

长治医学院附属和平医院

核医学科改建项目

环境影响报告表

（公示本）

建设单位：长治医学院附属和平医院

2021 年 10 月

环境保护部监制

长治医学院附属和平医院

核医学科改建项目

环境影响报告表

建设单位名称：长治医学院附属和平医院

建设单位法人代表（签章）：李红倬

通讯地址：山西省长治市延安南路 110 号

邮政编码：046000

联系人：郭学义

电子邮箱：hpyyybxx@163.com

联系电话：13720969998

目 录

表 1 项目基本情况.....	1
表 2 放射源.....	12
表 3 非密封性放射性物质.....	13
表 4 射线装置.....	15
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）.....	16
表 6 评价依据.....	17
表 7 保护目标与评价标准.....	19
表 8 环境质量和辐射现状.....	26
表 9 项目工程分析与源项.....	27
表 10 辐射安全与防护.....	51
表 11 环境影响分析.....	75
表 12 辐射安全管理.....	101
表 13 结论与建议.....	109
表 14 审批.....	112

表 1 项目基本情况

建设项目名称		核医学科改建项目			
建设单位		长治医学院附属和平医院			
法人代表	李红倬	联系人	郭学义	联系电话	13720969998
注册地址		山西省长治市延安南路 110 号			
项目建设地点		山西省长治市延安南路 110 号			
立项审批部门		/		批准文号	/
建设项目总投资（万元）	8000	项目环保投资（万元）	200	投资比例（环保投资/总投资）	2.5%
项目性质		<input type="checkbox"/> 新建 <input checked="" type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它			占地面积（m ² ） /
使用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I 类 <input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类 <input type="checkbox"/> IV 类 <input type="checkbox"/> V 类		
		<input type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I 类（医疗使用） <input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类 <input type="checkbox"/> IV 类 <input type="checkbox"/> V 类		
	非密封放射性物质	<input 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 type="checkbox"/> III 类		
	其它	/			
	1 项目概况 1.1 医院概况 长治医学院附属和平医院成立于 1946 年 7 月 1 日，前身是中国人民解放军晋冀鲁豫军区白求恩国际和平医院总院。医院占地面积 11 万平方米，建筑面积 22 万平方米，开放床位 1800 张，现有职工 2577 名，其中卫生技术人员 1979 名，高级职称人员 365 名，博士、硕士研究生 623 名，硕士生导师 123 名，博士生导师 2 名。 1.2 建设项目规模 1、项目名称：长治医学院附属和平医院核医学科改建项目。 2、建设单位：长治医学院附属和平医院。				

3、使用单位：长治医学院附属和平医院。

4、建设地点：长治市延安南路 110 号。

5、建设内容：将原核医学科及原放疗中心（单层建筑）进行改建，改建后核医学科一层总建筑面积 1739.84m²。

改建后的核医学科使用 II 类射线装置自屏蔽式小型回旋加速器 1 台，能量 10MeV，束流强度 100μA，用于制备 PET 用放射性药物（¹⁸F、¹¹C、¹³N）；使用 III 类射线 2 台，分别为 PET-CT 机 1 台，管电压 140kV，管电流 666mA，SPECT-CT 机 1 台，管电压 130kV，管电流 345mA；使用非密封放射性物质 ¹⁸F、¹¹C、¹³N、^{99m}Tc、¹⁵³Sm、⁸⁹Sr、¹²⁵I 粒子、¹³¹I，非密封放射性物质的日等效最大操作量为 1.98E+09Bq，属于乙级开放性工作场所。使用 V 类放射源 ⁹⁰Sr、⁶⁸Ge、²²Na。具体见表 1-1。

6、项目建设性质：本次为改建项目。

表 1-1 核技术利用项目清单

一、射线装置

序号	设备名称	型号	技术参数	射线装置类别	生产厂家
1	自屏蔽式小型回旋加速器	待定	能量 10MeV，束流强度 100μA	II	待定
2	PET-CT	待定	管电压 140kV，管电流 666mA	III	西门子
3	SPECT-CT	待定	管电压 130kV，管电流 345mA	III	西门子

二、非密封放射性物质

序号	核素名称	日最大等效操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	场所类别	治疗方式	备注
1	¹⁸ F	1.48E+8	3.70E+12	乙级	/	生产
2	¹¹ C	5.92E+05	5.92E+09			
3	¹³ N	2.22E+05	2.22E+09			
4	¹⁸ F	7.40E+06	1.85E+12		注射、门诊检查	使用
5	¹¹ C	2.96E+04	2.96E+09			
6	¹³ N	1.11E+04	1.11E+09			
7	¹³¹ I（甲状腺功能检查）	7.40E+04	1.85E+08		/	外购

8	^{131}I （甲亢）	1.85E+08	4.63E+11		口服、门诊治疗	外购
9	^{131}I （甲癌）	1.48E+09	2.22E+12		口服、住院治疗	外购
10	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1.85E+07	4.63E+12		注射、门诊检查	外购
11	^{153}Sm	3.70E+07	1.85E+11		注射、门诊检查	外购
12	^{89}Sr	4.44E+06	2.22E+10		注射、门诊检查	外购
13	^{125}I 粒子	7.40E+07	7.40E+11		粒子植入、住院治疗	外购

三、放射源

序号	核素名称	出厂活度 Bq*枚	暂存位置	放射源类别	备注
1	^{90}Sr	2.8E+8*1	源库	V 类	敷贴治疗
2	^{68}Ge	1.11E+8*1	源库	V 类	校准源
3	^{68}Ge	7.4E+7*2	源库	V 类	校准源
4	^{22}Na	3.7E+6*3	源库	V 类	校准源

注：（为出厂活度，出厂日期 1965.8.14，由原核医学科所有，核医学科改建后继续使用）

1.3 目的和任务由来

1.3.1 评价目的

（1）根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令 20 号），对该医院核技术利用建设项目进行环境影响评价，以掌握其辐射工作场所周围的辐射水平。

（2）对不利影响和存在的问题提出防治措施，把辐射环境影响减少到“合理达到的尽量低水平”。

（3）满足国家和地方生态环境部门对建设项目环境管理规定的要求，为该项目的辐射环境管理提供科学依据。

1.3.2 任务由来

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版），本项目应当进行环境影响评价，编制环境影响报告表，受建设单位的委托，核工业北京化工冶金研究院承担该项目的环境影

响评价工作。我单位通过资料调研、现场检测报告、评价分析，编制该项目环境影响报告表。

1.4 项目建设必要性

核技术已广泛的应用于医学领域，包括放射诊断、放射治疗、核医学诊断治疗。是现代医学诊疗不可或缺的技术手段，可以提高医院的诊断治疗水平。

医院原核医学建成较早，所使用核素仅为 ^{99m}Tc 、 ^{131}I 、 ^{125}I 、 ^{153}Sm ，从诊疗流程和诊疗项目上均已不能满足医院发展需要和患者治疗需求，因此医院决定对核医学科进行改建，从医院适应社会发展和服务患者角度本项目是必要的。

2 项目周边环境关系及项目选址情况

2.1 医院周边环境关系

长治医学院附属和平医院位于长治市城区延安南路 110 号，西临延安南路，背靠解放东街，南为城南东街，交通十分方便。长治医学院附属和平医院设有内科楼、外科楼、妇幼楼、体检中心、原核医学楼、原放疗中心（直线加速器、钴治疗机、后装治疗机及等候区）、医技保障系统和院内生活用房设施。地理位置图见附图 1，医院总平面布置图见附图 2。

医院核医学科位于医院南侧，核医学科东侧为广场，广场东为内科二病区，核医学科距离内科二病区大楼约 60m；南侧 2m 为医院围墙，围墙外为原晋城党校，现状无人，房屋为危房；西侧 2m 为垃圾中转站；北侧 30m 为建设中的妇幼大楼。整个核医学科为 2 层建筑，无地下室。一楼为核医学检查、治疗区；二楼为核医学科办公区（不涉及核素）。核医学科周边环境关系图见图 1.1。

2.2 核医学科平面布局

2.2.1 改建前

原核医学楼为两层结构，一层包括高压氧、核医学科和保卫法规科三个功能区域，二层为核医学摄碘率测定、 ^{90}Sr 敷贴， ^{125}I 体外诊断放免及其它科室办公用房，原放疗中心与核医学楼紧邻，位于其东侧。改建前平面布局图见附图 3。

2.2.2 改建后

本项目利用原核医学楼（两层结构）和原放疗中心（单层结构），二者融合为新核医学中心。

改建后核医学楼二层原有的甲功测定、 ^{90}Sr 敷贴治疗搬迁至改建后的一层， ^{125}I 体外诊断放免保留在二层原有位置。

原放疗中心直线加速器机房、钴治疗机机房、后装治疗机机房改建为核素制备区；原放疗中心办公区改建为 PET 诊疗区。一层原有保卫、法规科部分房间改建为 SPECT 诊疗区；一层原有 SPECT 诊疗区、保卫法规科部分房间，改建为 ^{131}I 诊疗区。

改建后的核医学科形成 4 个相对独立的功能区域，即：核素制备区、PET 诊疗区、SPECT 诊疗区、 ^{131}I 诊疗区。改建后核医学科平面布局图见附图 4。

2.3 选址合理性分析

改建后的核医学科核素使用场所集中设置在核医学科一楼，按照核素的使用种类分区域设置了相对独立的工作区域内，充分考虑了周围场所的防护与安全，以及患者就诊和临床应用的便利性，对公众影响较小。因而从辐射环境保护方面论证，本次核医学科的选址是可行的。

3 核技术利用及辐射安全管理现状

（1）辐射安全许可证

长治医学院附属和平医院于 2020 年 5 月 7 日重新申领了辐射安全许可证（晋环辐证[00465]，有效期至 2024 年 4 月 27 日），许可证的种类和范围包括：使用Ⅲ类、Ⅴ类放射源；使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所。具体见附件 2。

现有辐射安全许可证中放射源有两枚，分别为 ^{90}Sr 、 ^{192}Ir ；非密封放射性物质有四种，分别为 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{125}I 、 ^{153}Sm ；射线装置共有 26 台，其中Ⅱ类

射线装置 3 台（医用直线加速器 1 台、血管造影机 2 台），III类射线装置 23 台。

长治医学院附属和平医院现使用放射性同位素情况见表 1-1，现使用密封放射源情况见表 1-2，现使用射线装置情况见表 1-3。

表 1-1 长治医学院附属和平医院现使用放射性同位素一览表

序号	核素名称	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	场所等级	活动种类	工作场所位置	环评验收情况
1	^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$	1.11×10^8	5.328×10^{11}	乙级	使用	核医学楼 核医学科	已环评验收 晋环监字 (99)129 号
2	^{131}I	1.85×10^8	8.88×10^{10}		使用		
3	^{125}I	3.7×10^6	4.44×10^8		使用		
4	^{153}Sm	未开展	未开展		使用		

注：日等效最大操作量 (Bq) 按医院的实际情况表述。 ^{153}Sm 因药物停产，未开展。

表 1-2 长治医学院附属和平医院现使用密封放射源一览表

序号	核素名称	类别	放射源出厂活度 (Bq)	数量	出厂日期	工作场所	放射源编码	环评验收情况
1	^{90}Sr	V	2.8×10^8	1	1965.08.14	核医学科	0065SR147445	晋环监字 (99)129 号
2	^{192}Ir	III	3.7×10^{11}	1	2017.07.28	放疗科	0117IR000293	晋环审批函 [2018]514 号

表 1-3 长治医学院附属和平医院现使用射线装置一览表

序号	装置名称	射线装置类别	设备型号	工作场所	用途	环评验收情况
1	DR	III	TH 双板	门诊楼放射科 2 层 2 室	诊断	已环评验收， 环评批复见 附件 5 正常使用
2	数字胃肠机	III	TU-130DR	门诊楼放射科 2 层 5 室	诊断	
3	数字胃肠机	III	TU-6000FPD	门诊楼放射科 2 层 4 室	诊断	
4	乳腺机	III	6120	门诊楼放射科 2 层 3 室	诊断	
5	DR-X 线机	III	Ysio	门诊楼放射科 2 层 1 室	诊断	已环评验收， 环评批复见 附件 5 正常使用
6	多功能数字减影机 (DSA)	II	ALLurQ 1.2	核磁楼一层心脏导管室 (旧放射科机房)	诊断	
7	数字血管造影机 (DSA)	II	INFx-8000C	核磁楼三层放射介入室 (旧放射科机房)	诊断	
8	医用直线加速器	II	synergy	肿瘤病房楼放疗科地下一层 加速器机房	治疗	
9	双源 CT	III	Definition	CT 楼 CT 一室	诊断	
10	16 排螺旋 CT	III	TSX-101A	CT 楼 CT 二室	诊断	

11	床旁机	III	Sirius 130H	内科大楼 1 病区五层南	诊断	
12	床旁机	III	Sirius 125H	外科大楼 4 层 CCU 监护室	诊断	
13	床旁机（移动 C 臂）	III	ARCO-7	外科大楼 12 层手术 1 室	诊断	
14	专用摄影机（DR）	III	DHF-155H2	\	诊断	已环评验收， 环评批复见附件 5
15	SX-ATX 线摄影机	III	HITACHI	\	诊断	
16	模拟定位机	III	SL-ID	肿瘤病房楼放疗科地下一层模拟定位机房	诊断	登记表备案 2018140402 00000027， 2018140402 00000028
17	移动 C 臂	III	ARCADIS Orbic 3D	外科大楼 12 层手术 1 室	诊断	
18	车载 DR	III	DRX500	停车场	诊断	
19	骨密度仪	III	SGY-1	体检楼二层	诊断	
20	床旁机	III	Yz021-2	感染性疾病科	诊断	
21	小 C 臂	III	Cios Alpha	门诊大楼三层消化科	诊断	
22	口腔 CT	III	3deexam	CT 楼 1 层	诊断	
23	口腔全景	III	Kodak 8000C	门诊大楼六层口腔科	诊断	
24	移动（DR）	III	Sivius 130HP	门诊楼放射科 2 层	诊断	
25	移动（DR）	III	Sivius 130HP	门诊楼放射科 2 层	诊断	
26	床旁机	III	Yz021	感染性疾病科	诊断	

根据现场调研，长治医学院附属和平医院现有一个乙级非密封放射性物质工作场所，使用 4 种非密封放射性核素；26 台射线装置；2 枚放射源。

现有核技术利用情况汇总如下：

①原有一台钴-60 治疗机，已停用，编码 0097CO147411 的钴源已于 2017 年 11 月 28 日由成都中核高通同位素股份有限公司回收处理，治疗机现存放于医院原钴疗室内。该治疗机环评批复文件为晋环监字（99）129 号，2008 年 9 月通过了核技术应用项目竣工环保验收，附件 5。

②现有一个乙级非密封放射性物质工作场所，位于医院核医学楼核医学科，使用的核素有 ^{131}I 、 ^{125}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{153}Sm ，均为液态，已取得环评批复并通过环保竣工验收。环评批复文件为晋环监字（99）129 号，2008 年 9 月通过了核技术应用项目竣工环保验收，附件 5。

③现有 26 台射线装置，目前通过环评及竣工验收的射线装置有 15 台；

11 台Ⅲ类射线装置在山西省生态环境厅建设项目环境保护备案系统中备案。

④现使用 1 台后装机（含 1 枚铯-137 放射源，现编号为 0117IR00293），位于肿瘤病房负一层后装机房，晋环审批函[2018]514 号环评批复；1 台敷贴器（含一枚 Sr-90 源，编号为 0065SR147445），环评批复文件晋环监字（99）129 号，2008 年 9 月通过了核技术应用项目竣工环保验收。

（2）规章制度落实情况

为了保障辐射工作人员和公众的身体健康，杜绝环境辐射污染事故的发生，长治医学院附属和平医院成立了辐射安全防护管理机构，并制订相关的规章制度，且分解到各个涉核部门具体执行，主要包括《辐射安全和防护管理规定》、《放射性核素的订购、领取、保管、使用制度》、《安全管理制度》、《个人放射辐射防护管理制度》、《核医学科放射性废物管理制度》、《X 射线机运行安全操作规程》、《装置维护与维修制度》、《监测方案》、《监测仪表检测与刻度管理制度》、《辐射工作人员健康管理制度》、《辐射工作人员培训管理制度》、《剂量输出质量控制规程》、《X 射线诊断中断受检者防护规定》、《群众体检正当性规定》等，并严格按照规章制度执行。

（3）辐射工作人员培训

长治医学院附属和平医院制定有详细的辐射工作人员培训计划。目前，医院现有从事辐射相关工作人员共有 118 人，均参加了辐射安全防护知识和相关法规的培训，并通过了考核，取得了培训证书。

（4）年度评估报告

医院按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的要求，每年 1 月 31 日前向生态环境主管部门提交上一年度的年度评估报告，根据 2020 年度评估报告，医院辐射工作人员个人剂量检测结果满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，各项辐射安全设施运行良好，未发生辐射安全事故。

4 现有核医学科与改建后核医学科依托关系

本项目利用原核医学楼（二层结构）和原放疗中心（单层结构），二者融合为新核医学科。核医学科改建后，核素的诊疗流程、核素使用量、辐射防护情况

都有变化，在核医学科改建后原核医学科（一层）的所有功能将不再存在。所有核素的诊疗流程、使用量将按照改建后的核医学科核素诊疗流程、使用量进行。

改建后核医学科使用射线装置、核素等情况见改建前后对比表 1-4。

表 1-4 本项目核医学科改建前后所用射线装置、核素对比情况

一、射线装置							
序号	射线装置名称		改建前情况		改建后情况		对比情况
1	自屏蔽式小型回旋加速器		无		新增使用		新增使用
2	PET-CT		无		新增使用		新增使用
3	SPECT-CT		ECT（不带 CT 功能）		SPECT-CT（带 CT 功能）		更换设备
二、放射性同位素							
序号	核素名称		改建前		改建后		对比情况
			日等效最大操作量 Bq	年最大用量 Bq	日等效最大操作量 Bq	年最大用量 Bq	
1	^{99m} Tc		1.11E+8	5.328E+11	1.85E+07	4.63E+12	用量增加
2	¹³¹ I	甲亢	1.85E+8	8.88E+10	1.85E+08	4.63E+11	用量增加
		甲癌	/	/	2.22E+09	1.11E+12	新增项目
3	¹²⁵ I (放免)		3.7E+6	4.44E+8	3.7E+6	4.44E+8	位置和用量不变
4	¹⁵³ Sm		已批准，未开展		3.70E+07	1.85E+11	
5	¹⁸ F	制备	/	/	1.48E+8	3.70E+12	新增使用 核素
		使用	/	/	7.40E+06	1.85E+12	
6	¹¹ C	制备	/	/	5.92E+05	5.92E+09	
		使用	/	/	2.96E+04	2.96E+09	
7	¹³ N	制备	/	/	2.22E+05	2.22E+09	
		使用	/	/	1.11E+04	1.11E+09	
8	⁸⁹ Sr		/	/	4.44E+06	2.22E+10	
9	¹²⁵ I 粒子		/	/	3.70E+07	3.70E+11	
注： ¹²⁵ I(放免)在核医学科二楼继续使用，其使用位置和使用量不变，本次不对其进							

行评价。

三、放射源

序号	核素名称	出厂活度	使用位置		对比情况
			改建前	改建后	
1	⁹⁰ Sr	2.8E+8Bq	核医学二楼敷贴室	搬迁至核医学一楼敷贴室	搬迁后继续使用
2	⁶⁸ Ge	1.11E+8*1	无	PET/CT 机房，用于设备校准	新增
3	⁶⁸ Ge	7.4E+7*2	无		
4	²² Na	3.7E+6*3	无		

核医学科改建后原核医学科配备的辐射防护用品：1 个通风橱、1 个注射铅屏风、1 个 L 型铅屏风、5 件铅衣、2 个铅眼镜、2 台个人剂量报警仪、1 台辐射监测仪将继续投入使用。

5 原放疗中心退役情况

本项目改建涉及到将原放疗中心工作场所改建为回旋加速器制药区。经过现场调查，原放疗中心直线加速器机房内有 10MV 直线加速器一台，该设备现已不能使用，闲置在直线加速器机房内。

钴治疗机房内有钴治疗机一台，已停用，编码 0097CO147411 的钴源已于 2017 年 11 月 28 日由成都中核高通同位素股份有限公司回收处理，治疗机现存放于钴疗室内。退役过程监测报告见附件 6，根据该监测报告，钴机房放射源拆除后，周围环境监测值在（0.107~0.122）μSv/h 之间，处于环境本底值范围。

后装机房后装机已搬迁至肿瘤病房负一层后装机房使用，目前后装机房内无设备。后装机搬迁项目环评于 2018 年取得环评批复，晋环审批函[2018]514 号。

《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版），对核技术利用项目退役项目，使用 I 类、II 类、III 类放射源，使用 I 类、II 类（X 射线能量不高于 10 兆电子伏的加速器除外）存在污染的需要编制环境影响报告表，不存在污染的填写登记表后可直接退役。根据本次环评的现状监测结果（1#~6#）原放疗中心直线加速器机房、钴治疗机房、后装机房γ剂量率监测结果在（0.102~0.107）μGy/h 与长治市天然辐射本底无显著差异，属于当地

天然辐射本底水平。 β 表面污染监测结果在（0.002~0.004）Bq/cm²，低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中 β 表面污染监督区限制 0.4Bq/cm²。由现状监测结果可知原放疗中心已不存在污染，在填写登记表后可直接退役。

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	⁹⁰ Sr	2.8×10 ⁸ ×1 枚（为出厂活度，出厂日期 1965.8.14）	V 类	使用	敷贴	SPECT 诊疗区 敷贴室	源库	医院原有放射源搬迁至改建后核医学科使用
2	⁶⁸ Ge	1.11E+8*1 枚	V 类	使用	PET/CT 校准源	PET/CT 机房	源库	/
3	⁶⁸ Ge	7.4E+7*2 枚	V 类	使用	PET/CT 校准源	PET/CT 机房	源库	/
4	²² Na	3.7E+6*3 枚	V 类	使用	PET/CT 校准源	PET/CT 机房	源库	/

注：放射源放射性中子源，对其说明是何种核素以及产生的中子流强度（n/s）。

表 3 非密封性放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量(Bq)	日等效最大操作量(Bq)	年最大用量(Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	^{18}F	液态、低毒 $T_{1/2}=109.7\text{min}$	制备	1.48E+10	1.48E+8	3.70E+12	PET/CT 显像检查	简单操作	核素制备区	钨合金防护罐 包装置于热室 铅柜中
			使用	7.40E+09	7.40E+06	1.85E+12		很简单操作	PET 诊疗区	
2	^{11}C	液态 (低毒)	制备	5.92E+07	5.92E+05	5.92E+09		简单操作	核素制备区	钨合金防护罐 包装置于热室 铅柜中
			使用	2.96E+07	2.96E+04	2.96E+09		很简单操作	PET 诊疗区	
3	^{13}N	液态 (低毒)	制备	2.22E+07	2.22E+05	2.22E+09		简单操作	核素制备区	钨合金防护罐 包装置于热室 铅柜中
			使用	1.11E+07	1.11E+04	1.11E+09		很简单操作	PET 诊疗区	
4	^{99}Mo (贮存)	固态，中毒	贮存	1.85E+10	1.85E+7	/	淋洗 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	贮存	SPECT 诊疗区	母牛室(源库) 分装柜
5	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	液态、低毒 $T_{1/2}=6.02\text{h}$	使用	1.85E+10	1.85E+07	4.63E+12	SPECT/CT 显像检查	很简单 操作		
6	^{153}Sm	液态、中毒 $T_{1/2}=46.3\text{h}$	使用	3.70E+09	3.70E+07	1.85E+11	骨癌治疗			
7	^{89}Sr	液态、中毒 $T_{1/2}=50.53\text{d}$	使用	4.44E+08	4.44E+06	2.22E+10				

8	¹²⁵ I 粒子	固态，中毒 T _{1/2} =8.04d	使用	7.40E+09	7.40E+07	7.40E+11	粒子植入			粒子暂存室
9	¹³¹ I	液态、中毒 T _{1/2} =8.04d	使用	7.40E+05	7.40E+04	1.85E+08	甲状腺功 能检查	简单操作	¹³¹ I 治疗区	源库
				1.85E+09	1.85E+08	4.63E+11	甲亢治疗			
				1.48E+10	1.48E+09	2.22E+12	甲癌治疗			
核素制备区日等效最大操作量 1.49E+08Bq，PET 诊疗区日等效最大操作量 7.44E+06Bq， ¹³¹ I 核素诊疗区日等效最大操作量 1.67E+09Bq，SPECT 诊疗区日等效最大操作量 1.52E+08Bq，则医院改建后核医学科总的日等效最大操作量为 1.98E+09Bq。										
改建后的核医学科为 GB18871-2002 中的乙级非密封放射性物质工作场所（2×10 ⁷ Bq~4×10 ⁹ Bq）。										

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

序号	名称	类别	数量	型号	加速 粒子	最大能量(MeV)	束流强度 (μA)	用途	工作场所	备注
1	自屏蔽式小型回旋加速器	II	1	待定	质子	10	100	PET 用放射性药物	回旋加速器机房	拟购买

