能够得到及时有效的处理，放射性固体废物能够实现规范的管理，放射性废气能够得到有效的治理，放射性物质工作场所的辐射安全能够得到一定的保障。

五、辐射安全防护设施对照分析

综上所述，辐射安全防护分析及措施，医院需对下表所列设施进行配置：

表 10-16 本项目辐射安全防护设施对照分析表

项目	应具备的条件	落实情况	需补充或修改内容
放疗中心医用直线加速器			
实体防护	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	已设计	/
	铅防护门	已设计	/
控制台及安全联锁	防止非工作人员操作的锁定开关	仪器自带	/
	加速器治疗床、加速器主机上以及控制台上应具备紧急停机按钮	仪器自带	/
	条件显示联锁、控制超剂量的联锁装置、时间控制联锁	仪器自带	/
	视频监控系统与对讲系统	应设计	保证视频监控系统机房全覆盖
	门灯联锁	应设计	
	治疗室门与高压联锁	应设计	/
警示装置	入口电离辐射警示标志	计划配备	/
	入口加速器工作状态显示	应设计	/
	工作场所分区及标识	计划配备	/
紧急设施	屏蔽门内侧紧急开门按钮	应设计	迷道出口处的铅门内侧墙上，按钮高 1.2~1.5m
	治疗室防夹人装置	应设计	/
	机房内紧急停机按钮	应设计	机房内非主射面墙上、迷道口有按钮，高 1.2~1.5m
	机房内准备出束音响提示	仪器自带	/
	控制台上蜂鸣器	仪器自带	/
	紧急照明或独立通道照明系统	应设计	/
监测设备	机房内固定式辐射剂量率监测仪	应设计	探头位于迷道内
	便携式辐射监测仪器仪表	计划配备	/
	个人剂量报警仪	计划配备	/
	个人剂量计	计划配备	/
其他	灭火器材	计划配备	/
	火灾报警仪	计划配备	/
	通排风系统	已设计	/
模拟 CT 机			
实体防护	墙体、铅防护门、观察窗	已设计	/
警示装置	工作状态指示灯	应设计	/

	电离辐射警告标志	计划配备	/
紧急设施	门灯连锁装置	应配备	/
	门与高压连锁（门机连锁）	应配备	/
	室内安装紧急止动装置	应设计	/
	对讲装置	应设计	/
防护设施	病人、陪护人员防护	计划配备	/
防护器材	火灾报警仪	计划配备	/
	灭火器材	计划配备	/
其他	通排风系统	已设计	/
负二层核医学制药区			
实体防护	墙体、铅防护门	已设计	/
辐射安全设施	隔室操作	已设计	/
	通风设施	已设计	负压通风
	排风设施	已设计	应在回旋加速器机房管道穿墙外侧至活性炭过滤装置（含）段裸露部分采用3~5mm铅皮进行包裹
	单向门禁系统	应设计	/
	入口处电离辐射警告标志	拟设置	/
	入口处工作状态显示	拟设置	/
	回旋加速器制备场所内分区	已设计	/
	地下沟管铅砖防护	已设计	/
应急、连锁	门机连锁	拟设置	/
	紧急停机开关	拟设置	/
	紧急开门按钮	拟设置	/
警示装置	电视监控、对讲装置	拟设置	回旋就加速器机房及控制室、热室、接收室等
	广播系统	拟设置	/
监测设备	固定式辐射剂量率监测仪	拟配置	/
	便携式表面污染监测仪	拟配置	/
	便携式中子剂量监测仪	拟配置	/
	个人剂量报警仪	拟配置	/
其他	火灾报警仪	拟配置	/
	灭火器材	拟配置	/
	衰变池	已设计	/
	放射性废物暂存间，防火、防水、防盗、防丢失、防破坏、防射线泄漏措施	已设计	/
负一层核素诊断区、二层核素治疗区、三层核素治疗区			

场所设施	墙体、观察窗、机房防护门	已设计	
	场所门外电离辐射警示标志、通道标志	应设计	/
	独立的排风设施（流向）	已设计	/
	有负压和过滤的工作箱/通风柜（乙级场所）	已设计	/
	注射、给药用屏蔽设施	已设计	/
	易去污的工作台面和防污染覆盖材料	拟设计	/
	移动放射性液体时容器不易破裂或有不易破裂套	拟设计	/
	患者专用卫生间	已设计	/
	放射性同位素暂存库或设施	已设计	/
	放射性固体废物收集容器和放射性标识	已设计	/
	安全保卫设施（贮存场所必须）	已设计	/
	人员出口配备污染监测仪	计划配备	/
	发生器辐射屏蔽	已设计	/
	操作位屏蔽防护措施	已设计	/
	放射性废液暂存设施	已设计	/
	工作状态指示灯	拟设置	SPECT-CT 室、PET-CT 室、介入手术室
	门灯联锁装置	拟配置	
	室内安装紧急止动装置	拟设置	
	对讲装置	拟配置	负一层核素诊断区、二层核素治疗区、三层核素治疗区
监测设备	便携式辐射监测仪（污染、辐射水平等）	计划配备	/
	个人剂量计	计划配备	/
	个人剂量报警仪	计划配备	/
	放射性活度计	计划配备	/
放射性废物和废液	放射性下水系统（衰变池）及标识	已设计	/
	放射性固体废物暂存间（设施）	已设计	/
	废物暂存间屏蔽措施	已设计	/
	废物暂存间通排风系统	已设计	/
防护器材	通道铅隔板、门禁、监控装置	计划配备	/
	场所门外电离辐射警示及禁止串门的标志	计划配备	/
	个人防护用品	计划配备	/
	放射性表面去污用品和试剂	计划配备	/
	火灾报警仪	计划配备	/
	灭火器材	计划配备	灭火器

六、环保投资

本项目总投资**万元，环保投资**万元， 占总投资的**%。本项目环保投资估算见下表。

表 10-17 环保设施及投资估算一览表

场所	辐射安全防护设施		数量	投资金额（万元）
放疗中心 10MV 直线 加速器房	实体防护	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	2 座	计入大楼主体建设
		铅防护门	2 扇	**
	控制台及安全联锁	防止非工作人员操作的锁定开关	设备自带	**
		加速器治疗床、加速器主机上以及控制台上应具备紧急停机按钮	设备自带	**
		条件显示联锁、控制超剂量的联锁装置、时间控制联锁	设备自带	**
		工作状态指示灯-门灯联锁	2 个	**
		治疗室门与高压联锁（门机联锁）	2 个	**
	警示装置	视频监控系统与对讲系统	2 套	**
		入口电离辐射警示标志	2 个	**
		工作场所分区及标识	2 套	**
	治疗室紧急设施	屏蔽门内侧紧急开门按钮	2 个	**
		治疗室防夹人装置	2 个	**
		机房内紧急停机按钮	2 套（各 4 个）	**
	监测设备	机房内准备出束音响提示	仪器自带	**
		控制台上蜂鸣器	仪器自带	**
		紧急照明或独立通道照明系统	2 套	**
	监测设备	固定式辐射剂量率监测仪	2 套	**
		便携式辐射监测仪器	1 台	**
		个人剂量报警仪	2 台	**
		个人剂量计	1 人/套	**
	其他	灭火器材	1 套	**
		火灾报警仪	1 套	**
		通排风系统	1 套	**
放疗中心 模拟 CT 室	实 体 防 护	墙体+屋顶	/	**
		铅防护门、防护窗	/	**
	警示装置	工作状态指示灯-门灯联锁	1 套	**
		电离辐射警告标志	1 套	**
	紧急设施	门与高压联锁（门机联锁）	1 套	**
		对讲装置	1 套	**
	监测设备	个人剂量计	1 人/套	**
	防护设施	病人、陪护人员防护铅衣等	1 套	**
	其他	通排风系统	1 套	**

负二层核医学制药区		灭火器材	1 套	**
		火灾报警仪	1 套	**
	实体防护	四周墙体+屋顶屏蔽	若干	**
		铅防护门、传递窗	1 套	**
	场所设施	核素洁梯、核素污梯	各 1 台	**
		门禁系统	1 套	**
		入口处电离辐射警告标志	若干	**
		声光报警及语音广播	1 套	**
		药物合成分装热室柜（70mmPb，内含高效过滤装置）	1 组	**
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套	**
		去污工具组	1 套	**
		地下沟管+10mmPb铅盖板+60mmPb铅砖	若干	**
		药物转运铅罐(50mmPb)	2 个	**
		质控药物转运铅罐(5mmPb)	2 个	**
		不锈钢转运推车	2 个	**
		通风橱（10mmPb，含高效过滤装置）	1 个	**
		生物安全柜（含高效过滤装置）	1 个	**
		视频监控系统	1 套	**
		对讲装置	1 套	**
		放射性废物暂存间	2 间	**
	安全联锁	门-剂量联锁	1 套	**
		门灯联锁-工作状态指示灯	1 套	**
		门与加速器高压触发/束流联锁	1 套	**
		热室门与加速器药物传输系统联锁	1 套	**
		清场巡更按钮	3 个	**
		延时开门联锁	1 套	**
		控制台和大厅门钥匙控制	1 套	**
	紧急设施	机房内紧急开门装置	1 个	**
		机房内、外紧急停机按钮	3 个	**
	监测设备	固定式辐射剂量率监测仪	1 套	**
		放射性活度计	1 台	**
		表面污染监测仪	3 台	**
		便携式中子剂量监测仪	1 台	**
		便携式 X-γ辐射监测仪	1 台	**
	个人防护用品	个人剂量报警仪	4 台	**
		个人剂量计	1 人/套	**
		铅防护服、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	3 套	**
	放射性废	放射性废水衰变池	1 座	**

负一层核素诊断区	物和废液	独立下水系统及放射性排水管道	1 套	**
		放射性废物暂存桶（10mmPb）	3 个	**
		放射性废物衰变桶/箱(2个10mmPb、1个5mmPb)	3 个	**
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干	**
		合成分装柜等密闭设备独立排风系统	1 套	**
		负二层核医学制药区排风系统（铅皮包裹等）	1 套	**
		回旋加速器自屏蔽体排风管道（含活性炭过滤装置）、放化实验室密闭设施排风管道	1 套	**
		衰变池区域排风管道	1 套	**
		活性炭过滤装置	5 个	**
		火灾报警仪	1 套	**
		灭火器材	2 套	**
	场所设施	四周墙体+屋顶屏蔽	若干	**
		铅防护门、传递窗、防护窗等	若干	**
		储源保险柜	2 个	**
		注射窗（40mmPb、20mmPb）	2 个	**
		手套箱（60mmPb、10mmPb，内含高效过滤装置）	2 个	**
		注射器防护提盒（5mmPb、20mmPb）	2 个	**
		注射器屏蔽套（2mmPb、8mmPb）	若干	**
		放射性核素防护铅罐（50mmPb、10mmPb）	2 个	**
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套	**
		去污工具组	2 套	**
		铅防护屏风（5mmPb、10mmPb）	各 3 扇	**
		视频监控系统、语音广播系统	1 套	**
		对讲装置	5 套	**
		门灯联锁-工作状态指示灯	2 套	**
		紧急止动装置	2 套	**
		医护人员通道、患者通道门禁系统	1 套	**
	警示标识	电离辐射警示标识	1 套	**
		监督区、控制区标识	若干	**
		患者就诊路径标识	若干	**
	监测设备	放射性活度计	2 台	**
		表面污染监测仪	2 台	**
		便携式X-γ辐射监测仪	1 台	**
	个人防护用品	个人剂量报警仪	4 台	**
		个人剂量计	1 人/套	**
		铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜（0.5mmPb）	8 套	**
放射性和废液	放射性和废液	放射性废水衰变池	1 座	**
		放射性废物暂存间	1 间	**

二层 核素 治疗 区		放射性废物暂存桶（10mmPb）	7 个	**
		放射性废物衰变铅箱/桶（10mmPb）	4 个	**
		独立下水系统及放射性排水管道铅皮防护	1 套	**
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干	**
		手套箱独立排风系统	1 套	**
		场所区域内通排风系统	1 套	**
		活性炭过滤装置	1 套	**
		火灾报警仪	1 套	**
		灭火器材	2 套	**
	实体防护	四周墙体+屋顶屏蔽	若干	**
		防护窗、铅防护门	若干	**
	场所设施	储源保险柜	1 个	**
		注射给药窗（5mmPb）	2 个	**
		自动分装柜（15mmPb，内含高效过滤装置）	1 台	**
		手套箱（15mmPb，内含高效过滤装置）	1 台	**
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套	**
		去污工具组	2 套	**
		视频监控系统、语音广播系统	1 套	**
		对讲装置	8 套	**
		铅悬挂防护屏/铅防护帘	1 副	**
		床侧防护帘/床侧防护屏	1 副	**
		门灯联锁-工作状态指示灯	2 个	**
		医护人员通道、患者通道门禁系统	1 套	**
	警示标识	电离辐射警示标识	若干	**
		监督区、控制区标识	若干	**
		患者治疗路径标识	若干	**
	安全设施	紧急止动装置	2 个	**
		自动闭门、防夹装置	2 个	**
		注射器防护提盒（2mmPb、6mm 有机玻璃）	若干	**
		注射器屏蔽套（2mmPb、15mm 有机玻璃）	若干	**
		转运铅罐/盒（10mmPb）	3 个	**
		储源铅罐/盒（5mmPb）	1 个	**
		移动注射车（2mmPb）	1 个	**
		移动铅屏风（2mmPb）	1 个	**
	监测设备	放射性活度计	1 台	**
		表面污染监测仪	2 套	**
		便携式X-γ辐射监测仪	1 台	**
	个人防护用品	个人剂量报警仪	4 台	**
		个人剂量计	1 人/套	**
		有机玻璃面罩、铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜（0.5mmPb）	6 套	**
	放射性废	放射性废水衰变池	1 座	**

三层 核素 治疗 区	物和废液	放射性废物暂存间1、放射性废物暂存间2	2 间	**
		放射性废物暂存铅桶（5mmPb）	9 个	**
		放射性废物衰变铅箱/桶（5mmPb）	6 个	**
		独立下水系统及放射性排水管道铅皮防护设施	1 套	**
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干	**
		手套箱独立排风系统	1 套	**
		场所区域内通排风系统	2 套	**
		活性炭过滤装置	2 套	**
		火灾报警仪	1 套	**
		灭火器材	2 套	**
	实体防护	四周墙体+屋顶屏蔽	若干	**
		防护门、防护窗	若干	**
	场所设施	储源保险柜	1 个	**
		注射给药窗（40mmPb）	1 扇	**
		自动分装柜（40mmPb，内含高效过滤装置）	1 个	**
		手套箱（40mmPb，内含高效过滤装置）	1 个	**
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套	**
		去污工具组	2 套	**
		视频监控系统、语音广播系统	1 套	**
		对讲装置	7 套	**
		医护人员通道、患者通道门禁系统	1 套	**
	警示标识	电离辐射警示标识	若干	**
		监督区、控制区标识	若干	**
		患者治疗路径标识	若干	**
三层 核素 治疗 区	安全设施	转运铅罐/盒（20mmPb）	1 个	**
		储源铅罐/盒（40mmPb、10mmPb）	2 个	**
	监测设备	放射性活度计	1 台	**
		表面污染监测仪	2 套	**
		便携式X-γ辐射监测仪	1 台	**
	个人防护用品	个人剂量报警仪	2 台	**
		个人剂量计	1 人/套	**
		铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜（0.5mmPb）	4 套	**
	放射性废物和废液	放射性废水衰变池	1 座	**
		放射性废物暂存间1、放射性废物暂存间2	2 间	**
		放射性废物暂存铅桶（10mmPb）	9 个	**
		放射性废物衰变铅箱/桶（1个5mmPb、5个10mmPb）	6 个	**
		独立下水系统及放射性排水管道铅皮防护	1 套	**
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干	**
		手套箱独立排风系统	1 套	**

		场所区域内通排风系统	2 套	**
		活性炭过滤装置	1 套	**
		除碘过滤装置+活性炭过滤装置	2 套	**
		火灾报警仪	1 套	**
		灭火器材	2 套	**
其他	其他	各核医学科工作场所退役环评、实施、验收等	/	**
合计				517.2

今后医院在项目实践中，应根据国家发布的法规内容，结合医院实际情况对环保设施做补充，使之更能满足实际需要。同时医院应定期对环保设施、监测仪器等进行检查、维护。

三废的治理

一、废气治理措施

1、放疗中心

放疗中心直线加速器机房通排风均采用“上送风、下排风”的方式，机房内设计通风量为 1200m³/h，新风及排风管道在防护门顶部穿墙引出后，排风管道经机房防护门顶部预留洞口穿出后，向北进入排风井，通过排风井后引至高于地面 3m 排放，直线加速器产生的废气经自然分解和稀释后对周围环境的影响较小。

2、核医学科工作场所

核医学工作场所内产生的放射性废气主要来源于负二层核医学制药区、负一核素诊断区、二层核素治疗区和三层核素治疗区内放射性药品制备、操作过程产生的放射性气溶胶和射线装置产生的臭氧，其中臭氧可忽略不计。根据设计文件，设计单位在各场所内分别设计了新风系统和排风系统，在各楼层核素密闭操作设备顶部内侧分别设置高效过滤装置，工作场所产生的废气均由活性炭过滤装置处理后排放，设 10 根排风管道，共 7 个排风口。

(1) 负二层核医学制药区

在负二层核医学制药区内设计总新风量为 7000m³/h，总排风量为 9000m³/h，其中在负二层回旋加速器机房内设计新风量为 1200m³/h、排风量为 1400m³/h，均为负压通风。根据设计方案，拟在核医学科制药区设 5 根放射性废气排风管道。拟在回旋加速器机房外侧设活性炭过滤装置，回旋加速器机房产生的放射性废气经过滤后，经放化实验室再与核医学制药区其他区域的排风管道并管后，通过管道井引至屋顶排放，经

管道引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放；回旋加速器自屏蔽体、放化实验室通风橱等密闭设施各设 1 根专用排风管道，拟在回旋加速器机房内设活性炭过滤装置，回旋加速器自屏蔽体内放射性废气经管道引出，经活性炭过滤装置处理后穿墙，再与放化实验室密闭设施（高效过滤装置处理）废气管道并管后，通过排风井引至屋顶（距地面约 49.7m）排放；负二层辅助区域内产生的放射性废气经过管道收集后，通过排风井引至塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后，高于屋顶 2m 处排放；核医学制药区合成分装热室柜拟设 1 根专用排风管道，在各密闭柜体顶壁内侧设高效过滤装置，柜体内产生的放射性废气通过管道经排风井引至屋顶，经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放；拟在衰变池区域设 1 根专用排风管道，衰变池区域内产生的废气经活性炭过滤装置过滤后，经排风井引至屋顶（距地面约 45m），高于屋顶 2m 排放。

（2）负一层核素诊断区

在负一层核素诊断区内设计总新风量为 6000m³/h，总排风量为 6500m³/h，为负压通风。根据设计方案，拟在负一层核素诊断区设 2 根放射性废气排风管道。其中，诊断区场所内产生的含放射性同位素废气经管道收集后，通过排风井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放；2 台手套箱设 1 条专用排风管道，拟在手套箱顶壁内侧设高效过滤装置，箱体内产生的放射性废气通过管道在排风井内合管后，引至屋顶（距地面约 49.7m）经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放。

（3）二层核素治疗区

在二层核素治疗区内设计总新风量为 6000m³/h，总排风量为 8000m³/h，其中各隔离病房内新风量为 250m³/h、排风量为 400m³/h，介入手术室新风量为 600m³/h，排风量为 800m³/h，均为负压通风。根据设计方案，拟在二层核素治疗区设 3 根放射性废气排风管道。其中，核素操作区域和核素治疗区域内产生的放射性核素废气经管道收集后，通过排风井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放；密闭设备（手套箱、自动分装柜）设 1 条专用排风管道，拟在手套箱顶壁内侧设高效过滤装置，箱体内产生的放射性废气通过管道在排风井内合管后，引至屋顶（距地面约 49.7m）经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放。

(4) 三层核素治疗区

在三层核素治疗区内设计总新风量为 3850m³/h，总排风量为 5500m³/h，其中各隔离病房内新风量为 250m³/h、排风量为 400m³/h，均为负压通风。根据设计方案，拟在三层核素治疗区设 3 根放射性废气排风管道。其中，核素治疗病房区内产生的放射性核素废气经管道收集后，通过排风井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后高于屋顶 2m 排放；核素治疗操作区域内产生的放射性核素废气经管道收集后，通过排风井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置处理后高于屋顶 2m 排放；密闭设备（手套箱、自动分装柜）设 1 条专用排风管道，拟在密闭设备顶壁内侧设高效过滤装置，箱体内产生的放射性废气通过管道在排风井内合管后，引至屋顶（距地面约 49.7m）经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放。

二、废水处理措施

1、放疗中心

放疗中心营运期不产生医疗废水，加速器冷却水循环使用，辐射工作人员产生的生活污水依托建设单位新建污水处理站处理达到《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）表 2 中预处理标准后，排入市政污水管网。

2、核医学科工作场所

(1) 放射性废水

医院拟在 1#医疗综合楼东侧（2#直线加速器机房南侧）新建槽式长半衰期衰变池、短半衰期衰变池各 1 组，其中短半衰期衰变池收集负二层核医学制药区和负一核素诊断区内产生的含 ¹⁸F、¹¹C、¹³N、¹⁵O、^{99m}Tc、⁶⁴Cu、⁸⁹Zr 和 ⁶⁸Ga 核素的短半衰期放射性废水，长半衰期衰变池收集二层核素治疗区、三层核素治疗区内产生的含 ¹³¹I、¹⁷⁷Lu、¹⁸⁸Re、⁹⁰Y 等核素的长半衰期放射性废水。

1) 短半衰期放射性废水

医院拟在负二层核医学制药区、负一层核素诊断区内设放射性废水收集管道若干、产生的放射性废水均采用一定坡度的管道自流进入短半衰期降解池（2 格，1 用 1 备）内降解沉淀后，再排入短半衰期衰变池内进行处理。负一层核素诊断区开展核素 ⁸⁹Zr 显像后，产生的放射性废水在短半衰期衰变池内暂存超过 33 天，经检测总β浓度不大

于 10 Bq/L，监测结果经审管部门认可后，排入建设单位污水处理站进行处理后排入市政管网；未开展核素 ^{89}Zr 核素显像前，产生的放射性废水暂存超过 30 天后，可直接排入建设单位污水处理站进行处理。

2) 长半衰期放射性废水

医院拟在二层核素治疗区、三层核素治疗区内设放射性废水收集管道若干，二层核素治疗区、三层核素治疗区内产生的长半衰期放射性废水分别经过管道收集后，分别在配餐室外侧东北角穿过楼板后，竖直向下自流进入长半衰期降解池（2 格，1 用 1 备）内降解沉淀后，再进入长半衰期衰变池内暂存衰变超过 180 天，经检测总 α 不大于 1 Bq/L、总 β 不大于 10 Bq/L，监测结果经审管部门认可后，排入建设单位污水处理站进行处理。

医院应结合放射性废水在衰变池中的储存周期，制定合理的排水计划，按照计划定期将废水排放至建设单位污水处理站进一步处理达标后纳入市政管网。每次排放应做好详细记录所含核素名称、体积、废液产生的起始日期、责任人员、排放时间和监测结果，设置专门的废水排放台账，台账应有专人管理，存档保存。

3) 放射性废水处置系统施工要求

根据设计方案，短半衰期衰变池为地埋衰变池，短半衰期衰变池顶部与长半衰期衰变池底部处于同一水平面；拟在衰变池区域设 2 个集水坑用于收集溢流或者池体渗漏的长半衰期放射性废水。衰变池、集水坑应作为重点防渗区管理，基槽底、池壁/坑壁等为混凝土结构，应采取防水混凝土、防水砂浆保护层、不低于 2mm 厚防渗涂料等多层防渗措施。建设单位应严格保证工程质量，衰变池池底和池壁应坚固、耐酸碱腐蚀，衰变池池体应加以密封，应有防雨、防渗和防漏的措施，确保放射性废水衰变池、衰变池所在区域地面、集水坑内壁等达到等效黏土防渗层 $M_b \geq 6.0\text{m}$ ，渗透系数 $K \leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 的要求。

医院应按照设计方案，在衰变池各池体、集水坑之间设 2 台排水泵（1 用 1 备），应对放射性废水收集管道裸露部分采用 3~5mm 铅皮包裹，应采用防腐、管道内壁光滑的铸铁材质，施工过程中尽量减少“U 形”、“V 形”管道弯头的情况。

(2) 非放射性废水

核医学各场所产生的非放射性废水主要为工作人员产生的生活污水，生活污水经管道收集后，进入建设单位污水处理站处理。

三、固体废物处理措施

1、放疗中心

本项目直线加速器及模拟 CT 机诊断过程中不产生固体废物；辐射工作人员会产生少量的生活垃圾及办公垃圾由环卫部门统一定期清运；本项目直线加速器、模拟 CT 在报废前，应采取去功能化的措施，确保无法再次通电使用，并及时到生态环境主管部门办理相关手续。

2、核医学科工作场所

(1) 放射性固体废物处理措施

1) 负二层核医学制药区

医院拟在核医学制药区回旋加速器机房、热室、放化实验室各放置 1 个放射性废物暂存桶，在回旋加速器机房东侧设置 1 个放射性废物库，在热室南侧设置 1 个放射性废物暂存间。在放射性废物暂存间内设置放射性废物衰变桶/箱，分别暂存回旋加速器制药、核素操作、过滤装置滤芯更换等过程产生的放射性固体废物。回旋加速器制药过程中产生的高活性废靶废料，即有靶窗、废弃的离子源灯丝等均为感生放射性物质，由厂家更换后回收，其余放射性固体废物在产生点采用专用塑料袋收纳后及时转移至放射性废物暂存间，暂存超过 33 天，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，作为医疗废物进行处理。

2) 负一层核素诊断区

①放射性固体废物

医院拟在负一层核素诊断区分装注射室、给药区、VIP PET 给药后候诊室、PET 给药后候诊室、SPECT 给药后候诊室、SPECT 检后休息室、PET 检后休息室等各放置 1 个放射性废物暂存桶，用于收集核素诊断区内产生的放射性固体废物。医院在分装注射室南侧设置了 1 个放射性废物暂存间，在放射性废物暂存间内设置了放射性废物衰变桶/箱，用于收集核素操作过程、淋洗制药过程和过滤装置滤芯更换产生的放射性固体废物。核素诊断区产生的放射性固体废物在产生点采用专用塑料袋收纳后及时转送至放射性废物暂存间，暂存超过 33 天，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，作为医疗废物进行处理。

②废放射源

敷贴治疗使用的 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源由于半衰期较长，患者治疗完成后回收，用于下一

名患者治疗，短期内不会产生废源。PET-CT和PET-MRI使用的 ^{22}Na 或 ^{68}Ge 校准源，定期更换，废放射源交由有资质单位回收，日常暂存在核素诊断区校准源室内。

③报废射线装置

本项目核素诊断区使用的 PET-CT、SPECT-CT 在报废前，应采取去功能化措施，确保无法再次通电使用，并及时到生态环境主管部门办理相关手续。

3) 二层核素治疗区

医院拟在二层核素诊断区分装给药室、留观室、病房走道、隔离病房（6间）等各放置1个放射性废物暂存桶，用于收集二层核素治疗区内产生的放射性固体废物。医院在分装给药室南侧、专用电梯厅西侧各设置了1个放射性废物暂存间，在放射性废物暂存间内设置了放射性废物衰变桶/箱，用于暂存核素操作、给药、手术治疗、住院等过程，过滤装置滤芯更换中产生的放射性固体废物。二层核素治疗区产生的放射性固体废物在产生点分类收集，采用专用塑料袋收纳后及时转送至放射性废物暂存间衰变处置。其中，含放射性核素 ^{188}Re 、 ^{90}Y 的固体废物暂存超过30天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，作为医疗废物进行处理；含 α 核素的放射性固体废物暂存超过115天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，交由有资质的单位收运处置；含其他核素的放射性固体废物和废过滤装置滤芯暂存超过506天，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，作为医疗废物进行处理。

4) 三层核素治疗区

医院拟在三层核素治疗区分装给药室、病房走道、甲亢室、隔离病房（6间）等各放置1个放射性废物暂存桶，用于收集三层核素治疗区内产生的放射性固体废物。医院在分装给药室南侧、专用电梯厅西侧各设置了1个放射性废物暂存间，在放射性废物暂存间内设置了放射性废物衰变桶/箱，用于暂存核素操作、给药、住院等过程和过滤装置滤芯更换中产生的放射性固体废物，过滤装置滤芯更换中产生的放射性固体废物。三层核素治疗区产生的放射性固体废物在产生点收集，采用专用塑料袋收纳后及时转送至放射性废物暂存间暂存超过180天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，作为医疗废物进行处理。

放射性固体废物应分类收集后，采用专用塑料袋收纳、装满、密封，及时转运至放射性废物暂存间放射性废物衰变桶/箱内，暂存超过180天经监测达到清洁解控水平

后，作为医疗废物进行处理。

（2）非放射性固体废物处理措施

本项目产生的非放射性固体废物主要为医疗废物、办公生活垃圾等。医疗固体废物包括核医学科患者未给药前、手术治疗过程（药棉、纱布、手套、注射器、棉棒、一次性卫生用品、垫料等）产生的医疗废物、经衰变达到清洁解控水平后的放射性固体废物，均交由有资质的单位收运处理。

生活垃圾、办公垃圾依托医院收集设施收集后交由市政环卫统一清运。

表 11 环境影响分析

建设阶段对环境的影响

（一）施工期环境影响评价

本项目施工期属“林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期”建设内容之一，其施工期环境影响包含在该环境影响报告表中，该报告表中已对 1#医疗综合楼整体建设、房间装修和设备安装可能产生的环境影响进行了评价，并提出了污染防治措施，已取得了林家坝 TOD 项片区医疗用地项目二期建设项目专家意见。

建设单位应严格按照施工期环境影响报告表提出的各项环保措施，采取有效措施，尽可能减缓施工期对环境产生的影响。

（二）防射线泄漏施工要求

（1）直线加速器机房、回旋加速器机房及热室墙体应整体浇筑，使用满足要求的混凝土，混凝土密度不低于 2.35g/cm^3 。

（2）贯穿直线加速器机房、回旋加速器机房屏蔽墙的各种电缆、新风、排风、暖通等管道应在主屏蔽墙以外的墙体贯穿，贯穿口应采用S形、U形或斜穿，并在贯穿口采取一定的屏蔽补偿措施。

（3）防护门结构应考虑因自身重量而发生形变，频繁开关门的振动连接松动、屏蔽体老化龟裂等原因，其宽于门洞的部分应大于“门—墙”间隙的十倍，并预留防护门下沉沟槽。

（4）应在各核医学工作场所放射性废水管道裸露部分增加铅皮（3~5mmPb）包裹，在回旋加速器机房排风管道过滤装置前端裸露部分增加 3~5mm 铅皮包裹。

（三）安装调试期环境影响

本项目射线装置在安装调试阶段会产生 X 射线和 γ 射线，造成一定辐射影响。在设备安装调试完后，现场会有少量的废包装材料产生。

本项目拟购射线装置的运输、安装和调试均由设备厂家专业人员进行，安装和调试均在辐射防护设施建设完成后进行。

在设备安装调试阶段，医院应配合设备厂家加强安装调试现场的辐射安全管理，在此过程中保证各类辐射安全防护设施正常运行。在设备调试期间关闭防护门，在防护门外设立电离辐射警告标志，禁止无关人员靠近。

由于设备的安装和调试均在机房内进行，经过墙体的屏蔽和距离衰减后对周边的辐射影响是可接受的。设备安装完成后，医院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。

运行阶段对环境的影响

医院拟在 1#医疗综合楼内新建放疗中心和核医学科工作场所，其中拟在放疗中心 1#直线加速器机房、2#直线加速器机房内，分别使用 1 台 10MV 直线加速器（型号待定），属于Ⅱ类射线装置，在模拟 CT 室内使用 1 台模拟 CT 机（型号待定），属于Ⅲ类射线装置。核医学工作场所主要情况如下：①在负二层核医学制药区使用 1 台 10MeV 自屏蔽回旋加速器（Ⅱ类射线装置）生产 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr ，在放化实验室对生产、制备的放射性药物进行质控、阳性对照等操作，日等效最大操作量为 $1.89\times 10^9\text{Bq}$ （属于乙级非密封放射性物质工作场所）；②在负一层核素诊断区内使用 ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）、 ^{68}Ge （ ^{68}Ga ）淋洗制药，使用 SPECT-CT（Ⅲ类射线装置）、PET-CT（Ⅲ类射线装置）、PET-MRI 各 1 台，使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga 和 ^{89}Zr 用于肿瘤显像诊断，日等效最大操作量为 $4.64\times 10^8\text{Bq}$ （属于乙级非密封放射性物质工作场所），使用 3 枚活度为 $4.60\times 10^7\text{Bq/枚}\times 2\text{枚}+9.25\times 10^7\text{Bq/枚}\times 1\text{枚}$ 的 ^{68}Ge 放射源或 1 枚活度为 $3.70\times 10^8\text{Bq/枚}\times 1\text{枚}$ 的 ^{22}Na 放射源用于 PET-CT/MRI 设备校准，均属于Ⅴ类放射源；③在二层核素治疗区内使用 1 台 DSA-CBCT（属于Ⅱ类射线装置），使用放射性同位素 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{125}I 粒子源、 ^{103}Pd 种子源、 ^{90}Y 微球、 ^{188}Re ，用于肿瘤治疗，在甲吸室使用核素 ^{131}I 用于甲吸检查，敷贴室使用 2 枚放射源 ^{90}Sr - ^{90}Y ，最大活度为 $7.40\times 10^9\text{Bq/枚}\times 2\text{枚}$ （Ⅴ类），用于皮肤病敷贴治疗，场所内日等效最大操作量为 $3.71\times 10^9\text{Bq}$ （属于乙级非密封放射性物质工作场所）；④在三层核素治疗区内使用放射性药物 ^{131}I 、 ^{177}Lu 开展甲亢、肝癌和骨转移肿瘤治疗，日等效最大操作量为 $3.74\times 10^9\text{Bq}$ （属于乙级非密封放射性物质工作场所）。

