

核技术利用建设项目

阳光融和医院放射诊疗建设项目
环境影响报告表

山东阳光融和医院有限责任公司

2016年12月

环境保护部监制

核技术应用项目

阳光融和医院放射诊疗建设项目 环境影响报告表

建设单位名称：山东阳光融和医院有限责任公司

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：

邮政编码：

联系人：

电子邮箱：

联系电话

表 1 项目概况

建设项目名称		阳光融和医院放射诊疗建设项目				
建设单位		山东阳光融和医院有限责任公司				
法人代表	赵宗仁	联系人	刘兴安	联系电话	13572555763	
注册地址		山东省潍坊市高新区樱前街与志远路交叉口东南				
项目建设地点		山东阳光融和医院医技楼地上一层				
立项审批部门		/		批准文号	/	
建设项目总投资（万元）	6000	项目环保投资（万元）	600	投资比例	10%	
项目性质		<input checked="" type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它		占地面积（m ² ）	6150	
应用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V			
		<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 checked="" type="checkbox"/> IV类 <input checked="" type="checkbox"/> V			
	非密封放射性物质	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物			
		<input type="checkbox"/> 销售	/			
		<input 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 type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类			
其他	/					

1.1 项目概况

阳光融和医院位于山东省潍坊市高新区樱前街 9000 号，是经潍坊市卫生局批准设立的营利性三级综合医院，医院持有《设置医疗机构批准书》，批准文号：潍卫医设字[2014]023 号。

为满足医学诊疗需求，医院拟在医技楼放射介入科新增 1 台 DSA、2 台 CT、2 台 DR 和 1 台数字肠胃机；在医技楼地上一层新建核医学工作场所，购置 1 台 SPECT-CT、1 台 PET-MR 用于放射性药物显像诊断，分别使用 ^{99m}Tc、¹³¹I 和 ¹⁸F、¹¹C、⁶⁸Ga、¹³N 用于医学诊断，同时 PET 配套 5 枚 V 类 ⁶⁸Ge 校准源对 PET 进行校准；使用 ¹³¹I、⁸⁹Sr、¹⁵³Sm、¹⁷⁷Lu、³²P 核素用于医学治疗；使用 ¹²⁵I 用于籽粒植入；使用 ³²P 敷贴和 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 敷贴发射器用于敷贴治疗。项目核医学科工作场所日等效最大操作量为 6.80×10⁸Bq，属于乙级非密封源工作场所。目前医院放射介入科 5 台 III 类医用射线装置（2 台 CT、2 台 DR 和 1 台数字

肠胃机)已安装投入运行,放射介入科1台II类医用射线装置(DSA)和核医学科尚未投入运行,潍坊市环境保护局于2016年10月20日已对该部分医用射线装置未报批环境影响评价进行了行政处罚(潍环听告字[2016]第GX022号)。

核技术应用的目的是任务:SPECT-CT(使用 ^{99m}Tc 、 ^{131}I)和PET-MR(使用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N)用于放射性药物显像诊断;应用 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 治疗骨转移癌;应用 ^{177}Lu 治疗神经内分泌癌;应用 ^{32}P 治疗恶性胸腹水和无菌性滑膜炎;应用 ^{131}I 治疗甲亢和甲癌;应用 ^{125}I 用于籽粒植入治疗;应用 ^{32}P 和 ^{90}Sr 用于皮肤敷贴治疗;应用 ^{68}Ge 校准源对PET进行校准。

上述射线装置及放射性核素均用于放射诊疗,目的在于开展放射诊疗工作,最终是为了治病救人,其获得的利益远大于辐射所造成的损害,符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准(GB18871-2002)》中关于辐射防护“实践的正当性”的要求。

医院位于潍坊市高新技术产业开发区樱前街与志远路交叉口东南,医院东侧为广润商务酒店和惠贤路,隔路为潍坊高新区实验学校;医院南面为宝通街;医院西侧为志远路,西侧320m为马家东村;医院北侧为樱前街,再往北约380m距离医院为西里固村。本项目核医学工作场所位于医院医技楼地上一层,医技楼东侧紧邻医院内部广场,南侧距离医技楼最近10m为综合楼病房,西侧为地下车库出入口和医院污水处理站(地下),北侧紧邻医疗主街,隔路为医院急诊部和医院中心广场。

本项目核医学工作场所和放射介入科位于医技楼的西部。核医学科东侧紧邻为走廊,隔走廊约3m处为放射介入科;核医学科南侧约35m为放疗中心,核医学科西侧为地下车库出入口及医院污水处理站(地下);核医学科北侧约5.5m处为医院急诊部;放射介入科东侧紧邻为走廊,隔走廊约3.5m处为医院药房,再往东40m处为健康管理中心;放射科南侧距离最近25m处为医院综合楼;放射科南侧为走廊,隔走廊约3m处为核医学科,放射科北侧约5.5m处为医院急诊部。

医院地理位置见附图1,周边社会关系见附图2,医院总平面布置见附图3,医院医技楼平面布局详见附图4。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 第 449 号）、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（环境保护部令 第 3 号）、《建设项目环境影响评价分类管理名录》（环境保护部令 33 号）及山东省环境保护厅的有关规定，本项目在申领辐射安全许可证前须编制环境影响报告表，受阳光融和医院的委托，我院承当了该项目的辐射环境影响评价工作。

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	³² P	185MBq×13 枚	V 类	使用	敷贴治疗	核医学科工作场所	置于铅桶中暂存于储源室内	/
2	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	11100 MBq×1 枚	IV 类	使用	敷贴治疗	核医学科工作场所	置于铅桶中暂存于储源室内	/
3	⁶⁸ Ge	55MBq/1 枚	V 类	使用	PET 均匀性校正	PET 机房	置于专用铅罐中暂存于储源室内	/
4	⁶⁸ Ge	3.5MBq/1 枚	V 类	使用	检查和配准图像	PET 机房	置于专用铅罐中暂存于储源室内	/
5	⁶⁸ Ge	2.1MBq/3 枚	V 类	使用	PET 均匀性校正	PET 机房	置于专用铅罐中暂存于储源室内	/

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

表 3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	¹³¹ I	¹³¹ I 物理半衰期为 8.04d。 ¹³¹ I 可衰变产生多条 β 射线，其中分支比最大的为 89.9% 能量为 606.3keV，还能释放多条 γ 射线，其中分支比最大的为 81.7% 能量为 364.5keV。放射性核素的毒性分组为中毒组。	使用	5.92×10 ⁹	5.92×10 ⁸	5.30×10 ¹¹	甲状腺功能测定、甲亢和甲癌治疗、	简单操作	核医学科工作场所	外购，采用碘全自动分装仪分装，在注射室内服药，当天用完
2	¹⁷⁷ Lu	¹⁷⁷ Lu 的半衰期为 6.7d，其发射 3 种能量 β- 粒子，同时还发射 γ 射线（113keV 6.4%），毒性分组为中毒组。	使用	1.48×10 ⁸	1.48×10 ⁷	1.92×10 ⁹	神经内分泌癌治疗	简单操作	核医学科工作场所	外购，在注射室通风橱暂存，在注射防护屏处注射，当天用完
3	¹⁵³ Sm	液态，其半衰期为 46.8h，辐射类型为 β 衰变，能衰变	使用	1.11×10 ⁸	1.11×10 ⁷	1.44×10 ¹⁰	骨转移瘤治疗	简单操作	核医学科工作场所	外购，在注射室通风橱暂存，在

		出多条 β 射线，其中分支比最大为 45.1%，能量为 702.0keV，还能释放出多条 γ 射线，其中分支比最大的为 40.8%，能量为 54.6590keV。毒性分组为中毒组。								注射防护屏处注射，当天用完
4	^{89}Sr	液态， ^{89}Sr 发射纯 β 射线， β 粒子的平均能量为 0.58MeV，最大能量达 1.49MeV，在组织内的辐射距离约 2.4mm，半衰期为 50.5 天。放射性核素的毒性分组为中毒组。	使用	1.11×10^8	1.11×10^7	1.44×10^{10}	肿骨转移癌治疗	简单操作	核医学科工作场所	外购，在注射室通风橱暂存，在注射防护屏处注射，当天用完
5	^{32}P	液态， ^{32}P 是纯 β 射线， β 射线最大能量为 1.71MeV，平均能量为 0.695MeV。半衰期为 14.3 天。毒性分组为中毒组。	使用	1.85×10^8	1.85×10^7	1.85×10^9	恶性胸腹水和无菌性滑膜炎治疗	简单操作	核医学科工作场所	外购，在注射室通风橱分装，在注射防护屏处注射，当天用完
6	^{18}F	液态，半衰期 109.7min，毒性分组为低毒组，主要 β 射线能量（分支比）为 633.5keV（96.7%），主要 γ 射线能量（分支比）为 511keV（200%）。	使用	3.70×10^9	3.70×10^6	9.62×10^{11}	PET-CT 诊断及试验	很简单操作	核医学科工作场所	由回旋加速器生产，在注射室通风橱分装，在注射防护屏处注射，当天用完
7	^{11}C	液态，半衰期为 20min，其衰变类型为 β^+ 衰变，同时放射 γ 射线，最大能量为 0.51MeV	使用	3.70×10^8	3.70×10^6	9.62×10^{10}	PET-CT 诊断及试验	简单操作	核医学科工作场所	由回旋加速器生产，在注射室通风橱分装，在注射防护屏处注射，当天用完
8	^{68}Ga	液态，其半衰期为 68.3min， β 射线的最大能量为 1.90MeV， γ 射线的最大能量为 0.511 MeV。毒性分组为低毒组。	使用	3.70×10^8	3.70×10^6	9.62×10^9	PET-CT 诊断及试验	简单操作	核医学科工作场所	外购，在注射室通风橱分装，在注射防护屏处注射，当天用完
9	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	液态， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 为 ^{99}Tc 的同核	使用	3.70×10^9	3.70×10^6	9.62×10^{11}	一般器官	很简单	核医学科	使用 $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$

		异能表, IT%≈100%, 半衰期为 6.02h。发生 IT 跃迁(同质异能跃迁)时释放 γ 射线, 能量为 140keV。其子体为 ^{99m}Tc , ^{99m}Tc 又能发生 β 衰变, ^{99}Tc 的半衰期很长, 为 2.16×10^6 年, 毒性分组为低毒组。					显像	操作	工作场所	发生器制取, 每两周进货一次, 贮存在分装注射室通风橱内
10	^{13}N	液态, 物理半衰期为 10min, 辐射类型为 β^+ 衰变(1.2MeV 100%), 毒性分组为低毒组。	使用	1.48×10^9	1.48×10^7	3.85×10^{11}	PET-CT 诊断及试验	简单操作	核医学科工作场所	由回旋加速器生产, 在注射室通风橱分装, 在注射防护屏处注射, 当天用完
11	^{125}I	固态, 物理半衰期 60.14d, 衰变方式为轨道电子俘获, 主要发射 35keV 的 γ 射线、27keV 的 $\text{K}\alpha$ X 射线(12.5%) 和 31keV 的 $\text{K}\beta$ X 射线(25.4%)。属于中毒组。	使用	2.22×10^9	2.22×10^6	5.77×10^{10}	粒籽源植入	很简单操作	SPECT 机房	外购填装、消毒好的粒籽源, 置于铅桶中暂存于储源室内

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

表 4 射线装置

(一) 加速器: 包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量 (MeV)	额定电流 (mA)/剂量率 (Gy/h)	用途	工作场所	备注
1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(二)X射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途	工作场所	备注
1	DSA	II类	1	IGS 530	125	1000	肿瘤性疾病诊治和血管造影诊疗	介入放射科 DSA 机房	/
2	SPECT-CT	III类	1	NM/CT 670	140	380	显像	核医学科 SPECT-CT 机房	/
3	PET-MR	/	1	Signa	/	/	显像	核医学科 PET-MR 机房	/
4	CT 机	III类	1	Revolution CT	140	635	摄像	放射科 CT 机房	/
			1	Optima 520	140	300			
5	DR 机	III类	1	Definium 6000 单板	150	1000	摄像	放射科 DR 机房	/
			1	Definium 6000 双板	150	1000			
6	数字肠胃机	III类	1	Univision 80KW	150	1000	摄像	射科数字胃肠机房	/

(三)中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大靶电流 (mA)	中子强度 (n/s)	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度 (Bq)	贮存方式	数量	
1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
核医学科放射性废水	液态	¹³¹ I		<9.1×10 ⁶ Bq		总 β<10Bq/L	设 4 个 26m ³ 的衰变池, 总容积为 104m ³ 。	衰变后低于 GB18871-2002 中规定的放射性废水排放导出限值后进入医院污水处理站进一步处理
		¹⁸ F		<2.2×10 ⁹ Bq				
		^{99m} Tc		<6.9×10 ⁹ Bq				
		⁶⁸ Ga		<2.5×10 ⁹ Bq				
		¹¹ C		<8.3×10 ⁹ Bq				
放射性固废	固态	^{99m} Tc		10.8kg	130.0kg	<1×10 ² Bq/g	设 6 个 64L 衰变桶, 置于废料间贮存	经衰变 10 个半衰期以上后达到清洁解控水平, 作为医疗废物处理
		¹⁸ F		14.2kg	170.3kg	<1×10 ¹ Bq/g		
		¹¹ C				/		
		⁶⁸ Ga				/		
		¹³ N				/		
		¹³¹ I		4.77kg	57.2kg	<1×10 ² Bq/g		
		¹⁵³ Sm		0.54kg	6.5kg	<1×10 ² Bq/g		
		¹⁷⁷ Lu		0.06kg	0.7kg	<1×10 ³ Bq/g		
		³² P		0.04kg	0.50kg	<1×10 ³ Bq/g		
⁸⁹ Sr		0.54kg	6.5kg	<1×10 ³ Bq/g				
意外流出或住院病人死亡后取出等情况下完整或破损的 ¹²⁵ I 粒籽源	固态	¹²⁵ I	/	视使用情况	/	/	废料间, 废料间位于核医学科 SPECT 注射后候诊区西侧	厂家回收
废旧 ⁹⁰ Sr、 ³² P 源	固态	⁹⁰ Sr、 ³² P	/	根据使用情况更换	/	/	废料间, 废料间位于核医学科 SPECT 注射后候诊区西侧	厂家回收
⁶⁸ Ge 退役校准源	液态	⁶⁸ Ge	/	根据使用情况更换	/	/	废料间, 废料间位于核医学科 SPECT 注射后候诊区西侧	厂家回收

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/L，固体为 mg/kg，气态为 mg/m³；年排放总量用 kg。 2. 含有放射性的废物要注明，其排放浓度、年排放总量分别用比活度（Bq/L 或 Bq/kg 或 Bq/m³）和活度（Bq）。

表 6 评价依据

法 规 文 件	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》(2015.1.1);</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》(2016.9.1);</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》(2003 年);</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》(国务院令第 253 号, 1998 年);</p> <p>(5) 《建设项目环境影响评价分类管理名录》, (环境保护部令第 33 号, 2015 年);</p> <p>(6) 《放射性同位素与射线装置放射防护条例》(国务院令第 449 号, 2005 年);</p> <p>(7) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》(环境保护部令第 3 号, 2008 年修正);</p> <p>(8)《突发环境事件信息报告办法》(环境保护部令第 17 号, 2011 年);</p> <p>(9) 《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);</p> <p>(10) 《放射工作人员职业健康管理暂行办法》(卫生部令第 55 号, 2007 年);</p> <p>(11) 《关于发布射线装置分类办法的公告》(国家环境保护总局公告 2006 年第 26 号);</p> <p>(12) 《放射源分类办法》(国家环境保护局公告 2005 年第 62 号);</p> <p>(13) 《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》(国家环保总局, 环发[2006]145 号);</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) 《山东省辐射污染防治条例》(2014 年 5 月 1 日山东省人民代表大会常务委员会公告第 37 号)。</p>
------------------	---

<p>技 术 标 准</p>	<p>(1)《辐射环境保护管理导则—核技术应用项目环境影响报告书(表)的内容和格式》(HJ/T10.1-2016);</p> <p>(2)《环境地表γ辐射剂量率测定规范》(GB/T14583-93);</p> <p>(3)《辐射环境监测技术规范》(HJ/T 61-2001);</p> <p>(4)《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2016);</p> <p>(5)《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002);</p> <p>(6)《医疗照射防护基本要求》(GB179-2006);</p> <p>(7)《医用X射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013);</p> <p>(8)《X射线计算机断层摄影放射防护要求》(GBZ165-2012);</p> <p>(9)《医用X射线CT机房的辐射屏蔽规范》(GBZ/T180-2006);</p> <p>(10)《放射性物质安全运输规程》(GB11806-2004);</p> <p>(11)《医疗废物专用包装袋、容器和警示标志标准》(HJ421-2008);</p> <p>(12)《临床核医学放射卫生防护标准》(GBZ120-2006);</p> <p>(13)《医用放射性废物的卫生防护管理》(GBZ133-2009);</p> <p>(14)《低能γ射线籽源植入治疗放射防护要求与质量控制检测规范》(GBZ178-2014);</p> <p>(15)《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010);</p> <p>(16)《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)。</p>
<p>其 他</p>	<p>(1) 阳光融和医院环境影响评价委托书;</p> <p>(2) 《阳光融和医院放射诊疗建设项目职业病危害放射防护预评价报告书》(浙江建安检测研究院有限公司, 2016年);</p> <p>(3) 《山东省环境天然放射性水平调查研究报告》(山东省环境监测中心站, 1989年);</p> <p>(4) 《辐射防护手册》第一分册《辐射源与屏蔽》(李德平主编);</p> <p>(5) 《辐射防护手册》第三分册《辐射安全》(李德平主编);</p> <p>(6) 《辐射防护技术与管理》第一卷(李全太、李福生主编);</p> <p>(7) 《γ射线屏蔽参数手册》(中国科学院工程力学研究所编);</p> <p>(8) 《建筑给水排水设计规范》(GB50015-2003)。</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 核技术应用项目环境影响报告书（表）的内容和格式》（HJ/T10.1-2016）规定及本项目的实际情况，本辐射环境评价范围分别取以核医学科边界外、DSA机房及III类射线装置机房外50m范围内。

7.2 保护目标

本项目评价范围主要在医院范围内，环境保护目标为核医学科、DSA及III类射线装置使用场所的职业人员、慰问者及其周围公众人员。

表 7-1 本项目环境保护目标一览表

序号	环境保护目标		方位	距离	人数	年有效剂量约束值
1	核医学科	核医学科工作场所内职业人员	工作场所内	/	8	职业：6mSv/a
		核医学科工作场所内慰问者		/	/	慰问者：1.5 mSv/a
		核医学科边界外50m范围内公众人员	四周	50m范围内	/	公众：0.3mSv/a
2	介入放射科	介入放射科工作场所内职业人员	工作场所内	/	12	职业：6mSv/a
		各射线装置机房外50m范围内公众人员	四周	50m范围内	/	公众：0.3mSv/a

7.3 评价标准

1、运输包装表面目标控制限值

按照《放射性物质安全运输规程》（GB11806-2004）有关规定执行，运输采用专门屏蔽容器，运输包装表面的辐射剂量必须小于国家允许辐射剂量水平5 μ Sv/h。

2、《电离辐射防护与辐射源基本安全标准》（GB18871-2002）

（1）职业照射和公众照射的年剂量限值

①职业照射剂量限值

a) 连续5年的年平均有效剂量，20mSv；

b) 任何一年中的有效剂量，50mSv；

c) 四肢（手和脚）或皮肤的年当量剂量，500mSv。

②陪护人员（慰问者）剂量限值

对于慰问者（明知受到照射却自愿帮助、护理的人员）的剂量，5mSv。

③公众照射剂量限值

a) 年有效剂量，1mSv；

b) 特殊情况下，若 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；

对辐射工作人员、公众的剂量控制不仅要满足剂量限值的要求，而应依据辐射防护最优化原则，按照剂量约束和潜在照射危险约束的防护要求，把辐射水平降低到低于剂量限值的一个合理达到的尽可能低的水平。因此，本次评价采用年剂量管理约束值如下：

①辐射工作人员采用年剂量限值的 3/10，即 6.0mSv/a 作为年剂量管理约束值，四肢年当量剂量采用 150mSv 作为年剂量管理约束值。

②慰问者采用 1.5mSv/a 作为年剂量管理约束值。

③公众人员采用 0.3mSv/a 作为年剂量管理约束值。

(2) 表面污染控制水平

GB18871-2002 中对核医学工作场所放射性表面污染控制水平见表 7-2。

表 7-2 表面放射性物质污染控制水平 (Bq/cm²)

表面类型		β 放射性物质
工作台、设备、墙壁、地面	控制区 ¹⁾	4×10 ¹
	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		

(3) 非密封源工作场所分级

GB18871-2002 附录 C 中对非密封源工作场所分级原则见表 7-3。

表 7-3 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

(4) 放射性废水排放

GB18871-2002 中对放射性废水排放限值要求：放射性废液每月排放的总活度不超过 10ALImin，每次排放的活度不超过 1ALImin，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。ALImin 采用下式计算：

$$ALI_{min}=DL/e_j$$

DL 表示职业人员接触限值，20mSv/a；

e_j 表示 GB18871-2002 表 B3 工作人员吸入和食入单位摄入量所致的待积有效剂量，取其中最大值。

表 7-4 放射性废水排放导出限值

放射性核素	e_j (Sv/Bq)	月排放限值 (Bq)	一次排放限值 (Bq)
^{131}I	2.2×10^{-8}	9.1×10^6	9.1×10^5
^{18}F	8.9×10^{-11}	2.2×10^9	2.2×10^8
^{99m}Tc	2.9×10^{-11}	6.9×10^9	6.9×10^8
^{68}Ga	8.1×10^{-11}	2.5×10^9	2.5×10^8
^{11}C	2.4×10^{-11}	8.3×10^9	8.3×10^8

另外，《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)表 2 中“综合医疗机构总 β 排放标准为 10Bq/L”。

3、核医学工作场所屏蔽剂量率目标控制值

在《临床核医学放射卫生防护标准》(GBZ120-2006)中未给出核医学工作场所屏蔽控制目标值，本次评价采用公众和辐射工作人员年剂量管理约束值导出核医学科场所外屏蔽剂量目标控制值。核医学科外侧为公众区域墙体外 30cm 处采取公众年剂量约束值 0.3mSv/a 进行推导，核医学内部采取辐射工作人员年剂量约束值 6.0mSv/a 进行推导。

推导公式采用下式计算：

$$H=0.7 \times Dr \times T$$

式中：

H 年有效剂量当量，Sv/a；

0.7 吸收剂量对有效剂量当量的换算系数，Sv/Gy；

Dr 空气吸收剂量率，Gy/h；

T 年受照时间，h/a。

本项目年工作日为 260 天，每天工作 8h，公众居留因子取 1/16，工作人员居留因子取 1，经推导，核医学科外侧公众区域墙体外 30cm 处空气吸收剂量率控制目标值为 3.3 μ Gy/h，核医学科内部墙体外 30cm 处空气吸收剂量率控制目标值为 4.1 μ Gy/h。

根据计算结果，并参考《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)

中对X射线机房外剂量当量率控制目标值，本环评采用 $2.5\mu\text{Gy/h}$ 和 $4.1\mu\text{Gy/h}$ 分别作为核医学科外侧公众区域墙体外30cm处和核医学科内部墙体外30cm处空气吸收剂量率的控制目标值。

4、《临床核医学放射卫生防护标准》（GBZ120-2006）

（1）临床核医学的工作场所应按照 GB18871-2002 非密封源工作场所规定进行分级，并采取相应的放射防护措施。

（2）针对临床核医学实践的具体情况，可依据操作最大量放射性核素的加权活度，把工作场所分为 I、II、III 三类（分类原则见表 1.5-4）。

表 7-5 临床核医学工作场所具体分类

分 类	操作最大量放射性核素的加权活度/MBq
I	> 50000
II	$50\sim 50000$
III	< 50

（3）工作场所应备有收集放射性废物的容器，容器上应有放射性标志。

（4）诊断及治疗工作场所（包括通道）应注意合理安排与布局。

（5）诊断室应靠近给药室和检查室，有受检者专用厕所。

（6）使用治疗量发射 γ 射线放射性药物的区域应划为控制区。用药后患者床边 1.5m 处单人病房应划为临时控制区。控制区入口应有 GB18871 规定的电离辐射警告标志，除医务人员外，其他无关人员不得入内，患者也不应随便离开该区。

（7）接受放射性药物治疗的患者应使用专用便器或专用卫生间和浴室。

5、《放射性核素敷贴治疗卫生防护标准》（GBZ134-2002）

（1）贮源箱的外表面必须标有放射性核素名称、最大容许装载放射性活度和牢固、醒目的电子辐射警示标识。

（2）贮源箱的屏蔽层结构须分内外两层。内层为铝或有机玻璃等低原子序数材料，其厚度须大于 β 辐射在相应材料中的最大射程，见附录 C。外层为适当厚度的铅、铸铁等重金属材料。并具有防火、防盗的性能。

（3）贮源箱必须能锁于固定物体上，防止失盗。距离贮源箱表面 5cm 和 100cm 处的韧致辐射的空气吸收剂量率分别不超过 $10\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $10\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

（4）敷贴治疗室必须与诊断室、登记值班室和候诊室分开设置。治疗室使

用面积不应小于 10m^2 。

(5) 治疗室墙壁及防护门的屏蔽厚度应符合放射防护原则，以保证工作场所以外人员受照剂量在相应的年剂量限值以下。

(6) 治疗室内高 1.5m 以下的墙面应有易去污的保护涂层。地面，尤其在治疗患者位置，必须铺有可更换的质地较软有容易去污染的铺料。

(7) 治疗室内必须制定放射治疗操作规程及卫生管理制度，并配有 β 污染检查仪等检测仪器。

6、《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ133-2009）

(1) 液体废物的管理

① 使用放射性核素最大操作量等于或大于 $2 \times 10^7 \text{Bq}$ 的临床核医学单位应设置放射性污水池以存放放射性废水直至符合排放要求时方可排放。放射性污水池应合理选址，池底和池壁应坚固、耐酸碱腐蚀和无渗透性，应有防泄漏措施。

② 使用放射性药物治疗患者的临床核医学单位，应为住院治疗患者提供有防护标志的专用厕所，对患者排泄物实施统一收集和管理。

③ 专用厕所应具备使患者排泄物迅速全部冲入专用化粪池的条件，而且随时保持便池周围清洁。

④ 符合出院条件的患者排泄物不需要统一管理。

(2) 固体废物的管理

i 废物收集

① 供收集废物的污物桶应具有外防护层和电离辐射警示标志，污物桶放置点应避开工作人员工作和经常活动的区域。

② 污物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物，装满后的废物袋应密封，不破漏，并及时转送贮存室，并放入专用容器中贮存。

③ 对注射器和破碎器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入硬纸盒或其他包装材料中，然后再装入专用塑料袋内。

④ 每袋废物的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h ，重量不超过 20kg 。

ii 废物临时贮存

① 经审管部门批准可将其废物临时贮存在许可的场所和专门的容器中，贮

存时间和总活度不得超过审管部门批准的限值要求。

②临时贮存室建造结构应符合放射卫生防护要求，且具有自然通风或安装通风设备，出入口设电离辐射警示标志。

③废物袋、废物桶及其存放废物的容器必须安全可靠，并应在显著位置标有废物类型、核素种类，比活水平和存放日期等说明。

④废物包装体外表面的污染控制水平 $\alpha < 0.04\text{Bq}/\text{cm}^2$ ， $\beta < 0.04\text{Bq}/\text{cm}^2$ 。

iii 废物处理

①如果经审管部门确认或批准，凡放射性活度小于或等于附录 B 所示清洁解控水平推荐值的放射性废物，按免管废物处理。

②放射性废物含有多种核素时，按照下面公式来判断该废物是否容许被免管。

$$\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{C_{j,h}} \leq 1$$

式中：

C_j ：放射性核素 j 在该废物中的活度浓度（Bq/g）；

$C_{j,h}$ ：附录 B 所示放射性核素 j 的清洁解控水平推荐值（Bq/g）；

n：该废物中所含放射性核素的种类数。

7、《低能 γ 射线粒籽源植入治疗放射防护要求与质量控制检测规范》（GBZ178-2014）

（1）治疗室与贮存室应分开，但不宜相距太远，以便于源的取用。当容器密闭时，容器表面的辐射水平应低于 $20\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。粒籽源贮存的容器前应使用铅块屏蔽，并在屏蔽铅块铅放置防护铅屏风，屏风上方应有适当厚度的铅玻璃。操作人员应站在屏风后实施操作。