(二)X 射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析仪器等

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	西门子	140	666	检查	PET-CT 机房	拟购买
2	SPECT-CT	III	1	西门子	130	345	检查	SPECT-CT 机房	拟购买

(三)中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

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

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
废靶	固态	--	--	--	1 个/4-5 年	--	废物储藏间衰变贮存。	如不能满足解控要求，送贮至省放射性废物库。
放射性固体（靶废料、碳柱和滤膜、操作手套、口罩、棉签、试管、废离子交换树脂、活性炭等）	固态	¹⁸ F、 ¹¹ C、 ¹³ N	--	--	50kg	--	分类、分期收集于放射性废物桶中,转移至废物储藏间衰变贮存。	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，经监测满足核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021），要求和按医疗废物处理。
		^{99m} Tc	--	--	20kg	--		
		¹³¹ I	--	--	120kg	--		含 ¹³¹ I 核素的放射性固体废物暂存超 180 天，，经监测满足核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021），要求和按医疗废物处理。
放射性废水（药物合成、相关容器、器皿等冲洗、人员清洗产生废液及病人的尿液排泄物）	液态	¹⁸ F、 ¹¹ C、 ¹³ N、 ^{99m} Tc 等	--	--	93.75m ³	--	衰变池	储存满 30 天后可直接排放
		¹³¹ I	--	--	213.75m ³	--	碘衰变池	储存至少 180 天的要求，放射性废水监测结果经主管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放
剩余放射性药物	液态	¹⁸ F、 ¹¹ C、 ¹³ N	--	--	--	--	在铅或钨合金罐内放置	达到审管部门批准的清洁解控水平后处理。
放射性废气	气态	¹⁸ F、 ¹¹ C、 ¹³ N、 ¹³¹ I	--	--	--	--	经净化后排放	经高出本层建筑排气筒排入空气。

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

2. 含有放射性的废弃物要注明，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》，2015 年 1 月 1 日；</p> <p>(2)《中华人民共和国环境影响评价法》，2018 年 12 月 19 日；</p> <p>(3)《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月 1 日；</p> <p>(4)《建设项目环境保护管理条例》，国务院第 682 号令，2017 年 10 月 1 日；</p> <p>(5)《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2019 年修订），2019 年 3 月 2 日；</p> <p>(6)《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部令 20 号，2021 年 1 月 4 日。</p> <p>(7)《放射性同位素与射线装置安全与防护管理办法》，国家环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日；</p> <p>(8)《放射性废物安全管理条例》，2012 年 3 月；</p> <p>(9)关于发布《射线装置分类》的公告，环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日；</p> <p>(10)《关于发布放射性废物分类的公告》，环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月 1 日；</p> <p>(11)《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理报告制度的通知》，原国家环保总局，环发【2006】145 号；</p> <p>(12)《辐射安全与防护监督检查技术程序》环境保护部，2012 年 3 月；</p> <p>(13)《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版）；</p> <p>(14)《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函[2016]430 号）；</p> <p>(15)《山西省环境保护条例》（2017 年 3 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》（HJ 10.1-2016）；</p>

	<p>(2) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；</p> <p>(3) 《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）；</p> <p>(4) 《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）；</p> <p>(5) 《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-85）；</p> <p>(6) 《职业性外照射照射个人监测规范》（GBZ128-2019）；</p> <p>(7) 《10MeV～20MeV 范围内固定能量强流质子回旋加速器》（GB/T34127-2017）；</p> <p>(8) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；</p> <p>(9) 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）；</p> <p>(10) 《放射性同位素生产和加工中的辐射防护监测》（EJ748-1993）；</p> <p>(11) 《环境地表γ辐射剂量率测定规范》（GB/T14583-1993）；</p> <p>(12) 《辐射环境监测技术规范》（HJ/T61-2001）；</p> <p>(13) 《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ380-1989）；</p> <p>(14) 《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/T14056.1-2008）；</p> <p>(15) 《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）。</p>
其它	<p>（1）提供的与本项目相关的技术资料；</p> <p>（2）医院提供的核技术利用项目防护设计图纸及方案；</p> <p>（3）山西省环境天然贯穿辐射水平调查研究》（辐射防护，第 10 卷第 6 期，1990 年 11 月）。</p>

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

根据《辐射环境保护管理导则——核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》HJ10.1-2016 的规定，“以项目实体边界为中心，乙级非密封放射性物质工作场所的评价范围取半径 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”。

最终确定本项目评价范围为：放射性药物制备及使用场所四周墙体边界外 50m 区域。如图 7.1。

7.2 保护目标

环境保护目标为辐射工作人员及评价范围内公众成员。包括：医院从事本项目操作的职业人员及邻近机房的其它公众，其中职业人员包括核素制备区工作人员、PET 诊疗区医护人员、 ^{131}I 诊疗区医护人员、SPECT 诊疗区医护人员，公众包括核医学科附近其它科室工作人员、就诊病人及家属等。本项目主要环保目标分布情况见表 7-1。

表 7-1 本项目环境保护目标分布

名称	场所	方位	主要环境保护目标	与最近辐射源距离		人数	保护要求
				垂直	水平		
核素制备区辐射工作人员	回旋加速器控制室	回旋加速器北	回旋加速器制 药人员	0	5.5m	2 人	年剂量 限值 5mSv
	热室	内部		0	0.3m		
	质控室	通风橱前		0	0.3m		
	更衣室	回旋加速器机房东		0	7.8m		
PET 诊疗区辐射工作人员	PET 诊疗区各涉核素功能房间	内部	PET 诊疗区医护人员	0	0.3m	4 人	
^{131}I 诊疗区辐射工作人员	^{131}I 诊疗区各涉核素功能房间	内部	^{131}I 诊疗区医护人员	0	0.3m	2 人	

SPECT 诊疗区 辐射工 作人员	SPECT 诊疗 区各涉核素 功能房间	内部	SPECT 诊疗区 医护人员	0	0.3m	3 人	
核医学 科工作 人员	核医学科办 公区	楼上	核医学科工作 人员	3m	0m	14 人	
核医学 科周边 科室非 辐射工 作人 员	洗衣房	东北	洗衣房内工作 人员	0	30m	3 人	年剂量 限值 0.1mSv
	学术交流中 心	东北	学术交流中心 内工作人员	0	30m	5 人	
	高压氧	西	高压氧工作人 员	0	1m	3 人	
	CT 室	西北	CT 室工作人员	0	28m	2 人	年剂量 限值 5mSv
	妇幼大楼 (建设中)	北	妇幼大楼建成 后, 内部工作人 员、病人	0	30m	约 100 人	年剂量 限值 0.1mSv
核医学 科周边 非医院 人员	过道	北	核医学科北侧 过道经过的人 员	0	1m	流动 人群	
	广场	西	核医学科西侧 广场经过、逗留 的人员	0	3m	流动 人群	
	党校	南	核医学科南侧 党校内人员	0	3m	现状 无人, 房屋 废弃	

7.3 评价标准

7.3.1、剂量限值

(1) 标准限值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002), 本项目辐射工作人员及公众的年照射剂量限值, 见表 7-2:

表 7-2 照射剂量限值

	剂量限值
职业照射 剂量限值	<p>工作人员所接受的职业照射水平不应超过下述限值：</p> <p>①由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv；</p> <p>②任何一年中的有效剂量，50mSv；</p>
公众照射 剂量限值	<p>实践使公众有关关键人群组的成员所受的平均剂量估计值不应超过下述限值：</p> <p>①年有效剂量，1mSv；</p> <p>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。</p>

（2）项目管理限值

结合本项目的实际情况，本项目管理限值具体见表 7-3。

表 7-3 本项目剂量管理限值

序号	评价项目		评价指标
1	项目剂量管理 限值	职业人员（取 1/4）	$\leq 5\text{mSv/a}$
		公众成员（取 1/10）	$\leq 0.1\text{mSv/a}$

7.3.2 表面放射性污染的控制

工作人员体表、内衣、工作服以及工作场所的设备和地面等表面放射性污染的控制应遵循《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 B 第 B2 款所规定的限制要求。

第 B2 款 表面污染控制水平

第 B2.1 款 工作场所的表面污染控制水平具体见表 7-4。

表 7-4 工作场所的放射性表面污染控制水平 单位: Bq/cm²

表面污染		β放射性物质
工作台、设备、墙壁、地面	控制区 1)	4×10
	监督区	4
工作服、手套、工作鞋	控制区 监督区	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 ⁻¹
1) 该区内的高污染子区除外		

7.3.3 非密封源工作场所的分级

非密封源工作场所的分级应遵循《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 C 的规定进行。

第 C1 款, 应按表 7-5 将非密封源工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级。

表 7-5 非密封源工作场所的分级

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

放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量(Bq)与该核素毒性组别修正因子的积除以与操作方式有关的修正因子所得的商。放射性核素的毒性组别修正因子及操作方式有关的修正因子分别见表 7-6 和表 7-7。

表 7-6 放射性核素毒性组别修正因子

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

表 7-7 操作方式与放射源状态修正因子

操作方式	毒性组别修正因子			
	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
很简单的操作	100	10	1	0.1
简单操作	10	1	0.1	0.01
特别危险的操作	1	0.1	0.01	0.001

7.3.4 放射性物质向环境排放的控制

1、放射性废液

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）第 7.3.3 款规定，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 倍半衰期（含碘-131 核素的暂存超过 180 天），监测结果经审管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10Bq/L。

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 8.6.2 款规定，不得将放射性废液排入普通下水道，除非经审管部门确认是满足下列条件的低放废液，方可直接排入流量大于 10 倍排放流量的普通下水道，并应对每次排放做好记录：

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

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

主要放射性核素 ALI_{\min} 值见表 7-8 所示。

表 7-8 各放射性核素 ALI_{min} 值一览表

参数 \ 核素	¹¹ C	¹⁸ F	^{99m} Tc	¹³¹ I
ALI _{min} (Bq)	2×10 ⁸	2×10 ⁹	3×10 ⁹	1×10 ⁶

2、放射性废气

参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）第 5.2.3 款：合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5 m/s，排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。

3、放射性固废的管理

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）第 7.2.3 款规定，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/cm²、β 表面污染小于 0.8Bq/cm² 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：a) 所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；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。

不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。

固体放射性废物的储存和处理应安排专人负责，并建立废物储存和处理台账，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、出库时间和监测结果等信息。

7.3.5 场所剂量当量率

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）第 6.1 款：（1）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 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h。

（2）放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结

构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 $25\mu\text{Sv/h}$ 。

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

7.3.6 非放射性污染物排放标准限值

根据《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》（GBZ2.1-2019），工作场所空气中 O_3 的最大容许浓度 0.3mg/m^3 ， NO_2 的时间加权容许浓度为 5mg/m^3 ，短时间接触容许浓度为 10mg/m^3 。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 环境质量和辐射现状

8.1.1 监测内容

8.1.2 监测方法

8.1.3 监测仪器

8.1.4 监测时间与环境条件

8.1.5 质量保证措施

8.1.6 监测结果及分析

8.2 辐射环境现状评价

表 9 项目工程分析与源项

9.1 工程设备和工艺分析

9.1.1 核医学科改建后核素使用规模

本项目核医学科改建后主要包括：核素制备区、PEC/CT 诊疗区、 ^{131}I 诊疗区、SPECT 诊疗区，均位于改建后的核医学科一楼。各工作场所具体建设规模如下：

1、核素制备区、PEC/CT 诊疗区

核素制备区使用 1 台自屏蔽式小型回旋加速器，使用 2 个合成热室、1 个分装热室。生产 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 供医院 PET/CT 检查使用。由于 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 的半衰期非常短，为了满足每天排在后面的病人用药量需求，每天制备 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 的量按照当日 PET/CT 检查用量的 2 倍进行生产。

PET/CT 检查配有 1 台 PET/CT，使用放射性核素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 进行显像检查， ^{18}F 日最大门诊量 20 人，年门诊量最大约为 5000 人，单人最大用药量约为 $3.70\text{E}+08\text{Bq/人}$ ； ^{11}C 日最大门诊量 2 人，年门诊量最大约为 200 人，单人最大用药量约为 $1.48\text{E}+07\text{Bq/人}$ ； ^{13}N 日门诊量 1 人，年门诊量最大约为 100 人，单人最大用药量约为 $1.11\text{E}+07\text{Bq/人}$ 。

2、 ^{131}I 核素诊疗区

^{131}I 核素诊疗区使用 ^{131}I 进行甲状腺功能检查、甲亢治疗和甲癌治疗。甲状腺功能检查日最大门诊量 10 人，年门诊最大约 2500 人，单人最大用药量 $7.40\text{E}+04\text{Bq/人}$ ；甲亢治疗日最大门诊量 5 人，年门诊最大约 1250 人，单人最大用药量 $3.70\text{E}+08\text{Bq/人}$ ；甲癌治疗日最大治疗 2 人，年治疗最大约 300 人，单人最大用药量 $7.40\text{E}+09$ 。

3、SPECT 诊疗区

SPECT 诊疗区配有 1 台 SPECT/CT，使用 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ， ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器的活度为 $1.85\times 10^{10}\text{Bq}$ 。

使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行显像检查，日最大门诊量约为 20 人，年门诊最大约 5000 人，单人最大用药量约为 $9.25\text{E}+08\text{Bq/人}$ 。

使用 ^{153}Sm 治疗骨癌，日最大治疗人数 2 人，年治疗最大约 100 人，单人最大用药量 $1.85\text{E}+09\text{Bq/人}$ ；使用 ^{89}Sr 治疗骨癌，日最大治疗人数 3 人，年治疗最

大约 150 人，单人最大用药量 $1.48\text{E}+08\text{Bq/人}$ 。

使用放射源 ^{90}Sr 敷贴治疗皮肤病，日最大治疗人数 2 人，年治疗人数 500 人。

SPECT/CT 兼做 ^{125}I 粒子植入手术，SPECT 诊疗区设置 1 间 2 人间粒子植入病房，每次最多接诊 2 人，年治疗人数 200 人，单人最大用药量为 $1.850\text{E}+09\text{Bq/人}$ ，年治疗约为 120 人。

9.1.2 核医学科非密封放射性物质工作场所分级

根据《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函[2016]430 号），满足以下特点的放射性药品使用场所，应当作为一个单独场所进行日等效操作量核算：（1）有相对独立、明确的监督区和控制区划分；（2）工艺流程连续完整；有相对独立的辐射防护措施。

和平医院核医学科改建后共包括四个工作区域，分别为核素制备区，PET 诊疗区， ^{131}I 核素诊疗区，SPECT 诊疗区。

由于上述四个区域部分人员通道共用，故本项目将核医学科核素制备区，PET 诊疗区， ^{131}I 核素诊疗区，SPECT 诊疗区作为整体来核定其非密封放射性物质工作场所工作等级。

根据医院提供的预估工况下其使用的正电子药物以及使用的其他放射性药物的日最大操作量和年用量见表 9-1。

表 9-1 核医学科用药量一览表

工作场所	核素	单人最大用药量 (Bq)	日最大门诊量 (人)	日最大操作量 (Bq)	年门诊量 (人)	年最大用量 (Bq)
核素制备区 (制药)	^{18}F	/	/	$1.48\text{E}+10$	/	$3.70\text{E}+12$
	^{11}C	/	/	$5.92\text{E}+07$	/	$5.92\text{E}+09$
	^{13}N	/	/	$2.22\text{E}+07$	/	$2.22\text{E}+09$
PET 诊疗区 (使用)	^{18}F	$3.70\text{E}+08$	20	$7.40\text{E}+09$	5000	$1.85\text{E}+12$
	^{11}C	$1.48\text{E}+07$	2	$2.96\text{E}+07$	200	$2.96\text{E}+09$
	^{13}N	$1.11\text{E}+07$	1	$1.11\text{E}+07$	100	$1.11\text{E}+09$

¹³¹ I 核素治疗区	¹³¹ I（甲状腺功能检查）	7.40E+04	10	7.40E+05	2500	1.85E+08
	¹³¹ I（甲亢）	3.70E+08	5	1.85E+09	1250	4.63E+11
	¹³¹ I（甲癌）	7.40E+09	2	1.48E+10	300	2.22E+12
SPECT 诊疗区	^{99m} Tc	9.25E+08	20	1.85E+10	5000	4.63E+12
	¹⁵³ Sm	1.85E+09	2	3.70E+09	100	1.85E+11
	⁸⁹ Sr	1.48E+08	3	4.44E+08	150	2.22E+10
	¹²⁵ I 粒子	3.7E+09	2	7.40E+09	200	7.40E+11

根据《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函[2016]430号），放射性药品生产中分装、标记等活动视为“简单操作”，医疗机构¹⁸F（¹¹C和¹³N未给出，本次环评参照¹⁸F执行）、^{99m}Tc、¹²⁵I粒子的使用视为“很简单的操作”，利用⁹⁹Mo-^{99m}Tc发生器淋洗^{99m}Tc药物时，⁹⁹Mo的操作视为“贮存”，使用¹³¹I核素相关活动视为“简单操作”。经过毒性组别及核素的操作方式双重修正后，本项目核医学科非密封放射性物质工作场所分级详见表9-2。

9-2 核医学科核素日等效最大操作量及工作场所分级一览表

工作场	核素	日最大操作量 (Bq)	毒性组别 修正因子	操作方式与放射源状态 修正因子	日等效最大操作量 (Bq)
核素制备区	¹⁸ F (制备)	1.48E+10	低毒, 0.01	简单的操作（液体） 1	1.48E+8
	¹¹ C (制备)	5.92E+07	低毒, 0.01	简单的操作（液体） 1	5.92E+05
	¹³ N (制备)	2.22E+07	低毒, 0.01	简单的操作（液体） 1	2.22E+05
	小计				1.49E+08
PET 诊疗区	¹⁸ F (使用)	7.40E+09	低毒, 0.01	很简单的操作（液体） 10	7.40E+06
	¹¹ C (使用)	2.96E+07	低毒, 0.01	很简单的操作（液体） 10	2.96E+04
	¹³ N (使用)	1.11E+07	低毒, 0.01	很简单的操作（液体） 10	1.11E+04

	小计				7.44E+06
¹³¹ I 核素诊疗区	¹³¹ I (甲状腺功能检查)	7.40E+05	中毒, 0.1	简单操作 (液体), 1	7.40E+04
	¹³¹ I (甲亢)	1.85E+09	中毒, 0.1	简单操作 (液体), 1	1.85E+08
	¹³¹ I (甲癌)	1.48E+10	中毒, 0.1	简单操作 (液体), 1	1.48E+09
	小计				1.67E+09
SPECT 诊疗区	⁹⁹ Mo (贮存)	1.85E+10	中毒, 0.1	贮存, 100	1.85E+7
	^{99m} Tc	1.85E+10	低毒, 0.01	很简单的操作 (液体) 10	1.85E+07
	¹⁵³ Sm	3.70E+09	中毒, 0.1	很简单操作 (液体) 10	3.70E+07
	⁸⁹ Sr	4.44E+08	中毒, 0.1	很简单操作 (液体) 10	4.44E+06
	¹²⁵ I 粒子	7.40E+09	中毒, 0.1	很简单操作 (固体) 10	7.40E+07
	小计				1.52E+08

核素制备区日等效最大操作量 1.49E+08Bq, PET 诊疗区日等效最大操作量 7.44E+06Bq, ¹³¹I 核素诊疗区日等效最大操作量 1.67E+09Bq, SPECT 诊疗区日等效最大操作量 1.52E+08Bq, 则医院改建后核医学科总的日等效最大操作量为 1.98E+09Bq。

由上述非密封放射性工作场所的日等效最大操作量可知, 改建后的核医学科为 GB18871-2002 中的乙级非密封放射性物质工作场所 ($2 \times 10^7 \text{Bq} \sim 4 \times 10^9 \text{Bq}$)。

9.1.3 核素制备区

1、工程设备

(1) 回旋加速器工作原理

回旋加速器的基本原理是带电粒子在磁场中作圆周运动, 采用交变电极的方法, 使粒子在较低电压下通过多次加速获得很高的动能。最后当带电粒子加速到一定速度到达外围轨道时, 粒子束被带相反电荷的偏转板引出 D 型盒外, 并通过靶窗轰击靶材料产生核反应而生产放射性核素。

引出到加速器外部的入射加速带电粒子束与其路径上的靶核碰撞，入射粒子被靶核吸收，激活的靶核发生核反应发射出中子、质子或 α 粒子，同时可产生具有一定阈能的正电子放射性核素，放射性核素的产率取决于束流强度、被轰击靶物的量、核反应截面及轰击时间。通过改变靶物质可获得不同的放射性核素。

医院 ^{18}F 和 ^{13}N 的生产用液体靶，用的核反应分别为 $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ 、 $^{16}\text{O}(\text{p}, \alpha)^{13}\text{N}$ ， ^{11}C 的生产用气体靶，反应为 $^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{11}\text{C}$ 。打靶前自动往靶容器里加注液靶（或气靶），根据设置参数，打完靶后所产生的放射性药物自动地通过输送管道输送到热室进行化学合成。

（2）设备组成及技术参数

本项目使用一台自屏蔽式小型回旋加速器（型号待定），主要工作组件包括磁体、全内置离子源、粒子加速真空腔、加速电极、束流引出系统、射频系统、冷却系统、真空系统、靶系统、完全自屏蔽系统以及远程全自动控制工作站。设备具体参数见表 9-3。

表 9-3 回旋加速器技术参数

项目	有关参数
型号	待定
加速质子能量	10MeV
最大束流	100 μA
制备核素	^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N

2、工艺流程及产污环节

（1）核素制备

提前一天根据本院预约的检查人数、用量，向回旋加速器室预定安排第二天的放射性药物生产量。

核素制备前对回旋加速器进行调试，设置相应参数。回旋加速器运行期间，工作人员不进入加速器室内，仅在加速器控制台操作。

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。用 $^{16}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ 先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，将制备的核素通过专用防护管道系统，在氦气推动下输送至合成热室的药物合成器内。

本项目制备 ^{18}F 质子束流单束流轰击时长最大为 40min。制备 ^{11}C 质子束流单束流轰击时长最大为 30min。制备 ^{13}N 束流强度为 100uA、质子束流单束流轰击时长最大为 20min。加速器日最大出束时间为 1.5h。

回旋加速器在生产核素的同时伴随产生大量中子及粒子，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原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。另外回旋加速器生产前洗靶期间会产生少量废液，加速器长期运行会产生废靶。

（2）药物合成

放射性药物的合成由计算机控制的自动化程序完成。合成系统包括合成热室以及相应的仪器设备。

回旋加速器打靶产生的放射性物质输送至合成热室内的容纳合成装置，合成装置内有合成模块盒，提前将吸收液及收集瓶装入模块盒中，操作人员在热室操作台操作计算机，系统自动完成药物制备。

^{18}F （以 F-FDG 为例），回旋加速器所制备的 ^{18}F 经专用防护管道传送到 FDG 化学合成模块，采用的是氢核氟代标记，加速器生成的 ^{18}F 经阴离子交换柱（该交换柱已在合成前经处理转化为碳酸盐形式）—被 HCO_3^- 捕获，被 2mL K_2CO_3 溶液和穴醚（相转移催化剂）的乙腈溶液（K222）洗脱至反应管内，富集水得以再生重复使用。在反应管内加热与乙腈溶液共沸，除水二次，待反应管冷却后向残留物中加入 2mL 三氟甘露糖的乙腈溶液，加热发生亲核反应生成乙酰化的 ^{18}F -FDG，再一次加热除乙腈，待冷却后，用 10mL 水将乙酰化的 ^{18}F -FDG 转移至 C18 柱上，再用 20 mL 水清洗 C18，除去少量的 ^{18}F -乙腈溶液（K222），再加入 1mL 适当浓度的 NaOH 溶液，柱水解得到粗产品，适量水淋洗 C18 柱，水解完成后，碱性的 FDG 溶液与中和溶液混合中和。粗产品经过 IC-H 柱、 Al_2O_3 柱、C18 柱纯化后，再经无菌滤

膜得最终产品 ^{18}F -FDG（热室），用少量水漂洗套件、各处理室和过滤器，以回收管线中的残余 FDG，并将这部分 FDG 抽入最终产物瓶中。

^{11}C （以胆碱注射液为例）：用碘代甲烷模块将 $^{11}\text{CO}_2$ 转化成 $^{11}\text{CO}_2$ 碘代甲烷，与前体 N-N 二甲基乙醇胺反应生成 ^{11}C 胆碱。 ^{11}C 转化成 $^{11}\text{CH}_3\text{I}$ ， $^{11}\text{CH}_3\text{I}$ 与前体在 C18 柱上反应，乙腈和水淋洗 C18 柱，产品被 CM 柱吸附， ^{11}C —胆碱用生理盐水从 CM 柱上被洗脱，分装；分装时纯化好的药液需经过除菌过滤工艺进行除菌，使用自动分装仪进行自动分装测量。

