

表1 项目基本情况

建设项目名称	西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区核技术利用项目							
建设单位	榆林市卫生健康委员会							
法人代表	张军	联系人	杨东	联系电话	18192931383			
注册地址	陕西省榆林市榆阳区青山路9号							
项目建设地点	西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区 肿瘤科研楼负一层、一层和三层							
立项审批部门	/		批准文号	/				
建设项目总投资(万元)	12000	项目环保投资(万元)	241	投资比例(环保投资/总投资)	2.01%			
项目性质	<input type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input checked="" type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其他	占地面积(m <sup>2</sup> )		2500				
应用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类					
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I类(医疗使用) <input type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input checked="" type="checkbox"/> V类					
	非密封放射性物质	<input checked="" type="checkbox"/> 生产	<input checked="" type="checkbox"/> 制备PET用放射性药物					
		<input type="checkbox"/> 销售	/					
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> 乙 <input type="checkbox"/> 丙					
	射线装置	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类					
		<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类					
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类					
	其他	/						
<b>1.1 项目概述</b>								
<b>1.1.1 建设单位及运营单位简介</b>								
榆林市卫生健康委员会(以下简称建设单位)位于陕西省榆林市榆阳区青山路9号,是榆林市卫生健康主管部门,主要负责统筹规划和监督管理全市的卫生健康工作。内设政秘科、发展改革科、法规与综合监督科、疾病预防控制科、卫生应急安全科等13个机构。								
为推动榆林市医疗产业发展,满足榆林市疾病预防控制的需要,提升区域医疗卫生服务的能力,解决周围区域患者的就医需求,创造更舒适的医疗环境,建设单位投资建设西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目,委托编制了《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》,并于2025年7								

月23日取得榆林市生态环境局的批复（榆政环批复〔2025〕103号），批复内容主要包括肿瘤科研楼、医疗废物暂存间和污水处理站及本项目土建部分。肿瘤科研楼北侧住院部分为地上14层，地下3层，南侧科研部分为地上7层，地下3层，中部裙房部分为地上4层，地下3层，目前大楼主体正在建设中。

建设单位负责项目建设全流程实施，并在项目竣工后将符合标准的设施及全套技术资料移交西安交通大学第一附属医院榆林医院（运营单位）。

西安交通大学第一附属医院榆林医院（以下简称医院），曾用名榆林市第二医院，位于陕西省榆林市榆阳区康安路、榆阳西路，是集医疗、科研、教学、预防、保健于一体的三级甲等医院。医院始建于1931年，是陕西省建院时间较早的公立医院。2023年，以西安交通大学第一附属医院为输出医院，以榆林市第二医院为依托医院，建设了西安交通大学第一附属医院榆林医院，并成为陕西省唯一入选第五批国家区域医疗中心的项目单位。

医院现有建筑面积17.5万平方米，编制床位1650张，在职职工2016人，设有临床科室43个，医技科室13个，共有国家临床重点专科1个（骨科），省级临床重点专科5个（泌尿、影像、神经外科、消化、重症）。

医院地理位置见图1-1，总平面布局见图1-2，医院四邻关系见图1-3。

## 1.2 项目规模

本项目拟在肿瘤科研楼内建设核医学科、放疗科和DSA手术室及其他辅助用房。

核医学科共涉及3个乙级非密封放射性物质工作场所：

核医学科药物制备区域位于肿瘤科研楼负一层，使用1台质子回旋加速器（II类射线装置，以下简称回旋加速器）生产<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F药物自用，使用<sup>68</sup>Ge-<sup>68</sup>Ga发生器和<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc发生器淋洗制备<sup>68</sup>Ga药物和<sup>99m</sup>Tc药物，核医学科使用的其余核素均外购；

核医学科门诊诊疗区域位于肿瘤科研楼一层，配备1台PET-CT和1台PET-MR，使用<sup>14</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F、<sup>64</sup>Cu、<sup>68</sup>Ga、<sup>89</sup>Zr和<sup>124</sup>I开展PET核素诊断；配备2台SPECT-CT，使用<sup>51</sup>Cr、<sup>99m</sup>Tc、<sup>123</sup>I、<sup>201</sup>Tl开展SPECT诊断，使用<sup>35</sup>S、<sup>47</sup>Sc、<sup>89</sup>Sr、<sup>153</sup>Sm、<sup>177</sup>Lu、<sup>186</sup>Re、<sup>188</sup>Re、<sup>211</sup>At、<sup>223</sup>Ra、<sup>225</sup>Ac、<sup>227</sup>Th等多种核素开展核素治疗；

核医学科住院治疗区域位于肿瘤科研楼一层，使用<sup>131</sup>I开展甲功测定，甲亢治疗，甲癌治疗，使用<sup>32</sup>P和1枚V类<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y放射源开展敷贴治疗。

放疗科位于肿瘤科研楼负一层，共建设2间直线加速器机房、1间后装治疗机房和1间CT模拟定位机房。分别配备医用电子直线加速器（II类射线装置，以下简称直线加速器）开展放射治疗、后装治疗机（以下简称后装机，搭载1枚III类<sup>192</sup>Ir放射源）开展后装治疗、CT模拟定位机（III类射线装置）开展放射治疗辅助定位。

DSA手术室位于肿瘤科研楼三层，配备1台数字减影血管造影设备（II类射线装置，以下简称DSA）开展放射介入诊疗。

综上所述，本项目涉及3个乙级非密封放射性物质工作场所，1枚III类放射源，1枚V类放射源，4台II类射线装置，4台III类射线装置。本项目拟使用的放射源、非密封放射性物质和射线装置情况见表1-1。

表1-1 本项目拟使用的放射源、非密封放射性物质和射线装置情况

放射源						
核素名称	放射性活度(Bq) × 枚数	类别	用途	贮存方式/地点		
<sup>192</sup> Ir	$3.70 \times 10^{11}$ Bq×1枚	III类	后装治疗	肿瘤科研楼负一层放疗科后装机房后装机内		
<sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y	$1.85 \times 10^9$ Bq×1枚	V类	敷贴治疗	肿瘤科研楼一层核医学科住院治疗区域敷贴室		
非密封放射性物质						
序号	核素名称	单人最大用量(Bq)	日最大接诊人数(人)	日最大操作量(Bq)	年最大用量(Bq)	来源
1	<sup>14</sup> C	/	/	4.18×10 <sup>9</sup>	1.05×10 <sup>12</sup>	/
2	<sup>13</sup> N			1.48×10 <sup>9</sup>	3.70×10 <sup>11</sup>	
3	<sup>15</sup> O			2.96×10 <sup>9</sup>	7.40×10 <sup>11</sup>	
4	<sup>18</sup> F			2.91×10 <sup>10</sup>	7.28×10 <sup>12</sup>	
5	<sup>68</sup> Ge	/	/	1.85×10 <sup>9</sup>	3.70×10 <sup>9</sup>	外购
6	<sup>99</sup> Mo			1.11×10 <sup>11</sup>	5.55×10 <sup>12</sup>	
7	<sup>68</sup> Ga			1.85×10 <sup>9</sup>	4.63×10 <sup>11</sup>	淋洗制备
8	<sup>99m</sup> Tc			1.11×10 <sup>11</sup>	2.78×10 <sup>13</sup>	
9	<sup>11</sup> C	$3.70 \times 10^8$	2	$2.09 \times 10^9$	$5.23 \times 10^{11}$	自产 PET 诊断
10	<sup>13</sup> N	$3.70 \times 10^8$	2	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$	
11	<sup>15</sup> O	$3.70 \times 10^8$	2	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$	
12	<sup>18</sup> F	$3.70 \times 10^8$	30	$2.91 \times 10^{10}$	$7.28 \times 10^{12}$	

13	<sup>68</sup> Ga	$3.70 \times 10^8$	2	$1.05 \times 10^9$	$2.63 \times 10^{11}$	淋洗制备	外购
14	<sup>64</sup> Cu	$3.70 \times 10^8$	2	$1.04 \times 10^9$	$2.60 \times 10^{11}$		
15	<sup>89</sup> Zr	$3.70 \times 10^8$	2	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$		
16	<sup>124</sup> I	$3.70 \times 10^8$	2	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$		
17	<sup>99m</sup> Tc	$9.25 \times 10^8$	50	$5.54 \times 10^{10}$	$1.39 \times 10^{13}$	淋洗制备	SPECT 诊断
18	<sup>51</sup> Cr	$1.85 \times 10^8$	1	$1.85 \times 10^8$	$4.63 \times 10^{10}$		
19	<sup>123</sup> I	$1.85 \times 10^8$	1	$2.55 \times 10^8$	$6.38 \times 10^{10}$		
20	<sup>201</sup> Tl	$7.40 \times 10^7$	5	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{10}$		
21	<sup>32</sup> P	$1.85 \times 10^8$	5	$9.25 \times 10^8$	$2.32 \times 10^{11}$	敷贴治疗	外购
22	<sup>131</sup> I	$7.40 \times 10^9$	4	$2.96 \times 10^{10}$	$1.48 \times 10^{12}$		
23	<sup>131</sup> I	$3.70 \times 10^8$	10	$3.70 \times 10^9$	$9.25 \times 10^{11}$		
24	<sup>131</sup> I	$1.85 \times 10^5$	30	$5.55 \times 10^6$	$1.39 \times 10^9$		
25	<sup>177</sup> Lu	$3.70 \times 10^9$	1	$3.70 \times 10^9$	$1.85 \times 10^{11}$	甲癌治疗	核素治疗
26	<sup>35</sup> S	$3.70 \times 10^8$	1	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{10}$		
27	<sup>47</sup> Sc	$3.70 \times 10^8$	1	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{10}$		
28	<sup>89</sup> Sr	$1.85 \times 10^8$	2	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{10}$		
29	<sup>153</sup> Sm	$9.25 \times 10^8$	2	$1.85 \times 10^9$	$4.63 \times 10^{11}$	甲亢治疗	外购
30	<sup>186</sup> Re	$3.70 \times 10^9$	1	$3.70 \times 10^9$	$9.25 \times 10^{11}$		
31	<sup>188</sup> Re	$1.85 \times 10^9$	1	$1.85 \times 10^9$	$4.63 \times 10^{11}$		
32	<sup>221</sup> At	$7.40 \times 10^8$	1	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$		
33	<sup>223</sup> Ra	$1.11 \times 10^7$	1	$1.11 \times 10^7$	$2.78 \times 10^9$	甲功测定	核素治疗
34	<sup>225</sup> Ac	$1.11 \times 10^7$	1	$1.11 \times 10^7$	$2.78 \times 10^9$		
35	<sup>227</sup> Th	$1.11 \times 10^7$	1	$1.11 \times 10^7$	$2.78 \times 10^9$		
<b>射线装置</b>							
序号	射线装置 名称	型号	数量	类别	主要技术参数	使用场所	
1	回旋加速器	玖源-20	1	II类	最大质子能量20MeV 最大束流100μA	肿瘤科研楼负一层核 医学科药物制备区域 回旋加速器机房	
2	DSA	待定	1	II类	最大管电压125kV 最大管电流1250mA	肿瘤科研楼三层DSA 手术室	

3	直线加速器	待定	2	II类	最大 X 射线能量: 10MV 最大电子线能量: 22MeV X 线等中心点最大剂量率: 2400cGy/min 最大照射野: 40cm×40cm 影像引导系统: 150kV, 630mA 等中心处距地面高度: 1.295m	肿瘤科研楼负一层放 疗科直线加速器机房
4	CT模拟 定位机	待定	1	III类	最大管电压140kV 最大管电流1000mA	肿瘤科研楼负一层放 疗科CT模拟定位机房
5	PET-CT	待定	1	III类	最大管电压140kV 最大管电流1000mA	肿瘤科研楼一层核医
6	SPECT-CT	待定	2	III类	最大管电压140kV 最大管电流800mA	学科门诊诊疗区域

注: 半衰期较短的放射性同位素使用量需考虑衰变导致的活度降低; 半衰期极短的<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O  
还需在此基础上考虑院内运输等环节导致的活度降低。

### 1.3 目的和任务的由来

根据《中华人民共和国环境影响评价法》和《建设项目环境保护管理条例》，本项目需进行环境影响评价。根据《关于发布<射线装置分类>的公告》（国家环境保护总局公告 2017 年第 66 号），本项目涉及使用 II 类、III 类射线装置；根据《放射源分类办法》（国家环境保护总局公告 2005 年第 62 号），本项目涉及 III 类、V 类放射源；根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），核医学科涉及 3 处乙级非密封源工作场所。

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》中“五十五、核与辐射 172、核技术利用建设项目”中“…使用 II 类、III 类放射源；生产、使用 II 类射线装置的；乙、丙级非密封放射性物质工作场所（医疗机构使用植入治疗用放射性粒子源的除外）……”应编制环境影响报告表；“……使用 IV 类、V 类放射源的……生产、销售、使用 III 类射线装置的……”，应填报环境影响登记表。建设项目符合两个以上级别的划分原则时，按较高级别的评价等级评价。因此本项目应编制环境影响报告表。

建设单位委托西安旭奥环境科技有限公司（环评单位）承担本项目的环境影响评价工作。接受委托后，环评单位组织技术人员进行现场勘察调查，收集、整理有关资料，对项目的建设情况进行了初步分析，并根据建设项目的应用类型及所在地周围区域的环境特征，在现场勘察、资料收集、预测分析的基础上，按照《辐射环

境保护管理导则—核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016)的基本要求,编制了《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区核技术利用项目环境影响报告表》。

## 1.4 实践正当性及产业政策符合性分析

本项目开展多种肿瘤相关疾病的诊断、治疗,扩大了医院诊疗范围,提升接收患者数量,使更多患者能够就近就医,具有明显的社会效益;同时本项目提升医院诊疗能力,提升患者体验,提升医院的医疗能力和服务水平,在保障患者健康的同时也为医院创造了更大的经济效益。因此,本项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)“实践的正当性”的要求。

本项目属于中华人民共和国国家发展和改革委员会《产业结构调整指导目录(2024年本)》(2023年第7号令修改)鼓励类中“十三、医药,4.高端医疗器械创新发展:新型医用诊断设备和试剂,高性能医学影像设备,高端放射治疗设备……”,符合国家产业政策。

## 1.5 建设规模

### 1.5.1 核医学科

本次评价核医学科主要包括一层核医学科住院治疗区域、一层核医学科门诊诊疗区域、负一层放射性药物生产制备区域,共3个乙级非密封放射性物质工作场所。

一层核医学门诊诊疗区域配备1台PET-CT和1台PET-MR,使用<sup>18</sup>F、<sup>13</sup>N、<sup>11</sup>C、<sup>68</sup>Ga、<sup>15</sup>O、<sup>64</sup>Cu、<sup>89</sup>Zr、<sup>124</sup>I等放射性药物开展PET显像诊断;配备2台SPECT-CT(III类射线装置,型号待定),使用<sup>99m</sup>Tc、<sup>123</sup>I、<sup>201</sup>Tl等放射性药物开展SPECT显像诊断;使用<sup>47</sup>Sc、<sup>89</sup>Sr、<sup>153</sup>Sm、<sup>186</sup>Re、<sup>188</sup>Re、<sup>211</sup>At、<sup>223</sup>Ra、<sup>225</sup>Ac、<sup>227</sup>Th等核素开展多种门诊核素治疗。该场所最大日等效操作量为 $2.42\times10^9$ Bq,属于乙级非密封放射性物质工作场所。

一层核医学住院区域主要使用<sup>131</sup>I开展甲癌治疗、甲亢治疗、甲功测定,使用<sup>177</sup>Lu开展住院核素治疗;使用<sup>32</sup>P和1枚<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y放射源开展敷贴治疗。该场所最大日等效操作量为 $3.42\times10^9$ Bq,属于乙级非密封放射性物质工作场所。

负一层放射性药物生产制备区域使用1台医用质子回旋加速器生产<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F共4种放射性同位素;在生产热室使用<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc发生器制备<sup>99m</sup>Tc药物;使用<sup>68</sup>Ge-<sup>68</sup>Ga发生器制备<sup>68</sup>Ga药物。该场所最大日等效操作量为 $1.20\times10^9$ Bq,属于乙级

非密封放射性物质工作场所。

### 1.5.2 放疗科

本次评价放疗科主要建设 2 间直线加速器机房、1 间后装机房、1 间 CT 模拟定位机房及其他配套用房。

后装机房配备 1 台后装机，搭载 1 枚III类  $^{192}\text{Ir}$  放射源用于后装治疗，最大装源活度为  $3.7 \times 10^{11}\text{Bq}$  (10Ci)；2 间直线加速器机房各配备 1 台直线加速器 (II类射线装置) 开展放射治疗；CT 模拟定位机房配备 1 台 CT 模拟定位机 (III类射线装置)，开展直线加速器放射治疗和后装治疗前的模拟定位。

### 1.5.3 DSA 手术室

医院拟在肿瘤科研楼三层建设 1 间 DSA 手术室及控制室、设备间等配套辅助功能用房，配备 1 台 DSA (II类射线装置)，开展放射介入诊疗。

### 1.5.4 劳动定员和工作负荷

本项目共配备 27 名辐射工作人员，来自新聘或原有辐射工作人员，项目运行后不兼职医院的其他辐射工作。

核医学科共配备 16 名辐射工作人员。生产区域 1 名操作人员负责回旋加速器远程控制，1 名操作人员负责  $^{68}\text{Ga}$  药物淋洗、质控、分装，1 名操作人员负责  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  药物淋洗、质控、分装；门诊诊疗区域 2 名分装/注射人员负责 PET 药物、SPECT 药物的分装注射及门诊治疗药物注射，4 名工作人员负责 PET 摆位及检查，4 名工作人员负责 SPECT 摆位及检查；住院区域 1 名分装/质控人员负责甲癌患者、甲亢患者、 $^{177}\text{Lu}$  治疗患者给药，1 名工作人员负责甲功测定检查，1 名工作人员负责敷贴治疗。

分装、给药等环节约 1min/人次，PET 和 SPECT 检查约 15min/人次；甲功测定检查约 1min/人次，每名患者每日需测定 3 次；敷贴治疗敷贴器放置时间约 0.5min/人次， $^{32}\text{P}$  敷贴器制作时间约 0.5min/人次。

放疗科共配备 7 名辐射工作人员。每间直线加速器机房配备 2 名工作人员负责直线加速器操作，后装机房配备 1 名工作人员负责后装机操作和患者摆位，CT 模拟定位机房配备 2 名工作人员负责设备操作及患者摆位。2 台直线加速器等中心点最大剂量率均为 2400cGy/min，平均每人治疗剂量为 4.5Gy，单人治疗出束时间为 11.25s，调强 (N=5) 下单人治疗出束时间为 56.25s，按 1min 计算；后装治疗患者治疗时间为 6min/人次，CT 模拟定位出束时间约 0.5min/人次。

DSA 共配备 4 名辐射工作人员。2 名手术医生和 1 名手术护士负责介入手术，1 名影像工作人员负责 DSA 设备操作。DSA 手术室每年最多接诊 1000 名患者，每台手术透视状态下最长出束 10min，摄影状态下最长出束 0.5min。

本项目劳动定员及工作负荷见表 1-2。

表 1-2 项目劳动定员及工作负荷

辐射工作场所	岗位	受照时间	工作人员数量	年最大工作负荷
核医学科药物制备区域	回旋加速器操作	1h/天	1	生产制备 250 次
	药物转运	5min/天		
	<sup>68</sup> Ga 药物淋洗、标记、分装	30min/天		
	<sup>99m</sup> Tc 药物淋洗、标记、分装	30min/天		
	药物质控	5min/天		
核医学科门诊诊疗区域	PET 药物分装	1min/人次	1	11000 人
	PET 药物注射	1min/人次		
	门诊治疗核素注射	1min/人次		
	SPECT 药物分装	1min/人次	1	3250 人
	SPECT 药物注射	1min/人次		
	PET 摆位 (PET-CT)	1min/人次		
	PET 检查 (PET-CT)	15min/人次	2	7500 人
	PET 摆位 (PET-MR)	1min/人次		
	PET 检查 (PET-MR)	15min/人次	2	7500 人
	SPECT 摆位 (SPECT-CT1)	1min/人次		
	SPECT 检查 (SPECT-CT1)	15min/人次	2	7500 人
	SPECT 摆位 (SPECT-CT2)	1min/人次		
	SPECT 检查 (SPECT-CT2)	15min/人次	2	7500 人
核医学科住院治疗区域	<sup>177</sup> Lu 药物注射	1min/人次	1	50 人
	甲癌分装/给药	1min/人次		
	甲亢、甲功分装/给药	1min/人次		
	甲功测定检查	3min/人次	1	7500 人
	<sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y 敷贴源放置	0.5min/人次	1	1000 人
DSA 手术室	<sup>32</sup> P 敷贴器制作、放置	1min/人次		
	介入医生、护士 (透视)	10min/人次	3	1000 人
	介入医生、护士 (摄影)	0.5min/人次		
	影像工作人员 (透视)	10min/人次	1	1000 人
	影像工作人员 (摄影)	0.5min/人次		
10MV 直线加速器机房 1	操作人员	1min/人次	2	5000 人
10MV 直线加速器机房 2	操作人员	1min/人次	2	5000 人

后装机房	操作人员	6min/人次	1	2500 人
CT 模拟定位机房	操作人员	0.5min/人次	2	12500 人

注：考虑分期验收或设备故障等情况，核医学科每间诊断机房日最大接诊人数按 30 人考虑。

### 1.5.5 项目选址及周边关系

#### 1.5.5.1 医院地理位置及四邻关系

医院位于陕西省榆林市榆阳区文化南路与康安路的交汇处，地理坐标为经度：109.727212° E，纬度：38.273142° N，地理位置见图 1-1。医院北侧隔林河路为城投榆溪圣境小区，西侧隔永泰路为空地，南侧隔康安路为玉景园小区、星云巷小区和千巨大厦，东侧隔文化南路为西港锦天城小区，医院四邻关系见图 1-3。

#### 1.5.5.2 医院总平面布置

医院东部现有一病区包括门诊医技综合楼、病房综合楼、行政后勤综合楼、高压氧舱、发热门诊等建筑。

医院西部本次新建二病区主要包括肿瘤科研楼、医疗废物暂存间及污水处理站和液氧站，本项目放疗科位于肿瘤科研楼负一层北侧，核医学科位于肿瘤科研楼一层、负一层北侧，DSA 手术室位于肿瘤科研楼三层北部。医院总平面布局见图 1-3。

#### 1.5.5.3 选址布局及合理性

##### （1）核医学科

核医学科药物生产区域位于肿瘤科研楼负一层西北角，包括 1 间回旋加速器机房、1 间淋洗制备间及合成热室、质控室等配套辅助用房。北侧和西侧为土层，南侧为消防水池和水泵房，东侧为放疗科区域，上方为核医一层学科区域，下方负二层为停车场和土层。