（2）植入粒籽源术后的患者，应在植入部位应穿戴 0.25mm 铅当量的铅背心、围脖或腹带。

（3）植入粒籽源术后的患者床边 1.5m 处或单人病房应划为临时控制区。控制区入口处应有电离辐射警示标识，除医护人员外，其他无关人员不得入内。

（4）病人在接受治疗期间，对家庭和亲属成员的剂量约束值应控制在 5mSv 以下，对怀孕妇女和儿童的剂量约束值应控制在 1mSv 以下。

（5）不允许孕妇近距离接触患者。探视时距离患者至少 1m 以外。植入粒籽源的患者，在植入 240d 后，方能到公众场所活动。

(6) 粒籽源植入后 12 个月以上死亡的患者可以直接火化。植入后 12 个月内死亡的患者，总活度大于 4000MBq 时，应从尸体中切除粒籽源植入的器官，或从尸体中取出粒籽源，并将它保存至植入后算起至少一年；若粒籽源总活度小于 4000MBq 时可以直接火化。

(7) 粒籽源植入后经 10 个半衰期或火化后的骨灰活度小于 106Bq，方可将骨灰运输。

(8) 待用的粒籽源应装入屏蔽容器内，并存放专用房间。该房间应防火、防盗、防潮湿。

(9) 应建立粒籽源出入库登记制度，植入前，详细记录从容器中取出粒籽源的编号、日期时间、源名称、入库活动/数量、送货人、接收人、出库活度/数量、去往场所、出库经手人、接收人等。

(10) 应定期检查粒籽源的实际库存数量及贮存场所，对库存中的粒籽源应标明其用途。

(11) 应建立显示每个贮存器的标签，在标签上标明取出粒籽源数量。

8、《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)

(1) X 射线设备在确保铅屏风和床侧铅挂帘等防护设施正常使用的情况下，按附录 B 中 B.1.2 的要求，在透视防护区测试平面上的空气比释动能率应不大于 400 μ Gy/h。

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

(3) 每台 X 射线机（不含移动式或便携式床旁摄影机与车载 X 射线机）应设有单独的机房，机房应满足使用设备的空间要求。对新建、改建和扩建的 X 射线机房，其最小有效使用面积，最小单边长度应不小于下表要求。

表 7-6 X 射线设备机房（照射室）使用面积及单边长度

设备类型	机房内最小有效使用面积 m ²	机房内最小单边长度 m	备注
CT 机	30	4.5	2 台 CT 机、1 台 SPECT-CT
单管头 X 射线机 ^b	20	3.5	1 台血管造影机(DSA)，2 台 DR 机和 1 台数字肠胃机
^b 单管头、双管头或多管头 X 射线机的每个球馆各安装在 1 个房间内。			

(4) X 射线设备机房屏蔽防护应满足如下要求

①不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护应不小于下表要求。

表 7-7 不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向铅当量 mm	非有用线束方向铅当量 mm	备注
标称 125kV 以上的摄影机房	3	2	2 台 DR、1 台数字肠胃机
介入 X 射线设备机房	2	2	1 台 DSA
CT 机房	2 (一般工作量) ^a 2.5 (较大工作量) ^a		2 台 CT 机
a 按 GBZ/T 180 的要求			

②医用诊断 X 射线防护中不同铅当量屏蔽物质厚度的典型值参见附录 D。

③应合理设置机房的门、窗和管线口位置，机房的门和窗应有其所在墙壁相同的防护厚度。设于多层建筑中的机房（不含顶层）顶棚、地板（不含下方污建筑物的）应满足相应照射方向的屏蔽厚度要求。

④带有自屏蔽防护或 X 射线设备表面 1m 处辐射剂量水平不大于 $2.5\mu\text{Gy/h}$ 时，可不使用带有屏蔽防护的机房。

（5）在距机房屏蔽体外表面 0.3m 处，机房的辐射屏蔽防护，应满足下列要求：

①具有透视功能的 X 射线机在透视条件下检测时，周围剂量当量率控制目标值应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；测量时，X 射线机连续出束时间应大于仪器响应时间。

②CT 机、乳腺摄影、口内牙片摄影、牙科全景摄影、牙科全景头颅摄影和全身骨密度仪机房外的周围剂量当量率控制目标值应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；其余各种类型摄影机房外人员可能受到照射的年有效剂量约束值应不大于 0.25mSv ；测量时，测量仪器读出值应经仪器响应时间和剂量检定因子修正后得出实际剂量率。

（6）机房应设有观察窗或摄像监控装置，其设置的位置应便于观察到患者和受检者状态。

（7）机房内布局要合理，应避免有用线束直接照射门、窗和管线口位置；不得堆放与该设备诊断工作无关的杂物；机房应设置动力排风装置，并保持良好的通风。

（8）机房门外应有电离辐射警告标志、放射防护注意事项、醒目的工作状态指示灯，灯箱处应设警示语句；机房门应有闭门装置，且工作状态指示灯和

与机房相通的门能有效联动。

(9) 患者和受检者不应在机房内候诊；非特殊情况，检查过程中陪检者不应滞留在机房内。

(10) 每台 X 射线设备根据工作内容，现场应配备不少于表 7-8 基本种类要求的工作人员、患者和受检者防护用品与辅助防护设施，其数量应满足开展工作需要，对陪检者应至少配备铅防护衣；防护用品和辅助防护设施的铅当量应不低于 0.25mmPb；应为不同年龄儿童的不同检查，配备有保护相应组织和器官的防护用品，防护用品和辅助防护设施的铅当量应不低于 0.5mmPb。

(11) 模拟定位设备机房防护设施应满足相应设备类型的防护要求。

表 7-8 个人防护用品和辅助防护设施配置要求

放射检查类型	工作人员		患者和受检者		备注
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施	
放射诊断学用 X 射线设备隔室透视、摄影	---	---	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子	或可调节防护窗口的立位防护屏；固定特殊受检者体位的各种设备	2 台 DR 机和 1 台数字肠胃机
CT 体层扫描（隔室）	---	---	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子	---	2 台 CT 机、1 台 SPECT-CT
介入放射学操作	铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜选配：铅橡胶手套	铅悬挂防护屏、铅防护帘、床侧防护帘、床侧防护屏选配：移动铅防护屏风	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、阴影屏蔽器具	---	1 台 DSA

8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理位置和场所位置

山东省潍坊市位于山东半岛中部，地跨北纬 35°32'至 37°26'，东经 118°10'至 120°01'。南依泰沂山脉，北濒渤海莱州湾，东与青岛、烟台两市相接，西与东营、淄博两市为邻，地扼山东内陆腹地通往半岛地区的咽喉，胶济铁路横贯市境东西。直线距离西至省会济南 183 公里，西北至首都北京 410 公里。

阳光融和医院位于山东省潍坊市高新技术产业开发区樱前街与志远路交叉口东南。医院东侧为广润商务酒店和惠贤路，隔路为潍坊高新区实验学校；医院南面为宝通街；医院西侧为志远路，西南侧 330m 为马家村；医院北侧为樱前街，再往北约 380m 距离医院为西里固村。本项目核医学工作场所位于医院医技楼西侧地上一层，核医学工作场所包括 SPECT-CT 机房及注射后候诊区、PET-MR 机房及注射后候诊区、核素治疗室、给药室、抢救治疗室、分装注射室、废料间、储源室等，其周围 50m 范围内主要为放射介入科、急诊部、预留用房、放疗中心、员工办公室、医院内部走廊道路等；放射介入科位于核医学科东侧，工作场所包括 DSA 机房、CT 机房、DR 机房、数字肠胃机房，其 50m 范围内为核医学科、预留用房、医院综合楼、急诊部、药房、医院内部走廊道路等，因此本项目核医学科和介入放射科选址是合理可行的。

医院地理位置见附图 1，周围外环境社会关系见附图 2，医院平面布局总图见附图 3，医技楼一层平面布局图见附图 4，项目核医学科和放射介入科总平面布置见附图 5 和附图 6。

8.2 辐射环境质量现状评价

1、监测目的

目前医院核医学科工作场所和介入放射科机房等已基本建成，本次监测目的为了解项目拟建地周围辐射环境背景水平。

2、监测项目

环境 γ 空气吸收剂量率

3、监测方法

依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)、《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》(GB/T14583-1993) 的要求和方法进行现场监测。

4、监测点位

根据项目的平面布置、项目情况和周围环境情况布设监测点，监测点位详见监测单位提供的《阳光融和医院核医学、DSA 及 III 类射线装置项目辐射环境检测报告》。

5、监测仪器

名称：微电脑 X- γ 剂量率仪；型号：BH3103B；编号：022；检定单位：中国计量科学研究院；检定证书编号：Dyj12015-4504；有效期至 2016 年 11 月 5 日；量程范围： $(0.1\sim 100000) \times 10^{-8}\text{Gy/h}$ 。

6、监测单位

山东鲁环检测科技有限公司

7、监测时间

2016 年 3 月 17 日

8、质量保证措施

a 合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性。

B 监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗。

C 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用。

D 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常，并用检验源对仪器进行校验。

E 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录。

F 监测报告严格实行三级审核制度，经过校核、审核，最后由技术总负责人审定。

9、监测结果

本项目核医学科工作场所和放射介入科工作场所辐射环境监测结果详见表 8-1。

表 8-1 γ (X) 空气吸收剂量率检测结果 ($\times 10^{-8}\text{Gy/h}$)

监测点 编号	点位描述	测量结果	标准误差
1	放射科 CT 机房 1 西侧病人通道	10.3	0.33
2	放射科 CT 机房 1 西侧 VIP 通道	11.2	0.40
3	放射科 CT 机房 1	10.7	0.31
4	放射科 CT 机房 1 南侧控制室	10.5	0.28
5	放射科 CT 机房 1 东侧过道	11.3	0.30
6	放射科 DR 机房 1	12.7	0.35
7	放射科 DR 机房 1 南侧控制室	11.7	0.34
8	放射科 DR 机房 2	11.4	0.29
9	放射科 DR 机房 2 南侧房间	11.3	0.33
10	放射科 DR 机房 2 东侧病人通道	12.2	0.41
11	放射科数字肠胃机房北侧控制室	12.6	0.45
12	放射科数字肠胃机房	11.8	0.37
13	放射科数字肠胃机房南侧预留机房	11.2	0.31
14	放射科数字肠胃机房东侧员工通道	10.9	0.27
15	放射科 CT 机房 2 西侧过道	10.2	0.30
16	放射科 CT 机房 2 北侧控制室	11.3	0.38
17	放射科 CT 机房 2	12.0	0.35
18	放射科 CT 机房 2 南侧更衣室	12.5	0.37
19	放射科 CT 机房 2 东侧过道	12.2	0.30
20	放射科 DSA 机房西侧洁净通道	11.6	0.28
21	放射科 DSA 机房北侧控制室	11.1	0.34
22	放射科 DSA 机房	12.1	0.41
23	放射科 DSA 机房南侧控制室	12.4	0.36
24	放射科 DSA 机房东侧污物通道	11.9	0.32
25	核医学科北侧	11.7	0.30
26	核医学科东侧	11.1	0.31
27	核医学科南部办公室	11.5	0.28
28	核医学科西侧	10.4	0.26
29	核医学科内部宣教区左侧	11.3	0.33
30	SPECT-CT 机房	12.1	0.35
31	SPECT-CT 注射后候诊区	11.4	0.29
32	分装、注射室	11.2	0.36
33	PET-MR 机房	11.6	0.32
34	PET-MR 注射后候诊室	11.8	0.38
35	核素治疗室	12.4	0.42

山东省潍坊市天然辐射本底水平详见表 8-2。

表 8-2 潍坊市环境天然 γ 空气吸收剂量率 ($\times 10^{-8}\text{Gy/h}$)

监测内容	范围	平均值	标准差
原野	4.30~16.26	6.16	1.28
道路	3.35~17.70	6.07	1.73
室内	6.24~23.89	10.57	2.12

由表 8-1 和表 8-2 可知, 本项目核医学科和介入放射科工作场所室内环境 X- γ 辐射剂量率监测结果范围为 $10.2\sim 12.7\times 10^{-8}\text{Gy/h}$, 均处于潍坊市室内环境天然辐射水平正常范围 ($6.24\sim 23.89\times 10^{-8}\text{Gy/h}$) 内, 其中监测点 28 核医学科西侧环境环境 X- γ 辐射剂量率监测结果 $10.4\times 10^{-8}\text{Gy/h}$ 处于潍坊市室外环境天然辐射水平正常范围 ($4.30\sim 16.26\times 10^{-8}\text{Gy/h}$) 内。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 项目评价规模

通过与建设单位核实，确定本次评价规模：（1）新建核医学科乙级工作场所，包括新增 1 台 SPECT-CT 和 1 台 PET-MR，分别使用的同位素 ^{99m}Tc 、 ^{131}I 和 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N 用于医学诊断，同时 PET-MR 配套 5 枚 V 类 ^{68}Ge 校准源对 PET 进行校准；使用 ^{131}I 、 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 同位素用于医学治疗，使用 ^{125}I 用于籽粒植入；使用 ^{32}P 敷贴和 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴发射器用于敷贴治疗。（2）放射介入科新增 1 台 DSA、2 台 CT 机、2 台 DR 机、1 台数字肠胃机等射线装置，用于医学诊断和治疗。

本项目 ^{99m}Tc 由 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗制取， ^{18}F 、 ^{11}C 和 ^{13}N 由回旋加速器生产，其他放射性核素和敷贴器均由相关生产厂家外购获得。回旋加速器不在此次评价范围内。

9.2 放射性同位素应用

1、SPECT 诊断（使用 ^{99m}Tc 、 ^{131}I ）

医院拟购置 1 台 GE 公司 SPECT 设备进行诊疗工作。根据医院提供的资料，SPECT 诊断使用 ^{99m}Tc 、 ^{131}I 核素标记，其中 ^{99m}Tc 诊断每日最多 10 人，每人最大用量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi)，每年最大使用量为 $9.62 \times 10^{11} \text{Bq}$ (26Ci)； ^{131}I 诊断每日最多 1 人，每人最大用量为 $1.11 \times 10^8 \text{Bq}$ (3mCi)，每年最大使用量为 $2.89 \times 10^{10} \text{Bq}$ (780mCi)。 ^{99m}Tc 由医院使用 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器制取， ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器规格为 $1.11 \times 10^{10} \text{Bq}$ (300mCi)。发生器贮存在分装注射室通风橱内，淋洗过程在密闭发生器中负压条件下自动进行，发生器色谱柱外有 40mmPb 的铅防护，再加 15mmPb 通风橱的防护。废旧发生器置于铅罐中暂存在废料间，由厂家回收。

2、PET 诊断（使用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N ）

医院拟购置 1 台 GE 公司 PET 设备进行诊疗工作。根据医院提供的资料，PET 诊断使用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N 核素标记，其中 ^{18}F 诊断每日最多 10 人，每人最大用量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi)，每年最大使用量为 $9.62 \times 10^{11} \text{Bq}$ (26Ci)； ^{11}C 诊断每日最多 1 人，每人最大用量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi)，每年最大用量为 $9.62 \times 10^{10} \text{Bq}$ (2.6Ci)； ^{68}Ga 平均 2 周诊断 1 人，每人最大用量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi)，每年最大使用量为 $9.62 \times 10^9 \text{Bq}$ (260mCi)； ^{13}N

诊断每日最多 2 人，每人最大使用量为 $7.4 \times 10^8 \text{Bq}$ (20mCi)，每年最大使用量为 $3.85 \times 10^{11} \text{Bq}$ (10.4Ci)。

3、放射性核素治疗

本项目使用 ^{131}I 、 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 和 ^{125}I 用于治疗。

^{131}I 用于治疗甲亢和甲癌。医院拟购置 1 台碘全自动分装仪，根据患者患病状况确定用药剂量，然后按用量进行订购，采用碘全自动分装仪进行分装。

根据企业提供的资料， ^{131}I 治疗甲亢每日最多 1 人，每日每人最大用量为 $2.59 \times 10^8 \text{Bq}$ (7mCi)，每年最大使用量为 $6.73 \times 10^{10} \text{Bq}$ (1.82Ci)； ^{131}I 治疗甲癌每年为 78 人，每天最多治疗 1 人，每人最大用量为 $5.55 \times 10^9 \text{Bq}$ (150mCi)，每年最大使用量为 $4.33 \times 10^{11} \text{Bq}$ (11.7Ci)。

^{89}Sr 和 ^{153}Sm 治疗每 2 日治疗 1 人，每人最大用量为 $1.11 \times 10^8 \text{Bq}$ (3mCi)，每年最大使用量为 $1.44 \times 10^{10} \text{Bq}$ (390mCi)。

^{177}Lu 治疗平均每年治疗 13 人，每人最大用量为 $1.48 \times 10^8 \text{Bq}$ (4mCi)，每年最大使用量为 $1.92 \times 10^9 \text{Bq}$ (52mCi)。

^{32}P 治疗平均每年治疗 10 人，每人最大用量为 $1.85 \times 10^8 \text{Bq}$ (5mCi)，每年最大使用量为 $1.85 \times 10^9 \text{Bq}$ (50mCi)。

^{125}I 粒籽源植入平均每年治疗 26 人，平均每人次植入 50 颗粒籽源，每颗粒籽源活度在 $1.85 \sim 4.44 \times 10^7 \text{Bq}$ ，则每人最大用量为 $2.22 \times 10^9 \text{Bq}$ (60mCi)，每年最大使用量 $5.77 \times 10^{10} \text{Bq}$ (1.56Ci)。

4、敷贴治疗

^{90}Sr 敷贴治疗每日最多治疗 1 人，每人最大用量为 $3.7 \times 10^7 \text{Bq}$ (1mCi)，每年最大使用量为 $9.62 \times 10^9 \text{Bq}$ (260mCi)； ^{32}P 敷贴治疗平均每年治疗 13 人，每人最大用量为 $1.85 \times 10^8 \text{Bq}$ (5mCi)，每年最大使用量为 $2.41 \times 10^9 \text{Bq}$ (65mCi)。

医院应通过合理安排患者的诊疗时间，防止患者之间的交叉照射。

各放射性核素的性能参数详见表 9-1，年最大用量为目前保守估计的实际用量。

表 9-1 各同位素性能参数及用量

核素	半衰期	毒性	衰变方式	物理性态	日最大用量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	用途	工作场所
¹³¹ I	8.04d	中毒	β-	液态	5.92×10 ⁹	5.30×10 ¹¹	甲状腺功能测定 甲亢和甲癌治疗	核医学科
¹²⁵ I	60.14d	中毒	X	固态	2.22×10 ⁹	5.77×10 ¹⁰	籽源植入治疗	
¹⁷⁷ Lu	6.7d	中毒	β-	液态	1.48×10 ⁸	1.92×10 ⁹	神经内分泌癌治疗	
¹⁵³ Sm	46.7h	中毒	β-	液态	1.11×10 ⁸	1.44×10 ¹⁰	肿瘤骨转移治疗	
⁸⁹ Sr	50.5d	中毒	β-	液态	1.11×10 ⁸	1.44×10 ¹⁰	肿瘤骨转移治疗	
³² P	14.3d	中毒	β-	液态	1.85×10 ⁸	1.85×10 ⁹	恶性胸腹水和无菌性滑膜炎治疗	
¹³ N	10min	低毒	β+	液态	1.48×10 ⁹	3.85×10 ¹¹	PET-CT 诊断及试验	
¹⁸ F	109.7min	低毒	β-	液态	3.70×10 ⁹	9.62×10 ¹¹		
¹¹ C	20min	低毒	β+	液态	3.70×10 ⁸	9.62×10 ¹⁰		
⁶⁸ Ga	68.3min	低毒	β+	液态	3.70×10 ⁸	9.62×10 ⁹	一般器官显像	
^{99m} Tc	6.02d	低毒	IT	液态	3.70×10 ⁹	9.62×10 ¹¹		
³² P	14.3d	中毒	β-	固态	1.85×10 ⁸	2.41×10 ⁹	皮肤敷贴治疗	
⁹⁰ Sr	29.1a	高毒	β-	固态	3.70×10 ⁷	9.62×10 ⁹	皮肤敷贴治疗	
⁹⁰ Y	2.67d	中毒	β-	固态				

9.3 工程设备和工艺分析

9.3.1 SPECT-CT 和 PET-MR 诊断工作原理及工作流程

1、SPECT-CT 工作原理

当某种放射性核素或其标记物通过注射、口服等方式进入体内后，依其化学及生物学特性不同，随血流等进入某些特定的组织器官，参与或模仿某些生命物质在人体内的病理生理、引流代谢的过程。由于正常组织和病变组织在这个过程中的差异，使其聚集这种放射性核素或其标记物的能力发生了变化。利用 SPECT 来探测这种放射性核素发射的 γ 射线在体内的分布状态并还原成图像，其影像不仅可以显示脏器和病变的位置、形态、大小等解剖结构，更重要的是可以显示脏器的功能、代谢情况，提供有关脏器的血流、功能、代谢和引流等方面定性的和定量的信息。而血流、功能和代谢的异常，常是疾病的早期变化，出现在形态结构发生改变之前。因此，SPECT 放射性核素显像有助于疾病的早期诊断。

SPECT-CT 是将 SPECT 和 CT 有机结合在一起，使用同一个检查床和同一个图像处理工作站，将 SPECT 图像和 CT 图像融合，可以同时放映病灶的病理生理变化和形态结构，明显提高诊断的准确性。

本项目 SPECT 显像诊断采用 ^{99m}Tc 和 ¹³¹I 放射性核素标记，^{99m}Tc 由鉬

得发生器淋洗制取， ^{131}I 从放射性同位素生产厂家购买。

2、PET-MR 工作原理

(1) PET-MR

当某种放射性核素或其标记物通过注射，口服等方式进入体内后，依其化学及生物学特性不同，随血流等进入某些特定的组织器官，参与或模仿某些生命物质在人体内的病理生理、引流代谢的过程。由于正常组织和病变组织在这个过程中的差异，使其聚集这种放射性核素或其标记物的能力发生了变化。利用 PET 来探测这种放射性核素发射的 γ 射线在体内的分布状态并还原成图像，其影像不仅可以显示脏器和病变的位置、形态、大小等解剖结构，更重要的是可以显示脏器的功能、代谢情况，提供有关脏器的血流、功能、代谢和引流等方面定性的和定量的信息。而血流、功能和代谢的异常，常是疾病的早期变化，出现在形态结构发生改变之前。因此，PET 放射性核素显像有助于疾病的早期诊断。

该 PET-MR 具备 MR 检测功能。磁共振成像指处于某个静磁场中的物质的原子核系统受到相应频率的电磁波作用时，在它们的磁能级之间发生的共振跃迁现象。即人体内的氢核在一定静磁场和射频场的作用下，所产生的氢核核磁共振信号，经过数字处理，重建以磁共振信号强度为基础的图像。磁共振影像系统就是利用上述原理进行医。

本项目 PET 显像诊断采用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 和 ^{68}Ga 放射性同位素标记， ^{18}F 、 ^{11}C 和 ^{13}N 由回旋加速器生产（回旋加速器不在本次评价范围内）， ^{68}Ga 从放射性同位素生产厂家购买。

(2) 配套 ^{68}Ge 校准源

本项目 PET-MR 配套使用 1 枚 $5.5 \times 10^7 \text{Bq}$ 、1 枚 $3.5 \times 10^6 \text{Bq}$ 和 3 枚 $2.1 \times 10^6 \text{Bq}$ 的 ^{68}Ge 校准源共 5 枚，平时都放在铅屏蔽容器中。 ^{68}Ge 校准模拟注射同位素药物的人体，用于探头采集均匀性和能峰的校准。

3、SPECT 和 PET 工作流程及产污环节

a、SPECT 和 PET 诊断工作流程基本相同，其具体流程如下

I、接收患者，并告知患者诊断过程存在辐射危害；

II、医生根据病情确定使用核素的类别和剂量；

III、病人通过注射或口服将放射性药物摄入。在药品摄入过程中存在 γ

射线污染，同时会产生放射性废水、固废(注射器、棉球、一次性手套等)；

IV、病人摄入药品后通过仪器进行器官显像和病情检查。在此过程中病人带有 γ 射线。

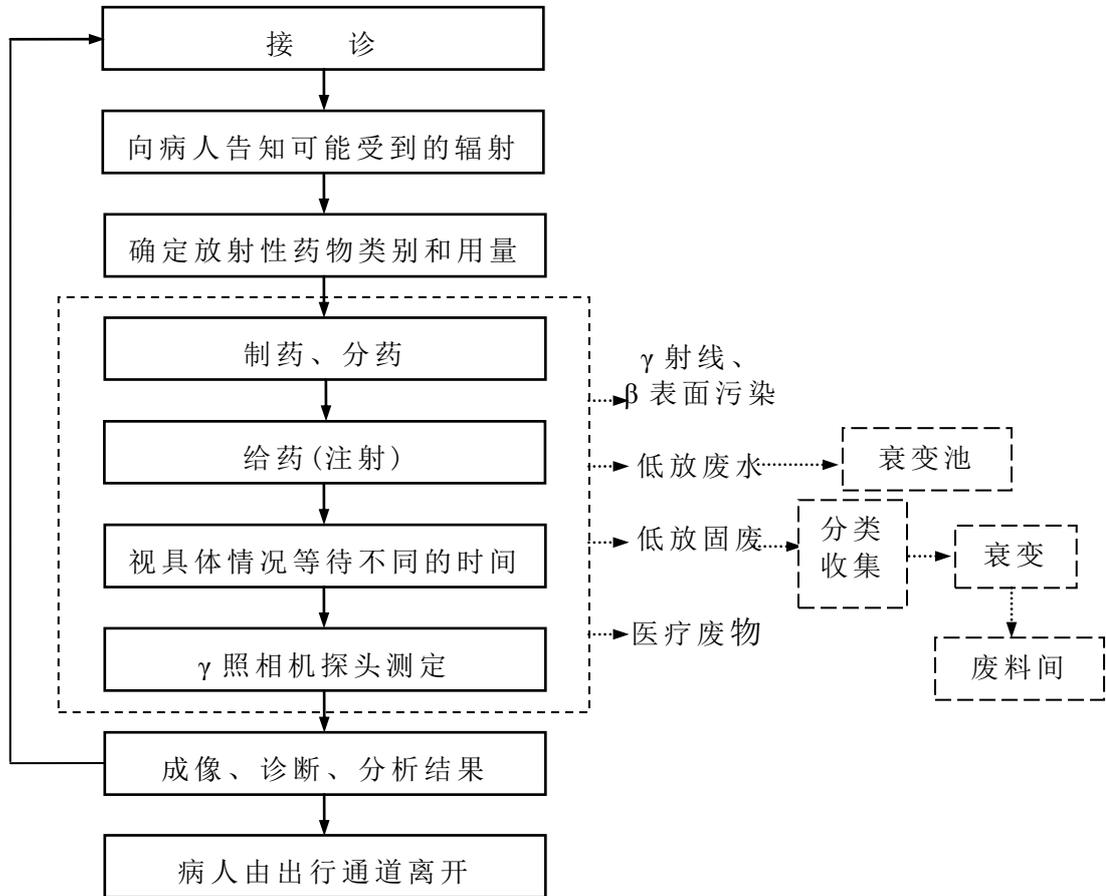


图 9-1 核医学科 SPECT 和 PET 系统诊断工艺流程及产污位置图

b、CT 检查

为了验证 PET 检查结果，对 PET 检查的病人同时也作 CT 检查。其流程与一般的 X 线、CT 检查相同，主要环节有接诊、告知辐射危害、检查和出具结果等，主要污染因子为 X 射线。

c、MR 检查

MR 科显示人体内部器官的精确结构图，与 PET 相结合，可一次检查即可获取 MRI 和 PET 的图像。核磁共振采用永久磁体。磁共振产生磁场的部件采用超导磁体，磁场强度稳定。由于磁共振仪设备采取了自屏障措施，因此周围环境的磁场强度衰减较快。核磁共振仪电磁辐射对周围环境影响很轻微。

综上所述 SPECT-CT 和 PET-MR 诊断过程中主要污染因子为： γ 射线、 β

表面污染、放射性废水、放射性固体废物等。

d、配套 ^{68}Ge 校准源

校准源操作流程如下：

- ①将 ^{68}Ge 校准源放置在病床上；
- ②做放射源透射的质量控制；
- ③进行病人检查，采集病人体内核素发射的射线，然后再采集校准源的透射线；
- ④将源卸下，置于专用铅盒中放入储源室保存。