一、辐射环境影响分析

（一）放疗中心辐射环境影响分析

1、直线加速器工作场所辐射环境影响分析

（1）电子束环境影响分析

本项目拟使用 2 台均为 10MV 的直线加速器，在按电子束模式工作时，最大电子线能量为 20MeV，根据《辐射防护手册》第三分册 4.1.5 加速器的辐射源（ P_{95} ），能量为 E （MeV）的单能电子束，在低 Z 物质中的射程（单位为 $g \cdot cm^{-2}$ ）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 20MeV，射程为 $20 \times 0.6 = 12 g/cm^2$ ，可以估算出 20MeV 的电子在密度为 $2.35 g \cdot cm^{-3}$ 的混凝土中的深度约为 5.11cm，而本项目屏蔽体厚度最小的为 150cm 混凝土，对电子线能完全屏蔽，可不再作特殊的防护要求，可不再考虑对电子束模式对周围环境的影响。

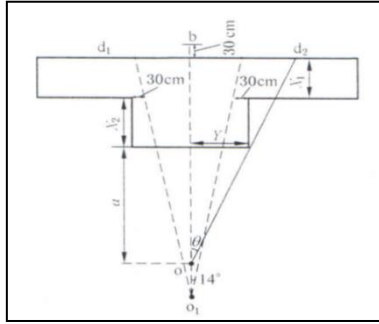
（2）X 射线环境影响分析

本项目直线加速器自带图像引导(CBCT)模块，用于放射治疗前对患者治疗位置的验证。根据 GBZ130-2020 中表 3“对 CT 机房，机房周围屏蔽防护铅当量应满足 2.5mmPb”。本项目直线加速器机房设有迷道，且机房最屏蔽体最薄处达到 1500mm 厚混凝土，根据 GBZ130-2020 中表 C.7，对管电压为 150kV 有用射线束方向 255mm 厚混凝土即可达到 3mm 铅当量，机房屏蔽体最薄处厚度远大于 3mm 铅当量。因此，本项目图像引导(CBCT)模块对机房外的辐射环境影响可以忽略不计，本次预测仅考虑直线加速器在对患者深层病灶治疗时 X 射线束的影响。

1) 加速器治疗室主屏蔽区宽度校核

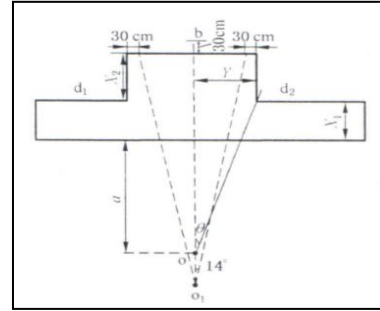
医院拟在 1#医疗综合楼负二层新建 2 间屏蔽防护厚度相同且呈镜像布置的直线加速器机房，拟在机房内使用的直线加速器 X 射线最大能量均为 10MV，主射线的最大出束角度均为 28° 。因本项目 2 间直线加速器机房尺寸大小和屏蔽体厚度相同，且呈镜像布置。因此，本次评价采用理论计算方法分析 X 射线的辐射影响。本次预测先通过分析直线加速器机房 2 内的直线加速器出束对机房周围的贡献剂量率，再考虑直线加速器机房 1 的叠加综合影响。

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）附录 D，加速器主屏蔽区宽度计算分为以下两种情况，本项目直线加速器机房屏蔽设计中，北侧、南侧主屏蔽墙体均为内凸，顶部主屏蔽墙体为外凸，对应的主屏蔽区宽度校核见表 11-1，对应的主屏蔽半宽度 Y 的计算公式如下：



主屏蔽区内凸

$$Y = (100 + a + X_2) \tan 14^\circ + 30$$



主屏蔽区外凸

$$Y = (100 + a + X_1 + X_2) \tan 14^\circ + 30$$

表 11-1 本项目主屏蔽区宽度校核表

焦点距主屏蔽区距离(mm)	主屏蔽区宽度计算值(m)	主屏蔽区宽度设计值(m)	结论
北侧主屏蔽墙体 7.66	$2 \times (7.66 \tan 14^\circ + 0.3) = 4.42$	5.00	满足要求
南侧主屏蔽墙体 7.57	$2 \times (7.57 \tan 14^\circ + 0.3) = 4.37$	5.00	满足要求
距顶部主屏蔽墙体 6.49	$2 \times (6.49 \tan 14^\circ + 0.3) = 3.84$	5.00	满足要求

根据表 11-1 可知，本项目加速器治疗室主屏蔽宽度均满足要求，设备厂家和医院在进行直线加速器设备安装时，必须严格按照既定的方案进行安装，杜绝安装后主射束超出主屏蔽范围的情况出现。

2) 关注点剂量率参考水平

①直线加速器机房关注点设立

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)，医院拟建放疗中心位于地下负二层，无地下负三层，故机房地下不设关注点。

本项目直线加速器机房关注点设立及主要照射路径图见图 11-1、11-2。

图 11-1 本项目关注点及主要照射路径示意图（立面）

图 11-2 各关注点及主要照射路径示意图（平面）

②剂量率参考控制水平

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021)等相关标准要求，直线加速器机房屏蔽体外人员居留因子 $T > 1/2$ 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： $\dot{H}_{c,max} \leq 10 \mu\text{Sv/h}$ 。本次评价各关注点除g点外，其余有人员停留的关注点最高剂量率参考控制水平均取 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ，无人员居留或人员不可到达的按照 $10 \mu\text{Sv/h}$ 进行控

制。

根据(GBZ/T201.2-2011)4.3.2.5, 加速器的漏射辐射经过迷路内墙屏蔽后再迷路入口g点的辐射剂量核算结果应为g处的参考控制水平的一个分数(应小于1/4), 取为0.5 μ Sv/h。

③关注点处居留因子

根据《放射治疗放射防护要求》(HJ1198-2021), 各关注点处居留因子取值见下表:

表 11-2 机房外各关注点剂量率参考控制水平和主要考虑的辐射束

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

④关注点处剂量率参考控制水平

根据关注点设立示意图, 结合关注点处居留因子, 本项目直线加速器机房外各关注点处剂量率参考控制水平见下表。

表 11-3 直线加速器机房外各关注点及剂量率参考控制水平

关注点	点位描述	照射途径	居留因子	剂量率参考控制水平 (μ Sv/h)	受照类型
a	北侧主屏蔽墙外 30cm 处	有用线束	1/4	2.5	公众
b	南侧主屏蔽墙体外 30cm 处	有用线束	1/2	2.5	公众
Cl	主屏蔽区相连的次屏蔽墙外 30cm 处	泄漏辐射、散射辐射束	1/4	2.5	公众
e	东侧非主射墙体外 30cm 处(回填土)	泄漏辐射	/	10	/
f	西侧穿过迷道及迷道外墙外 30cm 处(2#控制室)	泄漏辐射	1	2.5	职业
g	西侧迷道入口防护门内侧	泄漏辐射	/	0.5	/
G	西侧迷道入口防护门外侧 30cm 处	泄漏辐射束、散射辐射束	1/4	2.5	公众
h	正上方主屏蔽墙体外 30cm 处	有用线束	1/16	2.5	公众
m	与主屏蔽区相连的次屏蔽墙外 30cm 处(消防水泵房)	泄漏辐射、散射辐射束	1/16	2.5	公众

k	与主屏蔽区相连的次屏蔽墙外 30cm 处（衰变池区域）	泄漏辐射、散射辐射束	/	2.5	/
j	迷道外墙 30cm 处（设备间）	泄漏辐射、散射辐射束	1/4	2.5	公众

3) 电子直线加速器对关注点产生的剂量估算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分:电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011), 本项目医用直线加速器在运行过程中对关注点处人员受到的最大剂量可根据以下公式进行计算:

①主射线、漏射线致墙体外剂量率估算

主屏蔽区、迷道外墙、迷道内墙等关注点处辐射剂量率按下式进行计算。

$$Xe = X \cdot \sec\theta \quad \text{..... (式 11-1)}$$

$$B = 10^{-(Xe+TVL-TVLI)/TVL} \quad \text{..... (式 11-2)}$$

$$H = \frac{H_0 \cdot f}{R_2} \cdot B \quad \text{..... (式 11-3)}$$

式中:

Xe —墙体有效屏蔽厚度, cm;

X —墙体屏蔽厚度, cm。

θ —斜射角, 即入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角;

B —屏蔽透射因子;

$TVLI$ (cm) 和 TVL (cm) —辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度;

H —关注点处辐射剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$;

H_0 —直线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, $\mu\text{Sv.m}^2/\text{h}$; 本项目最大为 $1.32 \times 10^9 \mu\text{Sv.m}^2/\text{h}$ (最高剂量率为 22Gy/min);

R —辐射源点 (靶点) 至关注点的距离, m;

f —有用束为 1; 泄漏辐射为主射射线比率 (0.1%)。

由此估算出主射线束和泄漏辐射对各关注点产生的剂量见表 11-4。

表 11-4 直线加速器主射线束和泄漏辐射对关注点的剂量估算表

计算参数	主屏蔽区			迷道内墙 g 点	非主射墙体					
	a 点	b 点	h 点		C ₁ 点	j 点	k 点	e 点	f 点	m 点
设计屏蔽体厚度 X (cm)	280	280	280	180	170	150	170	150	150	170

斜射角 θ (°)	0	0	0	30	30	30	30	0	0	30
Xe (cm)	280	280	280	208	196	173	196	150	150	196
TVL1 (cm)	41	41	41	41	41	41	41	35	35	41
TVL (cm)	37	37	37	37	37	37	37	31	31	37
透射因子 B	3.5E-08	3.5E-08	3.5E-08	3.1E-06	6.3E-06	2.7E-05	6.3E-06	2.0E-05	2.0E-05	6.3E-06
H_0 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}$)	1.32 $\times 10^9$			1.32 $\times 10^9$						
f	1	1	1	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
R (m)	7.8	7.8	6.8	10.8	8.2	11.2	9.0	5.4	10.2	6.4
剂量当量 $H(\mu\text{Sv/h})$	7.5E-01	7.5E-01	9.9E-01	3.5E-02	1.2E-01	2.8E-01	1.0E-01	8.8E-01	2.5E-01	2.0E-01

根据上表计算可知，直线加速器的漏射辐射经过迷路内墙屏蔽后在迷路入口 g 点的辐射剂量率为 3.5E-02 $\mu\text{Sv/h}$ ，低于 GBZ/T201.2-2011 中 4.3.2.5 规定的不大于 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

②患者一次散射辐射剂量估算

$$\dot{H} = \frac{H_0 \times \alpha_{ph} \times (F/400)}{R_s^2} \times B \dots\dots\dots \text{(式 11-4)}$$

式中：

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

α_{ph} —患者400m²面积上的散射因子，数据取自附录B中表B.2；

R_s —患者（位于等中心点）至关注点的距离，m；

其他同上。

由此估算处患者一次散射对各关注点产生的剂量见表 11-5。

表 11-5 直线加速器机房内患者一次散射对关注点的剂量估算表

计算参数	非主射墙体						
	<i>g</i> 点	<i>C_I</i> 点	<i>j</i> 点	<i>k</i> 点	<i>e</i> 点	<i>f</i> 点	<i>m</i> 点
屏蔽厚度 X (cm)	180	170	150	170	150	150	170
斜射角 θ (°)	45	45	45	45	0	0	45
Xe (cm)	255	240	212	240	150	150	240
TVL (cm)	28	28	28	28	28	28	28
透射因子 B	8.1E-10	2.6E-09	2.7E-08	2.6E-09	4.4E-06	4.4E-06	2.6E-09
$H_0(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	1.32 $\times 10^9$	1.32 $\times 10^9$	1.32 $\times 10^9$	1.32 $\times 10^9$	1.32 $\times 10^9$	1.32 $\times 10^9$	1.32 $\times 10^9$
α_{ph}	1.35 $\times 10^{-3}$	1.35 $\times 10^{-3}$	1.35 $\times 10^{-3}$	1.35 $\times 10^{-3}$	3.81 $\times 10^{-4}$	3.81 $\times 10^{-4}$	1.35 $\times 10^{-3}$

F(cm ²)	40×40	40×40	40×40	40×40	40×40	40×40	40×40
R (m)	10.5	7.6	11.6	8.2	10.3	8.2	5.6
辐射剂量当量率 H(μSv/h)	5.2E-05	3.2E-04	1.4E-03	2.7E-04	8.3E-02	1.3E-01	5.9E-04

③迷道入口处辐射剂量率的预测分析

有用线束穿过患者身体并射入屏蔽墙内表面的散射辐射剂量率通过下式计算：

$$\dot{H}_g = \frac{\alpha_{ph} \times (F/400)}{R_1^2} \times \frac{\alpha_2 \times A}{R_2^2} \times H_0 \dots\dots\dots \text{(式 11-5)}$$

式中：

\dot{H}_g —有用射线束不向迷路照射时在 g 处的剂量率，μSv/h；

α_{ph} —患者 400m² 面积上的散射因子，本项目按 10MV 取值，保守取 3.18×10⁻³；

F—治疗装置有用线束在等中心处的最大治疗野面积，cm²；本项目等中心处最大治疗野为40cm×40cm=1600cm²；

α_2 —墙入射的患者散射辐射的散射因子，通常取 i 处的入射角为 45°，散射角为 0°， α_2 值见附录 B 表 B.6，通常使用其 0.5MeV 栏内的值，查得混凝土墙 45°入射、0°散射、1m² 的散射因子 $\alpha_2=22 \times 10^{-3}$ (查附录 B 表 B.6)；

A—i 处的散射面积，经计算本项目加速器 i 处的散射面积为 4.0m×4.4m=17.6m²；

R₁—第一次散射路径，“o→i”之间的距离，9.6m；

R₂—第二次散射路径；“i—g”之间的距离，10.8m；

经计算可得，迷道入口处散射辐射剂量率为 605μSv/h。

③迷道入口处防护门外最大综合剂量率 \dot{H}_G 由下式进行计算

$$\dot{H}_G = \dot{H}_g \times 10^{-(X/TVL)} + \dot{H}_{og} \dots\dots\dots \text{(式 11-6)}$$

式中：

\dot{H} —防护门外计算点的辐射剂量率，μSv/h；

\dot{H}_{og} —有用射线束不向迷路照射时在 g 处的剂量率，取 605μSv/h。

X—给定防护门的铅屏蔽厚度，15mm；

TVL—迷道入口处铅防护门的什值层厚度，在 g 处的散射辐射能量约 0.2MeV，铅中的 TVL 值取 5mm；

\dot{H}_{og} —穿过迷路内墙的泄漏辐射在 g 处的剂量率，3.5E-02μSv/h。

其他同上。

经过计算可得，防护门外G点处的综合辐射剂量率为0.64μSv/h。

机房四周、顶部 m 点既要受 X 射线漏射影响，亦要受机房患者一次散射影响，通过剂量叠加得到上述各关注点的最大辐射剂量率如下表所示：

表 11-6 直线加速器机房周围关注点综合剂量率叠加结果

计算参数	主射方向(单位: μSv/h)			非主射方向(单位: μSv/h)						
	a 点	b 点	h 点	G 点	C ₁ 点	j 点	k 点	e 点	f 点	m 点
主射影响	7.5E-01	7.5E-01	9.9E-01	/	/	/	/	/	/	/
漏射影响	/	/	/	/	1.2E-01	2.8E-01	1.0E-01	8.8E-01	2.5E-01	2.0E-01
散射影响	/	/	/	/	3.2E-04	1.4E-03	2.7E-04	8.3E-02	1.3E-01	5.9E-04
综合剂量率	7.5E-01	7.5E-01	9.9E-01	6.4E-01	1.2E-01	2.8E-01	1.0E-01	9.6E-01	3.8E-01	2.0E-01
剂量率参考控制水平	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	10	2.5	2.5

由表 11-6 可知，在本项目直线加速器机房四周和顶部屏蔽体外 30cm 处最大附加剂量为 9.9E-01μSv/h，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中辐射剂量率参考控制水平的要求。

2、模拟 CT 机辐射环境影响分析

拟在放疗中心内使用 1 台模拟 CT 机，用于放射治疗模拟定位，属于Ⅲ类射线装置。本项目所用模拟 CT 机为数字成像，无废显定影液及废胶片产生，其主要影响为设备工作时产生 X 射线。

根据医院提供资料，本项目模拟 CT 机每年累计曝光时间不超过 75h。模拟 CT 室南侧墙体为 300mm 厚混凝土或 370mm 厚实心砖墙（大于 3mm 铅当量），其余三侧墙体为 370mm 厚实心砖墙（大于 3mm 铅当量），屏蔽门为 3mm 铅门，屏蔽铅窗为 3mm 铅当量，楼顶为 300mm 厚混凝土（大于 3mm 铅当量）。根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）表 3，结合附录 C 中表 C.7 可知，模拟 CT 室周围屏蔽防护能够满足 2.5mmPb 的要求，机房周围屏蔽体外 30cm 处辐射剂量率不超过 2.5μSv/h，根据类似射线装置现状监测数据，经机房墙体、门屏蔽后，模拟定位装置工作时对机房外公众和职业人员影响可忽略不计。

3、放疗中心周围保护目标最大辐射剂量综合分析

医院拟在地下负二层放疗中心直线加速器机房 1、直线加速器机房 2 内各使用 1 台 10MV 直线加速器。因此，在放疗中心周围各保护目标受到 2 台直线加速器的叠加综合

影响。放疗中心保护目标年附加辐射剂量由下式进行计算：

$$E = H \times 10^{-3} \times q \times h \times W_T \dots\dots\dots \text{（式 11-7）}$$

式中：

H—关注点的剂量当量(μSv/h)；

E—关注点的年剂量（mSv/a）；

h—年工作负荷（h/a）；

q—居留因子；

W_T—组织权重因数，全身为 1。

在本次综合预测过程中，偏保守不考虑建筑和回填土屏蔽效能，仅考虑距离衰减，根据电离辐射水平与距离的平方成反比的规律，各保护目标处的最大辐射剂量率见下表。

表 11-7 直线加速器机房周围最近保护目标年最大受照剂量分析

最近保护目标位置	贡献剂量射线装置	贡献参考点	参考点辐射剂量率(μSv/h)	与参考点最近距离(m)	衰减后剂量率(μSv/h)	年最大照射时间(h)	居留因子	年最大辐射剂量(mSv/a)	综合年辐射剂量(mSv/a)	照射类型
直线加速器机房 1 控制室	1#直线加速器	f	3.8E-01	/	3.8E-01	412.5	1	1.6E-01	1.6E-01	职业照射
	2#直线加速器	G	6.4E-01	3.6	4.4E-03	412.5	1	1.8E-03		
直线加速器机房 2 控制室	1#直线加速器	f	3.8E-01	3.6	2.6E-03	412.5	1	1.1E-03	2.6E-01	职业照射
	2#直线加速器	G	6.4E-01	/	6.4E-01	412.5	1	2.6E-01		
模拟 CT 控制室	1#直线加速器	G	6.4E-01	5.4	2.0E-03	412.5	1	8.1E-04	9.1E-04	职业照射
	2#直线加速器	j	2.8E-01	10.5	2.3E-04	412.5	1	9.5E-05		
缓冲区外走廊	1#直线加速器	G	6.4E-01	3.7	4.2E-03	412.5	1/5	3.5E-04	7.0E-04	公众照射
	2#直线加速器	G	6.4E-01	3.7	4.2E-03	412.5	1/5	3.5E-04		
登记区	1#直线加速器	G	6.4E-01	17	2.0E-04	412.5	1	8.2E-05	1.6E-04	公众照射
	2#直线加速器	G	6.4E-01	17	2.0E-04	412.5	1	8.2E-05		
负二层电梯厅	1#直线加速器	G	6.4E-01	14	2.9E-04	412.5	1/5	2.4E-05	5.4E-05	公众照射

	2#直线加速器	j	2.8E-01	8.4	3.6E-04	412.5	1/5	3.0E-05		
核医学 制药区	1#直线加速器	G	6.4E-01	20.2	1.4E-04	412.5	1	5.8E-05	1.2E-04	职业 照射
	2#直线加速器	G	6.4E-01	20.2	1.4E-04	412.5	1	5.8E-05		
正上方 一层厨 房	1#直线加速器	m	2.1E-01	5	7.4E-04	412.5	1	3.0E-04	6.0E-04	公众 照射
	2#直线加速器	m	2.1E-01	5	7.4E-04	412.5	1	3.0E-04		
在建疾 控中心	1#直线加速器	G	6.4E-01	92	6.8E-06	412.5	1	2.8E-06	4.2E-06	公众 照射
	2#直线加速器	j	2.8E-01	86	3.4E-06	412.5	1	1.4E-06		
拟建 2# 医疗综 合楼	1#直线加速器	b	7.5E-01	35	5.5E-05	412.5	1	2.3E-05	2.6E-05	公众 照射
	2#直线加速器	k	1.0E-01	35	7.6E-06	412.5	1	3.1E-06		

备注：①上述环境保护目标所受年剂量均为附加剂量值；②上述所有保护目标均保守按照 2 台直线加速器年最大出束时间进行考虑。

由上表可知，放疗中心周围职业人员年最大受照剂量为 0.26mSv/a，周围最近的公众年最大受照剂量为 7.0×10^{-4} mSv/a，分别满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中规定的“一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a，公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a”，远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的职业人员 20mSv/a 和公众 1mSv/a 的剂量限值。

4、放疗中心臭氧环境影响分析

医院拟在放疗中心内新建 2 间直线加速器机房和 1 间模拟 CT 室，分别在直线加速器机房内使用 1 台 10MV 直线加速器，在模拟 CT 室内使用 1 台模拟 CT 机。在射线装置辐照出束期间，机房内空气中的氧受 X 射线电离会产生臭氧，主要产生臭氧的射线装置主要为直线加速器，模拟 CT 机产生的臭氧可忽略不计。

本项目直线加速器机房排风量为 1200m³/h，室内净空面积均为 60.4m²（L×B=7.55m×8.0m，不含迷道），净空高度为 3m，则每小时排风次数为 6.6 次，排风管道在防护门顶部穿墙引出后，排风管道经机房防护门顶部预留洞口穿出后，向北进入排风井，通过排风井后引至高于地面 3m 排放，排风口设于 1#医疗综合楼北侧外墙，朝向绿化带内排放，排风口位置人流较小，能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）

中“8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于4次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置”的要求，直线加速器产生的废气经自然分解和稀释后对周围环境的影响较小。

（二）核医学工作场所辐射环境影响分析

根据医院设计规划，拟在负二层设核医学制药区，负一层设核素诊断区，使用PET-CT、PET-MRI各1台用于PET影像诊断项目，使用1台SPECT-CT用于SPECT诊断项目，使用放射性同位素 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等共8种，使用 ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）、 ^{68}Ge （ ^{68}Ga ），使用3枚 ^{68}Ga 放射源或1枚 ^{22}Na 放射源（均属于V类放射源）；在二层核素治疗区内使用放射性核素 ^{131}I 、 ^{90}Y 、 ^{188}Re 等共11种，使用 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源2枚，使用1台DSA-CBCT用于放射性核素介入诊疗；在三层核素治疗区内使用放射性核素 ^{131}I 、 ^{177}Lu 共2种。本项目使用的PET-CT、SPECT-CT均属于III类医用射线装置，在项目运营过程中，产生的X射线影响较小；DSA-CBCT设备属于II类医用射线装置，主要产生X射线。因此，本项目核医学工作场所内，主要环境影响为核素衰变过程中产生的 β 射线、韧致辐射、 γ 射线和DSA-CBCT设备产生的X射线。

1、 β 射线的辐射影响分析

负二层放射性药物生产区内涉及生产、质控使用操作的核素为 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr ；负一层涉及使用的核素有 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ， ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）、 ^{68}Ge （ ^{68}Ga ）、 ^{22}Na 放射源或 ^{68}Ga 放射源；二层涉及使用的核素有 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{125}I _{粒子源}、 ^{103}Pd _{种子源}、 ^{90}Y 、 ^{188}Re 、 ^{131}I ， ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源；三层涉及使用核素 ^{131}I 、 ^{177}Lu 。其中， ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）、 ^{68}Ge （ ^{68}Ga ）、 ^{22}Na 放射源、 ^{68}Ga 放射源均进行了良好的封装，产生的 β 射线可忽略不计；除核素 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{125}I _{粒子源}、 ^{103}Pd _{种子源}外，其他放射性同位素在衰变过程中均会有 β 粒子，但核素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{89}Zr 、 ^{68}Ga 产生正电子，迅速发生湮灭反应，本次不考虑 β 射线影响。根据“表1-9 本项目涉及核素特性”，本次分析选取 β 射线能量和日操作量较大的 ^{188}Re 、 ^{131}I 、 ^{90}Y 、 ^{89}Sr 进行代表性分析。根据《辐射防护手册 第三分册》（原子能出版社）， β 粒子在不同介质中的射程按下式计算：

$$d = \frac{I}{2\rho} E_{\text{MAX}} \dots\dots\dots \text{式 (11-11)}$$

式中：

d —— β 射线在介质中的射程，cm；

ρ ——介质的密度，空气密度为 $1.29 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ ；铅密度为 11.34g/cm^3 ；铅玻璃密度为 4.6g/cm^3 ；实心砖密度为 1.65g/cm^3 ；

E_{MAX} —— β 射线的最大能量，MeV。

表 11-8 β 射线在不同材料中理论最大射程

核素	^{188}Re	^{131}I	^{90}Y	^{89}Sr
β 射线能量(MeV)	2.218	0.6065	2.288	1.488
空气密度(g/cm^3)	1.29×10^{-3}			
空气中的射程 (cm)	859.7	235.1	863.6	576.7
实心砖墙密度(g/cm^3)	1.65			
砖墙中的射程 (cm)	0.672	0.184	0.675	0.451
铅玻璃密度(g/cm^3)	7.36			
铅玻璃中射程 (cm)	0.151	0.041	0.151	0.101
混凝土密度(g/cm^3)	2.35			
混凝土中射程 (cm)	0.472	0.129	0.474	0.317
有机玻璃密度(g/cm^3)	1.18			
有机玻璃中射程 (cm)	0.940	0.257	0.944	0.631

由上表可知，本项目使用的核素在砖墙中的射程最大为0.675cm，本项目核医学工作场所内砖墙厚度最低为20cm，足以屏蔽 β 射线；在铅玻璃中的射程最大为0.151cm，本项目核医学工作场所内铅玻璃厚度最小为0.3cm，足以屏蔽 β 射线；在混凝土中的射程最大为0.474cm，本项目核医学工作场所混凝土墙体厚度最小为20cm，足以屏蔽 β 射线；在有机玻璃中的射程最大为0.944cm，本项目核医学工作场所内配置的有机玻璃注射器和最小厚度为1.5cm，足以屏蔽 β 射线；虽然在空气中的射程最大为863.6cm，但由于整个使用过程中职业人员穿戴有0.5mm铅当量的防护铅服，公众与放射性核素之间均有墙体或铅玻璃阻隔。因此， β 射线对周围辐射环境影响较小。

2、韧致辐射（X射线）影响分析

由于 β 粒子在遇到周围物质（如盛放放射性同位素的玻璃瓶、铅罐、手套箱、通风橱、彩钢板墙体等）阻挡时，会产生韧致辐射。根据项目使用的核素操作量，结合核素的衰变方式和主要射线能量，放射性核素工作场所内 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{188}Re 的日操作量最大， ^{90}Y 、 ^{188}Re 衰变产生的 β 射线能量最大，且 ^{90}Y 、 ^{188}Re 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 涉及介入手术内介入注射治疗，但 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变几乎不产生 β 射线。因此，本项目负二层核医学制药区选取操作量最大的核素 ^{18}F 进行分析分装/标记过程，其余核医学工作场所衰变产生的 β 射线所致韧致辐射影响选用 ^{18}F 、 ^{131}I 、 ^{90}Y 在分装/标记过程中进行分析，二层核素注入和住院留观过

程中选取¹⁸⁸Re、⁹⁰Y分别进行分析。

(1) 预测方法

本次预测将核素按照点源进行考虑，β射线产生的轫致辐射在关注点处空气中的吸收剂量可通过《辐射防护导论》（P133）中公式计算。

$$\dot{D} = 4.58 \times 10^{-14} A Z_e \left(\frac{E_b}{r} \right)^2 \cdot (\mu_{en}/\rho) \quad \text{.....式 (11-12)}$$

$$H_{\text{初}} = \dot{D} \cdot 10^{-\frac{X}{TVL}} \quad \text{.....式 (11-13)}$$

式中：

\dot{D} —是屏蔽层中由β粒子产生的轫致辐射在关注点处空气中的吸收剂量率，Gy/h；

A—放射源的活度，Bq；

Z_e —吸收β粒子的屏蔽材料（或靶核）的有效原子序数，根据《辐射防护导论》表 4.4 查得铅 82，有机玻璃 5.85，水（人体）6.66；

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

r—放射源到关注点的距离，分装/标记过程取 0.5m，核素注入和留观过程取 1m；

μ_{en}/ρ —平均能量为 E_b 的轫致辐射在空气中的质量能量吸收系数，m²/kg，由《辐射防护导论》附表 1 查得；

式中：

D—轫致辐射在关注点处的最大辐射剂量率，Gy/h；

X—拟采用的屏蔽材料厚度，mm；

TVL—γ射线在相应屏蔽材料中的十值层厚度，¹⁸F、¹³¹I保守按照GBZ120-2020中表L.1进行取值，⁹⁰Y、¹⁸⁸Re保守按照《辐射防护手册第三分册》图2.16 几种常用屏蔽材料对宽束γ射线的半值层和十分之一值层厚度进行取值，均取4mmPb。

①分装/标记过程

在分装/标记过程中，β粒子所致轫致辐射空气吸收剂量率及屏蔽体外辐射剂量当量率计算结果见下表。

表 11-9 分装/标记过程轫致辐射空气吸收剂量率及屏蔽体外剂量率计算表

核素	¹⁸ F	¹⁸ F	¹³¹ I	⁹⁰ Y	¹⁸⁸ Re
β粒子能量（MeV）	0.635	0.635	0.6065	2.288	2.218

β粒子平均能量 (MeV)	0.212	0.212	0.202	0.743	0.739
操作活度 (Bq)	5.55E+10	1.11E+10	3.52E+10	6.00E+09	2.22E+10
空气质量能量吸收系数 (m ² .kg ⁻¹)	2.67E-03	2.67E-03	2.67E-03	2.88E-03	2.88E-03
阻挡前空气吸收剂量率* (μGy/h)	399.2	79.8	230.7	40.9	149.9
阻挡层材质及厚度	60mmPb	50mmPb	40mmPb	10mmPb	10mmPb
透射比	2.43E-04	9.73E-04	2.31E-04	3.16E-03	3.16E-03
阻挡体外剂量当量率 (μGy/h)	9.7E-02	7.8E-02	5.3E-02	1.3E-01	4.7E-01
备注	负二层	负一层	三层	二层	二层

注：*—⁹⁰Y、¹⁸⁸Re核素在分装过程中，均采用内层为轻质材料的铅制容器中，放射性核素直接接触的材料保守按照有机玻璃进行考虑。

从上表可知，在核医学工作场所内分装/标记过程中，使用的核素衰变产生的韧致辐射在屏蔽体外30cm处辐射最大值为**4.7E-01**μSv/h，对周围辐射剂量率贡献值很小。

②核素注入和住院留观过程

在核素注入、患者转移和住院留观过程中，β粒子所致韧致辐射空气吸收剂量率及屏蔽体外辐射剂量当量率计算结果见下表。

表 11-10 核素注入和住院留观过程韧致辐射空气吸收剂量率及屏蔽体外剂量率计算表

核素	核素注入			患者转移		住院留观	
	⁹⁰ Y	¹⁸⁸ Re		⁹⁰ Y	¹⁸⁸ Re	⁹⁰ Y	¹⁸⁸ Re
		手术医生位	助手医生及护士位				
β粒子能量 (MeV)	2.228	2.218	2.218	2.228	2.218	2.228	2.218
β粒子平均能量 (MeV)	0.743	0.739	0.739	0.743	0.739	0.743	0.739
操作活度 (Bq)	3.00E+09	1.11E+10	1.11E+10	3.00E+09	1.11E+10	3.00E+09	1.11E+10
空气质量能量吸收系数 (m ² .kg ⁻¹)	2.88E-03	2.88E-03	2.88E-03	2.88E-03	2.88E-03	2.88E-03	2.88E-03
阻挡前空气吸收剂量率 (μGy/h)	1.3	4.7	4.7	1.5	5.3	1.5	5.3
阻挡物质材质及厚度	1.5cm 有机玻璃 +0.5mmPb 铅防护衣	1.5cm 有机玻璃 +2mmPb 注射筒+2mmPb 移动注射车 +0.5mmPb 铅衣	1.5cm 有机玻璃 +2mmPb 注射筒 +0.5mmPb 铅衣	人体组织 +0.5mmPb 防护铅衣	人体组织 +0.5mmPb 防护铅衣	人体组织	人体组织
透射比	7.5E-01	2.3E-02	1.23E-01	7.5E-01	6.6E-01	1	1
阻挡体外剂量当量率	9.6E-01	1.1E-01	5.8E-01	1.1	3.5	1.5	5.3

量率（μGy/h）							
备注	二层	二层	二层	二层	二层	二层	二层

从上表可知，在二层核素治疗区核素注入时，距离注射装置1m处核素衰变产生的韧致辐射最大辐射剂量率为**9.6E-01μGy/h**；在患者住院留观期间距离患者体表1m处产生的韧致辐射最大值为**5.3μGy/h**。