核医学科住院治疗区域位于肿瘤科研楼一层西北角，包括敷贴室、吸碘率室、分药间、给药区、4 间甲癌病房、1 间 <sup>177</sup>Lu 病房等区域及出院检测室、污染被服库等辅助用房。核医学科住院治疗区域北侧为风井、楼梯间、电梯间等区域，西侧为楼外绿化和道路，南侧为影像科区域，东侧为核医学科门诊诊疗区域。

核医学科门诊诊疗区域位于肿瘤科研楼一层西北角，包括 2 间 SPECT-CT 机房、1 间 PET-CT 机房、1 间 PET-MR 机房及给药准备间、注射后候诊室、留观室等配套附属用房。核医学科门诊诊疗区域北侧为核医学科阅片室、诊室、护士站等区域，西侧为核医学科住院治疗区域，南侧为影像科区域，东侧为核医学科示教室、会议室等区域。

衰变池位于肿瘤科研楼北侧地下，正上方为院内道路绿化，临近污水处理站，且避开人员就诊主要通道，活动人员较少。

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）和《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中相关选址要求，核医学科选址具体情况分析见表 1-3。

表 1-3 核医学科选址合理性分析

法规标准	相关要求	设计情况	评价
《核医学辐射防护与安全要求》 （HJ1188-2021）	5.1.1 核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层，设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。	核医学科集中布设于医院肿瘤科研楼一层、负一层西北角一端，肿瘤科研楼为医疗建筑，仅在工作时间开放，无人长期居留。通过门禁设计及合适的时间、交通模式来控制辐射源的活动，可实现工作人员、患者、放射性药物、放射性废物路径相对独立。	符合要求
	5.1.2 核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并应与非放射性工作场所有明确的分界隔离。	核医学科工作场所相邻区域无产科、儿科、食堂等部门或人员密集区。核医学科与非放射性工作场所有明确的分界墙隔离，工作场所不毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区。	符合要求
	5.1.3 核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。	核医学科放射性废气通过独立的排风管道经排风立管引至肿瘤综合楼楼顶朝西排放，废气排放前经活性炭吸附处理；排风口位置离周边高层建筑较远。	符合要求
《核医学放射防护要求》 （GBZ120-2020）	5.1.1 在医疗机构内部区域选择核医学场址，应充分考虑周围场所的安全，不应邻接产科、儿科、食堂等部门，这些部门选址时也应避开核医学场所。尽可能做到相对独立布置或集中设置，宜有单独出、入口，出口不宜设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。	核医学工作场所功能用房相对集中设置，不邻接产科、儿科、食堂等部门；核医学科设计有单独的出入口和独立的候诊区，出口设置在肿瘤科研楼西侧，不涉及门诊大厅、收费处等人群稠密区域。	符合要求

综上所述，本项目核医学科选址满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）和《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中选址布局相关要求。

## （2）放疗科

本项目放疗科位于肿瘤科研楼负二层北部，包括 2 间医用电子直线加速器机房，1 间后装机房，1 间 CT 模拟定位机房及其他辅助功能用房。

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）《放射治疗放射防护要

求》(GBZ121-2020)中相关选址要求,本项目放疗科选址合理性分析见表1-4。

表 1-4 放疗科选址合理性分析

法规标准	标准要求	设计情况	评价
《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)	5.1.1 放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响,不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	放疗科位于医院肿瘤科研楼负一层,用地类型为医疗卫生用地,不涉及民居、写字楼及商住两用的建筑物。	符合要求
	5.1.2 放射治疗场所宜单独选址、集中建设,或设置在多层建筑物的底层的一端,尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域,或人员流动性大的商业活动区域。	放疗科位于肿瘤科研楼负一层北侧,放疗机房下方为封闭空间。放疗科周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域,也无人员流动性大的商业活动区域。	符合要求
《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)	6.1.1 放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端;放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造,并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。	放疗科位于肿瘤科研楼负一层北侧,为外科综合楼底部的一端,直线加速器机房位于放疗科南侧,后装机房位于北侧,中间为模拟定位机房。机房与辅助设施同时设计和建造。	符合要求

综上所述,本项目放疗科选址满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)和《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)中选址布局相关要求。

### (3) DSA手术室

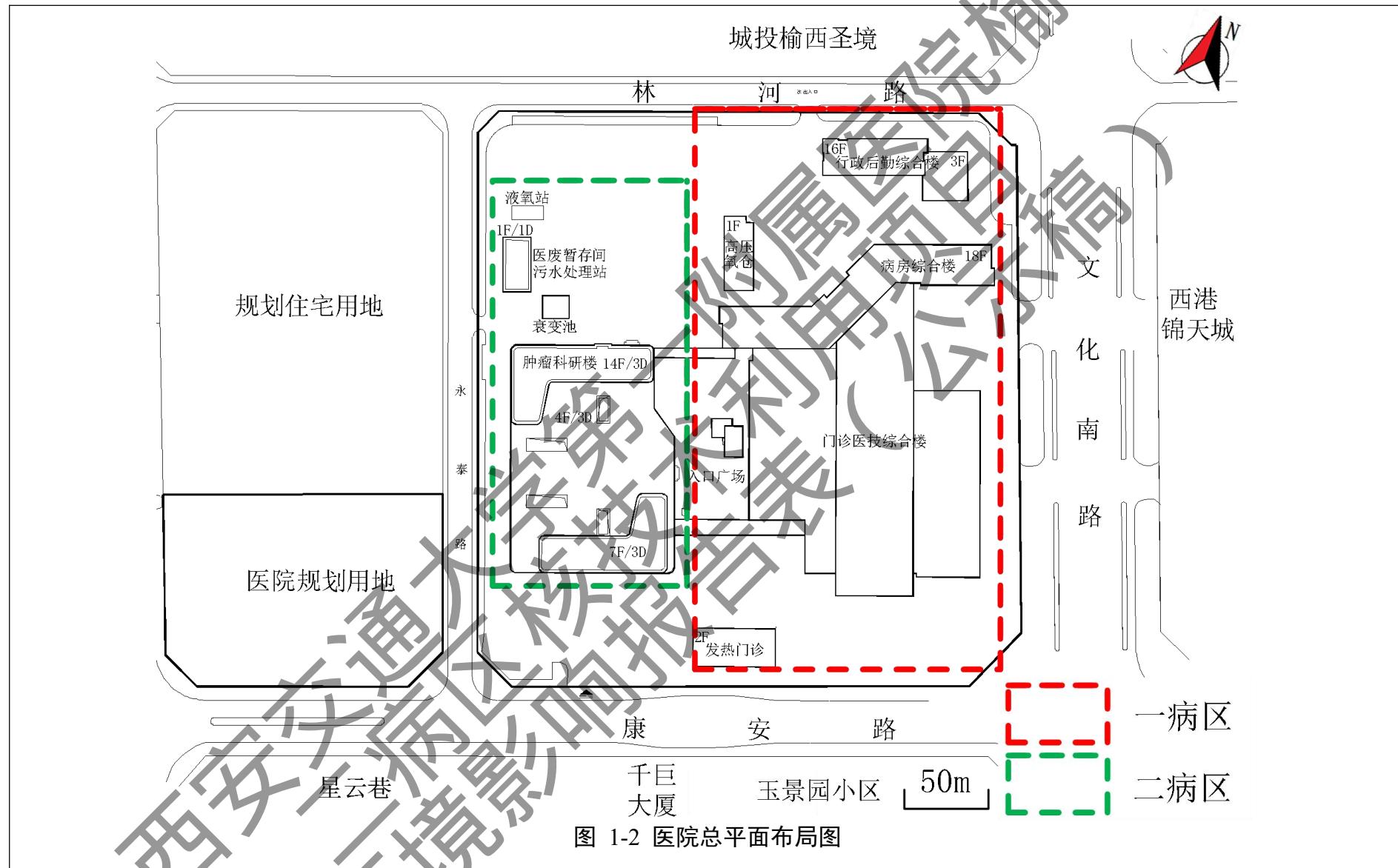
本项目 DSA 手术室位于肿瘤科研楼三层中部,北侧和南侧为走廊,西侧为操作间和污物通道,东侧为设备间,上方为体检科会议室,下方为内镜中心胃镜室和走廊。

DSA 手术室位于手术室区域,与医院其他手术室集中布局。手术室区域为相对独立的限制进入,仅有手术人员和患者可进入。手术室设置了操作间和设备间,污物通道独立设置。选址布局有利于控制周围公众剂量,也有利于辐射安全管理,因此 DSA 手术室选址布局合理。

肿瘤科研楼负二层至四层平面布局见图 1-4 至图 1-9,各工作场所平面布局见图 1-10 至图 1-13。



图 1-1 本项目地理位置图



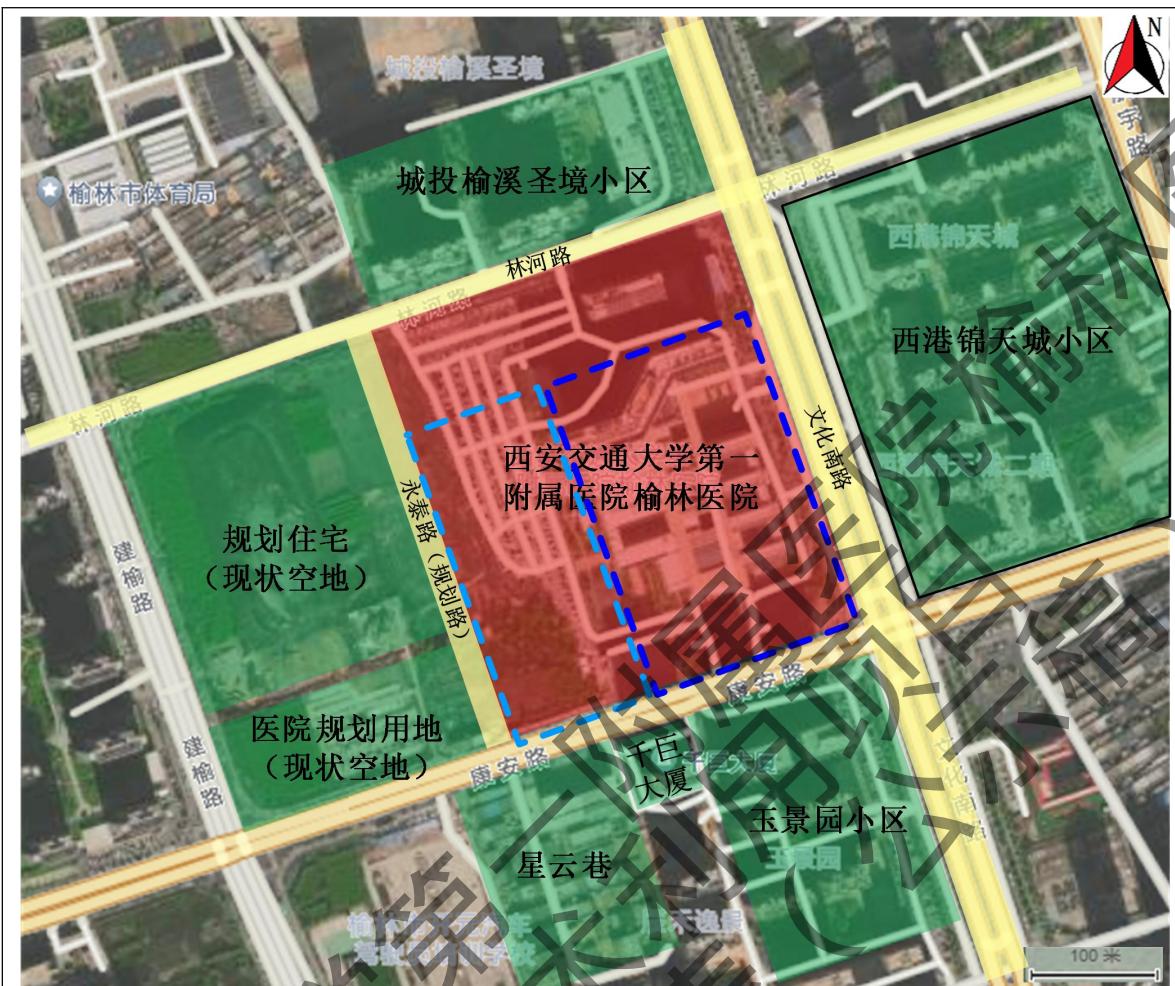


图 1-3 医院四邻关系图

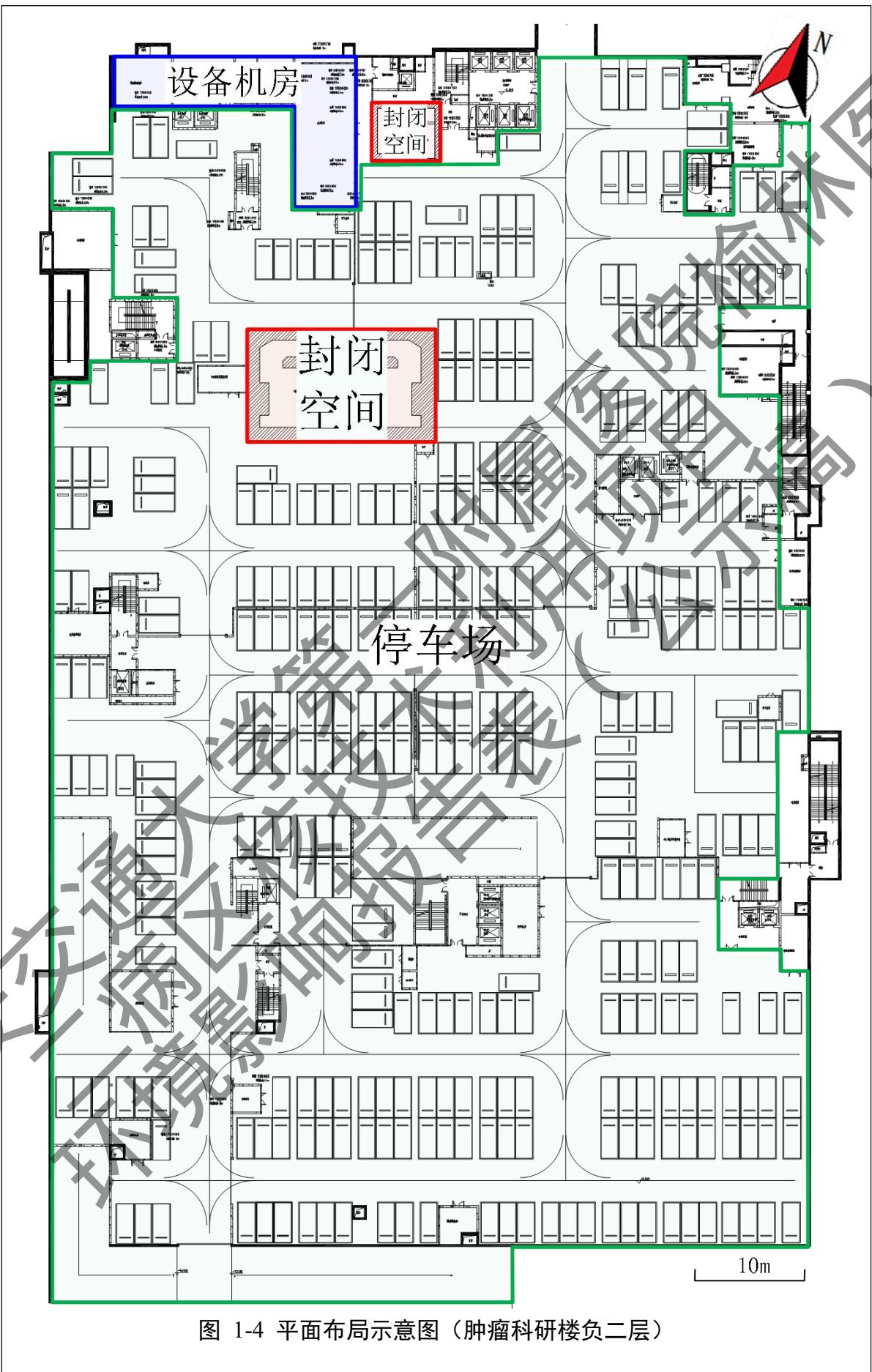


图 1-4 平面布局示意图（肿瘤科研楼负二层）

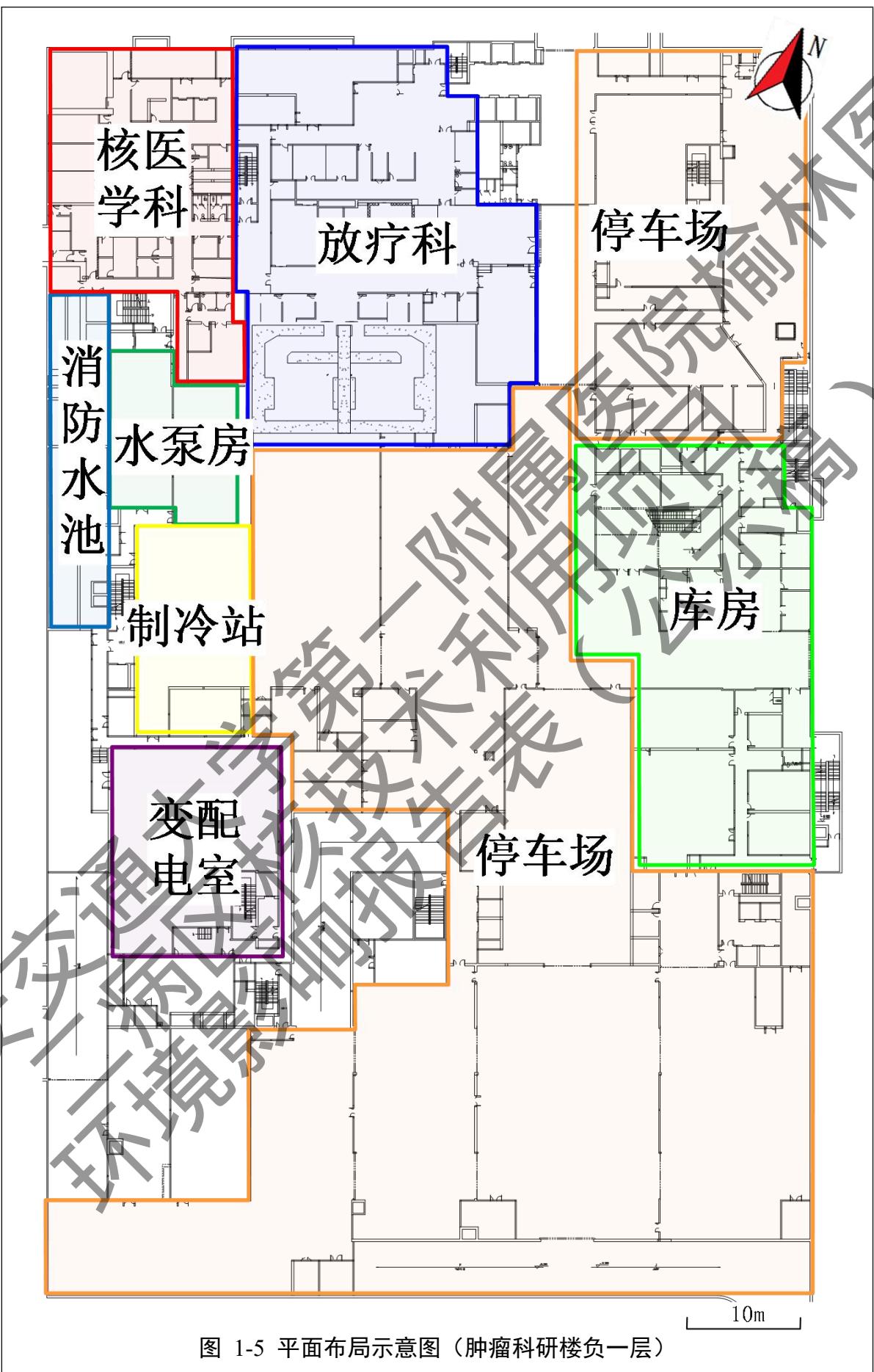
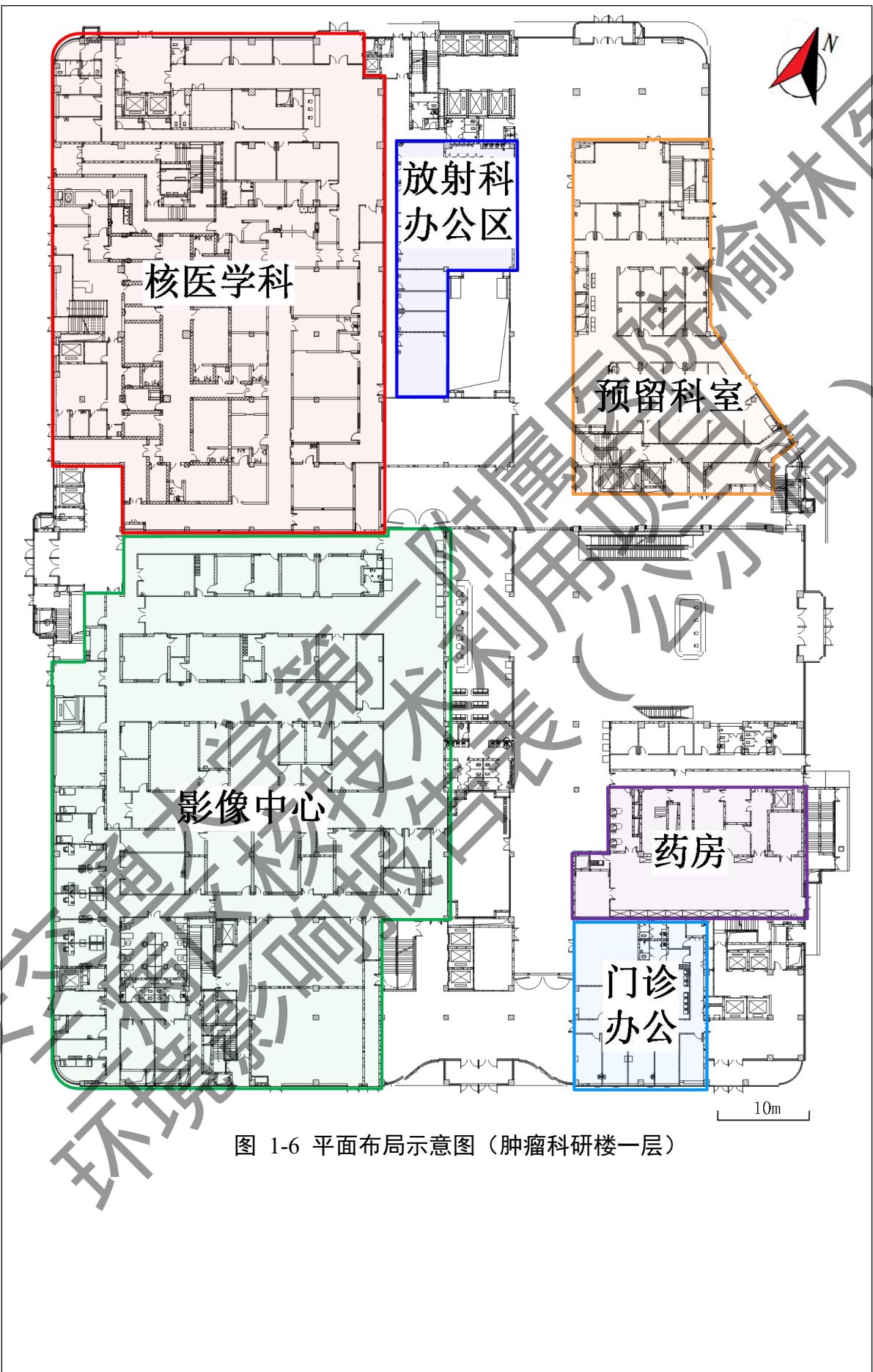
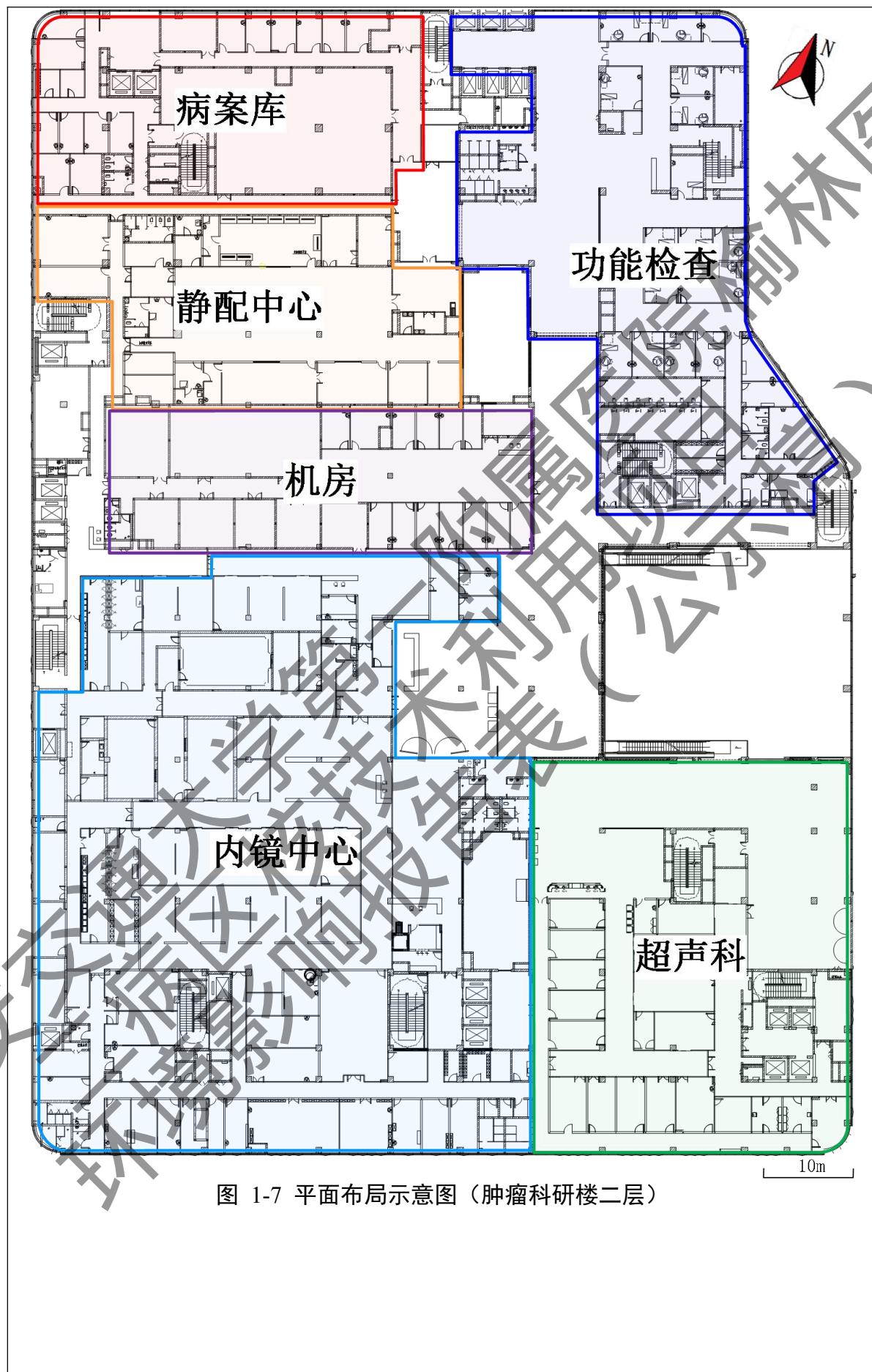