^{68}Ge 校准源衰变放出 X 射线和 γ 射线，因此污染因子为 X 射线和 γ 射线。

9.3.2 核医学科同位素治疗工作原理及工作流程

1、 ^{89}Sr

^{89}Sr 主要应用于主要用于骨转移瘤的治疗。 ^{89}Sr 发射纯 β 射线， β 粒子的平均能量为 0.58MeV，最大能量达 1.49MeV，在组织内的辐射距离约 2.4mm，半衰期为 50.5 天。通过对患者注射 ^{89}Sr 药物，利用 ^{89}Sr 在体内释放 β 射线治疗骨转移瘤。

医生对患者进行检查，根据病情，在本院医疗条件允许范围内确定注射剂量，与患者预约，根据患者数量订购 ^{89}Sr 注射药物，在注射室（患者在注射室外）对患者进行注射治疗，患者在原地短暂观察（约 10min）后，如无异常情况，患者可离开医院。

2、 ^{153}Sm

^{153}Sm 用于治疗骨转移瘤治疗。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。

^{153}Sm 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。

医生对患者进行检查，根据病情，在本院医疗条件允许范围内确定注射剂量，与患者预约，根据患者数量订购 ^{153}Sm 注射药物，在注射室（患者在注射室外）对患者进行注射治疗，患者在原地短暂观察（约 10min）后，如无异常情况，患者可离开医院。

3、 ^{177}Lu

主要用于神经内分泌癌治疗。通过对患者注射 ^{177}Lu 药物，利用 ^{177}Lu 在体内释放 β 射线治疗内分泌癌。

医生对患者进行检查，根据病情，在本院医疗条件允许范围内确定注射剂量，与患者预约，根据患者数量订购 ^{177}Lu 注射药物，在注射室（患者在注射室外）对患者进行注射治疗，患者在原地短暂观察（约 10min）后，如无异常情况，患者可离开医院。

4、 ^{32}P

主要用于恶性腹水和无菌性滑膜炎治疗。通过对患者注射 ^{32}P 药物，利用 ^{32}P 在体内释放 β 射线治疗恶性腹水和无菌性滑膜炎治疗。

医生对患者进行检查，根据病情，在本院医疗条件允许范围内确定注射剂量，与患者预约，根据患者数量订购 ^{32}P 注射药物，在注射室（患者在注射室外）对患者进行注射治疗，患者在原地短暂观察（约 10min）后，如无异常情况，患者可离开医院。

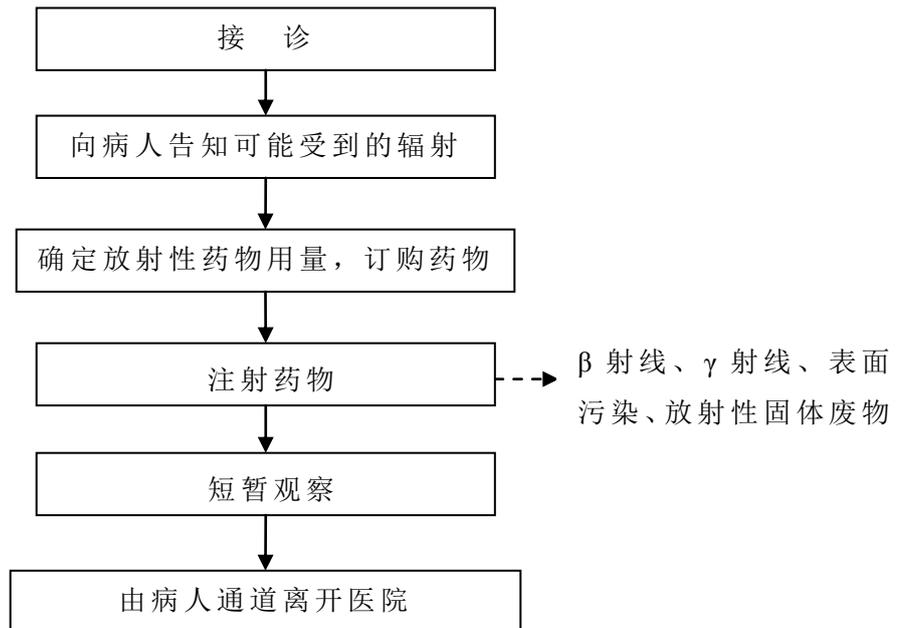


图 9-2 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 核素治疗工艺流程及产污环节

因此 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 核素治疗项目的污染因子主要为 β 射线、 γ 射线、表面污染、放射性固体废物。

5、 ^{131}I

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

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

治疗流程

I、接收患者，并告知患者诊断过程存在辐射危害；

II、医生根据病情确定使用核素的剂量。

III、医生利用分碘仪远程将药物分装，远程指导患者口服，患者在服药室口服药物

IV、病人口服 ^{131}I 药品进行治疗。一般甲亢患者服药室观察约 30min，如无异常情况，可离开医院，甲癌患者需在核素治疗室住院（最多 4 天），按规定时间全身扫描复查，以观察甲癌残留灶及转移灶的摄碘情况。

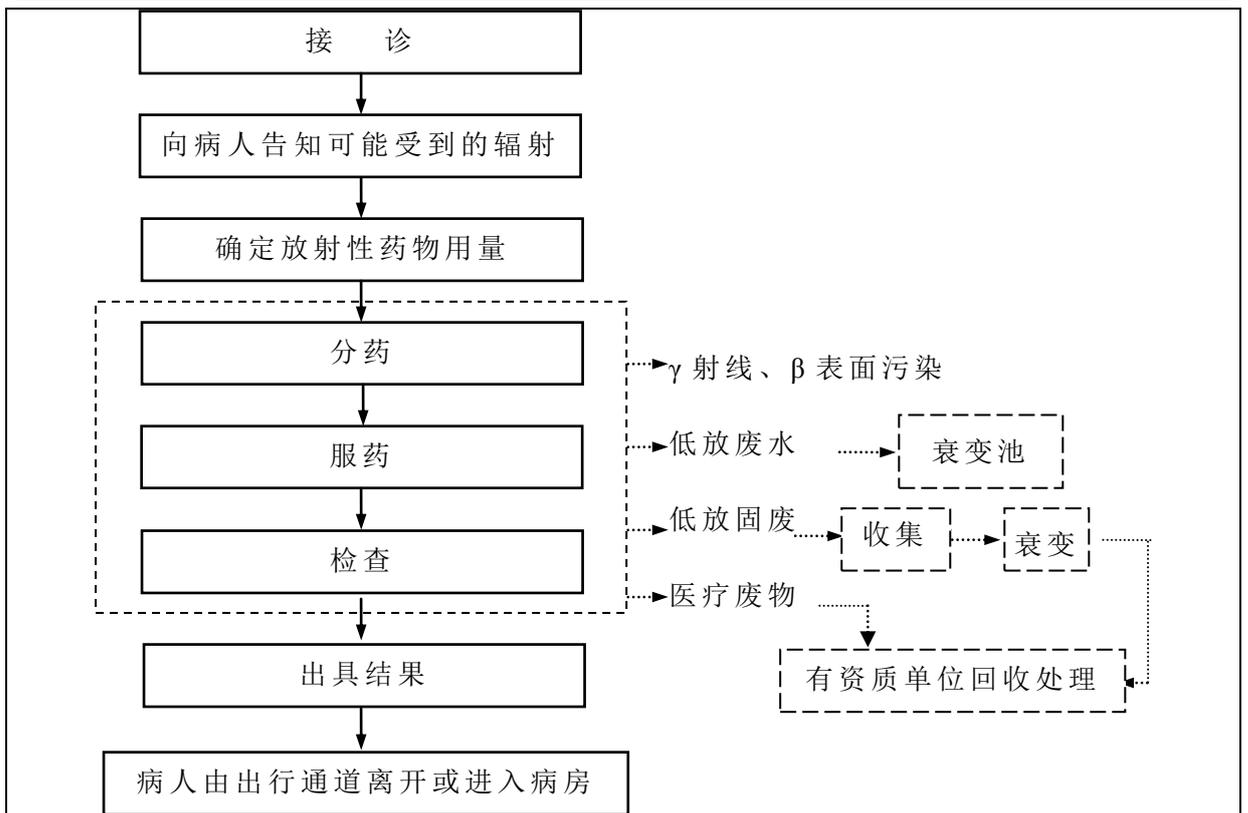


图 9-3 ^{131}I 治疗工作流程及产污环节图

综上， ^{131}I 治疗过程产生的污染因子主要为： γ 射线、 β 表面污染、放射性废水、放射性固废等。

6、 ^{125}I 籽源

a. 粒籽植入基本构件组成元件：植入枪、穿刺针、推送杆，见图 9-4



图 9-4 粒籽植入基本构件

b. 粒籽源基本结构

^{125}I 封焊于钛金属壳内，体积甚小（直径为 $0.80\pm 0.05\text{mm}$ ；长度为 $4.50\pm 0.30\text{mm}$ ），半衰期短，其发射的 X、 γ 射线能量低，可采用皮下穿刺等微创方法，将其准确地植入肿瘤内部进行定向治疗，利用 ^{125}I 发射的 γ 射线抑制肿瘤的生长，达到治疗肿瘤的目的，通常用于脑部肿瘤、颈部肿瘤、肺癌、前列腺癌、肝癌、乳腺癌、口腔肿瘤和支气管肿瘤等的治疗，外观照片见图 9-5。

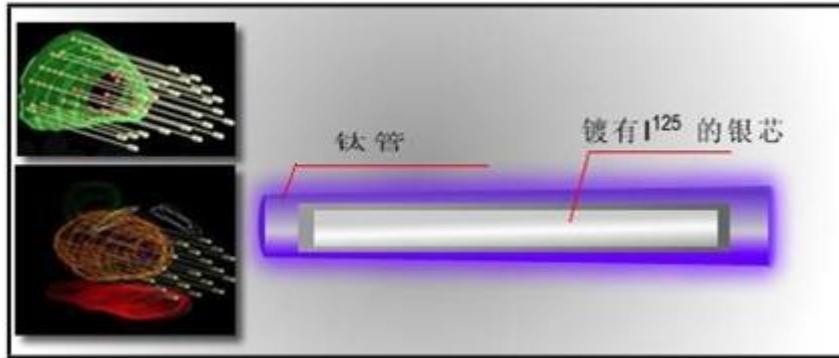


图 9-5 粒籽源外照示意图

c. 粒籽植入工作流程

本项目使用的 ^{125}I 粒籽源根据病人病灶情况提前预约量，由供货方直接消毒填装好后，在手术当天运送至医院核医学科储源室的保险柜内暂存，然后送往 SPECT-CT 室进行手术， ^{125}I 粒籽源植入手术在 SPECT-CT 室内进行。粒籽源购买成品，粒籽源的分装和消毒由供货商实施，不在医院内进行分装和消毒。其具体工艺流程如下：

◆ 植入前利用影像学方法在治疗计划（TPS）系统上进行治疗计划设计，制定治疗前计划确定植入导针数，导针位置，粒籽数及位置。选择粒籽种类及单个粒籽活度，计算靶区总活度，预期靶区剂量分布，包括肿瘤及正常组织的剂量分布。确定治疗日期并告知病人可能受到的辐射危害。

◆ 根据 TPS 治疗计划，由具有从事放射工作资质的医师向医院采购人员提出订购 ^{125}I 籽源的申请（内容包括生产厂家、数量及规格等），采购人员按照申请及时向有从事放射性药品经营许可证的单位订购。 ^{125}I 籽源由经营单位专人送到医院后，采购人员通知 ^{125}I 密封籽源植入治疗室的主治医师同时核对、签收并作详细登记，然后送到储源室保险柜中暂存。

◆根据 TSP 计划，将采购的 ^{125}I 粒籽源送至 SPECT-CT 机房，并准备好植入模板、植入针、定位模板等治疗设备。

◆用 SPECT-CT 的 CT 功能模板等引导下进行粒籽植入。粒籽植入时，用 TPS 进行剂量优化，优化剂量要求，正确勾画实际肿瘤靶区；重建核算植入针及粒籽数，剂量靶区放射性总活度，调整粒籽位置，纠正不均匀度，保护靶区相邻的重要器官。

◆完成手术后，病人需住院一般 7d~14d，以便医生随时进行手术后的病情观察。

病人住院观察期间，身体没有什么异常情况的，可正常办理出院手续。出院后，在 1 到 2 个月内，医院要求病人尽量避免与孕妇、儿童密切接触，或保持 1m 以上距离。经过约 8 个月的衰变粒子失去放射治疗作用。由于粒子外壳为钛合金，与组织有极好的相容性，允许长期留存体内，不会产生排异反应。

^{125}I 粒籽植入工作流程详见图 9-6。

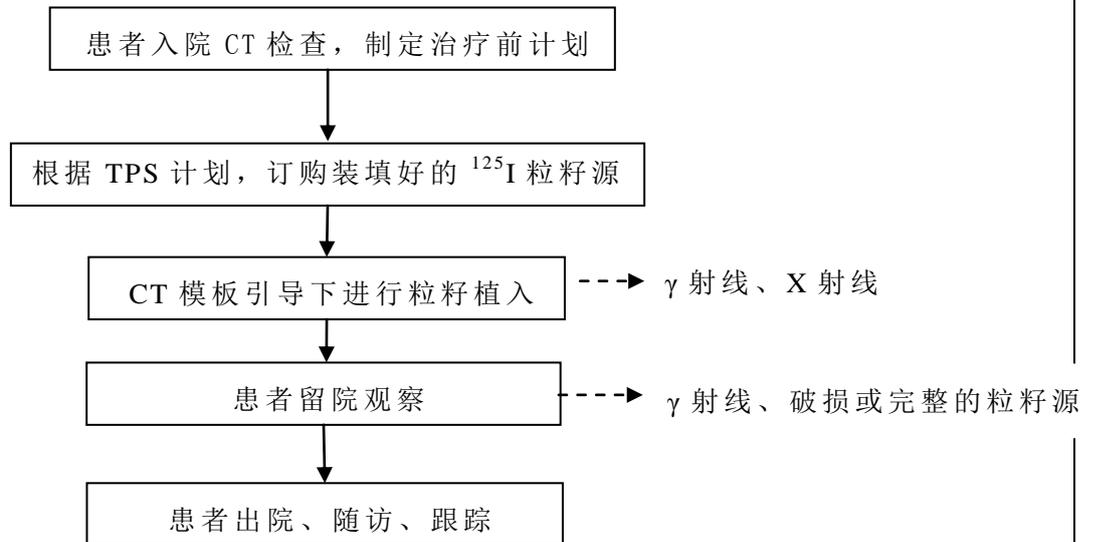


图 9-6 ^{125}I 粒籽植入工作流程及产污环节图

^{125}I 衰变方式是轨道电子俘获，主要发射 γ 射线和 X 射线，该院通过手术直接植入病变组织，在治疗过程中无废水和废气的产生，因此 ^{125}I 粒籽源治疗过程中的污染因子是 X 射线和 γ 射线，放射性固废主要为破损或回收完整的 ^{125}I 粒籽源。

9.2.6 敷贴治疗工作原理及工作流程

1、 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴发射器

当患者患有血管瘤、痣、酒渣鼻、毛细血管扩张、神经性皮炎、局限性慢性湿疹、局限性皮肤瘙痒和某些皮肤癌等症时，通过某些放射性同位素（如 ^{90}Sr ）的敷贴，可以降低细胞分裂速度，延长核分裂周期，闭塞毛细血管及止痒和镇痛等作用而达到治疗目的。该敷贴器从生产厂家订购， ^{90}Sr 放射源烧结在瓷片表面的陶瓷釉中，装入铝壳，滚压收口用环氧树脂密封。平常置于铅罐存于储源室的保险柜中。

2、 ^{32}P 敷贴

当患者患有癌症腹水和其他皮肤病，根据患者病变部位的形状及大小，让敷贴充分接近病变皮肤，通过 ^{32}P 在衰变过程中释放的纯 β 射线，作用于增生组织细胞，使其病变，核固缩和细胞膜消失变成合体细胞，从而减少组织的合成与沉积，达到治疗的目的。该 ^{32}P 敷贴器从生产厂家订购，平常置于铅罐存于储源室的保险柜中。

患者在贴服治疗室接受治疗，工作人员根据病人病变的大小，厚薄及部位的不同，选择不同的剂量和疗程，确定每次照射时间；治疗时，工作人员打开铅罐，持手柄取出敷贴器放在患处，治疗完毕，工作人员将放射源放回铅罐，将铅罐放回储源室的保险柜中。

9.2.7 主要放射性核素特性

1、 ^{131}I

- (1) 半衰期：8.04 天
- (2) 衰变类型： β -100%
- (3) 射线能量： β 射线 606.3keV（89.9%）； γ 射线 364.5keV（81.7%）
- (4) ^{131}I 衰变纲图：见图 9-7。

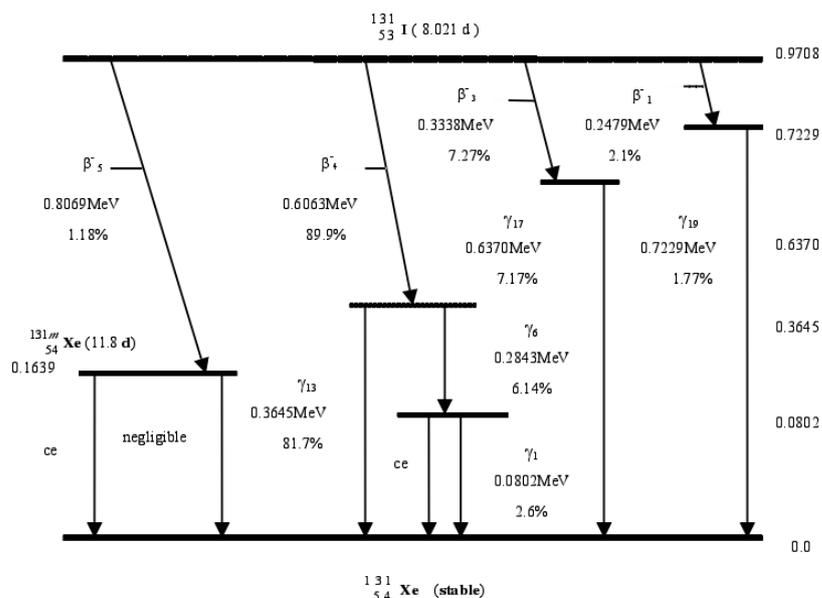


图 9-7 ¹³¹I 衰变纲图

2、⁸⁹Sr

⁸⁹Sr 发射纯 β 射线,β 粒子的平均能量为 0.58MeV,最大能量达 1.49MeV,在组织内的辐射距离约 2.4mm,半衰期为 50.5 天。衰变纲图见图 9-8。

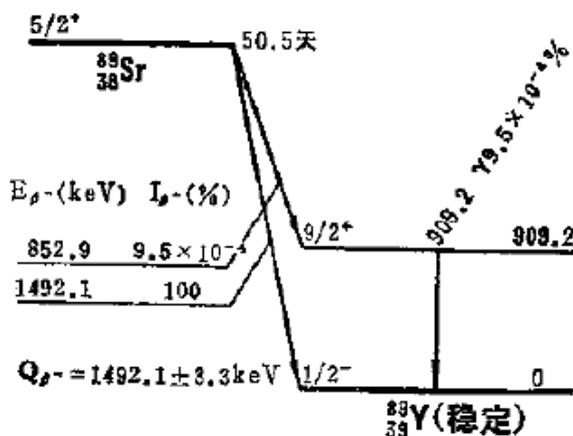


图 9-8 ⁸⁹Sr 衰变纲图

3、^{99m}Tc 放射性特性

(1) 半衰期: 核算 ^{99m}Tc 为 ⁹⁰Tc 的同质异能素,半衰期为 6.02h,其子体为核素 ⁹⁹Tc, ⁹⁹Tc 又能发生 β 衰变,但它的半衰期很长,为 2.13×10⁵ 年。

(2) 衰变方式: 同质异能跃迁, IT%≈100%,同时发射 γ 射线,能量为 140keV。

(3) ^{99m}Tc 衰变纲: 见图 9-9。

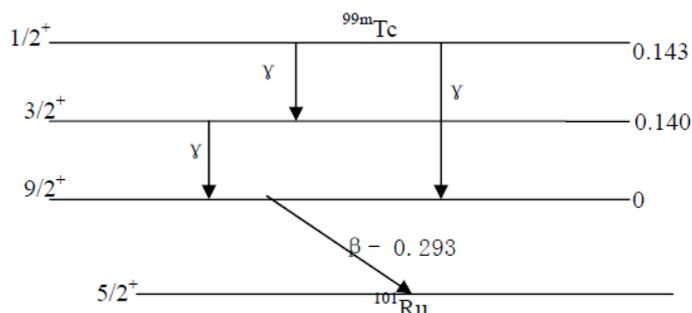


图 9-9 ^{99m}Tc 衰变纲图

4、¹⁵³Sm 放射特性

¹⁵³Sm 的半衰期为 46.8h，衰变方式为 β 衰变，能衰变出多条 β 射线，其中分支比最大的为 45.1%，能量为 702.0keV，还能释放出多条 γ 射线，其中分支比最大的为 40.8%，能量为 54.6590keV。衰变量纲详见 9-10。

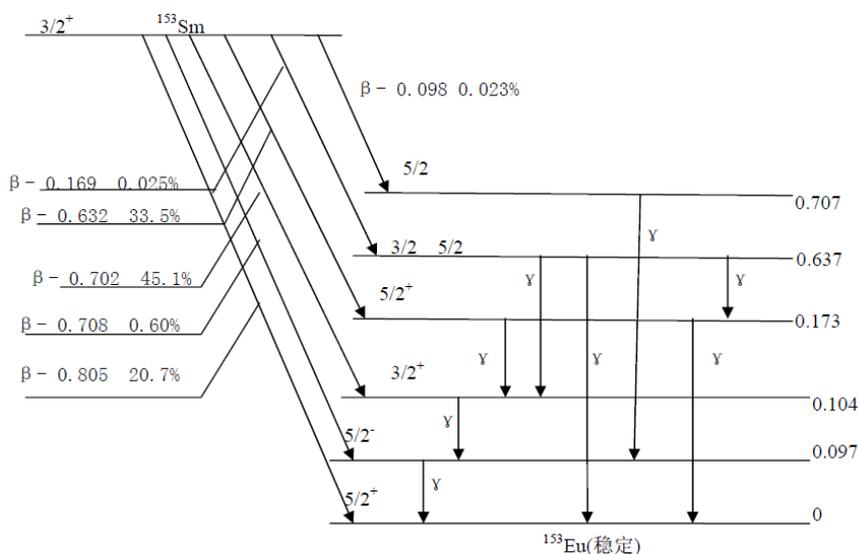


图 9-10 ¹⁵³Sm 衰变纲图

5、³²P

³²P 的半衰期为 14.3d，衰变方式为 β 衰变(β%=100%)，能量为 1.71MeV，其衰变纲图详见图 9-11。

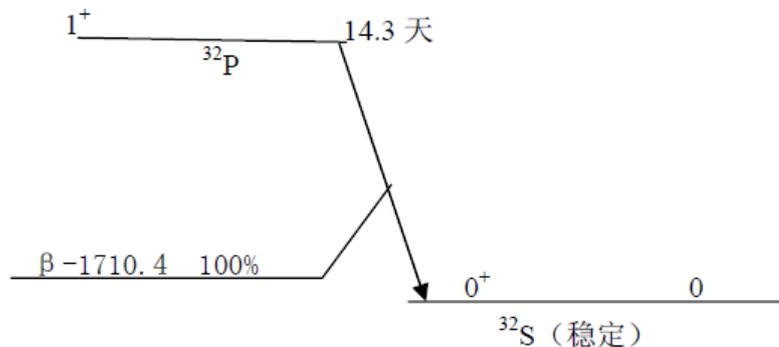


图 9-11 ³²P 衰变纲图

6、¹²⁵I 放射特性

¹²⁵I 的半衰期为 60.1d，衰变方式为轨道电子俘获（β%=100%），主要发射 35.5keV 的 γ 射线（6.8%）和两条 27.5keV 的 X 射线，其衰变纲图详见图 9-12。

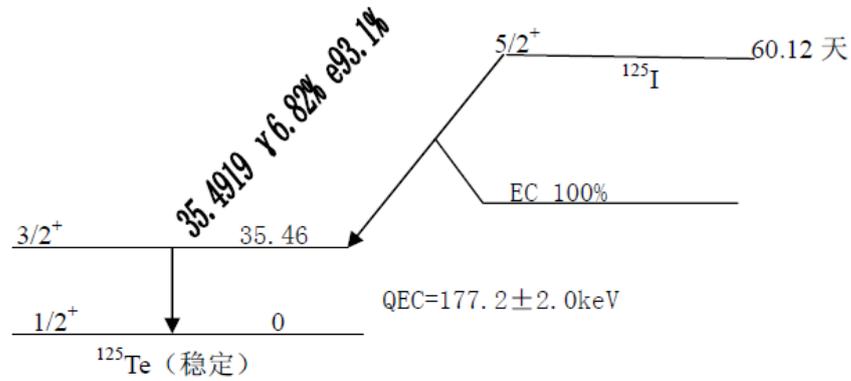


图 9-12 ¹²⁵I 衰变纲图

7、⁹⁰Sr 放射特性

⁹⁰Sr 是人工放射性同位素，纯 β⁻衰变，半衰期为 28.1a，子体 ⁹⁰Y 半衰期为 64.2h，两者发出的 β 射线能量分别为 0.54MeV 和 2.25MeV，其衰变纲图详见图 9-13。

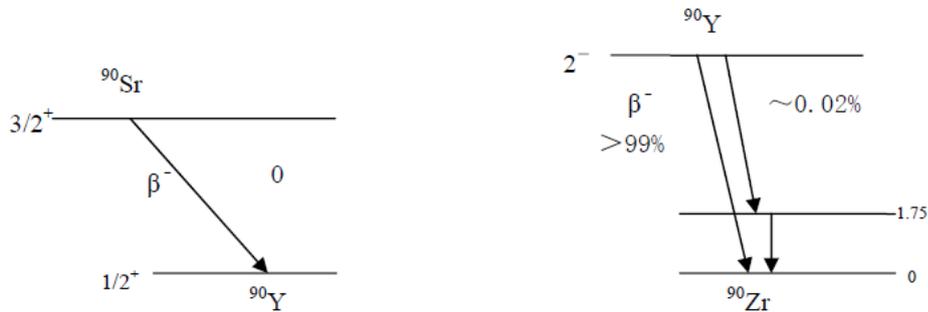


图 9-13 ⁹⁰Sr 衰变纲图

8、¹⁷⁷Lu 放射特性

¹⁷⁷Lu 的半衰期为 6.71d，其衰变方式为 β⁻衰变，可放射出多条 β 射线，其中分支比最大的为 78.2%，能量为 497.1keV，还能释放出多条 γ 射线，其中分支比最大的为 6.4%，能量为 113keV。其衰变纲图详见图 9-14。