3、关注点处（X/γ/中子）辐射剂量率水平分析

（1）负二层核医学制药区各关注点处辐射剂量率分析

医院拟在负二层设核医学制药区，在制药区内开展放射性药物进行放射性药物打靶生产、药物质控和药物传递。在制药区回旋加速器机房内安装使用1台GE公司生产的型号为MINItrace Qilin的回旋加速器用于正电子药物的制备。

医院拟在负一层核素诊断区PET影像诊断项目使用核素¹⁸F、¹¹C、¹³N、¹⁵O、⁸⁹Zr、⁶⁸Ga，SPECT影像诊断项目仅使用同位素^{99m}Tc，并使用⁹⁹Mo（^{99m}Tc）、⁶⁸Ge（⁶⁸Ga）淋洗制药；二层核素治疗区涉及使用的核素有¹³¹I、⁸⁹Sr、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re、²²³Ra、²²⁵Ac、^{99m}Tc、¹²⁵I_{粒子源}、¹⁰³Pd_{种子源}、⁹⁰Y、¹⁸⁸Re，⁹⁰Sr-⁹⁰Y放射源；三层核素治疗区涉及使用核素¹³¹I、¹⁷⁷Lu。

1）回旋加速器制药环境影响分析

根据源项分析，回旋加速器运行过程主要贯穿辐射影响因子包括中子和γ射线。根据医院市场调研，拟采购型号为 MINItrace Qilin 的自屏蔽回旋加速器，质子能量为 10 MeV，设备厂家提供了自屏蔽体外γ剂量率为 35μSv/h 的等高线和自屏蔽体外中子剂量率 8.4μSv/h 的等高线。由于正电子核素发生湮没反应后发出的γ射线能量为 0.511MeV，小于回旋加速器产生的γ射线的能量，因此回旋加速器机房的屏蔽设计在考虑了加速器产生的γ射线时，对正电子核素产生的γ射线的辐射影响也能屏蔽。本次预测点位见下图。

图 11-3 回旋加速器机房周围关注点示意图

①屏蔽墙体透射剂量率计算

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 I.3，回旋加速器屏蔽室外的剂量率根据设备生产厂家提供的泄漏辐射剂量等高线近似估算，计算公式如下：

$$\dot{H}_R=\left(\frac{r_0}{R}\right)^2\cdot\left(\dot{H}_n\times10^{-x/TVL_n}+\dot{H}_\gamma\times10^{-x/TVL_\gamma}\right).....式（11-14）$$

式中：

H_R —回旋加速器机房外关注点处的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

r_0 —参考点距靶心的距离，按照厂家提供剂量率等高线进行取值；

H_n —参考点 r_0 处的最大中子剂量率，根据生产厂家提供的泄漏辐射剂量等高线进行取值；

x —屏蔽墙厚度， cm ；

TVL_n —中子射线的十分之一减弱层厚度，保守按照《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中表 I.3 进行取值；

H_γ —参考点 r_0 的 γ 射线剂量率，根据生产厂家提供的泄漏辐射剂量等高线进行取值；

TVL_γ — γ 射线的十分之一减弱层厚度，保守按照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中表 I.3 进行取值；

表 11-11 回旋加速器泄漏辐射不同屏蔽材料的 TVL 值

材料名称	密度 g/cm^3	$TVL_\gamma(8\text{MeV})$ cm	$TVL_n(5\text{MeV})$ cm
混凝土	2.35	38	43
铅	11.3	5	47.8
聚乙烯	0.97	80	24

注：以上数据来自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中表I.3。

根据预测结果可知，回旋加速器机房在屏蔽设计和最大工况运行条件下，屏蔽体外辐射剂量率在 $4.5 \times 10^{-2} \sim 1.4 \mu\text{Sv/h}$ 之间，低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率限值，本项目回旋加速器机房屏蔽体厚度能够满足屏蔽防护的要求。

2) 放射性核素传输过程剂量率计算

放射性药物在管线中输送时（管道+3mm 铅套管+50mm 铅砖+10mm 铅盖板）按点源进行计算，源强保守取单次生产量最大的氟-18（1Ci）核素，每天最多两次打靶进行评价，参照《核医学科放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 I.1 公式推导：

$$H = \frac{A \times \Gamma \times 10^{-X/TVL}}{R^2} \dots\dots\dots \text{式 (11-15)}$$

式中：

- H —关注点的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；
- A —单日最大生产核素活度， $3.70 \times 10^4 \text{MBq}$ ；
- Γ —1m处的周围剂量当量率，取 $0.143 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot (\text{hMBq})^{-1}$ ；
- R —关注点到辐射源的距离，取 1m ；
- X —拟采用的屏蔽厚度，63mm；

TVL— γ 射线在相应屏蔽材料中的十值层，取 16.6mm。

经计算，放射性药物在传输过程中，管沟上方最大剂量为 0.85 μ Sv/h，满足 2.5 μ Sv/h 控制剂量率要求。

3) PET 诊断药物合成、分装过程剂量率计算

为保守考虑，本次预测液体靶选择操作量和周围剂量当量常数都相对较大的 ^{18}F 、 ^{15}O ，作为源项进行辐射剂量率的计算；固体靶以 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 作为源项进行辐射剂量率的计算。根据源项分析操作过程中主要辐射因子为： γ 射线产生的贯穿辐射和 β 离子产生的韧致辐射。 γ 射线产生的贯穿辐射由式（11-15）计算，产生的韧致辐射由公式（11-12）、（11-13）进行计算。

①液态靶药物制备时辐射剂量率计算

在 PET 药物制备过程中，合成分装柜体表面关注点处辐射剂量率可通过公式（11-15）计算得到，热室合成分装柜表面辐射剂量率计算参数取值及计算结果见表 11-12 和表 11-13。

表 11-12 热室内合成分装柜周围 γ 射线辐射剂量率计算表

操作核素名称	^{18}F				^{15}O			
	热室柜人员操作位	热室柜其他方向	热室周围	楼上	热室柜人员操作位	热室柜其他方向	热室周围	楼上
γ 射线能量 (MeV)	0.511	0.511	0.511	0.511	0.511	0.511	0.511	0.511
操作活度 (MBq)	5.55E+04	5.55E+04	5.55E+04	5.55E+04	2.96E+04	2.96E+04	2.96E+04	2.96E+04
周围剂量当量率常数 (裸源) ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$)	0.143	0.143	0.143	0.143	0.148	0.148	0.148	0.148
操作距离 (m)	0.8	1	1.6	4.5	0.8	1	1.6	4.5
屏蔽材料及厚度	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 混凝土	70mm 铅 +0.3m 混凝土	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 混凝土	70mm 铅 +0.3m 混凝土
γ 射线十值层厚度 (mm) *	16.6	16.6	16.6/176	16.6/176	16.6	16.6	16.6/176	16.6/176
γ 射线剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	7.53E-01	4.82E-01	1.37E-02	4.70E-04	4.15E-01	2.66E-01	7.59E-03	2.59E-04

*注：由《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）表 I.1 查得。

表 11-13 热室合成分装柜韧致辐射剂量率计算表

操作核素名称	^{18}F				^{15}O			
	热室柜人	热室柜其	热室周围	楼上	热室柜人	热室柜其	热室周围	楼上

	员操作位	他方向			员操作位	他方向		
β粒子最大能量 (MeV)	0.635	0.635	0.635	0.635	1.72	1.72	1.72	1.72
β粒子平均能量 (MeV)	0.21	0.21	0.21	0.21	0.57	0.57	0.57	0.57
单次操作活度 (Bq)	5.55E+10	5.55E+10	5.55E+10	5.55E+10	2.96E+10	2.96E+10	2.96E+10	2.96E+10
质量能量吸收系数 (m ² .kg ⁻¹)	2.69E-03	2.69E-03	2.69E-03	2.69E-03	2.95E-03	2.95E-03	2.95E-03	2.95E-03
操作距离 (m)	0.8	1	1.6	4.5	0.8	1	1.6	4.5
屏蔽材料及厚度	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 混凝土	70mm 铅 +0.3m 混凝土	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 混凝土	70mm 铅 +0.3m 混凝土
有效原子序数	82	82	82	82	82	82	82	82
韧致辐射什值层 厚度*	2.4	2.4	2.4/12	2.4/12	9	9	9/19	9/19
剂量转换因子	1	1	1	1	1	1	1	1
韧致辐射剂量率 (μSv/h)	2.67E-28	1.71E-28	1.44E-30	2.67E-32	2.81E-06	1.80E-06	6.22E-08	2.34E-09

*注：保守按照《辐射防护手册第三分册》图2.16 几种常用屏蔽材料对宽束γ射线的半值层和十分之一值层厚度进行取值。

表 11-14 热室合成成分装柜生产核素期间产生的最大辐射剂量率综合分析

辐射类型	¹⁸ F				¹⁵ O			
	热室柜人 员操作位	热室柜其 他方向	热室周围	楼上	热室柜人 员操作位	热室柜其 他方向	热室周围	楼上
γ射线	7.53E-01	4.82E-01	1.37E-02	4.70E-04	4.15E-01	2.66E-01	7.59E-03	2.59E-04
韧致辐射	2.67E-28	1.71E-28	1.44E-30	2.67E-32	2.81E-06	1.80E-06	6.22E-08	2.34E-09
合计	7.53E-01	4.82E-01	1.37E-02	4.70E-04	4.15E-01	2.66E-01	7.59E-03	2.59E-04

经计算，热室内合成成分装柜屏蔽体外正对人员操作位辐射剂量率最大为 $7.53 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ ，满足 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求，非正对人员操作位辐射剂量率最大为 $4.82 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ ，满足 $25 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求，楼上辐射剂量率最大为 $4.70 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ ，远低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求。

②固体靶药物制备时辐射剂量率计算

固体靶药物制备时辐射剂量率计算参数取值及计算结果见表 11-15 和表 11-16。

表 11-15 固体靶药物制备时γ射线辐射剂量率计算表

操作核素名称	⁶⁴ Cu	⁸⁹ Zr
--------	------------------	------------------

	热室柜人 员操作位	热室柜其 他方向	热室周围	楼上	热室柜人 员操作位	热室柜其 他方向	热室周围	楼上
γ射线能量 (MeV)	1.346	1.346	1.346	1.346	0.511	0.511	0.511	0.511
操作活度 (MBq)	2.22E+03	2.22E+03	2.22E+03	2.22E+03	1.48E+03	1.48E+03	1.48E+03	1.48E+03
周围剂量当量 率常(裸源) (μSv·m ² /MBq·h)	0.029	0.029	0.029	0.029	0.2	0.2	0.2	0.2
操作距离(m)	0.8	1	1.6	4.5	0.8	1	1.6	4.5
屏蔽材料及厚度	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 混凝土	70mm 铅 +0.3m 混凝土	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 厚 混凝土	70mm 铅 +0.3m 混 凝土
γ射线半值层厚 度(mm)*	16.6	16.6	16.6/176	16.6/176	16.6	16.6	16.6/176	16.6/176
γ射线剂量率 (μSv/h)	6.11E-03	3.91E-03	1.12E-04	3.81E-06	2.81E-02	1.80E-02	5.13E-04	1.75E-05

*注：由《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）表 I.1 查得。

表 11-16 固体靶药物制备时韧致辐射剂量率计算表

操作核素名称	⁶⁴ Cu				⁸⁹ Zr			
	热室柜人 员操作位	热室柜其 他方向	热室周围	楼上	热室柜人 员操作位	热室柜其 他方向	热室周围	楼上
β粒子最大能量 (MeV)	0.657	0.657	0.657	0.657	0.396	0.396	0.396	0.396
β粒子平均能量 (MeV)	0.22	0.22	0.22	0.22	0.13	0.13	0.13	0.13
单次操作活度 (Bq)	2.22E+09	2.22E+09	2.22E+09	2.22E+09	1.48E+09	1.48E+09	1.48E+09	1.48E+09
质量能量吸收 系数 (m ² .kg ⁻¹)	2.64E-03	2.64E-03	2.64E-03	2.64E-03	2.94E-03	2.94E-03	2.94E-03	2.94E-03
操作距离(m)	0.8	1	1.6	4.5	0.8	1	1.6	4.5
屏蔽材料及厚度	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 混 凝土	70mm 铅 +0.3m 混 凝土	70mm 铅	70mm 铅	70mm 铅 +0.2m 厚 混凝土	70mm 铅 +0.3m 混 凝土
有效原子序数	82	82	82	82	82	82	82	82
韧致辐射半值 层厚度*	2.4	2.4	2.4/12	2.4/12	1.95	1.95	1.95/11	1.95/11
剂量转换因子	1	1	1	1	1	1	1	1
韧致辐射剂量 率 (μSv/h)	1.12E-41	7.19E-42	6.05E-32	1.12E-33	5.63E-37	3.61E-37	2.14E-39	3.34E-41

*注：保守按照《辐射防护手册第三分册》图2.16 几种常用屏蔽材料对宽束γ射线的半值层和十分之

一值层厚度进行取值。

表 11-17 固体靶室生产核素期间产生的最大辐射剂量率综合分析

辐射类型	⁶⁴ Cu				⁸⁹ Zr			
	热室柜人员操作位	热室柜其他方向	热室周围	楼上	热室柜人员操作位	热室柜其他方向	热室周围	楼上
γ射线	6.11E-03	3.91E-03	1.12E-04	3.81E-06	2.81E-02	1.80E-02	5.13E-04	1.75E-05
韧致辐射	1.12E-41	7.19E-42	6.05E-32	1.12E-33	5.63E-37	3.61E-37	2.14E-39	3.34E-41
合计	6.11E-03	3.91E-03	1.12E-04	3.81E-06	2.81E-02	1.80E-02	5.13E-04	1.75E-05

经计算，热室内热室柜屏蔽体外正对人员操作位辐射剂量率最大为 $2.81 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ ，低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求，非正对人员操作位辐射剂量率最大为 $1.80 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ ，满足 $25 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求，楼上辐射剂量率最大为 $1.75 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ ，远低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求，医院提供的屏蔽设计方案能够满足本项目要求。

③放化实验室药物质控辐射环境影响分析

放化实验室内手套箱单次只操作 1 种核素，本次选择操作量最大的代表核素 ¹⁸F 作为源项进行辐射剂量率的计算，每次最多取用 100uCi（0.37MBq）。

表 11-18 药物质控γ射线辐射剂量率计算表

操作核素名称	¹⁸ F	
	手套箱四周	楼上
γ射线能量（MeV）	0.511	0.511
操作活度（MBq）	0.37	0.37
照射量常数（ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / \text{MBq} \cdot \text{h}$ ）	0.143	0.143
操作距离（m）	0.5	6.3
屏蔽材料及厚度	10mm 铅	10mm 铅
γ射线什值层厚度*（mm）	16.6	16.6
γ射线剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）	5.29E-02	3.33E-04

*注：由《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）查得。

经计算，放化实验室内通风橱屏蔽体外最大辐射剂量率为 $5.29 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ ，满足 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求，楼上辐射剂量率最大为 $3.33 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ ，满足 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求。

④其他区域屏蔽体外辐射剂量率分析

根据预测结果可知，屏蔽体外辐射剂量率最大为 $0.85 \mu\text{Sv/h}$ ，满足《核医学辐射防护与安全要求》6.1中“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 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ”的要求。

⑤感生放射性物质影响分析

本项目回旋加速器质子能量为10MeV打靶时，光-核反应产生的中子与回旋加速器结构材料和空气发生的（n， γ ）反应产生感生放射性，空气中会产生少量感生放射性气体。回旋加速器在打靶运行过程中因射线强辐射作用，在空气中会产生极少量臭氧和微量氮氧化物等有害气体，还会产生少量含 ^{11}C 、 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{41}Ar 等核素的放射性废气。这些物质浓度过高会影响辐射工作人员健康。在回旋加速器打靶期间，由于回旋加速器具有自屏蔽，且机房具有足够的实体屏蔽，其部件产生的感生放射性不会危害屏蔽体外的工作人员，且本项目回旋加速器机房内除设备检修及更换靶材料外无人员进入，因此不考虑其对工作人影响。

根据建设单位核实，回旋加速器制药程中产生的高活性废靶废料等感生放射性物质，均由厂家进行回收，回旋加速器产生的感生放射性物质中 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 半衰期很短，在很短时间内即可发生衰变，故可以不予考虑。感生放射性主要考虑 ^{41}Ar 的影响，由于空气中可以生成 ^{41}Ar 的 ^{40}Ar 含量仅为1.3%，加上产生 ^{41}Ar 的活化反应截面很小，所以 ^{41}Ar 的生成率极其微小，且机房拟设排风风机，排气次数不低于5次/h。因此，排出的感生放射性气体对周围公众的影响可以忽略不计。

（2）负一层核素诊断区各关注点处辐射剂量率分析

1）代表性核素分析

在负一层，使用的 ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）、 ^{68}Ge （ ^{68}Ga ）均按照II级（黄）货包进行考虑，PET影像诊断使用的核素 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{89}Zr 、 ^{68}Ga 能量相近，操作量 ^{18}F 相对最大，故核医学负一层PET影像诊断产生的 γ 辐射影响仅考虑 ^{18}F ，SPECT影像诊断产生的 γ 辐射影响仅考虑 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。

2）各功能区域内使用核素源强分析

①PET-CT/MRI诊断项目：PET-CT/MRI分装操作保守按照单次操作一种同位素，每次按照日最大用药量 $1.11 \times 10^{10}\text{Bq}$ （11100MBq）进行操作考虑，PET注射给药后VIP患者候诊室仅可容纳1个人，故其屏蔽体外辐射剂量率由 ^{18}F 单人次最大注射量 $3.70 \times 10^8\text{Bq}$ （370MBq）计算得到，一般患者PET注射给药后候诊室最多可容纳4人， ^{18}F 单人次最大注射量 $1.48 \times 10^9\text{Bq}$ （370 \times 4MBq），屏蔽体外辐射剂量率由此进行计算得；PET检查后留观室一次最多容纳2人，故其屏蔽体外辐射剂量率则由 $7.40 \times 10^8\text{Bq}$ （ $3.70 \times 10^8\text{Bq}/\text{人} \times 2\text{人} = 7.40 \times 10^8\text{Bq}$ ）计算得到；

②SPECT-CT诊断项目：SPECT-CT诊断项目使用的放射性药物为负一层淋洗制备

的^{99m}Tc, 经过质控后, 再进行标记、分装, 单次操作保守按照日最大操作量的 3.33×10^{10} Bq (33300MBq) 进行考虑, SPECT-CT注射、检查室、运动负荷间每次仅可容纳1个人, 故其屏蔽体外辐射剂量率由^{99m}Tc单人次最大注射量 7.40×10^8 Bq计算得到; 给药后候诊室一次最多可容纳6人, 故其屏蔽体外辐射剂量率则由 4.44×10^9 Bq (7.40×10^8 Bq/人 \times 6人 $=4.44 \times 10^9$ Bq) 计算得到;

③SPECT-CT 诊断和 PET-CT/MRI 诊断共用场所: 因不同的核素对应的单次注射活度 (A) 和周围剂量当量率常数 (Γ) 不一致, 故分装注射室屏蔽体外辐射剂量率为^{99m}Tc 和 ¹⁸F 单次最大操作量计算得到辐射剂量率之和比较保守; 源库主要用于存放 PET-CT/MRI 和 SPECT-CT 诊疗用药, 保守按照 PET-CT/MRI 诊断区最大用药量进行考虑 1.68×10^{10} Bq(16800MBq), SPECT-CT 诊断区最大用药量进行考虑 3.70×10^{10} Bq (37000MBq)。

3) 计算参数取值

根据《核医学科放射防护要求》(GBZ120-2020), 负一层核素诊断区内使用的放射性核素参数取值见下表。

表 11-19 使用放射性药物工作场所辐射屏蔽计算参数

核素	周围剂量当量率常数 (裸源) ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{MBq}$)	周围剂量当量率常数 (患者体内) ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{MBq}$)	TVL (mm)		
			铅 ($11.3\text{g}/\text{cm}^3$)	实心砖 ($1.65\text{g}/\text{cm}^3$)	混凝土 ($2.35\text{g}/\text{cm}^3$)
¹⁸ F	0.143	0.092	16.6	263	176
^{99m} Tc	0.0303	0.0207	1	160	110

备注: 周围剂量当量率常数 (裸源) 数据来源于《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 表H.1, 周围剂量当量率常数 (患者体内) 数据来源于《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 表L.1, TVL 取值来源于表I.1。

4) 各功能区域关注点处最大辐射剂量率预测分析

①放射性药物淋洗制备过程

经计算, 负一层核素诊断区分装注射室内手套箱屏蔽体外正对人员操作位辐射剂量率最大为 $9.1 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}/\text{h}$, 满足 $2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 控制剂量率要求, 非正对人员操作位辐射剂量率最大为 $5.9 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}/\text{h}$, 满足 $25 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 控制剂量率要求, 楼上、楼下辐射剂量率最大贡献为 $3.2 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}/\text{h}$, 满足 $2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 控制剂量率要求, 医院提供的屏蔽设计方案能够满足本项目要求的。

②核素诊疗过程对各功能区的辐射环境影响

由计算可知，负一层分装注射室内手套箱屏蔽体外正对人员操作位辐射剂量率最大为 $6.0 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ ，小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制剂量率要求；负一层核素诊断区控制区外人员可到达处，距屏蔽体外表面 0.3m 处的周围剂量当量率最大为 $2.1 \mu\text{Sv/h}$ ，小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；控制区内屏蔽墙外人员偶尔居留的区域周围剂量当量率最大为 $8.0 \mu\text{Sv/h}$ ，小于 $10 \mu\text{Sv/h}$ 。因此，屏蔽体外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》（HJ 1188—2021）的相关要求，建设单位提供的负一层核素诊断区屏蔽设计方案能够满足核素产生 γ 射线屏蔽防护的要求。

（3）二层、三层核素治疗区各关注点处辐射剂量率分析

1）使用放射性核素工作场所致关注点处辐射剂量率分析

①代表性核素分析

根据表1-5可知，医院拟在1#医疗综合楼二层使用的核素 ^{89}Sr 、 ^{90}Y 为纯 β 衰变，衰变过程中不产生 γ 射线，其余放射性同位素衰变过程中均会产生一定的 γ 射线，此外， α 核素衰变子体中 ^{209}Tl 的剂量率常数最大， γ 射线能量最高。根据GBZ120-2020附录I.1公式可知，核素操作活度与周围剂量当量率常数的乘积越大，对关注点处的辐射剂量率贡献越大， γ 射线对十分之一值层值越大，关注点处辐射剂量率越大，代表性核素分析见下表。

表 11-20 本项目代表性放射性同位素参数分析

序号	使用核素	周围剂量当量率常数 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / \text{MBq} \cdot \text{h}$)	药物分装、标记环节参数取值		给药注射等环节参数取值		γ 射线铅十分之一值层厚度TVL* (mm)	备注
			日最大放射性同位素用量 (MBq)	周围剂量当量率常数与用量乘积 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / \text{h}$)	单人次放射性同位素最大用量 (MBq)	周围剂量当量率常数与用量乘积 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / \text{h}$)		
1	^{131}I 甲吸	0.0595	/	/	0.37	0.02	11	二层核医学治疗场所
2	^{153}Sm	0.072	2960	213.1	1480	106.6	1.4	
3	^{186}Re	0.0065	2220	14.4	1110	7.2	2.0	
4	^{223}Ra	0.048	14.8	0.71	7.4	0.36	2.6	
5	^{225}Ac	0.00606	14.8	0.09	7.4	0.04	1.21	
	^{209}Tl	0.3496	14.8	5.17	7.4	2.59	4.5	
6	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	0.0303	3700	112.1	1850	56.1	1	
7	^{125}I 粒子源	0.0165	5920	97.7	2960	48.8	0.16	
8	^{103}Pd 种子源	0.00021	5920	1.24	2960	0.62	6.0	
9	^{188}Re	0.0188	22200	417.4	11100	208.7	2.75	

10	^{131}I 甲亢	0.0595	1850	110.1	370	22.0	11	三层核医学治疗场所
11	^{131}I 甲癌	0.0595	27750	1651.1	5550	330.2	11	
12	^{177}Lu	0.00517	7400	38.3	7400	38.3	2.11	

注：上表 γ 射线在屏蔽材料中的十分之一值层厚度分别取自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中表I.1和《辐射防护手册第三分册》中图2.16。

由上表可知，在二层核医学治疗药物分装、标记环节，核素 ^{188}Re 周围剂量当量率常数与用量的乘积最大，各核素产生的 γ 射线铅十分之一值层相近，因此选用核素 ^{188}Re 作为分装、标记环节代表核素进行分析；二层核医学治疗场所内，住院治疗核素中 ^{188}Re 的给药/注射环节单人次用量最大，非住院治疗核素中给药/注射环节 ^{153}Sm 单人次用量最大，各核素产生的 γ 射线铅十分之一值层厚度TVL相近，因此住院治疗核素给药/注射环节选取 ^{188}Re 作为代表核素进行分析，非住院治疗核素给药/注射环节选取 ^{153}Sm 作为代表核素进行分析；三层核医学药物分装、标记及给药/注射等环节中，核素 ^{131}I 甲癌周围剂量当量率常数与用量乘积、且 γ 射线铅十分之一值层厚度TVL均最大，因此，三层核医学科治疗场所内选取 ^{131}I 作为代表性核素进行分析。

②各功能区域内使用核素源强分析

A、二层开展的治疗项目：在二层核素治疗区源库内保守按照4个II级（黄）货包进行考虑；使用的核素分装操作保守按照单次操作一种同位素，按照单次操作核素 ^{188}Re 日最大用药量 $2.22 \times 10^{10}\text{Bq}$ (22200MBq)进行操作考虑；配药、给药、注射、住院治疗过程每次仅1人，按照单次操作核素 ^{188}Re 最大使用量 $1.11 \times 10^{10}\text{Bq}$ (11100MBq)进行操作考虑；非住院治疗留观保守按照最大留观人数10人，患者给药核素 ^{153}Sm 最大用药量 $1.48 \times 10^{10}\text{Bq}$ (14800MBq)进行考虑。

B、三层开展的治疗项目：三层使用的核素主要为 ^{177}Lu 和 ^{131}I ，源库储源、分装过程保守按照使用核素 ^{131}I 单日最大操作量 $2.96 \times 10^{10}\text{Bq}$ （29600MBq）进行考虑，使用的核素分装、配药、给药、注射操作、住院治疗过程保守按照同一种核素，按照单次操作 ^{131}I 最大用药量 $5.55 \times 10^9\text{Bq}$ (5550MBq)进行操作考虑，甲亢治疗留观保守最大留观2人，按照使用核素 ^{131}I 最大用药量 $3.70 \times 10^8\text{Bq}$ (370MBq)。

表 11-21 使用放射性药物工作场所辐射屏蔽计算参数

核素	周围剂量当量率常数 (裸源) ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h} \cdot \text{MBq}$)	周围剂量当量率常数 (患者体内) ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h} \cdot \text{MBq}$)	TVL (mm)		
			铅 ($11.3\text{g}/\text{cm}^3$)	实心砖 ($1.65\text{g}/\text{cm}^3$)	混凝土 ($2.35\text{g}/\text{cm}^3$)
^{131}I	0.0595	0.0583	11	240	170

¹⁸⁸ Re	0.0188	0.0069	2.75	127	117
¹⁵³ Sm	0.072	0.012	0.015	4	1.6

备注：¹³¹I、¹⁵³Sm周围剂量当量率常数（裸源、患者体内）取值数据来源于《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020），¹⁸⁸Re周围剂量当量率常数（患者体内）数据来源于《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）表L.1，¹³¹I的TVL取值源于《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）表L.1，¹⁵³Sm、¹⁸⁸Re的TVL保守按照《辐射防护手册第三分册》中图2.16 几种常用屏蔽材料对宽束γ射线的半值层和十分之一值层厚度进行保守取值。

③各功能区域关注点处最大辐射剂量率预测分析

根据计算可知，二层核素治疗区、三层核素治疗区核素工作场所分装注射室内手套箱屏蔽体外正对人员操作位辐射剂量率最大为1.6μSv/h，小于2.5μSv/h控制剂量率要求；二层核素治疗区、三层核素治疗区控制区外人员可到达处，距屏蔽体外表面0.3m处的周围剂量当量率最大为1.3μSv/h，小于2.5μSv/h；控制区内屏蔽墙外人员偶尔居留的区域周围剂量当量率最大为6.2μSv/h，小于10μSv/h。因此，二层核素治疗区、三层核素治疗区屏蔽体外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》（HJ 1188—2021）的相关要求，医院提供的二层核素治疗区、三层核素治疗区设计方案能够满足核素产生的γ射线屏蔽防护的要求。

2）介入手术室各关注点处辐射剂量率预测分析

根据医院提供资料，介入手术室四周墙体均为 370mm 厚实心砖墙；屋顶为 400mm 厚混凝土、地面为 300mm 厚混凝土，介入手术室与控制室之间拟设 4mmPb 的铅防护窗 1 扇，介入手术室拟设 4/5mmPb 的铅钢结构防护门 5 扇。

根据原环境保护部和原国家卫生计生委联合发布公告 2017 年第 66 号《射线装置分类办法》，本项目使用的 DSA 部分属于Ⅱ类射线装置，曝光过程中不产生放射性废气、废水和固体废物。本项目射线装置为数字成像设备，不使用显、定影液，其主要环境影响因素为工作时产生的 X 射线。DSA-CBCT 机在进行曝光时分为三种情况：

A、造影拍片过程：操作人员采取隔室操作的方式，医生通过控制室铅玻璃观察介入手术室内病人情况，并通过对讲系统与操作人员交流。在拍片过程中，医生位于控制室内，经机房各屏蔽体屏蔽后，对介入手术室外（包括介入手术室楼上）的公众和工作人员基本没有影响。

B、脉冲透视过程

为更清楚的了解病人情况，医生需进入介入手术室内进行治疗，在介入治疗时会有连续曝光，并采用连续脉冲透视，此时手术医生身着铅防护服、戴铅防护眼镜等在介入

手术室内铅帘后对病人进行直接的手术操作。

C、CBCT 扫描引导过程

为了更能够清楚的定位肿瘤区域、更精准的开展植入/注入放射性核素，手术医生需要对患处进行采用CBCT进行扫描定位和图像引导，操作人员采取隔室操作的方式，在控制室内进行操作CBCT进行患处周围扫描，在扫描过程中，医生位于控制室内，经机房各屏蔽体屏蔽后，对介入手术室外（包括介入手术室楼上）的公众和辐射工作人员的影响较小。因CBCT部分最大管电压、最大管电流与DSA部分相同，设备出束原理及能量相近，本次评价采用理论预预测方法，通过分析DSA部分正常运行期间对关注点处辐射剂量率，保守采用DSA部分拍片模式下代表CBCT扫描引导时对周围保护目标的辐射影响。

①预测参数取值

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）“5.1 一般要求 c）除牙科摄影和乳腺摄影用 X 射线设备外，X 射线有用线束中的所有物质形成的等效总滤过，应不小于 2.5mmAl”。根据 ICRP33 号报告 P55（图 2），该报告中无过滤材料为 2.5mmAl 的相关数据，为进行保守预测，本项目使用的复合射线装置 X 射线管/准直器的最低固有过滤保守按照 2mmAl 进行预测估算。

医院拟在介入手术室内使用的 DSA 部分最大管电压为 150kV、最大管电流为 1000mA。在 DSA 拍片时，常用管电压 60~100kV，常用管电流为 100~500mA，透视时常用管电压为 70~90kV，常用管电流为 6~20mA。根据 ICRP33 号报告 P55（图 2），当过滤片材质为 2mm 铝，DSA 在透视模式（90kV）时，距离靶 1m 处发射率约为 8mGy/(mA·min)，拍片模式（100kV）时，距离靶 1m 处发射率约为 9.5mGy/(mA·min)。

本项目使用的复合射线装置在不同工作模式下，距离靶点 1m 处最大辐射剂量率见下表。

表 11-22 本项目射线装置主要参数

常用拍片工况			常用透视工况		
管电压	管电流	1m 处辐射剂量率	管电压	管电流	1m 处辐射剂量率
60~100kV	100 ~500mA	4750mGy·min ⁻¹	70~90kV	10~20mA	160mGy·min ⁻¹

在手术过程中，DSA 部分曝光（透视、拍片）时，手术室四周、下方的保护目标，均受到漏射线和散射射线的影响，手术室上方的保护目标受到主射辐射的影响，DSA 手术室内的辐射工作人员主要受到散射和漏射的影响。

②辐射工作人员受照时间

根据医院提供资料，护士主要负责介入手术术前准备、手术后清洁工作，以及根据手术情况术中配合跟台手术，本次预测保守按照每 1 台介入手术，护士跟台手术时间为手术量总时间的 1/3 进行考虑。医院通常根据手术难易程度，复杂手术安排 1 名主刀医生和 1 名助手医生，简单手术安排 1 名手术医生进行手术，复杂手术通常占总手术量的 1/3；手术医生、护士及技师在实际工作中存在不能完全平均分配时间情况，本次评价保守按照 1.2 倍进行考虑。即本项目放射性介入手术医生主刀位年最大受照时间为平均受照时间的 1.6 倍（ $1 \times 1.2 \times 4/3$ ），非放射性介入手术血管造影手术主刀医生位年最大受照时间为平均受照时间的 1.6 倍（ $1 \times 1.2 \times 4/3$ ），助手医生位年最大受照时间为平均受照时间的 0.4 倍（ $1 \times 1.2 \times 1/3$ ）；护士年最大受照时间为平均跟台手术受照时间的 0.4 倍（ $1 \times 1.2 \times 1/3$ ），技师年最大受照时间为平均受照时间的 1.2 倍。根据本项目手术台数和曝光时间，结合项目人员配置情况（表 1-18），得到本项目保护目标受到年最大照射时间见下表。