^{13}N （以 N- $\text{NH}_3\cdot\text{HO}_2$ 为例）：将 150-200mg 前体和 250-300mgNaOH 共同装入一个密封的反应管里，另一试管加入 5ml 无菌热源生理盐水，两管之间用聚乙烯管连结，并用一根无菌的聚乙烯管通过 0.22 微米的微孔滤膜接入无菌收集瓶中。安装完毕后，有 He 气加压将轰击后的靶水从靶室内传入反应管中，4min 后还原反应生成，在收集瓶中得到 N- $\text{NH}_3\cdot\text{HO}_2$ 生理盐水溶液。

药物合成过程中核素衰变发出 β^+ 射线，发生正电子湮灭而产生 γ 射线；反应产生少量放射性废液、另外对相关容器、器皿等冲洗产生一定的放射性废液，合成室生产药物的逸散及水蒸气可能排放含放射性核素的废气。

（3）药物质控、转运、分装

由合成热室合成后的药物自动传送到分装柜，在热室分装室自动测量产品活度。质检药品经自动分装至钨合金铅罐内，再通过传递窗口传送至质控室，质控室设一通风橱，工作人员在通风橱内将待检药物用毛细管吸取微量抽检样品，检验药物的 pH 值和形状，经质控合格后的药物按病人需要量由热室分装室内自动分装至装有防护套的注射器内，再置于铅防护罐内。

工作人员将分装好的药品防护罐从分装柜取出后，通过热室侧的传递窗口传至质控室，在通过质控室侧的物流窗至配备药物室分装柜，按病人用量分装好后送至注射室注射。

药物质控、分装、转运过程中核素衰变发出 β^+ 射线，发生正电子湮灭产生 γ 射线；操作过程中，可能会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、

手套等产生放射性沾污，造成放射性表面污染；药物质检过程中相关容器、器皿等的冲洗会产生一定量的放射性废液；通风橱药物的逸散会排放含放射性核素的废气；作业产生废棉签、口罩、手套等放射性固废。

（4）冷却系统

回旋加速器打靶时需要提供水冷却，本项目采用去离子冷却水，封闭循环使用，不外排。去离子水制备过程中会产生一定的废离子交换树脂。

以上整个过程（打靶、合成、分装）为计算机全自动控制，工作人员不参与操作，只是监控整个过程的执行情况（其中打靶过程人员位于加速器控制台，合成过程人员位于热室操作台、分装时人员位于分装热室前）；在质控环节由工作人员在通风橱内操作，用注射器取出待检药物进行检验。

回旋加速器制药流程及产污环节见图 9-3 所示。

3、放射性药物制备操作流程

（1）加速器室操作流程

检查、准备：首先操作人员进入更衣室更换工作服和拖鞋、佩戴个人剂量仪，记录读数变化。然后进入气瓶间、设备间及控制室、回旋加速器室等分别查验气瓶压力、加速器水冷机组工作状态、加速器室温度、湿度、空压机压力等，并进行记录。

打靶：检查准备工作完成后，操作人员至回旋加速器控制室，启动系统自动清洗靶和用纯氦吹干药物传递管道，注入靶物质，启动回旋加速器进行自动打靶。并在回旋加速器控制室记录打靶时间和靶电流、打靶期间回旋加速器室辐射探头读数、回旋加速器运行时水冷机冷却水水温。结束打靶，传靶，观察整个打靶过程中回旋加速器状态是否正常。如无需连续打靶，依次关闭回旋加速器、查验气体压力是否正常，是否换气瓶。

（2）药物合成操作流程

首先放化实验室将当天制备药物的耗材准备好，至合成热室查验记录合成热室环境检测探头的读数，检查各试剂、管路、打开紫外灯灭菌，安装试剂、管道，检查核对，然后关闭模块箱，准备传靶；打开相应模块程序，开始合成，在合成热室操作台记录热室环境检测探头剂量读数，记录合成中间

体总剂量（R2），合成结束，记录合成的产量和效率，清洗合成模块，整理记录并清理现场。

（3）药物质控、分装操作流程

首先分装热室按生产指令单准备分装用注射剂瓶和防护罐（铅罐或钨合金罐），并清理工作台，确定药物浓度；分装之前，观察药物性状，抽取少量药物传递到质控室进行检验；工作人员在正面 60mmPb（其余面 50mmPb）的铅通风橱内进行药物分装及活度测量，工作人员将正电子药液抽取到带防护套的一次性针管里，达到一定体积后，用活度计测量所抽吸的药液活度是否满足活度要求，若不满足，再次抽吸调整药量直到符合要求位置，有经验的熟练护士一般能够一次性成功，不熟练的护士需要反复一至两次。每次分装保守按 1min 估算；完成分装任务后清理核素制备区现场。

9.1.4 PET 诊疗区

1、工作原理

PET/CT（Positron Emission TOMOgraphy and Computer TOMOgraphy），全称正电子发射断层与计算机断层诊断技术，是在 PET（Positron Emission TOMOgraphy）和 CT (Computer TOMOgraphy) 的基础上发展起来的新设备，充分结合了 PET 高灵敏度和 CT 高分辨率的优势。其原理是通过正电子核素或其标记的示踪剂，示踪人体内特定生物物质的生物活动，采用多层、环形排列于发射体周围的探头，由体外探测正电子示踪剂湮灭辐射所产生的光子，然后将获得的信息，通过计算机处理，以解剖影像的形式及其相应的生理参数，显示靶器官或病变组织的状况，藉此诊断疾病，又称为生化显像或功能分子显像，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；同时结合应用高档多排 CT 技术进行精确定位，可精确地提供靶器官的解剖和功能双重信息，并能够独立完成多排螺旋 CT 的临床显像，大大提高临床使用价值。

正电子发射是放射性核素衰变的方式之一。这类核素在自发的从不稳定状态向基态衰变过程中，从核内释放出与普通电子一样但电荷相反的粒籽，即正电子。正电子是一种反物质，从核内放出后很快与环境中自由电子碰撞湮灭，转化为一对方向相反、能量为 0.511MeV 的 γ 光子。如果在这对光子飞行方向上对置一对探测器，便可以几乎同时接受到这两个光子，并可推定光子发源（即正电子发射）点在两探头间连线上。通过环绕 360°排列的多组配对探头，经探头对之间符合

线路检验判定每只探头信号时间耦合性，排除其他来源射线的干扰，得到探头对连线上的一维信息，再用滤波反投射方式，将信号按探头对的空间位置向中心点反投射，便可形成与探头组连线轴平行的断层面正电子发射示踪剂分布图像。这种探测方式一次只反映一个层面的信息。实用中常用多层排列的探头对，配合层间符合线路，以利探测并重建更多层面的图像。

2、工作流程及产污环节分析

注射人员手持带防护套的一次性注射器，在 PET/CT 注射窗口为病人注射。注射完毕后的一次性注射器等沾有放射性核素的固废放入 PET/CT 专用废物铅桶内，注射器防护套回收重复利用。每次注射过程中近距离接触正电子药物的时间保守按 1min 估算。

病人根据注射的正电子药物特性，在 PET/CT 注射后候诊室候诊（一般注射 ^{18}F -FDG 后需等待约 40min），待药物代谢至靶器官，进入 PET/CT 扫描室，经医护人员通过对讲装置指导摆位或现场指导摆位后，接受 PET/CT 的扫描，每次扫描约 10~20min。扫描完成后，病人进入留观室观察约半小时，无碍后由病人专用通道离开。

PET/CT 显像检查流程如下：

①成罐的正电子药物由 PET 诊疗区专职工作人员接收，暂存在配备药物室的通风橱内；

②注射人员将药物分装后为病人注射；

③病人在 PET/CT 注射后候诊室候诊 40 分钟；

④到 PET/CT 检查室开始扫描，扫描 10~20 分钟不等；

⑤检查完后，病人在留观室留观约半小时，无碍后离开。

PET/CT 显像检查具体工艺流程及产污环节见图 9-5

3、核素特性

本项目 PET/CT 使用的放射性核素的特性见表 9-4。

表 9-4 PET/CT 使用放射性核素特性一览表

核素种类	半衰期	正电子最大能量 MeV	光子能量 MeV	铅半值层 mm	混凝土半值层 mm	空气比释动能率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$
^{18}F	109.8min	0.63	0.511	16.6	176	0.143
^{11}C	20.39min	0.96	0.511	16.6	176	0.148
^{13}N	10.0 min	1.19	0.511	16.6	176	0.148

注：数据引自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）

9.1.5 ^{131}I 核素诊疗区

1、工作原理

I 是合成甲状腺激素的物质之一，放射性的 ^{131}I 也能被摄取并参与甲状腺激素的合成，其被摄取的速度与甲状腺功能密切相关。将 ^{131}I 引入受检者体内，利用体外探测器测定甲状腺部位放射性计数的变化，可以了解 ^{131}I 被甲状腺摄取的情况，从而判断甲状腺的功能。

^{131}I 用于甲状腺方面疾病的治疗时，甲状腺疾病患者口服的 ^{131}I 药剂大都聚集在甲状腺内； ^{131}I 衰变发射的 β 射线在组织内平均射程仅为 1mm，因此 β 粒子的能量几乎全部释放在甲状腺组织内，对甲状腺周围的组织和器官影响较小。甲亢患者，如给予适当剂量的 ^{131}I ，则可利用其放射性“切除”部分甲状腺组织而又保留一定量的甲状腺组织，达到治疗目的，使甲状腺功能恢复正常；分化型甲状腺癌患者，手术切除癌变甲状腺组织后，可用 ^{131}I 去除残留的甲状腺组织，或者利用 ^{131}I 显像发现分化型甲状腺癌的转移灶，对其复发或者转移进行诊断。

2、工作流程及产污环节分析

医院 ^{131}I 药物由专业供货商按需供货，由核医学科 ^{131}I 治疗区专人接收、登记，暂存在 ^{131}I 诊疗区的源库。

医院订购的药物一般为成罐药剂，医院配备 ^{131}I 自动分装仪进行药物分装及活度测量，分装时工作人员位于操作台，由电脑设置好参数后，由自动分装仪自动分装。

分装好的药物自动传送至服药窗口，由工作人员通过对讲指导病人服药。甲亢病人服药后，进入甲亢留观室留观一段时间，无碍后由甲亢病人专用通道离开。甲癌服药后，进入各自病房住院观察治疗。甲癌每周开展一次，病人统一安排在

周一上午进行服药；甲亢每周开展一至两次，病人统一安排在下午进行服药。

¹³¹I 核素治疗具体过程如下：

①病人提前预约，前一天进行吸碘率测试，确定病人用药量，向厂家预约定药；

②当天由厂家按需供药，由核医学科专人负责药物接收与登记，并送至 ¹³¹I 诊疗区的储源室暂存；

③开诊后，工作人员将装有药物的铅罐放置通风橱内，分装药物，并指导病人服药；

④病人服药后将一次性纸杯弃入铅废物桶内，甲亢病人进入甲亢留观室留观一段时间，无碍后由甲亢病人专用通道离开，甲癌病人进入各自病房住院观察治疗。

甲癌病人住院期间，保洁人员不对病房进行打扫。由于甲癌患者的甲状腺大部分或者全部切除，其对碘的摄取量非常少，大部分碘由大小便及汗液排出，因此，在核素半衰期及生物半排期同时作用下，病人体内的 ¹³¹I 约一天后只剩一半（见《分化型甲状腺癌患者的 ¹³¹I 有效半衰期》），约住院 5 天后体内的 ¹³¹I 药物活度将小于 400MBq，病人可以出院。¹³¹I 核素治疗具体工艺流程及产污环节见图 9-5。

3、核素特性

甲癌治疗用放射性核素 ¹³¹I 特性见表 9-5。

表 9-5 放射性核素特性一览表

核素	半衰期	α/β最大能量 (MeV)	光子能量 (MeV)	铅什值层 mm	混凝土什值层 mm	空气比释动能率常数 (μ Sv•m ² •MBq ⁻¹ •h ⁻¹)
¹³¹ I	8.02d	0.602	0.284,0.365,0.637	11	170	0.0595

注：数据引自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）

9.1.6 ^{99m}Tc 显象

1、工作原理

（1）⁹⁹Mo—^{99m}Tc 发生器

将 ⁹⁹Mo 以钼酸铵的形式溶解于氨水中，再转化到 0.01mol/L 盐酸体系，pH=3~3.5 条件下，⁹⁹Mo 以 ⁹⁹MoO₄²⁻吸附在 Al₂O₃ 色柱上，⁹⁹MoO₄²⁻衰变时产生的

^{99m}Tc 以 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 的形式存在, 由于两者电荷不同, 可利用 Al_2O_3 对其吸附能力差异, 通过生理盐水将 ^{99m}Tc 淋洗下来。

(2) SPECT 显像原理

SPECT 即单光子发射型计算机断层显像 (Single photon emission computed TOMOgraphy, 简称 SPECT)。SPECT 显像, 其原理是利用引入人体内的放射性核素发出的 γ 射线经碘化钠晶体产生闪光, 闪烁光子再与光电倍增管的光阴极发生相互作用, 产生光电效应。光电效应产生的光电子经光电倍增管的打拿极倍增放大后在光阴极形成电脉冲, 其经过放大器放大成形, 再经过位置计算电路形成 X、Y 位置信号。各个光电倍增管输出信号之和为能量信号 Z。X、Y 信号经处理后加入显示器偏转极, Z 信号加入启挥极, 从而在荧光屏上形成闪烁影像。利用滤波反投影方法, 借助计算机处理系统可以从一系列投影影像重建横向断层影像, 由横向断层影像的三维信息再经影像重建组合获得矢状、冠状断层或任意斜位方向的断层影像。SPECT 是单光子发射型计算机断层显像仪和 CT 一体化组合的影像诊断设备, 将功能代谢与解剖结构完美结合显示成像, 是目前临床核医学最广泛应用的医学影像诊断设备。

本项目 SPECT 使用含放射性同位素 ^{99m}Tc 的药物进行显像, 由专业供货商提供。 ^{99m}Tc 为纯 γ 光子发射体, 方便易得, 几乎可用于人体各重要脏器的形态和功能显像, 是显像检查中最常用的放射性核素。目前全世界应用的显像药物中, ^{99m}Tc 及其标记的化合物占 80% 以上, 广泛用于心、脑、肾、骨、肺等多种脏器疾患的显像检查。

2、工作流程及产污环节分析

医院根据病人预约情况提前向供货商按需订购, 供货商将药物运至医院, 由核医学科专职工作人员接收, 暂存在源库内。

(1) ^{99}Mo — ^{99m}Tc 淋洗、标记、分装、质检

①淋洗: 医院订购的药物钼-锝柱, 活度为 500mCi/柱, 放置在母牛室药物分装柜内。淋洗前用 75% 酒精棉球擦拭发生器的单针、双针和氯化钠淋洗溶液小瓶、负压瓶盖进行消毒, 先将氯化钠淋洗溶液小瓶插入发生器的双针, 然后将置入钨合金罐的负压瓶插入发生器的单针。借助负压瓶的负压, 使淋洗溶液淋洗发生器的吸附柱, 这时由母体 [^{99}Mo] 衰变而得到的子体放射性核素 [^{99m}Tc] 即被洗脱入负压

瓶中，获得含钼[^{99m}Tc]酸钠淋洗液。取走钨合金罐后，用另一负压瓶插至单针上，吸干吸附柱。由于淋洗操作时钼钨发生器一直带有铅屏蔽体，工作人员手不会直接接触发生器，只有在插拔发生器单、双针头上的塑料保护套、生理盐水瓶和负压瓶时会靠近钼钨发生器，而且时间很短。

②标记：药物分装柜内，根据钼药生产工艺规程，用一次性无菌注射器抽取适量的含钼[^{99m}Tc]淋洗液注入有铅防护的冻干品瓶中，振摇、静置即得。

③分装、质检：将已标记好的药物，取样送检后，根据当天病人用药量需求，将药品分装至贴有内标签的一次性无菌注射器中。抽取相应活度的药物在一次性针管里，达到一定体积后，用活度计测量所抽吸的药液活度是否满足活度要求，若不满足，再次抽吸调整药量直到符合要求位置，有经验的熟练护士一般能够一次性成功，不熟练的护士需要反复一至两次。每次分装保守按 1min 估算。

^{99m}Tc 淋洗、分装产生的污染物主要是在 ^{99m}Tc 标记溶液洗脱过程中产生的。 ^{99m}Tc 标记溶液洗脱产生的污染因子是： γ 射线、 β 表面污染、废液、废水和固体废弃物中的 ^{99m}Tc 、 ^{99}Tc 、 ^{99}Mo 。

^{99}Mo 的衰变方式是 β^- ，衰变时除发射 β 射线外还发射 γ 射线， ^{99m}Tc 的主要衰变方式是同质异能跃迁，同时发射 γ 射线，下面列出其衰变的详细过程：

由于 ^{99}Tc 的半衰期长达 2.13×10^5 年，远远大于 ^{99}Mo 和 ^{99m}Tc 的半衰期， ^{99}Tc 在洗脱液中放射性贡献极小，如 1mCi ^{99m}Tc 99%退激成 ^{99}Tc ， ^{99}Tc 的活度仅为 3×10^{-9} mCi，因此 ECT 中 ^{99}Tc 的放射性可以忽略不计。

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

固态放射性废物主要是经淋洗后衰变到无使用价值的 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器、工作人员操作戴的手套，沾有 ^{99m}Tc 标记液的分装瓶等，包括事故工况下沾染放射性核素的废弃物等。沾有 ^{99m}Tc 的手套、分装瓶等集中收集放置在放射性废物桶内，暂存于废物储存间，经过 10 个半衰期达到清洁解控水平后，作为普通医疗废物处理；旧的钼-钨发生器贮存于 ^{99m}Tc 废弃物间中，待衰变到规定水平后，由厂家处理回收处理。

^{99}Mo 及其衰变产物 ^{99m}Tc 、 ^{99}Tc 等均为非挥发性物质，洗脱过程在密闭发生

器中负压条件下进行，无溶液的挥发，因此，无放射性气体污染。

(2) ^{99m}Tc 药物注射

注射护士手持带铅套的注射器，在 SPECT 注射窗口为病人注射。注射完毕后，一次性注射器等放射性固废放入 SPECT 专用废物铅桶内。每次注射过程中近距离接触 ^{99m}Tc 药物的时间保守按 1min 估算。

注射后病人在 SPECT 注射后候诊室内休息片刻待药物代谢至靶器官，部分病人可能需要在运动负荷室内加强运动使心率达到一定水平、促使药物代谢至靶器官。药物代谢至靶器官的病人，再进入 SPECT 机房的扫描室，躺在扫描床上，病人接受医护人员通过对讲装置或现场指导摆位后，开始 SPECT 扫描检查，得到最终的 SPECT 扫描图像。扫描完成后，病人离开 SPECT 扫描室，在留观室留观约半小时，无碍后由病人专用通道离开。注射后带药病人无论是候诊还是接受扫描，其体内的 ^{99m}Tc 仍将均持续发射 0.141MeV 的 γ 射线，对控制区其他人员造成外照射影响。

SPECT显像检查流程如下：

①医院订购的药物钼-锝柱由核医学科专职工作人员接收，暂存在核医学科的储源室内；

②分装人员淋洗药物分装后为病人注射；

③病人在SPECT注射后候诊室候诊10~30分钟不等；

④到SPECT检查室开始扫描，扫描10~20分钟不等；

⑤检查完后，病人在留观室留观约半小时，无碍后离开。

SPECT 显像检查具体工艺流程及产污环节见图 9-6。

3、核素特性

SPECT 显像检查用放射性核素 ^{99m}Tc 特性见表 9-6。

表 9-6 ^{99m}Tc 放射性核素特性一览表

核素 种类	半衰 期	α/β 最大能量 (MeV)	光子能量 (MeV)	铅什值层 mm	混凝土什 值层 mm	空气比释动能率 常数 (μ $\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
^{99m}Tc	6.02h	/	0.14	1	110	0.0303

注：数据引自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）。

9.1.7 ^{153}Sm 、 ^{89}Sr 骨转移治疗

1、工作原理

几乎所有恶性肿瘤都可能发生骨转移，静脉注射趋骨性放射性药 $^{89}\text{SrCl}_2$ ，通过高度选择性聚集在病变部位的放射性核素或其标记物所发射出的射程很短的 β 粒子，对病变进行集中照射，在局部产生足够的电离辐射生物学效应，达到抑制或破坏病变组织的目的，其有效射程很短，因而邻近正常组织和全身辐射吸收剂量很低，从而达到止痛和破坏肿瘤的目的。 ^{89}Sr 是纯 β 射线体，不伴 γ 射线，物理半衰期为 50.6 天， β 粒子的最大能量为 1.46MeV，在骨组织内的射程为 3mm，在病灶骨中的浓聚能保持很长时间。在转移灶的摄取高于正常骨 2-25 倍，这样，对病灶骨就有足够的照射剂量，而对病灶骨以外、周围的正常组织照射很少，不致引起不可逆的骨髓损伤。

^{153}Sm -EDTMP（乙二胺四甲撑膦酸）是一种有机膦酸盐，具有很强的骨亲和性而不被骨髓细胞明显摄取，进入人体内能较多地聚集在恶性肿瘤骨转移灶，其携带的 Sm-153（钐-153）所释放的 β 射线可对病灶产生内照射作用，达到减轻疼痛，抑制病灶增长，杀伤癌细胞等姑息性治疗效果，而无明显抑制骨髓功能。 ^{153}Sm 在组织中的射程相当短，发射的 γ 射线还可进行骨显像。

2、工作流程及产污环节分析

诊疗流程如下：

①核医学门诊接诊病人，经医师诊断及正当性判定需进行 ^{89}Sr 或 ^{153}Sm 骨转移治疗；

②病人预约；核医学科订购药物，经核医学药物通道进入源库保存；

③治疗当天，工作人员根据病人实际情况计算给药量，并在源库中制备好药物，通过铅罐运送至注射室；

④患者根据预约时间提前到达核医学科登记进行登记及查体，如测量血压、脉搏、体重、温度等；

⑤病人登记后进入注射前候诊室候诊，等待医生叫号；

⑥病人听到广播后到达注射窗口（病人），工作人员核实信息无误后对患者进行药物注射；

⑦病人注射后，无不适后离开；

⑧进行下一个患者的诊疗

3、核素特性

表 9-7 ^{153}Sm 、 ^{89}Sr 放射性核素特性一览表

核素种类	半衰期	α/β 最大能量 (MeV)	光子能量 (MeV)	铅什值层 mm	空气比释动能率常数 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
^{153}Sm	46.5h	0.2652	0.042,0.047,0.103	0.73	0.072
^{89}Sr	50.53d	0.5846	/	/	/

注：数据引自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）

9.1.8 ^{90}Sr 敷贴治疗

1、工作原理

^{90}Sr 核素衰变发射纯 β 射线，组织内射程为 1-2mm，深部组织不受损伤，非常安全。通过辐射效应，血管瘤组织微血管萎缩、闭塞，增生组织细胞分裂速度减低、停止、凋亡，抑制末梢神经过敏作用，并能萎缩皮肤的附属器，限制汗腺，皮肤腺的分泌，可达到止痒止痛效果。 ^{90}Sr 半衰期相对较长，一般是制成成品敷贴器长期使用，把敷贴器紧贴于病变的表面，对表浅病变进行外照射治疗。 ^{90}Sr 敷贴治疗主要适用于难治性疤痕、毛细血管瘤、局限性神经性皮炎、局限性慢性湿疹、局限性牛皮癣、口腔粘膜和女阴白斑以及其它皮肤非特异性炎症、溃疡、赘肉等疾病，效果良好，方法简便、见效快速、无毒副作用等优点。

2、治疗流程

^{90}Sr 敷贴治疗流程：

- ①核医学门诊接诊病人，经医师诊断及正当性判定适合进行 ^{90}Sr 敷贴治疗；
- ②病人预约，根据预约时间提前到达候诊区进行候诊，等待医生叫号；
- ③治疗当天，工作人员将 ^{90}Sr 敷贴器从源库中取出，运送至敷贴室；
- ④病人听到广播后进入敷贴室，工作人员核实信息无误，做好防护后取出敷贴器放置于患处；
- ⑤治疗结束后，工作人员收回敷贴器；
- ⑥病人无不适后离开，进行下一个患者的诊疗流程；
- ⑦所有患者治疗结束后，工作人员将 ^{90}Sr 敷贴器返回源库。

3、核素特性

表 9-8 ^{90}Sr 放射性核素特性一览表

核素种类	半衰期	α/β 最大能量 (MeV)	光子能量 (MeV)	铅值层 mm	空气比释动能率常数 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
^{90}Sr	28.5a	0.546	/	/	/

9.1.9 ^{125}I 粒子植入

1、工作原理

^{125}I 粒子源植入治疗肿瘤是一种微创治疗方法，属于近距离放射治疗，将放射性粒子源在术中 CT 引导下，根据三维立体治疗计划（TPS），将粒子源准确植入肿瘤内或受肿瘤侵犯的组织内，通过放射源持续放出的低能 X、 γ 射线，在 200 天内持续不断作用于肿瘤部位，使进入活跃期的肿瘤细胞被射线抑制或杀灭，局部肿瘤得到有效控制，而正常组织不受损伤或仅有微小损伤，从而达到良好的治疗效果。