线 GaKX，能量为 9.3keV。

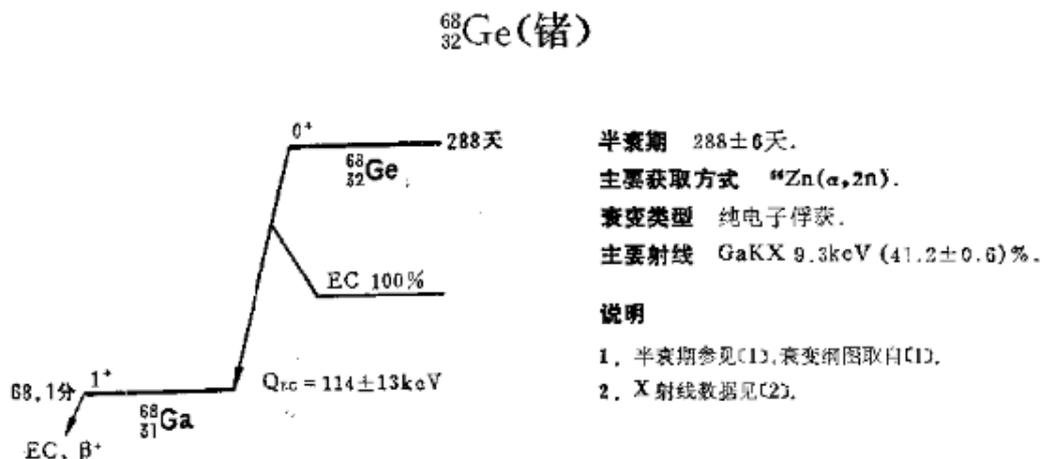


图 9-16 ^{68}Ge 衰变纲图

9.2.8 DSA、CT 及其他射线装置工作原理及工作流程

DSA、CT 及其他射线装置为采用 X 射线进行摄影的技术设备，由 X 射线管和高压电源组成，其典型 X 射线管的结构详见图 9-17。

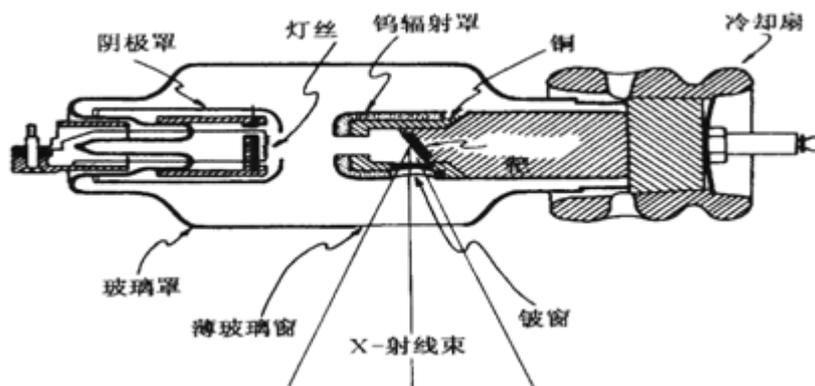


图 9-17 典型 X 射线管结构图

1、DSA

数字血管造影(DSA)是计算机与常规血管造影相结合的一种检查方法，是集电视技术、影像增强、数字电子学、计算机技术、图像处理技术多种科技手段于一体的系统。DSA 主要采用时间减影法，即将造影的蒙片与造影剂注入后摄取的造影片在计算机中进行数字相减处理,仅显示有造影剂充盈的结构，具有高精密度和灵敏度。

其工作流程如下：

- (1) 病人经医生诊断、诊断正当性判断后，确定需要介入治疗的病人

进行预约登记。

(2) 手术前洁净准备，手术医生、患者以及器械全部准备好后，患者进入介入手术室，准备接受介入手术。

(3) 手术过程中介入医生在设备图像引导下通过微小的创口将特定的器械导入人体病变部位。

(4) 手术结束后病人离开。

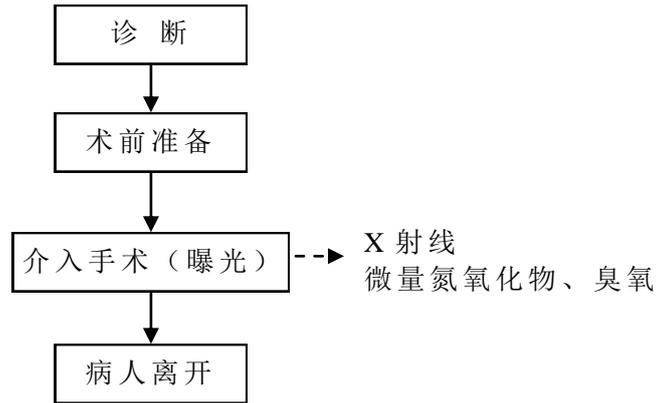


图 9-18 DSA 工作流程及产污环节图

2、CT

CT 是计算机断层 X 射线摄影术（Computed Tomography）的简称，它使用了精确准直的 X 射线从各种不同的离散角度扫描所关注的平面，利用探测器记录透射光束的衰减量，并经过数学运算，电子计算机处理相应数据，从而产生一个以检查层的相对衰减系数为依据的躯体横断面的影像。

3、其他射线装置

DR 和胃肠机等射线装置是利用 X 射线对人体不同组织穿透力不同的原理，寻找病灶部位、形状及体积大小并予以定位、摄影，永久记录被检部位影像的一种设备，这种方法比透视能发现更多有诊断价值的信息。

CT、DR 和数字肠胃机等 X 射线装置工作流程基本相同，其工作流程如下：

(1) 病人经医生诊断、诊断正当性判断后，确定需要 X 射线影像诊断的病人与放射科预约登记。

(2) 受检者按约定时间在候诊区准备和等候。

(3) 检查室内在放射科医生的指导下正确摆位。

- (4) 医生进行隔室操作，利用各种 X 射线影像诊断设备进行拍片/透视。
- (5) 检查结束离开检查室。

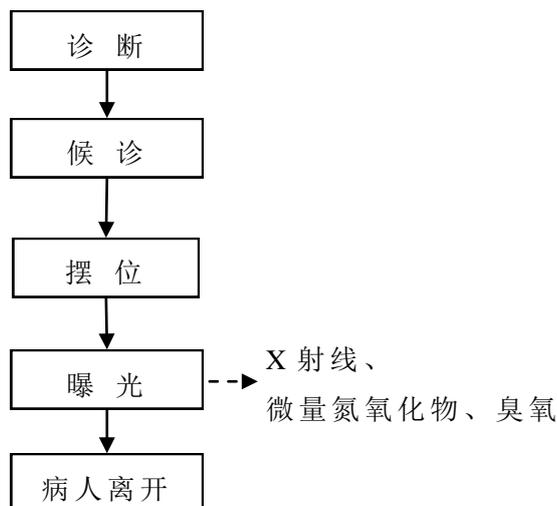


图 9-19 X 射线装置工作流程及产污环节

因此，项目使用 X 射线装置主要污染物因子为 X 射线、微量氮氧化物和臭氧等有害气体。

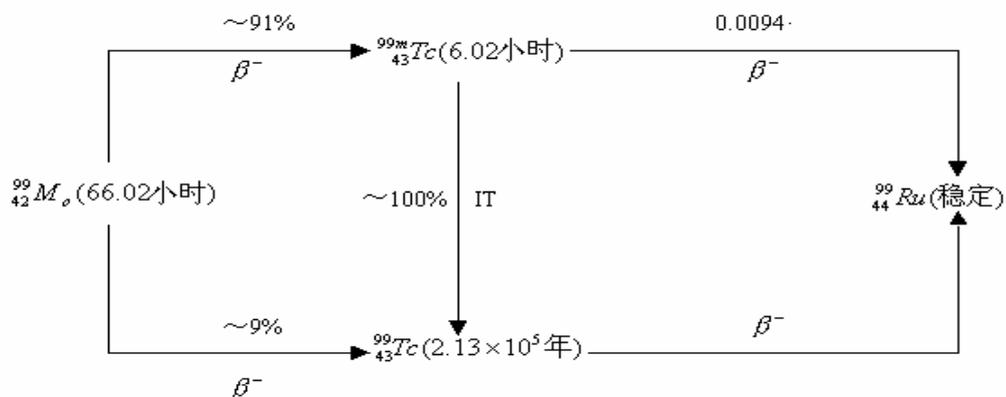
9.3 污染源强分析

9.3.1 污染因子分析

1、SPECT-CT 污染因子分析

医院 SPECT 检查药物 ^{99m}Tc 采用 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器制得。

^{99}Mo 的衰变方式是 β^- ，衰变时除发射 β 射线外还发射 γ 射线， ^{99}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

，产生 ^{99}Tc 的相对活度量极小，经估算，如 1Ci ($3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 99% 衰变成 ^{99}Tc ， ^{99}Tc 的活度仅为 120Bq ，因此，SPECT 中 ^{99}Tc 的放射性可以忽略不计。



图 9-20 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器实物图

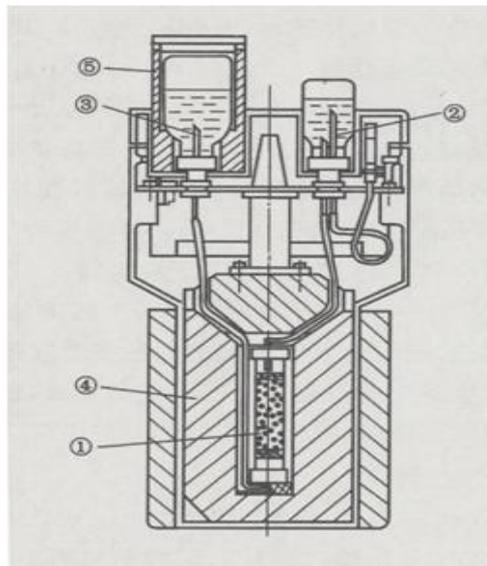


图 9-21 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器结构图

1、(吸附 ^{99}Mo 的) 色谱柱；2 双针插座 (插盐水瓶)；3 单针插座 (插真空瓶)；4、铅屏蔽体；5 铅防护容器

①β 射线和 γ 射线： $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{131}I 核素在衰变过程中释放 β 射线和 γ 射线，β 射线穿透力很弱，在组织内辐射距离很短，不会对环境产生明显影响。γ 射线穿透能力很强，会对周围环境造成一定的辐射影响。

②表面污染：由于操作过程可能会对工作台、地面造成放射性表面污染。

③放射性废气： $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 为非挥发性核素，淋洗过程在密闭发生器中负压条件下进行，无溶液挥发，因此无放射性废气。

④放射性废水：使用过程不产生放射性废液，但会产生一定量的放射性废水，主要来源于服药患者的排泄物以及冲洗用水等。SPECT 注射后候诊区设有患者专用卫生间，有专用下水道通往衰变池。

⑤放射性固废：放射性固体废物主要来源于患者使用的一次性纸杯、药棉、纱布、手套、破碎杯皿及污染地面的物品等。

因此，用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等核素标记 SPECT 项目污染因子是：γ 射线、β 表面污染、放射性废水和放射性固废。

2、PET-MR 污染因子分析

PET-MR 使用 ^{18}F 等核素显像。 ^{18}F 发射的正电子与负电子相结合，能产生湮没 γ 光子辐射，能量为 0.511MeV ； ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N 均为 β 衰变，同时放出 γ 射线。 β 射线穿透力很弱，在组织内辐射距离很短，不会对环境产生明显影响，因此 γ 射线是主要污染因子。

医生在对带有 ^{18}F 等放射性核素制剂的各种操作中，不可避免地会引起工作台、工作服和手套等产生放射性沾污，造成小面积的表面污染；也会产生一次性注射、手套、药棉等放射性固体废弃物，还有病人排泄产生的放射性废水。

用 ^{18}F 等核素标记 PET 项目污染因子是： γ 射线、 β 表面污染、放射性废水、放射性固废。

PET 配套 5 枚 ^{68}Ge 校准源， ^{68}Ge 衰变为纯电子俘获，衰变过程放出 X 射线和 γ 射线，同时也会产生退役校准源固废。

3、放射性核素治疗过程污染因子分析

(1) ^{131}I 甲亢和甲癌治疗污染因子分析

① β 射线和少量 γ 射线：核素在衰变过程中释放 β 射线和少量 γ 射线， β 射线穿透力很弱，在组织内辐射距离很短，不会对环境产生明显影响。

② 表面污染：患者服药后，一次性杯子表面残留的 ^{131}I 撒漏，对地面造成放射性表面污染。

③ 放射性废气： ^{131}I 是挥发性核素，但本项目使用的 ^{131}I 以碘化钠液体形式存在，为非挥发性核素，不存在升华现象。暂存期间密闭在铅罐内，使用时采用碘自动分装仪分装后，直接给患者口服，因此放射性废气可不考虑。

④ 放射性废水：使用过程不产生放射性废液，但会产生一定量的放射性废水，主要来源于服药患者的排泄物以及冲洗用水等。一般情况下甲亢患者服药后可直接离开医院。甲癌患者需要住院，医院设有核素治疗病房，病房内设有患者专用卫生间，有专用下水道通往衰变池。

⑤ 放射性固废：治疗时（含甲亢和甲癌），放射性固体废物主要来源于患者使用的一次性纸杯、擦拭铅罐及污染地面的物品等。另外，甲癌患者需要住院治疗，住院患者会产生一定的放射性废物。特殊情况下残留放射性核素放置于通风橱铅罐内，残留核素及铅罐由供应商厂家回收。

综上， ^{131}I 核素治疗项目的污染因子主要为 γ 射线、表面污染。放射性废水以及放射性固体废物。

(2) ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 核素治疗放射性污染因子分析

①核素在衰变过程中释放主要释放 β 射线， β 射线穿透力很弱，在组织内辐射距离很短，不会对环境产生明显影响。 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 两种核素在 β 衰变同时也会放射出 γ 射线。

②由于操作过程可能会对工作台、地面造成放射性表面污染。

③放射性废气： ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 为非挥发性核素，不产生放射性废气。

④放射性废水：使用过程中不产生放射性废液，患者接受注射或服药后在医院一般不会停留，在医院不会产生放射性废水。

⑤放射性固体废物：放射性固体废物主要为污染的一次性注射器、手套、药棉、纱布、破碎杯皿、服药杯、擦拭污染地面的物品等。

综上， ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 核素治疗项目的污染因子主要为 β 射线、 γ 射线、表面污染、放射性固体废物。

(3) ^{125}I 籽源

^{125}I 衰变方式是轨道电子俘获，主要发射X射线和 γ 射线，该院通过手术直接植入病变组织，在治疗过程中无废水和废气的产生，因此 ^{125}I 粒籽源治疗过程中的污染因子是X射线、 γ 射线，放射性固废主要为破损或回收完整的 ^{125}I 粒籽源。

4、敷贴治疗污染因子分析

(1) ^{90}Sr 和 ^{32}P 核素在衰变过程中主要释放 β 射线， β 射线穿透力很弱，在组织内辐射距离很短，不会对环境产生明显影响。但 β 射线被敷贴器外壳阻止时会产生韧致辐射。

(2)放射性废气： ^{90}Sr 、 ^{32}P 为非挥发性核素，不产生放射性废气。

(3)放射性废水：使用过程中不产生放射性废液。

(4)放射性固体废物：放射性废物主要为报废或退役的放射源，由供应商厂家回收。

综上， ^{90}Sr 、 ^{32}P 敷贴治疗项目的污染因子主要为韧致辐射、放射性固体

废物。

5、DSA 装置及Ⅲ类射线装置污染因子分析

由 X 射线装置的工作原理可知，X 射线是随机器的开、关而产生和消失。因此，该院使用的 DSA、CT 及其他射线装置在非诊断状态下不产生射线，只有在开机并处于出线状态时才会发出 X 射线。因此，在开机期间，主要污染因子为 X 射线，并伴有微量氮氧化物和臭氧有害气体产生，各射线装置机房拟采取中央空调新风系统进行动力排风，可保持良好的通风，产生的微量氮氧化物和臭氧对环境的影响很小。

上述各射线装置在运行时无其它放射性废气、废水和固体废弃物产生。

综上所述，本项目营运过程中产生的污染因子及过程详见表 9-1。

表 9-1 污染因子汇总表

核素	污染因子				
	放射性固废	放射性废水	放射性废气	β 表面污染	γ 射线辐射
^{99m} Tc	一次性注射器、手套、药棉、纱布、破损杯皿、服药杯、擦拭污染地面的物品等	沾有放射性核素的医疗器械、器皿的洗涤用水、辐射工作人员的洗涤用水以及注射药物病人的排泄物及其冲洗水	无	对操作台面、地面、墙壁、工作服、手套等可能造成的 β 表面污染	有
¹³¹ I			微量（负压通风柜）		有
¹⁸ F			无		有
¹¹ C			无		有
⁶⁸ Ga			无		有
¹³ N			无		有
⁸⁹ Sr		无	无		无
¹⁵³ Sm					有
¹⁷⁷ Lu					有
³² P					无
³² P	报废或退役的放射源	无	无	韧致辐射	
⁹⁰ Sr	报废或破损的 ¹²⁵ I 粒籽源	无	无	X 射线和 γ 射线。	
¹²⁵ I					
⁶⁸ Ge	退役校准源	无	无	γ 射线	
X 射线装置	无	无	无	X 射线、微量氮氧化物和臭氧	

9.3.2 放射性源强分析

1、γ-X 剂量率源强（计算过程详见 11.2 章节）

(1) 非密放射源污染源强

本项目核医学科 SPECT 使用 ^{99m}Tc 和 ¹³¹I 进行显像诊断，PET 使用 ¹⁸F、¹¹C、⁶⁸Ga 和 ¹³N 进行显像诊断，同时使用 ¹³¹I、¹⁵³Sm、⁸⁹Sr、¹⁷⁷Lu、³²P 进行核素治疗，其主要污染因子为 γ 射线。以服药病人视为裸点源，在距源

1m 处 γ 射线空气吸收剂量率详见表 9-2。

表 9-2 γ 射线空气吸收剂量率 ($\mu\text{Gy/h}$)

源项	核素	距离	1m
		活度	
甲亢治疗	^{131}I	7mCi	13.44
甲癌治疗	^{131}I	150mCi	288.1
SPECT 显像	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	10mCi	5.41
PET 显像	^{18}F	10mCi	49.76
PET 显像	^{68}Ga	10mCi	81.2
PET 显像	^{13}N	20mCi	101.3
骨转移癌治疗	^{153}Sm	3mCi	0.52
神经内分泌癌治疗	^{177}Lu	4mCi	0.31
PET 显像	^{11}C	10mCi	50.63

(2) ^{125}I 粒籽源植入

^{125}I 粒籽源使用过程中发射的射线为 X 射线和 γ 射线，粒籽源计划最大使用量为 $2.22 \times 10^9 \text{Bq}$ (60mCi)，在无任何屏蔽情况下，不考虑患者身体自身衰减，距离患者 1m 处 γ 辐射剂量 $36.68 \mu\text{Gy/h}$ 。

(3) ^{90}Sr 和 ^{32}P 敷贴治疗

^{90}Sr 和 ^{32}P 敷贴治疗过程中可能对环境产生的影响的为 β 射线产生的韧致辐射。在裸源状态下，距离 ^{90}Sr 和 ^{32}P 敷贴器 1m 处导致韧致辐射产生的 γ 辐射剂量率分别为 $0.025 \mu\text{Gy/h}$ 和 $2.8 \mu\text{Gy/h}$ 。

2、放射性废水

本项目核医学工作场所采用的湿布擦拭放射性药物倾洒或粒籽源破裂时所产生表面污染，擦拭后放入放射性废物衰变桶。 ^{89}Sr 、 ^{135}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 核素治疗患者以及 ^{90}Sr 、 ^{32}P 敷贴治疗患者接受治疗后，无异常可直接离开核医学工作场所，由于患者体内核素含量很少，患者的排泄物对环境可能产生的影响基本可以忽略，这些核素治疗过程中，正常情况下，废水产生量很小，可忽略。因此本项目产生的放射性废水环节主要包括 SPECT 和 PET 诊疗和 ^{131}I 甲癌治疗的患者呕吐物、排泄物、洗漱废水等。参照《建筑给水排水设计规范》(GB50015-2003)，门诊患者每人每次用水定额取 10L，甲癌住院患者每人每天用水定额取 200L。本项目 SPECT 和 PET 每年诊疗 6266 人次，甲癌治疗 78 人次，每人住院约 4 天，废水排污系数取 0.9，则本项目放射性

废水产生量约 $112.6\text{m}^3/\text{a}$ ，平均每月产生 $9.38\text{m}^3/\text{月}$ ，平均每天产生 $0.308\text{m}^3/\text{d}$ （以 365 天计）。

放射性废水主要含有的放射性核素为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{11}C 、 ^{13}N 混合废水，其中核素诊疗随人体排出的活度不超过使用量的 5%，用于甲癌治疗的 ^{131}I 核素随人体排出的活度为使用量的 90%，则本项目放射性废水中各核素排放情况详见表 9-3。

表 9-3 项目放射性废水各核素活度

序号	核素名称	半衰期	月最大用量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	每月未经衰变废水核素含量 (Bq)
1	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.02h	8.02×10^{10}	9.62×10^{11}	4.01×10^9
2	^{131}I	8.04d	3.61×10^{10}	4.33×10^{11}	3.25×10^{10}
			2.41×10^9	2.89×10^{10}	1.21×10^8
			5.61×10^9	6.73×10^{10}	2.81×10^8
3	^{18}F	109.7min	8.02×10^{10}	9.62×10^{11}	4.01×10^9
4	^{11}C	20min	8.02×10^9	9.62×10^{10}	4.01×10^8
5	^{68}Ga	68.3min	8.02×10^8	9.62×10^9	4.01×10^7
6	^{13}N	10min	3.21×10^{10}	3.85×10^{11}	1.61×10^9

3、放射性固废

放射性固体废弃物主要分为两类。第一类为失活的敷贴器、退役 ^{68}Ge 校准源、废旧 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器及完整或破损的 ^{125}I 粒籽源；第二类主要为注射器、针头、手套、药棉、纱布、破损杯皿、擦拭污染地面的物品、一次性杯子等。

根据本项目开展方案，SPECT ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 诊断每年为 2600 人次，PET (^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N) 诊断每年 3406 人次， ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 、 ^{131}I 诊断、 ^{131}I 甲亢、 ^{131}I 甲癌等核素治疗就诊人次分别为 130 人次/年、130 人次/年、13 人次/年、10 人次/年、260 人次/年、260 人次/年、78 人次/年，患者诊断过程放射性固废产生量约 $0.05\text{kg}/\text{人次}$ ，患者住院治疗过程放射性固废产生量约为 $0.1\text{kg}/\text{人} \cdot \text{天}$ ，经计算，SPECT 和 PET 诊断过程产生的放射性固废分别为 $130.0\text{kg}/\text{年}$ （约合 390L）和 $170.3\text{kg}/\text{年}$ （约合 511L）， ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 、 ^{131}I 诊断、 ^{131}I 甲亢、 ^{131}I 甲癌等核素治疗过程产生的放射性固废分别为 $6.5\text{kg}/\text{年}$ （约合 19.5L）、 $6.5\text{kg}/\text{年}$ （约合 19.5L）、 $0.7\text{kg}/\text{年}$ （约合 2.1L）、 $0.5\text{kg}/\text{年}$ （约合 1.5L）、 $13.0\text{kg}/\text{年}$ （约合 39L）、 $13.0\text{kg}/\text{年}$ （约合 39L）、 $31.2\text{kg}/$

年（约合93.6L），则本项目核医学工作场所放射性固废产生量为371.7kg/a。

根据类比其他医院核医学工作场所，核素应用过程中产生的固体废物核素量不超过使用量的1%，则放射性固废中各核素活度浓度详见表9-4。

表 9-4 项目放射性固废各核素活度浓度

序号	核素名称	半衰期	月最大用量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	固废量 kg/月	初始核素活度浓度 (Bq/g)
1	^{99m} Tc(诊断)	6.02h	8.02×10^{10}	9.62×10^{11}	25.0	3.21×10^4
2	¹⁸ F(诊断)	109.7min	8.02×10^{10}	9.62×10^{11}		3.21×10^4
3	¹¹ C(诊断)	20min	8.02×10^9	9.62×10^{10}		3.21×10^3
4	⁶⁸ Ga(诊断)	68.3min	8.02×10^7	9.62×10^8		3.21×10^1
5	¹³ N(诊断)	10min	3.21×10^{10}	3.85×10^{11}		1.28×10^4
6	¹⁷⁷ Lu(治疗)	6.70d	1.60×10^8	1.92×10^9	5.4	2.96×10^2
7	¹⁵³ Sm(治疗)	46.8h	1.20×10^9	1.44×10^{10}		2.22×10^3
8	¹³¹ I(诊断、甲亢、甲癌)	8.04d	4.42×10^{10}	5.30×10^{11}		8.19×10^4
9	⁸⁹ Sr(治疗)	50.5d	1.20×10^9	1.44×10^{10}	0.58	2.07×10^4
10	³² P(治疗)	14.3d	1.85×10^8	1.85×10^9		3.19×10^3

表 10 辐射安全与防护

10.1 工作场所分级

10.1.1 项目核工作场所布局

1、核医学科工作场所平面布局

项目核医学工作场所拟设置于医技楼（地上四层，地下一层）地上一层，东侧为放射介入科，南侧为放疗中心，西侧为地下车库出入口及医院污水处理站（地下），北侧为医院急诊部，上方为实践技能培训中心，下方为太平间和垃圾用房。衰变池位于核医学科西侧，地下设置，地面上均为医院内部绿化。

核医学科工作用房包括分装注射室、SPECT-CT 注射后候诊区、SPECT-CT 机房（粒籽植入）、给药室、核素治疗室、抢救治疗室、废料间、储源室、PET-MR 注射后候诊区、PET-MR 机房等。其中核素治疗室作为甲癌病房，分为 2 间，北侧为单人间，南侧为双人间，设 3 个专用卫生间。双人间和单人间有隔断，通过 120mm 实心砖墙分隔开来。

核医学科设有工作人员通道、患者通道、药物通道和污物通道。无药患者从核医学科东侧大门进入核医学科接诊大厅，在接诊台接受咨询后进入患者通道，医护人员由办公室进入核医学科工作人员通道。具体路径详见附图 5。

（1）工作人员路径

① PET 和 ^{131}I 治疗工作人员由核医学科东侧工作人员通道进入工作场所；

② 药物分装和注射工作人员由核医学科西侧通道经洗衣房和消毒间进入分装注射室，工作完毕再由原路返回。

③ SPECT 工作人员在工作人员通道更衣室更衣后，由东侧的患者入口经导诊台进入工作场所，工作完毕原路返回。

（2）患者路径

a、SPECT-CT 就诊患者经核医学科东侧患者入口进入走廊，进入注射室进行药物注射，然后进入 SPECT-CT 注射后候诊区候诊，然后进入 SPECT-CT 机房进行检查，检查完成后由北侧患者出口。

b、PET-MR 就诊患者经核医学东侧患者入口进入走廊，进入注射室进

行药物注射，然后进入 PET-MR 注射后候诊区候诊，然后进入 PET-MR 机房进行检查，检查完成后由西侧患者出口离开。

c、 ^{131}I 患者经东侧患者入口进入导诊台，甲亢患者在甲功室检测后，进入给药室进行口服药物，然后甲亢患者进入对面病房休息，服药者观察无异常后，由西侧患者出口离开。甲癌患者则直接进入给药室对面的核素治疗室留院观察。

d、进行 ^{125}I 粒籽植入的患者，由患者通道进入走廊，然后进入 SPECT-CT 机房进行粒籽源植入手术，手术完成后从北侧患者出口离开，植入患者在穿 0.25mm 铅衣情况下，由专人引导进入医院综合楼的专用病房。

e、使用 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 的患者由东侧患者入口进入核医学科走廊，进入注射室进行药物注射，注射完后短暂停留后由北侧患者出口离开核医学科。

f、敷贴治疗患者从核医学科东侧患者通道进入，直接进入敷贴室进行治疗，治疗结束后由原路离开核医学科。

(3) 药物通道

药物通过核医学科东侧患者入口进入分装注射室。放射源通过核医学科东侧患者入口经 SPECT-CT 注射后候诊区进入储源室保存。

(4) 污物通道

分装、注射污物通过传物窗进入废料间，在废料间暂存达到清洁解控水平后从核医学北侧患者出口运出。核素治疗室和给药室污物由患者通道经 SPECT 候诊室运至废料间，建议在下班时间进行污物的清理工作，避免影响就诊患者。

根据核医学科平面布局和医患人员路径分析，SPECT 工作人员和甲亢就诊患者路径存在交叉；另外敷贴室设置在核医学科内部，敷贴治疗属于密封源工作场所，设置在非密封源工作场所内部不合理。针对以上不合理地方本次评价提出以下调整建议：

① 建议将敷贴室调整至核医学科导诊区甲功室东侧的诊室；

② 为避免 SPECT 工作人员和甲亢就诊患者路径交叉，建议将甲功室门调整至南侧，并在 SPECT 工作人员进入操作间过道设置更衣间。

③建议放射性核素高活操作工作场所设置专用清污间。

2、通风设计

项目核医学单元拟设置独立的排风系统，各工作用房排风口及送风口均拟设置于顶棚上方，采用专门管道抽吸至楼顶排风。

根据医院提供的通风设计，本项目核医学科通风分设两组排风系统。一组通风系统包括核素治疗室、分装注射室，最终汇集后由核医学科西北角沿墙面引至楼顶排放，通风次数为 6~10 次/h。分装注射室设通风橱，防护当量为 15mmPb，通风橱通风通过支管与排风总管连接；另一组通风系统包括医生办公室、给药室、抢救治疗室、PET-MR 机房、PET-MR 注射后候诊区、SPECT-CT 注射后候诊区、SPECT-CT 机房，最后在 SPECT-CT 机房东侧排烟井汇集后引至屋顶排放，通风次数为 2~4 次/h。核医学科排风气流走向由低活区流向高活区，废气经活性炭吸附后排放，排气口设置在医技楼顶楼，并高出屋脊 3m。具体通风气流走向详见附图 7。