表 11-23 介入手术室内射线装置年最大曝光时间一览表

开展的项目		单台手术 CBCT 最 长扫描时 间 (min)	单台手术 DSA 最 长曝光时间		年最大手 术量 (台)	年最大出束时间		
			拍片 (min)	透视 (min)		拍片 (h)	透视 (h)	小计(h)
放射性 介入手 术	注射前插管	/	0.5	5	200	1.67	16.67	18.34
	^{99m} Tc 微球注射	/	0.5	15	100	0.83	25	25.83
	⁹⁰ Y 微球注射	/	0.5	15	100	0.83	25	25.83
非放射性介入手术		/	2	15	300	10	75	85
CBCT 扫描	¹²⁵ I 籽粒植入	15	/	/	400	/	/	100
	¹⁰³ Pd 种子源植入	15	/	/	400	/	/	100
	¹⁸⁸ Re 核素注射	30	/	/	100	/	/	50

表 11-24 介入手术室内射线装置周围保护目标年最大受照时间一览表

应用项目		透视模式 (h)						拍片模式* (h)				
		最长 受照 时间	手术医生		护士	技师	周围 公众	最长受 照时间	手术医生	护士	技师	周围 公众
			主刀医 生位	助手医 生位								
放射性 介入手 术	注射前插管	16.7	6.7	1.7	6.7	40	66.7	1.67	0.7	1.0	2	3.3
	^{99m} Tc 微球注射	25.0	10.0	2.5				0.83	0.3			
	⁹⁰ Y 微球注射	25.0	10.0	2.5				0.83	0.3			
非放射性介入手术		75	60	7.5	7.5	45.0	75.0	10.0	4.0	3	6	10

CBCT 扫描	¹²⁵ I 籽粒植入	/	/	/	/	/	/	100	40.0	75	150	250
	¹⁰³ Pd 种子源植入	/	/	/	/	/	/	100	40.0			
	¹⁸⁸ Re 核素注射	/	/	/	/	/	/	50	20.0			

注：CBCT 扫描、DSA 拍片模式下，医护人员及技师均位于控制室内。

③屏蔽透射因子

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）公式 C.1 以及附录表 C.2 可知，屏蔽透射因子 B：

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \dots\dots\dots \text{式 (11-16)}$$

式中：B—给定铅厚度的屏蔽透射因子；
 β —铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；
 α —铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；
 γ —铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；
X—铅厚度。

表 11-25 不同材料对 X 射线的辐射衰减拟合参数

管电压90kV（透视）						
材料	α		β		γ	
铅	3.067		18.83		0.7726	
混凝土	0.04228		0.1137		0.4690	
砖	0.03750		0.08200		0.8920	
管电压100kV（拍片）						
材料	α		β		γ	
	主束	散射	主束	散射	主束	散射
铅	2.500	2.507	15.28	15.33	0.7557	0.9124
混凝土	0.03925	0.03950	0.08567	0.08440	0.4273	0.5191
砖	0.03520	0.02870	0.0880	0.06700	1.149	1.346

注：①表 11-33 中数据来自 GBZ130-2020 中表 C.2、C.3；②拍片模式下，GBZ130-2020 中没有砖在 100kV 下非有用线束拟合参数，X 射线的散射辐射衰减拟合参数保守按照 125kV 有用线束进行取值。

根据上表参数代入公式计算，介入手术室不同屏蔽体材料及厚度对应的屏蔽透射因子见表 11-26。

表 11-27 介入手术室设计屏蔽防护措施及预测参数及一览表

屏蔽方位	屏蔽材料与厚度	屏蔽透射因子 (透视)	屏蔽透射因子（拍片）	
			主束	散射
四周墙体	370mm 厚实心砖墙	2.6E-07	7.4E-07	1.0E-05

顶部	400mm 厚混凝土	2.8E-09	1.0E-08	1.5E-08
地面	300mm 厚混凝土	1.9E-07	5.2E-07	7.9E-07
防护门	4mmPb 防护门	3.7E-07	2.8E-07	5.1E-06
防护门	5mmPb 防护门	1.72E-08	2.78E-07	4.2E-07
防护窗	4mm 铅当量防护玻璃	3.7E-07	3.4E-06	5.1E-06
手术主刀医生位	0.5mmPb 铅防护衣+0.5mmPb 铅帘 +2mmPb 移动注射车/2mmPb 铅屏风	7.9E-06	/	/
助手医生位	0.5mmPb 铅防护衣	4.1E-03	/	/
护士位	0.5mmPb 铅防护衣	2.5E-02	/	/

④主射方向关注点处辐射剂量率

A、计算模式

根据前文分析，主射方向关注点处辐射剂量率可根据下式进行计算：

$$D_r = D_l \cdot B / R^2 \dots \dots \dots \text{式 (11-17)}$$

式中：

D_r —预测点处辐射空气吸收剂量率，mGy/h；

D_l —X 射线在 1m 处的辐射空气吸收剂量率，mGy/h；

B —屏蔽材料对 X 射线束的减弱因子；

R —预测点距 X 射线源的距离，m。

B、预测结果分析

根据NCRP147报告，患者和接收器对初始线束的减弱倍数为10到100倍，考虑最不利影响，患者和接收器对初始线束的减弱倍数取10倍，则主射方向照射量率取主射线束的10%。将相关参数带入式（11-17）中，进行各关注点年有效剂量预测，预测点年剂量估算结果见表11-35。

表 11-28 介入手术室内射线装置主束方向关注点处空气比释动能率

关注点位描述		与辐射源最近距离 (m)	屏蔽材料与厚度 (mm)	屏蔽透射因子	关注点空气比释动能率 (μGy/h)
正上方三层临检大厅、办公区、采血区等（地面 0.5m 处）	透视	3.3	400mm 厚混凝土	2.8E-09	2.5E-04
	拍片	3.3	400mm 厚混凝土	1.0E-08	2.7E-02

由上表可知，在 DSA 部分曝光时，介入手术室主射方向最大辐射剂量率为 $2.7 \times 10^{-2} \mu\text{Gy/h}$ ，均满足本次评价确定的屏蔽体外关注点处不超过 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 的要求。

⑤介入手术室内关注点处辐射剂量率

根据建设单位提供资料，介入手术室内手术过程中，辐射工作人员在手术室内开展

手术时，DSA 部分仅进行透视模式曝光。因此，介入手术室内关注点位仅考虑 DSA 透视的情景。病人体表散射辐射剂量率通过下式进行计算：

$$H_s = \frac{H_0 \cdot \alpha \cdot B \cdot (s/400)}{(d_0 \cdot d_s)^2} \dots\dots\dots \text{式 (11-18)}$$

式中：

H_s —预测点处的散射剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

H_0 —靶 1m 处的剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

α —患者对 X 射线的散射比；根据《辐射防护手册》（第一分册）表 10.1 查表取得， 1.3×10^{-3} （ 90° 散射）；

s —散射面积， cm^2 ，取 100cm^2 ；

d_0 —源与病人的距离，m，取 1m；

d_s —关注点（病人）与预测点的距离，m；

B —非有用（散射）屏蔽透射因子。

手术室内的医护人员同时还受到漏射线的影响，各关注点处的泄漏辐射剂量率可采用下式进行计算：

$$H_{\text{漏}} = \frac{H_L \cdot B}{R^2} \dots\dots\dots \text{式 (11-19)}$$

式中：

$H_{\text{漏}}$ —预测点处的泄漏剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

H_L —距靶点 1m 处的最大漏射剂量率，根据 GB 9706.103-2020 中“X 射线管组件和 X 射线源组件在加载状态下的泄漏辐射，当其在相当于基准加载条件下以标称 X 射线管电压运行时，距焦点 1m 处，1 小时内在任一 100cm^2 区域(主要线性尺寸不大于 20cm)的空气比释动能不应超过 1.0mGy ”。本项目射线装置在 1m 处泄漏射线的空气比释动能率保守取 $1000\mu\text{Gy/h}$ ；

R —靶点距关注点的距离，m；

B —保守按照有用（主射束）屏蔽透射因子进行取值。

将各参数带入上式后，得到手术室内各关注点处最大空气比释动能率如下。

在介入手术室内开展介入手术时，介入手术室周围最大辐射剂量率为 $5.3 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ ，能够满足本次评价确定的屏蔽体外关注点处不超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

⑦各关注点处保护目标年最大辐射剂量预测分析

个人年最大有效剂量估算公式如下：

$$E = H \cdot t \cdot T \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots \text{式 (11-20)}$$

式中：

E —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。

根据计算可知，二层核素治疗区介入手术相关职业人员所受年剂量最大为4.20mSv/a，周围公众所受年剂量最大为 $4.9 \times 10^{-2} \text{ mSv/a}$ 。

⑧医生腕部皮肤受照剂量

A、射线装置导致皮肤受照剂量

医生介入手术操作时，会穿连体铅衣、戴介入防护手套、铅防护眼镜、铅橡胶颈套等防护用品，通常站立于介入治疗病床侧面，面对病患，受到散射和漏射线束照射，由于手术过程中手术医生随时在活动，其腕部不会一直处于受照射位置不动，分以下两种情况进行保守预测：①在透视时，有 1/5 时间手术医生在受照位置进行插入导管等操作，此时医生腕部受铅防护手套（0.025mmPb）保护，未受到铅悬挂防护屏的保护；②在透视时，4/5 时间内手术医生在手术床侧的其他位置，此时腕部未处于受照位置，腕部受到铅防护手套（0.025mmPb）和铅悬挂防护屏（0.5mmPb）的保护。在透视操作时，同时受到注射核素的剂量贡献。

本项目采用理论预测分析介入手术医生腕部所受到的皮肤剂量，减弱因子参照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）公式 C.1 以及附录表 C.2，则手术时医生腕部所受的最大辐射剂量率见下表：

表 11-29 本项目介入手术医生腕部最大辐射剂量率

关注点部位	射线源距关注点的距离（m）	屏蔽材料及厚度	屏蔽材料折合铅当量（mmPb）	减弱因子	散射辐射剂量率（ $\mu\text{Gy/h}$ ）	漏射辐射剂量率（ $\mu\text{Gy/h}$ ）	综合剂量率（ $\mu\text{Gy/h}$ ）
医生腕部	0.5	0.025mmPb 铅手套	0.025	6.3E-01	7.8E+03	2.5E+03	1.0E+04
		0.025mmPb 铅手套+0.5mmPb 铅悬挂防护屏	0.525	2.3E-02	2.8E+02	9.1E+01	3.7E+02

手术医生在介入手术室内进行手术操作时，手术医生腕部距离辐射源（非主射束方

向)最近,因 X 射线随着距离的增加呈现衰减趋势,故以手术医生腕部剂量估算结果进行核算医护人员皮肤照射年剂量,根据《电离辐射所致皮肤剂量估算方法》(GBZ/T244-2017)中的公式估算介入手术人员最大年皮肤吸收剂量:

$$D_s = C_{ks}(\dot{k} \cdot t) \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots \text{式 (11-21)}$$

$$\dot{k} = \frac{\dot{H}_{(10)}^*}{C_{KH}} \dots\dots\dots \text{式 (11-22)}$$

式中: D_s —皮肤吸收剂量, mGy;

\dot{k} —X 辐射场的空气比释动能率, $\mu\text{Gy/h}$;

C_{ks} —空气比释动能到皮肤吸收剂量的转化系数 (Gy/Gy) ;

t —人员累积受照时间, h;

$\dot{H}_{(10)}^*$ —X 辐射场的周围剂量当量率, $\mu\text{Sv/h}$;

C_{KH} —空气比释动能到周围剂量当量的转化系数 (Sv/Gy) 。

理论计算: 根据介入手术类型分配情况,放射性介入手术医生透视模式下年受照时间最长为 66.7h,非放射性介入手术医生模式下年最长受照为 75h。本次保守按照非放射性手术医生在透视模式下手术,并开展核素介入治疗进行考虑。

根据上述分析有如下两种情况:①手术医生在透视时预计有 1/5 时间在受照位置进行插入导管等操作,此时受照时间为 15h ($75\text{h} \times 1/5$),根据表 11-40 分析,腕部位置处的剂量当量率为 $1.0 \times 10^4 \mu\text{Gy/h}$;②手术医生在透视时预计有 4/5 时间在非受照位置进行手术操作时,此时受照时间为 60h ($75\text{h} \times 4/5$),根据表 11-40 分析,腕部位置处的剂量当量率为 $9.0 \times 10^2 \mu\text{Gy/h}$ 。

本项目 DSA 可近似地视为垂直入射,而且是 AP 入射方式。从表 A.9 可查得 X 辐射场空气比释动能到周围剂量当量的转化系数 $C_{KH} = 1.72\text{Sv/Gy}$,由式 (11-21) 计算出手术医生在上述两种受照情况下辐射场的空气比释动能分别为 $6.0 \times 10^3 \mu\text{Gy/h}$ 、 $2.2 \times 10^2 \mu\text{Gy/h}$ 。从表 A.4 可查出空气比释动能到皮肤吸收剂量的转换系数

$C_{KS}=1.134\text{mGy/mGy}$ 。根据式（11-22），手术医生在受照位置进行插入导管等操作时，医生手术位腕部皮肤受照当量剂量为 102.1mGy/a ，手术医生在非受照位置进行手术操作时，医生手术位腕部皮肤受照当量剂量为 14.8mSv/a ，手术医生腕部皮肤受照当量剂量叠加后为 116.9mSv/a ，则每名手术医生腕部皮肤受照当量剂量为 70.1mSv/a （考虑 1.2 倍不平均分配系数）。

B、放射性核素导致皮肤受照剂量

根据上文计算可得到，在核素注射过程中，医生手部距离注射器 0.2m 处最大辐射剂量率为 $960\mu\text{Sv/h}$ （不考虑韧致辐射），医生透视模式下进行核素注射操作每年最多 66.7h ，则手术医生腕部皮肤受放射性核素产生的 γ 射线剂量为 64.0mSv/a ，则每名手术医生腕部皮肤受照当量剂量为 19.2mSv/a （考虑 1.2 倍不平均分配系数）。

C、手术医生皮肤综合受照剂量

手术医生在介入手术室手术期间，同时受到放射性核素的影响，经过叠加后，手术医生皮肤最大受照剂量为 89.3mGy/a ，未超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 4.3.2.1 条“对任何工作人员，四肢（手/足）或皮肤的年当量剂量不超过 500mSv ”，满足本项目对于放射工作人员四肢（手和足）或皮肤当量剂量通常管理限值，即不超过 150mSv 的要求。

医院应严格落实辐射安全防护的各项规章制度，所有介入手术室内的医护人员均应按辐射工作人员进行管理，医护人员应按要求使用防护用品并严格遵守操作规程。对病人病灶进行照射时，应将病人病灶以外部位用铅橡胶布进行遮盖或穿着铅服，以避免病人受到不必要的照射。

4、核医学工作场所及周围保护目标年最大受照剂量分析

（1）工作负荷及受照时间分析

1) 负二层核医学科制药

①回旋加速器制药

工作人员将靶材料送至机房内，设置相关参数后，回旋加速器自动进行打靶生产放射性药品，每种核素每天最多打靶 2 次，每天最多打靶 3h。

②回旋加速器机房巡检

医院回旋加速器的气体靶、液体靶和固体靶均采用自动传输，不需要进行人工换靶，设备检修均有生产厂家进行操作，医院每月仅需对机房进行一次巡检，且巡检时机房至

少停机 12h，机房内已无气态感生放射性，但由于设备采用自屏蔽设计，因此人员进入机房内会受回旋加速器产生的固态感生放射性影响，根据《辐射防护手册》（三分册）P111：“一台回旋加速器停机 12h 后靶头表面因活化产生 γ 照射量率约为 1.6R/h”（ γ 辐射剂量当量率=8.73×1.6mGy/h=14.0mGy/h（14000 μ Gy/h），每次巡检时间约 1min，年巡检时间约 12min。

③核素合成、分装操作

每天进入固体靶室设置相关参数、药物制备完成后，放射性药物通过地下沟管进入热室，工作人员为合成和分装模块中设置相应参数后，设备自动运行。药物分别进入合成、分装模块中进行合成和分装，每次约 5min，每天最多 10min。

④放射性药物转移、质控

热室合成分装结束后，工作人员进入热室用滴管/试管取出少量药物，交给放化实验室的工作人员，每次约 3min，每天最多 6min；质控人员取药在放化实验室通风橱/生物安全柜中进行质控，每种核素每次质控时间约 15min，每天最多 30min；工作人员使用长柄转运小推车进行药物转运，转运时间取 3min，每天最多 6min；接收室每天最多接收 15 个放射性物质货包，每个货包近距离接触最多 2min，每天最多 30min。

2) 负一层核素诊断区

①PET诊断项目

根据药物的使用方法和医患规划路径，医护人员一般不会长时间近距离接触 PET-CT/MRI核素诊断患者，但在扫描时医护人员会近距离接触服药后患者并协助摆位，因此，职业照射估算分析保守按照患者注射核素后对工作人员的辐射影响。

工作负荷及计算参数：医护人员在分装注射室内对放射性核素 ^{68}Ga 进行淋洗、标记、质控等操作，每天最多1次，每天最多30min；医护人员在手套箱内，将核素从铅罐中取出，再为患者分装、标记药物按照一次1min/人进行考虑，每天最多42min；放射性核素从手套箱转移至注射窗口/核素洁梯，保守按照每例30s，最多34例，每天最多17min；护士注射药物均在注射窗进行，每次注射用时约30s，每天最多21min；患者在接受药物注射后听到广播通知后进入PET-CT或PET-MRI室扫描，护士协助摆位，摆位时间每次约1min，每天最多42min；然后技师隔室扫描检查，平均每次扫描时长约25min；危急情况下医生需对患者进行抢救，每次抢救时长约20min，每年最多10次。

②SPECT诊断项目

根据药物的使用方法和医患路径，医护人员一般不会长时间接触SPECT-CT诊断患者，但在扫描时医护人员会近距离接触服药患者并协助摆位，因此职业照射估算分析按照患者注射 ^{99m}Tc 对工作人员的辐射影响。

工作负荷及计算参数：医护人员在手套箱内对放射性核素 ^{99m}Tc 淋洗、标记、质控检测等操作，每天最多1次，每天最多30min；放射性核素从手套箱转移至注射窗口/核素洁梯，保守按照每例30s，最多22例，每天最多11min；SPECT-CT诊断显影、二层核素治疗区 ^{90}Y 微球介入治疗使用的核素 ^{99m}Tc 在手套箱中分装操作，按照单份1min计，每天最多11min；护士注射药物每次注射用时约30s，每天最多10min；患者在接受药物注射后接到广播通知进入SPECT-CT室扫描，护士辅助下进行摆位，摆位时间每次约1min，每天最多20min；危急情况下需对患者进行抢救，每次抢救时长约20min，每年最多10次。

3) 二层核素治疗区

① ^{188}Re 介入注射治疗

工作负荷及计算参数：购得的 ^{188}Re 核素在分装给药室手套箱内进行 ^{188}Re 标记的靶向性探针等操作，每次近距离接触最多5min，每天最多10min；患者接受注射治疗后，由医护人员将患者转移到隔离病房内进行隔离治疗，每天最多转运2次，每次最多3min，每天最多6min；注射治疗后48小时内，护士陪同患者到负一层核素诊断区进行SPECT显像，每天最多2次，近距离接近患者每次最多5min，每天最多10min。

② ^{90}Y 微球介入治疗

工作负荷及计算参数：第一阶段患者接受 ^{99m}Tc 核素注射治疗后，由医护人员将患者转移到隔离病房内进行留观等候，每天最多转运2次，每次最多5min，每天最多10min；注射治疗后1小时内，护士陪同患者到负一层核素诊断区进行SPECT显像，每天最多2次，近距离接近患者每次最多5min，每天最多10min。第二阶段医护人员在手套箱内对购得的盛有 ^{90}Y 微球的容器进行摇晃、测活、配制等操作，每天最多2次，每次最多10min，每天最多20min；患者接受 ^{90}Y 微球注射治疗后，由医护人员将患者转移到隔离病房内进行留观等候，每天最多转运2次，每次最多3min，每天最多6min；注射治疗后1小时内，护士陪同患者到负一层核素诊断区进行SPECT显像，每天最多2次，近距离接近患者每次最多5min，每天最多10min。

③ ^{125}I 粒籽源、 ^{103}Pd 种子源 植入治疗

工作负荷及计算参数：购得的 ^{125}I 粒籽源、 ^{103}Pd 种子源后，在分装给药室手套箱内进行质检、消毒等操作，每次近距离接触最多 2min，每天最多 4 次，每天最多 8min；患者接受注射治疗后，由医护人员将患者转移到隔离病房内进行隔离治疗，每天最多转运 4 次，每次最多 3min，每天最多 12min。

④敷贴治疗项目

工作负荷及计算参数：敷贴治疗使用 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器，不产生韧致辐射，也不产生 γ 射线，对职业人员和公众的影响可以忽略不计。

⑤甲吸检测项目

工作负荷及计算参数：医院采购已分装好的 ^{131}I 核素，由医生取药后供患者口服，医生取药、患者服药时间分别按照每例 30s 计，最多 10 名患者，每天最多 10min。甲吸检测患者在甲吸室服药后，如无异常情况，可以离开医院，按照医护人员要求回到甲吸室进行甲状腺功能检测，每名患者最多 4 次，每次检测约 1min，每天最多 40min。

⑥ ^{89}Sr 治疗骨转移治疗项目

工作负荷及计算参数：医院采购的骨转移治疗 ^{89}Sr 核素在分装给药室手套箱内进行手动分装，每次分装、标记等操作最多 2min，每天最多 4min；患者在护士站登记后，经过专用患者通道在病房走道通过注射/给药窗口为患者注射药物，每例最多 30s，每天最多 1min。

⑦其他核素治疗项目

工作负荷及计算参数：医院采购的 ^{225}Ac 、 ^{223}Ra 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 核素在分装给药室手套箱内进行手动分装，每次分装、标记等操作最多 2min，每天最多 16min；患者在护士站登记后，经过专用患者通道在病房走道通过注射/给药窗口为患者注射药物，每例最多 30s，每天最多 4min。

4) 三层核素治疗区

① ^{131}I 甲亢治疗项目

工作负荷及计算参数：医院采购的 ^{131}I 药品在分装给药室手套箱内进行手动分装，每份分装最多 1min，每天最多分装 5 份，每天最多 5min；药物分装完成后通过给药窗递给患者服药，药物传递给患者服用最多 30s，每天最多 2.5min。

② ^{177}Lu 前列腺癌治疗

工作负荷及计算参数：医护人员在手套箱内，将核素从铅罐中取出，再为患者分装、

标记药物按照一次 1min/人进行考虑，每天最多 1min；护士转移药物到注射窗/病房进行注射，平均每天最多 1min；患者接受核素注射后进入隔离病房内进行一定时间的住院观察，如无异常情况，达到出院标准后离开医院；危急情况下需对患者进行抢救，医生每天需查房了解患者情况。

③¹³¹I 甲癌治疗

工作负荷及计算参数：甲癌患者使用的 ¹³¹I 核素不涉及手动分装，均采用自动分装柜自动分装，患者自取药物服用，服用后进入隔离病房接受隔离治疗；患者接受核素注射后进入隔离病房内进行一定时间的住院观察，如无异常情况，达到出院标准后离开医院；危急情况下需对患者进行抢救，医生每天需查房了解患者情况。

5) 小结

根据上述分析，核医学工作场所内辐射工作人员年最大工作负荷见下表。

表 11-30 核医学工作场所内辐射工作人员工作负荷一览表

工作场所	工作内容	操作内容	操作时间	年最大操作时间(h)	人员配备	主要受照射线
负二层核素制备区						
回旋加速器控制室	制药	打靶制药	每天最多打靶3h	750	2人	中子、γ射线
回旋加速器机房	巡检	回旋加速器机房巡检	每年最多12min	0.2		
热室（热室后区、热室前区）	药物合成、分装	药物合成、分装	每天最多10min	41.7	3人	γ射线、韧致辐射
	质控取药	滴管/试管取出药物，传递到放化实验室	每天最多6min	25		γ射线
核素通道	转运	药物转运	每天最多6min	25		γ射线、韧致辐射
放化实验室	质控	质控、阳性对照、内毒检测等	每天最多30min	125	2人	γ射线、韧致辐射
接收室	接收	外购放射性物质接收、传递等	每天最多30min	125	1人	γ射线
负一层核素诊断区						
分装注射室	核素取用	核素从源库取出，并转移到手套箱内	每天最多4次，每次最多2min，每天最多8min	33.3	2人	γ射线
		PET核素从手套箱转移到注射窗口	每天最多17min	70.8		
		SPECT核素从手套箱转移到注射窗口	每天最多11min	45.8		
	淋洗制备	PET使用 ⁶⁸ Ga淋洗制	每天最多6min	25		γ射线、韧致

		药				辐射
		SPECT使用 ^{99m} Tc淋洗制药	每天最多11min	45.8		
	分装标记	PET药物分装、标记、	每天最多42min	175		γ射线、韧致辐射
		SPECT药物分装、标记等	每天最多30min	125		
	注射给药	PET药物注射	每天最多21min	87.5		γ射线
		SPECT药物注射	每天最多10min	41.7		
PET-CT/MRI控制室	扫描	技师在控制室操纵设备进行扫描	每天最多8h	2000	1人	X射线、γ射线
PET-CT/MRI机房	摆位	指导患者进行正确的位置	每天最多42min	175	3人	γ射线
SPECT-CT控制室	扫描	技师在控制室操纵设备进行扫描	每天最多8h	2000	1人	X射线、γ射线
SPECT-CT机房	摆位	指导患者进行正确的位置	每天最多20min	83.3	1人	γ射线
抢救治疗	患者抢救	PET患者危急情况抢救	每年最多200min	3.3	3人	γ射线
		SPECT患者危急情况抢救	每年最多200min	3.3		
二层核素治疗区						
分装给药室	核素取用	核素从源库取出，并转移到手套箱/自动分装柜内	每天最多8次，每次最多1min，每天最多8min	33.3	2人	γ射线
		核素从手套箱/自动分装柜转移到注射窗/介入手术室	每天最多20次，每次最多1min，每天最多20min	83.3		
	药物制备	¹⁸⁸ Re标记的靶向性探针等	每天最多10min	41.7		γ射线、韧致辐射
		⁹⁰ Y微球的摇晃、测活、配制等	每天最多20min	83.3		
	手套箱操作	¹²⁵ I _{粒籽源} 、 ¹⁰³ Pd _{种子源} 质检、消毒等	每天最多8min	33.3		γ射线
		⁸⁹ Sr核素分装、标记等	每天最多4min	16.7		韧致辐射
		²²⁵ Ac、 ²²³ Ra、 ¹⁵³ Sm、 ¹⁸⁶ Re核素分装、标记等	每天最多16min	66.7		γ射线、韧致辐射
	患者给药	⁸⁹ Sr核素注射	每天最多1min	4.2		韧致辐射
		²²⁵ Ac、 ²²³ Ra、 ¹⁵³ Sm、 ¹⁸⁶ Re核素给药	每天最多4min	16.7		γ射线

患者走道	患者转移至病房	^{188}Re 治疗患者转移	每天最多6min	41.7	4人	γ 射线、韧致辐射
		^{90}Y 微球治疗患者转移	每天最多6min	41.7		韧致辐射
		^{125}I 籽源、 ^{103}Pd 种子源治疗患者转移	每天最多12min	50		γ 射线
	患者核素显像转移	^{188}Re 治疗患者转移	每天最多10min	41.7		γ 射线、韧致辐射
		^{90}Y 微球治疗患者转移	每天最多10min	41.7		韧致辐射
抢救治疗	患者抢救	患者危急情况抢救	每年最多200min	3.3	4人	γ 射线、韧致辐射
医生查房	病房巡查	对病房内患者情况进行巡查	每年最多200min	3.3		
甲吸检测	给药	取药、患者服药	每天最多10min	41.7	1人	γ 射线
	检测	患者吸碘检测	每天最多40min	166.7		γ 射线

三层核素治疗区

分装配药室	核素取用	核素从源库取出,并转移到手套箱/自动分装柜内	每天最多3次,每次最多1min,每天最多3min	12.5	3人	γ 射线、韧致辐射
		核素从手套箱转移到给药窗	每天最多6次,每次最多30s,每天最多3min	12.5		
	药物分装	药物分装	每天最多5min	20.8		γ 射线、韧致辐射
	给药	为患者传递、注射药物、指导患者服药等	每天最多3.5min	14.6		γ 射线
抢救治疗	抢救	患者危急情况抢救	每年最多200min	3.3	3人	γ 射线
治疗查房	查房	对患者情况进行巡查	每年最多200min	3.3		γ 射线

(4) 核医学工作场所内核素操作致保护目标受照剂量分析

表 11-31 核医学工作场所内操作核素所致辐射工作人员年有效剂量估算

工作场所	工作内容	操作内容	年最大操作时间 (h)	关注点最大(γ 、中子)辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	关注点处韧致辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	年最大辐射剂量(mSv/a)	单人年最大有效剂量(mSv/a)	人员配备
负二层核医学制药								
回旋加速器控制室	制药	打靶制药	750	2.6E-01	/	2.0E-01	1.8E+00	2人
回旋加速	巡检	回旋加速器机房巡检	0.2	1.4E+04	/	2.8E+00		

器机房								
热室（热室后区、热室前区）	药物合成、分装	药物合成、分装	41.7	7.5E-01	2.7E-28	3.1E-02	4.4E-02	3人
	质控取药	滴管/试管取出药物，传递到放化实验室	25	2.1E+00	/	5.3E-02		
	核素通道	转运	药物转运	25	1.1E+00	/		
放化实验室	质控	质控、阳性对照、内毒检测等	125	5.5E+00	5.3E-02	6.9E-01	4.2E-01	2人
接收室	接收	外购放射性物质接收、传递等	125	2.0E+00	/	2.4E-01	2.4E-01	1人
负一层核素诊断区								
分装注射室	核素取用	核素从源库取出，并转移到手套箱内	33.3	2.0E+00	/	6.5E-02	3.1E-01	2人轮岗
		PET核素从手套箱转移到注射窗口	70.8	4.4E+00	/	3.1E-01		
		SPECT核素从手套箱转移到注射窗口	45.8	4.2E-05		1.9E-06		
	淋洗制备	PET使用 ⁶⁸ Ga淋洗制药	25	8.1E-02	1.0E-02	2.3E-03		
		SPECT使用 ^{99m} Tc淋洗制药	45.8	2.0E-05	/	9.0E-07		
	分装标记	PET药物分装、标记、	175	6.0E-01	7.8E-02	1.2E-01		
		SPECT药物分装、标记等	125	1.6E-07	/	2.0E-08		
	注射给药	PET药物注射	87.5	3.2E-01	/	2.8E-02		
		SPECT药物注射	41.7	3.5E-19	/	1.5E-20		
PET-CT/MRI控制室	扫描	技师在控制室操纵设备进行扫描	2000	2.2E-01	/	4.3E-01	4.3E-01	1人
PET-CT/MRI机房	摆位	指导患者进行正确的位置	175	3.2E+01	/	5.6E+00	2.2E+00	3人轮岗
SPECT-CT控制室	扫描	技师在控制室操纵设备进行扫描	2000	5.4E-03	/	1.1E-02	1.1E-02	1人
SPECT-CT机房	摆位	指导患者进行正确的位置	83.3	4.8E+00	/	4.0E-01	4.0E-01	1人
抢救治疗	患者抢救	PET患者危急情况抢救	3.3	1.3E+02	/	4.2E-01	1.8E-01	3人轮岗
		SPECT患者危急情况抢救	3.3	4.8E+00	/	1.6E-02		
二层核素治疗区								

分装给药室	核素取用	核素从源库取出, 并转移到手套箱/自动分装柜内	33.3	2.0E+00	/	6.5E-02	1.4E-01	2 人 (不 进行 分 配)
		核素从手套箱/自动分装柜转移到注射窗/介入手术室	83.3	3.6E-02	/	3.0E-03		
	药物制备	¹⁸⁸ Re标记的靶向性探针等	41.7	2.3E-03	4.7E-01	2.0E-02		
		⁹⁰ Y微球的摇晃、测活、配制等	83.3	/	1.3E-01	1.1E-02		
	手套箱操作	¹²⁵ I _{粒籽源} 、 ¹⁰³ Pd _{种子源} 质 检、消毒等	33.3	2.3E-03	/	7.6E-05		
		⁸⁹ Sr核素分装、标记等	16.7	/	1.3E-01	2.2E-03		
		²²⁵ Ac、 ²²³ Ra、 ¹⁵³ Sm、 ¹⁸⁶ Re核素分装、标记等	66.7	2.3E-03	4.7E-01	3.2E-02		
	患者给药	⁸⁹ Sr核素注射	4.2	/	9.6E-01	4.0E-03		
²²⁵ Ac、 ²²³ Ra、 ¹⁵³ Sm、 ¹⁸⁶ Re核素给药		16.7	2.3E-03	1.1E-01	1.8E-03			
患者走道	患者转移至病房	¹⁸⁸ Re治疗患者转移	41.7	5.0E+01	3.5E+00	2.2E+00	1.4E+00	4 人 轮岗
		⁹⁰ Y微球治疗患者转移	41.7	/	1.1E+00	4.5E-02		
		¹²⁵ I _{粒籽源} 、 ¹⁰³ Pd _{种子源} 治疗患者转移	50	5.0E+01	/	2.5E+00		
	患者核素显像转移	¹⁸⁸ Re治疗患者转移	41.7	5.0E+01	3.5E+00	2.2E+00	6.9E-01	
		⁹⁰ Y微球治疗患者转移	41.7	/	1.1E+00	4.5E-02		
抢救治疗	患者抢救	患者危急情况抢救	3.3	5.5E+02	5.3E+00	1.8E+00	6.1E-01	4 人 轮岗
医生查房	病房巡查	对病房内患者情况进行巡查	3.3	5.0E+01	5.3E+00	1.9E-01		
甲吸检测	给药	取药、患者服药	41.7	8.8E-02	/	3.7E-03	1.8E-02	1 人
	检测	患者吸碘检测	166.7	8.8E-02	/	1.5E-02		
三层核素治疗区								
分装配药室	核素取用	核素从源库取出, 并转移到手套箱/自动分装柜内	12.5	2.0E+00	/	2.4E-02	4.6E-02	2 人 轮岗
		核素从手套箱转移到给药窗	12.5	1.3E+00	/	1.7E-02		
	物分装	药物分装	20.8	1.6E+00	5.3E-02	3.5E-02		
	给药	为患者传递、注射药	14.6	7.9E-03	/	1.2E-04		