2、诊疗流程

病人预约→ 医师根据患者病情确定所需粒子的数量→ 订购粒子源→ 抽检（活度验证）→ 签收→ 进分装室入库登记→ 粒子源放进保险箱内保存→ 制定治疗计划（TPS）→ 从保险箱取出经 TPS 计算病人需要植入的粒子源→ 在分装前使用巡测仪对分装室环境进行检测，若发现高剂量区域，先进行清洗去污处理→在分装台中进行粒子活度质量控制检测（抽检 10%或全部）、装填弹夹→ 装填完成后，将弹夹及植入枪等工具用布包裹好制成消毒包，由专人送至供应室消毒，消毒后核对无误后由专人带回放入保险柜→使用当天进行粒子的衰变校正、按照 TPS 预先穿刺植入针→ 从保险柜取出消毒包等植入工具到 SPECT-CT 机房进行植入操作→通过植入针将粒子送至预先设定的病灶位置→ 定位验证→ 剩余 ^{125}I 粒子入库→告知植入病人及家属相关的防护注意事项后住院观察→ 出院回家。

3、核素特性

粒子源是吸附有 ^{125}I 的银棒装在钛管中，两端焊接的密封源。外形长度 4.5mm，呈圆柱状，直径 0.8mm，钛管壁厚 0.05mm，中心尺寸 0.5mm×3.0mm，常用的每枚粒子额定活度为 0.3~1.0mCi，半衰期为 59.4d，在人体组织中的穿

透力仅为 17mm。

表 9-9 ^{125}I 放射性核素特性一览表

核素种类	半衰期	α/β 最大能量 (MeV)	光子能量 (MeV)	铅当量层 mm	空气比释动能率常数 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
^{125}I	59.4d	/	0.027,0.028,0.031,0.036	/	0.0165

9.2 污染源项描述

9.2.1 回旋加速器

回旋加速器制药过程中污染因子主要包括：放射性核素生产过程中产生的中子、 γ 射线和 β 表面污染，还有含放射性核素的气态、液态和固态流出物，此外还会产生少量的臭氧。根据工艺流程，具体分析污染物和污染途径如下。

1、辐射

回旋加速器在制备放射性核素过程中，高速质子与靶物质作用伴随产生中子，中子与靶、部件、屏蔽体等物质相互作用会放出 γ 射线，中子和 γ 射线具有较强的穿透力，如果对其屏蔽不好则可以穿过屏蔽墙、防护门、屋顶等对工作人员和公众产生一定辐射危害。

在进行药物合成、分装、交接、传输等操作时，核素衰变时会发出 β^+ 射线以及发生正电子湮灭产生的 γ 射线， β^+ 的最大能量为 1.199MeV， β^+ 在空气中存在时间极短，极易与空气的电子结合（湮灭）而转化为两个 γ 射线光子（能量为 0.511MeV）。

核素制备、合成、分装均为自动控制，其中制备过程中工作人员在加速器控制室台进行监控，合成过程人员在热室操作台监控，受到的辐射影响较小，贯穿辐射主要来自质检、分装及传递转运放射性同位素药物过程中。

制药区无公众及患者进入，加速器运行及在药物转运过程中周围公众活动量很小，对公众造成影响的可能性较小。

2、空气活化产物

粒子与稳定的非放射性核素作用发生核反应，生成放射性的核素，称该非放射性核素被活化。活化产物决定因素主要包括：中子发生率和能量、空气的组成、核反应截面、粒子在空气中的行径（自靶点至墙内表面的距离）。回旋加速器在运行期间，中子活化空气产生的活化产物见表 9-10。

表 9-10 主要空气活化产物一览表

核素	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar
半衰期	20.9min	9.96min	2min	1.8h

这些核素均为 β 、 γ 衰变体，其中 ^{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。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 的母核 ^{40}Ar 的活化截面很小 610mb（《辐射防护手册》第三分册），所以 ^{41}Ar 的生成率极其微小。

3、表面污染

工作人员在对含有 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 制剂的各种操作中，可能会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等发生放射性沾污，造成放射性表面污染。

4、放射性废物

(1)放射性气体

在放射性药物合成、质检、分装时，药物的逸散及水蒸气等可能排放含放射性核素的废气，经通风管道排入大气，会对环境产生污染。

(2)放射性液体废物

放射性药物制取过程中加入的反应介质，在同位素交换反应和洗涤完成后，每天产生约 40ml 放射性废液。另外对靶、相关容器、器皿等的冲洗约产生 60ml 放射性废液。操作人员清洗去污可能产生少量的放射性清洗废水。

加速器冷却水被活化产生的感生放射性核素主要是 ^{15}O 、 ^{13}N ，半衰期很短最长为 9.96min，在放置 3.2 小时即为 20 个半衰期，其活度可衰减到可忽略水平。另外可能有一次生产后少量剩余药液。

(3)放射性固体废弃物

本工程产生的放射性固体废物主要包括：靶废料，即靶窗、废弃的离子源灯丝等，一年约产生 200g，为感生放射性废物；放射性药物制取时产生的放射性残留物碳柱和滤膜，另外去离子水制备过程中产生一定的废离子交换树脂,每年约产生 50kg；还有少量操作手套、口罩、棉签、试管等，年产生量不超过 10kg；分装质检通风橱通风系统及废气净化系统更换下来的废活性炭，年产生量不超过 50kg。

(4)加速器废靶

回旋加速器维修置换的废靶，产生量约为 1 个/4~5 年。

以上放射性废物如处理处置不当，可能对职业人员、周围环境及公众造成辐射影响。

5、非放射性污染物

空气电离会产生一定量的臭氧，本项目所产生的臭氧是加速器运行过程中激发粒子与空气中氧相互作用的结果，它对人的呼吸系统、眼睛和粘膜有一定的伤害。

9.2.2 PET 诊疗区

1、辐射

PET/CT 扫描时产生的 X 射线、质控源产生的微量 γ 射线；正电子药物在取药、分装、注射、注射后候诊、扫描等操作过程中产生的 γ 射线。以上射线会造成医务人员和公众的外照射。

2、表面污染

工作人员在对含有 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 制剂的各种操作中，可能会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等发生放射性沾污，造成放射性表面污染。

3、放射性废弃物

(1) 放射性废气

本项目使用的正电子药物分装时在带有通风装置的通风橱内，注射时药物在针筒内，基本无开放液面，空气中挥发散逸的放射性同位素几乎没有，因此放射

性气溶胶非常少,其对医务人员和公众呼吸入体内造成的内照射影响可以忽略。

(2) 放射性废水

PET 诊疗区放射性废水主要包括：放射性药物使用过程中产生的沾有放射性核素的医疗器械、器皿洗涤水，辐射工作人员的洗涤水及注射药物的病人排泄物及其冲洗水等。其中洗涤废水产生量较小每天为 20L；注射核素后病人排泄及冲洗水，按照 10L/人考虑，PET/CT 中心最大接诊量为 23 人/d，则放射性废水产生量每天为 230L/天。

(3) 放射性固废

放射性同位素操作过程中产生的如一次性注射器、一次性手套、棉签、滤纸等带微量放射性同位素的医疗固体废弃物，年最大产生量不超过 20kg。

9.2.3 3、¹³¹I 核素诊疗区

1、辐射

医务人员取药、分药、病人口服药物、病人留观、住院治疗以及放射性废物收集等过程中产生的 γ 射线。以上射线会造成医务人员和公众的外照射。

2、表面污染

工作人员在对含有 ¹³¹I 制剂的各种操作中，可能会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等发生放射性沾污，造成放射性表面污染。

3、放射性废弃物

(1) 放射性废气

¹³¹I 系易挥发性核素，空气中挥发的微量核素会造成吸入性内照射。本项目 ¹³¹I 药液需要在通风橱内自行分装，有开放液面。因此通风橱及分装室应设置良好的排风系统，避免放射性气溶胶对医务人员和公众呼吸入体内造成的内照射影响。

(2) 放射性废水

¹³¹I 诊疗区产生的放射性废水主要包括：放射性药物使用过程中产生的沾有放射性核素的医疗器械、器皿洗涤水，辐射工作人员的洗涤水及注射药物的病人排泄物及其冲洗水等。

其中医生的清洗用水约 20L/天，甲癌住院病人废水量约为 100L/床.日（按照《医院污水处理技术指南》中参考数值 100~200L/床.日，中最小值计算），

住院人数按最大病床数 6 人计，则甲癌治疗每天产生的放射性废水量约为 600L/天；甲亢患者每人用水约 5L，日最大门诊量为 5 人计，则甲亢患者每天的放射性废水产量为 25L，故 ^{131}I 诊疗区每天甲癌患者产生的放射性废水量为 600L/天，甲亢及医护人员产生的放射性废水为 45L/天。

（3）放射性固废

口服 ^{131}I 时产生的一次性纸杯、医护人员取药时使用的一次性手套、擦拭滤纸等带微量放射性核素的医疗固体废弃物，每月产生量约为 10kg，年产生量约为 120kg。

9.2.4 SPECT 诊疗区

1、辐射

药物分装、注射、给药后病人的候诊、摆位、扫描时会发射出 γ 射线和射线装置扫描时发出的 X 射线，X 射线对周围环境影响较小，核素衰变过程中产生的 γ 射线会对工作场所及周围环境产生一定的外照射影响。

2、表面污染

工作人员在对含有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{153}Sm 、 ^{89}Sr 制剂的各种操作中，可能会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等发生放射性沾污，造成放射性表面污染。

3、放射性废弃物

（1）放射性废气

本项目使用的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等核素在带有通风装置的通风橱内分装，注射时药物在针筒内，无开放液面，空气中挥发散逸的放射性核素几乎没有，因此放射性气溶胶非常少，其对医务人员和公众呼吸入体内造成的内照射影响可以忽略。

（2）放射性废水

SPECT 诊疗区产生的放射性废水主要包括：放射性药物使用过程中产生的沾有放射性核素的医疗器械、器皿洗涤水，辐射工作人员的洗涤水及注射药物的病人排泄物及其冲洗水等。其中洗涤废水产生量较小每天为 20L；注射核素后病人排泄及冲洗水，按照 10L/人考虑，SPECT 诊疗区最大接诊量为 25 人/d，则放射性废水产生量每天为 270L/天。

（3）放射性固废

放射性同位素操作过程中产生的如一次性注射器、一次性手套、棉签、滤纸等带微量放射性同位素的医疗固体废弃物，年最大产生量不超过 20kg。

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全设施

10.1.1 核素制备区

1、辐射工作场所分区情况

（1）平面布局合理性分析

本工程核素制备区包括回旋加速器机房及其控制室、气瓶间、水冷间，热室，更衣区、质控室。

核素制备区自行生产 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N ，邻近使用场所，工艺布局流畅，控制、气瓶间、更衣区等人员活动位置与回旋加速器室、热室隔壁布置，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

（2）人流、物流设计合理性分析

药物运送路线：核素由回旋加速器室制备后通过管道直接传输至热室，制备分装完成的药物通过传递窗传递至质控室，由制药工作人员将运送药物的防护罐放置在通风橱中。

工作人员进出路线：核素制备区工作人员通过北侧制药师专用出、入口进入，其中回旋加速器操作人员直接进入回旋加速器控制室操作；热室、质控室工作人员经更衣区二更经换鞋、更衣换洁净工作服后进入。

患者进出路线：核素制备区无患者通道，与患者活动区域无交叉，不允许患者及公众进入。

本工程工作人员进出与药物运送路线无交叉，设置合理。

综上所述认为，核素制备区人流、物流通道可避免交叉辐射污染，可以满足辐射防护要求，从环保角度讲设置合理。

（3）核素制备区功能分区合理性

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，应把放射性工作场所分为控制区、监督区以便于辐射防护管理和职业照射控制，需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，对控制区运用行政管理程序（如工作许可证制度）和连锁装置限制进入。

监督区通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价。

本工程核素制备区具体分区情况见表 10-1 所示。

表 10-1 加速器制备 PET 放射性药物场所具体分区情况一览表

场所及分区	回旋加速器制药场所
控制区	回旋加速器机房、热室、质控室、更衣区
监督区	回旋加速器控制室、值班室、气瓶间、水冷间等

控制区入口设置明显的电离辐射警告标志，标志图形、颜色、字体等均按照 GB18871-2002 规定要求设置，预防潜在照射及事故照射的发生。加速器运行时，机房内禁止有人员滞留、禁止人员进入。监督区只有经授权的放射性工作人员才能进入监督区进行操作，公众不允许进入。辐射工作场所详细分区情况见图 10-1。

本项目核素制备区监督区、控制区划分明确、独立，设置合理，满足辐射防护管理和职业照射控制要求。

2、辐射屏蔽措施

(1)回旋加速器自屏蔽系统

本项目拟购买的回旋加速器带有自屏蔽系统，回旋加速器运行状态下，厂家提供的回旋加速器屏蔽体外剂量分布图可知，在经自屏蔽系统衰减后距加速器靶等效中心 1m 处的剂量率均小于 15 μ Sv/h。

(2)建筑设施屏蔽

本项目回旋加速器机房，原为直线加速器机房各场所采取的屏蔽措施如表 10-2 所示。

表 10-2 场所屏蔽措施一览表

场所名称	尺寸	屏蔽墙体方向	相邻场所	屏蔽材料及厚度
回旋加速器室	不含迷路 7.5×7×3.5 (m)	防护门	通道	10mm 铅+150mmPE
		东墙	过道、小广场	1450mm 厚钢筋混凝土

		南墙	医院围墙	1880mm~2590mm 厚 钢筋混凝土
		西墙	热室、准备间	内迷路 1050mm, 外迷路 1000m~1190 厚钢筋混凝土
		北墙	控制室、水冷间、气瓶间	1880mm~2590mm 厚 钢筋混凝土
		顶	无建筑	1600-2300 厚钢筋混凝土
		地板	地下土层	最底层, 无需处理
热室	6.2×5.7×4 (m)	防护门	质控室、更衣区	6mm 铅
		东墙	回旋加速器机房	1190mm 厚混凝土
		南墙	医院围墙	800mm 厚钢筋混凝土
		西墙	质控室	740mm 厚混凝土
		北墙	缓冲区	600mm 厚混凝土
		顶	无建筑	400mm 厚混凝土
		地板	地下土层	最底层, 无需处理
质控室	6×4.1×4 (m)	防护门	药物传递走廊	6mm 铅
		东墙	热室	740mm 厚混凝土
		南墙	医院围墙	370mm 厚实心砖 +2mmPb 钡水泥
		西墙	药物传递走廊	370mm 厚实心砖 +2mmPb 钡水泥
		北墙	净化走廊、理化质控	490mm 实心砖 +1mmPb 钡水泥
		顶	无建筑	200mm 厚混凝土
		地板	地下土层	最底层, 无需处理

主要生产设施屏蔽措施见表 10-3 所示。

表 10-3 主要生产设施屏蔽措施一览表

场所名称	尺寸	屏蔽墙体方向		屏蔽材料及厚度
合成热室 (2 台)	1300×1185× 2400(mm)	正面屏蔽门		70mm 铅 (附加电子联锁保护装置)
		侧面		60mm 铅
		后面		60mm 铅
		底面		60mm 铅
		上面		60mm 铅
分装热室	1200×1185×	正	操作面	60mm 铅

		观察视窗	高铅玻璃（60mm 铅当量）
		操作手孔	60mm 铅
		侧面	50mm 铅
		后面	50mm 铅
		底面	50mm 铅
		上面	50mm 铅

(3)防护设备和个人防护用品

本工程其它防护设备具体见表 10-4 所示。个人防护用品及监测设备见表 10-5 所示。

表 10-4 防护设备一览表

装置	屏蔽材料及厚度	数量	设置场所
通风橱	60mm 铅（正面），其余面 50mm 铅	1	质控室
放射性废物衰变柜	20mm 铅	1	质控室 1 个
放射性废物存放桶	5mmPb	3	注射准备间、注射候诊室、PET 机房各 1 个
注射器防护套	10mm 铅	2	热室
钨合金翻转防护罐	50mm 铅	1	热室
送药铅防护罐	50mm 铅	2	
注射器防护盒	20mm 铅	3	质控室
注射车	/	1	注射准备间

表 10-5 个人防护用品及监测设备一览表

序号	设备及材料名称	单位	数量
1	数字化辐射剂量监测系统（4 个探头）	套	1
2	表面污染测量仪（共用）	台	1
3	个人剂量率仪	个	4
4	个人剂量报警仪	个	4
5	便携式 α 、 γ 剂量仪（共用）	台	1
6	便携式中子剂量监测仪	台	1
7	防护铅衣、铅眼镜、铅帽和铅围脖（0.5mmPb）	套	4

(4)转运、包装措施

制备好的放射性药物分装至注射器内，注射器放入 10mm 铅防护套，并置于内外不锈钢中间夹铅防护罐，采用 50mm 铅防护罐，然后装入推送车，推送至注射区。

(5)放射性物质传输管道

回旋加速器生产的放射性物质通过专用管道传输至回旋加速器机房隔壁的热室，专用管道敷设在地沟内，地沟上覆盖 3cm 的铅砖予以防护。

3、安全防护设施

(1)回旋加速器室安全设施

①安全联锁：回旋加速器室防护门与加速器的高压设置联锁，当防护门未关闭到位时，加速器无法开启高压出束；当加速器工作过程中误操作打开外侧防护门时，加速器立即停止出束；控制台和进入区大门钥匙控制；辐射报警灯和声音报警与加速器准备出束状态联锁，准备出束时发出警示；辐射剂量监测与门联锁；火灾报警仪与加速器联锁、与通风联锁。

②工作指示灯：回旋加速器机房防护门外设置红黄绿三色工作指示灯，红灯亮表示加速器正在出束工作，黄灯亮表示加速器已停机但机房内剂量较高，人员不能进入；绿灯亮表示机房内剂量率处于较低水平，人员可安全进入加速器机房。

③独立通风系统：回旋加速器自带一套独立通风系统，单独对设备进行排风，排风管道独立接到室外。

④电离辐射警告标志：回旋加速器工作场所入口醒目位置设置电离辐射警告标志。

⑤开门开关：回旋加速器机房入口，靠近防护门处设置 1 个开门开关，当人员被关在机房内紧急情况下按下开关，可实现防护门从内部打开，同时加速器停止出束。

⑥急停开关：回旋加速器室进出口、控制台操作台上各设置 1 个急停开

关，人员滞留在机房内时可以按下开关，实现加速器停止出束。

⑦固定式剂量监测：回旋加速器机房防护门内、外均设置固定式剂量监测探头，当探测到机房内剂量率超过设置阈值时，加速器防护门外有声光报警，机房门将被联锁装置锁死，不允许打开。同时控制室内操作台和加速器机房防护门口有剂量率实时显示。

回旋加速器装置设计和安装上述安全联锁和安全警告装置，符合《粒子加速器辐射防护标准》（GB53172-1985）中对安全联锁设计应满足多重性、冗余性的要求。

(2)热室工作场所安全设施

①电离辐射警告标志：热室工作场所入口醒目位置设置电离辐射警告标志。

②当回旋加速器制备出放射性核素之后，放射性核素传输之前，热室内合成热室设备将根据程序设定，自动检测合成热室的门是否已经关闭，热室里面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热室内部配辐射剂量监控系统，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。

④剂量监测：合成热室及分装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（如设置为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ），则有声光报警，人员马上撤离。

(3)通风换气设施

核素制备区域设置两套风机送风，分别对洁净区（包括：控制室、一更、二更等）和非洁净区（包括回旋加速器室、热室）形成两套独立的送风系统。其中洁净区换气次数大于 5 次/h，非洁净区加速器室换气次数大于 6 次/h。

(4)放射性药物包装、转运

①建立放射性同位素生产、使用台账，并定期上报生态环境管理部门。

②内部转运专人负责，有转运接受记录及台账。

(5)工作区域气流组织情况

根据工艺要求，药物制备区设全面及局部排风系统。针对合成分装热室、质检通风橱等设局部排风系统，保持负压操作，以控制有害物不扩散外溢，减少操作人员与有害物的直接接触，排风经过相应的净化处理后排放。对加速器机房、热室房间等房间设全面排风系统。具体如下：

①合成分装热室间设置一套全面排风系统，排风量均略小于空调送风量，保证室内正压；分装、合成热室设局部排风系统，保证热室内负压操作。更衣室、淋浴间、检测间设一套机械排风系统，各房间排风量略小于空调送风量，保证室内正压。

②加速器室设全面排风系统，排风量略大于空调送风量，保证室内负压。

工程洁净空调系统气流组织均采用上送下侧回（排）方式。非洁净区系统气流组织一般采用上送上回（排）方式，加速器区空调采用上送上排方式。通过控制负压和换气次数，使本工程气流由非放区流向放射性区，由低污染区流向高污染物区。气流组织合理。

10.1.2 PET 诊疗区

1、辐射工作场所分区

（1）平面布局合理性分析

PET 诊疗区包括卫生通过间、候诊厅、注射准备室、放废间、注射后候诊室、PET/CT 机房及控制室、留观室。

PET/CT 机房位于南侧；其西侧集中布置医护人员活动区域，包括操作室、阅片区；北侧为患者活动区域，分布有候诊厅、注射区、患者通道、患者进出口通道。PET/CT 机房紧邻注射区、患者通道、注射后候诊区，便于病人就诊。

PET 诊疗区共设置两个出入口，西北侧门为注射前患者进入门，东北门为患者离开门。患者由西北侧门进入候诊厅，该区域为非放射性工作场所；

通过门禁系统向东首先进入注射区，注射后进入注射后候诊室、PET/CT 机房、留观，最后经注射后患者通道由东北门离开，医护人员由医护人员入口进入更衣区、控制室，注射人员由卫生通过间进入注射室。放射性药物经核素制备区直接通过质控室送至注射准备间。

PET/CT 场所布局流畅，放射性区域进出均设置门禁系统，避免无关人员进入，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

（2）人流、物流设计合理性分析

工作场所设置了医护人员通道、患者通道及药物通道。

医护人员通道：医护人员由核医学科北侧医护人员专用通道进入 PET/CT 控制室、PET/CT 机房，注射人员由卫生通过间入口进入注射间。

患者通道：在 PET 诊疗区北侧设置两个患者门，其中西侧为患者进口，东侧为患者出口；注射前患者由西北侧门进入后，在候诊厅等候，然后经门禁系统进入注射区注射，注射药物后前往注射后候诊区休息等候扫描，患者从注射候诊室出来后，进入 PET/CT 机房扫描检查；扫描后至留观室休息，经患者出口由东侧北门离开（设置门禁系统）。PET/CT 机房设置两个门，西侧门为医护人员通道，北侧门为患者通道。

药物通道：药物经加速器制药区经质控室后直接进入注射准备间。放射性废物在每日诊疗结束后，送出至废物间。

综上分析认为，通道设置可避免交叉辐射污染，可以满足辐射防护要求，从环保角度讲设置合理。

（3）工作场所分区与合理性分析

PET 诊疗区分区情况见表 10-6 所示。

控制区进出均设置门禁系统，应严格控制无关人员进入及滞留，注射放射性药物的患者也不应随便离开，入口设置明显的电离辐射警告标志，标志图形、颜色、字体等均按照 GB18871-2002 规定要求设置，预防潜在照射及事故照射的发生。监督区内应尽量减少非工作人员及患者的停留时间，避免受到可能产生的辐射危害。

表 10-6 核医学科放射性工作场所分区情况一览表

分区情况	控制区	监督区
场所名称	PET/CT 机房，注射准备室（注射室），注射后候诊室、留观室、放废室、注射后患者走廊。	控制区外可能受到辐射照射的区域，包括 PET/CT 控制室、医护人员走廊。

本项目放射性药物使用场所监督区、控制区划分明确、独立，设置合理，满足辐射防护管理和职业照射控制要求。

本工程人流、物流通道设置、辐射防护分区管理情况见图 10-1 所示。

2、辐射屏蔽措施

（1）建筑屏蔽（PET 诊疗区）

本项目各操作室及主要生产设施采取的屏蔽措施如表 10-7 所示。

表 10-7 屏蔽措施一览表

场所名称	尺寸	屏蔽层	相邻场所	屏蔽材料及厚度
PET/CT 机房	8.1×5.3×3 (m)	东墙	洁具室、设备间	300mm 混凝土+2mmPb 钡水泥
		南墙	医院围墙	
		西墙	控制室	
		北墙	患者通道	
		屋顶	无建筑	
		防护门（西墙）	控制室	6mmPb
		防护门（南墙）	患者通道	6mmPb
		观察窗	控制室	6mmPb 当量铅玻璃
注射准备室	2.3×2.7×3 (m)	东墙	质控室	300mm 混凝土+2mmPb 钡水泥
		南墙	放废间	
		西墙	注射区	
		北墙	卫生通过间	
		屋顶	无	
		防护门	注射区	6mmPb
		注射窗	注射区	10mmPb 玻璃
放废间	1.6×2.5×	东墙	质控室	300mm 混凝土+2mmPb 钡水