3、X 射线装置工作单元平面布局

DSA 机房位于介入放射科东侧中部，DSA 机房东侧为污物通道，西侧为洁净通道，南侧和北侧为预留机房。楼上为检验科等工作用房，楼下为发放厅等后勤用房。

数字胃肠机房东侧为员工通道，南侧为厕所和预留机房，西侧为病人通道，北侧为其控制室，受检者防护门拟设置于机房西墙，工作人员防护门和观察窗拟设置于机房和其控制室之间隔墙，主射线拟朝向地坪和西墙。

DR 机房 1 和 DR 机房 2 共用一控制室，自南向北依次为排烟机房、DR 机房 2、共用控制室、DR 机房 1、值班室，两机房西侧均为员工通道，东侧均为病人通道，两机房受检者防护门拟设置于机房东墙，工作人员防护门和观察窗拟设置于机房和共用控制室之间隔墙，主射线均拟朝向地坪和东墙。

CT 机房 1 和 CT 机房 2 东侧均为员工通道，西侧均为病人通道，CT 机房 1 南侧为其控制室，北侧为 VIP 接待室；CT 机房 2 南侧为更衣室和厕所，北侧为其控制室；两机房受检者防护门拟设置于机房西墙，工作人员防护门和观察窗拟设置于机房和其控制室之间隔墙。

项目 DSA 机房和其他 III 类射线机房拟采取中央空调新风系统进行动力

排风，通风设计符合《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GZB130-2013）相关要求。

本项目核医学科和放射介入科平布局图详见附图 5 和附图 6。

10.1.2 工作场所管理

1、分级

①根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），日等效最大操作量计算公式为：日等效最大操作量=日最大操作量×毒性组别修正因子/操作方式修正因子；本项目放射性核素可在同一天使用，则工作场所日等效最大操作量为 $6.80 \times 10^8 \text{Bq}$ ，根据 GB18871-2002 非密封源工作场所的分级原则，本项目属于乙级非密封源工作场所。

表 10-1 非密封源工作场所分级表

核素	计划最大日操作活度 (Bq)	毒性权重因子	操作性质修正因子	日等效最大操作量 (Bq)	工作场所日等效最大操作量 (Bq)	场所分类
^{99m}Tc	3.70×10^9	0.01	100	3.70×10^5	6.80×10^8	乙级
^{99m}Tc	3.70×10^9	0.01	10	3.70×10^6		
^{131}I	5.92×10^9	0.1	1	5.92×10^8		
^{18}F	3.70×10^9	0.01	10	3.70×10^6		
^{11}C	3.70×10^8	0.01	1	3.70×10^6		
^{68}Ga	3.70×10^8	0.01	1	3.70×10^6		
^{13}N	1.48×10^9	0.01	1	1.48×10^7		
^{125}I	2.22×10^9	0.1	100	2.22×10^6		
^{153}Sm	1.11×10^8	0.1	1	1.11×10^7		
^{177}Lu	1.48×10^8	0.1	1	1.48×10^7		
^{89}Sr	1.11×10^8	0.1	1	1.11×10^7		
^{32}P	1.85×10^8	0.1	1	1.85×10^7		

②根据《临床核医学放射卫生防护标准》（GBZ 120-2006），日最大加权活度计算公式为：加权活度=日最大操作活度×毒性权重因子/操作性质修正因子，计算结果见表 10-2。

表 10-2 放射性药物日最大加权活度计算表

工作场所	核素	计划最大日操作活度 (Bq)	毒性权重因子	操作性质修正因子	加权活度 (Bq)	总加权活度 (Bq)	场所分类
SPECT-CT 机房	^{99m}Tc	3.70×10^9	1	10	3.70×10^8	3.11×10^{11}	I
	^{131}I	1.11×10^8	100	10	1.11×10^9		

	^{125}I	2.22×10^9	100	1	2.96×10^{11}		
PET-MR 机房	^{18}F	3.70×10^9	1	10	3.70×10^8	5.92×10^8	II
	^{11}C	3.70×10^8	1	10	3.70×10^7		
	^{68}Ga	3.70×10^8	1	10	3.70×10^7		
	^{13}N	1.48×10^9	1	10	1.48×10^8		
分装注射 室	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	3.70×10^9	1	1	3.70×10^9	4.90×10^{10}	II
	^{153}Sm	1.11×10^8	100	1	1.11×10^{10}		
	^{89}Sr	1.11×10^8	100	1	1.11×10^{10}		
	^{32}P	1.85×10^8	100	1	1.85×10^{10}		
	^{18}F	3.70×10^9	1	1	3.70×10^9		
	^{11}C	3.70×10^8	1	1	3.70×10^8		
	^{68}Ga	3.70×10^8	1	1	3.70×10^8		
给药室	^{13}N	1.48×10^9	1	10	1.48×10^8	5.81×10^{11}	I
	^{131}I	5.81×10^9	100	1	5.81×10^{11}		

根据 GBZ120-2006 临床核医学工作场所分类，本项目核医学工作场所给药室和 SPECT-CT 机房属于 I 类工作场所，分装注射室和 PET 机房属于 II 类工作场所。

2、分区

根据《放射源分类办法》（国家环境保护局公告第 62 号），安全管理参照 II 类放射源。本医院核医学工作场所及介入放射科划分为“控制区”和“监督区”两区管理，具体见附图 4 和附图 5。

（1）核医学科

控制区：SPECT-CT 机房、SPECT-CT 注射后诊区、分装注射室、给药室、PET-MR 机房、PET-MR 注射后候诊区、敷贴室、核素治疗室、抢救治疗室、专用卫生间等划为控制区，控制区防护及管理措施如下：

①非有关工作人员严禁入内，不允许服药的患者随便出入，除特别需要外不允许亲友陪护。

②在控制区入口及其他适当位置处设置电离辐射警告标志，并应给出相应的辐射水平和污染水平的指示。

③工作场所严格按照 GB18871-2002 附录 B 中“表 B11 表面放射性物质污染控制水平”的有关规定执行。

④及时清理放射性固废，患者痰液、呕吐物入病人专用厕所排入衰变池。

监督区：SPECT 和 PET 操作室、走廊及控制区四周墙外人员可到达的区域等

划为监督区，监督区防护及管理措施如下：

- ①其他无关公众人员严禁入内。
- ②监督区与控制区分隔处设置防护门，将控制区与监督区分开。
- ③在监督区入口处设立表明监督区的标牌。

(2) X射线装置单元

控制区：包括 1 间 DSA 机房、2 间 CT 机房、2 间 DR 机房及 1 间数字肠胃机房。

监督区：各机房相关控制室、各机房防护门、墙体、顶盖等外侧部位。

控制区入口设置电离辐射警告标志，禁止非有关工作人员不得入内，不允许就诊患者随便出入；监督区入口张贴监督区标牌，禁止无关公众人员进入。

表 10-3 项目控制区和监督区的划分情况

序号	场所名称	控制区	监督区
1	核医学科工作场所	SPECT-CT机房、SPECT-CT注射后诊区、分装注射室、给药室、抢救治疗室、PET-MR机房、PET-MR注射后候诊区、核素治疗室、抢救治疗室、专用卫生间、敷贴室	SPECT-CT和PET-MR操作室、走廊及控制区四周墙外人员可到达的区域
2	放射介入科工作场所	1间DSA机房、2间CT机房、2间DR机房及1间数字肠胃机机房	各机房相关控制室、各机房防护门、墙体、顶盖等外侧部位

10.2 工作场所防护屏蔽设计

10.2.1 核医学工作场所

本项目核医学工作场所包括 SPECT-CT 机房及注射后候诊区、PET-MR 机房及注射后候诊区、分装注射室、核素治疗室、给药室、储源室、废料间、抢救治疗室、敷贴室等，其屏蔽设计设计参数详见表 10-4。

10-4 核医学工作场所屏蔽设计参数

核医学科工作场所	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
SPECT-CT 机房	东墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	西墙	200mm 混凝土+2mm 铅板
	南墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	北墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	顶盖	170mm 混凝土+2mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+6cm 硫酸钡水泥
	防护门	钢+6mm 铅板

SPECT-CT 注射 后候诊区	东墙	200mm 混凝土
	西墙	120mm 红砖墙+3mm 铅板
	南墙	200mm 混凝土
	北墙	200mm 混凝土
	顶盖	170mm 混凝土
	地坪	180mm 混凝土
	防护门	钢+3mm 铅板
	铅屏风	10mm 铅板
PET-MR 机房	东墙	240mm 红砖墙+6mm 铅板
	西墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	南墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	北墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	顶盖	170mm 混凝土+2mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+6cm 硫酸钡水泥
	防护门	钢+6mm 铅板
PET-MR 注射后 候诊区	东墙	200mm 混凝土
	西墙	200mm 混凝土
	南墙	200mm 混凝土
	北墙	200mm 混凝土
	顶盖	170mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+3cm 硫酸钡水泥
	防护门	钢+3mm 铅板
	铅屏风	10mm 铅板
分装注射室	四周墙壁	120mm 红砖+16mm 铅板
	防护门	钢+16mm 铅板
	顶盖	170mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+6cm 硫酸钡水泥
	注射窗	50mmPb (铅+铅玻璃)
	通风橱	15mmPb 当量
核素治疗室 ^① (甲癌病房)	东墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	西墙	200mm 加气块+6mm 铅板
	南墙	200mm 加气块+12mm 铅板
	北墙	240mm 红砖+12mm 铅板
	防护门	钢+6mm 铅板
	顶盖	180mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+3cm 硫酸钡水泥
给药室	东墙	200mm 加气块+5mm 铅板
	西墙	200mm 加气块+5mm 铅板
	南墙	100mm 钢龙骨隔断+5mm 铅板
	北墙	240mm 红砖墙+5mm 铅板

	防护门	钢+5mm 铅板
	顶盖	170mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+3mmPb 硫酸钡水泥
储源室	东墙	120mm 红砖墙+8mm 铅板
	西墙	200mm 混凝土+8mm 铅板
	南墙	120mm 红砖墙+8mm 铅板
	北墙	200mm 混凝土+8mm 铅板
	防护门	钢+8mm 铅板
	顶盖	170mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+6cm 硫酸钡水泥
废料间	东墙	120mm 红砖墙+3mm 铅板
	西墙	200mm 混凝土+2mm 铅板
	南墙	120mm 红砖墙+3mm 铅板
	北墙	120mm 红砖墙+3mm 铅板
	防护门	钢+3mm 铅板
	顶盖	170mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+3mmPb 硫酸钡水泥
抢救治疗室	东墙	200mm 加气块+5mm 铅板
	西墙	200mm 加气块+5mm 铅板
	南墙	100mm 钢龙骨隔断+5mm 铅板
	北墙	240mm 红砖墙+5mm 铅板
	防护门	钢+5mm 铅板
	顶盖	170mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+3mmPb 硫酸钡水泥
敷贴室	东墙	16mm 铅板
	西墙	16mm 铅板
	南墙	16mm 铅板
	北墙	16mm 铅板
	顶棚	170mm 混凝土+3mm 铅板
	地坪	180mm 混凝土+6cm 硫酸钡水泥

注：①核素治疗室中间采用 120mm 实心砖墙隔断，分为北侧单人间和南侧双人间。

10.2.2 DSA 机房

DSA 手术室采用实体屏蔽，面积为 73m²，高 3m，容积为 219m³。DSA 手术室屏蔽参数见表 10-5。

DSA 手术室电缆线及穿墙管道各管道设在本层吊顶、地沟内，穿越墙体均为“U”形，DSA 手术室采用空调通风。

表 10-5 DSA 手术室屏蔽参数

	材料及规格	折合铅当量
东墙	240mm 实心砖土+2mmPb 铅复合板	4mmPb 当量
西墙	240mm 实心砖土+2mmPb 铅复合板	4mmPb 当量
南墙	240mm 实心砖土+2mmPb 铅复合板	4mmPb 当量
北墙	240mm 实心砖土+2mmPb 铅复合板	4mmPb 当量
室顶及楼板	120mm 混凝土+2mm 铅板	3.1mmPb 当量
地坪	120mm 混凝土+800mm 土层+250mm 混凝土	4.6mmPb 当量
防护门（3 扇）	内衬 3mm 铅板	3.0mmPb 当量
控制室观察窗	20mm 铅玻璃	4.0mmPb 当量

注：屏蔽铅当量折算依据依据 GBZ130-2013 附录 D。

10.2.3 III类射线装置机房

本项目III类射线装置包括 1 台 SPECT-CT 机、2 台 CT 机、2 台 DR 和 1 台数字肠胃机，射线装置工作用房设计使用面积和屏蔽设计参数详见表 10-6 和表 10-7。

表 10-6 各放射工作场所设计使用面积与评价一览表

单元	场所类型	机房设计使用面积	标准要求	评价
X 射线影像诊断单元	CT 机房 1	57.3 m ² (7.57m×7.57m)	机房内最小有效使用面积 30m ² ,机房内最小单边长度 4.5m	符合
	CT 机房 2	57.1 m ² (7.56m×7.56m)		符合
	数字胃肠机房	26.7m ² (4.65m ×5.76m)	机房内最小有效使用面积 20m ² ,机房内最小单边长度 3.5m	符合
	DR 机房 1	26.4 m ² (4.6m× 5.76m)		符合
	DR 机房 2	31.4 m ² (5.46m× 5.76m)		符合
核医学科	SPECT-CT 机房	60.84m ² (7.8m×7.8m)	机房内最小有效使用面积 30m ² ,机房内最小单边长度 4.5m	符合

表 10-7 X 射线影像诊断单元各机房屏蔽防护参数

机房名称	屏蔽体	屏蔽设计材料及厚度（折合铅当量 mmPb）
CT 机房 1、CT 机房 2	四侧墙体	240mm 实心粘土砖+2mmPb 铅复合板（4.0）
	地坪	120mm 砣（找平层）+800mm 土层（夹层）+250mm 混凝土（楼板）（4.6）
	顶棚	120mm 混凝土+2mm 铅板（3.5）
	观察窗	20mm 铅玻璃（4.0）
	防护门（2 扇）	内衬 3mm 铅板（3.0）
数字胃肠	西墙	240mm 实心粘土砖+2mmPb 铅复合板（4.0）

机房	其余三侧墙体	240mm 实心粘土砖+2mmPb 铅复合板 (4.0)
	地坪	120mm 混凝土 (找平层)+800mm 土层 (夹层)+250mm 混凝土 (楼板) (4.6)
	顶棚	120mm 混凝土+2mm 铅板 (3.1)
	观察窗	20mm 铅玻璃 (4.0)
	工作人员防护门	内衬 2mm 铅板 (2.0)
	受检者防护门	内衬 3mm 铅板 (3.0)
DR 机房 1、DR 机 房 2	东墙	240mm 实心粘土砖+2mmPb 铅复合板 (4.0)
	其余三侧墙体	240mm 实心粘土砖+2mmPb 铅复合板 (4.0)
	地坪	120mm 混凝土 (找平层)+800mm 土层 (夹层)+250mm 混凝土 (楼板) (4.6)
	顶棚	120mm 混凝土+2mm 铅板 (3.1)
	观察窗	20mm 铅玻璃 (4.0)
	工作人员防护门	内衬 2mm 铅板 (2.0)
	受检者防护门	内衬 3mm 铅板 (3.0)
SPECT-CT	详见表 10-4	

注：屏蔽铅当量折算依据依据 GBZ130-2013 附录 D。

由上表可知，本项目 III 类 X 射线装置机房有效使用面积和屏蔽防护设计均满足《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013) 相关要求。

10.3 污染防治措施

10.3.1 核医学科污染防治措施

(一) 工作场所区分

根据医院提供的设计资料，本项目的核医学工作场所位于医技楼一层西侧，工作场所是个相对独立的诊疗环境，有病人专用的进口与出口，有利于工作场所的“两区”划分。

(二) 工作场所屏蔽体设计

医院的核医学科给药室和 SPECT-CT 机房应按《临床核医学放射卫生防护标准》(GBZ120-2006) 中 I 类工作场所的标准来进行设计施工，四周墙壁、顶棚及地坪均设计有辐射防护与屏蔽，地面均须铺设塑料地坪，墙面、地面间各交角应圆弧形处理，地坪应采用不起壳、易清洗、耐腐蚀的环氧树脂自留平面层。地面平整光滑无接缝，易于清洗不渗漏，有利于表面污染防治。PET-MR 机房区和分装注射室应按《临床核医学放射卫生防护标准》(GBZ120-2006) 中 II 类工作场所的标准来进行设计施工，地面应易清洗且不易渗透，表面应平整光滑易清洗。

本项目核医学科各工作场所屏蔽设计详见表 10-4。

(三) 放射性废物处理

(1) 放射性废水

①医院拟设置4个衰变池和1个排放池，每个衰变池容积为 26m^3 ，排放池容积为 16m^3 ，衰变池 104m^3 ，四个衰变池采用连续式串联自溢流设计，1号衰变池从底部进水，从上部溢流到2号衰变池，以此类推。衰变池为密闭结构，通过进水自流水压将衰变池中废水从底部压至第二个衰变池，底部出水口设置有回水止水阀，防止废水回流，单个衰变池内采用“对角线”进出口，可以对放射性废水进行充分衰变，经衰变的废水排入医院污水处理总站进一步处理。废水中废渣同衰变后的废水一并进入医院污水处理总站的化粪池沉淀处理后排放，平均每半年需对衰变池中沉淀物进行冲洗。

②衰变池需进行防腐防渗处理。衰变池采用浇灌防渗处理，池底和池壁为混凝土结构，并做了防渗处理，池体上加盖，形成密闭空间，并且医院埋设了专门放射性废水管道，并做了防渗措施。

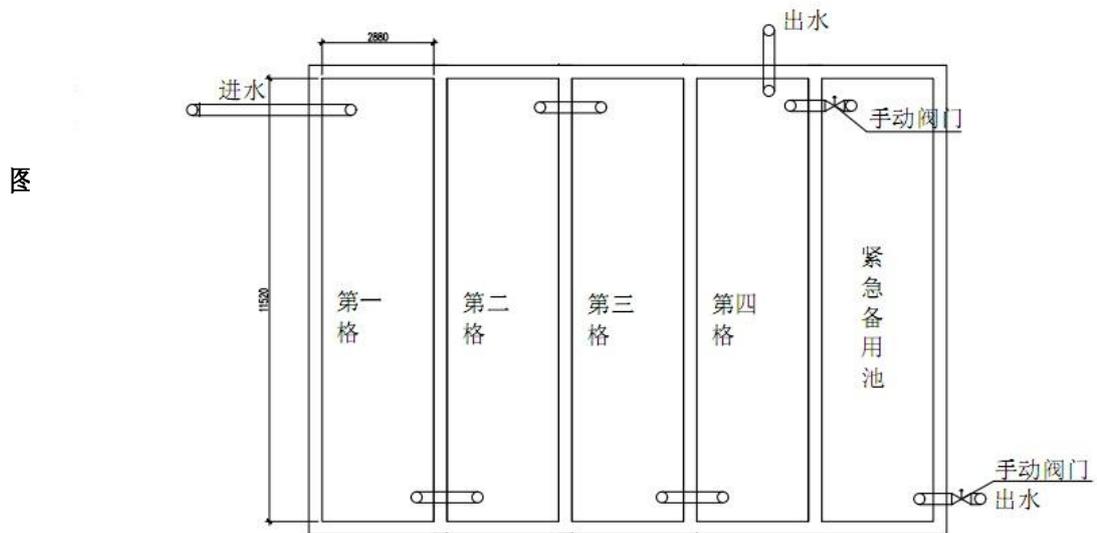


图 10-1 连续式衰变池平面示意图

③放射性废水排放须定期对池水取样检测，确认池中废水放射性活度，并做好排放记录。

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

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

(2) 放射性固体废物

核医学科相关工作场所的放射性固体废弃物收集在专用污物桶内，再将污物桶内的固体废弃物连同垃圾袋存放到废料间的衰变箱内，集中收储10个半衰期以上后监测达到要求再与医院的其他固体废物一起作为普通的医疗垃圾处理。用来收集放射性固体废弃物的专用污物桶须贴上电离辐射标志，并把受不同核素污染的固体废物分开收储，每次收集时收集袋表面应贴上标签，标明物品及最后一天的收集时间。同时放射性废料间应采取双人双锁的管理制度。

丧失活度的敷贴器、废旧 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器、完整或破损的 ^{125}I 粒籽源置于铅罐中，暂存于废料间，定期由供源厂家回收。如因故供源厂家不能回收时，可按照《城市放射性废物管理办法》规定，将放射源送有资质单位处置。

(三) ^{125}I 粒籽植入治疗项目拟采取的污染防治措施

(1)生产厂商根据医院订购合同，按时定量将 ^{125}I 粒籽直接送达至储源室暂存，存放于屏蔽容器内。每天工作结束后，如有报废的粒籽源，放置到屏蔽容器中暂存于核医学科废料间，由厂家负责回收处置。CT机房不进行 ^{125}I 粒籽存储。

(2)应配备测量粒籽源活度的活度计及探测光子能量下限低于 20keV 的辐射防护监测仪。

(3)当容器密闭时，容器表面的辐射水平应低于 $20\mu\text{Sv/h}$ 。粒籽源贮存的容器前应使用铅块屏蔽，并在屏蔽铅块前放置防护铅屏风，屏风上方应有适当厚度的铅玻璃。操作人员应站在屏风后实施操作。

(4)操作前要穿戴好防护用品。主要操作人员应穿铅防护衣，戴铅手套、铅玻璃眼镜和铅围脖等。防护衣厚度不应小于 0.25mm 铅当量。对性腺敏感器官，可考虑再穿含 0.5mm 铅当量防护的三角裤或三角巾。

(5)开展 ^{125}I 粒籽植入治疗项目后，应当利用辐射检测仪器，在每次手术后，增加相关手术室的巡测工作，避免手术失败，从而发生脱落现象，产生环境污染。

(6)如粒籽源破损引起泄漏而发生污染，应封闭工作场所，将源密封

在一个容器中，控制人员走动，以避免放射性污染扩散，并进行场所和人员去污。

(7) 住院病人植入粒籽源术后的患者，在植入部位应穿戴 0.25mm 铅当量的铅背心、围脖和腹带。

(8) 植入粒籽源的病人床边 1.5m 处或单人病房应划为临时控制区。控制区入口处应有电离辐射警示标志，除医护人员外，其他无关人员不得入内。

(9) 医院应在病房做好告知工作，病人在接受治疗期间，对家庭和亲属成员的剂量约束值应控制在 5mSv 以下，对怀孕妇女和儿童的剂量约束值应控制在 1mSv 以下。

(10) 治疗期间房间不做清扫，除食物盘外，房内任何物品不得带出房间。任何物品在撤离病房前应进行监测。

(11) 本项目粒籽植入专用病房内须设专用浴室及厕所；对前列腺植入粒籽病人，要求带两周避孕套，以防止粒籽源随精液排出而丢失。为防止随尿液排出，在植入两周内，对尿液使用 4cm×4cm 药用纱布过滤，如果患者出现植入粒籽源流失到膀胱或尿道，用膀胱内镜收回粒籽源放入铅罐中贮存。

(12) 当发现患者体外有粒籽源时，不应用手拿，应用勺子或镊子取夹粒籽源，放在预先准备好的铅容器内。

(13) 放射治疗医师应对患者家属及陪护进行事前培训，告知辐射防护相关事宜。

(14) 出院病人的管理

① 植入粒籽源出院患者应建立登记制度，信息卡内容包括：患者姓名、住址、电话、年龄、身份证、植入部位、医院及电话、植入粒籽源个数、陪护者或探视者姓名、植入时间、出院粒籽源数量、检查日期等。

② 植入粒籽源的患者出院时，医生应给患者佩带一张信息卡，其内容应包括患者姓名，出生年月、照片，植入粒籽源的位置，时间，活度，个数以及治疗医院电话等。

(15) 遗体的处理

① 如果住院患者死亡，体内存留总活度大于 4000MBq 时，治疗医师应

从患者治疗部位取出粒籽源，并监测患者遗体和房间。在清点粒籽源前，不准移走任何纱布和绷带。

②火葬工人处理遗体时，应采取相应措施，戴手套和防护面具等。

③粒籽源植入后 12 个月以上死亡的患者可以直接火化。植入后 12 个月内死亡的患者，总活度大于 4000 MBq 时，应从尸体中切除粒籽源植入的器官，或从尸体中取出粒籽源，并将它保存至从植入后算起至少一年；若粒籽源总活度小于 4000MBq 时可以直接火化。

④尸体火化时，应用高温或炉腔高大的焚尸炉，减少空气中的放射性污染。若使用低温或炉腔低小的焚尸炉，对患者骨灰中残留的放射性物质需要屏蔽或特殊处理。火化后遗物不能散落在环境中。

⑤ ^{125}I 粒籽源植入后经 10 个半衰期或火化后的骨灰活度小于 10^6Bq ，方可将骨灰运输。

（四）敷贴治疗安全措施

敷贴器平常放置于贮源箱内，贮源箱内层为铝或有机玻璃等低原子序数材料，厚度大于 β 辐射在材料中的最大射程，贮源箱置于储源室保存。

敷贴室设置安全警示标志。敷贴室四周墙体采用 16mm 铅板作为屏蔽材料，建议调整至甲功室东侧的诊室四周墙体采用 200mm 加气块作为屏蔽材料，均可以满足放射防护原则的要求，且房间面积均大于 10m^2 。

敷贴治疗中，辐射工作人员应采取有效的个人防护措施，如戴有机玻璃眼镜或面罩，尽量使用远距离操作工具。

（五）个人防护用品

本项目核医学科工作场所个人防护用品配置情况详见表 10-8。

表 10-8 核医学科工作场所个人防护用品配置表

场所类型	工作人员		患者和受检者		陪检者
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品
核医学科	表面污染监测仪 1 个；铅防护衣、铅防护眼镜、铅橡胶围脖、铅橡胶帽子、个人剂量报警仪、工作服、工作帽、工作鞋、手套、口罩每位核医学工作人员 1 套。	注射药物防护窗 2 块、铅污物桶、手提铅盒若干	铅防护衣、铅橡胶帽子、铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼	—	铅防护衣、铅橡胶帽子、铅橡胶颈套、铅防护眼镜各 2 件

镜各 2 件

注：防护用品和辅助防护设施的铅当量应不低于0.25mmPb，儿童防护用品和辅助防护设施的铅当量应不低于0.5mmPb。

（六）其他防护措施

（1）存放放射性物品的储源室、废料间等应安装防盗门和防盗报警装置，有专人负责看管，确保放射性物质的安全。储源室内设有保险柜，设置双人双锁、监控等防盗措施，对放射性药物及粒籽源登记建档，定期巡检。

（2）核医学科放射性工作场所应设置电离辐射警告标志，并设置工作警示灯。

（3）在放射性工作场所不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物品。

（4）工作人员操作后离开放射性工作室前应洗手和进行表面污染监测，如其污染水平超过GB18871规定值，应采取相应的去污措施。

（5）设置告示牌，告示病人家属SPECT、PET等候诊室不能进入进行陪护。

（6）用药后患者床边1.5m处或单人病房应划为临时控制区。控制区入口处应有GB18871规定的电离辐射警告标志，并设置工作警示灯；除医务人员外，其他无关人员不得入内，患者也不应随便离开该区。

（7）接受放射性药物诊断和治疗的患者应使用医院设置的专用卫生间。

（8）医院核医学工作场所设置独立的排风系统，在SPECT-CT机房、SPECT-CT注射后候诊区、分装注射室、PET-MR机房、PET-MR注射后候诊区、核素治疗室、给药室等均拟设置排风口，风向拟由低活性区流向高活性区，总排风口拟设置在医技楼屋顶上方，符合标准要求。

分装注射室设置通风橱，放射性药物的分装、取药等可能存在洒出污染危险，通常都在负压通风橱内操作，以免造成食入、吸入等内照射影响。通风橱为不锈钢外壳，正面为铅玻璃作为防护，侧面和后面铅钢复合板作为防护，防护能力不低于15mmPb，通风橱排放管道接入核医学科通风总管，配备有活性炭过滤装置，通风橱管道风速不低于1.0m/s，排气口应高于医技楼楼顶3m。