		物、指导患者服药等						
抢救治疗	抢救	患者危急情况抢救	3.3	1.2E+03	/	4.0E+00	2.0E+00	3 人 轮岗
治疗查房	查房	对患者情况进行巡查	3.3	3.0E+02	/	9.9E-01		

注：上表中，对有多名医护人员轮岗时，均按平均操作时间的1.2倍进行考虑。

根据上表可知，在放射性核素制备、操作过程中，负二层核医学制药区职业人员年最大受照剂量为1.8mSv/a；负一层核素诊断区内职业人员年最大受照剂量为2.2mSv/a；二层核素治疗区内职业人员年最大受照剂量为1.4mSv/a；三层核素治疗区职业人员年最大受照剂量为2.0mSv/a，因此，本项目各核医学科工作场所内职业人员进行核素操作时，年最大受照剂量均满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中规定的“一般情况下，职业照射的剂量约束值不超过5mSv/a”要求。

（5）核医学工作场所致保护目标受照剂量分析

在本次评价范围内，存在III类射线装置机房，如负二层放疗中心模拟CT室，负一层SPECT-CT室、PET-CT室，一层CT室、DR室、骨密度室等，设计屏蔽效能均大于GBZ130-2020的相关规定，根据类似射线装置机房现状监测数据，射线装置产生的X射线经设备机房墙体、门窗屏蔽后，对机房周围的公众影响可忽略不计，因此本次评价不进行叠加分析。根据辐射剂量率与距离的平方成反比的规律，计算可得距离关注点处最近保护目标的年有效剂量，可代表同一方位距离更远的保护目标为公众的年有效剂量，详见下表。

表 11-32 核医学工作场所致保护目标年最大受照剂量

保护目标位置		最近主要参考点位置	参考点辐射剂量率 (μSv/h)	与关注点最近距离 (m)	衰减后剂量率 (μSv/h)	居留因子	受照时间 (h)	各分项年最大有效剂量 (mSv)	综合年最大有效剂量 (mSv)	保护目标类型
负二层核医学制药区	回旋加速器控制室	PET 检后休息室正下方	2.2E-01	/	2.2E-01	1	2000	4.5E-01	9.7E-01	职业人员
		回旋加速器机房西侧墙体外 30cm 处	2.6E-01		2.6E-01	1	2000	5.3E-01		
	热室（包含热室后区、热室前区）	回旋加速器机房南侧墙体外 30cm 处	1.6E-01	2.4	2.5E-03	1	2000	4.9E-03	1.9E-01	职业人员
		放化实验室西侧墙体外 30cm 处	1.6E-02	/	1.6E-02	1	2000	3.2E-02		
		VIP PET 给药后候诊室正下方	7.5E-02	/	7.5E-02	1	2000	1.5E-01		
	放化实验室	回旋加速器机房南侧墙体外 30cm 处	1.6E-01	/	1.6E-01	1	2000	3.2E-01	3.5E-01	职业人员
SPECT 给药后候诊		1.6E-02	/	1.6E-02	1	2000	3.2E-02			

负一层核素诊断区	接收室	室正下方								
		回旋加速器机房南侧墙体外 30cm 处	1.6E-01	16.5	5.2E-05	1	2000	1.0E-04	1.4E-04	职业人员
		热室南侧墙体外 30cm 处	7.2E-03	13.8	3.4E-06	1	2000	6.8E-06		
		放化实验室南侧墙体外 30cm 处	2.9E-02	13	1.5E-05	1	2000	3.1E-05		
	核医学制药区外西侧地下停车区	回旋加速器机房西侧墙体外 30cm 处	1.5E-01	28.2	1.2E-04	0.05	2000	1.2E-05	1.4E-05	公众
		放化实验室西侧 30cm 处	1.6E-02	10.8	1.2E-05	0.05	2000	1.2E-06		
		热室西侧墙体外 0.3m 处	1.9E-02	16.4	6.5E-06	0.05	2000	6.5E-07		
	核医学制药区南侧地下停车库	回旋加速器机房南侧墙体外 30cm 处	1.6E-01	2.5	3.8E-05	0.05	2000	3.8E-06	5.8E-06	公众
		放化实验室南侧 30cm 处	2.9E-02	13.8	1.4E-05	0.05	2000	1.4E-06		
		热室南侧墙体外 0.3m 处	1.9E-02	16.5	6.3E-06	0.05	2000	6.3E-07		
	核医学制药区东侧放疗中心	回旋加速器机房东侧墙体外 30cm 处	5.2E-02	6.5	1.1E-04	0.25	2000	5.5E-05	3.7E-02	公众
		热室东侧墙体外 0.3m 处	7.2E-03	3.8	4.5E-05	0.25	2000	2.3E-05		
		PET-CT 机房正下方	7.5E-02	/	7.5E-02	0.25	2000	3.7E-02		
	分装注射室	PET 给药后候诊室南侧防护门外 30cm 处	8.0E+00	1.5	3.2E-01	1	2000	6.4E-01	3.3E+00	职业人员
		VIP PET 给药后候诊室南侧防护门外 30cm 处	5.9E-01	1.5	2.4E-02	1	2000	4.7E-02		
		SPECT 给药后候诊室南侧墙体外 30cm 处	3.0E+00	1.5	1.2E-01	1	2000	2.4E-01		
		运动负荷室/抢救室东侧墙体外 30cm 处	6.0E-01	/	6.0E-01	1	2000	1.2E+00		
		源库北侧墙体外 30cm 处 (PET 货包 +SPECT 货包叠加)	5.9E-01	/	5.9E-01	1	2000	1.2E+00		
	负一层核素诊断区内西侧医生办公区	PET 检后休息室西侧墙体外 30cm 处	2.8E-01	2.5	4.0E-03	1	2000	8.0E-03	1.1E-02	公众
		SPECT-CT 室西侧墙体外 30cm 处	8.9E-03	10.3	7.5E-06	1	2000	1.5E-05		
		SPECT 检后休息室北侧墙体外 30cm 处	7.7E-01	6.5	1.6E-03	1	2000	3.3E-03		

	负一层核素诊断区外西侧医护活动区	PET 检后休息室西侧墙体外 30cm 处	2.8E-01	7	5.1E-04	0.05	2000	5.1E-05	1.9E-04	公众
		SPECT-CT 室西侧墙体外 30cm 处	8.9E-03	7	1.6E-05	0.05	2000	1.6E-06		
		SPECT 检后休息室北侧墙体外 30cm 处	7.7E-01	7	1.4E-03	0.05	2000	1.4E-04		
	负一层核素诊断区外南侧停车库	源库南侧墙体外 30cm 处	3.7E-02	3.8	2.3E-04	0.05	2000	2.3E-05	2.1E-04	公众
		分装注射室南侧墙体外 30cm 处 (PET+SPECT 药物操作叠加)	3.1E-01	7	5.6E-04	0.05	2000	5.6E-05		
		运动负荷室/抢救室南侧 30cm 处	9.3E-01	8.1	1.3E-03	0.05	2000	1.3E-04		
	负一层核素诊断区外东侧护士(接待)站、等候区等区域	源库东侧墙体外 30cm 处 (PET 货包+SPECT 货包叠加)	5.7E-02	10.5	4.7E-05	1	2000	9.4E-05	5.7E-03	公众
		分装注射室东侧墙体外 30cm 处 (PET+SPECT 药物操作叠加)	7.2E-02	10.2	6.2E-05	1	2000	1.2E-04		
		PET 给药后候诊室东侧墙体外 30cm 处	3.7E-01	3.5	2.7E-03	1	2000	5.5E-03		
	负一层核素诊断区外东侧电梯厅	源库东侧墙体外 30cm 处 (PET 货包+SPECT 货包叠加)	5.7E-02	4.8	2.2E-04	0.05	2000	2.2E-05	2.8E-04	公众
		分装注射室东侧墙体外 30cm 处 (PET+SPECT 药物操作叠加)	7.2E-02	6.2	1.7E-04	0.05	2000	1.7E-05		
		PET 给药后候诊室南侧墙体外 30cm 处	1.4E+00	7.1	2.5E-03	0.05	2000	2.5E-04		
	负一层控制廊	PET 检后休息室北侧墙体外 30cm 处	7.7E-01	/	7.7E-01	1	2000	1.5E+00	1.6E+00	职业人员
		SPECT-CT 室北侧墙体外 30cm 处	5.4E-03	/	5.4E-03	1	2000	1.1E-02		
	1#医疗综合楼一层放射科内保护目标	负一层 PET 给药后候诊室正上方	1.8E-01	/	1.8E-01	0.25	2000	8.8E-02	1.1E-01	职业人员
		二层隔离病房正下方	4.4E-02	/	4.4E-02	0.25	2000	2.2E-02		
	分装给药室	隔离病房南侧墙体外 30cm 处 (3 间叠加)	4.6E-01	2.6	6.1E-03	1	2000	1.2E-02	4.5E-01	职业人员

二层核素治疗区		留观室东侧墙体外30cm处	1.2E-58	/	1.2E-58	1	2000	2.5E-58		
		介入手术室北侧30cm处	6.5E-02	2	1.5E-03	1	2000	2.9E-03		
		源库北侧墙体外30cm处	6.4E-02	/	6.4E-02	1	2000	1.3E-01		
		分装给药室正下方(PET+SPECT 药物操作叠加)	1.5E-01	/	1.5E-01	1	2000	3.0E-01		
	介入手术室控制室	分装给药室南侧墙体外30cm处	1.8E-02	11.7	1.2E-05	1	2000	2.3E-05	2.7E-05	职业人员
		留观室南侧墙体外30cm处	1.8E-58	6.5	3.8E-61	1	2000	7.6E-61		
		甲吸室北侧墙体外30cm处	4.4E-04	4.8	1.7E-06	1	2000	3.4E-06		
	¹³¹ I 甲吸室、 ⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y 敷贴室	介入手术室南侧30cm处	3.1E-03	/	3.1E-03	1	2000	6.2E-03	6.2E-03	职业人员
	核素治疗区内西侧医生值班、办公区	隔离病房西侧墙体外30cm处	2.8E-01	9.8	2.6E-04	1	2000	5.2E-04	5.2E-04	公众
		留观室西侧墙体外30cm处	1.2E-58	14.9	5.0E-62	1	2000	1.0E-61		
	核素治疗区外西南侧胃肠镜检查区域	病房走道南侧墙体外30cm处	6.7E-01	11.5	4.6E-04	1	2000	9.2E-04	5.3E-03	公众
		留观室南侧墙体外30cm处	1.8E-58	9	2.0E-61	1	2000	3.9E-61		
		介入手术室西侧防护窗外30cm处	4.3E-01	4.2	2.2E-03	1	2000	4.4E-03		
		甲吸室西侧墙体外30cm处	2.2E-03	7.3	3.8E-06	1	2000	7.6E-06		
	核素治疗区外南侧门诊诊疗区	介入手术室南侧墙体外30cm处	3.1E-03	9.1	3.4E-06	0.25	2000	1.7E-06	8.5E-06	公众
		甲吸室南侧防护门外30cm处	6.4E-03	6.5	1.4E-05	0.25	2000	6.9E-06		
	核素治疗区外东南侧护士站及候诊	介入手术室东侧墙体外30cm处	8.6E-03	/	8.6E-03	1	2000	1.7E-02	1.8E-02	公众
		甲吸室东侧墙体外30cm处	4.4E-04	/	4.4E-04	1	2000	8.8E-04		

三层核素治疗区	区									
	核素治疗区外东侧电梯厅等	介入手术室东侧墙体外 30cm 处	8.6E-03	8.2	1.1E-05	0.05	2000	1.1E-06	8.9E-06	公众
		甲吸室东侧墙体外 30cm 处	4.4E-04	8.5	5.5E-07	0.05	2000	5.5E-08		
		源库南侧墙体外 30cm 处	2.9E-02	5.8	7.7E-05	0.05	2000	7.7E-06		
	核素治疗区外东侧卫生间、库房等	隔离病房东侧墙体外 30cm 处	4.3E-01	/	4.3E-01	0.05	2000	4.3E-02	4.3E-02	公众
		分装给药室东侧墙体外 30cm 处	1.3E-05	6.3	3.0E-08	0.05	2000	3.0E-09		
		介入手术室东侧墙体外 30cm 处	8.6E-03	10.5	7.0E-06	0.05	2000	7.0E-07		
	分装给药室	隔离病房南侧墙体外 30cm 处（3 间叠加）	7.4E+00	2.6	9.9E-02	1	2000	2.0E-01	1.4E+00	职业人员
		源库北侧墙体外 30cm 处	5.5E-01	/	5.5E-01	1	2000	1.1E+00		
		分装给药室正上方（PET+SPECT 药物操作叠加）	7.1E-02	/	7.1E-02	1	2000	1.4E-01		
	核素治疗区内西侧医生值班、办公区	隔离病房西侧墙体外 30cm 处	2.8E-01	10	2.5E-04	1	2000	5.0E-04	2.2E-02	公众
		甲亢室西侧墙体外 30cm 处	3.8E-01	1.8	1.1E-02	1	2000	2.1E-02		
	核素治疗区外南侧护士站、候诊、临检大厅、办公区、采血区等	分装给药室南侧墙体外 30cm 处	1.1E-01	2.3	1.9E-03	1	2000	3.8E-03	2.9E-02	公众
		分装给药室南侧墙体外 30cm 处	5.6E-01	3.8	3.5E-03	1	2000	7.0E-03		
		病房走道南侧墙体外 30cm 处	6.0E-01	5.1	2.1E-03	1	2000	4.2E-03		
		源库南侧墙体外 30cm 处	4.8E-02	1	4.3E-03	1	2000	8.6E-03		
		介入手术室正上方	2.7E-03	/	2.7E-03	1	2000	5.4E-03		
	核素治疗区外南侧门诊诊疗区	分装给药室南侧墙体外 30cm 处	1.1E-01	18.7	2.9E-05	0.25	2000	1.4E-05	2.2E-05	公众
		源库南侧墙体外 30cm 处	4.8E-02	16.8	1.5E-05	0.25	2000	7.6E-06		
	核素治	隔离病房南侧墙体	1.8E+00	7.7	2.7E-03	0.05	2000	2.7E-04	3.9E-04	公众

	疗区外 东南侧 电梯厅 等	外 30cm 处（3 间叠 加）								
		源库东侧墙体外 30cm 处	7.5E-02	5.5	2.2E-04	0.05	2000	2.2E-05		
		分装给药室南侧墙 体外 30cm 处	5.6E-01	7.3	9.5E-04	0.05	2000	9.5E-05		
	核素治 疗区外 东侧卫 生间、 库房等	隔离病房东侧墙体 外 30cm 处	2.6E-01	/	2.6E-01	0.05	2000	2.6E-02	2.6E-02	公众
		源库东侧墙体外 30cm 处	7.5E-02	6.8	1.5E-04	0.05	2000	1.5E-05		
		分装给药室北侧墙 体外 30cm 处	3.7E-01	6.1	9.1E-04	0.05	2000	9.1E-05		
四层检测、 实验办公区 内		隔离病房正上方	1.3E-01	/	1.3E-01	0.25	2000	6.6E-02	6.6E-02	公众
在建疾 控中 心	负二层 核医学 制药区	回旋加速器机房南 侧墙体外 30cm 处	1.6E-01	64	3.5E-06	0.25	2000	1.7E-06	3.2E-04	公众
		放化实验室防护门 外 30cm 处	0.0E+00	56	0.0E+00	0.25	2000	0.0E+00		
		热室南侧墙体外 0.3m 处	1.2E-01	59	3.0E-06	0.25	2000	1.5E-06		
	负一层 核素诊 断区	PET 检后休息室南侧 墙体外 30cm 处	1.9E-02	65	4.1E-07	0.25	2000	2.0E-07		
		SPECT 检后休息室 南侧墙体外 30cm 处	7.7E-01	61	1.9E-05	0.25	2000	9.4E-06		
		SPECT 检给药后候 诊室南侧墙体外 30cm 处	1.0E-01	52	3.4E-06	0.25	2000	1.7E-06		
		运动负荷室/抢救室 南侧墙体外 30cm 处	2.6E-01	58	6.9E-06	0.25	2000	3.5E-06		
	二层核 素治疗 区	隔离病房南侧墙体 外 30cm 处（3 间叠 加）	9.3E-01	59	2.4E-05	0.25	2000	1.2E-05		
		留观室南侧墙体外 30cm 处	4.6E-01	56	1.3E-05	0.25	2000	6.6E-06		
		分装给药室南侧墙 体外 30cm 处	1.8E-58	56	5.1E-63	0.25	2000	2.5E-63		
	三层核 素治疗 区	隔离病房南侧防护 门外 30cm 处（3 间 叠加）	5.6E-01	67	1.1E-05	0.25	2000	5.6E-06		
		甲亢室南侧墙体外 30cm 处	1.9E+01	56	5.4E-04	0.25	2000	2.7E-04		
		分装给药室南侧墙	5.5E-01	52	1.8E-05	0.25	2000	9.2E-06		

		体外 30cm 处								
拟建 2# 医疗综合楼	负二层核医学制药区	回旋加速器机房北侧防护门外 30cm 处	5.6E-01	67	1.1E-05	0.25	2000	5.6E-06	6.7E-04	公众
		热室北侧墙体外 30cm 处	1.4E+00	31	1.3E-04	0.25	2000	6.7E-05		
	负一层核素诊断区	PET 检后休息室北侧墙体外 30cm 处	9.2E-03	39	5.4E-07	0.25	2000	2.7E-07		
		SPECT-CT 室北侧墙体外 30cm 处	0.0E+00	53	0.0E+00	0.25	2000	0.0E+00		
		PET-MRI 室北侧防护门外 30cm 处	7.7E-01	31	7.2E-05	0.25	2000	3.6E-05		
		PET-CT 室北侧防护门外 30cm 处	3.0E+00	31	2.8E-04	0.25	2000	1.4E-04		
	二层核素治疗区	隔离病房北侧墙体外 30cm 处（6 间叠加）	2.5E-01	31	2.4E-05	0.25	2000	1.2E-05		
	三层核素治疗区	隔离病房北侧防护窗外 30cm 处（6 间叠加）	3.3E-01	31	3.1E-05	0.25	2000	1.5E-05		
		甲亢室北侧墙体外 30cm 处	2.6E+00	41	1.4E-04	0.25	2000	7.0E-05		

由上表可知，在核医学工作场所内，负二层核医学制药区致场所内辐射工作人员年最大受照剂量为 $9.7 \times 10^{-1} \text{mSv}$ ，周围公众年最大受照剂量为 $3.7 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ；负一层核素诊断区致场所内辐射工作人员年最大受照剂量为 3.3mSv ，周围公众年最大受照剂量为 $1.1 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ；二层核素治疗区致场所内辐射工作人员年最大受照剂量为 $4.5 \times 10^{-1} \text{mSv}$ ，周围公众年最大受照剂量为 $4.3 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ；三层核素治疗区致场所内辐射工作人员年最大受照剂量为 1.4mSv ，周围公众年最大受照剂量为 $6.6 \times 10^{-2} \text{mSv}$ 。

（6）核医学工作场所内及周围保护目标年受照剂量综合分析

在核医学工作场所内，本项目保护目标主要涉及工作场所的辐射剂量贡献、核素操作过程和DSA-CBCT手术贡献剂量三个部分，综合最大辐射剂量见下表。

表11-33 核医学工作场所内及周围保护目标年综合最大受照剂量

保护目标		保护目标年最大受照剂量（mSv）			综合年最大受照剂量（mSv）	保护目标类型
		工作场所	核素操作	DSA-CBCT贡献		
负二层核医学制药区	制药工作人员	9.7E-01	1.7E+00	/	2.7E+00	职业人员
	质检（放化实验室）工作人员	3.5E-01	4.2E-01	/	7.6E-01	
	物料接收人员	1.4E-04	2.4E-01	/	2.4E-01	

	四周公众	3.7E-02	/	/	3.7E-02	公众
负一层核素诊断区	分装注射室内的工作人员	3.3E+00	3.1E-01	/	3.6E+00	职业人员
	扫描、摆位人员	1.6E+00	2.2E+00	/	3.8E+00	
	四周围公众	1.1E-02	/	/	1.1E-02	公众
1#医疗综合楼一层放射科内保护目标		1.1E-01	/	3.9E-02	1.5E-01	职业人员
二层核素治疗区	分装给药室内的工作人员	1.4E-01	1.4E-01	6.2E-02	3.4E-01	职业人员
	DSA-CBCT 介入治疗手术医生	2.7E-05	/	4.8E+00	4.8E+00	
	DSA-CBCT 介入治疗护士	2.7E-05	/	3.1E+00	3.1E+00	
	¹³¹ I 甲吸检测、 ⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y 敷贴治疗工作人员	6.2E-03	1.8E-02	1.3E-02	3.7E-02	
	四周公众	1.8E-02	/	1.8E-02	3.6E-02	公众
三层核素治疗区	分装给药室内的工作人员	1.4E+00	2.0E+00	/	3.5E+00	职业人员
	四周公众	2.9E-02	/	4.9E-02	7.8E-02	公众
正上方四层检测、实验办公区内的人员		6.6E-02	/	/	6.6E-02	公众
在建疾控中心		3.2E-04	/	6.6E-06	3.3E-04	公众
拟建 2#医疗综合楼		6.7E-04	/	4.1E-06	6.7E-04	公众

注：①上表中，DSA-CBCT贡献已考虑核素操作时产生的 γ 射线和韧致辐射的影响；②DSA-CBCT介入治疗手术医生受照剂量=手术室内非放射性手术+手术室内放射性手术+抢救、查房+控制室受照剂量；③DSA-CBCT介入治疗护士受照剂量=手术室内非放射性手术+手术室内放射性手术+控制室+患者转移受照剂量；④三层核素治疗区分装给药室内的工作人员核素操作受照剂量=抢救、查房+分装配药室相关操作受照剂量。

由上表计算可知，本项目核医学工作场所内职业人员受到年综合最大辐射剂量为3.8mSv/a，周围公众受到年最大有效剂量为 7.8×10^{-2} mSv/a，分别满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中规定的“一般情况下，职业照射的剂量约束值不超过5mSv/a，公众照射的剂量约束值不超过0.1mSv/a”的要求。

根据电离辐射水平随着距离的增加而衰减的规律，距离核医学工作场所最近的关注点可以代表最大可能辐射有效剂量，故核医学工作场所评价范围内的其他保护目标受照年剂量也小于本次评价确定的0.1mSv/a的约束值。在实际工作中，核医学工作场所内使用的核素随着时间衰变、且产生的 γ 射线经墙体、门窗屏蔽、距离衰减后，周围保护目标受照剂量远低于预测剂量。

4、 β 表面沾污的防护措施

β 表面沾污的影响主要来源于医护人员操作核素时，放射性物质逸出或飞散在操作台、地板、墙壁、个人防护用品等表面，对职业人员和公众造成辐射影响，因此，为了使本项目非密封放射性物质工作场所的 β 表面污染水平达到 GB18871-2002 规定要求，医院应落实以下措施：

- ①使用、操作放射性同位素的人员应经过培训，具备相应的技能与防护知识；
- ②开瓶、转移、标记、分离纯化等易产生放射性物质逸出或飞散的操作，其操作须在手套箱/通风橱内进行；
- ③操作液体放射性物质应在易去除污染的工作台上放置的托盘内进行，并铺以吸水性好的材料；
- ④吸取液体的操作必须用合适的器具，严禁用口吸取；
- ⑤不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物件操作；
- ⑥放射性操作之后应对工作台、设备、地面及个人防护用品等进行表面污染检查、清洗、去污，工作人员应进行淋浴；
- ⑦放射性药品用后应及时存放在手套箱/通风橱内，需防盗、防水、防火、柜外应有电离辐射标志；
- ⑧做好就诊患者的管理，特别是已服药和注射放射性药品的患者管理工作，严格划定好控制区和监督区，禁止无关人员随处走动。
- ⑨如 β 表面污染水平超过GB18871-2002规定值，医院应立即采取相关措施进行去污，同时辐射工作人员出现手、皮肤、内衣、工作袜等污染情况（超过 $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ）需及时进行去污操作并暂停放射性物质操作评估其受照射剂量，并根据评估结果采取下一步措施（调整工作或接受治疗等）。

5、III类医用射线装置环境影响分析

根据设计方案，医院拟在 1#医疗综合楼负一层核素诊断区 SPECT-CT 室、PET-CT 室内分别使用 1 台III类医用射线装置。其中，SPECT-CT 室四周屏蔽体厚度均为 370mm 厚实心砖墙，屋顶为 300mm 厚混凝土，地面为 800mm 厚混凝土，防护窗为 5mm 铅当量，屏蔽门为 5mm/10mm 铅当量；PET-CT 室四周墙体为 370mm 厚实心砖墙，屋顶和地面均为 300mm 厚混凝土，防护窗为 18mm 铅当量，防护门为 15/10mm 铅当量，设计

屏蔽体防护效能均大于 GBZ130-2020 的相关规定。

SPECT-CT室使用的SPECT-CT、在PET-CT室使用的PET-CT（均属于Ⅲ类射线装置），曝光扫描时将产生X射线，拟建SPECT-CT、PET-CT室四面墙体、顶棚、防护门以及观察窗均采取了辐射屏蔽，充分考虑邻室（含楼上下）及周围场所的人员防护与安全，且屏蔽厚度均高于有用线束和非有用线束铅当量防护厚度标准规定值。从X射线放射诊断场所的屏蔽方面考虑，本项目各检查室的防护设施技术要求满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中相关防护设施的技术要求，即射线装置在正常运行时可满足“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，射线装置工作时对机房外公众和辐射工作人员影响较小。

6、校准用密封源的环境影响分析

PET 核素诊断区拟使用 1 枚 ^{22}Na 校准源或 3 枚 ^{68}Ge 放校准源，均属于 V 类放射源。一般情况下放射源储存在场所东侧的校准源室保险柜内，进行图像质量校准时从校准源室中取出，放置在需要校准的设备上采集信息。放射源处于贮存状态时，贮存容器和校准源室的屏蔽设施能够完全屏蔽 γ 射线的影响。校准状态时，使用所在场所为专门防护的设备机房内，且校准时，源需放置在设备自带屏蔽体内部，对周围环境影响可忽略不计。

校准时间选择在非运营时间，故不会有非相关人员进入。专门负责校准的工作人员穿着铅衣在设备机房内对机器进行校准，且本项目使用的校准源活度较低，因此校准源使用过程中对周围环境影响很小，对工作人员的剂量贡献较低，可忽略不计。

（三）本项目保护目标最大受照剂量综合分析

根据本项目平面布局可知，医院放疗中心、核医学科工作场所距离较近，项目周围保护目标同时受放疗中心和核医学科工作场所的叠加影响。放疗中心与核医学工作场所职业人员相对较远，不考虑剂量叠加。根据前文预测分析，本项目周围各保护目标年最大综合受照剂量见下表。

表 11-34 本项目保护目标年最大受照剂量综合分析

序号	保护目标	辐射剂量贡献（mSv）		最大综合受照剂量（mSv）
		放疗中心	核医学科工作场所	
1	放疗中心辐射工作人员	2.7E-01	/	2.7E-01
2	核医学科辐射工作人员	/	3.8E+00	3.8E+00

3	1#医疗综合楼内的公众	6.9E-04	7.8E-02	7.9E-02
4	在建疾控中心内的公众	4.2E-06	3.3E-04	3.3E-04
5	拟建 2#医疗综合楼内的公众	2.6E-05	6.7E-04	7.0E-04

由上表可知，本项目投入运营后，致辐射工作人员年最大受照剂量为3.8mSv/a，致周围公众年最大受照剂量为 7.9×10^{-2} mSv/a，低于本次环评确定的辐射工作人员职业照射的剂量约束值5mSv/a，公众照射的剂量约束值0.1mSv/a，也低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业人员20mSv/a和公众1mSv/a的剂量限值的规定。

（四）放射性“三废”影响分析

本项目核医学工作场所运营期产生的主要放射性“三废”为工作场所使用非密封放射性同位素过程中产生的放射性废气、放射性废水和放射性固体废物，本项目核医学工作场所拟采取以下针对放射性“三废”的措施。

1、放射性废水

（1）放射性废水管道布置情况

医院拟在负二层核医学制药区（回旋加速器制药区和放化实验室域）、负一层核素诊断区放射性废水产生点分别设置了放射性废水收集管道，管道呈斜度自流设计，收集后的放射性废水进入负二层东侧衰变池区域短半衰期降解池内，经降解池沉淀后，排入紧邻的短半衰期衰变池内进行衰变处置；二层核素治疗区、三层核素治疗区放射性废水产生点均设计了放射性废水收集管道，管道在降板空间呈斜度自流设计，放射性废水管道在配餐室东北角外侧穿过楼板后竖直向下自流入进入长半衰期降解池，经降解沉淀后进入紧邻的长半衰期衰变池。负二层核医学制药区产生的放射性废水主要含 ^{18}F ，以及少量 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr ，来源于制备核素、药物质控等过程产生微量废水（可忽略不计）、工作人员淋浴废水以及场所清洗废水；负一层核素诊断区产生的放射性废水主要含核素 ^{18}F 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，以及少量 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr ，来源于患者注射后候诊过程中的少量排泄废水、工作人员淋浴废水以及场地清洗废水；核医学科二层核素治疗区和三层核素治疗区内产生的放射性废水主要为 ^{131}I 、 ^{177}Lu 、 ^{90}Y 、 ^{188}Re ，来源于住院患者产生排泄废水及场地清洗废水；核医学科二层核素治疗区内紧急去污、质检等过程可能会产生含微量的 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 核素放射性废水（可忽略不计）。

医院应在核医学工作场所按照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的要求，在回旋加速器机房、二级冷水间设放射性废水收集设施，核医学上水处设置洗消装置，在控制区和卫生通过间内的淋浴间、盥洗水盆、清洗池等选用脚踏式或自动感应式的开关。

（2）放射性废水处置

根据设计资料可知，各核医学工作场所产生的放射性废水先排至降解池（污泥池），再通过专用管道排至放射性废水衰变池，待放射性废水暂存至规定时间后通过管道排至建设单位污水处理站处理达标后排入市政管网。

本项目设计的2套专用放射性废水采用专用管道收集，衰变池均采用间歇式衰变的处理方式，同时每个放射性废水衰变池顶部设设计了维修井，在衰变池总排口设计了取样口，便于取样检测。本项目拟建衰变池池底、池壁均为混凝土结构，排水管道的材质为不锈钢材质，其表面光滑、坚固耐酸碱腐蚀、无渗透性，核医学工作场所内的放射性废水管道裸露部分拟采用3~5mmPb的铅皮进行包裹。

1) 拟建衰变池

建设单位拟在1#医疗综合楼内负二层放疗中心直线加速器机房南侧外新建2组衰变池，一组收集负二层核医学制药区和负一层核素诊断区产生的短半衰期 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{68}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素的放射性废物及其他废水，另一组收集二层核医学核素治疗区和三层核素治疗区内产生的含 ^{131}I 、 ^{177}Lu 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{90}Y 、 ^{188}Re 、 ^{186}Re 等核素的放射性废水。短半衰期衰变池组包含2个降解池（1用1备）、3格放射性废水衰变池，每格衰变池有效容积为 96m^3 ，总容量为 288m^3 ；长半衰期衰变池组包含2个降解池（1用1备）、4格放射性废水衰变池，每格衰变池有效容积为 $125\sim 187\text{m}^3$ ，总容量约 575m^3 ，每格衰变池拟安装2台排水水泵（1用1备）、2台进水泵（1用1备）。

建设单位应保证工程质量，衰变池池底和池壁应坚固、耐酸碱腐蚀，放射性衰变池应加以密封，应有防雨、防渗和防漏的措施，确保放射性废水衰变池池底及池身达到重点防渗区的技术要求（等效黏土防渗层 $M_b \geq 6.0\text{m}$ ，渗透系数 $K \leq 1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ ）。

2) 衰变池容量可行性分析

本项目核医学工作场所内产生的放射性废水主要为患者产生的排泄废水和场所清洗废水。根据《综合医院建筑设计规范》（GB 51039-2014），结合《四川省用水定额》（川府函[2021]8号），结合设计文件，医院拟在二层核素治疗区、三层核素治疗区内拟

设2套排水管道，将患者排泄废水与盥洗、沐浴污水分离，本次评价对病房内产生放射性废水的最大用水量保守按照200L/人·床进行考虑，本项目核医学工作场所产生的放射性废水水量估算如下。

表 11-35 核医学工作场所放射性废水产生量核算表

序号	场所	用水类别	最大用水量 (L/人或 L/日)	最大数量 (人/日)	废水排 放系数	最大日产 生量(m ³)	最大处理量 (m ³ /日)	备注
1	负二层 核医学 制药区	沐浴及场所清洗	150	1	0.8	0.12	0.928	进入短半衰 期衰变池
2	负一层 核素诊 断区	核素诊断患者	15	54	0.8	0.648		
		沐浴及场所清洗	200	1	0.8	0.16		
3	二层核 素治疗 区	住院治疗患者	200	6	0.8	0.96	2.38	进入长半衰 期衰变池
		沐浴及场所清洗	300	1	0.8	0.24		
4	三层核 素治疗 区	住院患者	200	6	0.8	0.96		
		非住院治疗患者	15	5	0.8	0.06		
		沐浴及场所清洗	200	1	0.8	0.16		