		南墙	设备间	
		西墙	洁具室	
		北墙	注射准备间	
		屋顶	无建筑	
		防护门	注射准备间	6mmPb
注射后 候诊室	不含卫生间 3.0×5.3× 3 (m)	东墙	患者出口通道	300mm 混凝土+2mmPb 钡水 泥
		南墙	患者通道	
		西墙	卫生间	
		北墙	核医学科楼外路	
		屋顶	档案室	300mm 混凝土+2mmPb 钡水
		防护门	患者通道	6mmPb
留观抢 救室	4.1×5.3× 3 (m)	东墙	卫生通过间	300mm 混凝土+2mmPb 钡水 泥
		南墙	患者通道	
		西墙	患者出口通道	
		北墙	核医学科楼外路	
		屋顶	无建筑	300mm 混凝土
		防护门	患者通道	6mmPb
控制室	5.4×3×3 (m)	东墙	PET/CT 机房	300mm 混凝土+2mmPb 钡水 泥
		南墙	医生通道	240mm 砖墙
		西墙	阅片室	240mm 砖墙
		北墙	患者通道	200mm 混凝土+3mmPb 钡水 泥
		屋顶	办公室	300mm 混凝土+2mmPb 钡水
		防护门	PET/CT 机房	6mmPb

(2) 防护设备和个人防护用品

PET 诊疗区其它防护设备具体见表 10-8 所示。

表 10-8 PET 诊疗区防护设备一览表

装置	屏蔽材料及厚度	数量	设置场所	备注
铅废物桶	20mm 铅	1	注射间 1 个	
注射器防 护套	10mm 铅	4	注射准备室	与热室共用,热室 按病人用量分装
注射防护 车	/	1	注射准备室	

非密封放射性物质使用场所个人防护用品及监测设备见表 10-9 所示。

表 10-9 防护用品及监测设备一览表

序号	设备及材料名称	单位	数量	备注
1	可携式表面污染测量仪	台	1	核医学科共用
2	可携式 x、γ 剂量仪	台	1	
3	个人剂量率仪	个	4	
4	个人剂量报警仪	个	4	
5	防护铅衣、铅眼镜、铅帽等 (0.5mmPb)	套	2	

3、安全防护设施

(1) 场所设施

①电离辐射警告标志：PET 诊疗区入口门禁处醒目位置设置电离辐射警告标志；PET/CT 机房患者入口门中部设置“当心电离辐射”警示标志；门口 1m 处设置警戒线标志，告诫无关人员请勿靠近。

②工作状态指示灯：PET/CT 机房患者入口门设工作状态指示灯，当射线装置未工作时，绿灯亮（红灯不亮），正常工作时，红灯亮且灯光闪烁（绿灯不亮）。防止无关人员逗留和误入。

③门禁系统：PET 诊疗区进出口均设置门禁系统，将辐射区与非辐射区分开，避免无关人员进入及注射后患者随意离开。

④紧急停机装置：PET/CT 操作室设置紧急停机按钮。

⑤监视对讲装置：机房内部墙壁上安装 1 套监视对讲装置，便于操作人员实时监控机房内的状况。

10.1.3 ¹³¹I 诊疗区

1、辐射工作场所分区

(1) 平面布局合理性分析

¹³¹I 诊疗区包括病人候诊区、服药监控室、自动分碘室、源库、沾污检测室、淋浴间、治疗室、留观室、¹³¹I 病房、放废间等。

¹³¹I 诊疗区共设置一个出口、一个入口，患者由东北侧门进入通道，该区域为非放射性工作场所；向西经过缓冲间进入碘病人患者通道，在医生通

通过对讲系统指导取药服用后，甲亢患者进入 ^{131}I 留观室观察一定时间后，从病人出口离开。甲癌病人服药后进入 ^{131}I 病房住院。

医护人员由与患者经过同一通道后，向南经过医生值班室向西进入碘医护人员通道。

^{131}I 诊疗区布局流畅，放射性区域进出均设置门禁系统，避免无关人员进入，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

（2）人流、物流设计合理性分析

工作场所设置了医护人员通道、患者通道及药物通道。

医护人员通道：医护人员由与患者经过同一通道后，向南经过医生值班室向西进入碘医护人员通道。

患者通道：患者由东北侧门进入通道，该区域为非放射性工作场所；向西经过缓冲间进入碘病人患者通道，在医生通过对讲系统指导取药服用后，甲亢患者进入 ^{131}I 留观室观察一定时间后，从病人出口离开。甲癌病人服药后进入 ^{131}I 病房住院。医院将甲癌和甲亢患者服药时间分开，甲癌患者待甲亢患者全部服完药后离开后，再由工作人员安排依次至服药，然后进入专用病房休息。通过此管理措施可防止甲亢和甲癌患者交叉。

药物通道：药物经患者入口通道进入后，向东缓冲区进入源库。

综上分析认为，通道设置可避免交叉辐射污染，可以满足辐射防护要求，从环保角度讲设置合理。

（3）工作场所分区与合理性分析

^{131}I 诊疗区分区情况见表 10-10 所示。

控制区进出均设置门禁系统，应严格控制无关人员进入及滞留，服用放射性药物的患者也不应随便离开，入口设置明显的电离辐射警告标志，标志图形、颜色、字体等均按照 GB18871-2002 规定要求设置，预防潜在照射及事故照射的发生。监督区内应尽量减少非工作人员及患者的停留时间，避免受到可能产生的辐射危害。

表 10-10 ^{131}I 诊疗区分区情况一览表

分区情况	控制区	监督区
场所名称	服药监控室、自动分碘室、分装室、源库、沾污检测室、淋浴间、治疗室、 ^{131}I 留观室、 ^{131}I 病房、放废间。	控制区外可能受到辐射照射的区域，包括医护值班室、医生走廊。

本项目放射性药物使用场所监督区、控制区划分明确、独立，设置合理，满足辐射防护管理和职业照射控制要求。本工程人流、物流通道设置、辐射防护分区管理情况见图 10-2 所示。

2、辐射屏蔽措施

(1) 建筑屏蔽 (^{131}I 诊疗区)

^{131}I 诊疗区采取的屏蔽措施如表 10-11 所示。

表 10-11 ^{131}I 诊疗区屏蔽措施一览表

场所名称	尺寸	屏蔽层	相邻场所	屏蔽材料及厚度
源库	$3 \times 1.7 \times 3$ (m)	东墙	通道	240mm 实心砖墙+10mm 铅板
		南墙	医生通道	
		西墙	留观抢救室	
		北墙	自动分碘室	
		屋顶	库房	预制楼板+10mmPb 钡水泥
		防护门	自动分碘室、	10mmPb
自动分碘室	$3 \times 1.6 \times 3$ (m)	东墙	通道	240mm 实心砖墙+10mm 铅板
		南墙	病人通道	
		西墙	留观抢救室	
		北墙	病人通道	
		屋顶	库房	预制楼板+10mmPb 钡水泥
		防护门	病人通道	10mmPb
留观抢救室	$3.9 \times 2.6 \times 3$ (m)	东墙	源库、自动分碘	240mm 实心砖墙+10mm 铅板
		南墙	医生通道	
		西墙	放废间、洗污间	
		北墙	病人通道	
		屋顶	库房	预制楼板+10mmPb 钡水泥

		防护门	病人通道	10mmPb
		防护门	病人通道	10mmPb
¹³¹ I 住院病房（3间相邻且大小一致，单人间）	含卫生间 5.3×3×3（m）	东墙	护理站	240mm 实心砖墙+10mm 铅板
		南墙	病人通道	
		西墙	病人出口通道	
		北墙	核医学科楼外路	
		屋顶	库房	预制楼板+10mmPb 钡水泥
		防护门	病人通道	10mmPb
放废间、洗污间	5.3×1.4×3（m）	东墙	留观抢救室	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水
		南墙	医生通道	
		西墙	高压氧值班室	
		北墙	病人通道	
		屋顶	库房	预制楼板土+2mmPb 钡水
		防护门	病人通道	5mmPb

（2）防护设备和个人防护用品

¹³¹I 诊疗区其它防护设备具体见表 10-12 所示。

表 10-12 ¹³¹I 诊疗区防护设备一览表

装置	屏蔽材料及厚度	数量	设置场所	备注
铅废物桶	5mm 铅	5	放废间、2 间住院病房、自动分碘室、分装各 1 个	
通风橱	40mm 铅	1	源库	
碘自动分装仪	40mm 铅	1	碘自动分装室	

非密封放射性物质使用场所个人防护用品及监测设备见表 10-13 所示。

表 10-13 防护用品及监测设备一览表

序号	设备及材料名称	单位	数量	备注
1	可携式表面污染测量仪	台	1	核医学科共用
2	可携式 x、γ 剂量仪	台	1	
3	个人剂量率仪	个	4	
4	个人剂量报警仪	个	4	

5	防护铅衣、铅眼镜、铅帽等 (0.5mmPb)	套	3	
---	---------------------------	---	---	--

3、安全防护设施

(1) 场所设施

①电离辐射警告标志： ^{131}I 诊疗区入口门禁处醒目位置设置电离辐射警告标志。

②源库双人双锁、安装视频监控，24 小时监控源库。

③门禁系统： ^{131}I 诊疗区进出口设置门禁系统，将辐射区与非辐射区分开，避免无关人员进入及服药患者随意离开。

④监视对讲装置：医护人员通过对讲装置与患者沟通，指导患者服药。

10.1.4 SPECT 诊疗区

1、辐射工作场所分区

(1) 平面布局合理性分析

SPECT 诊疗区包括病人源库、缓冲区、注射室、运动负荷室、SPECT/CT 机房、注射后候诊室、留观室、碘粒子储存分装室、碘粒子病房、 ^{90}Sr 敷贴室。

SPECT 诊疗区共设置两个出入口，患者由东北侧门进入候诊室，该区域为非放射性工作场所；通过门禁系统后进入注射室，再进入注射后候诊室，候诊一段时间后进入 SPECT/CT 机房进行扫描，然后进入留观室一段时间后，由西北侧出口离开。碘粒子植入病人由入口进入 SPECT/CT 机房进行粒子植入后，直接进入粒子植入病房，住院期满后，由出口离开。

医护人员由医护人员入口（与 PET/CT 医护人员同一入口）进入，向西经过进入 SPECT 诊疗区医生通道，再进入控制室或注射室。

SPECT 诊疗区布局流畅，放射性区域进出均设置门禁系统，避免无关人员进入，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

(2) 人流、物流设计合理性分析

工作场所设置了医护人员通道、患者通道及药物通道。

医护人员通道：医护人员由医护人员入口（与 PET/CT）进入，向西经过

进入 SPECT 诊疗区医生通道，再进入控制室或注射室。

患者通道：患者由东北侧门进入候诊室，该区域为非放射性工作场所；通过门禁系统后进入注射室，再进入注射后候诊室，候诊一段 时间后进入 SPECT/CT 机房进行扫描，然后进入留观室一段时间后，由西北侧出口离开。碘粒子植入病人由入口进入 SPECT/CT 机房进行粒子植入后，直接进入粒子植入病房，住院期满后，由出口离开。

药物通道：药物入口与 ¹³¹I 药物入口相同。药物经北侧放射性药品入口进入后，向东进入源库。

综上分析认为，通道设置可避免交叉辐射污染，可以满足辐射防护要求，从环保角度讲设置合理。

（3）工作场所分区与合理性分析

SPECT 诊疗区分区情况见表 10-14 所示。

控制区进出均设置门禁系统，应严格控制无关人员进入及滞留，服用放射性药物的患者也不应随便离开，入口设置明显的电离辐射警告标志，标志图形、颜色、字体等均按照 GB18871-2002 规定要求设置，预防潜在照射及事故照射的发生。监督区内应尽量减少非工作人员及患者的停留时间，避免受到可能产生的辐射危害。

表 10-14 SPECT 诊疗区分区情况一览表

分区情况	控制区	监督区
场所名称	源库、注射室、运动负荷室、SPECT/CT 机房、注射后候诊室、留观室、碘粒子病房等涉及核素区域	控制区外可能受到辐射照射的区域，包括控制室、医生走廊。

本项目放射性药物使用场所监督区、控制区划分明确、独立，设置合理，满足辐射防护管理和职业照射控制要求。

本工程人流、物流通道设置、辐射防护分区管理情况见图 10-3 所示。

2、辐射屏蔽措施

（1）建筑屏蔽（SPECT 诊疗区）

SPECT 诊疗区采取的屏蔽措施如表 10-15 所示。

表 10-15 SPECT 诊疗区屏蔽措施一览表

场所名称	尺寸	屏蔽层	相邻场所	屏蔽材料及厚度
源库(母牛室)	3×2.6×3 (m)	东墙	卫生通过监测间	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水泥
		南墙	医生通道	
		西墙	运动负荷室	
		北墙	更衣室	
		屋顶	库房	预制楼板+5mmPb 钡水泥
		防护门	更衣室	6mmPb
注射室	3.6×2.7×3 (m)	东墙	控制室	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水泥
		南墙	卫生通过监测间	
		西墙	更衣室	
		北墙	病人通道	
		屋顶	库房	预制楼板+5mmPb 钡水泥
		注射窗口	病人通道	10mmPb
运动负荷室	5.4×3×3 (m)	东墙	源库、更衣室	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水泥
		南墙	医生通道	
		西墙	粒子储存分装质控	
		北墙	病人通道	
		屋顶	教研室	预制楼板+5mmPb 钡水泥
		防护门	病人通道	6mmPb
控制室	5.4×3×3 (m)	东墙	SPECT/CT 机房	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水泥
		南墙	医生通道	
		西墙	卫生通过间及注射室	
		北墙	病人通道	
		屋顶	教研室	预制楼板+5mmPb 钡水泥
		防护门、观察窗	SPECT/CT 机房	6mmPb
SPECT/CT 机房	6.3×5.4×3 (m)	东墙	楼梯间、设备间	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水泥
		南墙	医生通道	
		西墙	控制室	

		北墙	病人通道	
		屋顶	库房	预制楼板+5mmPb 钡水泥
		防护门	控制室	6mmPb
注射后 候诊室	5.4×3.3×3 (m)	东墙	注射后卫生间、注射前卫生间	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水泥
		南墙	病人通道	
		西墙	留观室、放废间	
		北墙	核医学科外路	
		屋顶	库房	预制楼板+5mmPb 钡水泥
		防护门	病人通道	6mmPb
留观室 (含卫生间)	5.4×3×3 (m)	东墙	注射后候诊室	240mm 实心砖墙+3mmPb 钡水泥
		南墙	病人通道	
		西墙	碘粒子病房	
		北墙	核医学科外路	
		屋顶	卫生间	预制楼板+5mmPb 钡水泥
		防护门	病人通道	6mmPb
碘粒子 病房	5.4×3×3 (m)	东墙	留观室	240mm 实心砖墙+2mmPb 钡水泥
		南墙	病人通道	
		西墙	放射性药品登记室	
		北墙	核医学科外路	
		屋顶	库房	预制楼板+2mmPb 钡水泥
		防护门	病人通道	3mmPb

(2) 防护设备和个人防护用品

SPECT 诊疗区其它防护设备具体见表 10-16 所示。

表 10-16 SPECT 诊疗区防护设备一览表

装置	屏蔽材料及厚度	数量	设置场所	备注
铅废物桶	10mm 铅	2	注射室、母牛淋洗室	
通风橱(分装柜)	50mm 铅	1	源库(母牛室)	
淋洗铅罐	10mm 铅	1	源库(母牛室)	
钨注射器防护盒	10mm 铅	1	源库(母牛室)	
碘粒子源存放柜	10mm 铅	1	碘粒子源分装储存室	

药品注射车	10mm 铅	1	注射室	
-------	--------	---	-----	--

非密封放射性物质使用场所个人防护用品及监测设备见表 10-17 所示。

表 10-17 防护用品及监测设备一览表

序号	设备及材料名称	单位	数量	备注
1	可携式表面污染测量仪	台	1	核医学科共用
2	可携式 x、γ 剂量仪	台	1	
3	个人剂量率仪	个	4	
4	个人剂量报警仪	个	4	
5	防护铅衣、铅眼镜、铅帽等 (0.5mmPb)	套	2	

3、安全防护设施

①电离辐射警告标志：SPECT 诊疗区入口门禁处醒目位置设置电离辐射警告标志；SPECT/CT 机房患者入口门中部设置“当心电离辐射”警示标志；门口 1m 处设置警戒线标志，告诫无关人员请勿靠近。

②工作状态指示灯：SPECT/CT 机房患者入口门设工作状态指示灯，当射线装置未工作时，绿灯亮（红灯不亮），正常工作时，红灯亮且灯光闪烁（绿灯不亮）。防止无关人员逗留和误入。

③门禁系统：SPECT 诊疗区进出口均设置门禁系统，将辐射区与非辐射区分开，避免无关人员进入及注射后患者随意离开。

④紧急停机装置：SPECT/CT 操作室设置紧急停机按钮。

⑤监视对讲装置：机房内部墙壁上安装 1 套监视对讲装置，便于操作人员实时监控机房内的状况。

10.2 三废的治理

1、放射性废水处理措施

（1）放射性废水衰变池

核医学科原有的放射性衰变池不在使用，根据改建后的核素使用情况重新设计两套衰变池。

医院在核医学科西侧室外拟新建两套衰变池储放放射性废水。一套衰变池为碘衰变池，储存 ^{131}I 诊疗区放射性废水；另一套衰变池为核医学衰变池，

储存核素制备区、PET 诊疗区和 SPECT 诊疗区放射性废水。

①碘衰变池

共设置 1 个集水池和 3 个槽式衰变池，集水池有效容积 16.1m^3 ，3 个槽式衰变池每个有效容积为 40m^3 。碘衰变池总有效容积为 136.1m^3 ，衰变池建造过程中采取防腐防渗设施。

^{131}I 诊疗区产生的放射性废水经专用管道流入碘衰变池。 ^{131}I 诊疗区内接入碘衰变池的排水口分别有：医护值班室洗手水、淋浴水、 ^{131}I 住院病房卫生间、 ^{131}I 留观室卫生间、污洗间。放射性排水管上方用 4mm 铅覆盖，管道沟盖板为 20cm 厚混凝土。

碘衰变池采用槽式排放，放射性废水先进入碘集水池，然后先使用第一格衰变池，当第一格衰变池液位报警后，关闭第一格衰变池进水，打开第二格衰变池进水。当第二格衰变池液位报警后，关闭第二格衰变池进水，打开第三格衰变池。同时对第一格衰变池内放射性废水进行监测，监测结果满足排放标准后，打开排水口排放至医院污水管网，废水排空后再次使用。依次类推，轮换使用。

放射性废水经监测合格后，利用排水泵抽出后排放至医院污水管网，废水的排水泵一用一备废水的排水泵一用一备。

②核医学衰变池

共设置 1 个进水集水池、3 个槽式衰变池、1 个排水集水池，进水集水池有效容积 16.1m^3 ，3 个槽式衰变池每个有效容积为 16.1m^3 。核医学衰变池总有效容积为 64.4m^3 ，衰变池建造过程中采取防腐防渗设施。

核素制备区、PET 诊疗区和 SPECT 诊疗区放射性废水经专用管道流入核医学衰变池。核素制备区、PET 诊疗区和 SPECT 诊疗区控制区内涉及核素的排水口全部接入核医学衰变池。放射性排水管上方用 4mm 铅覆盖，管道沟盖板为 20cm 厚混凝土。

核医学衰变池采用槽式排放，放射性废水先进入碘集水池，然后先使用第一格衰变池，当第一格衰变池液位报警后，关闭第一格衰变池进水，打开第二格衰变池进水。当第二格衰变池液位报警后，关闭第二格衰变池进水，打开第三格衰变池。经过三级衰变的放射性废水经监测合格后，利用排水泵抽出后排放至医院污水管网，废水的排水泵一用一备废水的排水泵一用一备。

（2）预测分析排放情况

①含碘放射性废水产量

^{131}I 诊疗区：根据前述污染物分析， ^{131}I 诊疗区每天甲癌患者产生的放射性废水量为 600L/天（ $0.6\text{m}^3/\text{天}$ ），甲亢及医护人员产生的放射性废水为 45L/天（ $0.045\text{m}^3/\text{天}$ ）。

《核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021）中要求含 ^{131}I 的放射性废水暂存时间应至少为 180 天。在 180 天中，甲癌患者按照住院考虑 180 天产生放射性废水 $0.6 \times 180 = 108\text{m}^3$ ，其余门诊按照 180 天内的工作日 130 天所产生的放射性废水 $0.045 \times 130 = 5.85\text{m}^3$ 。在此 180 天内产生含 ^{131}I 放射性废水共 113.85m^3 ，碘衰变池总容积为 120m^3 （不含集水池），满足放射性废水排放时必须储存至少 180 天的要求，放射性废水监测结果经审管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。

②核医学放射性废水产量

核素制备区：放射性药物制取过程中每天产生约 40ml 放射性废液，另外对靶、相关容器、器皿等的冲洗产生约 60ml 放射性废液，回旋加速器室及热室内设有废液收集瓶，专门用来存放生产过程中产生的少量废液。收集后存放 1 天即可满足 10 个半衰期要求，经管道排入衰变池。

操作人员清洗去污可能产生少量的放射性清洗废水直接通过下水管道排入衰变池。质控室器皿及人员清洗会产生一定量的放射性废水，通过下水管道排至衰变池。以上放射性废液中质检产生量为 5L/d，其它清洗废水只有在极少数情况下，出现人员皮肤沾污时产生，出现沾污的机率很小，出现次数不会超过操作天数的 1/10，本次评价以 1/5 的天数出现人员沾污，每次去污清洗产生废水量 50L 计算。本次评价核素制备区放射性废水产量按 55L/天计。

PET 诊疗区：根据前述污染物分析，PET 诊疗区每天放射性废水产量 230L/天。SPECT 诊疗区：根据前述污染物分析，SPECT 诊疗区每天放射性废水产量 270L/天。核素制备区、PET 诊疗区、SPECT 诊疗区每天的放射性废水产量为 555L/天（ 0.555m^3 ）

核素制备区、PET 诊疗区和 SPECT 诊疗区所使用的放射性核素量最大的为 ^{99m}Tc ，半衰期为 6.02 小时，小于 24 小时，按《核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021）储存满 30 天后可直接排放。

在 30 天（20 个工作日）中产生的放射性废水为 11.1m^3 ，核医学衰变池单格衰变池容积为 16.1m^3 ，满足《核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021）中半衰期小于 24 小时的放射性废水，储存满 30 天后可直接排放的要求。

2、放射性废气处理措施

根据《粒子加速器辐射防护规定》GB5172-85 中 3.4.1 规定，排放有毒气体（如臭氧）和气载放射性物质，加速器设施内必须设有通风装置。《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）第 5.2.3 款：合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5m/s ，排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置。

本项目采取的废气治理措施如下：

（1）核素制备区：

①回旋加速器机房设置单独排风系统，机房内配置排风量 $3000\text{m}^3/\text{h}$ 的风机，并在排风口设置活性炭高效过滤器，排放口设置在本层屋顶。回旋加速器机房容积约为 184m^3 ，排风次数可满足每小时 4 次的要求。

②合成、分装热室设置单独的排风系统，排风量为 $7200\text{m}^3/\text{h}$ ，在合成热室、分装热室每一个排风口设置一个活性炭高效过滤器，排放口设置在本层屋顶。

③热室房间、质控室各房间设置全面排风系统，排风量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，排风口设置一个活性炭高效过滤器，排放口设置在本层屋顶；

④热室通风橱、质控室通风橱均为独立排风管道，经风机引至本层屋顶排放，排风口设置一个活性炭高效过滤器，设置风速均大于 1m/s 。

（2）PET 诊疗区

PET/CT 机房、注射准备室、放废间、注射后候诊室等涉及放射性药物场所均设置排风系统，统一经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，

排放口高度高出本层屋顶，排风次数为 6 次/h。

(3) ^{131}I 诊疗区

^{131}I 自动分装仪、源库通风橱、两间 ^{131}I 住院病房、 ^{131}I 留观病房全部设置单独排风管道，共配置 5 台风机，排风量均为 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。

^{131}I 诊疗区治疗室、源库、分装、洗污间、放废间等涉及放射性药物场所均设置排风系统，统一经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶，排风次数为 6 次/h。

(4) SPECT 诊疗区

母牛（淋洗室）通风橱设置单独排风管道，配置 1 台风机，风量 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。

SPECT 诊疗区质控室、注射室、运动负荷室、注射后候诊室等涉及放射性药物场所均设置排风系统，统一经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶，排风次数为 6 次/h。

本项目废气均经管道引至本层楼顶排放，排放口高度高出本层屋顶。本项目废气治理措施满足相关标准、规定要求，废气排放浓度较低，不会对周围环境造成明显影响。工程送排风平面布置见附图 9、附图 10 所示。

3、放射性固体废物处理措施

(1) 核素制备区

核素制备区产生的放射性固体废物包括靶废料，即靶窗、废弃的离子源灯丝等感生放射性废物；放射性药物制取时产生放射性残留物碳柱和滤膜、废离子交换树脂等；还有少量操作手套、口罩、棉签、试管等。均采取衰变贮存方式，贮存达到审管部门批准的清洁解控水平，并经审管部门同意后按医疗废物处理。