图 1-5 平面布局示意图（肿瘤科研楼负一层）





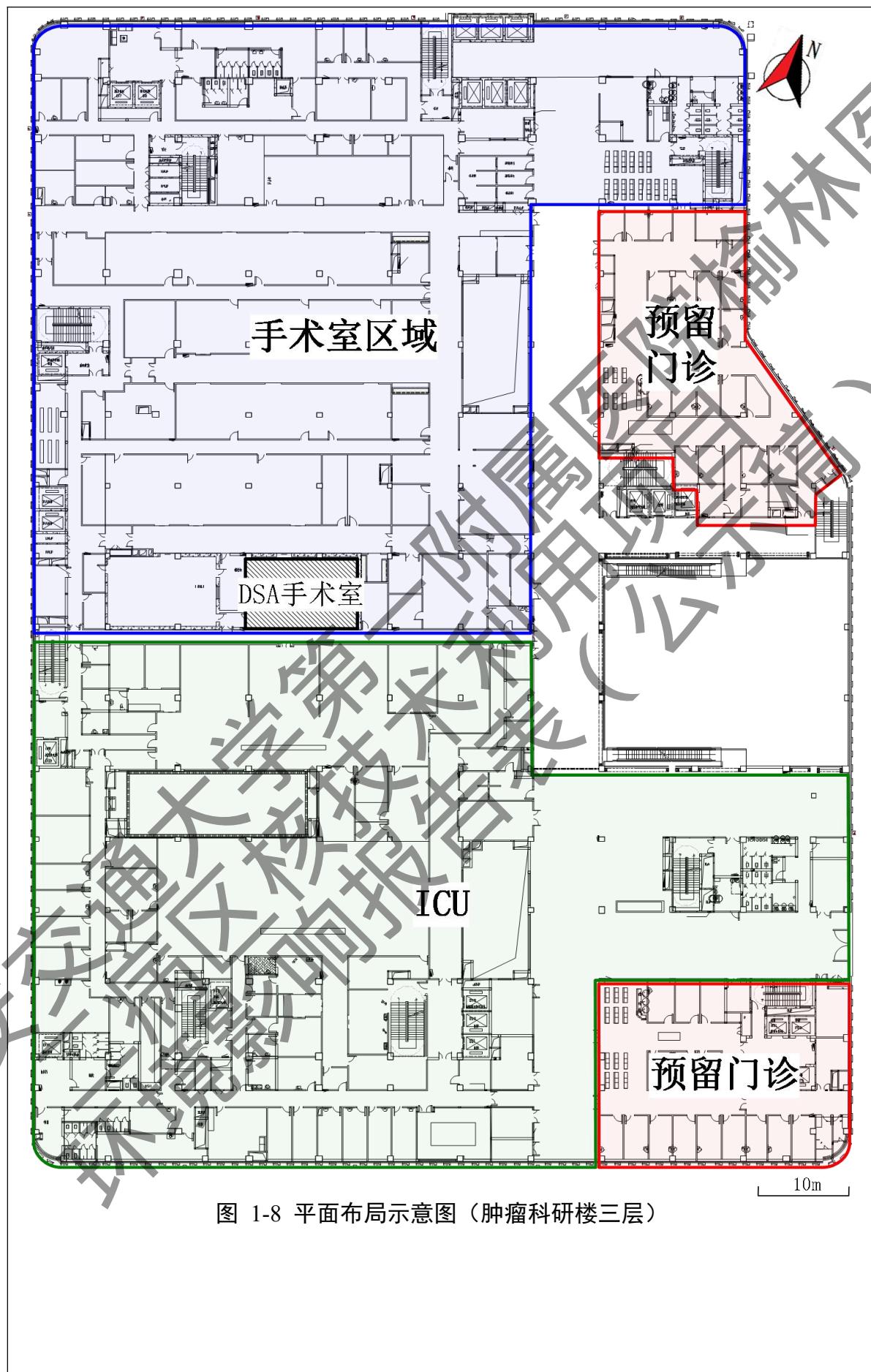
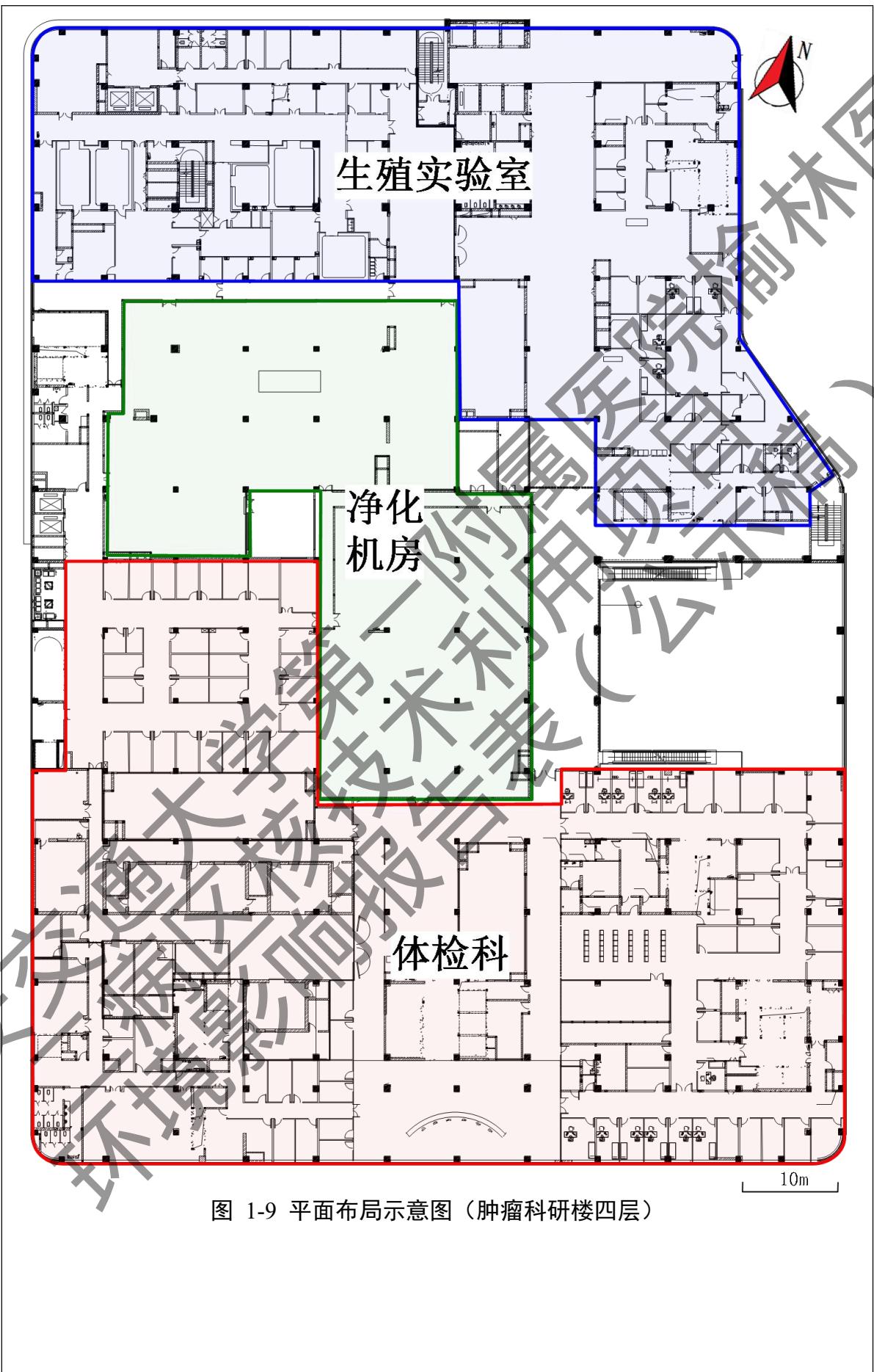
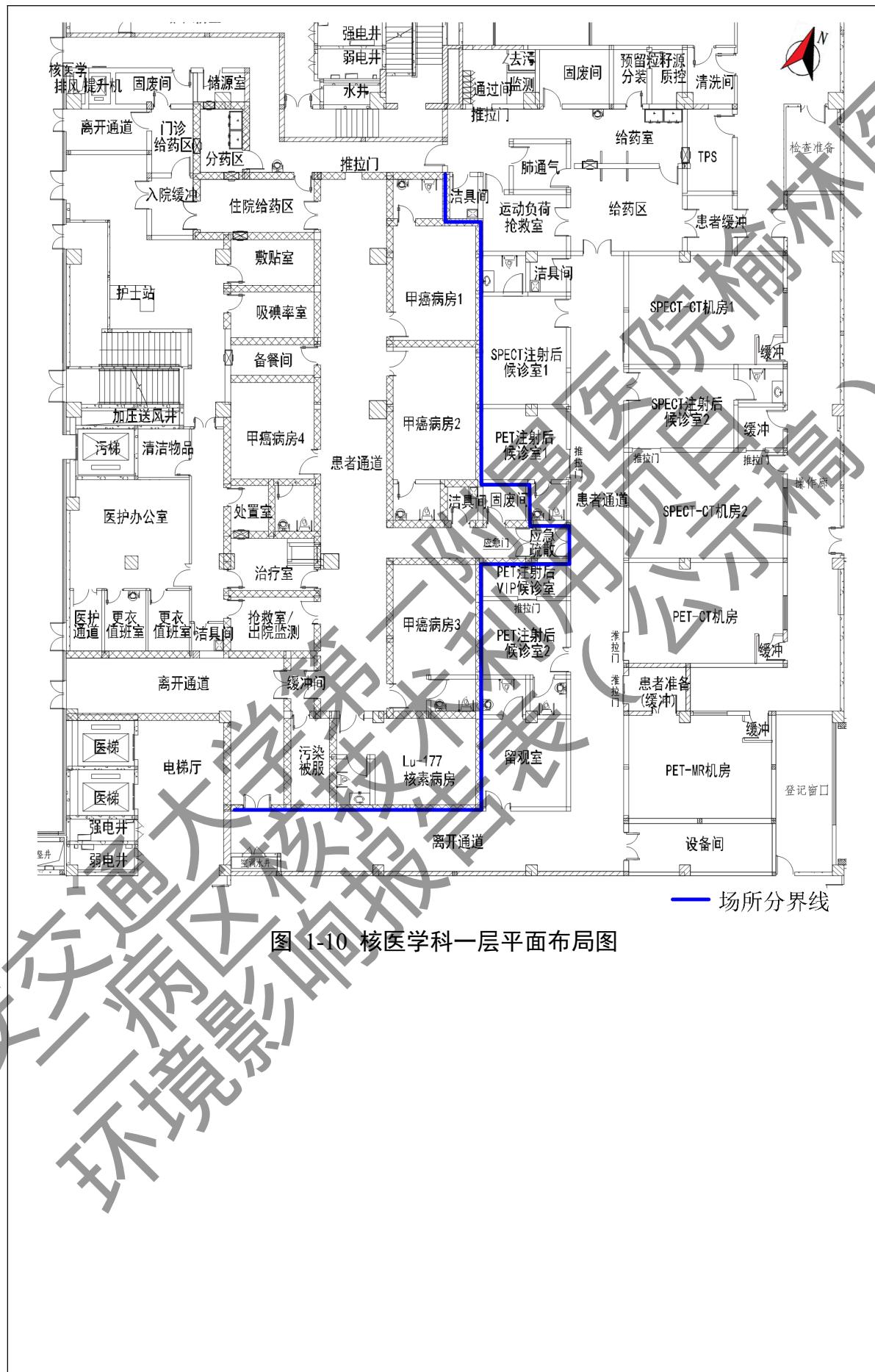
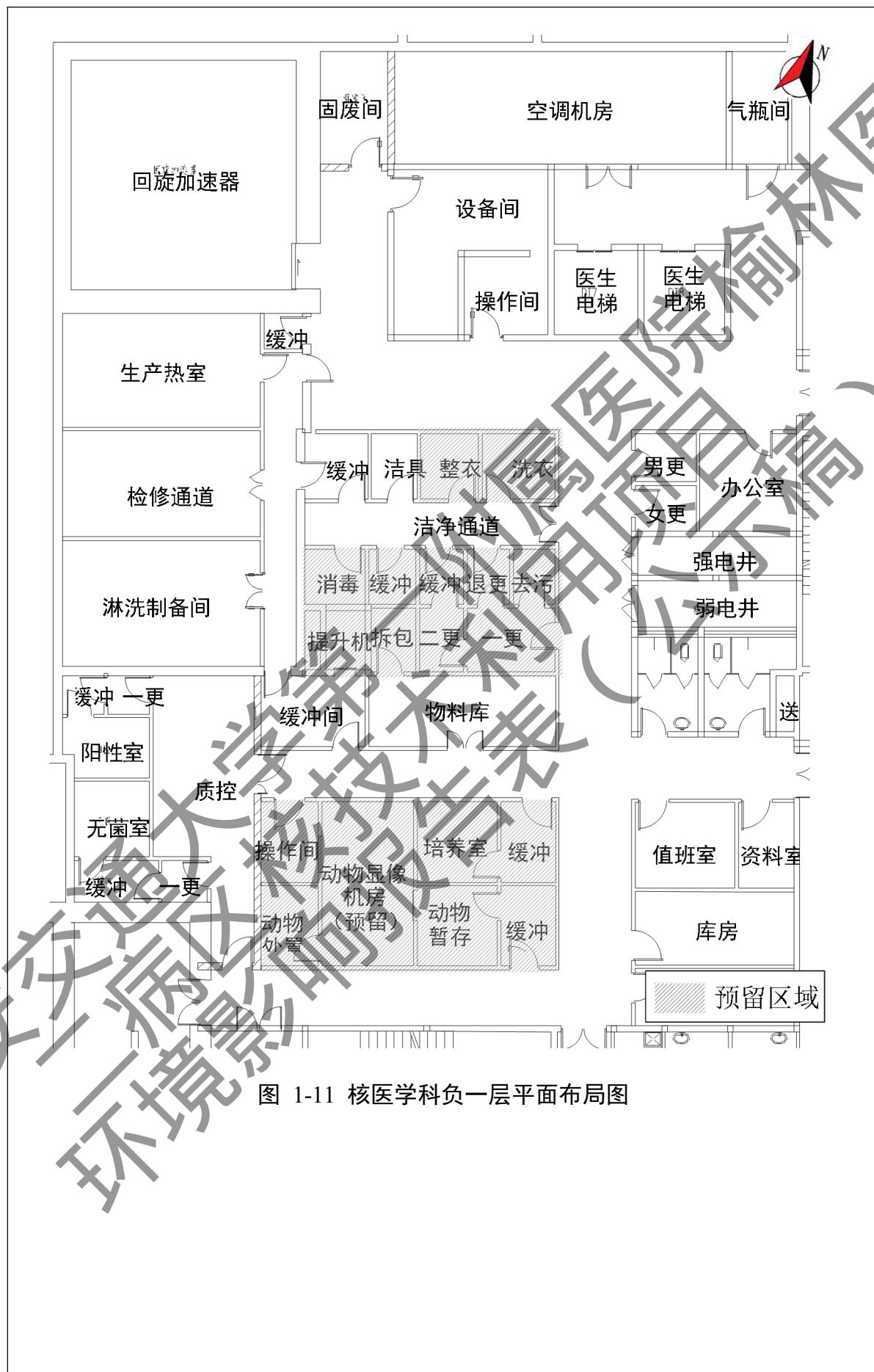


图 1-8 平面布局示意图 (肿瘤科研楼三层)







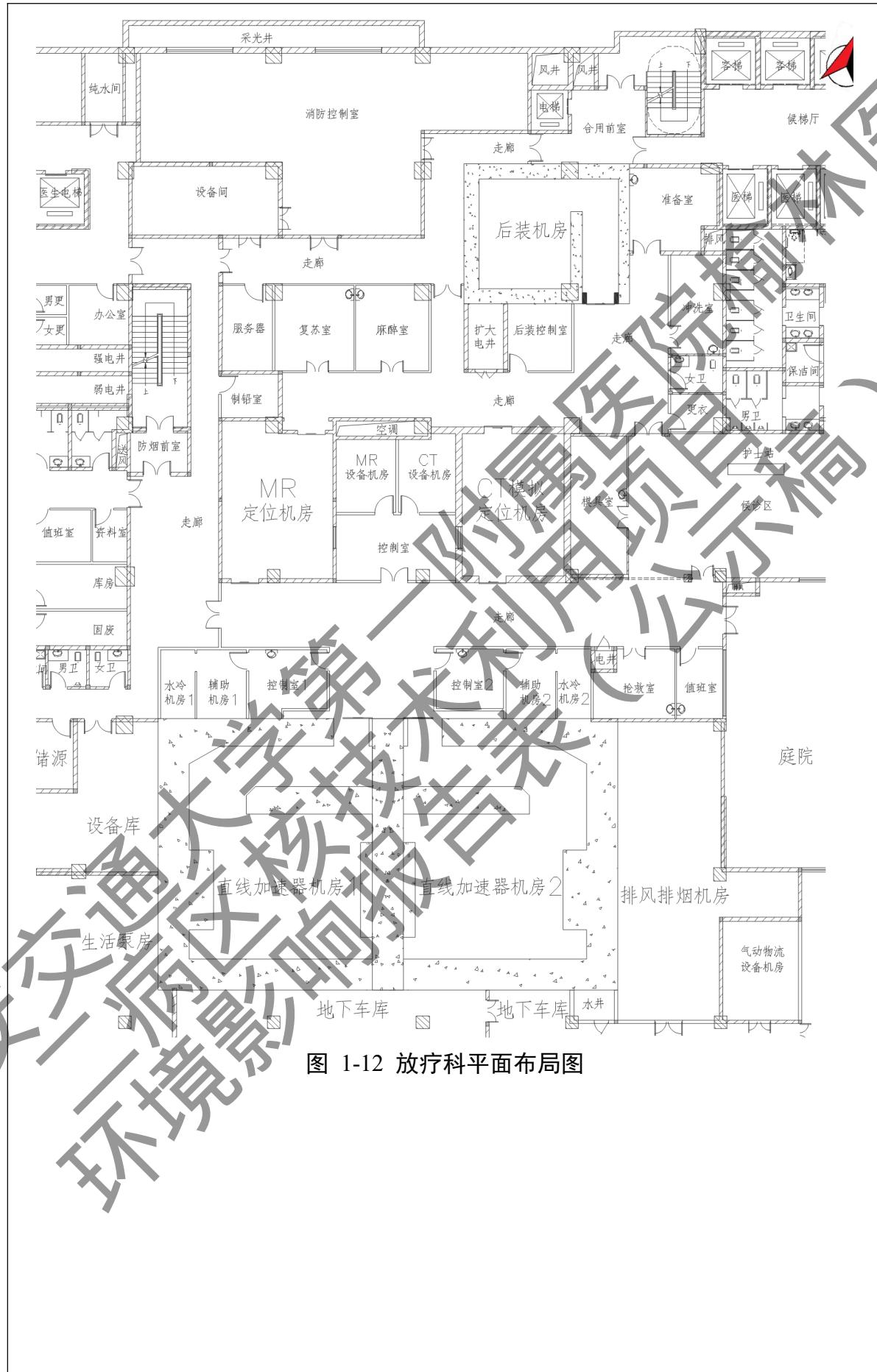




图 1-13 DSA 手术室平面布局图

## 1.6 现有核技术利用项目情况

### 1.6.1 环保手续履行情况

医院现持有 2024 年 7 月 24 日由陕西省生态环境厅核发的辐射安全许可证，证书编号：陕环辐证[60008]，有效期至 2029 年 3 月 8 日。许可种类和范围：使用 III 类放射源；使用 II 类、III 类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所。辐射安全许可证核准内容及环保手续履行情况见表 1-5。