10.3.2 密封放射源

根据医院所提供的设计图，可知放射源将设置专用的储源室，位于核医学科的中部的北侧，其东面为SPECT-CT注射后候诊区，南侧为废料间，西侧为预留用房，北侧为地下车库出入口。医院前期已配备了存放放射性药品的保险箱。贮存场所需设置电离辐射警告标志，并采取“防火、防水、防盗、防丢失、防破坏、防射线泄漏”等的安全措施，并在管理上做双人双锁。

PET配套的5枚⁶⁸Ge密封源平常置于铅罐中，存储于储源室的保险柜中，并且实行双人双锁制度管理，密封放射源需要使用时，由专职人员进行登记出入库。正常运行时将放置于PET-CT的机头内，PET-CT室安装有监控器，且24小时均有专门的值班人员负责。

10.3.3 射线装置

(1) 各射线装置屏蔽防护能力基本能满足辐射环境保护的要求。

(2) 医院需在所有操作室上张贴相应的操作规程。

(3) 医院配备有符合防护要求的个人防护和辅助防护用品，具体个人防护和辅助防护用品配置情况如下：

表10-9 放射介入科工作场所个人防护用品一览表

场所类型	工作人员		患者和受检者		陪检者
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品
DSA 机房	每名工作人员配铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜各1件	铅悬挂防护屏、铅防护帘、床侧防护帘、床侧防护屏各1件	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、阴影屏蔽器具各1件	——	——
CT 机房 1、CT 机房 2、DR 机房 1、DR 机房 2、数字胃肠机房	——	——	每个机房铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子各1件	——	每个机房铅防护衣各1件

注：防护用品和辅助防护设施的铅当量应不低于0.25mmPb，儿童防护用品和辅助防护设施的铅当量应不低于0.5mmPb。

(4) 所有射线装置机房均需设置工作指示灯，机房门外均需张贴电离辐射警告标志及其中文警示说明。

(5) 各机房门口均应设置1m警戒线，告知公众成员在警戒线外等待。

(6) 射线装置运行过程中，X 射线与空气作用会产生少量臭氧、氮氧化物等有害气体，机房应设置动力排风装置，并保持良好的通风。

本项目总投资约 6000 万元，预计环保投资约 600 万元，占总投资额的 10%。

表 10-10 环保投资一览表 单位：万元

项目	环保及安全管理措施名称	内容	环保投资	
辐射安全管理机构	设立辐射安全管理机构	已成立防护安全管理小组，并制定专人专职负责辐射安全与环境保护管理工作	/	
辐射安全和防护措施	屏蔽措施	核医学科和放射介入科等工作用房屏蔽设计详见表 10-4~表 10-7	430	
	安全措施	连锁装置、保险柜、监控设施、警示标志、工作指示灯	50	
	防护用品	核医学科工作人员配置铅衣、铅眼镜、铅围脖、铅帽、铅围裙等个人防护用品；放射介入科工作人员配置铅围裙、铅围脖、铅帽、铅眼镜等；配置铅防护帘、铅防护屏等，性腺防护用品等、铅防护衣等	10	
	放射性废物处理		医院拟设置 4 个衰变池和 1 个应急池，每个衰变池容积为 26m ³ 。衰变池及污水管线防腐防渗处理	30
			设置放射性污物桶及废料间，放射性固体废物经分类收集并自然衰变 10 个半衰期，经检测满足排放标准后作为医疗废物处置。	10
			分装注射室设置通风橱，核素均在通风橱内操作，通风橱风速不低于 1.0m/s，并设置活性炭过滤装置，其他工作场所和射线机房均设置排风系统。	30
人员配备	辐射防护与安全培训和考核	辐射工作人员均应参加辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训，并在通过考核后方可从事相关工作	10	
	个人剂量监测和职业健康监护	辐射工作人员应定期健康检查，定期进行个人剂量监测，医院建立个人职业健康监护档案盒个人剂量档案	5	
监测仪器和防护用品		核医学科至少配置 1 台表面污染监测仪，放射科每个射线装置机房至少配置 1 台个人剂量报警仪， ¹²⁵ I 籽源植入场所应配备测量籽源活度的活度计及探测光子能量下限低于 20keV 的辐射防护监测仪。每个辐射工作人员均配备个人剂量计。	20	
辐射安全管理制度		结合项目实际情况，制定和完善操作规程、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、台账管理制度、监测方案和辐射事故应急措施	5	
合计			600	

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

项目在建设过程中，未使用放射性同位素，故不会对周围环境造成电离辐射影响。放射性同位素的用量根据实际需求由供货单位提供，并由供货单位承担运输等安全责任。因此提供放射性同位素的过程中不会对本院辐射工作人员产生辐射影响。医院配备的DSA、CT机、DR机和数字肠胃机等医疗设备只有在开机曝光过程中才会产生辐射，其生产的射线是随机器的开、关而产生和消失的。因此在建设期未通电运行，故不会对周围环境造成电离辐射影响，也无放射性废气、废水及固体废弃物产生。

此外，医院院区已建成投产，故本项目不涉及大型土建施工。

11.2 运行阶段对环境的影响

11.2.1 放射性核素应用环境影响分析

11.2.1.1 计算公式

辐射剂量率估算公式为：

$$D=0.873K^{-1}\Gamma A/R^2 \dots\dots\dots \text{(式 11-1)}$$

- 式中：D γ 剂量率， 10^{-2}Gy/h ；
- A 放射源的预期最大放射性活度，Ci；
- Γ 照射率常数， $\text{R}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}$
- R 距放射源的距离，m；
- K 衰减倍数，无量纲；
- 0.873 转行系数， 10^{-2}Gy/R

$$K^{-1}=2^{-\text{(h/HVT)}} \dots\dots\dots \text{(式 11-2)}$$

- 式中：K 衰减倍数，无量纲
- h 屏蔽厚度，mm
- HVT 半值层厚度值

$$H=H_0/K \dots\dots\dots \text{(式 11-3)}$$

- 式中：H₀ 无辐射屏蔽时，在距源 R_m 处的空气比释动能率， $\mu\text{Gy/h}$
- H 衰减倍数为 K 时，在距源 R_m 处的空气比释动能率， $\mu\text{Gy/h}$
- K 衰减倍数，无量纲

$$A=A_0e^{-\lambda t} \dots\dots\dots \text{(式 11-4)}$$

- 式中：A₀ 放射源初始活度，Bq

- A 放射源衰变后活度, Bq
 λ 衰变常数, $0.693/T_{1/2}d^{-1}$
 t 衰变天数, d

11.2.1.2 核医学工作场所辐射水平预测

1、无屏蔽状态下各核素 γ 空气吸收剂量率

表 11-1 各核素裸源 γ 空气吸收剂量率 $\mu\text{Gy/h}$

核素	Γ ($\text{R cm}^2/\text{h mCi}$)	距离	1m	3m	5m	10m	30m
		活度					
^{131}I	2.2	7mCi	13.44	1.49	0.54	0.13	0.015
		150mCi	288.1	32.0	11.5	2.9	0.32
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	0.62	100mCi	54.12	6.01	2.17	0.54	0.06
^{18}F	5.7	100mCi	497.6	55.29	19.90	4.98	0.55
^{68}Ga	9.3	10mCi	81.2	9.0	3.2	0.8	0.09
^{13}N	5.8	20mCi	101.3	11.26	4.05	1.013	0.11
^{153}Sm	0.198	3mCi	0.52	0.06	0.02	5.19×10^{-3}	5.76×10^{-4}
^{177}Lu	0.09	4mCi	0.31	0.03	0.01	3.14×10^{-3}	3.49×10^{-4}
^{11}C	5.8	10mCi	50.63	5.63	2.03	0.51	0.06

注： Γ 依据《 γ 射线屏蔽参数手册》（原子能出版社，1976）查表得到。

根据上表预测结果，结合各放射核素放射特性及用途，本次环评选取 ^{131}I （甲亢和甲癌治疗）、 ^{18}F （PET 诊疗）、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （SPECT 诊疗） γ 射线对人体及环境影响预测和评价。

2、使用 ^{131}I 治疗运营期辐射环境影响预测与评价

本项目 ^{131}I 用于 SPECT 显像、甲亢治疗和甲癌治疗。由 ^{131}I 污染因素分析，在核素治疗过程中，对环境的影响主要为 γ 射线、放射性废水及放射性固体废物。

根据医院提供的资料，SPECT 显像用量最大为 3mCi，甲亢治疗用量最大为 7mCi，甲癌治疗用量最大为 150mCi。本评价按患者最大用量 $1.67 \times 10^9 \text{Bq}(150\text{mCi})$ 进行预测。

由《辐射防护手册》第三分册查出铅、混凝土和空心砖墙(加气块按空心砖墙计算)对 ^{131}I 射线半值层约为 3.0mm、5.5cm 和 8.4cm。

(1) ^{131}I 药物周围 γ 辐射剂量率

医院 ^{131}I 采用碘全自动分装仪，置于给药室内。使用时，工作人员将存有原液的铅罐置于碘自动分装仪内，操作员可以远程计算机设定样品的分配活度、体积和计划使用时间，系统会自动完成将放射性原液进行稀释处理、

定量分配、在线活度测量和样品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，病人自己直接拿取盛有分装好的药液的一次性杯子，服药后穿过铅门到对面核素治疗室休息或住院观察。全过程进行严格监控。

碘全自动分装仪采用专用的液面传感器和精密剂量泵，可精确测量、设置药液的体积，并能够准确稀释和准确分配。全程使用计算机程序控制，提供了分配的准确性和一致性。

综上所述可知，在药物分装和病人服药过程中，工作人员不近距离接触药物。

(2) 墙体、防护门等屏蔽厚度校核

分碘仪将 ^{131}I 自动分装至患者面前的纸杯中，医生通过对讲系统通知患者喝下 ^{131}I 药物，甲癌患者带纸杯回核素治疗室，甲亢病人在给药室休息约 30min 后直接离开医院，SPECT 诊断病人进入注射后候诊区候诊。

医院计划甲亢患者在给药室服用 ^{131}I 后，在给药室短暂休息，如无异常可直接离开医院，给药室最多容纳 1 名甲亢患者，源强总活度 $2.6 \times 10^8 \text{Bq}$ (7mCi)。甲亢患者全部结束治疗并离开核医学科后，甲癌患者接受治疗。甲癌患者在给药室服用 ^{131}I ，给药室只容纳 1 名甲癌患者，服药后甲癌患者直接前往核素治疗室住院观察。核素治疗室设有 1 个单人间和 1 个双人间。

偏安全考虑，本评价给药房采用 $5.55 \times 10^9 \text{Bq}$ (150mCi) 作为源强总活度，双人间核素治疗室采用 $1.11 \times 10^{10} \text{Bq}$ (300mCi) 作为源强总活度，单人间核素治疗室采用 $5.55 \times 10^9 \text{Bq}$ (150mCi) 作为源强总活度，计算各墙体、防护门等外辐射剂量率，计算结果见表 11-2。

表 11-2 ¹³¹I 使用时屏蔽体外辐射剂量率

考察点	屏蔽设计厚度	源强 (mCi)	考察点到源最小距离 (m)	考察点辐射剂量率 (μGy/h)	建议
给药室东墙体外 30cm 处	200mm 加气块 +5mm 铅板	150	2.5	2.79	/
给药室南侧墙体 (抢救治疗室) 外 30cm 处 ^①	100mm 钢龙骨隔断 +5mm 铅板	150	7.0	1.85	/
给药室西墙体外 30cm 处	200mm 加气块 +5mm 铅板	150	2.5	2.79	/
给药室北墙体外 30cm 处	240mm 红砖墙 +5mm 铅板	150	1.5	5.57	增加 1.5mmPb 当量厚度
给药室防护门外 30cm 处	钢+5mm 铅板	150	2.5	14.52	增加 5.5mmPb 当量厚度
给药室室顶上方 30cm 处	170mm 混凝土 +3mm 铅板	150	5.3	0.60	/
核素治疗室东侧墙体外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	300	3.5	2.26	/
核素治疗室南侧墙体外 30cm 处	200mm 加气块 +12mm 铅板	300	1.8	2.13	/
核素治疗室西侧墙体外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	300	3.5	2.26	/
核素治疗室北侧墙体外 30cm 处	240mm 红砖 +12mm 铅板	150	1.5	1.10	/
核素治疗室顶上方 30cm 处	180mm 混凝土 +3mm 铅板	300	5.3	1.06	/
核素治疗室防护门外 30cm 处	钢+6mm 铅板	300	5.3	5.13	增加 1mmPb 当量厚度
由《辐射防护手册》第三分册查出铅、混凝土和空心砖墙(加气块按空心砖墙计算)对 ¹³¹ I 射线半值层约为 3.0mm、5.5cm 和 8.4cm。					

注：①给药室南侧抢救治疗室划为控制区，因此墙外剂量率考察点设置在抢救治疗室南侧墙体外 30cm 处。屏蔽防护为双层墙厚度。

根据核医学科工作场所平面布局图，核素治疗室房南、西、北侧墙体外为公众区域，其余墙体为核医学科内部走廊，则公众区域考察点（墙外 30cm 处）辐射剂量率均可以满足本次评价提出的目标控制值 2.5μGy/h 要求，核医学科内部考察点（墙外 30cm 处）在落实本报告提出的建议后辐射剂量率可以满足本次评价提出的推导目标控制值 4.1μGy/h 要求。

(3) 患者服药后辐射剂量率预测

患者服药后，距患者不同距离处辐射剂量率预测结果表 11-3。

对服用 ^{131}I 的甲癌患者，甲状腺切除， ^{131}I 进入患者体内后，会随着身体代谢，很快随着尿液、粪便等排出。根据《分化型甲状腺癌患者的 ^{131}I 有效半衰期》（易艳玲等，原子能科学与技术，Vol44, suppl.10,9）报道，甲癌患者的 ^{131}I 平均有效半衰期为 $(14.6 \pm 6.5) \text{ h}$ ，本评价取最大值 21.1h，据此计算甲癌患者服药后的剂量率。对服用 ^{131}I 的甲亢患者， ^{131}I 半衰期取 8.04d，据此计算甲亢患者服药后的剂量率。

表 11-3 患者注（服）后辐射剂量率预测结果

核素	距患者距离	辐射剂量率 $\mu\text{Gy/h}$						
		注（服）当天	1d	2d	4d	6d	10d	24d
$^{131}\text{I}(7\text{mCi})$	1m	13.44	12.33	11.31	9.52	8.01	5.68	1.70
$^{131}\text{I}(150\text{mCi})$	1m	288.1	131.0	59.53	12.30	2.54	0.11	/

由上表预测值中可以看出，服药后患者对周围辐射环境影响随时间的增加而逐渐减小。甲亢患者服药后初期体外 1m 处 γ 辐射剂量率为 $13.44\mu\text{Gy/h}$ ，随着时间衰变，服药 24 天后，患者体外 1m 处 γ 辐射剂量率为 $1.70\mu\text{Gy/h}$ ；甲癌患者服药后初期体外 1m 处 γ 辐射剂量率为 $288.1\mu\text{Gy/h}$ ，随着时间衰变，服药 6 天后，患者体外 1m 处 γ 辐射剂量率为 $2.54\mu\text{Gy/h}$ 。

患者体内携带一定量活度的放射性核素离开医院是允许的，对于核素 ^{131}I ，允许离开医院的核素活度上限为 400MBq (10.8mCi)。本项目 ^{131}I 甲亢治疗最大用量为 7mCi ，因此患者服药后若无异常情况可以直接离开医院；对于甲癌患者，用量高于 10.8mCi ，需要住院治疗，待体内核算 ^{131}I 含量小于 10.8mCi 时，方可允许离开医院。经估算可知，甲癌患者住院三天后，体内核素活度最大为 14.08mCi ，四天后体内核素活度最大为 6.4mCi ，因此甲癌患者最多需住院 4 天即可达到出院标准。

从某种程度上讲，服药患者相当于一个流动的放射源，在一段时间内，对近距离接触的公众可能产生 γ 外照射，并且患者排泄物也会对环境可能产生一定的影响。但是这种影响是暂时的，其影响将随着时间的推移越来越小，因此医院应加强对服药患者管理，向患者及其家属作出口头及书面的住院期间及出院后的防护措施指导，给出辐射防护建议，要求患者在一定时间内避免外出。

3、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F 药物周围 γ 辐射剂量率

根据医院提供资料， ^{99m}Tc 和 ^{18}F 每日最大用量均为 $3.7 \times 10^9 \text{Bq}$ (100mCi)，每天各诊断 10 人，按患者单次最大注射量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi) 进行预测。

由《辐射防护手册》第三分册查出铅、混凝土和空心砖对 ^{99m}Tc 射线半值层约为 0.7mm、3.3cm 和 4.9cm；铅、混凝土和空心砖墙对 ^{18}F 的半值层为 5.7mm、6.4cm 和 10.1cm。

(1) ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器

^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器储存及淋洗均在注射室通风橱内，单个发生器活度为 300mCi，淋洗过程在密闭发生器中负压条件下自动进行，发生器色谱柱外面有 40mm 的铅防护，再加上 15mmPb 当量给药防护屏，铅对 ^{99m}Tc γ 射线的半值层约为 0.7mm，对发生器 1m 外 γ 辐射剂量率进行计算，得到 γ 辐射剂量率为 $3.62 \times 10^{-22} \mu\text{Gy/h}$ 。因此经上述屏蔽措施防护后， ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器储存及淋洗过程对工作人员及注射室外的影响可以忽略不计。

(2) 分装过程 γ 辐射剂量率预测

按每日最大使用量 $3.7 \times 10^9 \text{Bq}$ (100mCi) 进行预测，分装过程中工作人员穿着 0.5mmPb 当量防护衣，戴 0.5mmPb 当量的防护手套，通过 15mmPb 当量的防护屏进行操作，药物距离身体 50cm。根据估算， ^{99m}Tc 分装过程工作人员身体受照剂量为 $4.67 \times 10^{-5} \mu\text{Gy/h}$ ； ^{18}F 分装过程工作人员身体受照剂量为 0.3mGy/h。

(3) 取药及注射过程 γ 辐射剂量率预测

按患者单次最大注射 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 各为 3.7×10^8 (10mCi) 进行预测，取药过程工作人员穿着 0.5mmPb 当量的防护衣，戴 0.5mmPb 当量的防护手套，药物距离身体约 50cm。注射时，工作人员穿着 0.5mmPb 当量的防护衣，戴 0.5mmPb 当量的防护手套，通过 50mmPb 当量的注射窗对患者进行注射。注射过程药物距离身体约 50cm。根据估算，取药及注射过程 γ 辐射剂量率预测结果详见表 11-4。

表 11-4 取药及注射过程 γ 辐射剂量率

考察点	屏蔽措施	γ 辐射剂量率 ($\mu\text{Gy/h}$)	
		^{99m}Tc	^{18}F
身体 (取药)	0.5mmPb 当量的防护衣	13.19	187.3
身体 (注射)	0.5mmPb 当量的防护衣+50mmPb 当量的注射防护窗	4.15×10^{-21}	0.43

SPECT 工作人员手部剂量率参考《核医学工作场所辐射水平调查》(李桂云等, Vol.19 No.5,1999) 中数据进行类比。根据文献, 操作人员在开源、淋洗、分装、取源(使用 ^{99m}Tc , 活度 $1.48 \times 10^7 \sim 2.96 \times 10^{10} \text{Bq}$) 时, 手部的剂量率为 $1.2 \sim 5000 \mu\text{Gy/h}$, 注射时(^{99m}Tc , 活度 $7.4 \times 10^9 \text{Bq}$), 手部剂量率为 $10 \sim 5000 \mu\text{Gy/h}$ 。本项目 ^{99m}Tc 分装过程操作活度为 $3.7 \times 10^9 \text{Bq}$, 注射过程操作活度为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ 。通过类比, SPECT 工作人员分装取药过程手部剂量率为 $625 \mu\text{Gy/h}$, 注射过程手部剂量率为 $250 \mu\text{Gy/h}$ 。

PET 工作人员手部剂量率参考《北京市临床核医学使用 ^{18}F 核素场所的辐射水平调查》(李桂云, Vol.13, No.4, 2004) 中数据进行类比。根据文献, 工作人员在给病人注射 ^{18}F ($4.5 \sim 11 \text{mCi}$) 时, 手部剂量率范围在 $101 \sim 505 \mu\text{Gy/h}$ 。本项目 ^{18}F 注射操作活度为 10mCi , 通过类比, 注射过程 PET 工作人员手部剂量率为 $459 \mu\text{Gy/h}$ 。分装过程 ^{18}F 操作活动为 100mCi , 则分装过程工作人员手部剂量率为 $4590 \mu\text{Gy/h}$ 。

(4) 分装注射室外 γ 辐射剂量率预测预测

SPECT-CT 和 PET-MR 共用分装注射室。根据医院提供的屏蔽防护设计方案, 经估算注射室外 γ 辐射剂量率预测结果详见表 11-5。

表 11-5 分装注射室外 γ 辐射剂量率

考察点	屏蔽厚度	考察点到源的最近距离 (m)	考察点 γ 辐射剂量率 ($\mu\text{Gy/h}$)	
			^{99m}Tc	^{18}F
四周墙外 30cm 处	120mm 红砖 + 16mm 铅板	2	3.26×10^{-8}	0.78
防护门外 30cm 处	钢 + 16mm 铅板	2	1.78×10^{-7}	1.78
室顶上方 30cm 处	170mm 混凝土 + 3mm 铅板	5.3	2.8×10^{-4}	0.20

(5) 注射后候诊室内病人周围与室外 γ 辐射剂量率

根据医院提供的资料, SPECT-CT 注射后候诊区分为两个候诊室, PET-MR 注射后候诊区分四个候诊室, 候诊室之间用 4mm 铅板隔开(详见附图 5)。SPECT 考虑 5 人共同休息, 源强总活度为 $1.85 \times 10^9 \text{Bq}$ (50mCi), PET 候诊室考虑每个候诊室 2 人共同休息, 源强总活度为 $7.4 \times 10^8 \text{Bq}$ (20mCi), 候诊室对顶棚的影响按患者满负荷考虑。根据估算候诊室外的 γ 辐射剂量率预测结果详见表 11-6 和表 11-7。

表 11-6 候诊室外 ^{99m}Tc 产生的 γ 辐射剂量率

考察点	屏蔽厚度	源强 (mCi)	考察点到源的最近距离 (m)	考察点 γ 辐射剂量率 (μ Gy/h)
SPECT-CT 注射后候诊室东侧墙外 30cm 处	200mm 混凝土	50	3.2	0.04
SPECT-CT 注射后候诊室南侧墙外 30cm 处	200mm 混凝土	50	3.3	0.04
SPECT-CT 注射后候诊室西侧墙外 30cm 处	120mm 红砖 +3mm 铅板	50	3.2	0.03
SPECT-CT 注射后候诊室北侧墙外 30cm 处	200mm 混凝土	50	4.3	0.02
防护门外 30cm 处	钢+3mm 铅板	50	3.3	0.13
室顶上方 30cm 处	170mm 混凝土	100	5.3	0.05

表 11-7 候诊室外 ¹⁸F 产生的 γ 辐射剂量率

考察点	屏蔽厚度	源强 (mCi)	考察点到源的最近距离 (m)	考察点 γ 辐射剂量率 (μ Gy/h)
四周墙外 30cm 处	200mm 混凝土	20	1.8	3.52
防护门外 30cm 处	钢+3mm 铅板 +4mm 铅板	20	4.0	2.66
室顶上方 30cm 处	170mm 混凝土 +3mm 铅板	80	5.3	1.56

(6) ^{99m}Tc 和 ¹⁸F 核素扫描过程对 SPECT-CT 和 PET-MR 机房屏蔽剂量率计算

SPECT 受检者注射 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}(10\text{mCi})^{99\text{m}}\text{Tc}$ 后, 经过休息后进入 SPECT 机房进行检查, 采集时间 30min 或更长; PET 受检者注射 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}(10\text{mCi})^{18}\text{F}$ 后, 经过休息后进入 PET 机房进行检查, 采集时间 30min 或更长。经估算, ECT 机房和 SPET 机房墙体、室顶、防护门及观察窗外 γ 辐射剂量率预测结果详见表 11-8 和表 11-9。

表 11-8 SPECT-CT 机房外 ^{99m}Tc 核素产生的 γ 辐射剂量率

考察点	屏蔽厚度	考察点到源的最近距离 (m)	考察点 γ 辐射剂量率 μ Gy/h)
东侧墙外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	4.3	4.5×10^{-5}
南侧墙外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	4.3	4.5×10^{-5}
西侧墙外 30cm 处	200mm 混凝土 +2mm 铅板	4.3	6.0×10^{-4}
北侧墙外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	4.3	4.5×10^{-5}
防护门外 30cm 处	钢+6mm 铅	4.3	7.7×10^{-4}
室顶上方 30cm 处	170mm 混凝土 +2mm 铅板	5.3	6.1×10^{-4}

表 11-9 PET-MR 机房外 ^{18}F 核素产生的 γ 辐射剂量率

考察点	屏蔽厚度	考察点到源的最近距离 (m)	考察点 γ 辐射剂量率 ($\mu\text{Gy/h}$)
东侧墙外 30cm 处	240mm 红砖墙 +6mm 铅板	3.3	0.42
南侧墙外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	4.5	0.30
西侧墙外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	3.3	0.55
北侧墙外 30cm 处	200mm 加气块 +6mm 铅板	4.5	0.30
室顶上方 30cm 处	170mm 混凝土 +2mm 铅板	5.3	0.20
防护门外 30cm 处	钢+6mm 铅板	5	0.96

根据核医学科工作场所平面布局图，PET-MR 和 SPECT-CT 工作场所公众区域考察点（墙外 30cm 处）辐射剂量率均可以满足本次评价提出的目标控制值 $2.5\mu\text{Gy/h}$ 的要求，内部考察点（墙外 30cm 处）辐射剂量率可以满足本次评价提出的推导目标控制值 $4.1\mu\text{Gy/h}$ 的要求。

(7) 用药患者离开医院对环境的影响

目前对于使用核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F 的患者，允许其离开医院的体内最大活度，国家相关标准中没有明确规定，偏安全考虑，不考虑人体软组织屏蔽效果，按患者单次最大注射 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F 分别为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}$ (10mCi) 进行预测， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 半衰期为 6.02h， ^{18}F 半衰期为 109.7min，则患者注射药物后，其体外 1m 处的 γ 辐射剂量率如下表所示。

表 11-10 患者注射药物后体外 1m 处不同时间的 γ 辐射剂量率 ($\mu\text{Gy/h}$)

核素	注射初始	0.5h	1h	2h	4h	7h	10h
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	5.41	4.48	3.70	2.53	1.19	0.38	0.12
^{18}F	49.76	41.17	34.06	23.31	10.92	3.50	1.12

4、 ^{125}I 粒籽源植入治疗过程辐射水平

^{125}I 粒籽源封装由供货商负责，医院只进行手术植入。

由《辐射防护手册》第三册分册查出铅对 ^{125}I 射线的半值层约为 0.025mm。由于 ^{125}I 衰变过程主要发射 35keV 的 γ 射线 (6.5%)，根据《辐射防护知识》(梁石强编) 查出射线能量在 50keV 时，混凝土对射线的半值层为 1.0cm。查《 γ 射线屏蔽参数手册》， ^{125}I 的照射常数 Γ 为 $0.7\text{R} \cdot \text{cm}^2/\text{h} \cdot \text{mCi}$ 。

(1) 院内输送

本项目每例患者最大使用活度为 $2.22 \times 10^9 \text{Bq}$ (60mCi)，在把植源器由核医学科通风橱运送到 CT 室过程中，植源器放在 3mm 厚铅盒中，按放射源距铅盒表面 0.3cm 计算，经计算，铅盒表面 γ 辐射剂量率为 $3.08 \times 10^{-30} \mu\text{Gy/h}$ ，则植源器在院内输送过程中，对外环境产生的影响可以忽略。

(2) 手术植入

在 ^{125}I 籽源植入治疗手术过程中，按最大用量 $2.22 \times 10^9 \text{Bq}$ (60mCi) 进行估算，手术过程中距离 ^{125}I 籽源大于 10cm。偏保守估算，不考虑患者本身 (20mm 组织厚度) 和植源器 (5mm 不锈钢) 衰减，仅考虑 0.5mmPb 当量防护衣和铅手套的防护作用，经计算， ^{125}I 籽源植入过程中，医生所受 γ 辐射剂量率为 $3.5 \times 10^{-3} \mu\text{Gy/h}$ 。