加速器维修置换的废靶委托有相应放射性水平检测资质的机构进行放射性水平检测，如不能满足清洁解控要求，送贮至省放射性废物库。

(2) PET 诊疗区

PET 诊疗区产生的放射性固体废物主要是操作人员操作 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 等核素时戴的手套、药棉、废弃的制剂瓶、注射器等分类收集，存放在放射性废

物储存间铅桶内，经过衰变，贮存达到审管部门批准的清洁解控水平，并经审管部门同意后按医疗废物处理。

（3） ^{131}I 诊疗区

^{131}I 诊疗区产生的放射性固体废物主要是被核素污染的一次性手套、一次性服药杯、甲癌病房放射性固废等，统一收集后存放在放射性废物储存间铅桶内，经过衰变，贮存达到审管部门批准的清洁解控水平，并经审管部门同意后按医疗废物处理。

（4）SPECT 诊疗区

SPECT 诊疗区产生的放射性固体废物主要是操作核素时戴的手套、药棉、废弃的制剂瓶、注射器等，分类收集后存放在放射性废物储存间铅桶内，经过衰变，贮存达到审管部门批准的清洁解控水平，并经审管部门同意后按医疗废物处理。使用完的钼铯发生器由厂家回收。

本项目共设计配置 5mmPb 的放射性固体废物暂存桶 16 个，用于收集放射性固体废弃物。在 PET 诊疗区设置 1 个放废间（位于 PET 注射准备室南侧），用于储存核素制备区和 PET 诊疗区产生的放射性固体废弃物；在 SPECT 诊疗区设置 1 个放废间（位于注射后候诊室西侧），用于储存 SPECT 诊疗区产生的放射性固体废弃物；在 ^{131}I 诊疗区设置 1 个放废间（位于留观抢救室西侧），用于储存 ^{131}I 诊疗区产生的放射性固体废弃物。

根据《核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021）中要求，放射性废物存储间，入口设电离辐射警示标识、采取有效的防火、防丢失、放射性泄露措施；放射性废物储存间内设专用容器盛放固体放射性废物袋，不同类别废物分开存放，容器表面应注明废物所含核素名称、废物类别、入口日期等信息，并做好登记。

放射性固体废物储存下列要求的，经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 表面污染小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ ， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：①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；②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；③含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超 180 天。

采取上述措施后本项目的放射性废物处置方式能够满足当前生态环境管理的要求。

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

本项目核医学科改建，仅对一楼进行改造，不对楼体结构进行改动，在原有基础上进行辐射屏蔽施工和对部分房间进行分隔。施工期的主要污染因子为：扬尘、噪声、固废、废水。

施工期应采取的措施如下：

（1）扬尘：在改建施工过程中，施工场地会产生部分扬尘，应及时清扫施工场地，并保持施工场地一定的湿度减少扬尘产生。

（2）噪声：整个建筑施工阶段，施工噪声对周围环境造成一定的影响。在施工时严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523—2011）的标准，尽量使用噪声低的先进设备，合理安排施工时间，同时严禁夜间进行强噪声作业，若需在夜间作业，需取得环保部门同意。

（3）固体废物：项目施工期间产生的固废主要有建筑施工过程中产生的建筑垃圾、装修垃圾以及少部分施工人员产生的生活垃圾，建筑垃圾应回填或堆放在指定地点并委托有资质的单位清运，并做好清运工作中的装载工作，防止建筑垃圾在运输途中散落；装修垃圾和生活垃圾由环卫部门统一及时清运处理。

（4）废水：项目施工期间产生的废水主要包括施工人员日常生活产生的生活污水和含有泥浆的建筑废水，生活污水经医院污水处理设施预处理后，纳入市政污水管网；含有泥浆的建筑废水经沉淀池初级沉淀处理，上清液用于场地洒水抑尘、场地浇灌。

在施工阶段采取上述污染防治措施，将施工期的影响控制在医院局部区域内，对周围环境影响较小。

11.2 运行阶段辐射剂量分析

11.2.1 估算预测模式

1、回旋加速器运行过程中辐射剂量率

$$D = D_0 \times K_r \times K_d \text{-----公式 1}$$

式中：

D：为回旋加速器运行时某点处的剂量率，μSv /h；

D_0 : 为参考点处的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

K_r : 为距离衰减系数;

K_d : 为屏蔽层衰减系数。

2、药物分装、合成、使用过程中 γ 射线在空气中的吸收剂量率经验公式

$$D_r = K^{-1} A \Gamma / R^2 \text{ -----公式 2}$$

式中:

D : 关注点的周围剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

A : 核素活度, MBq ;

R : 距离, m ;

Γ : 核素单位距离 1m 处的剂量率常数, $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$;

3、经过屏蔽材料后的衰减计算公式

$$K^{-1} = 10^{-(d/TVL)} \text{ -----公式 3}$$

式中:

d : 屏蔽层的厚度, cm ;

TVL : $1/10$ 值层厚度, cm 。

4、随距离衰减计算公式

$$K_r = X_2/X_1 = R_1^2/R_2^2 \text{ -----公式 4}$$

式中:

K_r : 为距离衰减系数;

R_1 : 原来的距离, m ;

R_2 : 改变后的距离, m ;

X_1 : 原距离处的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

X_2 : 改变距离处的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$ 。

5、有效剂量计算公式

$$H = D \times W \times T \times Q \text{ -----公式 5}$$

式中:

H: 射线所致有效剂量当量, Sv/a;

D: 空气吸收剂量率, Sv/h;

T: 照射时间, h;

W: 辐射种类的辐射权重因子

Q: 居留因子

11.2.2、核素制备区及 PET 诊疗区运行过程剂量预测

1、回旋加速器机房

本项目拟安装 1 台回旋加速器, 最大能量为 10MeV, 加速器带自屏蔽体, 根据生产厂家提供资料, 回旋加速器表面剂量分布图见图 11-1。

由图 11-1 可知, 在经自屏蔽系统衰减后距加速器表面 1m 处的剂量率均小于 15 μ Sv/h。为保守起见, 计算中加速器表面 1m 的剂量率均取 15 μ Sv/h。

根据设备厂家提供靶照射的放射数据可知, 该回旋加速器 γ 射线及中子最大能量为 10MeV, 《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 附录 I, 给出了 11MeV 自屏蔽式回旋加速器泄露辐射不同屏蔽材料的 TVL 值, 本项目保守参照其取值, 见表 11-1。

表 11-1 11MeV 回旋加速器泄露辐射不同屏蔽材料的 TVL 值

材料名称	密度 g/cm ³	γ 射线的 TVL 值 (cm)	中子 (cm)
混凝土	2.35	38	43
铅	11.3	5	47.8
聚乙烯	0.97	80	24

根据回旋加速器机房建筑平面布置图(图 11-2)可知, 回旋加速器四周围墙外人员活动点、等效靶中心处距离各活动点的距离、采取的屏蔽措施及各点剂量率计算结果见表 11-2 所示。

表 11-2 回旋加速器机房周围环境的附加剂量率估算结果表

位置	东墙外 30cm （过道、 小广场）	南墙外 30cm （医院围 墙）	西墙 30cm （热室）	北墙外 30cm （控制 室、水冷 间、气瓶 室）	屋顶 30cm （无建 筑）	加速器门 外 30cm （通道）	
距等效中心处距 离 m	3.8	6.4	9.7	5.7	5.1	9.5	
表面 1m 距等效 中心处距离 m	2.3	2.6	1.8	2.6	2	2.5	
屏蔽层	145cm 混凝土	188cm（考 虑最小厚 度） 混凝土	90cm（仅 考虑迷路 外墙） 混凝土	188cm （考虑 最小厚 度） 混凝土	160cm （考虑 最小厚 度） 混凝土	10mmPb +150mm 聚 乙烯	
距离衰减系数 K _r	0.3663	0.165	0.034	0.208	0.154	0.069	
屏蔽衰 减系数 K _d	γ射线	1.53E-04	1.13E-05	4.28E-03	1.13E-05	6.16E-05	1.73E-05
	中子	4.25E-04	4.25E-05	8.07E-03	4.25E-05	1.90E-04	8.57E-04
附加剂 量率 (μSv/h)	γ射线	8.40E-04	2.79E-05	2.21E-03	3.52E-05	1.42E-04	1.79E-05
	中子	2.33E-03	1.05E-04	4.17E-03	1.32E-04	4.39E-04	8.87E-04
	合计	3.17E-03	1.33E-04	6.38E-03	1.67E-04	5.81E-04	9.05E-04

由估算结果可知，回旋加速器正常运行时，在只考虑最小防护厚度的情况下，贯穿辐射对机房周围附加剂量均满足加速器机房墙外 30cm 处剂量率不超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的防护要求。

2、合成分装热室周围剂量率计算

在合成分装热室内进行药物合成、分装，每日一次，合成、分装最大操作量即为本项目核素最大使用量；则操作各种核素时间具体见表 11-3 所示。

表 11-3 合成、分装操作情况

序号	核素	合成		分装	
		日最大操作量 (Bq)	日最大合成时间 min	日最大操作量 (Bq)	日分装时间 min
1	^{18}F	1.48E+10	20	1.48E+10	60
2	^{11}C	5.92E+07	20	5.92E+07	10
3	^{13}N	2.22E+07	5	2.22E+07	10

在合成和分装药物过程中，核衰变产生 β^+ 衰变， β^+ 存在时间极短，当它被物质阻止而失去能量后立即与物质中的电子结合，发生湮灭而转化为能量为 0.511MeV 的 γ 射线对周围环境操作人员产生辐射影响。

热室内合成过程中人员位于热室操作台进行控制，分装过程中人员位于分装柜前进行监控，人员活动位置均位于热室前区。

由前述污染源分析可知， ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 在铅和混凝土中的什值层相同，其空气比释动能率场所相同，而 ^{18}F 使用量是最大，故在预测合成和分装药物过程中热室墙外剂量率时，以 ^{18}F 为例，若满足 ^{18}F 的防护要求，即可认为满足 ^{11}C 、 ^{13}N 的防护要求。

根据公式 2 可计算出合成、分装室人员操作位置及机房外剂量辐射水平见表 11-5 所示。

由估算结果可知，本项目热室药物合成、分装过程所致建筑周围及人员活动位置的空气比释动能率均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

表 11-5 合成、分装药物过程周围环境的附加剂量率估算结果表

位置		东 墙 外 30cm (回 旋加速器 机房)	南墙外 30cm (医院 围墙)	西墙外 30cm (质控 室)	北墙外 30cm (准 备间)	热室操作 台	屋顶 30cm (无 建筑)	分装柜前 (观察位 置)
距离 m	合成	3.1	2.2	5	5.2	1	3.7	/
	分装	3.1	4.6	5	4	1	3.7	1
屏蔽 层	合成柜	6cm 铅	6cm 铅	7cm 铅	6cm 铅	7cm 铅	6cm 铅	/
	分装柜	5cm 铅	5cm 铅	6cm 铅	5cm 铅	6cm 铅	5cm 铅	6cm 铅
热室房间屏蔽		119cm 混凝土	80cm 混 凝土	74cm 混凝 土	60cm 混 凝土	0	40cm 混 凝土	0
屏蔽 衰减 系数	合成	2.43E-04	2.43E-04	6.07E-05	2.43E-04	6.07E-05	2.43E-04	/
	分装	9.73E-04	9.73E-04	2.43E-04	9.73E-04	2.43E-04	9.73E-04	2.43E-04
建筑屏蔽衰减系数		3.90E-06	2.31E-04	4.33E-04	1.87E-03	1	1.52E-02	1
^{18}F	合成	2.16E-07	2.54E-05	2.30E-06	3.69E-05	1.33E-01	5.91E-04	/
	分装	8.64E-07	2.33E-05	9.21E-06	1.48E-04	5.32E-01	2.37E-03	5.32E-01
附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	叠加值	1.08E-06	4.87E-05	1.15E-05	1.85E-04	6.65E-01	2.96E-03	5.32E-01

3、质检

本项目各类放射性药物制备完毕后，工作人员采用注射器抽取少量药物（约为 30mCi）并置于钨合金防护罐内，通过药物传递窗口送达质控室。质检人员将药物转移至通风橱铅罐内，利用注射器或毛细管在通风橱内沾取少量药物，滴在烧杯内试纸上待扩散完全后进行检测。质控抽取量约为 $3.7 \times 10^7 \text{Bq}$ (1mCi)，质控操作过程中通风橱采用正面 60mmPb，其余面 50mmPb 屏蔽。假设质检人员距通风橱正面距离为 0.3m。则利用公式 2 可计算出人员操作位置剂量率见表 11-6 所示。

表 11-6 质控过程周围环境的附加剂量率估算结果表

核素	^{18}F	^{11}C	^{13}N
1m 处剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	5.06	5.24	5.24
屏蔽衰减系数 K_d	2.43E-04	2.43E-04	2.43E-04
附加剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	1.48E-02	1.48E-02	1.48E-02

4、转运、注射

分装热室按照约定病人需要量直接分装在注射器内，注射器置于 10mm 注射器防护套内，再置于 50mmPb 送药防护铅罐内进行转运；分装完成后由制药师负责转运，至 PET 诊疗区后，注射室医护人员从送药防护铅罐内取出带防护套的注射器，对病人进行注射。注射时注射人员由送药防护铅罐内取出，快速注射，通过注射窗操作，注射窗采用 10mmpb 屏蔽。

一次分装、转运最大 3 人用量，注射为单人用量，则转运和注射人员处的最大剂量率计算见表 11-7 所示。

由表 11-7 可知，本项目核素在注射过程中操作人员在从送药防护铅罐内取出药物注射过程中，操作 ^{11}C 时人员操作位附加剂量率值最大为 $41\mu\text{Sv/h}$ ，注射操作人员穿戴防护铅衣，铅手套等防护用品，佩带个人剂量计，可控制工作人员所受剂量。另为尽可能减少操作人员注射操作时的受照剂量，护士预先给病人建立静脉通路，单次注射操作时间小于 2min。

表 11-7 转运及注射过程中剂量率计算结果一览表

场所	核素	A(MBq)	$\Gamma(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq}))$	R(m)	铅 TVL (mm)	d (mm)	D ($\mu\text{Sv/h}$)
转运	^{18}F	14800	0.143	0.3	16.6	60	5.71
	^{11}C	59.2	0.148	0.3	16.6	60	0.024
	^{13}N	22.2	0.148	0.3	16.6	60	0.009
注射	^{18}F	370	0.143	0.5	16.6	20	13.21
	^{11}C	14.8	0.148	0.5	16.6	20	0.547
	^{13}N	11.1	0.148	0.5	16.6	20	0.410

5、患者（注射后）周围环境剂量率估算

^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 均为短命核素，回旋加速器制备成成品后，在很短时间内由专用屏蔽车送至 PET 诊疗区注射室，立刻给患者注射，整个过程非常短暂。注射 ^{18}F 病人注射后需在休息室停留 30-40min， ^{11}C 、 ^{13}N 注射后不停留，立即进入 PET/CT 机房进行摆位、扫描检查。扫描时间约 10~15min 不等，检查完毕后由病人出口离开。

根据《医用辐射危害控制与评价》（中国原子能出版社，苏旭主编）中，对于核素注射入患者体内后，1m 处的剂量率常数 ^{18}F 取 $0.092\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ， ^{11}C 和 ^{13}N 取 $0.095\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ 。

每例病人按照 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 最大注射量分别为 $3.7\times 10^8\text{Bq}$ （370MBq）、 $5.92\times 10^7\text{Bq}$ （14.8MBq）、 $2.22\times 10^7\text{Bq}$ （11.1MBq）考虑。PET 诊疗区周围关注点的剂量率，结果见表 11-8。

表 11-8 PET 诊疗区周围关注点辐射水平估算结果

关注点位	活度 A (MBq)	衰减距离 r (m)	屏蔽层	减弱系数 K^{-1}	参考点辐射水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
护士摆位处	^{18}F :370	0.5	0.5mmPb 铅衣	9.33E-01	127
	^{11}C : 14.8				5.24
	^{13}N :11.1				3.94
医院南墙外党校(PET 机房南墙外)	^{18}F :370	4.7	300mm 混凝土 +2mmPb 钡水泥	1.52E-02	0.05
	^{11}C : 14.8				1.48E-03
	^{13}N :11.1				1.11E-03
PET 控制室 (PET 机房西观察窗外)	^{18}F :370	4.5	6mmPb (观察窗)	4.35E-01	0.73
	^{11}C : 14.8				4.71E-02
	^{13}N :11.1				3.53E-02
PET 控制室 (PET 机	^{18}F :370	5.0	6mmPb (防护门)	4.35E-01	0.59

房西防护门外)	^{11}C : 14.8				3.81E-02
	^{13}N :11.1				2.86E-02
PET 控制室 (PET 机房西墙外)	^{18}F :370	4.7	300mm 混凝土 +2mmPb 钡水泥	1.52E-02	0.05
	^{11}C : 14.8				1.48E-03
	^{13}N :11.1				1.11E-03
PET 机房楼上 (无建筑, 无人)	^{18}F :370	3.2	300mm 混凝土 +2mmPb 钡水泥	1.52E-02	0.08
	^{11}C : 14.8				3.2E-03
	^{13}N :11.1				2.4E-03
病人出口通道 (注射后候诊室东墙外)	^{18}F :370*3 (考虑3人同时候诊)	4.8	300mm 混凝土 +2mmPb 钡水泥	1.52E-02	0.06
核医学科外走廊 (注射后候诊室北墙外)	^{18}F :370*3 (考虑3人同时候诊)	3.2	300mm 混凝土 +2mmPb 钡水泥	1.52E-02	0.15
注射后候诊室楼上 (无建筑、无人)	^{18}F :370*3 (考虑3人同时候诊)	3.2	300mm 混凝土 +2mmPb 钡水泥	1.52E-02	0.15

根据表 11-8 计算结果可知, PET 诊疗区周围关注点辐射剂量率均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

6、人员剂量估算与评价

(1) 工作人员附加有效剂量

① 工作人员配置

本项目核素制备区配备制药医师 2 名, PET 诊疗区配备医师 2 名, 护士 4 名。

② 工作负荷及位置

药物制备: 日打靶 1.5h, 打靶时人员位于加速器控制台; 每日药物合成最大时间 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 分别为 20min、20min、5min, 人员位于热室操作台; 每日药物分装最大时间 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 分别为 60min、10min、10min, 人员位于分装柜前监控。

质检室: 单日操作放射性核素时间 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 分别按照 2min 计, 共计 6min/d。

转运: 制药师药物分装完成后, 负责转运至注射室, 本项目总运距约 10m, 全程单次转运移交按照 5min 考虑, 每次最大 3 人用量, 则人员转运接触药物时间最大为 50min/d。

核素制备区每年工作 250 天, 一年内所有工作由 2 名工作人员承担, 每人所受年附加有效剂量保守按照总剂量的 70% 计算。

注射：总检查人数全年 ^{18}F 最多 5000 人， ^{11}C 最多 200 人， ^{13}N 最多 100 人，全年总检查人数不超过 5300 人，按照单人注射药品时间 2min 考虑，全年 ^{18}F 注射不超过 166.7h， ^{11}C 注射不超 6.7h， ^{13}N 注射不超 3.4h。

摆位：PET/CT 检查为患者摆位，每次时间按 1min，全年 ^{18}F 摆位不超过 83.4h， ^{11}C 摆位不超 3.4h， ^{13}N 摆位不超 1.68h。以上由 PET 诊疗区注射及 PET/CT 检查摆位均分别由 4 名护士完成。

每个病人的扫描时间 10~15min 不等，按 15min 计，全年扫描时间为 450h，其中 ^{18}F 扫描不超过 1250h， ^{11}C 扫描不超 50h， ^{13}N 扫描不超 25h。扫描工作由 2 名医师在控制室内操作。

③职业人员接受的年受照剂量的计算

对本项目核素制备区及 PET 诊疗区职业人员照射剂量计算见表 11-9 所示。

表 11-9 核素制备区及 PET 诊疗区辐射工作人员接受的年受照剂量

场所	操作环节	人员位置		关注点空气吸收剂量率 μSv/h	照射时间 (h/a)	居留因子	辐射种类权重因子	组织权重因素	年附加有效剂量 (mSv)	年附加总有效剂量 (mSv)
回旋加速器制药	打靶	回旋加速器控制室		3.52E-05 (γ)	375	1	1	1	1.32E-05	0.58 (0.41mSv/人)
				1.32E-04 (中子)	375	1	10	1	4.95E-04	
	合成	操作台		6.65E-01	187.5	1	1	1	0.12	
	分装	分装柜前		5.32E-01	333.3	1	1	1	0.18	
	质检	通风橱前		1.48E-02	25	1	1	1	0.00037	
	转运	转运铅罐前		1.33	208.3	1	1	1	0.28	
PET诊疗区	注射	注射位	¹⁸ F	13.21	166.7	1	1	1	2.207	12.824(3.206mSv/人)
			¹¹ C	0.547	6.7					
			¹³ N	0.410	3.4					
	摆位	摆位	¹⁸ F	127	83.4	1	1	1	10.617	
			¹¹ C	5.24	3.4					
			¹³ N	3.94	1.68					
	扫描	PET控制室	¹⁸ F	0.59	1250	1	1	1	0.74	0.74 (0.37mSv/人)
			¹¹ C	3.81E-02	50					
			¹³ N	2.86E-02	25					

由计算结果表明，本项目核素制备区及 PET 诊疗区职业工作人员所受的

年附加有效剂量最大为 3.206mSv，满足辐射工作人员职业照射的剂量管理目标值 5mSv。

④公众人员年受照剂量

本项目回旋加速器制药场所设置门禁系统，张贴电离辐射警告标志，进行严格的“分区”管理，除工作人员外，其它人员不得入内，公众成员不会进入。

PET 诊疗区，放射性物质使用场所与非放射性场所严格分区，并设置门禁系统，张贴电离辐射警告标志，进行严格的“分区”管理，放射性物质使用场所除工作人员、受检患者外，其它人员不得入内。

因此，本项目可能对公众造成影响的主要为场所外四周邻近区域及 PET 诊疗区楼上区域。

对公众活动场所附加剂量率值，本次邻近场所直接取邻近辐射场所侧计算最大值，对距离较远的关注点考虑距离衰减，除专门的辐射场所屏蔽体外，未考虑其它墙体、建筑等的屏蔽衰减；加速器制备药物操作在早上 8 点以前完成，回旋加速器制药时机房周围辐射剂量率比本底值低 2 个数量级，周围基本无公众居留，公众主要受放射性药物使用过程辐射影响。

PET 注射后候诊，按每人 30min 计，候诊室同时候诊 3 人，仅 ^{18}F 注射后需候诊，全年 ^{18}F 检查人数不超 5000 人，总候诊时间 2500h。居留因子参照《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），走廊、档案室、会议室属于部分居留，居留因子范围值 1/2~1/5，本次取推荐的典型值 1/4；候诊区（无人护理）属于偶然居留，居留因子范围值 1/8~1/40，推荐典型值为 1/16，本次保守取 1/8。

本项目所致公众剂量计算结果见表 11-10 所示。

表 11-10 公众年附加有效剂量

所处位置	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照时间 (h/a)	居留因 子	年附加有效剂量 (mSv)	备注
病人出口通道（注射 后候诊室东墙外）	0.06	2500	1/4	0.037	/
核医学科外走廊（注 射后候诊室北墙外）	0.15	2500	1/4	0.09	/
医院南墙外党校 （PET 机房南墙外）	0.05	1250	1/4	0.016	/

以上剂量估算均按照日最大操作及使用量计算得到，在实际运行中，本项目放射性药物制备量“以需定产”，使用量无法达到各种核素最大使用量，实际操作量小于计算量，因此，实际所接受的附加年有效剂量比计算结果要小。

由以上估算结果及分析可知，本项目对公众人员造成的年附加有效剂量最大为 0.09mSv，满足本项目公众成员剂量管理限值 0.1mSv。

本项目工作人员和公众成员所受到的附加辐射照射，均符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于“剂量限值”的要求以及本项目剂量管理限值的要求。

11.2.3、 ^{131}I 诊疗区运行过程剂量预测

1、源库、分装仪外剂量率估算

给患者服药前，核素暂存于铅罐（40mmPb）中放置在源库内间通风橱（40mmPb）；分装时，核素存于铅罐中（打开状态），放置在自动分装仪内（40mmPb），电脑控制进行自动分装。医务人员只需在电脑上设定分配活度、体积和计划使用时间，系统自动完成放射性原料（母液）稀释、定量分配、在线活度测量和体积配比的全部工作。设备自动将原液稀释后引入设备内预先放置好的一次性杯子中。并将分装好的药品传递至取药窗口，医护人员通过对讲装置，引导病人取药、服药。本次评价按 ^{131}I 一天最大使用量 $1.67\text{E}+10\text{Bq}$ （16700MBq）计算。关注点位剂量率计算结果见表 11-11。