表 1-5 陕环辐证[60008]号核准内容及环保手续履行情况

(一) 放射源									
序号	核素	类别	总活度(贝克)/活度(贝克)×枚数	活动种类	工作场所	环评手续	验收手续		
1	Ir-192	III类	$3.7 \times 10^{11} \times 1$	使用	门诊部负一层后装治疗室	陕环批复〔2011〕13号	自主验收(2025.7)		
(二) 非密封放射性物质									
序号	工作场所	场所等级	核素	日等效最大操作量(Bq)	年最大用量(Bq)	活动种类	环评手续	验收手续	
1	门诊部负一层核医学科	乙级	I-131	$3.7 \times 10^6$	$1.39 \times 10^{11}$	使用	陕环批复〔2011〕13号	已建成, 尚未投入使用	
2			Tc-99m	$1.85 \times 10^8$	$4.625 \times 10^{12}$		陕环批复〔2011〕13号	自主验收(2025.7)	
3			F-18	$2.6 \times 10^7$	$6.5 \times 10^{12}$		陕环批复〔2026〕1号	核医学科改建内容尚未竣工验收	
(三) 射线装置									
序号	装置名称	型号规格	类别	装置数量	场所	活动种类	环评手续	验收手续	
1	数字血管造影机	Integrисall ural2	III类	1	住院部一层介入手术室3	使用	陕环批复〔2011〕13号	陕辐环验字〔2017〕第042号	
2	单板 DR	Diigital Dignost 2.0	III类	1	门诊部一层拍片3室		陕环批复〔2017〕308号		
3	双板 DR	Diigital Dignost 2.0	III类	1	门诊部一层拍片1室				
4	64排CT	Sensation 64	III类	1	门诊部一层CT检查室1				
5	骨密度仪	Lunar iDXA	III类	1	门诊部一层骨密度室				
6	256排CT	Brilliance iCT	III类	1	门诊部一层CT检查室2				
7	移动DR	Mobilett Mira	III类	1	门诊部一层造影室2				

8	双板 DR	Ysio	III类	1	门诊部一层拍片 2 室	陕环批复〔2011〕13号	
9	移动式 C 臂机	Siremobil Compact L	III类	1	门诊部三层手术室 13		
10	数字血管造影机	Artis Zee go	II类	1	住院部一层介入手术室 2		
11	移动式 C 臂机	ARCADIS Varic	III类	1	门诊部三层手术室 14		
12	移动式 C 臂机	ARCADIS Varic	III类	1	门诊部三层手术室 15		
13	口腔 CT	Promax 3D	III类	1	门诊部四层口腔 CT 室		
14	单板 DR	DigiEye 280T	III类	1	门诊部三层透视拍片室		
15	直线加速器	Clinac iX	II类	1	门诊部负一层加速器治疗室		
16	模拟定位机	SL-ID	III类	1	门诊部负一层模拟机房		
17	碎石定位机	HB-ESWL-BG	III类	1	门诊部一层碎石室		
18	牙片机	YKY-G	III类	1	门诊部四层牙片室		
19	16 排大孔径 CT 机	Discovery CT590 RT	III类	1	门诊部负一层 CT 定位室		
20	64 排 128 层 CT	SOMATOM Perspective	III类	1	门诊部一层 CT 检查室		
21	X 射线计算机体层摄影设备	SOMATOM Force	III类	1	门诊部一层 CT 检查室 3		
22	数字化 X 射线透视摄影系统	EXAVISTA	III类	1	门诊部一层造影室 2		
23	移动式 C 型臂 X 射线机	Brivo OCE 785	III类	1	门诊部三层手术室 12		
24	数字化移动式摄影 X 射线机	Optima XR240amx	III类	1	移动 DR 无固定使用场所		
25	数字化乳腺 X 射线机	Senographe Pristina	III类	1	门诊部一层乳腺检查室		

26	DSA	Discovery IGS 7 OR	II类	1	门诊部三层复合手术室	榆政审批生态发〔2022〕72号 榆政环辐批复〔2024〕19号 备案号: 20246108020000057 (2024.4.11) 备案号: 20246108020000074 (2024.5.15) 建设中	自主验收 (2022.9.28)
27	DSA	Azurion 7 M20	III类	1	住院部一层介入手术室 1		自主验收 (2024.6.22)
28	移动式C型臂X射线机	cios spin	III类	1	门诊部三层手术室 12		
29	CT 机	Revolution ACE	III类	1	门诊部一层 CT 检查室 4		
30	PET-CT	uMI Panorama 28C	III类	1	病房综合楼负一层核医学科 PET-CT 机房		

注: 现有核医学科<sup>131</sup>I治疗取得辐射安全许可证后尚未完成竣工环保验收, 也未开展有关诊疗工作, 后续该项拟从辐射安全许可证上删除。

表 2 放射源

序号	核素名称	放射性活度 (Bq) / 活度 (Bq) × 枚数	类别	活动类别	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
1	<sup>192</sup> Ir	$3.7 \times 10^{11}$ Bq × 1枚	III类	使用	放射治疗	肿瘤科研楼负一层后装机房	后装机头内	新增
2	<sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y	$1.85 \times 10^9$ Bq × 1枚	V类	使用	敷贴治疗	肿瘤科研楼一层敷贴室	敷贴室铅箱内	新增

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	<sup>11</sup> C	液体, 半衰期 20min, 低毒	生产	$4.18 \times 10^9$	$4.18 \times 10^7$	$5.23 \times 10^{11}$	PET 显像检查	很简单操作	负一层核医学科药物制剂区域	装在储源容器中, 暂存于一层核医学科门诊诊疗区域 PET 手套箱内
2	<sup>13</sup> N	液体, 半衰期 10min, 低毒		$1.48 \times 10^9$	$1.48 \times 10^7$	$1.85 \times 10^{11}$				
3	<sup>15</sup> O	液体, 半衰期 2min, 低毒		$1.48 \times 10^9$	$1.48 \times 10^7$	$1.85 \times 10^{11}$				
4	<sup>18</sup> F	液体, 半衰期 109.8min, 低毒		$2.91 \times 10^{10}$	$2.91 \times 10^8$	$7.28 \times 10^{12}$				
5	<sup>68</sup> Ge	固体, 半衰期 271d, 中毒	贮存	$1.85 \times 10^9$	$1.85 \times 10^7$	$3.70 \times 10^9$	淋洗制备	贮存	贮存于合成热室淋洗模块箱内	装在储源容器中, 暂存于一层核医学科门诊诊疗区域 PET 手套
6	<sup>68</sup> Ga	液体, 半衰期 1h, 低毒	淋洗制备	$7.40 \times 10^{10}$	$7.40 \times 10^7$	$2.63 \times 10^{11}$	PET 显像检查	简单操作		
7	<sup>99</sup> Mo	固体, 半衰期 2.7d, 低毒	贮存	$7.40 \times 10^{10}$	$7.40 \times 10^7$	$5.55 \times 10^{12}$	淋洗制备	贮存		

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		
8	$^{99m}\text{Tc}$	液体, 半衰期 6.02h, 低毒	淋洗制备 使用	$3.70 \times 10^{10}$	$3.70 \times 10^7$	$1.39 \times 10^{13}$	SPECT-CT 显像检查	简单操作	一层 核医学科门诊诊疗区域	箱内		
9	$^{11}\text{C}$	液体, 半衰期 20min, 低毒		$2.09 \times 10^9$	$2.09 \times 10^6$	$5.23 \times 10^{11}$	PET 显像检查	很简单操作		装在储源容器中, 暂存于一层 核医学科门诊诊疗区域 SPECT 手套箱内		
10	$^{13}\text{N}$	液体, 半衰期 10min, 低毒		$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^5$	$1.85 \times 10^{11}$						
11	$^{15}\text{O}$	液体, 半衰期 2min, 低毒		$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^5$	$1.85 \times 10^{11}$						
12	$^{18}\text{F}$	液体, 半衰期 109.8min, 低毒		$2.91 \times 10^{10}$	$2.91 \times 10^7$	$7.28 \times 10^{12}$						
13	$^{68}\text{Ga}$	液体, 半衰期 1h, 低毒		$1.05 \times 10^9$	$1.05 \times 10^6$	$2.63 \times 10^{11}$						
14	$^{64}\text{Cu}$	液体, 半衰期 12.7h, 低毒		$1.04 \times 10^9$	$1.04 \times 10^6$	$2.60 \times 10^{11}$						
15	$^{89}\text{Zr}$	液体, 半衰期 3.3d, 低毒		$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^6$	$1.85 \times 10^{11}$						
16	$^{124}\text{I}$	液体, 半衰期 4.2d, 低毒		$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^5$	$1.85 \times 10^{11}$						
17	$^{51}\text{Cr}$	液体, 半衰期 27.7d, 低毒		$1.85 \times 10^8$	$1.85 \times 10^5$	$4.63 \times 10^{10}$	SPECT-CT 显像检查	很简单操作				
18	$^{99m}\text{Tc}$	液体, 半衰期 6.02h, 低毒		$5.54 \times 10^{10}$	$5.54 \times 10^7$	$1.39 \times 10^{13}$						
19	$^{123}\text{I}$	液体, 半衰期 13.2h, 中毒		$2.55 \times 10^8$	$2.55 \times 10^6$	$6.38 \times 10^{10}$						

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
20	$^{201}\text{Tl}$	液体, 半衰期 3.04d, 低毒	使用	$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^5$	$9.25 \times 10^{10}$	核素治疗	简单操作	暂存于一层核医学科治疗区域给药室 储源容器中	
21	$^{35}\text{S}$	液体, 半衰期 87.4d, 中毒		$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^7$	$9.25 \times 10^{10}$				
22	$^{47}\text{Sc}$	液体, 半衰期 3.35d, 中毒		$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^7$	$9.25 \times 10^{10}$				
23	$^{89}\text{Sr}$	液体, 半衰期 50.6d, 中毒		$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^7$	$9.25 \times 10^{10}$				
24	$^{153}\text{Sm}$	液体, 半衰期 1.93d, 中毒		$1.85 \times 10^9$	$1.85 \times 10^8$	$4.63 \times 10^{11}$				
25	$^{186}\text{Re}$	液体, 半衰期 3.72d, 中毒		$3.70 \times 10^9$	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{11}$				
26	$^{188}\text{Re}$	液体, 半衰期 17h, 中毒		$1.85 \times 10^9$	$1.85 \times 10^8$	$4.63 \times 10^{11}$				
27	$^{211}\text{At}$	液体, 半衰期 7.2h, 高毒		$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$				
28	$^{223}\text{Ra}$	液体, 半衰期 11.4d, 低毒		$1.11 \times 10^7$	$1.11 \times 10^8$	$2.78 \times 10^9$				
29	$^{225}\text{Ac}$	液体, 半衰期 10d, 极毒		$1.11 \times 10^7$	$1.11 \times 10^8$	$2.78 \times 10^9$				
30	$^{227}\text{Th}$	液体, 半衰期 18.7d, 极毒		$1.11 \times 10^7$	$1.11 \times 10^8$	$2.78 \times 10^9$				

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
31	$^{32}\text{P}$	液体, 半衰期 14.2d, 中毒	使用	$9.25 \times 10^8$	$9.25 \times 10^7$	$2.32 \times 10^{11}$	敷贴治疗	简单操作	一层核医学科住院治疗区域	暂存于一层核医学科住院治疗区域敷贴手套箱内
32	$^{131}\text{I}$	固体, 半衰期 8.02d, 中毒		$5.55 \times 10^6$	$5.55 \times 10^5$	$1.48 \times 10^{12}$	甲功测定			暂存于一层核医学科住院治疗区域分药区
33	$^{131}\text{I}$			$3.70 \times 10^9$	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{11}$	甲亢治疗			暂存于一层核医学科住院治疗区域自动分装仪内
34	$^{131}\text{I}$			$2.96 \times 10^{10}$	$2.96 \times 10^9$	$1.39 \times 10^9$	甲癌治疗			暂存于一层核医学科住院治疗区域分药区
35	$^{177}\text{Lu}$	液体, 半衰期 6.64d, 中毒		$3.70 \times 10^9$	$3.70 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$	核素治疗			暂存于一层核医学科住院治疗区域分药区

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	额定电流 (mA) / 剂量率 (Gy/h)	用途	工作场所	备注
1	回旋加速器	II类	1台	玖源-20	质子	20MeV	最大束流强度100 $\mu$ A	PET药物制备	回旋加速器机房	新购
2	医用电子直线加速器	II类	2台	待定	电子	10MV	最大 X 射线能量: 10MV 最大电子线能量: 22MeV X 线等中心点最大剂量率: 2400cGy/min	放射治疗	直线加速器机房	新购

(二) X 射线机: 包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途	工作场所	备注
1	PET-CT	III类	1台	待定	140	1000	显像诊断	核医学科	新购
2	SPECT-CT	III类	2台	待定	140	800	显像诊断	核医学科	新购
3	DSA	II类	1台	待定	125	1250	放射介入诊疗	DSA手术室	新购
4	CT模拟定位机	III类	1台	待定	140	1000	放射治疗 模拟定位	CT模拟定位机房	新购
5	图像引导系统	III类	2台	待定	150	630	放射治疗 图像引导	直线加速器机房	与直线加速器配套安装

表 5 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
手套箱及核医学科辐射工作场所活性区内含微量放射性核素的气体	气体	$^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{123}\text{I}$ 、 $^{124}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$	/	微量	微量	/	/	经活性炭吸附过滤后接专用排风管道，最终引至肿瘤科研楼十四层楼顶排放
臭氧、氮氧化物		/	/	微量	微量	/	/	由排风系统引至肿瘤科研楼楼顶排放
放射性废水（工作人员清洗废水、患者排泄物及冲洗废水、场所清洁废水等）	液体	$^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	18.00m <sup>3</sup> (平均)	216.02m <sup>3</sup>	总α不超过1Bq/L；总β不超过10Bq/L	在短半衰期衰变池暂存30天后排放	满足暂存要求后排放至医院污水处理站
		$^{51}\text{Cr}$ 、 $^{123}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ 、 $^{201}\text{Tl}$	/	19.23m <sup>3</sup> (平均)	230.75m <sup>3</sup>		在长半衰期衰变池暂存277天后排放	
后装机废放射源	固体	$^{192}\text{Ir}$	/	/	每年最多产生3枚废放射源	/	不在本项目区域暂存	由放射源供应单位回收处理
废敷贴源		$^{90}\text{Sr}$ ( $^{90}\text{Y}$ )	/	/	约10年产生1枚废放射源	/	不在本项目区域暂存	由放射源供应单位回收处理
废 $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器		$^{99}\text{Mo}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	约4个	每年最多产生50个废发生器	/	不在本项目区域暂存	由发生器供应单位回收处理
废 $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 发生器		$^{68}\text{Ge}$ 、 $^{68}\text{Ga}$	/	最多1个	每年最多产生2个废发生器	/		
回旋加速器、直线加速器活化部件		/	/	/	/	/	不在本项目区域暂存	由设备厂家回收处理

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
放射性固体废物 (空药瓶、废注射器、吸水纸、棉棒、敷贴器、淋洗瓶、一次性卫生防护用品、废活性炭、清洁时用过的抹布及拖布等)		$^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	8.75kg (平均)	105kg	/	在负一层固废间暂存 30 天	达到清洁解控要求后 送到医院医疗废物暂存间暂存，最终交有资质的单位处置
		$^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	/	95.8kg (平均)	1150kg	/	在一层东北角固废间暂存 30 天	
		$^{131}\text{I}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ 、 $^{32}\text{P}$	/	127.9kg (平均)	1535kg	/	在一层西北角固废间暂存 180 天	
		$^{35}\text{S}$ 、 $^{47}\text{Sc}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{89}\text{Zr}$ 、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{123}\text{I}$ 、 $^{124}\text{I}$ 、 $^{153}\text{Sm}$ 、 $^{186}\text{Re}$ 、 $^{188}\text{Re}$ 、 $^{201}\text{Tl}$ 、 $^{211}\text{At}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ 、 $^{225}\text{Ac}$ 、 $^{227}\text{Th}$	/	26.9kg (平均)	322.5kg	/	在固废间暂存 10 倍半衰期	

表 6 评价依据

法规文件	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法(修订)》中华人民共和国主席令第九号, 2015年1月1日施行;</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法(修订)》第十三届全国人民代表大会常务委员会第七次会议, 2018年12月29日起施行;</p> <p>(3) 《建设项目环境保护管理条例》国务院第682号修改, 2017年10月1日发布施行;</p> <p>(4) 《中华人民共和国放射性污染防治法》中华人民共和国主席令第六号, 2003年10月1日起施行;</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》国务院令第449号公布, 2019年3月2日第二次修订;</p> <p>(6) 《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5月1日起施行;</p> <p>(7) 《建设项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)》生态环境部令第16号, 2021年1月1日;</p> <p>(8) 《关于发布&lt;射线装置分类&gt;的公告》, 环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告, 2017年第66号, 2017年12月6日起施行;</p> <p>(9) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法(修订)》生态环境部令第20号, 第四次修改, 2021年1月4日;</p> <p>(10) 《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, 2006年9月26日起施行;</p> <p>(11) 《放射工作人员职业健康管理规定》中华人民共和国卫生部令第55号, 2007年11月1日施行;</p> <p>(12) 《放射源分类办法》国家环境保护总局公告2005年第62号;</p> <p>(13) 《放射性物品分类和名录(试行)》国家环境保护总局公告2010年第31号, 2010年3月4日;</p> <p>(14) 《关于发布&lt;放射性废物分类&gt;的公告》环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局公告2017年第65号, 2018年1月1日起施行;</p> <p>(15) 《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</p>
------	--

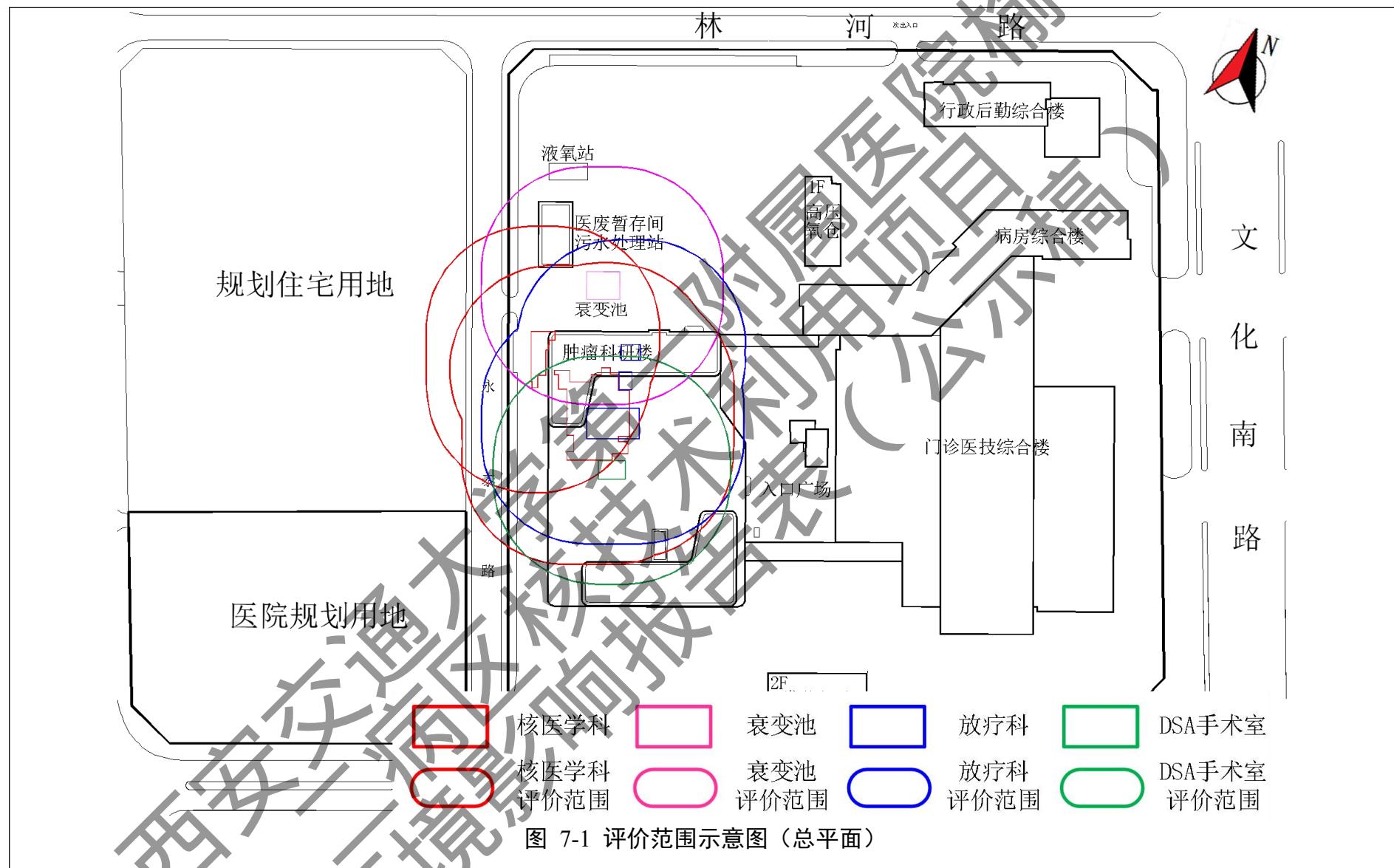
	<p>(2016) 430 号, 2016 年 3 月 7 日;</p> <p>(16) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》生态环境部公告 2019 年第 57 号, 自 2020 年 1 月 1 日起施行;</p> <p>(17) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》生态环境部公告 2021 年第 9 号, 自 2021 年 3 月 15 日起施行;</p> <p>(18) 陕西省环境保护厅关于印发新修订《陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表》的通知(陕环办发〔2018〕29 号), 2018 年 6 月 6 日起施行;</p> <p>(19) 《陕西省放射性污染防治条例(2019 年修正)》陕西省人大, 2019 年 7 月 31 日起施行。</p>
技术 标准	<p>(1) 《建设项目环境影响评价技术导则总纲》(HJ2.1-2016) ;</p> <p>(2) 《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016) ;</p> <p>(3) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)</p> <p>(4) 《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021) ;</p> <p>(5) 《环境<math>\gamma</math>辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021) ;</p> <p>(6) 《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) ;</p> <p>(7) 《关于核医学标准相关条款咨询的复函》生态环境部辐射函〔2023〕20 号, 2023 年 9 月 11 日;</p> <p>(8) 《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021) ;</p> <p>(9) 《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) ;</p> <p>(10) 《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020) ;</p> <p>(11) 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2019) ;</p> <p>(12) 《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020) ;</p> <p>(13) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范—第 1 部分: 一般原则》(GBZ/T201.1-2007) ;</p> <p>(14) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分: 电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011) ;</p> <p>(15) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范—第 3 部分: <math>\gamma</math>射线源放射治疗机房》</p>