(3) 术后距离患者 1m 处 γ 辐射剂量率

术后，患者应在植入部位穿戴 0.25mm 铅当量的铅背心、围脖或腹带，偏安全考虑，本次考虑无屏蔽状态下，距离患者 1m 处 γ 辐射剂量率详见表 11-11。

表 11-11 植入后不同时间距离患者 1m 处 γ 辐射剂量率 ($\mu\text{Gy/h}$)

	术后当天	术后 30 天	术后 60 天	术后 120 天	术后 180 天(治疗期结束)
籽源活度 (mCi)	8	6	4	2	1
无屏蔽状态	36.68	23.55	18.3	9.15	4.58

由上表可知，术后当天，不考虑患者身体自身的屏蔽、距离患者 1m 处 γ 辐射剂量率为 $36.68 \mu\text{Gy/h}$ ，术后 180 天距患者 1m 处的 γ 辐射剂量率为 $4.58 \mu\text{Gy/h}$ 。

(4) ^{125}I 籽源工作场所外 γ 辐射剂量率

根据表 10-4 CT 机房屏蔽设计参数，CT 机房四周、顶层、防护门、观察窗等屏蔽防护当量均不小于 3.0mm 铅当量，防护效果不低于铅盒的屏蔽效果，因此 CT 机房对外影响可以忽略。

5、 ^{90}Sr 和 ^{32}P 敷贴治疗辐射环境影响分析

^{90}Sr 和 ^{32}P 均为纯 β 衰变， β 射线穿透能力很弱，在组织内部辐射距离很短，不对对周围环境产生明显影响。但 β 射线被放射源包壳阻止时会产生韧致辐射，韧致辐射所致 γ 辐射剂量率估算采用下式计算：

$$X = 1.71 \times 10^{-4} AZ(E/r)^2 f \quad (\text{式 11-5})$$

- 式中： X 距离铷致辐射源 r 米处的空气比释动能率，Gy/h；
 A 放射源活度，Ci；
 Z 电子屏蔽材料的有效原子序数， ^{90}Sr 取 56， ^{32}P 取 13；
 E β 射线的最大能量，MeV；
 r 参考点与铷致辐射源的距离，m；
 f 转换系数 $8.73 \times 10^{-3} \text{Gy/R}$ 。

(1) ^{90}Sr 敷贴治疗辐射环境影响分析

^{90}Sr 为纯 β 衰变，射线能量为 546keV，3mm 组织可吸收 91% 的射线能量，对周围正常组织影响极小。

本项目 ^{90}Sr 敷贴发生器拟从中国原子能研究院订购，使用活度为 1mCi，电子屏蔽材料铁（密封源的包壳）的有效原子序数取 56，根据上式，得到无屏蔽状态下不同距离 ^{90}Sr 裸源导致铷致辐射产生的 γ 辐射剂量率。

表 11-12 不同距离上 ^{90}Sr 裸源导致铷致辐射产生的 γ 辐射剂量率($\mu\text{Gy/h}$)

活度(Bq) \ 距离	0.05m	0.5m	1m	2m	3m
$3.7 \times 10^7(1\text{mCi})$	9.96	0.10	0.025	0.006	0.003

由上表可知，在裸源状态下，距离敷贴器 1m 处 γ 辐射剂量率为 0.025 $\mu\text{Gy/h}$ ，基本对周围环境已没有显著影响。

(2) ^{32}P 敷贴治疗对周围环境的影响

本项目 ^{32}P 敷贴器拟从中国原子能研究院 401 所订购，根据实际需求订购 30-50mCi 的敷贴器。 ^{32}P 释放的 β 射线最大能量为 1.71MeV，在无任何屏蔽、受照物体为玻璃的情况下，经计算得到不同距离上 ^{32}P 导致铷致辐射产生的 γ 辐射剂量率。

表 11-13 不同距离上 ^{32}P 裸源导致铷致辐射产生的 γ 辐射剂量率($\mu\text{Gy/h}$)

活度(Bq) \ 距离	0.05m	0.2m	0.5m	1m	2m	3m
$1.85 \times 10^9(50\text{mCi})$	1140	70.9	11.3	2.8	0.7	0.3

由上表可知，在最大用量 50mCi 的裸源状态下，距离源 1m 处 γ 辐射剂量率为 2.8 $\mu\text{Gy/h}$ ，体外 3m 处 γ 辐射剂量率为 0.3 $\mu\text{Gy/h}$ ，基本对周围环境已影响不大。

6、配套 ^{68}Ge 密封源对周围环境的影响

本项目 PET 配套使用活动分别为 $5.5 \times 10^7 \text{Bq}$ (1.5mCi)、 $3.5 \times 10^6 \text{Bq}$ (0.1mCi)和 $2.1 \times 10^6 \text{Bq}$ (0.06mCi)的 ^{68}Ge 校准源，校准源置于 3cm 厚的铅容器中，存储于贮源间，校准源表面的剂量可以根据公式 11-1 计算。由《辐射防护手册》第三分册查出铅对 ^{68}Ge 的半值层为 7.2mm， ^{68}Ge 的照射量常数 Γ 依据《 γ 射线屏蔽参数手册》(原子能出版社, 1976) 查表得到为 $5.43 \text{R cm}^2/(\text{h mCi})$ 。密封源置于 3cm 铅罐中，距密封源 100cm 处产生的最大辐射剂量率为 $0.4 \mu\text{Gy/h}$ ，符合《密封放射源及密封放射源容器的放射卫生防护标准》(GBZ114-2006) 中 5.8 款规定：距离装有活度为 $3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ 以下的密封 γ 放射源容器外表面 100cm 处任意一点辐射的空气比释动能率不得超过 0.05mGy/h 。

11.2.2 人员所受辐射剂量估算

由于本项目使用核素种类较多，其他核素使用量和 γ 射线能量相较 ^{131}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F 较小，因此其他核素在治疗和诊断应用过程对工作人员和公众人员产生的照射辐射远远小于 ^{131}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F 三种核素，因此本次评价选取 ^{131}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F 作为影响预测因子进行评价。

1、估算公式

年有效剂量估算公式如下：

$$H=0.7 \times D_r \times T \quad (\text{式 11-6})$$

式中：

H 年有效剂量当量，Sv/a；

0.7 吸收剂量对有效剂量当量的换算系数，Sv/Gy；

D_r 空气吸收剂量率，Gy/h；

T 年受照时间，h/a。

2、停留因子

停留因子参照《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) 选取，具体数值见表 11-15。

表 11-14 居留因子的选取

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

3、估算结果

(1) 辐射工作人员设置情况

本项目辐射工作人员设置情况详见下表 11-15。

表 11-15 辐射工作人员设置情况

工作场所	装置	医生	护士
放射介入学科	DSA (1 台)	2	1
	CT (2 台)	2	/
	DR (2 台)	2	/
	肠胃机 (1 台)	1	/
核医学科	SPECT-CT	1	1
	PET-MR	1	2
	分装岗位	2	/
	注射岗位	/	2
	粒籽植入	1	/
	敷贴治疗	1	/
	甲癌治疗	1	/

注：本项目辐射工作人员不存在岗位交叉，分装、注射及 PET-MR 摆位工作人员进行轮岗操作。

(2) 核医学工作场所职业人员的年有效剂量

① ¹³¹I 治疗

本项目 ¹³¹I 采用全自动碘分装仪分装，操作过程为全自动远程控制，在药物分装和病人服药过程中，工作人员不近距离接触药物。

对于甲癌住院患者，工作人员需要进行查房，每天观察一次，距离患者约 1m，累计时间约 8min，工作人员穿戴 0.5mmPb 当量铅衣。核素治疗室可

接纳 3 个病人，每个病人住院 4 天。根据表 11-3，在 0.5mmPb 的防护下，工作人员查房期间受到的剂量率分别为：284.8 $\mu\text{Gy/h}$ (第 1 天)、128.9 $\mu\text{Gy/h}$ (第 2 天)、58.6 $\mu\text{Gy/h}$ (第 3 天)、12.09 $\mu\text{Gy/h}$ (第 4 天)，甲癌病人每年住院 78 人次，则工作人员查房期间最大所受年剂量为 3.53mSv/a。

综上，负责 ^{131}I 甲癌治疗工作人员可能接受的年有效剂量为 3.53mSv/a，符合本评价采用的工作人员身体受照剂量符合本评价提出的工作人员管理剂量约束值不超过 6.0mSv/a 的要求。

②SPECT 诊断（以 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 为例）

根据医院提供资料， ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗在注射室通风橱内进行。淋洗过程自动进行。本项目单个发生器活度为 300mCi，淋洗过程发生器 1m 外 γ 辐射剂量率为 $3.62 \times 10^{-22} \mu\text{Gy/h}$ 。淋洗过程工作人员距离发生器超过 1m，因此淋洗过程工作人员手部和身体受照剂量可以忽略。放射工作人员受照射的环节主要为分装、取药、注射和近距离接触用药患者。

i 分装过程，分装过程在通风橱内进行，按每日最大使用量 $3.7 \times 10^9 \text{Bq}$ (100mCi) 进行预测。按照工作人员身体距源 0.5m，穿 0.5mmPb 当量防护衣，通过 15mmPb 当量的防护屏操作，身体距源 50cm，分装时身体受 γ 辐射剂量率为 $4.67 \times 10^{-5} \mu\text{Gy/h}$ ，手部受 γ 辐射剂量率为 625 $\mu\text{Gy/h}$ 。分装过程约 1min 完成，按年工作 260 天，则身体的年剂量为 $1.4 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/a}$ ，手部的年剂量为 1.9mSv/a。

ii 取药过程，按工作人员身体距源 50cm，穿 0.5mmPb 当量防护衣，身体 γ 辐射剂量率为 0.013mGy/h。取药过程约 10s 完成，每天最多诊断 10 人，按年工作日 260 天计，则身体的年剂量为 0.07mSv/a。

iii 药物注射过程，按照工作人员身体距源 50cm，穿 0.5mmPb 当量防护衣，通过 50mm 铅当量的注射窗注射，则身体 γ 辐射剂量率为 $4.15 \times 10^{-21} \mu\text{Gy/h}$ ，手部 γ 辐射剂量率为 250 $\mu\text{Gy/h}$ 。一次注射过程的时间按照 30s 考虑，每天最多诊断 10 人，按年工作日 260 天计，则身体的年剂量为 $6.3 \times 10^{-20} \mu\text{Sv/a}$ ，手部的年剂量为 3.8mSv/a。

iv 检查之前，摆位人员在机房内指导受检者正确姿势，每次过程摆位人员与受检者间隔大约 1m，穿 0.5mmPb 当量防护衣，则身体 γ 辐射剂量率为

3.30 μ Gy/h。摆位大约需要 1min，每天最多诊断 10 人，按年工作日 260 天计，工作人员摆位过程身体受到的年剂量为 0.10mSv/a。

③PET 诊断(以 ^{18}F 为例)

根据医院提供资料，PET 诊断每天最多诊断 10 人，年工作 260 天，其操作流程与 SPECT 相同，同理 SPECT 诊断，PET 诊断分装过程身体的年剂量为 0.91mSv/a，手部的年剂量为 13.92mSv/a；取药过程身体的年剂量为 946.90 μ Sv/a；注射过程身体的年剂量为 6.52 μ Sv/a，手部的年剂量为 6.96 mSv/a；摆位过程身体的年剂量为 1.41mSv/a。

本项目 PET 分装、注射和摆位工作人员同时操作 ^{68}Ga 、 ^{13}N 、 ^{11}C 等产生 γ 射线的核素，其年操作量分别为 $9.62 \times 10^9 \text{Bq}$ 、 $3.85 \times 10^{11} \text{Bq}$ 、 $9.62 \times 10^{10} \text{Bq}$ ，小于 ^{18}F 年操作量 $9.62 \times 10^{11} \text{Bq}$ ，偏保守考虑，工作人员操作 ^{68}Ga 、 ^{13}N 、 ^{11}C 三种核素过程中身体和手部年有效剂量等同于 ^{18}F 考虑，则职业人员年有效剂量详情见表 11-16。

表 11-16 SPECT-CT 和 PET-MR 机房工作人员年有效剂量

工序		核素		年总有效剂量	岗位人数	人均年有效剂量
		SPECT	PET			
分装	身体(μ Sv/a)	1.4×10^{-4}	3640.0	3640.0	2	1820.0
	手部(mSv/a)	1.9	55.68	57.58		28.79
取药注射	身体(μ Sv/a)	70.0	3813.7	3883.7	2	1941.85
	手部(mSv/a)	3.80	27.84	31.64		15.82
PET 摆位	身体(mSv/a)	/	5.64	5.74	2	2.82
SPECT 摆位	身体(mSv/a)	0.10	/	0.10	1	0.10

分装、注射和摆位辐射工作人员通过轮岗，其身体和手部可能受到的年有效剂量不会超过本评价提出的工作人员管理剂量约束值不超过 6.0mSv/a 的要求，手部受照剂量符合本评价提出的工作人员四肢管理剂量约束值不超过 150mSv/a 的要求。

④PET 配套 ^{68}Ge 校准源

辐射工作人员收到的密封源额外辐射照射来自于校准源校准的准备工作，现假设：某一工作人员每次校准准备 1min(距源 100cm)，每年校准 12 次。

根据剂量率估算公式，距离密封源 100cm 处的辐射剂量率为 0.4 μ Gy/h，则工作人员接受的年有效剂量为 0.06 μ Sv，符合本评价提出的工作人员管理剂

量约束值不超过 6.0mSv/a。

⑤¹²⁵I 粒籽源植入

根据院方提供数据，¹²⁵I 粒籽源植入患者的治疗过程，医护人员近距离接触包括取药、植入粒籽源等，时间约 60min，一年最多接诊 26 人，则照射时间约 26h。手术过程中工作人员穿 0.5mm 厚铅衣、铅手套操作，手术过程取 $3.5 \times 10^{-3} \mu\text{Gy/h}$ ，则手术人员身体受到的年有效剂量为 $6.37 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/a}$ 。

对于 ¹²⁵I 粒籽源植入住院患者，工作人员需要进行查房，每天观察一次，累计时间约 10min，偏安全考虑，按患者住院观察 14 天计算，工作人员穿 0.5mmPb 当量防护衣，距离患者 1m 情况下所受 γ 辐射剂量率为 $3.5 \times 10^{-4} \mu\text{Gy/h}$ ，则年有效剂量为 $1.49 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/a}$ 。

则负责 ¹²⁵I 粒籽源植入工作人员身体受到的年有效剂量为 $7.86 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/a}$ ，因此工作人员受照剂量符合本评价提出的工作人员管理剂量约束值不超过 6.0mSv/a 的要求。

⑥敷贴治疗

治疗时，工作人员打开铅罐，持手柄取出敷贴器放在患处，治疗完毕，工作人员将放射源放回铅罐，将铅罐放回储源室保险柜中。根据医院提供的资料，一次近距离操作时间最多为 1min，⁹⁰Sr 敷贴治疗项目评价每天接诊 1 人，每年接诊 260 人，需治疗 3 个疗程，则全年操作时间为 13h，按照无屏蔽状态下、最大使用活度 10mCi ⁹⁰Sr 裸源周围 1m 处的 γ 辐射剂量率取 $0.025 \mu\text{Gy/h}$ ，则敷贴工作人员近距离操作的年有效剂量为 $0.23 \mu\text{Sv/a}$ 。

³²P 每年接诊 13 人，需治疗 3 个疗程，则全年操作时间为 0.65h，按照无屏蔽状态下、最大使用活度 10mCi ⁹⁰Sr 裸源周围 1m 处的 γ 辐射剂量率取 $2.8 \mu\text{Gy/h}$ ，则敷贴工作人员近距离操作的年有效剂量为 $1.3 \mu\text{Sv/a}$ 。

综上敷贴工作人员近距离操作的年有效剂量为 $1.53 \mu\text{Sv/a}$ ，符合本评价采用的工作人员身体受照剂量符合本评价提出的工作人员管理剂量约束值不超过 6.0mSv/a 的要求。

本项目核医学科辐射工作人员可能接受的年有效剂量详见表 11-17。

表 11-17 核医学科辐射工作人员可能接受的年有效剂量汇总表

岗位		人员数	人均有效剂量 (mSv/a)	管理约束值 (mSv/a)
甲癌治疗	身体	1	3.53	6.0
分装	身体	2	1.82	6.0
	手部		28.79	150
注射	身体	2	1.94	6.0
	手部		15.82	150
PET 摆位	身体	2	2.82	6.0
SPECT 摆位	身体	1	0.10	
粒籽植入	身体	1	7.86×10^{-5}	
敷贴治疗	身体	1	1.53×10^{-3}	

本项目辐射工作人员身体可能受照剂量符合本评价提出的工作人员管理剂量约束值不超过 6.0mSv/a 的要求，手部受照剂量符合本评价提出的工作人员四肢管理剂量约束值不超过 150mSv/a 的要求。

(2) 慰问人员的年有效剂量

慰问人员与住院有药患者的近距离接触，会不同程度的接受 γ 射线的照射。

甲癌患者一般需住院 4 天，慰问人员每天与患者近距离接触 1h 计，距离服用 ^{131}I (最大 150mCi) 患者 1m 处的剂量率为 288.1 $\mu\text{Gy/h}$ ，考虑时间衰变，则慰问人员所受辐射剂量为 0.34mSv/a；

^{125}I 粒籽植入患者一般在医院留院观察 7~14 天，慰问人员每天与患者近距离接触 1h，患者着 0.25mmPb 当量防护措施，距离 ^{125}I 患者 1m 处的剂量率为 $3.66 \times 10^{-2} \mu\text{Gy/h}$ ，则慰问人员所受辐射剂量为 $3.6 \times 10^{-4} \text{mSv/a}$ ；

一般 ^{90}Sr 和 ^{32}P 敷贴治疗过程中，无需慰问人员，故敷贴治疗过程对慰问人员无影响。

综上所述，本项目核医学科慰问人员所受辐射剂量均符合本评价提出的慰问人员管理剂量约束值不超过 1.5mSv/a 的要求。

(3) 公众人员的年有效剂量

①核医学科工作场所周围

本项目核医学工作场所楼上为实践技能培训中心，楼下为太平间和垃圾房，因此本次不考虑核医学工作场所对楼下公众产生的附加 γ 辐射影响。根

据工作场所周围 γ 辐射剂量率计算结果，项目运行对核医学工作场所室顶外产生的附加 γ 辐射剂量率最大为 $1.1\mu\text{Gy/h}$ (核素治疗室)。医院年工作 260 天，工作时间以 8h 计，停留因子取 1/16，则楼上实践技能培训中心公众成员所受年有效剂量最大为 0.1mSv/a 。

结合核医学科平面布局图，本项目核医学工作场所周围（除室顶外） γ 辐射剂量率最大值出现在核素治疗室，核素治疗室西侧为地下车库出入口，根据估算结果，墙外附加 γ 辐射剂量率最大值为 $2.3\mu\text{Gy/h}$ ，本项目年工作日最大为 260 天，按每天工作时间 8h，停留因子取 1/40，则墙外公众成员所受年有效剂量最大为 0.084mSv/a 。

②公众被动与出院患者近距离接触

公众被动与有药患者的近距离接触，会受到外照射的危害。

按照公众在 10 个半衰期内与患者近距离接触，距离患者 1m 计算，停留因子取 1/16，则注射 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 患者对公众造成的辐射剂量为 0.001mSv/a ；注射 ^{18}F 患者对公众造成的辐射剂量为 0.002mSv/a ；甲癌患者对公众造成的辐射剂量为 0.02mSv/a ； ^{125}I 粒籽植入患者对公众造成的受辐射剂量为 0.001mSv/a ，均低于本评价提出的 0.3mSv/a 的公众人员年管理剂量约束值。

综上所述，本项目工作人员手部所受辐射年有效剂量能够满足《电子辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 中职业人员“四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量不超过 500mSv ”的要求，也低于本评价采用的工作人员四肢（手和足）或皮肤的年剂量不超过 150mSv 的年管理剂量约束值；工作人员、陪护人员（慰问者）和公众人员所受辐射年有效剂量分别符合本评价提出的 6.0mSv/a 、 1.5mSv/a 和 0.3mSv/a 的年管理剂量约束值。

11.2.3 DSA装置机房辐射水平评价与人员所受辐射剂量估算

1、DSA 机房屏蔽符合性分析

本项目 DSA 机房使用面积和屏蔽防护符合性分析详见表 11-18 和表 11-19。

表 11-18 DSA 机房有效使用面积

有效使用面积（尺寸）	标准要求	符合性分析
73 m^2 ($7.56\text{m}\times 9.66\text{m}$)	机房内最小有效使用面积 30m^2 ， 机房内最小单边长度 4.5m	符合

表 11-19 DSA 机房屏蔽防护符合性分析

屏蔽体	屏蔽参数（折合铅当量 mmPb）	标准要求	符合性分析
四周墙体	240mm 实心砖+2mmPb 铅复合板（4.0）	2mmPb 当量	符合
室顶及楼板	120mm 混凝土+2mmPb 铅复合板（3.1）		符合
地坪	120mm 混凝土+800mm 土层+250mm 混凝土（4.6）		符合
防护门	内衬 3mm 铅板（3.0）		符合
观察窗	20mm 铅玻璃（4.0）		符合

由上表可知，本项目 DSA 机房有效使用面积和屏蔽防护均符合《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）的要求。

2、机房周围辐射水平和工作人员剂量估算

医用诊断 X 射线机发射的 X 射线对人体的作用，主要是来自体外照射，对该项目辐射源产生的 X 射线外照射，主要通过屏蔽材料来实现。通过辐射源的工作电压、电流、时间，参考点离源距离，剂量限值等因素，进行屏蔽计算可确定该项目各屏蔽体所需的屏蔽材料厚度。本项目 DSA 额定参数为 125kV、1250mA，主射方向朝向下，主要考虑散射线与漏射线，设备使用时应防止无关人员进入机房。

① 泄漏辐射的屏蔽防护计算：

$$N_{TVT} = Lg[W \times T / (d^2 \times P)] \quad (\text{式 11-7})$$

式中：

N_{TVT} 为相应屏蔽泄漏辐射透射的十分之一值厚度数；

W 为离源 1 米处空气比释动能，取 1mGy/h；

T 为受照人员居留因子；

d 为参考点距辐射源的距离（m）；

P 为剂量限值（mSv/week）。

根据公式 11-7 算出的是达到该透射比所需十分之一值层的个数 n ，从相关表中查得相应屏蔽材料的十分之一值层厚度 $d_{1/10}$ ，再用 $d_{\text{漏}} = n \cdot d_{1/10}$ 求出屏蔽漏射线所需的屏蔽厚度。

② 散射线的屏蔽防护计算：

$$B_s = \frac{P \times r^2 \times r_s^2}{W \times T \times S} \times \frac{400}{a} \quad (\text{式 11-8})$$

式中： B_s 为透射系数 ($mSv \cdot m^2 / mA \cdot min$)；

r_s 为病人受照体表到辐射源的距离 (m)，一般取 1.0m；

r 为参考点到病人受照体表中心的垂直距离 (m)；

W 为周工作负荷 ($mA \cdot min / week$)，取 6000mA min/week；

P 为周剂量控制参考限值 ($mSv / week$)；

T 为居留因子；

a 为病人体表照射面积 (cm^2)，可取 400 cm^2 ；

S 为散射比值，取 0.0015。

如果散射辐射计算结果与泄漏辐射计算结果的厚度相差大于一个十分之一值厚度，则其中较厚的一个厚度可以作为总的次级辐射屏蔽厚度，若两者厚度相差不到十分之一值厚度，则其中较厚的一个厚度再加上一个半值厚度作为次级辐射屏蔽厚度。

③ 参数确定

本次屏蔽计算中，周剂量控制限值 P ：按相关标准要求，机房外人员的年剂量控制值为 0.3mSv，即 0.006mSv/week，辐射源所在位置取机房的中心点。

表 11-20 DSA 机房屏蔽防护核算

屏蔽体	居留因子	距离(m)	计算值	屏蔽体等效铅当量	标准值	符合性分析
四周墙体	1	4.0	1.89	4.0	2.0	符合
顶棚	1	4.8	1.74	3.1	2.0	符合

由计算结果可知，本项目 DSA 机房各屏蔽体防护措施均优于计算值和标准值，说明 DSA 机房外公众可能受到的年有效剂量能够控制在 0.3mSv 以内，满足本评价采用的年剂量管理约束值要求。

3、人员所受辐射剂量估算

对于 DSA 介入工作人员，主要考虑侧向散射射束的照射，可采用下式计算工作人员辐射剂量。

$$D = f \cdot X_o \cdot I \cdot t \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \cdot \alpha \cdot S \cdot U \cdot q \quad (\text{式 11-9})$$

式中 D 为空气吸收剂量，mGy；

f 为伦琴到戈瑞的换算系数，取 0.0095；

X_0 为离靶为 R_0 处 X 射线输出额 (伦/毫安·分)，取 $1\text{mR}\cdot\text{mA}\cdot\text{min}$ ；

R_0 为离靶距离， R 为受照点离靶的距离(m)；

I 为管电流 (mA)；

α 为散射比，取 0.0015；

S 为散射面积，取 0.4m^2 ；

U 为束定向因子，取 1；

q 为居留因子，取 1；

医生手术时穿有 0.5mmPb 当量的铅衣，铅衣对 125kV 的 X 射线可衰减到原剂量的 8.4% 左右。由于图像采集时工作人员隔室操作，只有在介入手术透视暴露在射线下，因此只计算透视部分的个人剂量。

本项目 DSA 装置共配备 3 名操作人员。院方提供 DSA 装置每年的工作负荷为：平均每天诊断 3 例，透视电流取 20mA ，最大照射时间为 20min/例 ，工作 260d/a 。经计算，DSA 工作人员人均可能受到的照射剂量为 0.39mSv/a ，满足本评价采用的辐射工作人员 6.0mSv 的年剂量管理约束值要求。

4、III类射线装置环境影响分析

由表10-6和表10-7可知，本次项目CT机房、DR机房及数字肠胃机机房使用面积、单边长度及设备机房的屏蔽防护铅当量厚度均满足《医用X射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)规定的不同类型X射线机房的使用面积、单边长度及屏蔽防护铅当量厚度要求。

此外，本项目III类射线装置各机房拟采取中央空调新风系统进行动力排风，可保持良好的通风，满足《医用X射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)要求。

11.2.4 放射性废水影响分析

放射性废水主要为少量冲洗水及病人呕吐物、排泄物、病人洗漱废水。项目废水每天产生量为 0.308m^3 ，月均产生量为 9.38m^3 ，年产生量为 112.6m^3 。

医院在核医学工作场所西侧地下设置单独的放射性废水收集处理系统，放射性废水收集系统包括4个衰变池和1个应急池，每个衰变池容积为 26m^3 ，应急池容积为 16m^3 ，衰变池总容积为 104m^3 ，采用连续式串联结构，在每个

衰变池的底部出水口安装有回水止水阀门，放射性废水连续出水。

1、衰变池未达到平衡状态

当衰变池未达到平衡状态时，本项目废水产生量为0.308m³/d，衰变池盛装系数以0.8计，四个衰变池全部排满需270天。按照半衰期最长¹³¹I的8.04d半衰期考虑，废水在衰变池中停留时间可以满足10个半衰期以上的要求。

2、衰变池达到平衡状态

衰变池运行270天后四个衰变池达到平衡状态。引用平衡状态下自流串联式n级分池的总活度减弱倍数公式（《某医院核医学科放射性废水环境影响评价》，吴运涛，海峡科学，2015年第7期），公式如下：

$$K = \left(1 + \frac{\lambda V}{nV_0}\right)^n \quad (\text{式11-10})$$

K—总活度减弱倍数；

V—n级相同分池串联的自流池总体积，m³；

V0—进入衰变池废水的产生速率（m³/d或m³/h）

λ—核素的物理衰变常数。

以半衰期最长¹³¹I的8.04d半衰期考虑，带入上式计算，K减弱倍数为4691，经衰变的废水直接排入流量大于10倍排放流量的医院污水处理总站排放。则废水经四格衰变池衰变后，废水中放射性核素活度和浓度详见表11-21。其他核半衰期很短，经衰变后废水中活度浓度可忽略不计。

表11-21 废水中核素活度和活度浓度

核素	月排放量(Bq)	经衰变后月排放量(Bq)	排水量(m ³)	排放浓度(Bq/L)
¹³¹ I	3.29×10 ¹⁰	7.01×10 ⁶	93.8m ³	7.47