短半衰期衰变池：负二层核医学制药区和负一层核素诊断区共用 1 组衰变池，最长半衰期核素 ⁸⁹Zr 的半衰期约 3.3 天（78.4h>24h），其他核素半衰期均低于 24h，日废水产生量为 0.928m³，而本项目短半衰期衰变池为 3 格槽式设计，每格衰变池有效容积为 96m³，偏保守考虑，放射性废水待放满第 1 格衰变池起才计算衰变时间，直到放满其余 2 格衰变池，再排放第 1 格衰变池废水，注满 1 格约 104 个工作日，能够满足 HJ1188 中规定“所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期”的要求。

根据设计文件，医院拟将短衰变池池体之间采用排水管道联通，通过电动阀门进行控制，在总排口设有专用取样泵。负一层核素诊断区开展核素 ⁸⁹Zr 显像后，产生的放射性废水经检测，总β不大于 10 Bq/L 后，监测结果经审管部门认可后，排入建设单位污水处理站进行处理后排入市政管网；未开展核素 ⁸⁹Zr 核素显像前，产生的放射性废水经衰变暂存超过 30 天后，可直接排入建设单位污水处理站进行处理。

长半衰期衰变池：二层核素治疗区和三层核素治疗区使用的放射性核素中，¹²⁵I、¹⁰³Pd 为粒子源，植入人体后不产生放射性废水；患者注射 ²²³Ra、²²⁵Ac、⁸⁹Sr、¹⁵³Sm、¹⁸⁶Re 核素前进行排便，留观室内未设计患者卫生间，患者短暂留观后离开核医学工作场所，产生的放射性废水可忽略不计。因此，排入长半衰期衰变池内的放射性废水中所

含核素主要为 ^{131}I 、 ^{177}Lu 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{90}Y 、 ^{188}Re 。二层核素治疗区和三层核素治疗区共用 1 组衰变池，排入衰变池内的放射性废水中最长半衰期核素 ^{131}I 的半衰期约 8.02 天（> 24h）。

二层核素治疗区和三层核素治疗区内放射性废水日产生量约 2.38m^3 ，根据 HJ1188 中 7.3.3.1 规定“含碘-131 核素的暂存超过 180 天”，本次对长半衰期衰变池容量的核算按照超过暂存 180 天进行考虑。根据设计文件，长半衰期衰变池为 4 格槽式设计，衰变池最小容积为 125m^3 ，偏保守考虑，放射性废水首次待放满第 1 格衰变池起才计算衰变时间，直到放满其余 3 格衰变池，再排放第 1 格衰变池废水，注满一格需要约 52.5 个工作日（约 10.5 周），注满 3 格衰变池至少需要 220 个自然日（约 31 周），即第 1 格放射性废水排放前的衰变时长已超过 180 天可满足暂存需求。

根据设计文件，本项目每格衰变池分别设计了 1 个检修井，各衰变池池体通过排水管道联通，在总排口设有专用取样泵，放射性废水在每次排放前，医院应委托有资质的单位采样检测，检测结果应经审管部门认可后才能排入医院内部污水管网进入建设单位污水处理站，并做好排放记录。长半衰期衰变池每 73 天排放 1 次，每次排放活度不得高于《医疗机构水污染物排放标准》中的相关规定。

综上，建设单位提供的衰变池设计的容积能够满足 HJ1188 中规定“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；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）”的要求；短半衰期衰变池、长半衰期衰变池的容积均能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188—2021）中关于“含碘-131 核素的放射性废液暂存超过 180 天，监测结果经审管部门认可后，按照 GB 18871 中 8.6.2 规定方式进行排放”的要求。

（3）放射性废水排放管控措施

在开展 ^{89}Zr 核素显像前，放射性废水在短半衰期衰变池内暂存超过 30 天后，可根据放射性废水排水计划直接排放到建设单位污水处理站处理；根据设计文件，短半衰期衰变池拟设废水在线取样泵，在开展 ^{89}Zr 显像后，放射性废水在短半衰期衰变池内暂存超过 33 天后，每次排放前采用在线取样泵进行取样监测，监测结果符合排放标准经审管部门认可后方可排放。医院应结合放射性废水在衰变池中的储存周期，制定排水计划，按照计划定期将废水排放至建设单位污水处理站进一步处理达标后纳入市政管网。每次排放应做好详细记录所含核素名称、体积、废液产生的起始日期、责任人员、排放时间

和监测结果，设置专门的废水排放台账，台账应有专人管理，存档保存。

2、放射性固废

(1) 放射性固废处理措施

本项目核医学工作场所产生的放射性固废主要为配药、给药过程中产生的一次性注射器、针头、手套、药瓶等医用器具，排风管道及通风橱/合成分装柜内更换的废活性炭过滤器、除碘过滤装置、活性炭过滤装置等。医院拟在核医学科工作场所内各功能房间内拟设置放射性固废收集桶(10mm 铅当量/5mm 铅当量)，用于收集放射性固废，在到达一定量时转入放射性废物暂存库间的放射性废物衰变铅桶/箱(10mm 铅当量/5mm 铅当量)进行暂存衰变。

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021)针对固体放射性废物的收集、贮存和处理，医院应从以下几个方面进行落实：

①固体放射性废物应收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶。废物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物。放射性废物每袋重量不超过 20kg。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至放射性废物暂存间贮存。产生少量放射性废物和利用贮存衰变方式处理放射性废物的单位，经审管部门批准可以将废物暂存在许可的场所和专用容器中。暂存时间和总活度不能超过审管部门批准的限制要求。

②放射性废物贮存场所应安装通风换气装置，放射性废物中含有易挥发放射性核素的通风换气装置应有单独的排风管道。入口处应设置电离辐射警告标志，采取有效的防火、防丢失、防射线泄漏等措施。废物暂存间内应设置专用容器盛放固体放射性废物袋(桶)，不同类别废物应分开存放。容器表面应注明废物所含核素的名称、废物的类别、入库日期等信息，并做好登记记录。废物暂存间内不得存放易燃、易爆、腐蚀性物品。

③对于固体放射性废物暂存时间，所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍；含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天。

④经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。

⑤固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息。

(2) 放射性固体废物处置方案

1) 负二层核医学制药区

本项目负二层核医学制药区产生的放射性固体废物主要为制药过程中产生的废靶部件（膜、片、活化部件等），合成分装、质控过程中产生的放射性固体废物，定期更换的废活性炭等。

①放射性固体废物产生量的核算

a、回旋加速器制药过程

回旋加速器固体靶件（片）可重复使用，靶件（片）在意外损坏需要更换时，由设备厂家进行更换，更换下的废靶部件（膜、片、活化部件等）按放射性固体废物处理，产生量约 10kg/次，每年最多 6 次，按照平均密度 800kg/m^3 核算，则每次产生量为 0.075m^3 （75L）。每次更换下来的放射性固体废物经监测后，在回旋加速器机房/回旋加速器机房东侧放射性废物库内放射性废物衰变桶/箱暂存，达到一定量后交由厂家回收。

b、核素操作过程

合成分装、质控等操作时，产生的操作手套、口罩、棉签、滤纸、清洁去污时用过的抹布等含短半衰期核素的废物，产生量约 50kg/a，按照平均密度 100kg/m^3 核算，则年产生量为 0.5m^3 （500L）。

c、过滤装置滤芯更换

放射性废气过滤装置更换下来的活性炭等滤芯等，约 6 个月更换一次，每次产生量约 100kg，按照颗粒柱状的活性炭密度 500kg/m^3 核算，则废活性炭每年产生量为 0.4m^3 （400L）。

②放射性固体废物管控措施

医院负二层核医学制药区产生的放射性固体废物根据产生的位置，分区、分类收集后，进行衰变贮存。在核医学制药区回旋加速器机房东侧设放射性废物库，净空面积约 3.7m^2 ，在热室前区南侧设放射性废物暂存间，净空面积为 4.1m^2 。医院拟在回旋加速器机房东侧放射性废库内放置 1 个带有万向轮的放射性废物暂存桶（5mmPb），用于暂存回旋加速器产生的放射性固体废物。拟在热室前区、放化实验室内分别放置 1 个带有万向轮的放射性废物暂存桶（5mmPb），在放射性废物暂存间内设置 2 个容积不低于 150L 的放射性废物暂存桶（10mmPb），用于回旋加速器生产过程、核素操作过程中产生的放射性废物暂存衰变，1 个容积不低于 300L 的放射性废物暂存桶（5mmPb），用于过滤装置

滤芯更换产生的废活性炭过滤装置滤芯等。医院应在每日工作结束后，将当日产生的废物分类收集，利用放射性废物暂存桶/箱转移至放射性废物库的废物箱/桶内静置衰变，并注明核素种类、转入时间，做好台账记录。

本项目回旋加速器制药过程中产生的高活性废靶部件（膜、片、活化部件等）为不能解控的放射性固体废物，根据《核医学辐射防护与安全要求》中的规定，不能解控的放射性固体废物由有资质的单位回收，其余放射性固体废物在产生点采用具有专用塑料袋的放射性废物暂存桶收纳后，及时转送至放射性废物库，暂存超过 33 天（ ^{89}Zr 的十倍半衰期），经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 后，作为医疗废物进行处理。

2) 负一层核素诊断区

①放射性固体废物产生量的核算

a、核素操作过程

负一层核素诊断区产生的放射性固体废物主要是工作人员操作过程产生的废注射器、针头、手套、棉签、垫纸、破碎杯皿、擦拭污染物地面的物品以及其他可能受放射性污染的物品等。医院拟在给药区注射位配置 1 个 10mmPb 的专用脚踏式放射性废物暂存桶(放射性废物暂存桶底部带有万向轮)，桶内放置专用塑料袋，对注射器和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，然后再放入塑料袋内，每袋不超过 20kg ，装满后送至放射性废物暂存间。正常情况下，PET 核素诊断、SPECT 药物诊断按照每人每天 0.02kg 产生量进行估算，年产生放射性固体废物约 270kg ，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量为 2.7m^3 （ 2700L ）。

b、发生器淋洗制药

在淋洗制作 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{68}Ga 过程中分别产生的废 ^{99}Mo （ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）、 ^{68}Ge （ ^{68}Ga ），年产生量最多 80 个（ $<400\text{L}$ ），经整備后在放射性废物暂存间内暂存，交由供应商回收处置。

c、过滤装置滤芯更换

放射性废气过滤装置更换下来的滤芯，约 6 个月更换一次，每次产生量约 50kg ，按照颗粒柱状的活性炭密度 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则废活性炭每年产生量为 0.2m^3 （ 200L ）。

②放射性固体废物管控措施

医院在分装注射室南侧设置了 1 个放射性废物暂存间，净空面积约 5.1m^2 ，用于暂

存负一层核素诊断区产生的放射性固体废物和废活性炭。其拟布置 2 个容积不低于 300L 的铅废物箱/桶(10mmPb)，用于暂存核素操作过程中产生的放射性固体废物；拟布置 2 个容积不低于 150L 的铅废物箱/桶(5mmPb)，分别用于暂存废发生器和过滤装置中废活性炭等滤芯。

根据《核医学辐射防护与安全要求》7.2.3.1 中的规定，放射性固体废物在产生点采用专用塑料袋直接收纳后及时转送至放射性废物暂存间，暂存超过 33 天（ ^{89}Zr 的十倍半衰期）后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，作为医疗废物进行处理，废发生器色谱柱交由厂家回收处置。

3) 二层核素治疗区

①放射性固体废物产生量的核算

A、门诊核素治疗

在敷贴室采用 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴器进行皮肤疾病敷贴治疗，由于 ^{90}Sr - ^{90}Y 具有较长半衰期（28.79a），根据患者患处的实际情况，把控敷贴治疗时间，敷贴治疗完成后，收回敷贴源，经过消毒处理后再供其他患者使用，短期内不产生废放射源；擦拭消毒过程中产生的棉球、纱布等经收集后作为医疗废物进行处理。

甲吸检测拟使用 ^{131}I 为已分装的胶囊或口服液，正常情况下产生的放射性固体废物产生量较少且活度较低，经过收集后作为医疗废物进行处理。

B、非住院核素治疗

患者接受 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 核素治疗药患者产生的放射性固体废物主要为废注射器、针头、手套、棉签、纱布、破碎杯皿、擦拭污染物地面的物品以及其他可能受放射性污染的物品等，保守按照每人每天 0.02kg 产生量进行估算，则年最大产生量为 50kg（其中为 α 核素的 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 核素的放射性废物共 20kg），按照平均密度 100kg/m^3 核算，则每年产生的 α 核素放射性固体废物为 0.2m^3 （200L），每年产生的其他核素放射性固体废物为 0.3m^3 （300L）。医院拟在注射给药窗设置 2 个 5mmPb 的专用脚踏式放射性废物暂存桶(放射性废物桶底部带有万向轮)，分别用于暂存 α 核素和其他核素的放射性固体废物。暂存桶内应放置专用塑料袋，对注射器和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，然后再放入塑料袋内，每袋不超过 20kg，装满后分别送至放射性废物暂存间 2 进行暂存。

C、住院核素治疗

a)籽粒植入

使用的放射性核素 ^{125}I 、 ^{103}Pd 均为具有良好包壳封装的粒子源，在手术植入过程中，不会产生放射性固体废物；手术过程中产生的固体废物经过收集后作为医疗废物进行处理。

b) ^{90}Y “微球”介入治疗

^{90}Y 微球介入治疗在输注放射性核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{90}Y 微球手术和住院治疗过程中，均会产生放射性固体。 ^{90}Y 微球在注射前分装、配制过程中产生的放射性固体废物产生量较少，可忽略不计；在核素介入输注过程中，产生的放射性固体废物主要有 V 瓶、一次性使用输注装置、输注导管、纱布、手套、废有机玻璃防护罐及含剩余药物的西林瓶等放射性固废，若发生撒漏则还可能产生吸水纸、去污用纸、医护人员手套、手术服、口罩、眼罩、有机玻璃盒子等。在核素输注手术中，本次保守按照每例患者每次产生放射性固体废物 0.5kg，每年产生的放射性固体废物为 100kg（包含 2 个阶段），按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量约 1m^3 （1000L）；住院患者产生一次性卫生用品和垫料等按每张床位每天产生放射性固体废物 0.5kg，目前拟设 1 个床位，每年按照 300 天进行考虑，则每年产生的放射性固体废物为 150kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量约 1.50m^3 （1500L）。

c) ^{188}Re 介入注射治疗

在 ^{188}Re 靶向探针输注和住院治疗过程中，均会产生放射性固体。 ^{188}Re 在标记、分装过程中产生的放射性固体废物产生量较少，可忽略不计；在核素输注过程中，产生的放射性固体废物主要有 V 瓶、一次性使用输注装置、输注导管、纱布、手套、废有机玻璃防护罐及含剩余药物的西林瓶等放射性固废，若发生撒漏则还可能产生吸水纸、去污用纸、医护人员手套、手术服、口罩、眼罩、有机玻璃盒子等。在核素输注手术中，本次保守按照每例患者每次产生放射性固体废物 0.5kg，每年产生的放射性固体废物为 50kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量约 0.5m^3 （500L）；住院患者产生一次性卫生用品和垫料等按每例患者每天产生放射性固体废物 0.5kg，目前拟设 3 个床位，每年按照 300 天进行考虑，则每年产生的放射性固体废物为 450kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量约 4.50m^3 （4500L）。

d)过滤装置滤芯更换

放射性废气过滤装置更换下来的活性炭，约 6 个月更换一次，每次产生量为 50kg，

每年产生量为 100kg，按照颗粒柱状的活性炭密度 500kg/m³ 核算，则废活性炭每次产生量为 0.1m³（100L）。

②放射性固体废物管控措施

医院在分装给药室南侧拟设置 1 个净空面积约 2.5m² 的放射性废物暂存间 1，拟布置 1 个容积不低于 300L 的放射性固体废物铅箱/桶(5mmPb)，用于暂存介入手术室内核素制备/配药、输注、药物制备过程中产生的放射性固体废物；在患者专业电梯厅西侧拟设置 1 个净空面积约 4.1m² 的放射性废物暂存间 2，拟在其内布置 2 个容积为 500L 的放射性固体废物铅箱/桶(5mmPb)，分别用于非住院治疗患者（ α 核素除外）产生的放射性固体废物；2 个容积为 500L 的放射性废物衰变铅桶/箱(5mmPb)，用于隔离病房内患者住院治疗产生的放射性固体废物；1 个容积为 300L 的放射性废物衰变铅桶/箱(5mmPb)，用于暂存 α 核素放射性固体废物和过滤装置滤芯。

根据《核医学辐射防护与安全要求》7.2.3.1 中的规定，二层核素治疗区介入手术室内产生的放射性固体废物最长半衰期为 2.67d（⁹⁰Y），经及时收集转运至放射性废物暂存间 1，暂存超过 30 天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm² 的，作为医疗废物进行处理；二层核素治疗区非住院治疗含 α 核素放射性固体废物和过滤装置更换的废滤芯，经及时收集转运至放射性废物暂存间 2，暂存超过 115 天后，交由有资质的单位收运处置；二层核素治疗区非住院治疗其他核素放射性固体废物最长半衰期为 50.53d（⁸⁹Sr），经及时收集转运至放射性废物暂存间 2，暂存超过 506 天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm² 的，作为医疗废物进行处理；二层核素治疗区住院核素治疗隔离病房产生的放射性固体废物最长半衰期为 2.67d（⁹⁰Y），经及时收集转运至放射性废物暂存间 2，暂存超过 30 天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm² 的，作为医疗废物进行处理。

4) 三层核素治疗区

①放射性固体废物产生量的核算

A、住院治疗

三层核素治疗区内拟使用的核素为 ¹³¹I、¹⁷⁷Lu，其核素最长半衰期的核素为 ¹³¹I，¹⁷⁷Lu 核素 10 倍半衰期低于 180 天。因此，病房治疗区内产生的放射性固体废物按照分类收集暂存 180 天后进行管控。三层核素治疗区产生的放射性固体废物量分析如下：

医护人员 ^{177}Lu 核素操作过程产生的废注射器、针头、手套、棉签、一次性卫生用品、破碎杯皿、擦拭污染物以及其他可能受放射性污染的物品等，按照每名患者每天产生 0.05kg 进行估算，正常情况下，产生放射性固体废物每年最多 5kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量为 0.05m^3 （50L），拟在分装给药室拟配置 1 个专用脚踏式放射性废物暂存桶/箱(10mmPb，底部带有万向轮)，用于收集核素操作过程中产生的放射性固体废物，拟在桶内放置专用塑料袋，经收集后及时转移到放射性废物暂存间 1 内进行暂存衰变。甲癌患者用药均采用自动分装柜分药，患者自取药物服用，产生的放射性废物主要为服药杯、擦拭污染物等，每名患者按照 0.02kg，每年产生 10kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量为 0.1m^3 （100L），医院拟在自助服药窗旁拟配置 1 个专用脚踏式放射性废物暂存桶/箱(10mmPb，底部带有万向轮)，用于收集患者服药过程中产生的放射性固体废物；住院患者产生一次性卫生用品和垫料等，按照每床位每天 0.5kg 产生量，医院在三层核素治疗区内拟设 6 张床位，保守按照 300 天进行考虑，则隔离病房内年产生放射性固体废物量约为 900kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量为 9m^3 （9000L）。医院拟在各隔离病房内分别设置 1 个专用脚踏式放射性废物暂存桶/箱(10mmPb，底部带有万向轮)，用于收集隔离病房内产生的放射性固体废物。

B、非住院治疗（甲亢）

医护人员甲亢（ ^{131}I ）核素操作过程中产生的废注射器、针头、手套、破碎杯皿、擦拭污染物以及其他可能受放射性污染的物品，按照每名患者每天产生 0.02kg 进行估算，正常情况下，产生放射性固体废物每年最多 10kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量为 0.1m^3 （100L），拟在分装给药室拟配置 1 个专用脚踏式放射性废物暂存桶/箱(10mmPb，底部带有万向轮)，用于收集核素操作过程中产生的放射性固体废物；甲亢治疗产生的放射性固体废物主要为服药杯，留观及去污过程中产生的放射性固体废物，按照每人每天 0.02kg 产生量进行估算，正常情况下，年产生量约 10kg，按照平均密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 核算，则年产生量为 0.1m^3 （100L），医院拟在给药窗旁、甲亢室内各配置 1 个专用脚踏式放射性废物暂存桶/箱(10mmPb，底部带有万向轮)，用于收集患者服药、留观和去污过程中产生的放射性固体废物。

C、过滤装置滤芯更换

三层核素治疗区排风管道末端及各楼层的合成成分装柜、手套箱、自动分装柜排风管道末端的过滤装置更换下来的活性炭等滤芯，约 6 个月更换一次，每次产生量为 100kg，

按照颗粒柱状的活性炭密度 500kg/m^3 核算，则废活性炭每年产生量为 0.20m^3 （200L）。

②放射性固体废物管控措施

医院在分装给药室南侧拟设置 1 个净空面积约 2.6m^2 的放射性废物暂存间 1，拟布置 1 个容积不低于 150L 的铅废物箱/桶(10mmPb)，用于暂存 ^{177}Lu 核素操作、甲亢使用 ^{131}I 核素操作过程中产生的放射性固体废物；1 个容积不低于 300L 的铅废物箱/桶(5mmPb)，用于暂存废活性炭等过滤装置滤芯。在患者专业电梯厅西侧拟设置 1 个净空面积约 3.9m^2 的放射性废物暂存间 2，拟在其内布置 4 个容积为 1500L 的放射性废物衰变铅桶/箱(10mmPb)，用于暂存三层核素治疗区甲亢患者服药及留观、隔离病房内产生的放射性固体废物等。

根据《核医学辐射防护与安全要求》7.2.3.1 中的规定，三层核素治疗区内核素操作过程中产生的放射性固体废物最长半衰期核素为 ^{131}I ，经及时收集转运至放射性废物暂存间 1，暂存超过 180 天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8Bq/cm^2 的，作为医疗废物进行处理；三层核素治疗区患者服药、留观过程及隔离病房内产生的放射性废物暂存超过 180 天后，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8Bq/cm^2 的，作为医疗废物进行处理。

③放射性固体废物暂存能力分析

医院在负二层核医学制药区、负一层核素诊断区、二层核素治疗区、三层核素治疗区分别设置了放射性废物暂存场所，其暂存能力分析见下表。

表 11-36 放射性固体废物暂存能力分析表

暂存场所	放废产生环节	放射性固体废物产生量 (L/a)	暂存周期 (d)	暂存周期内产生量 (L)	暂存期间放射性废物体积 (L)	废物衰变铅箱/桶容积 (L)	暂存期间放射性废物体积 (m³)	暂存间面积 (m²)	是否满足要求
负二层核医学制药区放射性废物库	回旋加速器制药过程	75	33	9.9	9.9	150 (150*1)	0.01	3.7	满足
负二层核医学制药区放射性废物暂存间	核素操作过程	500	33	66	266	150 (150*1)	0.27	4.1	
	过滤装置滤芯更换	400	33	200		300 (300*1)			
负一层核素诊断区	核素操作过程	2700	33	356.4	509	600 (300*2)	0.51	5.1	满足

放射性废物暂存间	发生器淋洗制药		400	33	52.8		150 (150*1)			
	过滤装置滤芯更换		200	33	100		150 (150*1)			
二层核素治疗区放射性废物暂存间 1	住院核素治疗	⁹⁰ Y 微球治疗配药、输注过程	1000	30	120	180	300 (300*1)	0.33	2.5	满足
		¹⁸⁸ Re 靶向探针治疗标记、分装、输注过程	500	30	60					
二层核素治疗区放射性废物暂存间 2	隔离病房	⁹⁰ Y 微球住院治疗	1500	30	150	1449	1000 (500*2)	1.45	4.1	满足
		¹⁸⁸ Re 住院治疗	4500	30	450					
	非住院核素治疗	其他核素治疗	300	506	607.2		1000 (500*2)			
		α核素治疗	200	115	92		300 (300*1)			
	过滤装置滤芯更换		100	506	150					
三层核素治疗区放射性废物暂存间 1	¹⁷⁷ Lu 核素操作过程		50	180	36	408	150 (150*1)	0.41	2.6	满足
	¹³¹ I（甲亢）核素操作过程		100	180	72					
	过滤装置滤芯更换		200	506	300		300 (300*1)			
三层核素治疗区放射性废物暂存间 2	患者给药	¹³¹ I 甲癌住院患者服药	100	180	72	5616	6000 (1500*4)	5.62	3.9	满足
		¹³¹ I 甲亢患者服药	100	180	72					
	¹³¹ I（甲亢）患者留观		100	180	72					
	隔离病房住院患者		9000	180	5400					

从上表可知，本项目设置的放射性固体废物暂存设施满足暂存要求。

5) 小结

综上，医院各核医学工作场所产生的放射性固体废物（含废活性炭等废过滤器）采用专用塑料袋分类收集后封闭暂存于放射性衰变桶内并及时转移至放射性废物暂存间存放，经监测符合排放标准后同其它医疗废物一起由医疗废物处理机构定期统一处理；生活垃圾分类收集后交市政环卫部门统一清运。医院拟配备的专用脚踏式放射性废物暂

存桶底部拟配万向轮，工作人员转移废物时可将放射性废物连同铅桶一起转移至放射性废物暂存间内，至暂存间后再将含放射性废物的塑料袋转移至大容积的铅废物箱，随后再将空置的铅废物桶转移至原工作场所。此转移过程中，放射性废物一直在铅废物桶中存放，工作人员近距离接触时间明显减少，避免了不必要的照射。

3、放射性废气

根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中 5.2.3 规定，合成和操作放射性药物所用的通风橱，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。根据设计文件，本项目核医学科工作场所共设 10 根放射性废气排风管道，共 7 个排风口，排风口均位于屋顶。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中 7.4 规定，产生放射性废气的核医学场所应设置独立的通风系统，合理组织工作场所的气流，对排出工作场所的气体进行过滤净化，避免污染工作场所和环境。医院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。

（1）负二层核医学制药区排风系统

本项目回旋加速器机房产生的废气主要来源于回旋加速器打靶制药过程产生的含 ^{41}Ar 等感生放射性废气以及空气电离产生的臭氧和氮氧化物。为防止回旋加速器机房内有害气体的累积，在回旋加速器机房设计了通排风系统，拟在回旋加速器机房排风管道与合管位置前端设置活性炭过滤装置。根据《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（辐射函〔2023〕20 号）中“三、关于独立通风要求—经过滤后的气体汇入到一个主管道中排放不违反标准要求”，设计单位未对回旋加速器机房设计单独的通风系统、单独的排气管道是能够满足要求的。

根据设计方案，本项目回旋加速器机房容积约为 252m^3 ，机房的有效排风风量为 $1400\text{m}^3/\text{h}$ ，新风风量为 $1200\text{m}^3/\text{h}$ ，则每小时的换气次数约为 5.5 次，机房内实现了负压通风。回旋加速器机房采用机械进排风，进风管道从加速器机房北侧通过预留的“S”型管道进入回旋加速器机房，排风管道通过预埋的“S”型管道穿过回旋加速器机房南墙，经活性炭过滤装置处理后，再引至机房外南侧（医护电梯北侧）的排风井内，机房内气体由排风系统抽排至 1#医疗综合楼楼顶，经楼顶活性炭吸附装置处理后，高于屋面 2m 排放。

负二层核医学制药区内共设 5 根专用排风管道。其中，核医学制药区域设 1 根排风

管道，经管道井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放；负二层核医学制药区密闭设备设 1 根专用排风管道，回旋加速器自屏蔽体内放射性废气经活性炭过滤装置处理后，穿墙管道引出，再与放化实验室密闭设施（高效过滤装置处理）废气管道并管后，通过排风井引至屋顶（距地面约 49.7m）排放；负二层辅助区域内产生的放射性废气经过管道收集后，通过排风井引至塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后，高于屋顶 2m 处排放；核医学制药区成分装热室柜设 1 根专用排风管道，各密闭柜体产生的放射性废气经顶壁内侧设高效过滤装置处理后，通过管道经排风井引至屋顶，经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放；衰变池区域设 1 根专用排风管道，衰变池区域内产生的废气经活性炭过滤装置过滤后，经排风井引至屋顶（距地面约 45m），高于屋顶 2m 排放。本项目负二层核医学工作场所各功能用房新风系统风量小于排风系统的排风量，保证了非密封放射性物质工作为负压工作场所，各功能用房内产生的放射性废气均经过处理后排放，对周围环境的影响较小。

（2）负一层核素诊断区排风系统

负一层核素诊断区内拟设 2 根放射性废气排风管道。其中，分装注射室的 PET 用手套箱和 SPECT 用手套箱设 1 根专用排风管道，放射性药物的各项操作均在手套箱内进行，手套箱由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（一般风速不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的手套箱排风口处风速不得低于 0.5m/s；第 2 根排风管道分为 4 个分支，分别连接了源库、分装注射室、放射性废物暂存间、给药后候诊室、检后休息室、PET-CT/MRI 室、SPECT-CT 室等区域。本项目负一层核素诊断区内的各功能用房新风系统风量小于排风系统的排风量，保证了非密封放射性物质工作为负压工作场所。

负一层核素诊断区内的放射性废气经 2 根排风管道引至 1#医疗综合楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放。其中分装给药室内的手套箱顶壁内侧拟配活性炭过滤装置，产生的放射性废气经管道引至排风井内进行合管，通过管道经排风井引至屋顶，经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放采用 2 级过滤后进行排放，含放射性核素的废气对周边环境影响较小。

（3）二层核素治疗区排风系统

二层核素治疗区内拟设 3 根放射性废气排风管道。其中，分装给药室内密闭设备（手

套箱、自动分装柜）设 1 根专用排风管道；核素操作区域（源库、分装给药室、放射性废物暂存间 1、介入手术室、留观室等）、核素治疗病房区域（隔离病房（6 间）、放射性污染被服暂存间、放射性废物暂存间 2 等）各设 1 根放射性排风管道。密闭设备（手套箱、自动分装柜）设 1 条专用排风管道，拟在手套箱顶壁内侧设高效过滤装置，箱体产生的放射性废气通过管道在排风井内合管后，引至屋顶（距地面约 49.7m）经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放；核素操作区域和核素治疗区域内产生的放射性核素废气经管道收集后，通过排风井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放。

二层核素治疗区放射性药物的各项操作均在手套箱/自动分装柜内进行，手套箱/自动分装柜由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（一般风速不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的手套箱排风口处风速不得低于 0.5m/s。二层核素治疗场所各功能用房内的新风系统新风量小于排风系统的排风量，保证了非密封放射性物质工作为负压工作场所。分装给药室内的密闭设备中产生的放射性废气经顶壁内侧高效过滤装置处理后，经管道引至屋顶，再次经过多重过滤处置，核素操作区域、核素治疗病房区域产生的废气经过活性炭过滤装置处理后，放射性核素的废气对周边环境的影响较小。

（4）三层核素治疗区排风系统

三层核素治疗区内拟设 3 根放射性废气排风管道。其中，核素操作区域（接源库、分装给药室、放射性废物暂存间 1、放射性污染被服暂存间、放射性废物暂存间 2、甲亢室等）、核素治疗隔离病房（6 间）各设 1 根放射性排风管道。密闭设备（手套箱、自动分装柜）设 1 根专用排风管道，拟在手套箱顶壁内侧设高效过滤装置，箱体产生的放射性废气通过管道在排风井内合管后，引至屋顶（距地面约 49.7m）经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 排放；核素操作区域内产生的放射性核素废气经管道收集后，通过排风井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经活性炭过滤装置过滤后高于屋顶 2m 排放；核素治疗隔离病房内产生的放射性核素废气经管道收集后，通过排风井引至 1#医疗综合楼塔楼楼顶（距地面约 49.7m），经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后高于屋顶 2m 排放。

三层核素治疗区内放射性药物的各项操作均在手套箱/自动分装柜内进行，手套箱/自动分装柜由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成

和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（一般风速不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的手套箱排风口处风速不得低于 0.5m/s；核素操作区域及核素治疗隔离病房各功能用房内的新风系统新风量小于排风系统的排风量，保证了非密封放射性物质工作为负压工作场所；分装给药室内的密闭设备中产生的放射性废气经顶壁内侧高效过滤装置处理后，经管道引至屋顶，再次经过除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后排放，核素操作区域产生的废气经过活性炭过滤装置，核素治疗隔离病房内产生的放射性废气经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，三层核素治疗区内产生的含放射性核素的废气对周边环境影响较小。

（5）小结

本项目核医学工作场所内合成分装等操作均在密闭的合成分装柜内进行，放射性药物的淋洗、质控、分装、质检等操作均在密闭手套箱/通风橱内进行，拟在密闭合成分装柜、手套箱/通风橱顶壁内侧安装高效过滤装置，密闭操作装置产生的放射性废气均由“二级过滤”后排放。本项目核医学工作场所内的放射性废气气流排风管道均由低活度区域向高活度区域，经管道引至屋顶通过活性炭过滤/除碘过滤吸附处理后高于屋顶 2m 排放。医院应在排风管道内设置止回阀，限制放射性废气气流走向，防止放射性废气及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

综上，本项目核医学科排风系统满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中关于“①保持工作场所负压和各区之间的压差，使得工作场所气流由清洁区流向监督区再流向控制区；②应在碘-131 治疗病房和手套箱设计独立排风系统，在每一个密闭设备顶壁安装活性炭过滤装置，经过滤装置处理后的废气经管道在楼顶经过高效过滤+活性炭吸附装置处理后排放；③使用回旋加速器制备放射性药物的场所应设有单独的通风系统，加速器屏蔽区内应有单独的排气管道，并呈负压状态”等相关要求。

（五）非放射性污染物环境影响分析

1、放疗中心

（1）废气环境影响分析

放疗中心使用的直线加速器在出束治疗、模拟 CT 机在定位扫描过程中，产生的 X 射线、电子线会使空气电离产生一定的臭氧(O₃)和少量氮氧化物(NO_x)，其中模拟 CT 产生的臭氧可忽略不计。经前文分析，直线加速器治疗过程中产生的臭氧产额较少，能够满足标准规定的最高浓度限值的要求。直线加速器机房内产生的臭氧经专用管道引至高