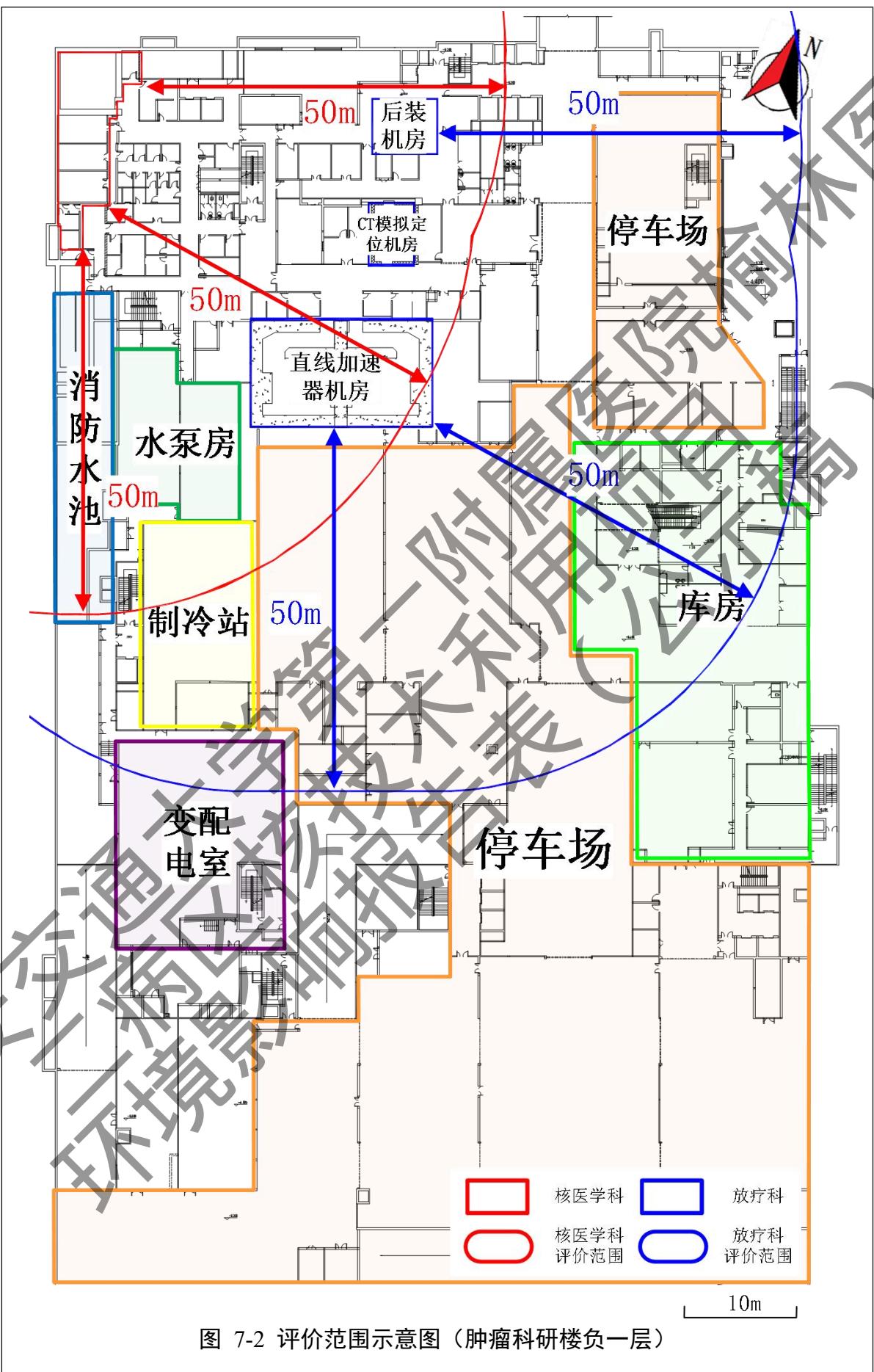
	<p>(GBZ/T201.3-2014)；</p> <p>(16) 《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》(GBZ2.1-2019)；</p> <p>(17) 《电离辐射监测质量保证通用要求》(GB8999-2021)；</p> <p>(18) 《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010)；</p> <p>(19) 《医疗废物专用包装袋、容器和警示标志标准》(HJ421-2008)；</p> <p>(20) 《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)；</p> <p>(21) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范核技术利用》(HJ1326-2023)。</p>
其他	<p>(1) 环境影响评价委托书；</p> <p>(2) 医院提供的现有核技术利用项目环保手续等；</p> <p>(3) 《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》(榆政环批复〔2025〕103号)</p> <p>(4) 《辐射防护手册 第三分册：辐射安全》，原子能出版社，1990年；</p> <p>(5) 《中国环境天然放射性水平》，中国原子能出版社，2015年；</p> <p>(6) 项目设计图纸及屏蔽方案，中联西北工程设计研究院有限公司。</p>

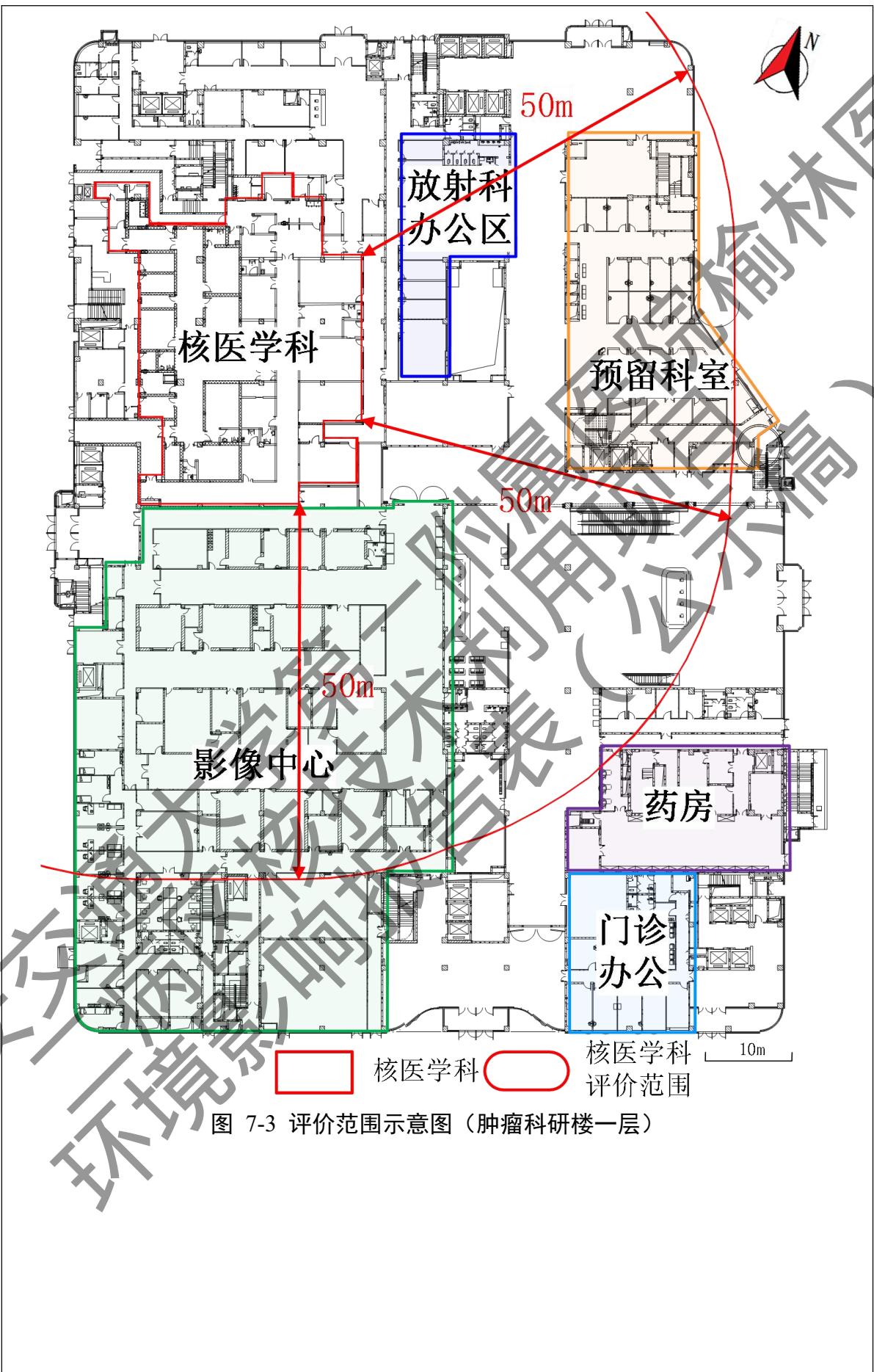
表 7 环境保护与评价标准

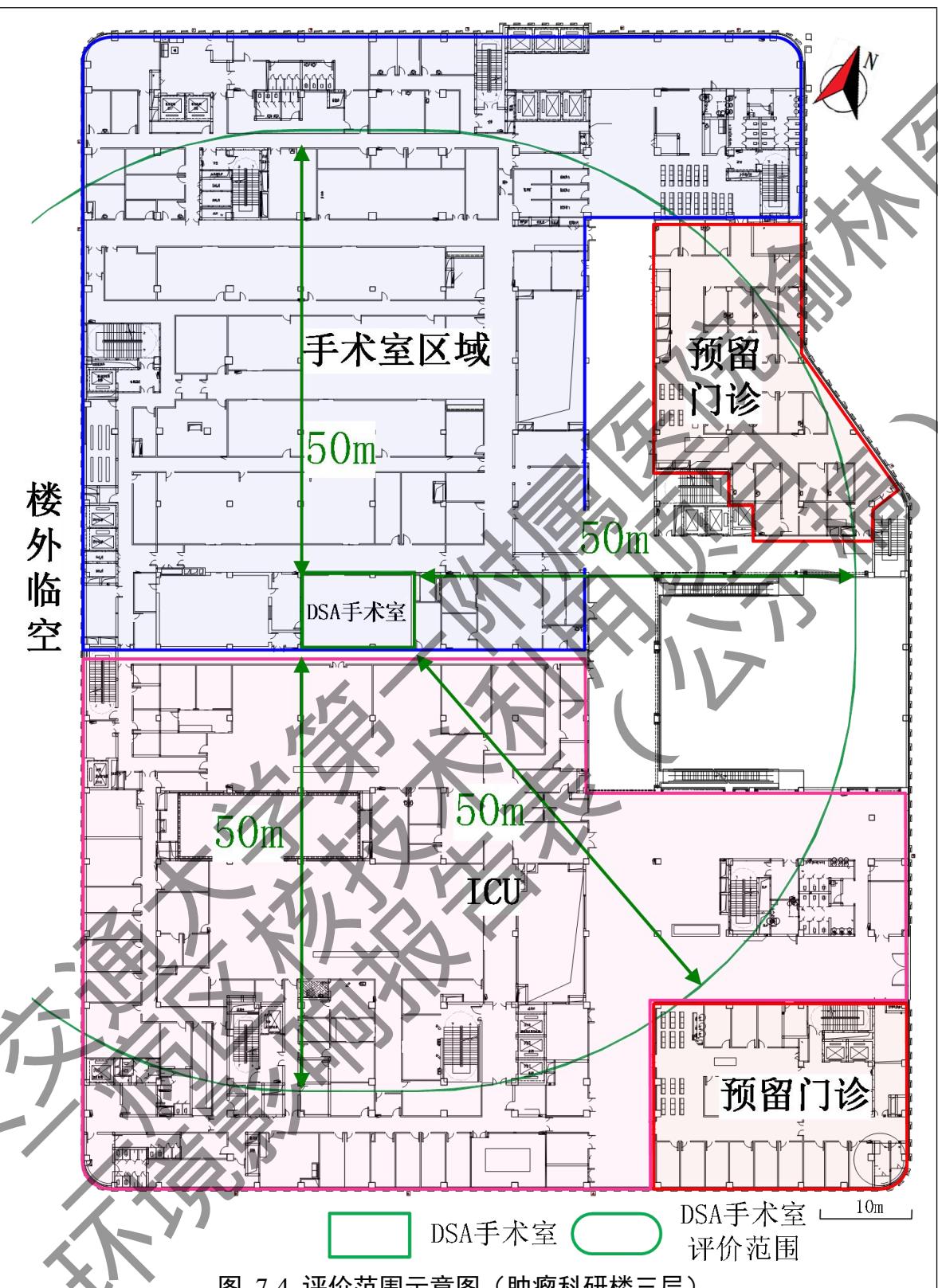
### 7.1 评价范围

本项目在固定的有实体边界的机房内使用射线装置、密封放射源和非密封放射性物质，依据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目环境影响评价内容和格式》（HJ10.1-2016）对核技术利用建设项目的评价范围和保护目标的相关规定，以本项目涉及场所的边界外 50m 的范围作为本项目的评价范围。评价范围内主要包括肿瘤科研楼其他科、北侧液氧站、医废暂存间和污水处理站、西侧永泰路、西侧规划住宅用地等，详见图 7-1 至图 7-4。









## 7.2 环境保护目标

本项目环境保护目标包括评价范围内活动的辐射工作人员和公众。本项目环境保护目标见表 7-1。

表 7-1 项目环境保护目标一览表

序号	保护目标	方位	距屏蔽体 外表面距 离 (m)	人口数量	剂量约束值
1	三层 DSA 手术室	控制室	西	紧邻	介入手术人员4人 ≤5mSv/a(辐射工作人员)
2		手术室区域	北	紧邻-50	手术室工作人员 约10人及患者等 流动人员
6		ICU区域	南	2-50	手术室工作人员 约10人及患者等 流动人员
4		预留门诊	东南	48-50	公众约5人 ≤0.1mSv/a (公众)
5		预留门诊	东北	30-50	公众约10人
6		体检科	上	紧邻	体检科医护人员 约20人及患者等 流动人员
7		内镜中心	下	紧邻	内镜中心医护人员 约20人及患者等 流动人员
8	一层核 医学科	住院治疗区域给药人 员、门诊诊疗区域给 药人员、敷贴治疗人 员、甲功测定人员、 PET和SPECT显像检 查人员	内部	/	辐射工作人员 13人 ≤5mSv/a(辐射工作人员)
9		影像中心	南	3-50	影像检查人员约 10人
10		放射科	东	10-25	工作人员约10人
11		二层静配中心、功能 检查科、超声科、内 镜中心等	上	紧邻	工作人员约50人 及患者、家属等流 动人员 ≤0.1mSv/a (公众)
12		负一层停车场、库房 制冷站等区域	下	紧邻	流动人员
13		永泰路	西	22-40	流动人员
14		空地(规划住宅)	西	42-50	流动人员
15	负一层 核医学 科	药物生产控制室	内部	/	操作人员1人 ≤5mSv/a(辐射 工作人员)
16		锝淋洗间、质控室		/	淋洗质控人员1人
17		放疗科	东南	31-50	辐射工作人员7人
18		停车场、水泵房、消 防水池、制冷站等	东南	10-50	流动人员 ≤0.1mSv/a (公众)
19		一层药房、门诊办公、 核医学科等	上	紧邻	工作人员约15人
20		设备机房、停车场	下	紧邻	流动人员
21	负一层 放疗科	直线加速器控制室、 后装机控制室、CT模 拟定位机控制室	内部	/	操作人员7人 ≤5mSv/a(辐射 工作人员)

22		负一层核医学科药物制备区域	西	31-50	辐射工作人员2人	
23		停车场、库房、水泵房、消防水池、制冷站、变配电室等	南	2-50	流动人员	$\leq 0.1\text{mSv/a}$ (公众)
24	DSA手术室、核医学科、衰变池、放疗科投影至地面	肿瘤科研楼	南	紧邻-50	核医学科、放疗科、放射科等辐射工作人员约10人	$\leq 5\text{mSv/a}$ (辐射工作人员)
25		液氧站	北	43-50	工作人员2人	
26		污水处理站、医废暂存间	北	7-40	工作人员4人	
27		永泰路	西	10-22	流动人员	
28		空地(规划住宅)	西	28-50	流动人员	
29		肿瘤科研楼	南	紧邻-50	工作人员约50人及流动人员	$\leq 0.1\text{mSv/a}$ (公众)
注: 非本项目辐射工作人员剂量约束值为5mSv/a, 本项目对其附加剂量按0.1mSv/a控制。						

### 7.3 评价标准

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)等标准, 本项目的剂量要求、屏蔽体表面剂量率控制值、场所分区、通风要求、放射性废物管理要求、辐射安全防护措施和设施等要求见表7-2所示。

表 7-2 本项目评价标准一览表

执行对象	剂量要求		执行标准
	辐射工作人员	公众	
剂量限值 ( $\text{mSv/a}$ )	20	5	GB18871-2002
剂量约束值 ( $\text{mSv/a}$ )	5	0.1	HJ1198-2021 HJ1188-2021
剂量率要求			执行标准
核医学科工作场所	剂量控制应符合以下要求: 1.工作场所控制区内工作人员经常性停留的场所(人员居留因子 $\geq 1/2$ )房间防护门、观察窗和墙壁外表面30cm处的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ; 2.控制区内工作人员较少停留或无需到达的场所(人员居留因子 $< 1/2$ ), 如给药/注射室防护门外、给药后患者候诊室门外、核素治疗住院病房门外以及核医学科患者走廊等位置, 其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv/h}$ ; 3.放射性药物分装箱体、注射窗外表面30cm处人员操作位的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ; 4.放射性药物分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率应小于 $25\mu\text{Sv/h}$ 。		

直线加速器机房	<p>剂量控制应符合以下要求：</p> <p>a) 治疗机房墙和入口门外表面30cm处、邻近治疗室的关注点、治疗机房顶外的地面附近和楼层及在治疗室上方已建、拟建二层建筑物或在治疗机房旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点到机房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗机房顶外表面30cm处和（或）在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处的周围剂量当量率应同时满足下列 1) 和 2) 所确定的剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_c</math>：</p> <p>1) 使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子（可依照附录A选取），由以下周剂量参考控制水平（<math>H_c</math>）求得关注点的导出剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_{c,d}</math>（<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>）：</p> <p>机房外辐射工作人员： <math>H_c \leq 100 \mu\text{Sv}/\text{周}</math>；</p> <p>机房外非辐射工作人员： <math>H_c \leq 5 \mu\text{Sv}/\text{周}</math>。</p> <p>2) 按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_{c,max}</math>（<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>）：</p> <p>1) 人员居留因子 <math>T &gt; 1/2</math> 的场所： <math>\dot{H}_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}</math>；</p> <p>2) 人员居留因子 <math>T \leq 1/2</math> 的场所： <math>\dot{H}_{c,max} \leq 10 \mu\text{Sv}/\text{h}</math>。</p> <p>b) 穿出治疗机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量 <math>250 \mu\text{Sv}</math> 加以控制。</p> <p>c) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面30cm处的剂量率参考控制水平可按 <math>100 \mu\text{Sv}/\text{h}</math> 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。</p>	<p>GBZ/T201.1-2007 GBZ/T201.2-2011</p>
后装机房	<p>剂量控制应符合以下要求：</p> <p>4.1.1 治疗机房墙和入口门外关注点的剂量率应不大于下述a)、b) 和c) 所确定的剂量率参考控制水平：</p> <p>a) 使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子，可以依照附录A，由以下周剂量参考控制水平（<math>H_c</math>）求得关注点的导出剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_{c,d}</math>（<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>）：</p> <p>i 放射治疗机房外控制区的工作人员： <math>H_c \leq 100 \mu\text{Sv}/\text{周}</math>；</p> <p>ii 放射治疗机房外非控制区的人员： <math>H_c \leq 5 \mu\text{Sv}/\text{周}</math>；</p> <p>b) 按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_{c,max}</math>（<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>）：</p>	<p>GBZ/T201.1-2007 GBZ/T201.3-2014</p>