表 11-11 ^{131}I 诊疗区源库、分装仪周围关注点辐射水平估算结果

关注点位	活度 A (MBq)	衰减距离 r (m)	屏蔽层	减弱系数 K^{-1}	参考点辐射水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
铅罐表面 5cm	16700	0.05	40mmPb	2.31E-04	91.5
源库通风橱表面 30cm	16700	0.8	40mmPb	2.31E-04	0.36
自动分碘仪表面 30cm	16700	0.8	40mmPb	2.31E-04	0.36
服药监控室	16700	3.8	40mm 铅+480mm 实心砖+10mm 铅	2.85E-07	0.00003
源库楼上 1m (库房)	16700	3.2	40mm 铅+10mm 铅	2.85E-05	0.003
源库南墙外 30cm (医 生通道)	16700	1.2	40mm 铅+240mm 实心砖+10mm 铅	2.85E-06	0.002
自动分碘仪楼上 1m (库房)	16700	3.2	40mm 铅+10mm 铅	2.85E-05	0.003

由表 11-11 计算结果可知, ^{131}I 诊疗区源库、分装仪周围关注点辐射剂量率均低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

2、服药病人周围、病房外剂量率计算

甲癌病人服用的 ^{131}I 剂量较大, 服药后的病人需要住院后才可出院。病人服药后立即进入甲癌病房。《非密封放射性核素治疗后的患者出院考虑》(ICRP 第 94 号出版物, 2004 年) 给出甲癌患者服用 Na^{131}I 后身体周围 1m 处的平均剂量率为 $0.046\mu\text{Sv}/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ 。本次评价假定病人服用 ^{131}I 量为 $3.7\text{E}+09\text{Bq}$ (单次服药量 3700MBq , 人均用药量)。则该病人服药后, 体表 1m 处的剂量当量率为 $170.2\mu\text{Sv/h}$ 。病人服药后, 立即进入病房, 病房内按 2 位病人考虑, 病房外关注点辐射剂量率计算结果见表 11-12。

表 11-12 甲癌病房外 (1 位刚服药病人) 关注点辐射剂量率计算结果

关注点位	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	衰减距离 r (m)	屏蔽层	减弱系数 K^{-1}	参考点辐射水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
甲癌病房东墙外 30cm (护理站)	340.4	2.8	240mm 实心砖 +10mm 铅	1.23E-02	0.53
甲癌病房南墙外 30cm (病人通道)	340.4	3.2	240mm 实心砖 +10mm 铅	1.23E-02	0.41
甲癌病房北墙外 30cm (核医学科外走)	340.4	3.2	240mm 实心砖 +10mm 铅	1.23E-02	0.41

廊)					
甲癌病房楼上 1m (库房)	340.4	3.2	预制板+10mmPb 钡水泥	1.23E-01	4.08

注*: 该计算结果为刚服药病人在病房内的保守结果, 随着病人住院时间的增加该结果会迅速减小。甲癌病房楼上楼板为预制板, 在进行剂量率计算时不考虑其防护能力。

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 第 6.1 款: (1) 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$, 如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域, 其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv/h}$ 。由表 11-12 计算结果可知, ^{131}I 诊疗区甲癌患者住院病房周围除甲癌病房楼上库房辐射剂量率为 $4.08\mu\text{Sv/h}$, 其余关注点辐射剂量率均低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$, 满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 的要求。

3、人员剂量估算与评价

(1) 工作人员附加有效剂量

①工作人员配置

本项目 ^{131}I 诊疗区配备护士 1 名, 医师 1 名。

②工作负荷及位置

根据治疗工作流程, 医护人员在整个过程中, 近距离接触放射性同位素的时间段分为: (1) ^{131}I 到货后将装有 ^{131}I 的铅罐搬运至源库通风橱暂存, 病人到位后将装有 ^{131}I 的铅罐放到自动分装仪内 (该过程 ^{131}I 在铅罐中, 有较好的防护, 时长约 1min), 按每周 1 次计, 每年 50 周, 共 50min; (2) 自动分装 ^{131}I , 病人服药后进入病房, 时长约 2min, 该过程工作人员在服药监控间操作, 每年病人 1400 人, 共计 2800min; (3) 每日查房, 时间约为 20min, 每年按工作 250 天计, 年查房时间 83.3h。职业人员和公众人员年受照剂量计算结果见表 11-13。

表 11-13 职业人员年受照剂量表

工作内容	位置	辐射剂量率 $\mu\text{Gy/h}$	工作时间 h	居留因子	年剂量 mSv	总的剂量 mSv
搬运铅罐	铅罐旁	91.5	0.84	1	0.0768	1.171
自动分装	分装监控室	0.00003	46.7	1	0.000001	
查房	病人通道	0.41	83.3	1	0.034	

值班	甲癌病房东 墙外 30cm (护理站)	0.53	2000	1	1.06	
----	---------------------------	------	------	---	------	--

由以上计算结果可知，本项目投运后 ^{131}I 诊疗区职业工作人员的外照射年剂量值最大为 1.171mSv。

③ ^{131}I 工作人员内照射剂量分析

由于 ^{131}I 具有可挥发性，对于职业工作人员除需要关注外照射造成的年剂量还需考虑内照射造成的年剂量，由于工作人员极少入甲癌病房且具有良好的通风设施，故不考虑考虑病人的呼出对空气中 ^{131}I 浓度的贡献。其计算公式引用 GBZ120-2020 中的推荐公式。

$$E(\tau) = A_0 e(\tau) \dots \dots \dots \text{公式 6}$$

式中： $E(\tau)$ ——待积有效剂量，mSv；

A_0 ——放射性核素摄入量，Bq；

$e(\tau)$ ——每单位摄入量引起的待积有效剂量，7.6E-06mSv/Bq(取自 GBZ129-2006)。

$$A_{0\text{吸}} = C_{\text{空}} B_{\text{空}} t \dots \dots \dots \text{公式 7}$$

式中： $A_{0\text{吸}}$ ——通过呼吸道的摄入量，Bq；

$C_{\text{空}}$ ——放射性核素 ^{131}I 在空气中的活度浓度，Bq/m³；

$B_{\text{空}}$ ——工作人员呼吸率，取 0.83m³/h；

t ——在放射性核素 ^{131}I 工作场所的累计时间，h。

^{131}I 年操作总量约为 2.68E+12Bq，分装室体积约为 14.4m³，每天换气 6 次， ^{131}I 采用自动分碘仪，假设有 1/100000（十万分之一）的同位素进入空气中，按每年 250 天进行估算，则分装室中放射性核素 ^{131}I 在空气中的活度浓度为 7.2×10²Bq/m³，年工作时间按分装时间 46.7h 计，利用公式 6、7 可估算出 ^{131}I 职业工作人员因内照射造成的年剂量为 0.34mSv。

综上所述， ^{131}I 诊疗区职业工作人员的年剂量值最大为 1.511mSv，满足辐射工作人员职业照射的剂量管理目标值 5mSv。

(2) 公众人员年受照剂量

本项目 ^{131}I 诊疗区设置门禁系统，张贴电离辐射警告标志，进行严格的“分区”管理，除工作人员、受检患者外，其它人员不得入内。

因此，本项目可能对公众造成影响的主要为场所外四周邻近区域及 ^{131}I 诊疗区楼上区域。

根据 ICRP 第 94 号出版物给出的数据，患者体内大约 55% 施予活度的 ^{131}I 在服药 24 小时内排出体外，22% 的 ^{131}I 在第 2 个 24 小时排出，即最初 2 天内随尿液排出总计 77%；总量 85% 的 ^{131}I 在最初 5 天内排出体外。故患者服药后每天的剂量率变化很大，以瞬时剂量率估算公众受照剂量不符合实际情况。表 11-14 列出了服用 ^{131}I 的甲癌患者周围辐射剂量率变化情况。

表 11-14 甲癌患者服用 ^{131}I 后体表周围 γ 剂量率统计表

服药后时间	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天
距离患者体表 1m 外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	0.046	0.019	0.009	0.007	0.007
服用 7400MBq 患者体表 1m 外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	340.4	140.6	66.6	51.8	51.8

由表 11-14 可知，在 ^{131}I 治疗病房收治甲癌患者的一个治疗隔离期（5 天）内，周围公众的累积照射量约为第一天受照剂量的 2 倍。甲癌病房周围公众的活动时间按照 480 小时考虑。

本项目甲亢为门诊治疗，甲癌为住院治疗。甲癌年治疗患者 300 人，每次治疗 2 人，人均住院 5 天，甲癌患者总住院时间为 250 天。由于源库和自动分碘仪周围房间的辐射剂量率计算结果比本底值低 3 个数量级，源库和分碘仪周围房间活动的公众人员年剂量可忽略不计，仅考虑甲癌病房周围活动的公众的年剂量。本项目所致公众剂量计算结果见表 11-15 所示。

表 11-15 公众人员年受照剂量表

关注位置	辐射剂量率 $\mu\text{Gy/h}$	工作 时间 h	居留 因子	年剂量 mSv	备注
甲癌病房北墙外 30cm（核医学科外 走廊）	0.41	480	1/4	0.049	/
甲癌病房楼上 1m （库房）	4.08	480	1/32	0.06	/

由以上估算结果及分析可知，本项目对公众人员造成的年附加有效剂量最大为 0.06mSv，满足本项目公众成员剂量管理限值 0.1mSv。

患者隔离治疗期结束出院后，体内残留 ^{131}I 的放射性也可能对周围公众产生影响。考虑放射性药物衰变因素，本项目要求 ^{131}I 治疗的患者住院 5 天以上，需满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》第 7.4.4.3 条款：接受 ^{131}I 治疗的患者，其体内放射性活度降至低于 400MBq 之前不得出院的要求。在患者出院时，主治医师发放放射性药物治疗患者告知书，要求服药患者离院后，限制与儿童或孕妇密切接触，避免与他人长时间接触。采取上述辐射防护措施，接受 ^{131}I 治疗的患者出院后对周围人员的辐射影响可以控制。

11.2.3、SPECT 诊疗区运行过程剂量预测

11.2.3.1 使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 过程剂量预测

1、各关注点剂量率计算

供货商每周送来一柱活度为 $1.85 \times 10^{10}\text{Bq}$ (500mCi) 的钼铯发生器，该钼铯发生器自带 1.2cm 的铅套，确保外表面剂量率 $\leq 400 \mu\text{Sv/h}$ 且表面污染水平 $\leq 0.4\text{Bq/cm}^2$ 。该钼铯发生器放置在母牛（淋洗室）通风橱内，每天淋洗一次，洗脱液一次最多 500mCi，医护人员在 50mmPb 的通风橱内抽取 20mCi 的针剂，测定活度后在注射窗口给病人注射。注射窗口为 10mmPb 的铅玻璃防护。注射后病人在注射候诊室内等待，注射后候诊室一次最多候诊 6 人，人均半小时。SPECT 扫描室每次进行一个病人的扫描。SPECT 诊疗区周围人员易到达点辐射剂量率计算结果见表 11-16。

表 11-16 SPECT 诊疗区周围关注点辐射剂量率

关注点位		活度 A (MBq)	衰减距离 r (m)	屏蔽层	减弱系数 K^{-1}	参考点辐射水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
通风橱外 30cm	淋洗	18500	0.8	50mmPb	2.34E-53	2.04E-50
	分装	22200	0.8	50mmPb	2.34E-53	2.45E-50
注射位		740 (单人)	0.5	10mmPb	2.98E-11	2.67E-09
注射室北墙外 30cm (病人通道)		740 (单人)	2.1	240mm 实心砖墙 +3mmPb 钡水泥	4.39E-05	2.23E-04
注射室东墙外 30cm (控制室)		740 (单人)	3.1	240mm 实心砖墙 +3mmPb 钡水泥	4.39E-05	1.02E-04

注射室楼上（库房）	740（单人）	3.2	预制楼板+5mmPb 钡水泥	5.46E-06	1.19E-05
SPECT/CT 机房内摆位处	740（单人）	0.5	0.5mmPb	2.98E-01	26.7
SPECT/CT 机房西侧（控制室）	740（单人）	3.8	6mmPb	4.83E-07	7.50E-07
SPECT/CT 机房南侧（医生通道）	740（单人）	3.3	240mm 实心砖墙 +3mmPb 钡水泥	4.39E-05	9.03E-05
注射后候诊室东墙外（候诊区）	4440（6 人）	3.3	240mm 实心砖墙 +3mmPb 钡水泥	4.39E-05	1.48E-03
注射后候诊室北墙外（走廊）	4440（6 人）	3.2	240mm 实心砖墙 +3mmPb 钡水泥	4.39E-05	5.76E-04
注射后候诊室楼上（库房）	4440（6 人）	3.2	预制楼板+5mmPb 钡水泥	5.46E-06	6.35E-06

由表 11-16 计算结果可知，SPET 诊疗区周围各关注点位的辐射剂量率均小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

根据以上计算结果，医院 SPECT 诊疗区的防护设计偏保守，根据 GBZ120-2020 中表 1.2 操作 18500MBq 活度的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 仅需要 3mmPb 的防护通风柜即可满足通风柜表面 30cm 处剂量率 $25\mu\text{Sv/h}$ ，若医院将通风柜表面剂量率控制在 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 以下，通风柜铅当量设计为 10mmPb 即可。

2、职业和公众人员个人剂量计算

①工作人员配置

本项目 SPECT 诊疗区配备护士 1 名，医师 2 名。

②工作负荷及位置

工作人员每天淋洗一次铅-锡柱。淋洗完成后每次抽取 20mCi 药物后进行注射，每次淋洗时间按 5min 计，每年淋洗时间取 21h；每次抽取药物时间按 1min 计，全年 5000 名患者，年分装时间按 83.4h；每个患者注射时间按 1min 计，全年注射时间 83.4h；每位患者摆位时间按 1min 计，全年摆位时间 83.40h；每位患者扫描时间按 15min 计，全年扫描时间 1250h。SPECT 诊疗区职业人员和公众人员受照剂量计算结果见表 11-17。

表 11-17 SPECT 诊疗区职业人员和公众人员受照剂量

关注位置		辐射剂量率 $\mu\text{Gy/h}$	工作 时间 h	居留 因子	年剂量 mSv	备注
通风橱外 30cm	淋洗	2.04E-50	21	1	4.29E-52	职业人员
	分装	2.45E-50	83.4	1	2.04E-51	职业人员
注射位		2.67E-09	83.4	1	2.23E-10	职业人员
注射室东墙外 30cm (控制室)		1.02E-04	83.4	1/4	2.13E-06	公众
注射室楼上 (库房)		1.19E-05	83.4	1/4	2.48E-07	公众
SPECT/CT 机房内 摆位处		26.7	83.4	1	5.57E-01	职业人员
SPECT/CT 机房西 侧 (控制室)		7.50E-07	1250	1	2.34E-07	公众
SPECT/CT 机房南 侧 (医生通道)		9.03E-05	1250	1/4	2.82E-05	公众
注射后候诊室东墙 外 (候诊区)		1.48E-03	416	1/4	1.54E-04	公众
注射后候诊室北墙 外 (走廊)		5.76E-04	416	1/4	5.99E-05	公众
注射后候诊室楼上 (库房)		6.35E-06	416	1/4	6.60E-07	公众

由表 11-17 可知，本项目 SPECT 诊疗区职业人员年受照剂量最大为 0.557mSv，公众人员年受照剂量最大为 1.54E-04mSv，均满足本项目职业人员剂量管理限值 5mSv 和公众成员剂量管理限值 0.1mSv。

11.2.3.1 使用 ^{89}Sr 、 ^{153}S 、 ^{90}Sr 、 ^{125}I 粒子过程剂量预测

^{89}Sr 、 ^{153}S 、 ^{90}Sr 为 β 核素，外照射剂量主要体现为 β 射线产生的韧致辐射，产生量较小，其影响较小。

^{125}I 粒子植入，因 ^{125}I 粒子棒产生的 X 射线能量平均为 28.3 keV，在人体组织中的穿透力仅为 17mm，在铅中的半值层为 0.26mm，只需要穿戴 0.5mmPb 的防护用品即可将射线量降低 100 倍，医护人员在正确穿戴防护用品的情况下， ^{125}I 粒子植入过程对医护人员产生的辐射影响非常小。

11.2.4 PET/CT、SPECT/CT 射线装置环境影响分析

PET/CT、SPECT/CT 均自带 CT 功能，根据《射线装置分类办法》划分为 III 类射线装置，在此仅对其机房的防护能力对照《放射诊断放射防护要求》（GBZ

130-2020) 进行符合性分析。

表 11-18 SPECT 机房辐射防护措施对照表

机房	标准要求	实际措施	是否满足
PET/CT SPECT/ CT 机房	①应设有单独机房，机房内最小有效使用面积不小于30m ² ，机房内最小单边长度不小于4.5m。 ②有用线束方向铅当量2mm，非有用线束方向铅当量1mm。	①设置有独立机房，PET/CT机房面积42.9m ² （8.1m×5.3m），最小单边5.3m；SPECT/CT面积34m ² （6.3m×5.4m），最小单边5.4m； ②PET/CT 机房防护：四周墙体及屋顶300mm 混凝土+2mmPb 钡水泥，防护门、观察窗 6mmPb； SPECT/CT机房四周墙体：240mm实心砖墙+3mmPb钡水泥，顶棚5mmPb钡水泥，防护门、观察窗6mmPb	满足要求

11.3、放射性三废的治理评价

11.3.1 放射性废液

1、核素制备区及 PET 诊疗区、SPECT 诊疗区

核素制备区及 PET 诊疗区、SPECT 诊疗区产生的放射性废水进入同一个衰变池系统，该衰变池系统共设置 1 个进水集水池、3 个槽式衰变池、1 个排水集水池，进水集水池有效容积 16.1m³，3 个槽式衰变池每个有效容积为 16.1m³，总有效容积为 64.4m³。

核素制备区：核素制备区：放射性药物制取过程中每天产生约 40ml 放射性废液，另外对靶、相关容器、器皿等的冲洗产生约 60ml 放射性废液，回旋加速器室及热室内设有废液收集瓶，专门用来存放生产过程中产生的少量废液。收集后存放 1 天即可满足 10 个半衰期要求，经管道排入衰变池。

操作人员清洗去污可能产生少量的放射性清洗废水直接通过下水管道排入衰变池。质控室器皿及人员清洗会产生一定量的放射性废水，通过下水道排至衰变池。以上放射性废液中质检产生量为 5L/d，其它清洗废水只有在极少数情况下，出现人员皮肤沾污时产生，出现沾污的机率很小，出现次数不会超过操作天数的 1/10，本次评价以 1/5 的天数出现人员沾污，每次去污清洗产生废水量 50L 计算。本次评价核素制备区放射性废水产量按 55L/天计。

PET 诊疗区:根据前述污染物分析,PET 诊疗区每天放射性废水产量 230L/天。

SPECT 诊疗区:根据前述污染物分析, SPECT 诊疗区每天放射性废水产量 270L/天。

核素制备区、PET诊疗区、SPECT诊疗区每天的放射性废水产量为555L/天(0.555m³)

核素制备区、PET 诊疗区和 SPECT 诊疗区所使用的放射性核素量最大的为 ^{99m}Tc, 半衰期为 6.02 小时, 小于 24 小时, 按《核医学防护与安全要求》(HJ 118-2021) 储存满 30 天后可直接排放。

在 30 天(20 个工作日)中产生的放射性废水为 11.1m³, 核医学衰变池单格衰变池容积为 16.1m³, 满足《核医学防护与安全要求》(HJ 118-2021) 中半衰期小于 24 小时的放射性废水, 储存满 30 天后可直接排放的要求。

2、¹³¹I 诊疗区

¹³¹I 诊疗区产生的放射性废水单独进入一套衰变池系统。该衰变池系统共设置 1 个集水池和 3 个槽式衰变池, 集水池有效容积 16.1m³, 3 个槽式衰变池每个有效容积为 40m³。碘衰变池总有效容积为 136.1m³。

《核医学防护与安全要求》(HJ 118-2021) 中要求含¹³¹I的放射性废水暂存时间应至少为180天。在180天中, 甲癌患者按照住院考虑180天产生放射性废水 $0.6 \times 180 = 108\text{m}^3$, 其余门诊按照180天内的工作日130天所产生的放射性废水 $0.045 \times 130 = 5.85\text{m}^3$ 。在此180天内产生含¹³¹I放射性废水共113.85m³, 碘衰变池总容积为120m³(不含集水池), 满足放射性废水排放时必须储存至少180天的要求, 放射性废水监测结果经审管部门认可后, 按照GB18871中8.6.2规定方式进行排放。

11.3.2 放射性废气处理措施评价

1、核素制备区

①回旋加速器机房、合成、分装热室均设置有独立的排风系统, 并在排风口设置一个活性炭高效过滤器, 排放口设置在本层屋顶, 高出本层屋顶。

②热室房间、质控室各房间设置全面排风系统, 排风口设置一个活性炭高效过滤器, 排放口设置在本层屋顶, 高出本层屋顶;

③热室通风橱、质控室通风橱均为独立排风管道，排风口设置一个活性炭高效过滤器，设置风速均大于 1m/s，排放口设置在本层屋顶，高出本层屋顶。

2、PET 诊疗区

PET/CT 机房、注射准备室、放废间、注射后候诊室等涉及放射性药物场所均设置排风系统，统一经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。

3、¹³¹I 诊疗区

¹³¹I 自动分装仪、源库通风橱、三间 ¹³¹I 住院病房、¹³¹I 留观病房全部设置单独排风管道，经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。

¹³¹I 诊疗区治疗室、源库、分装、洗污间、放废间等涉及放射性药物场所均设置排风系统，统一经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。

4、SPECT 诊疗区

母牛（淋洗室）通风橱设置单独排风管道，经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。

SPECT 诊疗区质控室、注射室、运动负荷室、注射后候诊室等涉及放射性药物场所均设置排风系统，统一经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。

本项目产生的放射性废气排放满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中“排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置”要求。

11.3.3 放射性固体废物

1、核素制备区

核素制备区产生的放射性固体废物包括靶废料，即靶窗、废弃的离子源灯丝等感生放射性废物；放射性药物制取时产生放射性残留物碳柱和滤膜、废离子交换树脂等；还有少量操作手套、口罩、棉签、试管等。均采取衰变贮存方式，贮存达到审管部门批准的清洁解控水，并经审管部门同意后按医疗废物处理。

加速器维修置换的废靶委托有资质的机构进行放射性水平检测，如不能满足清洁解控要求，送贮至省放射性废物库。

2、PET 诊疗区

PET 诊疗区产生的放射性固体废物主要是操作人员操作 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 等核素时戴的手套、药棉、废弃的制剂瓶、注射器等分类收集，存放在放射性废物储存间铅桶内，经过衰变，贮存达到审管部门批准的清洁解控水平，并经审管部门同意后按医疗废物处理。

3、 ^{131}I 诊疗区

^{131}I 诊疗区产生的放射性固体废物主要是被核素污染的一次性手套、一次性服药杯、甲癌病房放射性固废等，统一收集后存放在放射性废物储存间铅桶内，经过衰变，贮存达到审管部门批准的清洁解控水平，并经审管部门同意后按医疗废物处理。

4、SPECT 诊疗区

SPECT 诊疗区产生的放射性固体废物主要是操作核素时戴的手套、药棉、废弃的制剂瓶、注射器等，分类收集后存放在放射性废物储存间铅桶内，经过衰变，贮存达到审管部门批准的清洁解控水平，并经审管部门同意后按医疗废物处理。使用完的钼铯发生器由厂家回收。

本项目在 PET 诊疗区设置 1 个放废间，用于储存核素制备区和 PET 诊疗区产生的放射性固体废弃物； ^{131}I 诊疗区设置 1 个放废间，用于储存 ^{131}I 诊疗区和 SPECT 诊疗区产生的放射性固体废弃物。

根据《核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021）中要求，放射性废物存储间，入口设电离辐射警示标识、采取有效的防火、防丢失、放射性泄露措施；放射性废物储存间内设专用容器盛放固体放射性废物袋，不同类别废物分开存放，容器表面应注明废物所含核素名称、废物类别、入口日期等信息，并做好登记。

放射性固体废物储存满足下列要求的，经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 表面污染小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ ， β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：①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；②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；③含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超 180 天。

采取上述措施后本项目的放射性废物处置方式能够满足当前生态环境管理的要求。

11.4 运行期满后场所的退役

本项目在运行期满后，按照《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版）的要求若经有资质的单位进行环境监测后，不存在污染可直接退役；如经监测后存在污染，则需要按要求编制退役环境影响评价报告表，经过去污处理满足退役条件后方可退役。

11.5 异常事件分析与防范建议

11.5.1 异常事件

1、回旋加速器

①在防护门关闭后，如果有人滞留在加速器室内或安全联锁系统失效、人员误入，加速器运行可能产生误照射。

②回旋加速器装置失灵、损坏、调试和操作失误等，导致放射性核素或药物因意外停留在传输管道中，生产核素的过程中盛放靶核素的管子破裂，合成系统管道堵塞或泄漏等情况下，可能导致工作人员误照射或放射性核素污染相关工作场所。

2、非密封放射性物质的操作和使用

①在操作非密封放射性物质的过程中，因容器破碎、药物泼洒等，有可能污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成手和皮肤的污染。