于地面 2m 处排放，经过自然分解和稀释，对周围环境的影响较小。

(2) 噪声环境影响分析

在医院放疗中心内通排风风机工作时将产生一定的噪声，噪声源均位于室内，本项目通排风机产生的噪声通过实体防护和距离衰减后，厂界噪声可满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2类标准限值要求，对周围环境的影响较小。

(3) 水环境影响分析

医院放疗中心运行后，废水主要为医院工作人员、患者产生的生活污水和辅助机房产生的废水。生活污水进入建设单位新建的污水处理站，经污水处理站处理后的废水进入市政污水管网，辅助机房废水循环利用，不外排，不会对周围水环境造成影响。

(4) 固体废物环境影响分析

本项目运营期主要固体废物为加速器废靶、工作人员及患者生活垃圾及办公垃圾。其中，工作人员及患者生活垃圾及办公垃圾经过统一收集后交由环卫部门处置；加速器废靶由有资质单位回收处置。

2、核医学工作场所

(1) 废气环境影响分析

本项目使用的II、III类射线装置在工作状态时，会使空气电离产生少量的臭氧(O₃)和氮氧化物(NO_x)，少量臭氧和氮氧化物可通过动力排风装置排出，臭氧 50 分钟后自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

(2) 固体废物环境影响分析

本项目使用的各类型医用射线装置均采用数字成像，不打印胶片，因此不会有废胶片产生，产生的非放射性固体废物主要为生活垃圾及医疗废物。

本项目工作人员工作中会产生少量生活垃圾和办公垃圾，候诊病人候诊过程中会产生少量的生活垃圾，依托医院拟建的生活垃圾收集系统进行处理。

在介入手术室内非放射性手术操作时产生的医用器具、药棉、纱布、废造影剂及废造影剂瓶等医用废物，每台手术保守按照 2kg 进行考虑，年最大产生量约为 0.6t，各核医学工作场所（含放射性手术）内解控后的放射性废物每年最大产生量共约为 2.2t。其中，非放射性手术产生的医疗废物从介入手术室西南侧污物通道运出后由专人每天到科室收集到院内医疗废物暂存点，按照医疗废物执行转移联单制度，定期由有资质的医疗废物处置单位统一收集处置；各核医学工作场所（含放射性手术）内解控后的放射性废

物由核素污梯运出后，在放射性废物库 2 内暂存，由医院专人每天到负二层核医学制药区转运到院内医疗废物暂存点，按照医疗废物执行转移联单制度，定期交由有资质的医疗废物处置单位统一收集处置。

项目产生固废均得到合理处置，不会对周围环境产生明显影响。

(3) 水环境影响分析

本项目产生的废水主要为生活污水和解控后的放射性废水。

本项目工作人员工作中产生的生活污水、候诊患者产生的生活污水、解控后的放射性废水，均依托医院拟建的污水处理系统处理达到《医疗机构水污染物排放标准》GB 18466-2005 中的表 2 预处理标准后排入市政污水管网进入城市污水处理厂处理。

(4) 声环境影响分析

本项目噪声主要来源于通排风系统的风机，各机房所使用的通排风系统均为低噪声节能排风机和低噪声节能空气处理机，其噪声值一般低于 65dB(A)，噪声较小，考虑到噪声的远距离衰减作用，各排风系统使用的风机均采用橡胶垫进行减震，噪声进一步减小。项目运行期间厂界噪声可满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2 类标准要求，已在《林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期环境影响报告表》中进行评价。

3、射线装置报废要求

根据《四川省辐射污染防治条例》，“射线装置在报废处置时，使用单位应当对射线装置内的高压射线管进行拆解和去功能化”。本项目使用的直线加速器、模拟 CT、PET-CT、SPECT-CT 和 DSA-CBCT 在进行报废处理时，将射线装置高压射线管进行拆卸并去功能化，同时将射线装置主机的电源线绞断，使射线装置不能正常通电，防止二次通电使用，造成误照射，并按照生态环境主管部门的要求，履行相关报废手续。

辐射事故影响分析

一、环境风险评价目的

环境风险评价是为了分析和预测建设项目存在的潜在危害和有害因素，以及项目在建设、运营期间可能发生的事故（一般不包括自然灾害与人为破坏），引起有毒、有害（本项目为电离辐射）物质泄漏，所造成的环境影响程度和人身安全损害程度，并提出合理可行的防范、应急与减缓措施，以使项目事故发生率、损失和环境影响达到可以接

受的水平。

二、风险识别

（一）放疗中心直线加速器可能发生的事故

直线加速器不运行时不存在放射性事故，也不存在影响辐射环境质量事故，只有当加速器运行期间才会产生 X 射线、电子束等危害因素，而且最大可能的事故主要有两种：

- ①医用直线加速器运行时其它无关人员误入或滞留于加速器治疗室；
- ②检修时，检修人员触动直线加速器开关，造成检修人员受到误照射。

（二）核医学工作场所风险识别

根据污染源分析，本项目使用回旋加速器存在主要环境风险因子为中子、 γ 射线等，危害因素为中子、 γ 射线外照射导致人员超剂量照射，回旋加速器只有在开机状态下才会产生中子、 γ 射线，一旦切断电源，便不会再有中子、 γ 射线产生。由于回旋加速器在停机后存在剩余辐射，若处理不当也会对人员和环境造成一定的影响。本项目可能发生的辐射事故情景如下：

- ①安全装置或设备控制系统出现故障，人员非法闯入正在运行的机房，操作人员开启回旋加速器导致人员误照射。
- ②操作人员未按操作规程对机房进行清场巡更，导致人员滞留机房内，室外操作人员开启回旋加速器导致人员误照射。
- ③机房开门延时联锁失效，停机后机房内未进行足够时间的排风，或者通风系统失效，工作人员直接进入机房导致受到感生放射性废气的误照射。
- ④回旋加速器冷却系统失效或火灾事故，导致靶腔破裂，造成非密封放射性物质泄漏。
- ⑤辐照后的固态靶件在传输过程中因传输管道堵塞导致卡靶或停靶。
- ⑥工作人员误操作、转运、火灾或因管理不善而丢失被盗，导致放射性物质（原料、产品和废物）撒漏；
- ⑦工作箱负压不足或破损泄漏导致放射性气溶胶逸散到操作区；
- ⑧排风系统过滤装置达到饱和或受潮、断电导致过滤失效；
- ⑨校准源丢失、被盗、失控。

（三）DSA-CBCT 射线装置可能发生的事故

本项目使用的 DSA 属于Ⅱ类射线装置，属中危险射线装置，事故时可使受照人员产生较严重的放射损伤，大剂量照射甚至可导致死亡。DSA 不运行时不可能发生放射性事故，也不存在影响辐射环境质量事故，只有当机器运行期间才会产生 X 射线等危害因素，而且最大可能的事故主要有两种：

①在介入手术操作中，DSA 控制系统失灵；

②DSA 射线装置 X 射线源处于“曝光”状态，介入手术人员在距 X 射线管非主射束方向进行介入手术操作。

（四）Ⅲ类医用射线装置可能发生的辐射事故

本项目涉及使用 1 台模拟 CT 机，为Ⅲ类射线装置，所用射线装置为数字成像，无废显定影液及废胶片产生，其主要危害为设备工作时产生 X 射线。Ⅲ类射线装置属于低危险射线装置，发生事故时一般不会对受照者造成辐射损伤，最大可能发生的事故等级为一般辐射事故。

三、源项分析及事故等级分析

医用直线加速器会产生 X 射线、电子线、臭氧，臭氧经通风设施换气，对大气环境基本无影响，电子线经机房屏蔽体的材料屏蔽后，在环境辐射方面已无影响，故医用直线加速器可能发生的风险事故中，其风险因子主要为 X 射线。

回旋加速器打靶过程中会产生 γ 射线、中子、臭氧，臭氧经通风设施换气，对大气环境基本无影响，电子线经治疗室屏蔽体的材料和厚度屏蔽后，在环境辐射方面已无影响，故医用直线加速器可能发生的风险事故中，其风险因子主要为 X 射线；核医学非密封放射性物质工作场所中所用的核素，产生 β 和 γ 射线，由于 β 射线在空气中射程较短，通过实体屏蔽后影响较小，故核医学风险因子主要为 γ 射线；Ⅲ类医用射线装置主要风险因子为 X 射线。

DSA-CBCT 属于Ⅱ类射线装置，属中危险射线装置，且放射性核素介入过程中会造成叠加影响，事故时可使受照人员产生较严重的放射损伤，大剂量照射甚至可能导致死亡。DSA-CBCT 不运行、不进行同位素介入操作时不可能发生放射性事故，也不存在影响辐射环境质量事故，只有当机器运行期间才会产生 X 射线等危害因素，最大可能的事故为：

射线装置在运行时，介入手术医生在未采取任何防护的情况下，位于非主射方向进行介入放射性核素注射手术操作，操作时未对注射装置采取屏蔽措施；由于安全联锁系统失效，介入手术核素注射过程中，公众人员误入或滞留在手术室内而造成非主射方向的误照射。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 449 号）第四十条：根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级，详见表 11-37 中。

表 11-37 项目的风险因子辐射伤害程度与事故分级

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

根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ104-2017），急性放射病发生参考剂量见表 11-38。

表 11-38 急性放射病初期临床反应及受照剂量范围参考值

急性放射病	分度	受照剂量范围参考值
骨髓型急性放射病	轻度	1.0Gy~2.0Gy
	中度	2.0Gy~4.0Gy
	重度	4.0Gy~6.0Gy
	极重度	6.0Gy~10.0Gy
肠型急性放射病	轻度	10.0Gy~20.0Gy
	重度	20.0Gy~50.0Gy
脑型急性放射病	/	50.0Gy~100.0Gy
	死亡	>100Gy

四、后果计算

1、放疗中心直线加速器可能发生的辐射安全事故分析

(1) 事故情景假设

1) 在对病人进行治疗时，10MV直线加速器主射束1m处剂量率为最大值22Gy/min，

假设考虑安全联锁失效，有人员误入机房，人员在无其它屏蔽的情况下处于加速器主射方向出束口最近距离1m，每次误入照射时间为3min（治疗方案中单次出束最长时间），结合加速器机房平面布置，误入人员与加速器出束口最远距离为4m。

2）检修人员检修时，触碰加速器开关，造成加速器出束误照射，维修人员位于主射方向，距离出束口最近距离为0.5m，最长受照射时间为1min。

（2）最大受照剂量估算

根据上述事故情景，经计算，随时间和距离的变化，最大可能受到的剂量见下表：

表 11-39 最大可能事故状态下不同时间、距离处有效剂量情况表（mSv）

时间(s) 距离(m)	5	10	60	120	180
0.5	7.33E+03	1.47E+04	8.80E+04	/	/
1	1.83E+03	3.67E+03	2.20E+04	4.40E+04	6.60E+04
2	4.58E+02	9.17E+02	5.50E+03	1.10E+04	1.65E+04
3	2.04E+02	4.07E+02	2.44E+03	4.89E+03	7.33E+03
4	1.15E+02	2.29E+02	1.38E+03	2.75E+03	4.13E+03

（3）事故等级

通过计算，维修人员误操作受到直线加速器主射方向 0.5m 处 1min 的辐射影响，其有效剂量为 88Sv/次，分别大于公众年剂量限值 1mSv、职业人员年剂量限值 20mSv，根据表 11-50，可能会发生脑型急性放射病，为较大辐射事故；公众误入机房内在出束口 1m 处受照 180s 的情况下最大辐射剂量为 66Sv，参照表 11-38，可能会发生脑型急性放射病，为较大辐射事故。但随着照射时间的推移，受照剂量不断增加，可能造成重大辐射事故。

2、核医学工作场所可能发生的辐射安全事故分析

（1）非法闯入或人员滞留回旋加速器机房事故后果影响分析

根据设备厂家提供资料，回旋加速器自屏蔽体表面 35μSv/h 剂量率等高线距离屏蔽体表面最远为 1.1m（与靶点最近距离为 3.2m），当人员非法闯入或滞留回旋加速器机房，假设受照时间为 2min，人员距离机体表面 1m 处，其受照剂量约 1.2×10^{-3} mSv，人员受照剂量未超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业 20mSv 的剂量限值，也未超过公众 1mSv 年剂量限值的要求，不构成辐射事故。

（2）回旋加速器机房放射性物质泄漏事故后果影响分析

本项目涉及生产放射性物质 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr ，其中因 ^{11}C 、 ^{15}O 、 ^{13}N 半衰期极短， ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 日最大制备量较少，本次以 ^{18}F 作为代表核素进行分析，单批次生产产额最大为1Ci，当 ^{18}F 发生泄漏时，主要造成机房及管路沿线 β 表面沾污超标，由于回旋加速器大厅设计有防渗措施，泄漏的 ^{18}F 对土壤和地下水影响较小，同时 ^{18}F 的半衰期相对较短，通过场所封闭衰变和后续去污措施，不会造成较大影响，其事故后果属于辐射事件。若存在工作人员误入情况，按单批次产额1Ci进行泄漏量考虑，机房最大辐射剂量率为5.29mSv/h，若事故持续发生227min将导致工作人员受照剂量超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业20mSv的剂量限值，构成一般辐射事故。

（3）卡靶或停靶事故后果影响分析

当发生卡靶时，辐照后的放射性固体靶将长时间滞留于管道中，会持续对周围辐射环境造成影响，回旋加速器输药地沟深度约0.40m，输药管道外采用3mm铅套管进行包裹，通道上方采用50mm铅砖+10mm铅盖板进行屏蔽，假设传输的放射性固体原料未发生衰变，以 ^{18}F 为代表（单次生产活度为 $3.70 \times 10^4 \text{MBq}$ ），经计算距离其1m处辐射剂量率为 $0.212 \mu\text{Sv/h}$ ，人员居留时间按8h考虑，其最大受照剂量为 $1.7 \times 10^{-3} \text{mSv}$ ，人员受照射剂量未超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业20mSv的剂量限值，不构成一般辐射事故。若工作人员私自打开铅盖板和铅砖进行处置，其辐射剂量率将达到3.5mSv/h，事故持续发生6h，可导致工作人员受照剂量超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业20mSv的剂量限值，构成一般辐射事故。

（4）放射性物质撒漏事故状态下影响分析

①发生放射性溶液溅洒对皮肤的影响分析

对于使用热室柜、手套箱进行核素制备、分装的场所，放射性溶液撒漏一般不会直接沾染工作人员手部皮肤，因而对人体的影响不大。但在给病人服药时容易因误操作导致撒漏对工作人员造成辐射影响，假设发生事故时溅洒活度为单次给药的最大操作活度，溅洒溶液在手部均匀分布，沾染面积取成人平均手部表面积 280cm^2 ，假设事故处理时间持续10min。根据《RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK 2002》（Published by Nuclear Technology Publishing）查得，不同放射性核素溅洒到手部时，每 $1 \text{kBq} \cdot \text{cm}^{-2}$ 对皮肤造成的剂量率，据此核算事故状态下受照剂量见

表 11-40。

表 11-40 放射性溶液溅洒对手部造成的剂量计算表

核素	最大给药量 (Bq)	手部沾染活度 (kBq·cm ⁻²)	每 1kBq·cm ⁻² 对皮肤造成 的辐射剂量率 (mSv/h)	事故中皮肤受 照剂量 (mSv)	全身受照 剂量(mSv)
¹⁸ F	3.70E+08	2.64E+03	1.95	429.5	4.3
⁶⁴ Cu	2.22E+08	7.93E+02	1	132.1	1.3
⁶⁸ Ga	1.85E+08	2.64E+03	1.81	199.3	2.0
^{99m} Tc	7.40E+08	2.64E+03	1.89	832.5	8.3
⁸⁹ Sr	1.85E+08	6.61E+02	1.78	196.0	2.0
¹³¹ I	5.55E+09	1.98E+04	1.62	5351.8	53.5
¹⁸⁸ Re	1.11E+09	3.96E+03	2.32	1532.9	15.3

*注：根据《辐射安全手册》（潘自强主编）表 1.4，皮肤组织权重因子为 0.01，全身受照剂量=皮肤受照剂量率/0.01。

经计算，单次事故状态下职业人员手部最大受照剂量为 5351.8mSv，超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中对四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量 500mSv 的限值，对应全身最大受照剂量为 53.5mSv，构成一般辐射事故。若事故持续发生可能导致事故等级升级。

②发生地面撒漏情况下的影响分析

工作人员误操作、转运、火灾或因管理不善而丢失被盗，造成放射性物质撒漏在地面，本次以单种核素单日最大操作量计算，包括储存量。根据式 11-3，选取单日用量最大、周围剂量当量率常数较大等具有代表性的核素 ¹⁸F、^{99m}Tc、¹³¹I 和 ¹⁷⁷Lu 分别计算距辐射源 0.1m、0.2m、0.5m、1.0m、2.0m、5.0m、以及超过 0.1mSv/h 处的剂量率。

根据事故情景假设条件计算得出，距源 0.1m~10m 范围内剂量率，计算结果见表 11-41。

表 11-41 放射性药物丢失和泄漏事故和下不同距离处剂量率分布表

距源距离 (m)	各事故持续时段的γ射线剂量率 (μGy/h)			
	¹⁸ F（单日最大操作量 0.3Ci）	^{99m} Tc（单日最大操作量 0.4Ci）	¹³¹ I（单日最大操作量 0.8Ci）	¹⁷⁷ Lu（单日最大操作量 0.2Ci）
0.1	1.6E+05	4.5E+04	1.8E+05	5.0E+03
0.5	6.3E+03	1.8E+03	7.0E+03	2.0E+02
0.7	3.2E+03	9.2E+02	3.6E+03	1.0E+02
1.2	1.1E+03	3.1E+02	1.2E+03	3.4E+01
1.5	7.1E+02	2.0E+02	7.8E+02	2.2E+01
2.1	3.6E+02	1.0E+02	4.0E+02	1.1E+01
2.5	2.5E+02	7.2E+01	2.8E+02	7.9E+00

3.0	1.8E+02	5.0E+01	2.0E+02	5.5E+00
3.9	1.0E+02	2.9E+01	1.2E+02	3.3E+00
4.2	9.0E+01	2.5E+01	1.0E+02	2.8E+00
5	6.3E+01	1.8E+01	7.0E+01	2.0E+00

根据表 11-41 可知，当日 ^{18}F 全部泄漏，事故持续 1h 后，周围半径 3.9m 范围内的保护目标受照剂量将超过 0.1mSv；当日 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 全部泄漏，事故持续 1h 后，周围半径 2.1m 范围内的保护目标受照剂量将超过 0.1mSv；当日 ^{131}I 全部泄漏后，事故持续 1h 后，周围半径 4.2m 范围内的保护目标受照剂量将超过 0.1mSv；当日 ^{177}Lu 全部泄漏后，事故持续 1h 后，周围半径 0.7m 范围内的保护目标受照剂量将超过 0.1mSv。当环境剂量超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中公众 0.1mSv/a 剂量限值时，构成一般辐射事故。

综上，本项目非密封放射性物质使用过程中发生辐射事故时，最大可能发生的辐射事故等级为一般辐射事故。

（5）校准源丢失、被盗、失控

本项目使用的校准源均为 V 类放射源，根据表 11-37 可知，V 类放射源丢失、被盗、失控属于一般辐射事故。

3、介入手术室内使用射线装置后果计算

1) 事故假设

①在手术注射 ^{188}Re 核素过程中，射线装置不慎触动透视开关，辐射工作人员位于非主射方向，未采取任何防护的情况下与射线束最近距离 0.5m 进行介入手术操作，最长受照时间 15min；

②在手术注射 ^{188}Re 核素过程中，射线装置在运行时，公众未采取任何防护的情况下，误入介入手术室，位于射线装置非主射方向，与射线束最近距离 1.5m，公众误入或滞留在介入室内按照 15min。

③设备维护人员在维护 DSA 的 X 线机射线管或测量探测器时，射线管处于出束状态，维修人员处于主射方向。

2) 剂量估算

①介入手术人员或误入人员在未采取任何防护的情况下位于非主射方向进行介入手术操作，公众进入机房受到非主射方向的照射的事故后果计算结果如下表所示：

表 11-42 事故状态下非主射方向不同停留时间和距离人员受照剂量表

关注点与射线 装置的距离(m)	时间 (min)	核素注射事故 剂量 (mGy)	射线装置贡献剂量 (mGy)		总剂量 (mGy)
			散射所致剂量	漏射所致剂量	
0.5	2	5.1E-03	4.2E-01	1.3E+00	1.7E+00
	5	1.3E-02	1.0E+00	3.2E+00	4.3E+00
	15	3.8E-02	3.1E+00	9.6E+00	1.3E+01
1	2	1.3E-03	1.0E-01	3.2E-01	4.3E-01
	5	3.2E-03	2.6E-01	8.0E-01	1.1E+00
	10	6.4E-03	5.2E-01	1.6E+00	2.1E+00
	15	9.6E-03	7.8E-01	2.4E+00	3.2E+00
1.5	2	1.4E-04	1.2E-02	3.6E-02	4.7E-02
	5	2.8E-04	2.3E-02	7.1E-02	9.5E-02
	10	1.4E-03	1.2E-01	3.6E-01	4.7E-01
	15	2.8E-03	2.3E-01	7.1E-01	9.5E-01
2	2	8.0E-05	6.5E-03	2.0E-02	2.7E-02
	5	1.6E-04	1.3E-02	4.0E-02	5.3E-02
	10	8.0E-04	6.5E-02	2.0E-01	2.7E-01
	15	1.6E-03	1.3E-01	4.0E-01	5.3E-01

②事故状态下，维修人员处于主射方向透视模式时不同时间和距离所受剂量预测结果如下表所示：

表 11-43 事故状态下主射方向不同停留时间和距离维修人员受照剂量表

距离 (m)	时间 (s)	剂量 (mGy)	距离 (m)	时间 (s)	剂量 (mGy)	距离 (m)	时间 (s)	剂量 (mGy)
0.5	1	10.7	1	1	2.7	2	1	0.7
0.5	2	21.3	1	2	5.3	2	2	1.3
0.5	4	42.7	1	8	21.3	2	4	2.7
0.5	30	320	1	16	42.7	2	30	20
0.5	60	640	1	60	160	2	60	40
0.5	90	960	1	90	240	2	90	60

3) 事故后果

①非主射方向职业人员

随着不同位置和时间的推移，手术医生非主射方向上最大可能受照剂量为 13.1mGy/次，低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的职业人员 20mSv/a 的剂量限值，低于表 11-38 中轻度骨髓型急性放射病受照剂量参考范围。因此，手术医生位于非主射方向未穿戴防护用品的情况下实施介入手术，不会构成急性重度放

射病、局部器官残疾的情况，不构成辐射事故。

②公众

公众人员误入介入手术室非主射方向最大可能受照射剂量为 0.95mGy/次，低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的公众 1mSv/a 的剂量限值，不构成辐射事故，但在极端情况下，随着时间的推移，可能造成一般辐射事故。

③维修人员

根据表 11-43 可知，维修人员在不同位置随着时间的推移，最大可能受照剂量为 960mGy/次，高于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871- 2002）规定的职业人员 20mSv/a 的剂量限值。根据表 11-50 可知，不构成轻度骨髓型急性放射病。因此，本项目 **DSA-CBCT** 一般不会导致人员发生急性重度放射病、局部器官残疾，为**一般辐射事故**。

4、III类医用射线装置的后果分析

模拟CT、SPECT-CT、PET-CT均属于III类射线装置，其X射线能量不大，曝光时间都比较短，事故情况下，人员误入或误照射情况下，可能导致人员受到超过年剂量限值的照射。

事故情况下，X射线直接照射到人员身上，保守考虑，误入人员或病人在距离射线头1m处被误照射，根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）表E.4典型成年受检者X射线透视的诊断参考水平入射体表剂量率100mGy/min。人员误入受照射时间按检查1个患者的最长扫描时间（10min）计算，则机房内误入人员所受的X射线辐射剂量率最大为1.0Gy/次，最大可能为轻度骨髓型急性放射病，人员受到超年剂量照射，为一般辐射事故。

5、小结

综上所述，本项目 **DSA-CBCT** 及III类医用射线装置一旦发生辐射事故，最大可能为一般辐射事故。本项目射线装置一旦发生辐射事故，应立即切断电源，停止射线装置出束，封闭现场。医院在管理中必须认真执行安全操作规程和各项规章制度，强化安全管理，杜绝此类事故发生。

五、事故防范措施

1、直线加速器事故防范措施

①直线加速器运行时其它无关人员误入或滞留于加速器机房内。

应对措施：加速器自身有多种安全防护措施，如辐射启动装置与控制台上显示的辐射参数预选值联锁，选择参数前辐照不能启动；有门机安全联锁，机房门关闭后辐射才能启动。

②医务人员误操作，导致病人受超剂量照射或受其它的额外照射；

应对措施：加速器的控制台上显示有辐射类型、标称能量、照射时间、吸收剂量、治疗方式等参数的显示装置，操作人员可随时了解设备运行情况。

2、核医学科可能发生的事故及应对措施

本项目涉及的核医学科负二层核医学制药区、负一层核素诊断区、二层核素治疗区、三层核素治疗区均属于乙级非密封放射性物质工作场所。按国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的规定，应参照Ⅱ类密封型放射源工作场所的相关要求，实施辐射安全管理。由于核素的操作量较大，一旦发生事故有可能导致环境的放射污染。核医学科诊治过程中较常见的事故有：

（1）回旋加速器制备放射性核素时，回旋加速器打靶期间时人员误入回旋加速器机房，造成人员误照射事故；

应对措施：回旋加速器机房与防护门实现门机联锁保护装置，防护门打开时加速器自动停止出束，回旋加速器室防护门外设置了工作状态指示灯和悬挂电离辐射警示标识，相关场所的出入口均设置了门禁及视频监控系统，回旋加速器室、出入口及控制室均需设置应急停止按钮，张贴事故应急预案，放射防护注意事项、设备操作规程、紧急处理措施等。热室内部配备辐射剂量监控系统，可调节监控剂量，当热室内部剂量值大于设定值时，热室门将被联锁装置锁死，不允许打开；热室所在房间内安装固定式剂量率监测探头，当探测到剂量率超过设置阈值时，则有声光报警，人员马上撤离。

（2）放射性药物或放射源丢失、被盗、放射性药物撒漏或工作场所失火，均可能使放射性药物释放到环境中，这样就会使室内的设备、地面等受到放射性污染；

应对措施：医院应当在放射源和放射性药物的签收、暂存和发放等环节有详细的程序和记录，实行专人专锁专管，切实做好防火防盗，以此避免此类事故的发生；对大剂量的治疗用量必须格外小心，要严格按照操作规程进行，尽量避免污染事故的发生，在操作放射性核素和药物后应进行表面污染监测；在核医学工作中，遇到放射性药品抛洒的意外情况时尽快进行处理，应迅速用吸附衬垫吸干溅洒的液体，以防止污染扩散，争

取在最短的时间内将事故排除，事故处理时应穿戴防护用品，以避免不必要的污染。

(3) 在放射性药物的制备、质控/检、给药过程中，因为多种原因导致工作人员获得高剂量照射。

应对措施：医院应制定针对放射性核素紧急情况的应急程序，职业人员应通过辐射安全与防护知识的培训和考核，并且对辐射工作人员进行个人剂量的监测。

3、使用 DSA-CBCT 事故分析与防范措施

DSA-CBCT 属于Ⅱ类射线装置，为中危险射线装置，事故时可使受照人员产生较严重的放射损伤，但由于 DSA-CBCT 的特殊性，事故时使受照人员受大剂量照射甚至导致死亡的几率很小。DSA-CBCT 开机曝光时，医生与病人同处一室，且距 X 射线机的管头组装体约 1m 左右，距病人很近，介入机主要事故是因曝光时间较长，防护条件欠佳对医生和病人引起的超剂量照射，其级别最高为较大辐射事故。

应对措施：①购置工作性能和防护条件均较好的介入诊疗设备；②实施介入诊疗的质量保证；③做好医生的个人防护；④做好病人非投照部位的防护工作；⑤按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》的要求，当 DSA-CBCT 导致辐射事故发生时，应及时上报当地生态环境主管部门。

4、Ⅲ类医用射线装置事故分析与防范措施

本项目涉及的Ⅲ类医用射线装置均为低危险射线装置，发生事故时一般不会对受照者造成辐射损伤，不构成辐射事故。

Ⅲ类医用射线装置主要事故是由于设备控制失灵或操作失误或质保不佳，使被检者受到不必要照射。因此，在诊断过程中应注意对被检者的防护，合理使用 X 射线，实施医疗照射防护最优化的原则，实际操作中可采用“高电压、低电流、重过滤、小视野”的办法，使被检者所受的剂量，达到合理的尽可能的低水平。同时，按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》的要求，当发生辐射事故时，医院应即时上报当地生态环境局。

5、事故综合防范应对措施

医院在管理中必须认真执行安全操作规程和各项规章制度，强化安全管理，避免各辐射工作场所出现人员滞留事故发生；定期检查各辐射工作场所的门机联锁等辐射安全环保设施是否有效，同时应当加强控制区和监督区的管理，避免人员误入事故的发生。

当事故发生时应当立即启动事故应急程序，对于可能发生的各种事故，医院方面除

在硬件上配齐、完善各种防范措施外，在软件设施上也注意了建设、补充和完善，使之在安全工作中发挥约束和规范作用，其主要内容有：

（1）建立安全管理领导小组，组织管理医院的安全工作。

（2）加强人员的辐射安全与防护知识的学习，考试（核）合格、持证上岗。

（3）建立岗位的安全操作规程和安全规章制度，注意检查考核，并应将操作规程张贴在操作人员可看到的显眼位置，认真贯彻实施；操作人员严格按照操作规程进行操作，并做好个人的防护。

（4）制定医院重大事故处理预案、完善组织、落实经费、准备物资、加强演练、时刻准备应对可能发生的各种事故和突发事件。

（5）辐射安全管理人员要经常对辐照工作场所进行巡视，及时纠正不利于辐射安全防护的行为。

以上各种事故的防范与对策措施，可减少或避免放射性事故的发生，从而保证项目正常运营，也保障工作人员、公众的健康与安全。

表 12 辐射安全管理

辐射安全与环境保护管理机构的设置

一、辐射防护与安全管理机构

医院成立了辐射安全管理领导小组，由院长作为第一责任人，负责对全院的辐射安全管理工作（见附件 8），日常办公地点设在院感科。文件明确了机构人员组成和领导小组的职责范围。

1、领导小组文件已包含内容

（1）领导小组人员组成

组长：院长

副组长：分管副院长

成员：核医学科主任、医学影像科主任、肿瘤科主任、保卫科主任、院感科主任、后勤科主任、设备科主任

（2）领导小组下设办公室，办公室设置在院感科，由院感科主任兼任，负责全院辐射安全与防护工作的具体组织、协调、督查和指导工作。

（3）领导小组的主要职责

- ①组织编制和定期修订医院辐射安全管理规章制度；
- ②领导和协调小组成员及职责分工，组织和监督贯彻落实辐射安全管理相关规章制度；
- ③定期检查医院辐射工作人员执行各项规章制度，保证辐射防护、安全与诊疗质量；
- ④定期委托有资质的单位对辐射工作场所和防护设施进行检测，确保辐射安全防护设施可靠、辐射剂量率水平符合有关规定；
- ⑤按照国家对辐射防护的有关规定和标准，组织定期对医院辐射工作人员进行上岗前、在岗期间、离岗时的职业健康体检；
- ⑥协调监督全院辐射安全与防护知识的学习和考核情况，并督促相关科室为辐射工作人员建立个人剂量、职业健康管理和培训档案；
- ⑦负责组织应急准备工作，调度人员，指挥辐射事故应急救援行动，向上级行政主管部门报告辐射安全事故应急救援情况，配合相关行政主管部门的事故调查和监督检查。

2、根据机构调整相关文件要求，医院在以后工作中还需做到：

①补充日常管理工作联系人和紧急情况下联络的生态环境主管部门联系电话。

②文件中应明确定期对医院各项辐射安全管理制度进行修订，并定期检查辐射安全防护措施落实情况，发现异常及时进行调查和纠正。

二、辐射工作人员配置和能力要求

①医院为本项目拟配备辐射工作人员57人，均为新增辐射工作人员。医院后期可根据设备数量，承担诊疗、科研任务，开展的项目和工作量等实际情况适当增加人员编制。

②射线装置、核医学工作场所辐射工作人员均需取得射线装置相关操作证书，熟悉专业技术；

③本项目辐射工作人员和辐射安全管理人员均需参加生态环境部辐射培训平台中辐射安全与防护知识的学习，参加考核，考核通过后方可上岗。

④医院应定期委托有资质的单位对辐射工作人员个人剂量进行检测，且应建立辐射工作人员个人剂量档案。

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和防护管理办法》的相关规定，本项目除使用Ⅲ类射线装置的人员外，其他辐射工作人员和辐射防护负责人均应通过辐射安全与防护的考核，登录国家核技术利用辐射安全与防护学习平台（网址：<http://fushe.mee.gov.cn>）进行辐射安全与防护知识学习并取得考核成绩单，成绩单到期前，需进行再次通过考核，辐射安全与防护成绩报告单有效期为五年。

三、射线装置报废

医院射线装置在报废前，须去功能化处理，如拆除电源或拆除高压零部件，确保装置无法再次通电使用，并及时到生态环境主管部门办理相关手续。

四、非密封放射性物质工作场所退役

本项目涉及的负二层核医学制药区、负一层核素诊断区、二层核素治疗区、三层核素治疗区的非密封放射性物质工作场所另做他用前，医院应履行场所退役的相关手续。

辐射安全档案资料管理和规章管理制度

一、档案管理分类

医院应将相关资料进行分类归档妥善放置，包括以下九大类：“制度文件”、“环评资料”、“许可证资料”、“放射源和射线装置台账”、“监测和检查记录”、“个人剂量档案”、“培训档案”、“辐射应急资料”和“废物处置记录”。