综上所述，本项目放射性废水处理设施总容积能够满足放射性废水在衰变池停留10个半衰期以上的要求，符合《电离辐射防护与辐射源基本安全标准》（GB18871-2002）规定的放射性废水排放活度限值（每月排放的总活度不超过10ALImin（¹⁸FALImin=2.2×10⁸Bq，^{99m}Tc=6.9×10⁸Bq，¹³¹IALImin=9.1×10⁵Bq，⁶⁸GaALImin=2.5×10⁸Bq，¹¹CALImin=8.3×10⁸Bq））后排放至医院总污水处理站。经总污水处理站进一步处理后，直接排入流量大于10倍排放流量的普通下水道，排放口水质可满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18446-2005）中总β<10Bq/L的规定。医院应做好排放监测记录。

11.2.5 放射性固废影响分析

本项目产生的放射性固废可分为二类，第一类为丧失活度的敷贴器、退役的 ^{68}Ge 校准源、废旧 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器， ^{125}I 粒籽植入患者体内后意外排出或住院患者死亡后取出等情况下的完整 ^{125}I 粒籽源和破损的 ^{125}I 粒籽源；第二类为污染物的注射器、针头、手套、药棉、纱布、破碎杯皿、擦拭污染物地面的物品和患者使用的一次性杯子等。放射性药物根据治疗计划按需生产和订购，不会产生剩余放射性药物。

1、第一类放射性固废

丧失活度的敷贴器、退役的 ^{68}Ge 校准源、废旧 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器定期由供源厂家回收；破损和完整的 ^{125}I 粒籽源放置于铅罐内由供源厂家回收。如因故供源厂家不能回收时，可按照《城市放射性废物管理办法》规定，将放射源送有资质单位处置。

2、第二类放射性固废

被污染的注射器、针头、手套、药棉、纱布、破碎杯皿、擦拭污染物地面的物品及患者使用的一次性杯子。

根据医院制度要求，核医学给药室设有1个铅桶（5mmPb当量），分装注射室设置2个铅桶（5mmPb当量），用于收集放射性固废，医护人员定期将收集的放射性废物按类别转移至废料间放射性废物衰变箱内，待废料间放射性废物衰变箱装满后封闭放置，放置10个半衰期以上待达到解控水平可作为免管固废处理。医院拟于废料间放置6个规格相同的放射性废物衰变箱（屏蔽厚度为10mmPb当量，容积64L）。

本次评价建议将含 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N 核素的固废集中贮存衰变3天（需2个衰变箱交替使用），将含 ^{131}I 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 核素的固废集中贮存衰变3个月（需2个衰变箱交替使用），将含 ^{89}Sr 、 ^{32}P 核素的固废集中贮存衰变17个月（需2个衰变箱交替使用），则各核素均可满足贮存10个半衰期以上的要求。

根据放射性固废源强分析，放射性固废分类储存后个核素活度详见表11-22。

表11-22 放射性固废中各核素活度浓度

核素名称	半衰期	初始核素活度浓度(Bq/g)	衰变周期(天)	衰变后固废中核素活度浓度(Bq/g)
^{99m} Tc	6.02h	3.21×10 ⁴	3	8.06×10 ⁻⁴
¹⁸ F	109.7min	3.21×10 ⁴		/
¹¹ C	20min	3.21×10 ³		/
⁶⁸ Ga	68.3min	3.21×10 ¹		/
¹³ N	10min	1.28×10 ⁴		/
¹³¹ I	8.04d	8.19×10 ⁴	90	3.50×10 ⁻³
¹⁵³ Sm	46.8h	2.22×10 ³		/
¹⁷⁷ Lu	6.7d	2.96×10 ²		2.68×10 ⁻⁴
⁸⁹ Sr	50.5d	2.07×10 ⁴	510	18.87
³² P	14.3d	3.19×10 ³		/

根据GBZ133-2009中规定：放射性固废中含有多种核素时，按下式判断是否容许被免管。

$$\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{C_{j,h}} \leq 1 \quad (\text{式11-11})$$

式中：C_j 放射性核素j在该废物中的活度浓度，Bq/g；

C_{j,h} 放射性核素j的清洁解控水平推荐值，Bq/g；

n 该废物中所含放射性核素的种类数。

根据《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ133-2009）附录B和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录A所示放射性废物清洁解控水平推荐值（¹⁸F 1×10¹Bq/g、^{99m}Tc 1×10²Bq/g、¹⁵³Sm 1×10²Bq/g、¹³¹I 1×10²Bq/g、⁸⁹Sr 1×10³Bq/g、¹⁷⁷Lu 1×10³Bq/g、³²P 1×10³Bq/g）。

经计算，本项目含有核素^{99m}Tc、¹⁸F、¹¹C、⁶⁸Ga、¹³N放射性固废计算结果为8.06×10⁻⁶，含有核素¹³¹I、¹⁵³Sm、¹⁷⁷Lu放射性固废计算结果为3.53×10⁻⁵，含核素⁸⁹Sr、³²P放射性固废计算结果为1.89×10⁻²，因此本项目核医学工作场所产生的放射性固废经设定周期存放后可达到解控水平，经审管部门确认或批准后按免管废物处理。

根据《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ133-2009）的具体要求，放射性废物桶内放置专用塑料袋，收纳放射性废物不应超过20kg。桶外需贴电离辐射标志、废物种类、比活度范围和存放日期等说明，表面剂量率小

于0.1mSv/h， β 表面污染水平应小于0.4Bq/cm²。

11.2.6 放射性废气影响分析

由污染源分析可知，核医学科使用的放射性同位素除¹³¹I外均为非挥发性核素。¹³¹I采用分碘仪自动分装，其他核素分装均在负压通风柜内进行，不存在食入、吸入等内照射影响。且核医学科核素治疗室、分装注射室、给药室、通风柜等均设有通风换气系统，换气次数为6~10次/h，废气经活性炭吸附处理后由医技楼楼顶排放，且排放口高出屋脊3m，对周围环境影响不大。

11.3 事故影响分析

11.3.1 事故影响分析

1、核医学科、敷贴治疗、¹²⁵I籽源植入工作场所

主要考虑电离辐射损伤、放射源和药物失控对环境的影响。

(1) 由于工作人员操作不熟练或违反放射操作规程或误操作等其他原因造成的工作是放射性药物撒漏，造成意外照射和辐射污染。

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

(3) 核素治疗患者用药后未经允许离开核医学科，尤其是在用药初期离开候诊区，可能对接近患者的人员造成附加的照射剂量。

(4) 放射性废物管理不善

①放射性废水：患者服药初期将放射性药物呕吐到环境中，可能对环境在一定范围内造成暂时性的辐射污染；放射性废水未经足够的时间衰变即进行排放，使排放超出规定的限值，可能对环境或人体造成一定的危害。

②放射性固体废物：放射性固体废物未经足够的时间衰变，存放时间过短，即进行擅自处理，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

(5) ¹²⁵I籽源(包壳未损)被盗、丢失、失控事故影响分析

①¹²⁵I籽源在储源室暂存和使用过程中因保管不善，可能发生放射源丢失或被盜事故，产生环境污染。在暂存和使用过程中，应加强粒籽植入的CT机房的安全保卫，防止丢失和被盜事故。

②¹²⁵I籽源钛金属壳出现破损，造成射线泄露，产生环境污染。如粒籽

源破损引起泄漏而发生污染，应封闭工作场所，将源密封在一个容器中，控制人员走动，以避免放射性污染扩散，并进行场所和人员去污。

③¹²⁵I 籽源在手术过程中，可能会出现植入失败，从而发生脱落现象，产生环境污染。开展¹²⁵I 粒籽植入治疗项目后，应当利用辐射检测仪器，增加相关手术室的巡测工作，避免脱落现象产生的环境污染。

(6) 配套校准源

①由于误操作，导致较大放射性剂量照射的情况；

②放射源因故从机器上拆下来或放射源容器保管不善，可能发生放射源丢失或被盗事故，产生环境污染。

2、DSA

主要事故环境影响包括：

(1) 工作人员或病人家属尚未撤离DSA介入机房时误开机，会对工作人员或病人家属产生不必要的X射线照射。

(2) 控制系统出现故障，照射不能停止，病人受到计划外照射。

(3) 维修期间的事故，维修工程师在检修期间误开机出束，造成辐射伤害。

(4) 辐射工作人员不按要求穿戴个人防护用品，造成附加剂量照射。

(5) 屏蔽厚度不能满足辐射安全需要，造成辐射工作人员和公众受照。

3、III类射线装置

III类射线发生放射事故的可能较小，但也存在以下风险：

(1) 工作人员或病人家属在机房内时，控制台处操作人员误开机曝光。

(2) 设备维修调试过程中，因检修人员误操作导致曝光。

(3) X射线装置工作状态下，没有关闭防护门对附近流动人员误照射。

11.3.2 事故影响防范措施

上述辐射事故可以通过完善辐射防护安全设施、制定相关管理规章制度和辐射事故应急措施加以防范，是辐射环境风险控制在可以接受的水平。针对在运行过程中可能发生的事故，本次评价提出以下防范措施，尽可能的减小或控制事故的危害和影响，主要体现在以下几个方面：

1、核医学科、敷贴治疗、¹²⁵I粒籽源植入工作场所

(1) 制定完善的操作规范，对操作人员定期培训，使之熟练操作，严格按照操作规范操作，减少药物撒漏事故的发生，发生撒漏等事故后，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拭，直到擦干污染区。并用表面污染监测仪测量污染区，如果 β 表面污染大于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，表面该污染区未达到控制标准，应用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，直到该污染区 β 表面污染小于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ 为止。擦拭物收集放到放射性固体废弃物衰变箱中，作为放射性固体废物进行管理。

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

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

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

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

(6) 采用适当方法，手术前对粒籽源检查并确保它的完整性和安全性。破损的 ^{125}I 粒籽源，经收集后放置在铅盒中暂存，由供货商回收。

(7) 按照《低能 γ 射线粒籽源植入治疗放射防护要求与质量控制检测规范》(GBZ178-2014)的要求, 加强住院病人的管理, 防止粒籽源意外排出。

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

2、DSA及III类射线装置

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

(2) 门-机连锁、监视器、工作状态指示灯、电离辐射警告标志灯防护设施不完善或失灵, 制定经常性自检制度, 如发现这些防护设施不够完善或失灵, 立即维护、修复。

(3) 项目应严格遵循所用辐射设备的安全使用年限, 避免机械事故造成辐射污染, 严禁超期使用。

(4) 严格按照辐射监测计划进行辐射水平监测, 如果辐射水平监测结果表明防护墙外辐射水平偏高, 可适当增加防护墙厚度。

3、事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》(国务院令449号)第四十条、《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》(环保部令18号)及《突发环境事件信息报告办法》(环保部令17号)有关规定, 医院已制定了医院辐射事故应急预案, 医院应在以后辐射工作开展过程中定期进行演练, 及时进行整改。同时医院应配置必要的应急装备、器材以及应急资金。

医院在落实本次环评提出的环境事故风险防范措施, 并落实辐射事故应急预案中提出的各项应急措施和设施的前提下, 本项目辐射事故影响可控制在可接受水平内。

12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境管理机构的设置

根据医院提供的资料，医院已按照国务院第 449 号《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》等有关法律法规，结合卫生、环保等行政主管部门的规章制度，设立了放射防护管理领导小组。

领导小组组长岗位职责包括以下内容：

1、医院法人为单位放射防护管理的第一责任人，单位法人授权放射防护管理领导小组组长代表法人全面负责院内放射防护管理工作，承担分管领导责任；

2、负责医院内放射源、放射性同位素、射线装置安全防护和环境保护工作实施统一监督管理；

3、负责医院放射防护管理队伍的建设；

4、负责指导各小组成员及相应科主任对科室实施放射防护的日常监督管理；

5、协助法人代表组织制定并实施放射事故应急预案，配合上级部门开展放射事故的应急响应、调查处理和定级定性工作。

领导小组成员岗位职责包括以下内容：

1、积极配合小组负责人对院内各科室放射源、放射性同位素、射线装置安全防护工作和环境保护工作实施监督管理；

2、负责对科室人员进行放射事故应急培训，定期进行应急演练；

3、负责本单位《辐射诊疗许可证》的申请及变更工作；

4、监督检查医院的防护工作及个人、场所、环境监测，按有关规定上报防护监测数据或资料，并接受环保部门的监督和指导；

5、定期组织从事射线工作人员学习国家颁布的相关法律法规，对科室从事工作的人员加强安全和辐射防护（职业卫生防护）知识的教育，并定期进行考核，不合格者不得上岗；

6、监督科室及工作人员自觉遵守有关辐射防护（职业卫生防护）的各种标准和规定，有效进行防护，防止事故的发生；

7、定期检查及科室自查放射源的安全管理情况，并记录；

- 8、定期检查督促放射性工作人员做好设备质控；
- 9、每日工作结束后，监测各放射性工作场所及内环境、个人的放射性污染状况，防止环境污染；
- 10、每月定期检查放射性废物的处理、存储和排放情况，并记录；
- 11、对突发放射性污染事故，科室及相应部门按急处理预案规定现场指导处理并立即上报。

12.2 辐射安全管理规章制度

目前，医院先期已按照《放射性同位素与射线装置和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和主管环保部门的要求制定了以下放射防护规章制度：《放射工作人员职业健康监护管理办法》、《放射工作人员个人剂量管理办法》、《放射工作人员培训制度》、《放射工作场所监测管理办法》、《放射性同位素与射线装置台账管理办法》、《受检者告知制度》、《放射诊断质量保证制度》、《放射防护管理制度》、《X线机操作规程》、《放射事故应急预案》、《GE Optima CT520 操作规程》、《CT 操作规程》、《DR 室操作规程》、《数字肠胃机操作规程》、《DSA 操作规程》

上述辐射环境管理制度基本合理，建议补充自行检查和年度评估、放射防护和安全保卫、放射性药品管理和使用、核医学科相关治疗项目的操作规程、工作场所工作人员岗位职责等管理制度，建议补充设备检修、辐射监测等制度，结合本项目实际情况，根据要求进一步完善并加强对辐射工作人员的安全防护意识教育。

本项目预计共 20 名辐射工作人员，目前在岗 5 名工作人员，5 名工作人员均持证上岗，其他人员尚未到岗。本次评价要求医院其他辐射工作人员应在参加有资质单位组织的上岗培训并取得辐射安全培训合格证后方可上岗，并按时接受再培训。

12.3 辐射监测

12.3.1 监测仪器和防护设备

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，核医学科应至少配置 1 台环境辐射巡测仪和 1 台表面污染监测仪，每个 III 类 X 射线机机房应至少配置 1 台个人剂量报警仪。 ^{125}I 粒籽植入场所应配备测量粒籽源活度

的活度计及探测光子能量下限低于 20keV 的辐射防护监测仪。每个辐射工作人员均应配备个人剂量计。

12.3.2 监测计划

医院可委托有资质的单位，定期（每年 1 次）对辐射工作场所周围环境进行辐射监测，监测数据每年年底须向当地环保局上报备案。

（1）监测频度：每年常规监测一次；

（2）监测范围：各机房屏蔽墙外，防护门及缝隙处，候诊区、操作台等；

（3）监测项目：X、 γ 辐射剂量率；表面污染等。

（4）监测记录应清晰、准确、完整并纳入档案进行保存。

另外，日常工作中，每次诊疗结束或其他相关操作（分装或注射等）完成后，还需使用表面污染监测仪对医学科和 ^{125}I 籽粒植入场所放射性污染情况进行监测。工作人员离开放射工作场所，需监测工作服、体表的污染水平。本项目工作由核医学科工作人员自行完成。

放射工作人员应配备个人剂量仪，每三个月委托有资质单位进行个人剂量监测，并建立个人剂量档案；放射工作人员应进行岗前、在岗期间和离岗职业健康检查，每一年或两年委托委托相关资质单位对放射工作人员进行职业健康检查，建立职业健康档案。

放射性废物在废料间存储过程中，每个废料箱填满后对外表面的 β 表面污染进行监测， β 表面污染应小于 $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，并做好监测记录。放射性固废经设定周期存放后达到免管解控水平，经审管部门确认或批准后按免管废物处理。

12.4 辐射事故应急

医院目前已制定《放射事故应急方案》，设置以院领导王继琛为组长，周茂义、郝刚、杨兆禄、张言镇任副组长的辐射事故应急小组，小组成员包括刘兴安、宗杰、谭少青、姜涛、王冠武、李方元。

本评价根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 449 号）第四十条、《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环保部令 18 号）及《突发环境事件信息报告办法》（环保部令 17 号）有关

规定，建议医院辐射事故应急方案从以下几个方面进行补充和完善：

（1）事故应急措施的基本任务为：①立即组织营救受害人员，组织撤离或者采取其他措施保护危害区域的其他人员；②迅速控制事态，并对事故造成的危害进行监测，确定事故的危害区域、危害性质及危害程度；③消除危害后果，做好现场恢复；④查清事故原因，评估危害程度。

（2）发生事故后，立即启动辐射事故应急方案。发生一般事故后，立即封锁现场，迅速查明事故原因，凡能通过切断事故源等处理措施而消除事故的，则以自救为主；发生严重事故后，立即封锁现场，迅速安排受照人员接受医学检查，在指定的医疗机构救治；组织有关人员携带仪器设备赶赴现场进行检测，核实事故情况，估算受照剂量、污染范围和程度，判定事故类型级别，提出控制措施和方案。

（3）发生辐射事故时，事故单位应当立即启动本单位的应急方案，采取必要的应急措施，在2小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地环境保护部门、公安部门和卫生主管部门报告。视事故具体情况，向上级相关管理部门报告。具体辐射事故分级处理和报告制度应严格执行《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》（国家环保总局，环发[2006]145号）及《突发环境事件信息报告办法》（环保部令第17号）的相关要求，此处不再赘述。

（4）在事故处理过程中，处理事故的应急人员应佩带个人剂量计。为制止事故的扩大或进行抢救、抢修处理事故的应急人员接受超过正常剂量当量限值的应急照射，按照GB 18871-2002的规定，一次应急事件全身照射的剂量不应超过职业人员最大单一年份剂量限值的10倍。

（5）定期进行事故应急演练，对演练效果作出评价，提交演练报告，详细说明演练过程中发现的问题，列出不符合项，进行整改。

12.5 从事辐射活动能力评价

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条规定，使用放射性同位素、辐射装置的单位应具备相应的条件，对其从事辐射活动能力的评价详见表 12-1。

表 12-1 阳光融和医院从事辐射活动能力评价

应具备条件	落实情况
(一) 使用 II 类放射源, 使用 II 类射线装置的, 应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构, 或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	已设有放射防护领导小组
(二) 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。	本次环评要求辐射工作人员均须通过培训和考核
(三) 使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	核医学科设计有放射源暂存库
(四) 放射性同位素与射线装置使用场所应有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射要求的安全措施。	已制定相应的操作规程, 按要求建设专用机房, 实体屏蔽, 设有急停开关、监视和对讲系统, 设有工作警示灯及电离辐射警告标志。
(五) 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。使用非密封放射性物质的单位还应当有表面污染监测仪。	医院将根据相关要求及工作实际需要配备铅衣、铅屏等防护用品和配备患者使用的辅助防护用品。根据要求配备个人剂量计(工作人员人手一支)、辐射巡测仪、表面污染监测仪。
(六) 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。	基本健全, 建议补充监测方案
(七) 有完善的辐射事故应急措施。	已制定
(八) 产生放射性废气、废液、固体废物的, 还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	已制定

山东省建设项目环境评审服务中心在济南市组织召开了《山东阳光融和医院有限责任公司阳光融和医院放射诊疗建设项目环境影响报告表》技术评估会, 并形成了专家组意见。我院根据专家组意见对报告表进行了修改和完善, 完成了本项目报批稿, 在正式报批之前依据《关于印发〈建设项目环境影响评价信息公开机制方案〉的通知》(环发[2015]162号)文件, 建设单位于 2016 年 12 月 23 日在阳光融和医院官网对本文本进行了全文本公示。

综上所述, 阳光融和医院核医学科、DSA 及 III 类射线装置项目, 在严格执行相关法律法规、标准规范等文件, 严格落实各项辐射安全管理、防护措施的前提下, 其从事辐射活动的技术能力基本符合相应法律法规的要求。

13 结论与建议

13.1 结论

1、项目概况

阳光融和医院成立于 2008 年，是经潍坊市卫生局批准设立的营利性三级综合医院。

为满足医学诊疗需求。（1）新建核医学科乙级工作场所，新增 1 台 SPECT-CT 和 1 台 PET-MR，分别使用 ^{99m}Tc 、 ^{131}I 和 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 、 ^{13}N 用于医学诊断，同时配套使用 5 枚 ^{68}Ge 校准源对 PET 进行校准；使用 ^{131}I 、 ^{89}Sr 、 ^{153}Sm 、 ^{177}Lu 、 ^{32}P 同位素用于医学治疗，使用 ^{125}I 用于粒籽植入；使用 ^{32}P 敷贴和 ^{90}Sr - ^{90}Y 敷贴发射器用于敷贴治疗。核医学工作场所日等效最大操作量为 $6.80 \times 10^8 \text{Bq}$ ，属于乙级非密封源工作场所。（2）放射介入科新增 1 台 DSA、2 台 CT 机、2 台 DR 机、1 台数字肠胃机等射线装置，用于医学诊断和治疗，DSA 装置属于 II 类射线装置，其它射线装置属于 III 类射线装置。

本项目核医学科及粒籽源植入、射线装置应用于放射诊断与治疗，有较好的社会效益和经济效益，符合实践的正当性。

2、环境质量现状监测

监测结果表明，本项目核医学科和介入放射科工作场所及周围环境 X- γ 辐射剂量率监测结果范围为 $10.2 \sim 12.7 \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ ，均处于潍坊市室内环境天然辐射水平正常范围（ $6.24 \sim 23.89 \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ ）内，其中监测点 28 核医学科西侧环境 X- γ 辐射剂量率监测结果 $10.4 \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ 处于潍坊市室外环境天然辐射水平正常范围（ $4.30 \sim 16.26 \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ ）内。

3、核医学科工作场所影响分析结论

（1）放射性核素 ^{99m}Tc 由 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器自动制取、分装， ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器以及 ^{125}I 粒籽源、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 、 ^{153}Sm 、 ^{89}Sr 、 ^{32}P 、 ^{68}Ga 等放射性同位素均从同位素公司直接购买， ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 由回旋加速器生产（回旋加速器不在本次评价范围内）， ^{32}P 敷贴和 ^{90}Sr 敷贴反射器从中国原子能研究所购买，由供货方负责运输。 ^{125}I 粒籽源填装消毒工作由供货商负责，医院只进行手术植入。

（2）该工作场所属于乙级非密封源工作场所，参照 II 类放射源安全管理。根据 GB18871-2002 及 GBZ120-2006 的有关规定，工作场所划分为“控

制区”和“监督区”两区进行管理。

(3) 核医学工作场所给药室和核素治疗室在落实本次评价提出的建议后，核医学科工作场所墙体外公众区域考察点（墙外 30cm 处）和核医学科内部考察点（墙外 30cm 处）辐射剂量率分别可以满足本次评价提出的 $2.5\mu\text{Gy/h}$ 和 $4.1\mu\text{Gy/h}$ 的目标控制值。

(4) 人员所受辐射剂量估算

人员所受年辐射剂量估算表面，本项辐射工作人员和公众人员所受辐射年有效剂量符合本评价提出的职业工作人员 6.0mSv/a 和公众人员 0.3mSv/a 的年管理剂量约束值要求；慰问者所受年有效剂量低于本评价提出的慰问者所受剂量符合本次评价采用的 1.5mSv 的年管理剂量约束值。

(5) 医院在核医学科西侧地下建有衰变池，串联结构，包括 4 个衰变池和 1 个应急池，每个衰变池的容积为 26m^3 ，总容积 104m^3 。本项目排放废水约 $0.308\text{m}^3/\text{d}$ ，连续出水，废水在衰变池停留时间可以满足 GB18871-2002 规定的废水在衰变池中停留 10 个半衰期以上的要求，每月排放的总活度不超过 10ALImin 。经总污水处理站进一步处理后，直接排入流量大于 10 倍排放流量的普通下水道，排放口水质可满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18446-2005）中总 $\beta < 10\text{Bq/L}$ 的规定。

(6) 项目产生的放射性固废分为两类。第一类为退役的 ^{68}Ge 校准源、废旧 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器、 ^{125}I 粒籽源植入患者体内后意外排出或住院患者死亡后取出等情况下完整、破损的 ^{125}I 粒籽源以及丧失活度的 ^{90}Sr 和 ^{32}P 敷贴，均由供源厂家回收；第二类被污染的注射器、针头、手套、导管、药棉、纱布、吸水纸、杯皿、擦拭污染地面的物品和患者使用的一次性杯子等，放置于废物衰变箱内进行衰变达到解控水平后作为免管固废处理。

4、DSA 项目辐射环境影响评价结论

(1) DSA 机房采用实体屏蔽，工作场所屏蔽防护设计满足《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）相关规定，设置了灯光警示装置、急停开关、动力排风系统、对讲系统及电离辐射警告标志。

(2) 经估算，DSA 机房屏蔽防护措施满足相关要求，DSA 辐射工作人员和机房外公众可能接受的最大辐射年有效剂量均满足本次评价提出的

6.0mSv/a 和 0.3mSv/a 的年剂量管理约束值。

5、III类射线装置项目辐射环境影响评价结论

各III类射线装置机房各侧墙体、室顶、防护门、铅窗和观察窗防护厚度、通风等设计均符合《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)中相关标准的要求。

6、辐射事故影响分析表明,医院在使用同位素治疗和诊断及射线装置工作中存在一定辐射环境风险。本次评价针对辐射事故类型提出了相应的风险防范措施,在医院落实本次评价提出的防护措施,并落实放射性事故应急预案中各项应急设施的前提下,本项目辐射事故影响可控制在可接受水平。

7、辐射安全防护管理

医院已成立了辐射安全与环境管理机构,并制定了相应的辐射环境管理制度和辐射岗位职责等制度,相关管理制度较为全面。建议今后在开展工作时,结合自身情况,按照法律法规及主管部门的要求,对已制定的制度进行整理和完善。

综上,阳光融和医院放射诊疗建设项目,在切实落实报告中提出的辐射管理、辐射防护等各项措施,严格执行相关法律法规、标准规范等文件,严格落实各项辐射安全管理、防护措施的前提下,该项目对职业人员、慰问者和公众人员是安全的,对周围环境产生的影响较小,不会引起周围辐射水平的明显变化,因此从环境保护角度分析,项目建设是可行的。

13.2 建议

1、建设单位须建立健全辐射安全管理体系,加强辐射安全教育培训,提高职业工作人员对辐射防护的理解和执行辐射防护措施的自觉性,杜绝放射性事故的发生。

2、建立健全辐射防护工作档案,对放射工作人员的辐射防护培训、个人剂量检测、健康查体和辐射防护检测等资料要分来保管并长期保存。

3、建议医院对核医学科布局进行调整,将敷贴室调整至甲功室东侧的诊室。建议将甲功室房门调整至南侧,并在 SPECT 工作人员进入操作间通道设置更衣间,避免 SPECT 工作人员和甲功患者路径交叉。

4、建议给药室北侧防护墙体和给药室防护门分别增加 1.5mmPb 当量和

5.5mmPb 当量的防护厚度，核素治疗室防护门增加 1mmPb 当量的防护厚度。

5、做好职业工作人员的个人剂量监测和健康管理。

6、按照辐射事故应急预案和报告制度的要求，定期进行熟练演习。

7、定期检查机房工作警示灯，确保工作警示灯正常工作，避免无关人员误入机房。

8、建立健全放射源台账，做好放射源使用记录，加强放射源防盗和丢失措施。

9、做好辐射工作人员培训和再培训。

10、医院应结合工作实际情况对辐射安全管理制度进行不断修改和完善。

11、加强对植入 ^{125}I 籽源和注射使用 ^{131}I 、 ^{89}Sr 患者的管理，对出院的患者必须提供与他人接触时的辐射防护措施的书面指导。

12、如果出现射线装置位置变更、型号改变、机房屏蔽状况发生变更、区域居留因子发生变动等情况，应重新进行辐射环境影响评价。

表 14 审批

下一级环保部门预审意见：

经办人

年 月 日

公 章

年 月 日

审批意见

经办人

年 月 日

公 章

年 月 日