	<p>c) 由上述a)中的导出剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_{c,d}</math> 和b)中的最高剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_{c,max}</math>，选择其中较小者作为关注点的剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_c</math>(<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>)。</p> <p><b>4.1.2 治疗机房顶的剂量控制要求</b></p> <p>治疗机房顶的剂量应按下述a)、b)两种情况控制:</p> <p>a) 在治疗机房正上方有建筑物或治疗机房旁邻近建筑物的高度超过自放射源点到机房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗机房顶外表面30cm处和（或）在该立体角区域内的高层建筑物中人员驻留处，可以根据机房外周剂量参考控制水平 <math>\dot{H}_c \leq 5\mu\text{Sv}/\text{周}</math> 和最高剂量率 <math>\dot{H}_{c,max} \leq 2.5\mu\text{Sv}/\text{h}</math>；按照①求得关注点的剂量率参考控制水平加以控制。</p> <p>b) 除a)的条件外，应考虑下列情况：</p> <p>i 天空散射和侧散射辐射对治疗机房外的地面附近和楼层中公众的照射。该项辐射和穿出机房墙透射辐射在相应处的剂量（率）的总和，应按（2）中的a)确定关注点的剂量率参考控制水平 <math>\dot{H}_c</math>(<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>)加以控制；</p> <p>ii 穿透治疗机房屋顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量250<math>\mu\text{Sv}</math>加以控制；</p> <p>iii 对无人员停留并只有借助工具才能进入的机房顶，考虑上述i和ii之后，机房顶外表面30cm处的剂量率参考控制水平可按100<math>\mu\text{Sv}</math>加以控制（可在相应处设置辐射告示牌）。</p>				
DSA机房、 CT机房	<p>6.3.1 a) 具有透视功能的X射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于2.5<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>；测量时，X射线设备连续出束时间应大于仪器响应时间。</p> <p>6.3.1b) CT机、乳腺摄影、乳腺CBCT、口内牙片摄影、牙科全景摄影、牙科全景头颅摄影、口腔CBCT和全身骨密度仪机房外的周围剂量当量率应不大于2.5<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>。</p> <p>6.3.1 c) 具有短时、高剂量率曝光的摄影程序（如DR、CR、屏片摄影）机房外的周围剂量当量率应不大于25<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>，当超过时应进行机房外人员的年有效剂量评估，应不大于0.25mSv。</p>	GBZ130-2020			
<b>表面污染控制水平</b>			执行标准		
表面类型		$\alpha$ 放射性物质 ( $\text{Bq}/\text{cm}^2$ )		$\beta$ 放射性物质 ( $\text{Bq}/\text{cm}^2$ )	GB18871-2002
		极毒性	其他		
工作台、设备、 墙壁、地面	控制区	4	$4 \times 10$	$4 \times 10$	
	监督区	$4 \times 10^{-1}$	4	4	
工作服、手套、 工作鞋	控制区、 监督区	$4 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-1}$	4	

手、皮肤、内衣、工作袜	$4\times10^{-2}$	$4\times10^{-2}$	$4\times10^{-2}$	
<b>非密封放射性物质工作场所分级</b>				<b>执行标准</b>
级别	日等效最大操作量/Bq			
甲	$>4\times10^9$			
乙	$2\times10^7\sim4\times10^9$			
丙	豁免活度值以上~ $2\times10^7$			
<b>选址和布局</b>				
核医学 学科	选 址	1.核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层，设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。 2.核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并应与非放射性工作场所有明确的分界隔离。 3.核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。		
	布 局	1.核医学工作场所应合理布局，住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置；同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局，控制区应相对集中，高活室集中在一端，防止交叉污染。尽量减小放射性药物、放射性废物的存放范围，限制给药后患者的活动空间。 2.核医学工作场所应设立相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开，减少给药后患者对其他人员的照射。注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉，人员与放射性药物通道不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷。 3.核医学工作场所宜采取合适的措施，控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动，避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲区，为工作人员和患者提供必要的可更换衣物、防护用品、冲洗设施和表面污染监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。		
放疗科	选 址	1.放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。 2.放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。 3.放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。		
	布 局	1.治疗设备控制室应与治疗机房分开设置，治疗设备辅助机械、电器、水冷设备，凡是不可以与治疗设备分离的，尽		

	<p>可能设置于治疗机房外。</p> <p>2.应合理设置有用线束的朝向，直接与治疗机房相连的治疗设备的控制室和其他居留因子较大的用室，尽可能避开被有用线束直接照射。</p> <p>3.X射线管治疗设备的治疗机房可不设迷路；<math>\gamma</math>刀治疗设备的治疗机房，根据场所空间和环境条件，确定是否选用迷路；其他治疗机房均应设置迷路。</p> <p>4.放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需要。</p>	
	<b>场所分区要求</b>	<b>执行标准</b>
控制区	把需要或可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。	GB18871-2002
监督区	未被定为控制区，在其中通常不需要专门的防护手段或安全措施，但要经常对职业照射条件进行监督和评价。	
核医学科	<p>4.3.1 应按照GB18871的要求将核医学工作场所划分出控制区和监督区，并进行相应的管理。</p> <p>4.3.2 核医学工作场所的控制区主要包括回旋加速器机房、放射性药物合成和分装室、放射性药物贮存室、给药室、给药后候诊室、扫描室、核素治疗病房、给药后患者的专用卫生间、放射性废物暂存库、衰变池等区域。</p> <p>4.3.3 核医学工作场所的监督区主要包括回旋加速器和显像设备控制室、卫生通过间以及与控制区相连的其他场所或区域。</p> <p>4.3.4 控制区的入口应设置规范的电离辐射警告标志及标明控制区的标志，监督区入口处应设置标明监督区的标志。</p>	HJ1188-2021
直线加速器机房、后装机房	<p>5.2.1 放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下，控制区包括加速器大厅、治疗室（含迷路）等场所，如质子/重离子加速器大厅、束流输运通道和治疗室，直线加速器机房、含源装置的治疗室、放射性废物暂存区域等。</p> <p>5.2.2 与控制区相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区（如直线加速器治疗室相邻的控制室及与机房相邻区域等）。</p>	HJ1198-2021
	<b>机房使用面积、单边长度控制</b>	<b>执行标准</b>
设备名称	机房内最小有效使用面积 (m <sup>2</sup> )	机房内最小单边长度 (m)
单管头X射线设备 (含C形臂、乳腺 CBCT)	20	3.5
CT机 (不含头颅移动CT)	30	4.5
	<b>通风要求</b>	<b>执行标准</b>

核医学科	6.3.1 核医学工作场所应保持良好的通风，工作场所的气流流向应遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。	HJ1188-2021		
	6.3.2 使用回旋加速器制备放射性药物的工作场所应设有单独的通风系统，加速器自屏蔽区内应有单独排气管道，并相对加速器室呈负压状态。			
	6.3.3 碘-131治疗病房应设有单独的通风系统，病房的门窗应有封闭措施，保持治疗区域内的负压，治疗区域内的空气应经单独的排气管道有组织排放。			
	6.3.4 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。			
	6.3.5 通风橱应有足够的通风能力。制备放射性药物的回旋加速器工作区域、碘-131治疗病房以及设有通风橱、手套箱等场所的通风系统排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。			
直线加速器机房、后装机房	放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于4次/h，排气口不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。	HJ1198-2021		
DSA机房、CT机房	机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。	GBZ130-2020		
<b>辐射监测</b>				
核医学科工作场所	监测内容	监测点位	监测频次	执行标准
	辐射水平	控制区和监督区所有工作人员和公众可能停留的有代表性的点位和存有放射性物质的装置/设备的表面	不少于1次/月	HJ1188-2021
	表面放射性污染	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，核素治疗场所的设施、墙壁和地面等，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等。	每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）	
8.3 开展核医学相关活动的机构应自行或委托有能力的监测机构对工作场所周围环境的辐射水平进行监测，监测频次应不少于1次/年。				
直线加速器机房、后	9.2.1 应根据使用放射治疗设备种类、能量和使用方式配备相应的辐射监测设备，对辐射工作场所的辐射水平（X-γ）			HJ1198-2021

装机房	<p>辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率等) 进行监测。</p> <p>9.2.2 应对放射治疗工作场所机房四周屏蔽墙外30cm处、顶棚、操作位、观察窗、防护门,以及其他关注点处开展X-γ辐射周围剂量当量率监测; 中子源治疗装置、质子/重离子加速器治疗装置、大于10MV的X射线放射治疗设备还应对前述位置开展中子剂量当量率监测。</p> <p>9.2.3 放射治疗设备安装调试阶段,应在最大工况下,由辐射工作人员进行全面的辐射监测,评估辐射安全状况,确保辐射水平达标。</p> <p>9.2.4 含放射源的放射治疗设备进行放射源倒装时应根据倒装源实施方案开展外照射剂量率监测。</p> <p>9.3.1 开展放射治疗相关活动的机构应自行或委托有能力的监测机构对工作场所运行工况下周围环境的辐射水平进行监测,监测频次应不少于1次/年。</p>	
DSA机房、 CT机房	<p>8.1 X射线设备机房防护设施和机房周围辐射剂量检测应满足下列要求:</p> <p>b) X射线设备机房的防护检测应在巡测的基础上,对关注点的局部屏蔽和缝隙进行重点检测。关注点应包括:四面墙体、地板、顶棚、机房门、操作室门、观察窗、采光窗/窗体、传片箱、管线洞口、工作人员操作位等,点位选取应具有代表性。</p> <p>8.2 X射线设备机房放射防护安全设施应进行竣工验收,在使用过程中,应进行定期检查和检测,定期检测的周期为一年。</p> <p>8.3 在正常使用中,医疗机构应每日对门外工作状态指示灯、机房门的闭门装置进行检查,对其余防护设施应进行定期检查。</p>	GBZ130-2020
<b>固态、液态废物管理要求</b>		<b>执行标准</b>
核医学科	放射性固体废物	<p>固体放射性废物暂存时间满足下列要求的,经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平, <math>\alpha</math>表面污染小于0.08 Bq/cm<sup>2</sup>、<math>\beta</math>表面污染小于0.8 Bq/cm<sup>2</sup>的,可对废物清洁解控并作为医疗废物处理:</p> <p>a)所含核素半衰期小于24小时的放射性固体废物暂存时间超过30天;</p> <p>b)所含核素半衰期大于24小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的10倍;</p> <p>c)含碘-131核素的放射性固体废物暂存超过180天。</p>
	放射性废气	<p>7.4.1 产生气态放射性废物的核医学场所应设置独立的通风系统,合理组织工作场所的气流,对排出工作场所的气体进行过滤净化,避免污染工作场所和环境。</p> <p>7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性,及时更换失效的过滤器,更换周期不能超过厂家推</p>

		荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理。	
		所含核素半衰期小于24小时的放射性废液暂存时间超过30天后可直接解控排放；所含核素半衰期大于24小时（ <sup>131</sup> I）的暂存时间超过180天后可直接解控排放。	
放射性液态废物	收集	<p>7.3.1.1 核医学工作场所应设置有槽式或推流式放射性废液衰变池或专用容器，收集放射性药物操作间、核素治疗病房、给药后患者卫生间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液。</p> <p>7.3.1.2 核医学工作场所放射性药物标记、分装、注射后的残留液和含放射性核素的其他废液应收集在专用容器中。盛放放射性废液的容器表面应张贴电离辐射标志。</p> <p>7.3.1.3 核医学工作场所的上水需配备洗消处理设备（包括洗消液）。控制区和卫生通过间内的淋浴间、盥洗水盆、清洗池等应选用脚踏式或自动感应式的开关，以减少场所内的设备放射性污染。头、眼和面部宜采用向上冲淋的流动水。</p> <p>7.3.1.4 放射性废液收集的管道走向、阀门和管道的连接应设计成尽可能少的死区，下水道宜短，大水流管道应有标记，避免放射性废液集聚，便于检测和维修。</p>	HJ1188-2021
	贮存	<p>7.3.2.1 经衰变池和专用容器收集的放射性废液，应贮存至满足排放要求。衰变池或专用容器的容积应充分考虑场所内操作的放射性药物的半衰期、日常核医学诊疗及研究中预期产生贮存的废液量以及事故应急时的清洗需要；衰变池池体应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施。</p> <p>7.3.2.2 槽式废液衰变池应由污泥池和槽式衰变池组成，衰变池本体设计为2组或以上槽式池体，交替贮存、衰变和排放废液。在废液池上预设取样口。有防止废液溢出、污泥硬化淤积、堵塞进出水口、废液衰变池超压的措施。</p> <p>7.3.2.1 经衰变池和专用容器收集的放射性废液，应贮存至满足排放要求。衰变池或专用容器的容积应充分考虑场所内操作的放射性药物的半衰期、日常核医学诊疗及研究中预期产生贮存的废液量以及事故应急时的清洗需要；衰变池池体应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施。</p>	HJ1188-2021

		排放	7.3.3.1 对于槽式衰变池贮存方式： a) 所含核素半衰期小于24小时的放射性废液暂存时间超过30天后可直接解控排放； b) 所含核素半衰期大于24小时的放射性废液暂存时间超过10倍最长半衰期（含碘-131核素的暂存超过180天），监测结果经审管部门认可后，按照GB18871中8.6.2规定方式进行排放。	HJ1188-2021 辐射函〔2023〕20号
直线加速器机房、后装机房	固态废物		8.2.1 废旧放射源应按法律法规要求返回放射源生产厂家或原出口方。确定无法交回生产单位或者返回原出口方的，送交有相应资质的单位收贮，并承担相关费用。 8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。	HJ1198-2021
<b>个人防护用品配置要求</b>				
场所类型	工作人员		患者或受检者	执行标准
	必备	选备		
核医学和SPECT场所	铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖	铅橡胶帽、铅玻璃眼镜	—	GBZ120-2020
正电子放射性药物和 <sup>131</sup> I的场所	放射性污染防护服	—	—	
敷贴治疗	宜使用远距离操作工具	有机玻璃眼镜或面罩	不小于3mm厚的橡皮泥或橡胶板等	
放射检查类型	工作人员		受检者	
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护用品
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 选配：铅橡胶帽子	—
介入放射性操作	铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、	铅悬挂防护屏/铅防护吊帘/床侧	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、	—

	介入防护手套 选配：铅橡胶 帽子	防护屏/床 侧防护帘； 选配：移动 铅防护屏风	铅橡胶颈套 选配：铅橡胶 帽子		
直线加速器 机房、后装 机房	6.2.4 后装治疗室内应配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具。 7.3 任何人员未经授权或允许不得进入控制区。工作人员须在确认放射治疗或者治疗室束流已经终止的情况下方可进入放射治疗室，进入含放射源或质子/重离子装置的治疗室前须携带个人剂量报警仪。			HJ1198-2021	

表 8 环境质量和辐射现状

## 8.1 项目地理位置及场所位置

### 8.1.1 医院地理位置

医院位于陕西省榆林市榆阳区青山路9号，地理坐标为经度：109.727212° E，纬度：38.273142° N，地理位置见图1-1。

### 8.1.2 项目场所位置

医院现有一病区主要包括行政后勤综合楼、病房综合楼、高压氧舱、门诊医技综合楼、发热门诊等；本次新建二病区主要包括肿瘤科研楼、污水处理站和医废暂存间。医院总平面布置见图1-2。

医院拟在肿瘤科研楼负一层建设核医学科药物制备区域和放疗科，在一层建设核医学科住院治疗区域和核医学科门诊诊疗区域，在三层建设1间DSA手术室。根据现场调查结果，项目所在的肿瘤科研楼正在施工。

## 8.2 辐射环境质量现状评价

### 8.2.1 监测方法

为了解项目拟建场地及周边环境 $\gamma$ 辐射本底水平，本次委托陕西新高科辐射技术有限公司于2025年12月26日对场地周边环境进行本底检测。因现场监测时肿瘤科研楼尚在封闭施工，大楼内部不可达，因此监测点位设于工地外围。

监测方案见表8-1。

表 8-1 辐射环境质量现状监测方案

监测因子	监测点位		监测频次
$\gamma$ 剂量率	肿瘤科研楼北侧	检测点1	每个点位连续监测10次
	肿瘤科研楼西侧	检测点2、检测点3	
	肿瘤科研楼南侧	检测点4	
	医废暂存间/污水处理站	检测点5、检测点6	
	永泰路	检测点7	

监测方法：《环境 $\gamma$ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）。

### 8.2.2 监测点位

环境 $\gamma$ 辐射剂量率监测点位布设情况详见图8-1。

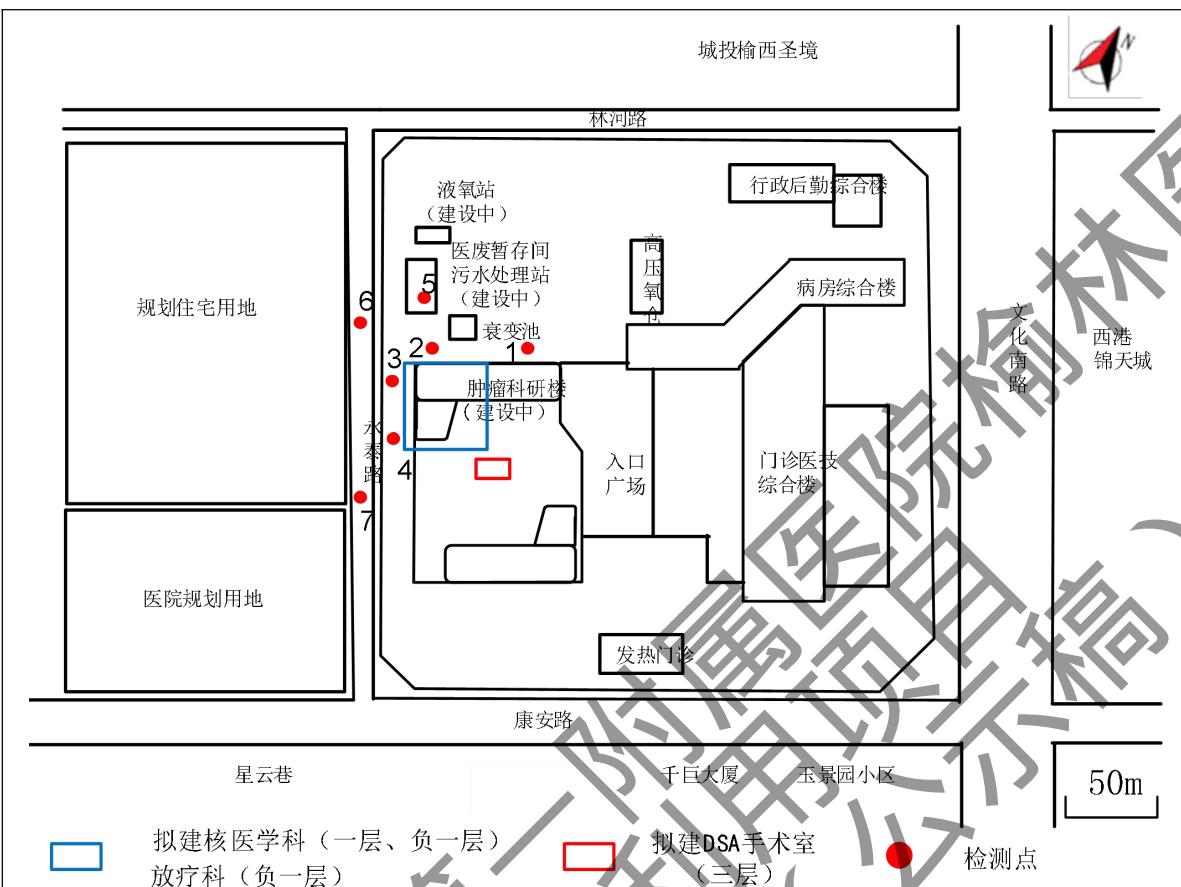


图 8-1 肿瘤科研楼周围区域检测点位图

### 8.2.3 监测使用仪器

监测仪器相关情况见表8-2。

表 8-2 监测仪器相关信息一览表

检测仪器 名称、型号、编号	测量范围	检定单位	证书编号	证书有效期
环境监测用 X、 $\gamma$ 辐射 空气比释动能率仪 FD-3013H-6882	0.01~200 $\mu\text{Gy}/\text{h}$	中国辐射防护研究 院放射性计量站	C 校字第 [2025]-L401	2025.8.18~ 2026.8.17

#### (5) 质量保证:

- 结合现场实际情况及检测点位的可到达性，在项目拟建场地周边环境布设检测点位，充分考虑检测点位的公正性和客观性，以保证检测结果的科学性和可比性；
- 严格按照《环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率测定规范》（HJ1157—2021）进行检测；
- 检测仪器每年经有资质的计量部门检定/校准，合格后方可使用；
- 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；
- 检测人员持证上岗；
- 检测结果经三级审核，保证检测数据的准确。

#### 8.2.4 监测结果及评价

项目拟建后装机房和核医学科及周围区域环境 $\gamma$ 辐射剂量率检测结果见表8-3。

表 8-3 环境 $\gamma$ 辐射剂量率监测结果

点位编号	点位描述	检测结果 ( $\mu\text{Gy}/\text{h}$ )	
		平均值	标准差
1	在建肿瘤科研楼北侧 在建肿瘤科研楼西侧	检测点1	0.06
2		检测点2	0.06
3		检测点3	0.06
4		检测点4	0.06
5	在建医废暂存间 /污水处理站	检测点5	0.06
6	永泰路	检测点6	0.06
7		检测点7	0.05

注1：表中数据已扣除宇宙射线响应值，此处宇宙射线响应值为 $0.016\mu\text{Gy}/\text{h}$ ，建筑物对宇宙射线的屏蔽因子：点位5按平房取0.9，其余点位按原野、道路取1。

由表8-3可知，项目拟建核医学科、放疗科、DSA手术室及周围区域的环境 $\gamma$ 辐射剂量率为 $50\sim60\text{nGy}/\text{h}$ （已扣除宇宙射线响应值）。与《中国环境天然放射性水平》（中国原子能出版社，2015年）中榆林市 $\gamma$ 辐射剂量率调查结果（原野： $33\sim87\text{nGy}/\text{h}$ ，道路： $33\sim82\text{nGy}/\text{h}$ ）相当，属天然辐射本底水平。

表9 项目工程分析与源项

## 9.1 工程设备和工艺分析

### 9.1.1 核医学科

#### 9.1.1.1 回旋加速器制药

##### (1) 设备组成及工作原理

回旋加速器主要由磁场系统、射频系统、离子源系统、束流提取系统、真空系统、靶系统、供电与控制系统、冷却系统等组成。

###### ① 磁场系统

磁场系统由上下磁轭、线路极片、磁场线圈、磁场电源等组成。磁场系统的作用是提供偏转力使束流维持在上下磁极之间中心平面的准环形轨迹上并在上下磁极之间加速。

每一磁场极含有4个磁峰，临近磁峰之间的区域称之为磁谷，加速的束流在到达提取半径的路径中交替经过磁峰与磁谷确定的强和弱的磁场。当束流通过每一次磁峰区域时，由于强磁场的影响，束流轨迹近似为圆形；然而在磁谷区域时，束流轨迹接近笔直的路径向下一个磁峰区。方位角交替变化的磁场对束流粒子在加速的中心层面提供了强聚焦力，这些强聚焦力引导粒子返回中心层面，实现较高的束流引出效率。

###### ② 射频系统

射频系统包括监测与控制元件、频率合成器、中继放大器、RF电源振幅器、共轴透射线、耦合网络和D型盒结构等。其主要功能是对D型盒提供交替的高电压电势，并将能量传递至加速粒子。

###### ③ 真空系统

真空系统包括真空室、排气泵、仪表和控制元件等。真空仪表和控制元件用于监测并显示真空室的压力以及在系统出现故障时保护仪器。排气泵连续抽气以排除来源于离子源及真空室内表面的气体，在真空箱里建立并维持粒子加速所需要的真空压力水平，以降低束流的丢失，同时对高电压场提供绝缘。

###### ④ 离子源系统

离子源系统包括离子源、ARC电源、偏向电源与氢气流量控制器等。离子源通过电势差，电离氢气产生H<sup>+</sup>离子，形成等离子浓聚体。氢气流量控制器用于控制进