②放射性药物丢失或被盗，造成放射性事故；放射性药物在转移过程中由于操作人员违反操作规定或误操作引起意外泄漏而造成放射性表面污染。

③放射性同位素使用中，出现患者识别错误，或者剂量使用错误，会给患者造成不该施加的照射。

④违反管理规定，工作人员手部有伤仍从事放射性物质操作，可能造成内污染；在场所内吸烟、进食，可能吸入和食入放射性物质造成人员内照射；将开放性用品（包括清洁用具）带到其它非放射工作场所；放射性药物发放错误：活度检测设备灵敏度低病员不得不注射或服用较大剂量的放射性药物，而受到不必要的照射。工作人员没有经过专业知识培训，有不良工作习

惯，对自身的防护不重视，注射用棉签，一次性手套乱扔，使室内受到污染，辐射水平增高。

⑤因受到爆炸、火灾等各种自然或人为灾害的破坏，可能会导致放射性药物包容破损、放射性液体泄漏、放射性释放，若处置不当，会对人员和环境造成危害。

⑥放射性废物处置或管理不当，造成环境放射性污染。

11.5.2 防范措施

(1)对所有操作场所进行严格的分区管理，设置控制区和监督区，控制区禁止无关人员进入，设置门禁系统、警示灯，悬挂电离辐射警示标识。

(2)辐射工作人员全部配备个人剂量报警仪、一体式铅衣、铅帽、围领、手套、防护眼镜、防护面罩等必要的个人防护用品。

(3)回旋加速器带自屏蔽门，并与外侧防护门实现门机连锁保护装置，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、入口间及控制室均需设置应急停止按钮，张贴应急预案，放射防护注意事项、设备操作规程、紧急处理措施等。

(4)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（如设置为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ），则有声光报警，人员马上撤离。

(5)放射性物质操作使用区出入口设单向门进出，张贴警示标志，防止其他工作人员及公众成员进入，也避免服药病人服药后外出；在控制区走廊及注射后候诊区设视频控制及语音装置。

(6)建立放射性药物制备、使用、转运、保管的安全管理制度，加强放射性药物安全管理，落实放射性物质安保措施，以防止放射性药物丢失。医生、护士等人员做好患者的信息沟通，给药前对药物进行测量并核对。

(7)对工作人员进行岗前培训合格后上岗，工作人员须熟练掌握放射性药物操作技能和熟悉辐射防护基本知识，能正确处置意外情况。

(8)对放射性废物制定放射性三废的处理制度，设置放射性废物专职管理

员，对放射性废物单独收集，按照国家规定处理。

(9)各操作场所配备防护面罩、吸水滤纸、纱布、酒精、便携式剂量监测仪等应急物资和灭火器材。

(10)制定医生、患者管理制度，患者在满足离开条件时方可离开，工作人员在离开现场时，进行表面污染监测。

11.5.3 应急处理措施

在发生事故时，采取的应急处理措施如下：

(1)回旋加速器室

①为避免加速器运行人员滞留误入造成的辐射事故，要求工作人员每次上班时首先要检查防护门上警示信号灯是否正常。如果警示信号灯失灵，应立即修理，恢复正常。平时加强对工作人员安全教育，严格按操作规程操作。在加速器室、加速器入口间及控制室人员易到达位置均设置紧急按钮，一旦有人员滞留立即使用墙上紧急停止按钮，切断电源。

②针对回旋加速器装置失灵、损坏、调试和操作失误及生产核素的过程中盛放靶核素的管子破裂，合成系统管道堵塞或泄漏等情况。由于该加速器自动化程度高，一旦发生系统故障，加速器立即自动停机，并且要经过24小时后，加速器才能重新启动。这时机房内泄漏的微量的核素已经过13个以上半衰期（ ^{18}F 为13），放射性活度衰减幅度约为 10^{-4} 以上，若有必要，可继续停机一段时间，再进行换靶和去污。如发生传输管道脱落或破裂等导致放射性药物泄漏事故，应及时采取去污措施防止污染扩散，并对去污后的工作场所进行必要检测。

(2)放射性同位素操作及使用

①由于操作不慎，有少量的液态 药物溅洒。发生这种事故应迅速用吸附衬垫吸干溅洒的液体，以防止污染扩散。然后用备用的塑料袋装清洗过程中产生的污染物品和湿的药棉、纸巾，从溅洒处移去垫子，用药棉或纸巾擦抹，应注意从污染区的边沿向中心擦抹，直到擦干污染区。最后用表面污染监测仪测量污染区，如果 β 表面污染大于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，表明该污染区未达到解控标准，这时应用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，直到该污染区表面污染小于 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ 为止。擦拭产生的放射性固废应统一收集在污物桶内。

②因不慎造成放射性核素污染了地面或台面时，应先用吸收滤纸将其吸干，以防扩散，并立即标记污染范围，注明放射性核素名称、日期。根据污染程度及时报告上级领导和有关部门。人体溅污放射性核素时，可先用氧化肽膏或高锰酸钾的饱和溶液洗涤，再用 50%的酸性亚硫酸钠进行洗涤。

③若发生放射性药物丢失、被盗，应第一时间将事故情况通报有关（生态环境、公安、卫健等）主管部门；分析确定丢失、被盗事故的具体时间及原因，向相关部门提供信息，根据有关线索，组织人员协同相关部门查找丢失、被盗放射性同位素，在查找过程中携带辐射监测仪器，防止事故处理人员受到照射；对放射性同位素丢失前存放场所进行监测，根据现场辐射剂量率的大小确定是否受污染。如现场受到污染出现辐射剂量率异常情况，根据辐射剂量率大小划定警戒线，撤离警戒区域内的所有人员，事故处理人员应穿戴防护用品，佩戴个人剂量计进入事故现场。

④放射性废物处置或管理不当造成污染时，立即划定警戒区，并设置放射性污染标识，限制无关人员靠近，由专业人员处理，经监测满足解控要求后再解除警戒。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规要求，使用射线装置、放射性同位素的单位应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；辐射工作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。

1、医院已成立了以医院法定代表人为组长，以分管副院长、为副组长，核医学科、影像科、放疗科等相关负责人及主要辐射工作人员为组员的辐射安全防护领导组，全面负责辐射安全管理相关工作，制定单位辐射防护管理制度，并对执行情况进行监督检查。并设置了辐射专职人员，辐射专职人员具体负责日常辐射安全与环保工作，负责组织实施辐射安全防护措施和落实各项管理制度，辐射专职人员具有本科以上学历。

2、本项目辐射工作人员共 14 人，其中 4 人为计划新增辐射人员。均应通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习相关知识，报名并参加考核，考核合格后方可上岗工作。

12.2 辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规要求，使用放射源和射线装置的单位要健全操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性核素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等，并有完善的辐射事故应急措施。

医院需要根据相关要求，制定相关的辐射防护管理规章制度，现对医院拟制定的辐射安全管理制度的重点建议如下：

操作规程：明确辐射工作人员的资质条件要求、操作过程中应采取的具体防护措施及步骤。

岗位职责：明确辐射工作人员的岗位责任，并落实到个人，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任。

辐射防护和安全保卫制度：根据射线装置、放射源及放射性药物操作的具体

情况制定相应的辐射防护和安全保卫制度，预防辐射安全事故的发生。

设备检修维护制度：明确设备在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施，确保设施安全有效地运转。

射线装置和放射性核素使用登记制度：建立射线装置和放射性核素使用登记制度，明确射线装置的购买、使用以及放射性药物的使用、贮存情况等由专人负责登记、专人形成台帐、每月核对，确保帐物相符。

人员培训计划：明确培训对象、内容、周期、方式以及考核的办法等内容，并强调对培训档案的管理，做到有据可查。

监测方案：明确监测对象、频次和监测项目，监测结果定期上报环境保护行政主管部门，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度的评估报告。

事故应急预案：明确应急机构的组成、职责分工、应急人员的培训、事故报告制度、辐射防护措施及事故处理程序等。医院在试运行前还应对事故应急预案进行补充和完善，主要是明确应急人员的组成及联系方式等，并在以后的工作中，根据实际情况不断完善相应的辐射事故应急方案和措施。

12.3 辐射监测

12.3.1 个人剂量监测

医院应制订辐射工作人员个人剂量监测的管理要求，并将辐射工作人员个人剂量监测工作作为全院辐射监测计划体系的管理目标之一，要求全院辐射工作人员按要求接受个人剂量监测，并建立相应的个人剂量监测档案。

全院辐射工作人员的个人剂量监测工作需委托具有相应资质的机构承担，监测频度为每 3 个月检测一次。医院应严格要求辐射工作人员按照规范佩戴个人剂量计，规定在个人剂量计佩戴时间届满一个监测周期时，由专人负责收集人员佩戴的剂量计送检更换，医院应严格按照国家法规和相关标准进行个人剂量监测和相关的防护管理工作。

12.3.2 工作场所及环境监测

1、监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，使用乙级非密封放射性物质工作场所的单位、使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置的单位、使用Ⅲ类密封源的单位，应“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

人剂量报警仪、固定式和便携式辐射监测、表面污染监测、流出物监测等设备”，“对直接从事生产、销售、使用活动的工作人员进行个人剂量监测和职业健康检查，建立个人剂量档案和职业健康监护档案”。

医院根据所开展的项目，配备有 1 台可携式 α 、 γ 剂量仪和 1 台可携式表面污染测量仪，用于辐射工作场所定期自行检测。并配备有个人剂量报警仪和个人剂量计。

2、监测方案

医院应根据辐射管理要求，制定如下监测方案：

（1）定期（不少于 1 次/年）请有资质的单位对核医学科非密封放射性物质工作场所、回旋加速器机房周围环境的 X- γ 辐射剂量率进行监测，并对核医学科非密封放射性物质工作场所的表面沾污进行监测；

（2）辐射工作人员佩带个人剂量计监测累积剂量，定期（不少于 1 次/季度）送有资质部门进行个人剂量测量，并建立个人剂量档案。

（3）辐射工作人员定期进行职业健康体检，并建立职业健康监护档案。

（4）利用配备的便携式辐射巡测仪对核医学科非密封放射性物质工作场所、回旋加速器机房周围环境的 X- γ 辐射剂量率进行监测。利用配备的表面污染测量仪对核医学科开放性工作场所进行 β 表面污染监测；并对监测项目、监测点位、监测结果等进行记录存档；监测项目、点位见表 12-1。

表 12-1 核医学科日常监测点位

监测区域	监测项目	监测位置	监测频次
回旋加速器核素制备区	场所 γ 剂量率	控制区屏蔽墙外 0.3m、防护门缝隙和中央、管线口	建议一季度一次
	场所 β 表面污染	控制区内地面、工作台面、座椅、洗手池台面	建议一季度一次
	人员 β 表面污染	工作人员手部、皮肤、工作服、手套、鞋帽，鞋底	每次操作完核素离开时
PET 诊疗区、 ^{131}I 核素诊疗区、SPECT 诊疗区	场所 γ 剂量率	控制区屏蔽墙外 0.3m，控制区楼上房间地面外 0.3m 防护门缝隙和中央，观察窗外 0.3m，管线口	建议一季度一次
	场所 β 表面污染	控制区内地面、工作台面、座椅、洗手池台面、床面	建议一季度一次
	人员 β 表面污染	工作人员手部、皮肤、工作服、手套、鞋帽，鞋底	每次操作完核素离开时

本项目落实以上措施后，本项目的监测仪器配备及监测方案将满足环保要求。

12.4 辐射事故应急管理

针对可能发生的事故风险，医院应根据发生辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围，制定辐射事故应急方案。依照原国家环保总局的《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》（环发[2006]145号文）中的有关要求，辐射事故可分为特别重大辐射事故、重大事故、较大事故和一般辐射事故。本项目事故多为放射性核素的丢失、被盗或泼洒而发生污染。

医院应根据本项目的特点制定了辐射事故应急预案，预案中明确了应急机构的组成、职责分工、应急人员的培训、事故报告制度、辐射防护措施及事故处理程序等。医院在试运行前还应对事故应急预案进行补充和完善，主要是明确应急人员的组成及联系方式等，并在日常工作中加强对职工进行辐射防护知识的培训 and 安全意识教育，积极开展辐射应急演练，发现问题及时解决，并在以后实际工作中不断完善辐射安全管理制度。

发生辐射事故时，医院应立即启动本单位的辐射事故应急措施，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境主管部门和公安部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。

12.5 法规符合情况

依据《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 20 号）和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令第 18 号，2011 年）规定现对医院从事本项目辐射活动能力评价列于表 12-2 和表 12-3。

12.5.1 对照原“环保部 3 号令”要求的满足情况

表 12-2 汇总列出了本项目对照《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 20 号）对使用射线装置单位承诺的对应检查情况。

表 12-2 项目执行“生态环境部令 20 号”要求对照表

序号	原环保部 3 号令要求	本单位落实情况	是否符合要求
1	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	已成立辐射防护领导小组,并在该机构设有本科学历的专职管理人员。	符合
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。	医院辐射工作人员已报名参加辐射安全培训,等待考试。	符合
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体防卫要求的放射源暂存库或设备。	设置有专用储源室	符合
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要求的安全措施。	①回旋加速器制药、PET 诊疗区、 ¹³¹ I 诊疗区、SPECT 诊疗区病人入口拟设置工作状态指示灯;医生、病人进出口通道门,高活室(分装、注射)、储源室、污物间、运动室、注射后候诊室、检查室的防护门及铅废物桶表面拟设置电离辐射警告标志,警告无关人员不要靠近和逗留。病人进出口通道门拟设置为单向门并设有门禁,入口只进不出,出口只出不进,禁止无关人员进入。储源室拟配备保险柜与储源室的防盗门实现双人双锁,并安装监控。注射后候诊室、检查室、留观室拟安装高清探头,并设有对讲系统。检查室病人通道防护门拟安装闭门装置,确保防护门处于常闭状态。	符合
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,包括个人剂量监测报警、辐射监测等仪器。	医院已配置相应的辐射监测仪器。	符合
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。	拟制定健全的定规章制度、操作规程、岗位职责及辐射防护 和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测 方案等。	近期符合

7	有完善的辐射事故应急措施。	根据项目的需要，拟制定辐射事故应急处理预案。	近期符合
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。	拟建核医学科有完善的放射性三废处理设施，放射性三废可达标排放	符合

12.5.2 对原“环保部 18 号令”要求的满足情况

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令第 18 号，2011 年）对拟使用射线装置的单位提出了具体条件，本项目具备的条件与“环保部 18 号令”要求的对照检查如表 12-3 所示。

表 12-3 项目执行原“环保部 18 号令”要求对照表

序号	安全和防护管理办法要求	本单位落实情况	是否符合要求
1	<p>第五条</p> <p>生产、销售、使用、贮存放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定设置明显的放射性标志，其出口处应当按照国家有关安全和防护标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全联锁、报警装置或者工作信号。</p>	在回旋加速器机房门外拟设有出束工作状态指示灯，防护门外拟贴有电离辐射警告标志。放射性同位素操作场所入口设置电离辐射警示标识	符合
2	<p>第七条</p> <p>放射性同位素和被放射性污染的物品应当单独存放，不得与易燃、易爆、腐蚀性物品等一起存放，并指定专人负责保管。</p>	本项目设置有单独的储源室和放射性废物暂存间。	符合
3	<p>第九条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。</p>	委托有辐射水平监测资质单位每年对辐射工作场所及其周围环境进行 1 次监测	符合
4	<p>第十二条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当对本单</p>	每年 1 月 31 日前向生态环境主管部门提交有年度评估报告。	符合

	位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年1月31日前向发证机关提交上一年度的评估报告。		
5	<p>第十七条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲，对直接从事生产、销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗。</p>	医院辐射工作人员已报名参加辐射安全培训，等待考试。	近期符合
6	<p>第二十三条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测；发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。</p>	全部辐射工作人员配备个人剂量卡，并定期送检。	符合
7	<p>第二十四条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，不具备个人剂量监测能力的，应当委托具备条件的机构进行个人剂量监测。</p>	项目开展后，拟委托有资质单位对辐射工作人员进行个人剂量监测。	近期符合

通过对照国家有关要求对本项目从事辐射活动能力的逐项分析，本项目辐射工作场所屏蔽防护设计满足辐射防护要求，各种辐射防护措施设计较齐全，放射性废物处理措施较合理，在落实和完善各项辐射防护措施及管理要求后，医院将具备从事本项目辐射活动的综合能力。

12.6 竣工环境保护验收

根据《建设项目环境保护管理条例》，本项目的建设应执行污染治理设施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的“三同时”制度。并按照《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》等相关法律法规要求环评手续履行后，及时完成自主竣工环境保护验收工作，编制竣工环境保护验收文件，验收合格后方可正式投入运行。该建设项目的“三同时”验收情况见表 12-4。

表 12-4 “三同时”验收一览表

验收项目	验收内容及要求
剂量约束值	职业工作人员一年所接受的有效剂量不超过 5mSv/a，公众人员一年所接受的有效剂量不超过 0.1mSv/a。
屏蔽体效果	按照本报告表“表 10 辐射安全与防护”中的各场所屏蔽措施进行施工建设，回旋加速器机房各墙外和入口门外 0.3m 处，周围剂量当量率小于 2.5 μ Sv/h。核医学科控制区外人员可达处，距屏蔽体外表面 0.3 m 处的周围剂量当量率小于 2.5 μ Sv/h。
电离辐射标志及中文警示说明	相关场所明显位置处设电离辐射标志及中文警示说明。
放射性废水衰变池	①碘衰变衰变池：总容积 136.1m ³ ，采用三级槽式衰变，由集水池和衰变池组成，含 ¹³¹ I 放射性废水排放时必须储存至少 180 天，放射性废水监测结果经监管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放；②核医学衰变池：总容积 64.4m ³ ，采用三级槽式衰变，由集水池和衰变池组成，核素制备区、PET 诊疗区和 SPECT 诊疗区放射性废水储存满 30 天后可直接排放。
放射性固体废物处理	<p>根据《核医学防护与安全要求》（HJ 118-2021）中要求，放射性废物存储间，入口设电离辐射警示标识、采取有效的防火、防丢失、放射性泄露措施；放射性废物储存间内设专用容器盛放固体放射性废物袋，不同类别废物分开存放，容器表面应注明废物所含核素名称、废物类别、入口日期等信息，并做好登记。</p> <p>放射性固体废物储存下列要求的，经检测辐射剂量率满足所处环境本底水平，α 表面污染小于 0.08Bq/cm²，β 表面污染小于 0.8Bq/cm²，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：①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；②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；③含 ¹³¹I 核素的放射性固体废物暂存超 180 天。</p>
放射性废气处理	设置独立的排风系统，废气经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。
管理规章制度	各项管理规章制度得到落实，记录完备。
个人防护用品	每名辐射工作人员配置个人剂量卡和一件 0.5mmPb 的铅衣。
辐射监测仪器	配置一台便携式 X- γ 剂量率仪和一台便携式表面污染检测仪；回旋加速器机房内配固定式辐射监测仪。
辐射防护用品	按照本报告表“表 10 辐射安全与防护”中的各场所防护用品清单进行配置。

表 13 结论与建议

13.1 结论

1、实践正当性评价

医院开展放射诊疗业务不但能够更好的满足患者多层次、多方位、高质量和文明便利的就诊需求，并且能够提高当地医疗卫生水平，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）“实践的正当性”的原则。

2、项目概况

改建后的核医学科使用 II 类射线装置自屏蔽式小型回旋加速器一台，能量 10MeV，束流强度 100 μ A，用于制备 PET 用放射性药物（ ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N ）；使用 III 类射线两台，分别为 PET-CT 机一台，管电压 140kV，管电流 666mA，SPECT-CT 机一台，管电压 130kV，管电流 345mA；使用非密封放射性物质 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{153}Sm 、 ^{89}Sr 、 ^{125}I 粒子、 ^{131}I ，非密封放射性物质的日等效最大操作量为 1.98E+09Bq，属于乙级开放性工作场所。使用 V 类放射源 ^{90}Sr 一枚、 ^{68}Ge 三枚、 ^{22}Na 三枚。

3、选址、布局合理性评价

医院的核医学科核素使用场所集中设置在核医学科一楼，按照核素的使用种类分区域设置了相对独立的工作区域内，充分考虑了周围场所的防护与安全，以及患者就诊和临床应用的便利性，对公众影响较小。因而从辐射环境保护方面论证，本次核医学科的选址是可行的。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.4 款中有关辐射工作场所的分区规定，将本项目辐射工作场所划分为监督区和控制区。本项目各场所病人、医护人员流向明确，整个流向清晰，布局合理。

4、辐射安全管理

医院已成立了辐射安全防护领导组，全面负责辐射安全管理相关工作，并设置了辐射专职人员，辐射专职人员具体负责日常辐射安全与环保工作，负责组织实施辐射安全防护措施和落实各项管理制度，辐射专职人员具有本科以上学历。本项目的辐射工作人员已报名参加辐射安全培训。

本项目拟配置 X- γ 剂量检测仪 1 台， α 、 β 表面沾污仪 1 台，用于对核医学科日常运行时的辐射水平监测；医院定期（不少于 1 次/年）请有资质的单位对

辐射工作场所和周围环境的辐射水平进行监测。

5、环境影响分析结论

(1) 辐射防护

核素制备区墙体满足以下要求：回旋加速器机房：东墙 1450mm 厚钢筋混凝土；南墙：1880mm~2590mm 厚钢筋混凝土；西墙：内迷路 1050mm，外迷路 1000mm~1190 厚钢筋混凝土；北墙：1880mm~2590mm 厚钢筋混凝土；顶：1600-2300 厚钢筋混凝土；防护门：10mm 铅+150mmPE。热室：东墙：1190mm 厚混凝土；南墙：800mm 厚钢筋混凝土；西墙：740mm 厚混凝土；北墙：600mm 厚混凝土；顶：400mm 厚混凝土；防护门：6mmPb。质控室：东墙：740mm 厚混凝土；南墙：370mm 厚实心砖+2mmPb 钡水泥；西墙：370mm 厚实心砖+2mmPb 钡水泥；北墙：490mm 实心砖+1mmPb 钡水泥；顶：200mm 厚混凝土；防护门：6mmPb。

PET 诊疗区墙体满足以下要求：四周墙体、顶层 300mm 混凝土加 2mmPb 钡水泥；防护门：6mmPb；观察窗 6mmPb；注射窗 10mmPb。

SPECT 诊疗区墙体满足以下要求：四周墙体 240mm 实心砖加 3mmPb 钡水泥；顶层：预制板加 5mmPb 钡水泥；防护门：6mmPb；观察窗 6mmPb。

^{131}I 诊疗区墙体满足以下要求：四周墙体 240mm 实心砖加 10mm 铅板；顶层：预制楼板加 10mm 铅板。

(2) 保护目标剂量

根据分析预测，本项目核素制备区及 PET 诊疗区职业工作人员所受的年附加有效剂量最大为 3.206mSv，对公众人员造成的年附加有效剂量最大为 0.09mSv。

^{131}I 诊疗区职业工作人员的年剂量值最大为 1.511mSv，公众人员造成的年附加有效剂量最大为 0.06mSv。

SPECT 诊疗区职业人员年受照剂量最大为 0.557mSv，公众人员年受照剂量最大为 1.54E-04mSv。

职业工作人员和公众人员受照剂量均满足本项目职业人员剂量管理限值 5mSv 和公众成员剂量管理限值 0.1mSv。

(3) 三废处理处置

①放射性废气：本项目核素制备区、PET 诊疗区、 ^{131}I 诊疗区、SPECT 诊疗

区均设置有专用独立排风系统，放射性废气经活性炭高效过滤器净化后引至本层屋顶排放，排放口高度高出本层屋顶。放射性废气经过净化处理后对周围环境的影响较小。

②放射性固废：本项目产生的放射性固体废物，经收集储存衰变处理后，对环境的影响可满足相关标准要求。

③放射性废液：本项目设计有两套衰变池系统，一套用于暂存含碘放射性废水，一套用于暂存其它核素放射性废水，两套衰变池系统均可满足放射性废水储存要求。

可行性结论：

综上所述，长治医学院附属和平医院核医学科改建项目在落实本报告所提出的各项污染防治和管理措施后，该院具备与其所从事的辐射活动相适应的技术能力和辐射安全防护措施，其运行对周围环境产生的影响较小，故从辐射环境保护角度论证，该项目的建设运行是可行的。

13.2 建议

1、在日常工作中，工作人员应合理穿戴防护用品，并告知、指导受检者使用防护用品。

2、项目批复许可后，运行期间，发现问题及时整治，完善管理制度，落实管理责任，进一步加强本单位的辐射安全的管理。项目竣工后及时开展竣工验收，并接受生态环境部门的监督检查。

3、在辐射项目运行中决不容许违规操作和弄虚作假等现象发生，如若发现相关现象接受相关处理。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况，单位进行调查并报生态环境部门备案。

4、医院 SPECT 诊疗区的防护设计偏保守，根据 GBZ120-2020 中表 1.2 操作 18500MBq 活度的 ^{99m}Tc 仅需要 3mmPb 的防护通风柜即可满足通风柜表面 30cm 处剂量率 $25\mu\text{Sv/h}$ ，若医院将通风柜表面剂量率控制在 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 以下，通风柜铅当量设计为 10mmPb 即可。

表 14 审批

下一级生态环境部门预审意见:	
经办人:	公章 年 月 日
审批意见:	
经办人:	公章 年 月 日