二、辐射安全管理规章制度

根据《核技术利用监督检查技术程序》（生态环境部（国家核安全局），2020 发布版）、《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）》（川环函[2016]1400 号）、《四川省核技术利用单位辐射安全工作指引（2025 年版）》（川环函〔2025〕616 号），医院应制定的辐射安全管理规章制度见下表。

表 12-1 本项目辐射管理制度汇总对照分析表

序号	国家生态环境部要求		省生态环境厅要求		具体要求	对照分析
	项目	制度名称	制度名称			
1	A 综合	辐射安全与环境保护管理机构和岗位职责	辐射安全与环境保护管理机构和岗位职责	应建立辐射安全管理机构或配备专（兼）职管理人员，落实部门和人员全面负责辐射安全管理的具体工作	落实后满足	
2		辐射安全与防护管理规定	辐射安全管理规定	应包含辐射防护与安全保卫相关内容，并悬挂于辐射工作场所。内容应体现现场操作性和实用性，字体醒目，尺寸应不小于 400×600mm	落实后满足	
		非密封放射性物质管理规定	/			
		放射性药物管理规定	/			
		物料平衡管理规定	/			
3	B 场所	安全与防护设施等维护与维修制度	辐射安全与防护设施维护维修制度	应定期检查辐射安全防护设施的有效性	落实后满足	
4		场所分区管理制度	/	应包含全部辐射活动种类与范围，并悬挂于辐射工作场所。内容应体现现场操作性和实用性，字体醒目，尺寸应不小于 400×600mm	落实后满足	
5		操作规程	辐射工作设备操作规程			
6		安保管理规定	/			
7		去污操作规程	/			
8		放射性药物（体内）治疗病房管理规定	/			
8	C 监测	场所及环境监测方案	辐射工作场所和环境辐射水平监测方案	每年委托有资质单位进行 1 次场所年度监测；平时应定期开展自我监测，并做好记录；取得《辐射安全许可证》后 3 个月内完成验收监测	落实后满足	

9		监测仪表使用与校验管理制度	监测仪表使用与校验管理制度	需制定并落实监测仪表使用与校验管理制度	落实后满足
10		校验源管理制度	/		
11	D 人员	辐射工作人员培训/再培训制度	辐射工作人员培训制度	辐射工作人员和辐射安全管理人员均应登录国家核技术利用辐射安全与防护学习平台(网址: http://fushe.mee.gov.cn)进行学习,并根据要求通过辐射安全与防护知识的考核	落实后满足
12		辐射工作人员个人剂量管理制度	辐射工作人员个人剂量管理制度	个人剂量监测周期为1次/季。当单个季度个人剂量超过1.25mSv时,医院要对该辐射工作人员进行干预,要进一步调查明确原因,并由当事人在情况调查报告上签字确认;当全年个人剂量超过5mSv时,医院需进行原因调查,并最终形成正式调查报告,经本人签字确认后,上报发证机关。	落实后满足
13		工作人员岗位职责	辐射工作人员岗位职责	应悬挂于辐射工作场所。内容应体现现场操作性和实用性,字体醒目,尺寸应不小于400×600mm	落实后满足
14	E 应急	辐射事故/事件应急预案	辐射事故应急预案	辐射事故应急预案的主要内容应包括:应急组织结构、应急职责分工、辐射事故应急处置(最大可信事故场景、应急报告、应急措施和步骤,应急联络电话)、应急保障措施、应急演练计划、辐射事故应急响应程序。辐射事故应急响应程序应悬挂于辐射工作场所。内容应体现现场操作性和实用性,字体醒目,尺寸应不小于400×600mm	落实后满足
15	F 三废	放射性“三废”管理规定	/	放射性“三废”应分类收集。放射性废水应在衰变池内暂存满足要求后排放;放射性固体废物贮存场所(设施)应具备“六防”(防火、防水、防盗、防丢失、防破坏、防射线泄漏)措施,贮存容器应有放射性标识和放射性核素名称、批号、物理形态、出厂活度及存放日期等相关信息。放射性废气应由专门的排气管道经活性炭过滤后排放。	落实后满足

16		放射源台账管理		应包含现有实物台账、购买台账、放射性同位素领取使用台账、射线装置去向台账等，台账的内容应该包括：放射性同位素名称、初始活度、放射源编码、购买时间、收贮时间；射线装置型号、管电压、管电流、购买时间、报废时间等，放射源与射线装置台账应与国家辐射安全管理系统档案保持一致等内容。	落实后满足
17	G 放射源	更换放射源管理制度	放射源与射线装置台账管理制度		
18		X 射线诊断中受检者防护规定	/	对核医学科诊断患者采取铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套等防护	落实后满足
19	H 其他	/	质量保证大纲和质量控制检测计划	使用放射性同位素和射线装置开展诊断和治疗的单位须制定质量保证大纲和质量控制检测计划，利用更精确的诊疗计划减少病患受到不必要的照射	落实后满足

医院应根据上表要求制定相关规章制度，并严格落实，并根据国家新发布的相关法规内容，结合医院实际对各项规章制度修订完善，使之更能符合实际需要。

三、《辐射安全许可证》发放条件对照分析

结合《辐射安全许可证》发放条件、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2021 年修订，生态环境部令第 20 号），本项目辐射安全许可证发放条件对照见表 12-2。

表 12-2 《辐射安全许可证》发放条件与本项目评价结果

序号	原环保部第 3 号令要求	项目实际情况	评价结果
1	使用放射性同位素、射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作	已设立	满足
2	从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核	应组织	人员通过考核后满足
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备	已设计	落实后满足
4	放射性同位素与射线装置使用场所所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	应配备	配备后满足
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。使用非密封放射性物质的单位还应当有表面污染监测仪	应配备	配备后满足
6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	应制定	制定后满足

7	有完善的辐射事故应急措施。	应配备	配备后满足
8	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	已设计	落实后满足
9	使用放射性同位素和射线装置开展诊断和治疗的单位，还应当配备质量控制检测设备，制定相应的质量保证大纲和质量控制检测计划，至少有一名医用物理人员负责质量保证与质量控制检测工作。	应落实	落实后满足

医院落实上述要求后，具备《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中关于使用II类射线装置、放射性同位素工作场所的许可条件。

医院在具备《辐射安全许可证》申领条件后，及时到四川省生态环境厅申请办理相关业务。

辐射监测

辐射监测是安全防护的一项必要措施，通过辐射剂量监测得到的数据，可以分析判断和估计电离辐射水平，防止人员受到过量的照射。根据实际情况，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。

1、工作场所监测

自主验收监测：医院在取得《辐射安全许可证》后三个月内，应委托有资质的单位开展1次辐射工作场所验收监测，编制自主验收监测（调查）报告。

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；年度监测报告应作为《放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告》的重要组成部分一并提交给发证机关。

日常自我监测：定期自行开展辐射监测（也可委托有资质的单位进行监测），制定各工作场所的监测方案，监测数据应存档备案，监测频次根据医院的实际工作量自行确定。

2、个人剂量监测

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。

医院应按以下要求做好个人剂量档案的管理：

（1）当单个季度个人剂量超过1.25mSv时，医院要对该辐射工作人员进行干预，要进一步调查明确原因，并由当事人在情况调查报告上签字确认；当全年个人剂量超过5mSv时，医院需进行原因调查，并最终形成正式调查报告，经本人签字确认后，上报

发证机关。检测报告及有关调查报告应存档备查；

(2) 个人剂量检测报告（连续四个季度）应当连同年度监测报告一起作为《安全和防护状况年度评估报告》的重要组成部分一并提交给发证机关；

(3) 根据《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019），就本项目而言，辐射主要来自前方，剂量计应佩戴在人体躯干前方中部位置，一般左胸前；对于工作中穿戴铅衣的情况，通常应根据佩戴在铅衣里面躯干上的剂量计估算工作人员有效剂量；

(4) 辐射工作人员个人剂量档案内容应当包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。医院应当将个人剂量档案终身保存。

3、医院日常自我监测

医院应定期自行开展辐射环境监测（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，监测周期可为1次/月。

4、监测内容和要求

(1) 监测内容：X- γ 辐射剂量率、中子剂量率、 α 表面污染、 β 表面沾污、放射性废水中总 α 、放射性废水中总 β 。

(2) 监测布点及数据管理：本项目监测布点应参考环评提出的监测计划（表12-3）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，建立监测数据台账。

表 12-3 本项目监测布点方案表

场所或设备	监测内容	监测周期	监测布点位置
10MV 直线加速器机房	X- γ 空气吸收剂量率	验收监测1次，委托有资质的单位监测，频率为1次/年；自行开展辐射监测1次/月	四周墙体外侧0.3处、技师操作位、防护门外及门缝、机房正上方、机房外管线穿墙处等
模拟定位 CT 机房			四周墙体外侧0.3m处、铅窗、技师操作位、防护门及门缝、机房外管线穿墙处等
核医学工作场所	X- γ 空气吸收剂量率	验收监测1次，委托有资质的单位监测，频率为1次/年，放射性固体废物暂存期满按照医疗废物处理检测	回旋加速器机房、热室、放化实验室、源库、放射性废物暂存间、分装注射（给药）室、留观室、抢救室（运动负荷室）、给药后候诊室、检后休息室、PET-MRI/CT室、SPECT-CT室、隔离病房、介入手术室、甲吸室四周墙体外0.3m处，SPECT-CT操作位、PET-CT/MRI操作位，通风橱、合成分装柜、手套箱、自动分装柜四周表面0.3m处，放射性废物表面及1m处、核医学工作场所正上方、正下方等
	β 表面放射性污染	验收监测1次，委托有资质的单位监测，频率为1次/年；每日工作结	回旋加速器机房、热室、放化实验室、源库、放射性废物暂存间、分装注射（给药）室、留观室、抢救室（运动负荷室）、给药后候诊室、检后休息室、患者走廊、检查廊、PET-MRI/CT室、SPECT-CT室、介入手术室、甲吸室、患者专用电梯厅、隔离病房、患者

		束开展表面污染监测；放射性固体废物暂存期满按照医疗废物处理检测	专用卫生间内侧的地面、墙面、桌面、台面等，通风橱、合成分装柜、手套箱、自动分装柜等密闭设备四周表面，防护门及门把手、辐射工作人员工作服、手套、工作鞋、手、皮肤等
	放射性废水中总 α 、总 β	验收监测 1 次、放射性废水排放前监测 1 次	衰变池总排口

(3) 监测范围：控制区和监督区域及周围环境

(4) 监测质量保证

a、制定监测仪表使用、校验管理制度，并利用监测部门的监测数据与医院监测仪器的监测数据进行比对，建立监测仪器比对档案；也可到有资质的单位对监测仪器进行校核；

b、采用国家颁布的标准方法或推荐方法，其中自我监测可参照有资质的监测机构出具的监测报告中的方法；

c、制定辐射环境监测管理制度。

此外，医院需定期和不定期对辐射工作场所进行监测，随时掌握辐射工作场所剂量变化情况，发现问题及时维护、整改。做好监测数据的审核，制定相应的报送程序，监测数据及报送情况存档备查。

5、年度评估报告

医院应于每年 1 月 31 日前通过全国核技术利用申报系统提交《放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告》，内容包括近一年（四个季度）个人剂量检测报告、辐射工作场所年度监测报告和辐射工作人员培训情况，编写格式应满足原四川省环境保护厅办公室《关于印发〈放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告格式（试行）〉的通知》（川环办发〔2016〕152 号）的规定。医院延续、变更许可证，新增或注销射线装置以及单位信息变更、个人剂量、年度评估报告等均应及时在该系统中申报。

辐射事故应急

1、事故应急预案内容

为了应对放射诊疗中的事故和突发事件，医院应制订辐射事故应急预案，应包含以下内容：

(1) 应急机构和职责分工，应急和救助的装备、资金、物资准备，辐射事故应急处理程序，辐射事故分级与应急响应措施，辐射事故调查、报告和处理程序，辐射事故的调查、预案管理；

(2) 应急组织体系和职责、应急处理程序、上报电话；

(3) 应急人员的培训；

(4) 环境风险因子、潜在危害、事故等级等内容；

(5) 辐射事故调查、报告和处理程序中相关负责人员及联系电话；

(6) 发生辐射事故时，应当立即启动应急预案，采取应急措施，并按规定向所在地县级以上地方人民政府及其生态环境、公安、卫生等主管部门报告。

2、应急措施

若本项目发生了辐射事故，医院应迅速、有效采取以下应急措施：

(1) 一旦发现放射性药物、放射源被盗或者丢失，及时向公安部门、生态环境主管部门和卫生主管部门报告。

(2) 放射源/放射性药物操作或者贮存过程中发生火灾、爆炸等可能影响放射源/放射性药物的安全，在现场允许情况下，应优先对放射源/放射性药物进行灭火并抢离火灾现场。

(3) 发现误照射事故时，工作人员应立即切断电源，将患者撤出机房，关闭机房门，同时向医院主管领导报告。

(4) 医院根据估算的超剂量值，尽快安排误照人员进行检查或在指定的医疗机构救治；对可能受放射损伤的人员，应立即采取暂时隔离和应急救援措施。

(5) 事故发生后的 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境和公安部门报告。造成或可能造成超剂量照射的，还应同时向当地卫健行政部门报告。

(6) 最后查清事故原因，分清责任，消除事故隐患。

3、其他要求

(1) 辐射事故风险评估和辐射事故应急预案，应报送所在地县级地方人民政府生态环境主管部门备案；

(2) 医院应结合本项目建设内容特点，及时制定辐射事故应急预案并定期演练。

(3) 在预案的实施中，应根据国家发布新的相关法规内容，结合医院实际及时对预案作补充修改，使之更能符合实际需要。

表 13 结论与建议

结论

一、项目概况

项目名称:林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期-医院新建放疗中心及核医学科项目

建设单位: 成都兴锦生态建设投资集团有限公司

建设性质: 新建

建设地点: 成都市锦江区柳江街道潘家沟村一组、十组、十一组

本项目建设内容与规模为: 医院租赁林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期 1# 医疗综合楼及相关配套设施, 在 1# 医疗综合楼内新建放疗中心和核医学工作场所。其中, 放疗中心位于 1# 医疗综合楼负二层东北角, 核医学制药区位于负二层西北侧、核素诊断区位于负一层北侧、核素治疗区位于二层北侧和三层北侧。

医院拟在放疗中心内新建 2 间直线加速器机房、1 间模拟 CT 室及其他配套用房, 在直线加速器机房内分别使用 1 台 X 射线能量最大为 10MV、电子束能量最大为 20MeV 的直线加速器 (II 类射线装置), 型号待定, 用于肿瘤治疗; 拟在模拟 CT 室内使用 1 台模拟 CT 机 (III 类射线装置), 型号待定, 最大管电压为 150kV, 最大管电流为 1000mA, 用于模拟定位。

医院拟在负二层核医学制药区内使用 1 台型号为 MINItace Qilin 的 10MeV 自屏蔽回旋加速器 (II 类射线装置), 用于生产放射性核素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr , 在放化实验室对生产的放射性药物进行质控等操作, 日等效最大操作量为 $1.89\times 10^9\text{Bq}$ (乙级非密封放射性物质工作场所); 在负一层核素诊断区内使用 $^{99\text{m}}\text{Mo}$ ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)、 ^{68}Ge (^{68}Ga) 淋洗制药, 使用 SPECT-CT (III 类射线装置)、PET-CT (III 类射线装置)、PET-MRI 各 1 台, 使用放射性核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga 和 ^{89}Zr 用于肿瘤显像诊断, 核素诊断区日等效最大操作量为 $4.64\times 10^8\text{Bq}$ (乙级非密封放射性物质工作场所), 使用 3 枚活度为 $4.60\times 10^7\text{Bq/枚}\times 2$ 枚 + $9.25\times 10^7\text{Bq/枚}\times 1$ 枚的 ^{68}Ge 放射源或 1 枚活度为 $3.70\times 10^8\text{Bq/枚}\times 1$ 枚的 ^{22}Na 放射源用于 PET-CT/MRI 设备校准 (均属于 V 类放射源); 在二层核素治疗区内使用 1 台 DSA-CBCT (II 类射线装置), 最大管电压为 150kV、最大管电流为 1000mA,

使用放射性核素 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{186}Re 、 ^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{125}I 粒子源、 ^{103}Pd 种子源、 ^{90}Y 微球、 ^{188}Re ，用于肿瘤治疗，在场所南侧甲吸室使用核素 ^{131}I 用于甲吸检查，在敷贴室使用 2 枚放射源 ^{90}Sr - ^{90}Y ，最大活度为 $7.40 \times 10^9 \text{Bq/枚} \times 2 \text{枚}$ （V 类），用于皮肤病敷贴治疗，场所内日等效最大操作量为 $3.71 \times 10^9 \text{Bq}$ （乙级非密封放射性物质工作场所）；在三层核素治疗区内使用放射性核素 ^{131}I 、 ^{177}Lu ，开展甲亢、甲癌和骨转移等肿瘤治疗，日等效最大操作量为 $3.74 \times 10^9 \text{Bq}$ （乙级非密封放射性物质工作场所）。

二、本项目产业政策符合性分析

根据中华人民共和国国家发展和改革委员会修订发布《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（中华人民共和国国家发展和改革委员会令 第 7 号）的相关规定，本项目使用非密封放射性物质、V 类放射源、II 类射线装置、III 类射线装置为医院医疗基础建设内容，属该指导目录中第三十七项“卫生健康”中第 1 款“医疗卫生服务设施建设”，属于国家鼓励类产业，符合国家产业政策。

三、本项目选址合理性分析

本项目依托的拟建 1#医疗综合楼及配套建设内容已包含在林家坝 TOD 项片区医疗用地项目二期建设项目中，已通过专家评审，选址合理性已在环评报告表中进行了论述，且用地取得了成都市锦江区规划和自然资源局核发的《建设项目用地预审与选址意见书》（用字第 51010***号），本项目放疗中心及核医学科工作场所均位于建设单位规划建设建筑内，不新增用地。项目建成后 50m 评价范围内人员活动较少，满足“HJ1188-2021”的选址要求。综上，本项目选址是合理的。

四、所在地区环境质量现状

根据监测报告，项目所在地的 X- γ 辐射空气吸收剂量率属于正常天然本底辐射水平，拟建核医学科场所周围 α 、 β 表面污染、中子辐射剂量率检测结果均无异常。

五、环境影响评价分析结论

（一）施工期环境影响分析

本项目土建工程已在《林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期环境影响报告表》中进行评价分析，建设单位在落实报告表提出的各项污染防治措施后，对周围环境影响较小。

（二）营运期环境影响分析

根据预测分析，本项目投入运营后，放疗中心内辐射工作人员年最大有效剂量为 0.26mSv/a 、周围最近的公众年最大受照剂量为 $7.0\times 10^{-4}\text{mSv/a}$ ，分别满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中规定的“一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a ，公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a ”，远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的职业人员 20mSv/a 和公众 1mSv/a 的剂量限值；核医学工作场所内职业人员受到年综合最大辐射剂量为 3.8mSv/a 、周围公众受到年最大有效剂量为 $7.8\times 10^{-2}\text{mSv/a}$ ，分别满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中规定的职业照射个人年有效剂量 5mSv 和公众人员个人年有效剂量 0.1mSv 的剂量约束值，也满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的职业人员 20mSv/a 和公众 1mSv/a 的剂量限值的规定。

2、大气的环境影响分析

（1）放疗中心对大气的影响分析

放疗中心直线加速器机房内设有专用通排风管道，每小时排风次数大于 4 次，直线加速器机房内产生的臭氧采用排风管道引出后，经排风井引至高于地面 3m 处排放，能够满足 HJ1198-2021 中的相关要求。

（2）核医学科对大气的影响分析

本项目核医学科产生的废气主要为含放射性核素废气。在核医学科各楼层的各场所及衰变池区域分别设计了通排风系统，场所内排风风量大于新风风量，各场所内产生的放射性废气经活性炭过滤装置处理后高于屋顶排放；在密闭设备（成分装柜、通风橱、手套箱、自动分装柜等）设计了专用排风系统，在密闭操作设备顶壁内侧拟设高效过滤装置，核素操作产生的放射性废气经高效过滤装置过滤后，在排风井内合管后，经除碘过滤装置+活性炭过滤装置处理后，高于屋顶 2m 处排放；回旋加速器自屏蔽体内放射性废气经管道引出后，经活性炭过滤装置处理后，与放化实验室内密闭设备内（顶壁内侧拟设高效过滤装置）放射性废气管道合管后，经排风井引至屋顶 2m 处排放。

3、声环境影响分析

本项目噪声源主要为通排风机噪声，所有设备选用低噪声设备，均处于室内，

通过建筑墙体隔声及距离衰减后，运行期间厂界噪声可满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2类标准要求。

4、水环境影响分析

本项目投入运营后，废水主要为放射性废水和医院工作人员、患者产生的生活污水及医疗废水。本项目产生的放射性废水通过管道排入衰变池中暂存衰变，暂存周期满足《核医学辐射防护与安全要求》要求后开展监测，监测结果经审管部门认可后，排入建设单位污水处理站处理后排入市政污水管网。

5、固体废物影响分析

本项目产生的医疗废物，按照危废管理相关要求，进行分类收集；核医学科产生的放射性废物分类暂存于放射性废物暂存间/库，含 α 核素放射性废物和过滤装置废滤芯经过暂存衰变，交由有资质的单位收运处置；含其他核素放射性固体废物暂存时间超过《核医学辐射防护与安全要求》要求期限，经监测辐射剂量率处于环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，作为医疗废物进行处置；本项目工作人员和患者会产生少量的办公垃圾和生活垃圾，经统一收集后交由环卫部门定期清运。

六、环保设施与保护目标

按照环评报告落实后，医院环保设施配置较全，总体效能良好，可使保护目标所受年剂量低于本次确定的剂量约束值。

七、事故风险与防范

医院制订的辐射事故应急预案和安全规章制度内容较全面、措施可行，应认真贯彻实施，以减少和避免发生辐射事故与突发事件。

八、辐射安全管理的综合能力

医院按照环评要求完善相关内容后，对本项目辐射设备和场所而言，其具备辐射安全管理的综合能力。

九、项目环保可行性结论

在坚持“三同时”的原则，采取切实可行的环保措施，落实本报告提出的各项污染防治措施的前提下，从环境保护和辐射防护角度看，本项目在成都市锦江区林家坝 TOD 片区医疗用地项目二期 1#医疗综合楼内建设是可行的。

十、项目环保竣工验收检查内容

表 13-1 项目环保竣工验收辐射安全防护设施检查一览表

场所	辐射安全防护设施		数量
放疗中心 10MV 直线 加速器房	实体防护	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	2 座
		铅防护门	2 扇
	控制台及安全联锁	防止非工作人员操作的锁定开关	设备自带
		加速器治疗床、加速器主机上以及控制台上应具备紧急停机按钮	设备自带
		条件显示联锁、控制超剂量的联锁装置、时间控制联锁	设备自带
		工作状态指示灯-门灯联锁	2 个
		治疗室门与高压联锁（门机联锁）	2 个
	警示装置	视频监控系统与对讲系统	2 套
		入口电离辐射警示标志	2 个
		工作场所分区及标识	2 套
	治疗室紧急设施	屏蔽门内侧紧急开门按钮	2 个
		治疗室防夹人装置	2 个
		机房内紧急停机按钮	2 套（各 4 个）
	监测设备	机房内准备出束音响提示	仪器自带
		控制台上蜂鸣器	仪器自带
		紧急照明或独立通道照明系统	2 套
	监测设备	固定式辐射剂量率监测仪	2 套
		便携式辐射监测仪器	1 台
		个人剂量报警仪	2 台
		个人剂量计	1 人/套
	其他	灭火器材	1 套
		火灾报警仪	1 套
		通排风系统	1 套
放疗中心 模拟 CT 室	实体防护	墙体+屋顶	/
		铅防护门、防护窗	/
	警示装置	工作状态指示灯-门灯联锁	1 套
		电离辐射警告标志	1 套
	紧急设施	门与高压联锁（门机联锁）	1 套
		对讲装置	1 套
	监测设备	个人剂量计	1 人/套
	防护设施	病人、陪护人员防护铅衣等	1 套
	其他	通排风系统	1 套
		灭火器材	1 套
		火灾报警仪	1 套
负二 层核	实体防护	四周墙体+屋顶屏蔽	若干
		铅防护门、传递窗	1 套

医学 制药 区	场所设施	核素洁梯、核素污梯	各 1 台
		门禁系统	1 套
		入口处电离辐射警告标志	若干
		声光报警及语音广播	1 套
		药物合成分装热室柜（70mmPb，内含高效过滤装置）	1 组
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套
		去污工具组	1 套
		地下沟管+10mmPb铅盖板+60mmPb铅砖	若干
		药物转运铅罐(50mmPb)	2 个
		质控药物转运铅罐(5mmPb)	2 个
		不锈钢转运推车	2 个
		通风橱（10mmPb，含高效过滤装置）	1 个
		生物安全柜（含高效过滤装置）	1 个
		视频监控系统	1 套
		对讲装置	1 套
		放射性废物暂存间	2 间
	安全连锁	门-剂量连锁	1 套
		门灯连锁-工作状态指示灯	1 套
		门与加速器高压触发/束流连锁	1 套
		热室门与加速器药物传输系统连锁	1 套
		清场巡更按钮	3 个
		延时开门连锁	1 套
		控制台和大厅门钥匙控制	1 套
	紧急设施	机房内紧急开门装置	1 个
		机房内、外紧急停机按钮	3 个
	监测设备	固定式辐射剂量率监测仪	1 套
		放射性活度计	1 台
		表面污染监测仪	3 台
		便携式中子剂量监测仪	1 台
		便携式 X-γ辐射监测仪	1 台
	个人防护用品	个人剂量报警仪	4 台
		个人剂量计	1 人/套
		铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	3 套
	放射性废物和废液	放射性废水衰变池	1 座
		独立下水系统及放射性排水管道	1 套
		放射性废物暂存桶（10mmPb）	3 个
		放射性废物衰变桶/箱(2个10mmPb、1个5mmPb)	3 个
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干
		合成分装柜等密闭设备独立排风系统	1 套
		负二层核医学制药区排风系统（铅皮包裹等）	1 套
		回旋加速器自屏蔽体排风管道（含活性炭过滤装置）、放化	1 套

		实验室密闭设施排风管道	
		衰变池区域排风管道	1 套
		活性炭过滤装置	5 个
		火灾报警仪	1 套
		灭火器材	2 套
负一层核素诊断区	实体防护	四周墙体+屋顶屏蔽	若干
		铅防护门、传递窗、防护窗等	若干
	场所设施	储源保险柜	2 个
		注射窗（40mmPb、20mmPb）	2 个
		手套箱（60mmPb、10mmPb，内含高效过滤装置）	2 个
		注射器防护提盒（5mmPb、20mmPb）	2 个
		注射器屏蔽套（2mmPb、8mmPb）	若干
		放射性核素防护铅罐（50mmPb、10mmPb）	2 个
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套
		去污工具组	2 套
		铅防护屏风（5mmPb、10mmPb）	各 3 扇
		视频监控系统、语音广播系统	1 套
		对讲装置	5 套
		门灯联锁-工作状态指示灯	2 套
		紧急止动装置	2 套
		医护人员通道、患者通道门禁系统	1 套
	警示标识	电离辐射警示标识	1 套
		监督区、控制区标识	若干
		患者就诊路径标识	若干
	监测设备	放射性活度计	2 台
		表面污染监测仪	2 台
		便携式X-γ辐射监测仪	1 台
	个人防护用品	个人剂量报警仪	4 台
		个人剂量计	1 人/套
		铅防护服、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜（0.5mmPb）	8 套
	放射性废物和废液	放射性废水衰变池	1 座
		放射性废物暂存间	1 间
		放射性废物暂存桶（10mmPb）	7 个
		放射性废物衰变铅箱/桶（10mmPb）	4 个
		独立下水系统及放射性排水管道铅皮防护	1 套
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干
		手套箱独立排风系统	1 套
		场所区域内通排风系统	1 套
		活性炭过滤装置	1 套
		火灾报警仪	1 套
		灭火器材	2 套
二层	实体防护	四周墙体+屋顶屏蔽	若干

核素 治疗 区		防护窗、铅防护门	若干
	场所设施	储源保险柜	1 个
		注射给药窗（5mmPb）	2 个
		自动分装柜（15mmPb，内含高效过滤装置）	1 台
		手套箱（15mmPb，内含高效过滤装置）	1 台
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套
		去污工具组	2 套
		视频监控系统、语音广播系统	1 套
		对讲装置	8 套
		铅悬挂防护屏/铅防护吊帘	1 副
		床侧防护帘/床侧防护屏	1 副
		门灯联锁-工作状态指示灯	2 个
		医护人员通道、患者通道门禁系统	1 套
	警示标识	电离辐射警示标识	若干
		监督区、控制区标识	若干
		患者治疗路径标识	若干
	安全设施	紧急止动装置	2 个
		自动闭门、防夹装置	2 个
		注射器防护提盒（2mmPb、6mm 有机玻璃）	若干
		注射器屏蔽套（2mmPb、15mm 有机玻璃）	若干
		转运铅罐/盒（10mmPb）	3 个
		储源铅罐/盒（5mmPb）	1 个
		移动注射车（2mmPb）	1 个
		移动铅屏风（2mmPb）	1 个
	监测设备	放射性活度计	1 台
		表面污染监测仪	2 套
		便携式X-γ辐射监测仪	1 台
	个人防护用品	个人剂量报警仪	4 台
		个人剂量计	1 人/套
		有机玻璃面罩、铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜（0.5mmPb）	6 套
	放射性废物和废液	放射性废水衰变池	1 座
		放射性废物暂存间1、放射性废物暂存间2	2 间
		放射性废物暂存铅桶（5mmPb）	9 个
		放射性废物衰变铅箱/桶（5mmPb）	6 个
		独立下水系统及放射性排水管道铅皮防护设施	1 套
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干
		手套箱独立排风系统	1 套
		场所区域内通排风系统	2 套
		活性炭过滤装置	2 套
		火灾报警仪	1 套
		灭火器材	2 套

三层 核素 治疗 区	实体防护	四周墙体+屋顶屏蔽	若干
		防护门、防护窗	若干
	场所设施	储源保险柜	1 个
		注射给药窗（40mmPb）	1 扇
		自动分装柜（40mmPb，内含高效过滤装置）	1 个
		手套箱（40mmPb，内含高效过滤装置）	1 个
		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	1 套
		去污工具组	2 套
		视频监控系统、语音广播系统	1 套
		对讲装置	7 套
		医护人员通道、患者通道门禁系统	1 套
	警示标识	电离辐射警示标识	若干
		监督区、控制区标识	若干
		患者治疗路径标识	若干
	安全设施	转运铅罐/盒（20mmPb）	1 个
		储源铅罐/盒（40mmPb、10mmPb）	2 个
	监测设备	放射性活度计	1 台
		表面污染监测仪	2 套
		便携式X-γ辐射监测仪	1 台
	个人防护用品	个人剂量报警仪	2 台
		个人剂量计	1 人/套
		铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜(0.5mmPb)	4 套
	放射性废物和废液	放射性废水衰变池	1 座
		放射性废物暂存间1、放射性废物暂存间2	2 间
		放射性废物暂存铅桶（10mmPb）	9 个
		放射性废物衰变铅箱/桶（1个5mmPb、5个10mmPb）	6 个
		独立下水系统及放射性排水管道铅皮防护	1 套
	其他	放射性表面去污用品和试剂	若干
		手套箱独立排风系统	1 套
		场所区域内通排风系统	2 套
		活性炭过滤装置	1 套
		除碘过滤装置+活性炭过滤装置	2 套
		火灾报警仪	1 套
		灭火器材	2 套

建议和要求

- 1、建设单位应加强与周边公众的沟通，做好解释协调工作。
- 2、落实本报告表中的各项辐射防护措施和安全管理制度的。
- 3、定期组织辐射工作人员参加辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的学习与考核，成绩合格单到期，应再次考核。
- 4、年度评估报告须按照《四川省核技术利用单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告》固定的格式进行编制；年度评估报告应签章后上传至全国核技术利用辐射安全申报系统。
- 5、定期检查辐射工作场所的电离辐射标志和电离辐射警告标志，工作状态指示灯，若出现松动、脱落或损坏，应及时修复或更换。
- 6、医院须重视控制区和监督区的管理。
- 7、射线装置在报废处置时，应当对射线装置内的高压射线管进行拆解和去功能化。
- 8、医院在更换辐射安全许可证之前，需登录全国核技术利用辐射安全申报系统，对相关信息进行修改。
- 9、若日后核医学科非密封放射性物质工作场所不再使用，须办理退役手续后，方可再行他用。
- 10、回旋加速器退役时，应对加速器部件测定辐射水平，高于豁免值的部件应作为放射性固体废物进行处理。
- 11、根据原环保部《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：
 - （1）建设单位可登陆生态环境部网站查询建设项目竣工环境保护验收相关技术规范（<http://www.mee.gov.cn>）。
 - （2）项目竣工后，建设单位应当如实查验、监测、记载建设项目环境保护设施的建设和调试情况，编制验收（调查）报告。
 - （3）本项目配套建设的环境保护设施经验收合格后，方可投入使用，未经验收或者验收不合格的，不得投入生产或者使用。
 - （4）除按照国家需要保密的情形外，建设单位应当通过其网站或其他便于公众知晓的方式，向社会公开下列信息：

①本项目配套建设的环境保护设施竣工后，公开竣工日期；

②对项目配套建设的环境保护设施进行调试前，公开调试的起止日期；

③验收报告编制完成后 5 个工作日内，公开验收报告，公示的期限不得少于 20 个工作日。

建设单位公开上述信息的同时，应当在建设项目环境影响评价信息平台（<https://cepc.lem.org.cn>）中备案，且向项目所在地生态环境主管部门报送相关信息，并接受监督检查。