入离子源的氢气流量，ARC 电源用于控制离子源的靶电流，从而实现离子源强度控制。

#### ⑤束流提取系统

束流提取系统主要包括玻璃碳膜、装载碳膜的多叶转动器、马达等装置。提取系统最主要的基础是剥离膜。被加速的阴离子 ( $H^-$ ) 通过剥离膜期间被脱去 2 个电子从而转变为质子 ( $H^+$ )，因此在磁场中粒子的运行轨道是逆时针方向偏转。剥离膜的位置直接确定束流的退出位置，并通过调整剥离膜位置使束流进入指定的同位素靶。

#### ⑥靶系统

靶系统是完成特定核反应而产生正电子核素的装置，一般包括靶体、准直器、靶膜、管路阀门等。靶体材料采用纯度为 99.9% 的铌靶。靶材料包括液态、气态和固态靶三种类型。气体靶是由气瓶间通过管道自动输送到加速器。固体靶安装在靶面板上，可重复使用。对于液态靶，需要医院辐射工作人员定期进入加速器机房添加靶水，添加靶水前需提前确认设备停机，过程中不需要打开回旋加速器自屏蔽体。本项目回旋加速器仅使用液体靶和气体靶两种类型，靶水 3-4 周补充一次，每次更换时间约 1min。

在靶室中用带电粒子轰击稳定同位素生产出正电子核素；当粒子束通过选择性提取碳膜后，在回旋加速器束流出口处粒子束将打在相应的靶上。粒子束进入靶室穿过靶的双箔膜装置。

#### ⑦控制系统

控制系统通过远程输入指令，控制对应设备单元完成药物生产、标记、分装，工作人员通过控制系统能远程、简单、精准地控制设备完成药物制备工作。

#### ⑧冷却系统

冷却系统通常包括水冷系统和氦冷系统。水冷系统主要用于将去离子冷却水被泵到各个循环中，带出的热量通过二级冷却系统进行热交换，将热量传送到一级冷却系统，实现从微波管等发热部位将工作产生的热量带出。氦冷系统主要通过打靶期间在靶室和靶窗的 Havar 箔膜和钽箔膜之间形成氦流束，将靶膜的热量带走，从而控制靶温度确保设备正常运行。

回旋加速器药物生产主要利用阴离子源产生的阴离子穿过剥离碳膜产生质子，

之后借助规律变化的磁场系统加速带电的质子，并用其照射目标靶。质子和靶材料发生核反应后生成目标同位素。工作原理如下：

### ①产生高速带电粒子

电离发射出粒子束流，该粒子束流在称为Dees的半圆形电极盒（简称“D型盒”）中运动。D型盒与高频振荡电源相连为加速粒子提供交变的电场。在磁场和电场的作用下被加速的粒子在近似于螺旋的轨道中运动飞行。带电粒子经多次加速后，圆周轨道直径达到最大而接近Dees的边缘并具有最大的能量，在该点粒子经过束流提取系统的剥离碳膜。被加速的负粒子在通过碳膜期间被脱去两个电子，变成带正电的阳离子，此时在磁场中粒子的运行轨道是逆时针方向偏转，直接将具有最大能量的带电粒子从真空室引出。

### ②打靶

通过调整提取膜的位置使引出的束流引导进入预定的同位素生产靶系统，以一定速度轰击靶物质引发预定核反应。

使用 $^{14}\text{N}_2+0.5\%^{16}\text{O}_2$ 作为靶材料，通过 $(\text{P}, \alpha)$ 反应生产 $^{11}\text{CO}_2$ 气体；使用加压甲烷及重水 $(\text{H}_2^{16}\text{O})$ 作为靶材料，通过 $(\text{P}, \alpha)$ 反应生产 $^{13}\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ；使用 $^{15}\text{N}_2+1\%^{16}\text{O}_2$ 作为靶材料，通过 $(\text{P}, \text{n})$ 反应生产 $^{15}\text{O}_2$ ；使用97% $\text{H}_2^{18}\text{O}$ 作为靶材料，通过 $(\text{P}, \text{n})$ 反应生产 $^{18}\text{F}^-$ 。打靶生产过程工作人员全程远程控制。

### ③标记合成

生产出的放射性同位素通常需要再次加工，使其标记在特定分子的特定位置，以便利用分子的生物化学特性到达人体特定位置。放射性药物通过回旋加速器机房地下的正压输送管道送至合成热室的合成分装仪中。合成由计算机自动控制程序及配套仪器设备完成。

回旋加速器药物生产过程中各阶段产物见表9-1。

表 9-1 药物生产各阶段产物情况

目标核素	靶材料	核反应	打靶产物	常用标记产物
$^{11}\text{C}$	$^{14}\text{N}_2+0.5\%^{16}\text{O}_2$	$^{14}\text{N} (\text{P}, \alpha) ^{11}\text{C}$	$^{11}\text{CO}_2$	$^{11}\text{CH}_3\text{I}$
$^{13}\text{N}$	加压甲烷+ $\text{H}_2^{16}\text{O}$	$^{16}\text{O} (\text{P}, \alpha) ^{13}\text{N}$	$^{13}\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$^{13}\text{NH}_4\text{Cl}$
$^{15}\text{O}$	$^{15}\text{N}_2+1\%^{16}\text{O}_2$	$^{15}\text{N} (\text{P}, \text{n}) ^{15}\text{O}$	$^{15}\text{O}_2$	$^{15}\text{O}_2\text{-水}$
$^{18}\text{F}$	97% $\text{H}_2^{18}\text{O}$	$^{18}\text{O} (\text{P}, \text{n}) ^{18}\text{F}$	$^{18}\text{F}^-$	$^{18}\text{F-FDG}$

放射性核素完成预定标记后通常需要经过纯化和稀释，之后根据需要与对应的药物配制成用于注射的成品药物溶液。

#### ④分装

配置好的药物自动进入分装模块，在分装模块中自动根据设定的患者给药活度完成药物分装，移至铅罐中并盖上顶盖。该过程工作人员全程远程控制。

#### ⑤质控

放射性药物注射前需要对其性质进行检测，确保药物不会对患者造成额外不良影响。质控项目主要包括：放射性核纯度、放射化学纯度、无菌、细菌内毒素、阳性对照等。经检测满足临床使用要求的放射性药物方可认为合格，可交由临床科室诊疗活动。

#### ⑥包装与运输

放射性药物质控合格后，工作人员将装有分装好药物的铅罐密封好，张贴标签后固定在手推车上，送至药物电梯，经药物电梯送至一层核医学科诊断区域。

回旋加速器结构见图9-1，工作原理见图9-2，本项目使用的回旋加速器基本情况及参数见表9-2。

表 9-2 回旋加速器基本情况及技术参数

生产厂家	四川玖谊源粒子科技有限公司		
型号	玖源-20		
质子束流能量	$\leq 20\text{MeV}$		
质子束流强度	$\leq 100\mu\text{A}$		
核素种类及最大产额	$^{14}\text{C}$	3.0Ci/30min (20MeV)	
	$^{13}\text{N}$	400mCi/20min (20MeV)	
	$^{15}\text{O}$	1.0Ci/30min (20MeV)	
	$^{18}\text{F}$	10.0Ci/2h (20MeV)	

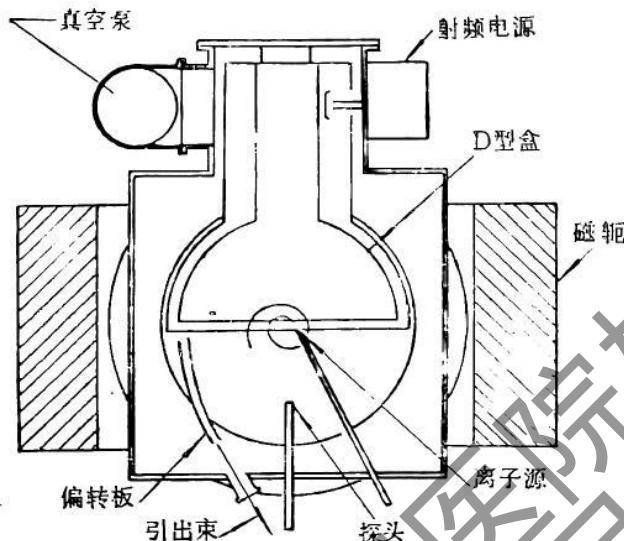


图 9-1 回旋加速器结构示意图

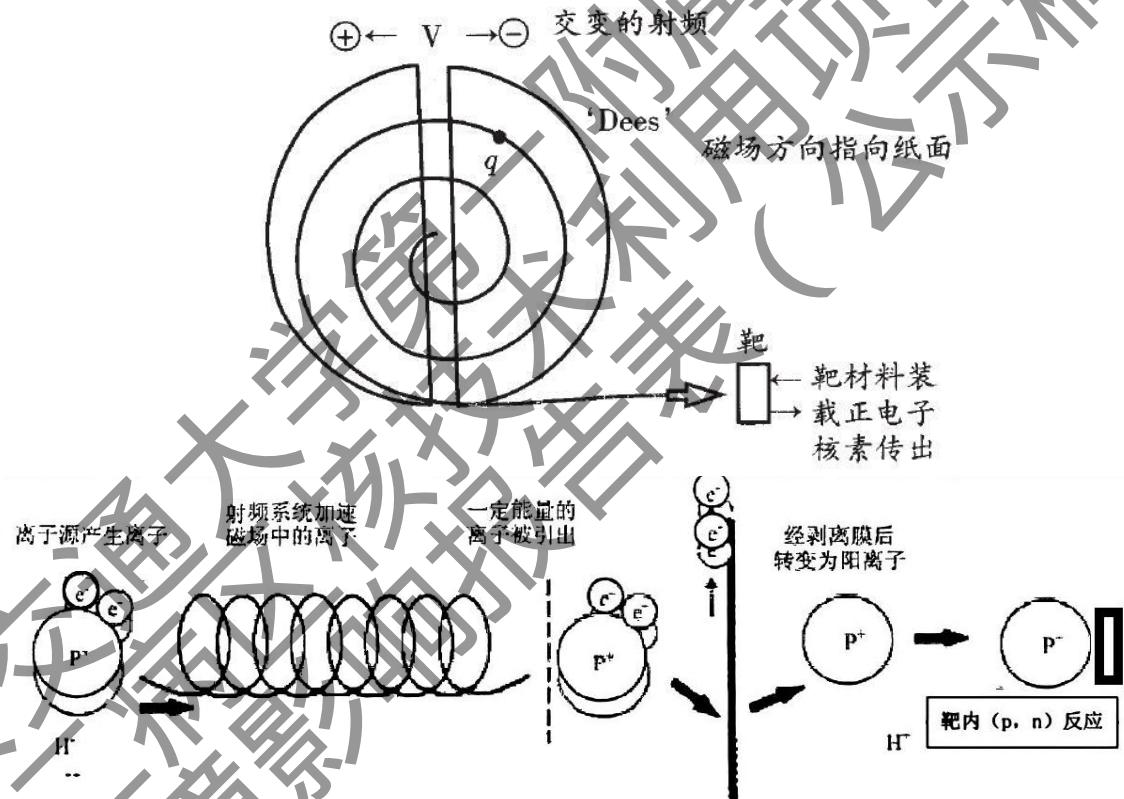


图 9-2 回旋加速器工作原理图

## (2) 药物生产量

本项目回旋加速器用于制备<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F四种放射性核素。PET核素半衰期均较短，考虑药物打包、运输、拆封等环节会导致药物活度减小，半衰期极短且用量较少的<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N生产量按使用量二倍考虑，<sup>15</sup>O生产量按使用量四倍考虑，<sup>18</sup>F按使用量生产。回旋加速器生产量见表9-3。

表 9-3 回旋加速器药物生产操作量情况

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量 (Bq)	日最大操作量 (Bq/d)	年最大操作量 (Bq)	用途
<sup>11</sup> C	液体	20min	EC β <sup>+</sup>	$3.70 \times 10^8$ (10mCi)	$4.18 \times 10^9$	$1.05 \times 10^{12}$	PET 显像诊断
<sup>13</sup> N	液体	10min	EC β <sup>+</sup>	$3.70 \times 10^8$ (10mCi)	$1.48 \times 10^9$	$3.70 \times 10^{11}$	
<sup>15</sup> O	液体	2min	EC β <sup>+</sup>	$3.70 \times 10^8$ (10mCi)	$1.48 \times 10^9$	$3.70 \times 10^{11}$	
<sup>18</sup> F	液体	109.8min	EC β <sup>+</sup>	$3.70 \times 10^8$ (10mCi)	$2.91 \times 10^{10}$	$7.28 \times 10^{12}$	

### (3) 工作流程及产污环节

回旋加速器药物生产流程如下：

①科室根据患者预约情况汇总药物使用情况，据此制定生产计划，报药物生产制备部门；

②设备开机检查，补充必需的耗材试剂；

③操作人员远程控制回旋加速器出束，产生的质子与靶物质反应生成所需的放射性同位素；

④产生的放射性同位素通过管道自动传输至合成分装模块，设备自动操作加入试剂，根据预设指令将放射性同位素标记在预定的药物分子上；

⑤标记好的药物根据预定的患者用药量进行自动分装，张贴标识后放在储源铅容器内；

⑥质控人员取出预留的质控样品（约1mCi）送至质控室，在质控室完成放射性药物质控，检查其放射性活度、放射化学纯度、微生物等指标，以确认药物满足注射质量要求，检查合格后该批次药物方可投入临床使用；

⑦工作人员将分装好的药物分别送至核医学科对应使用场所，与值班人员确认无误后交接，暂存在对应手套箱或储源容器内。

回旋加速器生产正电子药物流程见图9-3。

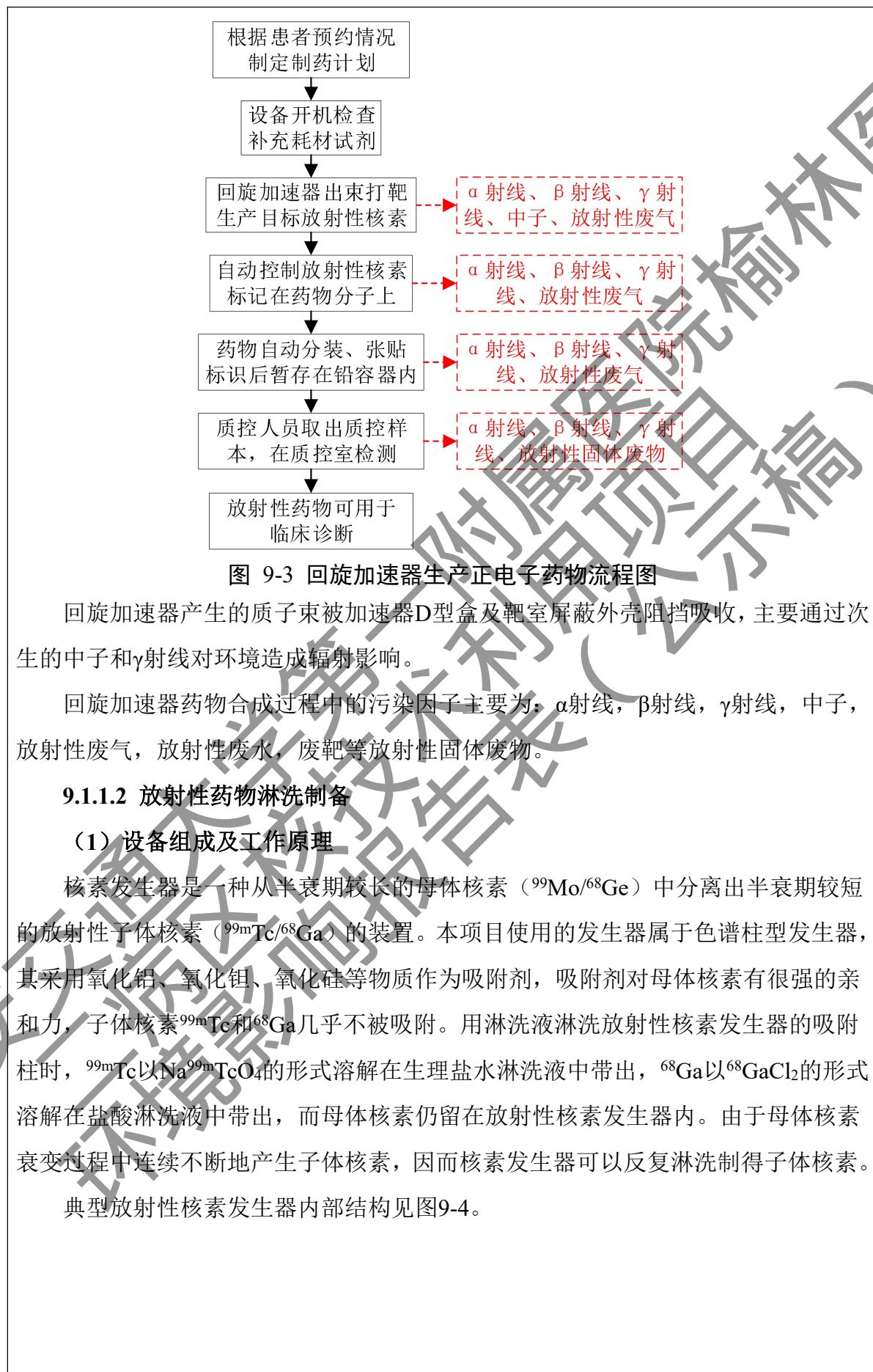


图 9-3 回旋加速器生产正电子药物流程图

回旋加速器产生的质子束被加速器D型盒及靶室屏蔽外壳阻挡吸收，主要通过次生的中子和 $\gamma$ 射线对环境造成辐射影响。

回旋加速器药物合成过程中的污染因子主要为： $\alpha$ 射线， $\beta$ 射线， $\gamma$ 射线，中子，放射性废气，放射性废水，废靶等放射性固体废物。

### 9.1.1.2 放射性药物淋洗制备

#### (1) 设备组成及工作原理

核素发生器是一种从半衰期较长的母体核素 ( $^{99}\text{Mo}/^{68}\text{Ge}$ ) 中分离出半衰期较短的放射性子体核素 ( $^{99\text{m}}\text{Tc}/^{68}\text{Ga}$ ) 的装置。本项目使用的发生器属于色谱柱型发生器，其采用氧化铝、氧化钽、氧化硅等物质作为吸附剂，吸附剂对母体核素有很强的亲和力，子体核素  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  和  $^{68}\text{Ga}$  几乎不被吸附。用淋洗液淋洗放射性核素发生器的吸附柱时， $^{99\text{m}}\text{Tc}$  以  $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$  的形式溶解在生理盐水淋洗液中带出， $^{68}\text{Ga}$  以  $^{68}\text{GaCl}_2$  的形式溶解在盐酸淋洗液中带出，而母体核素仍留在放射性核素发生器内。由于母体核素衰变过程中连续不断地产生子体核素，因而核素发生器可以反复淋洗制得子体核素。

典型放射性核素发生器内部结构见图9-4。

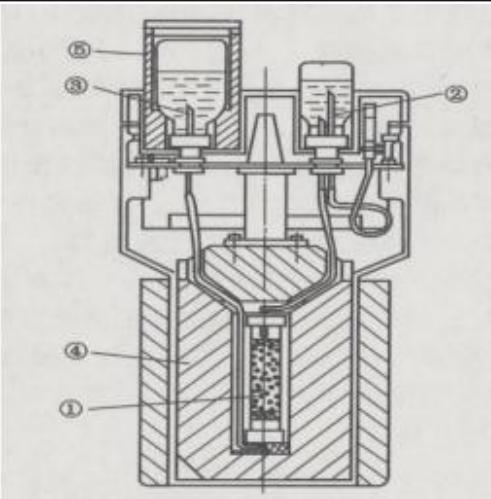


图 9-4 放射性核素发生器内部结构示意图

### (2) 发生器用量情况

根据医院提供的资料, 为满足目前核医学科工作需要,  $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器最大采购活度为 $1.11 \times 10^{11}\text{Bq}$  ( $^{99}\text{Mo}$ ) , 淋洗效率不小于80%;  $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 发生器最大采购活度为 $1.20 \times 10^9\text{Bq}$  ( $^{68}\text{Ge}$ ) , 淋洗效率不小于70%。 $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器半衰期较短, 通常每周需更换一次, 每次使用1个;  $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 发生器每年更换2次, 每次使用1个。

### (3) 工作流程及产污环节

放射性核素发生器的操作流程为:

①准备: 医院根据患者的人数、诊疗内容和药物注射量向有资质的厂家订购 $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器和 $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 发生器, 发生器送至医院后, 由医院核医学科值班人员与送货人员核对发生器数量、活度后办理交接手续和入库登记, 送至淋洗制备间暂存。

②淋洗: 在每日诊疗工作开始前(7:30)开展淋洗工作。将淋洗柜中的发生器外壳打开, 将盛有淋洗液的小瓶插入发生器的双针, 然后将置入铅罐的负压瓶插入发生器的单针。启动放射性核素发生器, 借助负压瓶的负压, 使淋洗溶液淋洗发生器的吸附柱, 这时由母体衰变而得到的子体放射性核素即被洗脱入负压瓶中, 获得含子体核素的洗脱液。取走铅罐后, 用另一负压瓶插至单针上, 吸干吸附柱。淋洗过程用时约15min。

③标记: 将制得的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ / $^{68}\text{Ga}$ 淋洗液转移至冻干药盒, 并充分摇匀, 根据活度测量结果稀释到预设体积, 室温放置约5min。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 即标记到预定的药物分子上。

④分装: 根据不同患者的用药要求, 用一次性无菌注射器抽取对应量的药物, 封装后放在转运铅罐中。

⑤质控：药物制备时，预留约 1mCi 的药物作为质控样品。质控样品装在铅罐中从淋洗制备间送至质控室，在质控室操作台上按照质控项目依次对淋洗液进行质量检验。其关键质控项目和方法包括：①放射性活度测定：使用活度计测量样品的放射性强度，确保剂量准确；②放射化学纯度分析：通过纸层析法、薄层层析法（TLC）或高压液相色谱法（HPLC）等方法，测定目标化学形态的放射性占比；③外观检查：目测药物的澄清度、均匀度和颜色，确保无可见杂质或沉淀；④pH 值测定：采用精密 pH 试纸快速检测，确保药物酸碱度在安全范围内，避免对患者造成刺激；⑤其他项目：如化学纯度、颗粒物等。质控时打开铅罐，蘸取少量药品点板，再将涂有少量放射性药品的测试板放入设备中自动检测。由于测试板上涂有的放射性药物极少，质控时间较短，因此对工作人员的辐射影响基本可以忽略。

⑥暂存：将分装好的药物通过送药电梯送至给药间暂存，待注射使用。

放射性核素发生器的操作流程及产污环节见图 9-5。



图 9-5 放射性核素发生器操作流程示意图

发生器淋洗制备辐射药物过程的污染因子主要是：β射线、γ射线、放射性废气、放射性废水、放射性固体废物等。

### 9.1.1.3 PET 显像诊断

#### (1) 设备组成及工作原理

PET-CT 是把核医学显像和现代医学影像学成像结合在一起，达到取长补短的目

的。PET 显像是反映组织或脏器代谢或功能变化的功能显像，可以通过图像观察分子水平的代谢和功能变化，这些变化早于形态和结构的变化，可用于肿瘤的早期诊断、寻找原发灶及转移灶、判断心肌存活等，但图像的空间分辨和质量较差。CT 等现代医学影像学成像具有空间分辨率高、解剖结构和脏器轮廓清楚、图像质量好，但反映功能和代谢变化差，确定占位性病变的性质比较困难。利用图像融合技术，把核医学显像和现代医学影像学成像相重叠，所显示的图像为两者图像的融合的结果，即细胞的代谢显像和所处的解剖位置图像，一次检查可快速了解全身的整体状况，便于病灶的准确定性和精确定位。

典型 PET-CT 见图 9-6。



图 9-6 典型 PET-CT 实物图

## (2) PET-MR

PET-MR，即正电子发射计算机断层显像（PET）和核磁共振成像术（MR）两强结合一体化组合成的大型功能代谢与分子影像诊断设备，扫描过程中 PET 对进入体内的正电子核素进行扫描和显像可获得代谢显像，而 MR 对 PET 图像做放射性的衰减校正，可以提供解剖学和组织特征，两者结合可以看到组织功能和新陈代谢，可提供比传统成像方式更为优质的影像结果。检查采用放射性核素或其标记物作为示踪剂，通过注射方式进入体内后，依其化学及生物学特性不同，随血流等进入某些特定的组织器官，参与或模仿某些生命物质在人体内的病理生理、引流代谢的过程。由于正常组织和病变组织在这个过程中的差异，使其聚集这种放射性核素或其标记物的能力发生了变化。因此，PET-MR 是目前最好的高端体检手段之一。

PET-MR 的主要部件包括机架、环形探测器、检查床及工作站等。环形晶体探

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

MR 主要组成部分为磁体系统、梯度系统、射频系统、计算机系统和辅助设备系统五部分组成。

本项目使用  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{89}\text{Zr}$ 、 $^{124}\text{I}$  等核素，JINX PET-CT 和 PET-MR 核素显像诊断。

### （3）用药量情况

由于 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 等PET药物的半衰期较短，生产和购药时应考虑药物衰变导致的活度减小。为充分利用药物，减少浪费，本项目PET药物按照药物半衰期由短到长（即 $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{89}\text{Zr}$ 、 $^{124}\text{I}$ ）的顺序依次注射，PET药物送达后即刻开始注射。1台PET-CT和1台PET-MR同时工作时，每15min可检查2人，因此按每半小时注射一批，每批4人，每人用药量均为10mCi。衰变损失的放射性药物活度按公式9-1计算：

$$A = A_0 \times e^{-(0.693t/T_{1/2})} \quad (9-1)$$

式中：

A — 药物注射时的放射性活度；

$A_0$  — 药物送达时的放射性活度；

t — 衰变时间；

$T_{1/2}$  — 半衰期。

经计算，本项目PET核素诊断拟使用放射性核素相关情况见表9-4。

表 9-4 PET 核素诊断拟使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量 (Bq)	日最大接诊人数	日最大操作量 (Bq/d)	年最大操作量 (Bq)	用途
$^{11}\text{C}$	液体	20min	EC  $\beta^+$	$3.70 \times 10^8$ (10mCi)	2 人	$2.09 \times 10^9$	$5.23 \times 10^{11}$	PET 显像诊断
$^{13}\text{N}$	液体	10min	EC  $\beta^+$	$3.70 \times 10^8$ (10mCi)	2 人	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$	

<sup>15</sup> O	液体	2min	EC β <sup>+</sup>	3.70×10 <sup>8</sup> (10mCi)	2 人	7.40×10 <sup>8</sup>	1.85×10 <sup>11</sup>	
<sup>18</sup> F	液体	109.8min	EC β <sup>+</sup>	3.70×10 <sup>8</sup> (10mCi)	30 人	2.91×10 <sup>10</sup>	7.28×10 <sup>12</sup>	
<sup>64</sup> Cu	液体	12.7h	EC β <sup>+</sup> β <sup>-</sup>	3.70×10 <sup>8</sup> (10mCi)	2 人	1.04×10 <sup>9</sup>	2.60×10 <sup>11</sup>	
<sup>68</sup> Ga	液体	1h	EC β <sup>+</sup>	3.70×10 <sup>8</sup> (10mCi)	2 人	1.05×10 <sup>9</sup>	2.63×10 <sup>11</sup>	
<sup>89</sup> Zr	液体	3.3d	EC β <sup>+</sup>	3.70×10 <sup>8</sup> (10mCi)	2 人	7.40×10 <sup>8</sup>	1.85×10 <sup>11</sup>	
<sup>124</sup> I	液体	4.2d	EC β <sup>+</sup>	3.70×10 <sup>8</sup> (10mCi)	2 人	7.40×10 <sup>8</sup>	1.85×10 <sup>11</sup>	

#### (4) 工作流程及产污环节

PET-CT 及 PET-MR 诊断工作流程基本相同，流程如下：

①根据临床诊断需药量，提前一天向医院放射性药物制备提出药物需求，对于外购的药物提前一天进行用药量采购，用药当天送达。

②医院放射性核素生产场所按照需求进行生产、标记、分装、质控，送至核医学科储源室，外购的放射性按时间要求送至核医学科给药准备间。

③患者根据预约情况，进入一层核医学科门口候诊区域候诊，工作人员根据工作安排呼叫轮到诊断的患者名字，根据视频监控图像，通过语音提示，指导患者到达注射窗前。

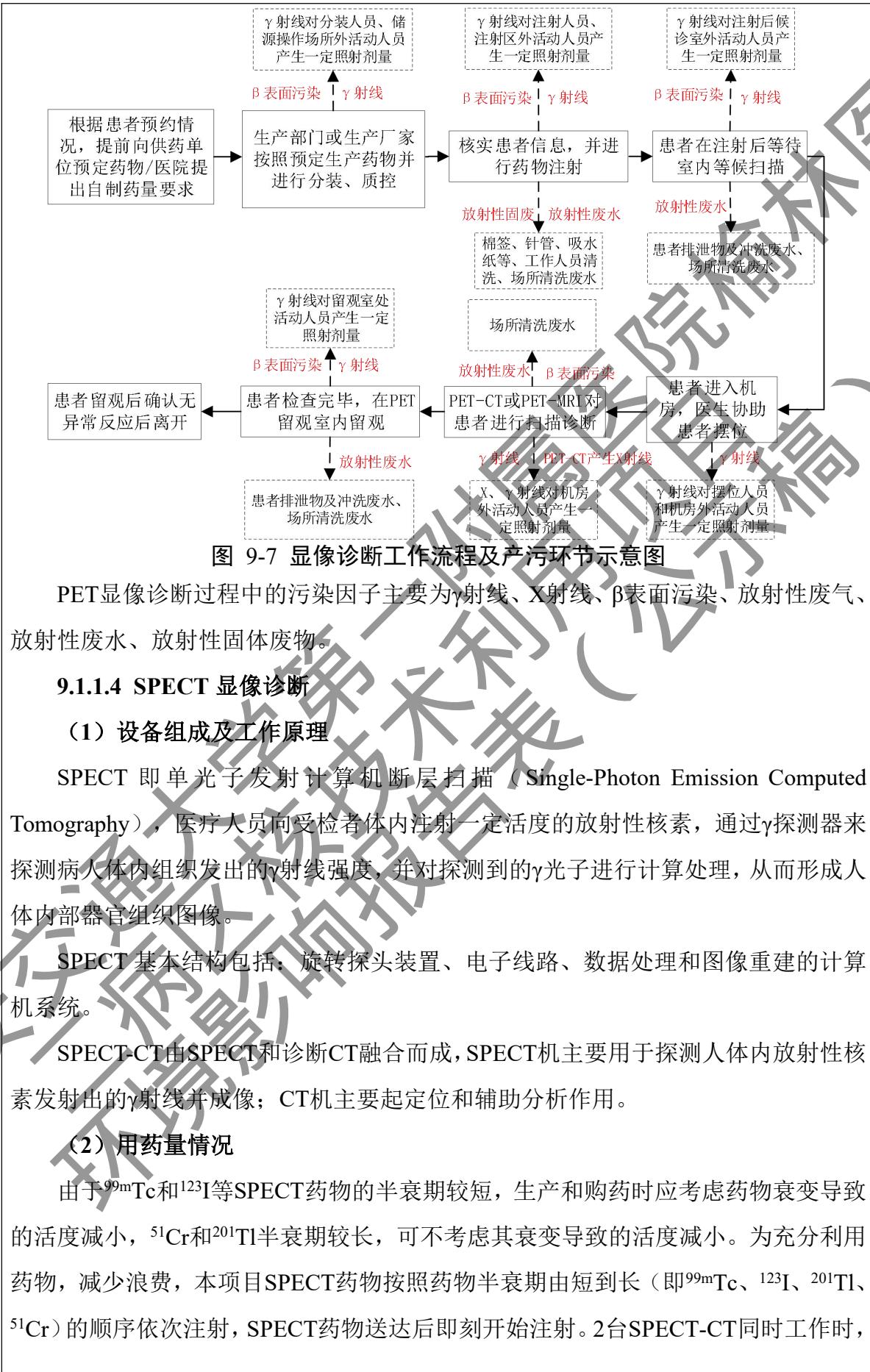
④辐射工作人员根据视频监控图像，通过语音提示，指导药物注射后的患者进入注射后候诊室候诊。

⑤患者听到叫号后进入 PET 机房接受显像扫描。患者进入机房后，控制室的辐射工作人员通过观察窗和语音系统，指导患者正确躺在检查床上，然后隔室操作 PET-CT 或 PET-MR 对患者实施显像扫描。如遇到患者需要协助摆位时，辐射工作人员从控制室进入机房对患者辅助摆位，之后回到控制室，隔室操作 PET-CT 或 PET-MR 对患者实施显像扫描。

⑥进行 PET 显像检查的患者因为扫描成像清晰度等原因，需要在留观室进行留观，确认无需补片后由离开通道离开核医学科。

本项目 PET 放射诊断过程的污染因子主要是：放射性药物产生的γ射线和β射线，放射性废水、放射性废气、放射性固废等，CT 扫描时产生的 X 射线、臭氧和氮氧化物。

PET 放射诊断工作流程及产污环节见图 9-7。



#### 9.1.1.4 SPECT 显像诊断

##### (1) 设备组成及工作原理

SPECT 即单光子发射计算机断层扫描 (Single-Photon Emission Computed Tomography)，医疗人员向受检者体内注射一定活度的放射性核素，通过 $\gamma$ 探测器来探测病人体内组织发出的 $\gamma$ 射线强度，并对探测到的 $\gamma$ 光子进行计算处理，从而形成人体内部器官组织图像。

SPECT 基本结构包括：旋转探头装置、电子线路、数据处理和图像重建的计算机系统。

SPECT-CT由SPECT和诊断CT融合而成，SPECT机主要用于探测人体内放射性核素发射出的 $\gamma$ 射线并成像；CT机主要起定位和辅助分析作用。

##### (2) 用药量情况

由于 $^{99m}\text{Tc}$ 和 $^{123}\text{I}$ 等SPECT药物的半衰期较短，生产和购药时应考虑药物衰变导致的活度减小， $^{51}\text{Cr}$ 和 $^{201}\text{Tl}$ 半衰期较长，可不考虑其衰变导致的活度减小。为充分利用药物，减少浪费，本项目SPECT药物按照药物半衰期由短到长（即 $^{99m}\text{Tc}$ 、 $^{123}\text{I}$ 、 $^{201}\text{Tl}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ ）的顺序依次注射，SPECT药物送达后即刻开始注射。2台SPECT-CT同时工作时，

每15min可检查2人，因此按每半小时注射一批，每批4人， $^{99m}\text{Tc}$ 单人用药量为25mCi， $^{201}\text{Tl}$ 单人用药量为4mCi，其余核素单人用药量为5mCi。衰变损失的放射性药物活度按公式9-1计算：

经计算，本项目SPECT核素诊断拟使用放射性核素相关情况见表9-5。

表 9-5 SPECT 核素诊断使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量(Bq)	日最大接诊人数	日最大操作量(Bq/d)	年最大操作量(Bq)	用途
$^{51}\text{Cr}$	液体	27.7d	EC	$1.85 \times 10^8$ (5mCi)	1人	$1.85 \times 10^8$	$4.63 \times 10^{10}$	
$^{99m}\text{Tc}$	液体	6.02h	IT	$9.25 \times 10^8$ (25mCi)	50人	$5.54 \times 10^{10}$	$1.39 \times 10^{13}$	SPECT-CT 显像诊断
$^{123}\text{I}$	液体	13.2h	EC  $\beta^+$	$1.85 \times 10^8$ (5mCi)	1人	$2.55 \times 10^8$	$6.38 \times 10^{10}$	
$^{201}\text{Tl}$	液体	3.04d	EC	$7.40 \times 10^7$ (4mCi)	5人	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{10}$	

### (3) 工作流程及产污环节

SPECT-CT 显像诊断工作流程：

①根据患者预约情况，提前一天向供药部门汇报用药计划或向供药单位订购。  
②药物生产部门按照订购要求在约定时间内将放射性药物运送至项目核医学科给药室，外购药物按要求送至给药室，核医学科安排专人接收。经确认无误完成相关交接手续，并将放射性药物暂放给药室 SPECT 手套箱内，

③注射人员穿戴好个人防护用品。  
④护士站的工作人员根据工作安排，呼叫轮到诊断的患者名字。在确认患者身份后，让该患者经核医学科门禁系统进入辐射工作场所。

注射给药患者按照语音广播提示，前往注射窗处，辐射工作人员通过注射窗口对患者进行药物注射。

需要在运动负荷或药物负荷下给药的患者进入运动负荷室，通过运动或注射药物达到目标心率后，工作人员从给药室穿过运动负荷室北侧门进入运动负荷室，为患者注射 SPECT 药物。注射时通常可使用注射防护车减少工作人员受照剂量。

通过肺通气吸入锝药物的患者前往肺通气室，通过雾化面罩吸入含  $^{99m}\text{Tc}$  药物的气体。吸入过程约 3-5 分钟。

⑤工作人员根据视频监控图像，通过语音提示，指导给药后的患者进入 SPECT 注射后等待室候诊。

⑥通过语音提示，患者进入 SPECT-CT 机房接受显像扫描。患者进入机房后，控制室的放射工作人员通过观察窗和语音系统，指导患者正确躺在检查床上，然后隔室操作 SPECT-CT 对患者实施显像扫描。如遇到个别特殊的患者需要协助摆位时，放射工作人员从控制室进入机房对患者辅助摆位，随后离开机房进入控制室，隔室操作 SPECT-CT 对患者实施显像扫描。

⑦扫描完成后无需留观，患者由控制区出口离开核医学科辐射场所活性区。

SPECT 显像诊断工作流程及产污环节见图 9-8。



图 9-8 项目 SPECT-CT 显像诊断工作流程及产污环节示意图

SPECT 显像诊断过程中的污染因子主要为  $\gamma$  射线、X 射线、 $\beta$  表面污染、放射性废气、放射性废水、放射性固体废物。

#### 9.1.1.5 $^{131}\text{I}$ 核素诊疗

##### (1) 工作原理

$^{131}\text{I}$  核素治疗包括甲状腺吸碘功能测定（简称甲功测定），甲亢治疗，甲癌治疗。主要利用碘元素会在甲状腺处选择性富集的特点，使用其放射性同位素  $^{131}\text{I}$ 。

甲功测定主要利用甲状腺具有选择性摄取和浓聚碘的特点，其摄取碘的速度和数量以及碘在甲状腺的停留时间，取决于甲状腺的功能状态。由于  $^{131}\text{I}$  与稳定性的碘

具有相同的生化性质和生物学特性，因此<sup>131</sup>I经患者口服后在甲状腺内聚集。利用等量的<sup>131</sup>I药物作为标准源，分别利用甲状腺功能仪γ探测器测量甲状腺部位、标准源<sup>131</sup>I发射的γ射线计数率以及本底计数率，获得不同时间（给药后2h、4h、24h）甲状腺部位放射性计数率，根据甲状腺摄取<sup>131</sup>I的数量和速度、释放的速率来判定甲状腺功能状态。利用不同时间段患者摄碘率的变化曲线来判断患者甲状腺功能是否正常，为甲状腺疾病的诊断和放射性碘治疗提供可靠的数据。<sup>131</sup>I半衰期8.02d，主要通过<sup>131</sup>I衰变发射出的0.364MeV的γ射线测定甲状腺摄<sup>131</sup>I率。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录A 豁免中A2“可豁免的源与豁免水平”规定：<sup>131</sup>I的豁免水平应符合表A1的豁免活度浓度（<100Bq/g）与豁免活度（<1MBq）的要求。每名受检者体重按50kg计，则受检者的活度浓度为：0.37MBq/50kg=7.4Bq/g，满足<100Bq/g的豁免活度浓度要求；甲功测定受检者一般最大用药量为0.185MBq（5μCi），满足<1MBq的豁免活度水平的要求。

因此服药后的甲状腺吸碘功能测定受检者对周围环境影响可忽略，无需进行额外的辐射安全管控。

### （2）用药量情况

本项目<sup>131</sup>I诊疗用药量情况见表9-6。

表 9-6 <sup>131</sup>I核素诊疗使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量(Bq)	日最大接诊人数	日最大操作量(Bq)	年最大操作量(Bq)	用途
<sup>131</sup> I	液体	8.02h	$\beta^-$	$1.85 \times 10^5$ (5μCi)	30 人	$5.55 \times 10^6$	$1.39 \times 10^9$	甲功测定
				$3.70 \times 10^8$ (25mCi)	10 人	$3.70 \times 10^9$	$1.85 \times 10^{11}$	甲亢治疗
				$7.40 \times 10^9$ (200mCi)	4 人	$2.96 \times 10^{10}$	$1.48 \times 10^{12}$	甲癌治疗

### （3）工作流程及产污环节

#### 1) 甲功测定

甲功测定是甲亢治疗、甲癌治疗流程中治疗前阶段的步骤，甲状腺功能测定是在甲功室内利用甲状腺功能测定仪来测定患者甲状腺吸碘率。其具体治疗流程为：

①根据医生指导意见，需要接受甲状腺功能测定的患者提前登记预约，进行治疗前准备，需停止食用含碘丰富的食物2-4周，停止服用含碘药物2周以上。检查当日患者应空腹；

- ②药物预定好以后，然后由供药单位将药物当天用专车运抵医院核医学科分药区，暂存在储源容器中；
- ③开机预热，使甲状腺功能仪处于正常工作状态，测量甲功测定室本底计数；
- ④将1人份药物放入颈部模型内甲状腺对应位置，测量标准源计数；
- ⑤患者在门诊给药区服药窗口服药，药物进入人体后参与人体代谢；
- ⑥甲功测定患者服药后2h、4h、24h分别前往吸碘率室，测定甲状腺放射性计数；
- ⑦并根据结果计算甲状腺摄碘率，出具报告。

甲状腺吸碘功能测定的操作流程及产污环节见图9-9。

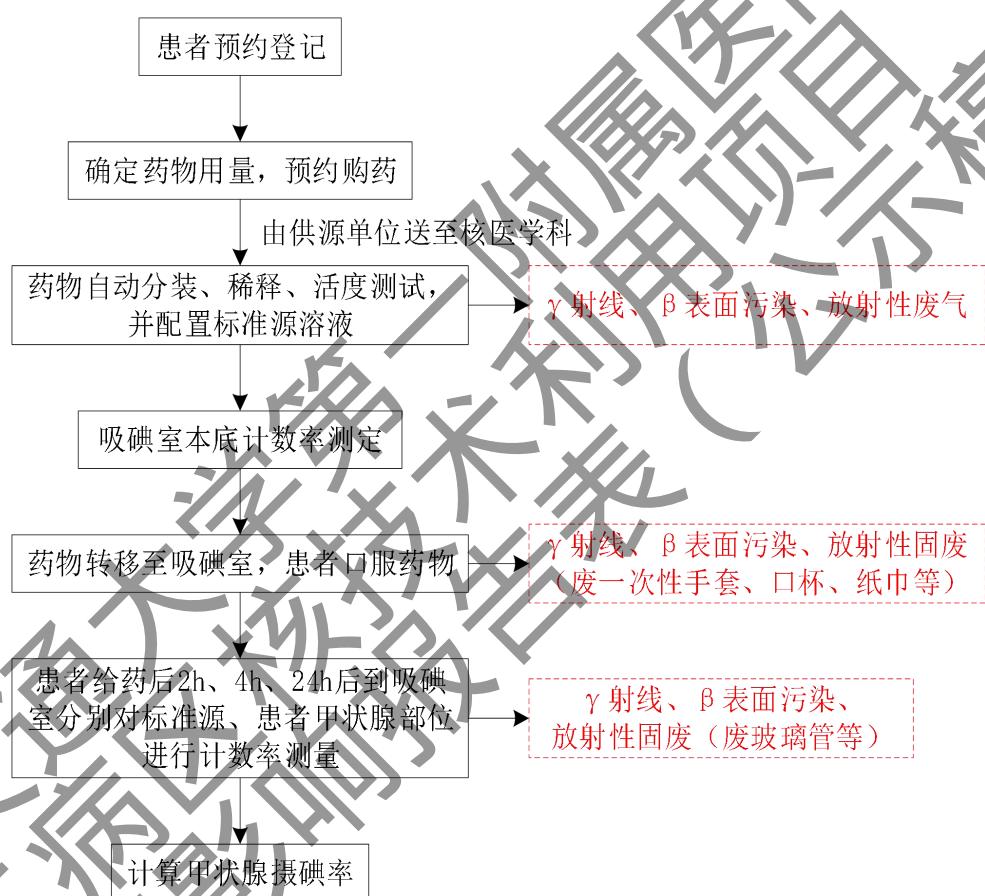


图 9-9 甲功测定操作流程及产污环节示意图

## 2) 甲亢治疗流程

医院根据患者情况向供药单位预定 $^{131}\text{I}$ 放射性药物，然后由供药商当天用专车运抵医院核医学科，供药商的专业技术人员通过泵吸将铅罐内的 $^{131}\text{I}$ 注入自动分装仪中，然后医生通过电脑控制自动分装仪中对购买的 $^{131}\text{I}$ 液态放射性药物进行稀释。医生在本机页面或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料进行稀释处理、定量分配、在线活度测量和样品种体积配比的全部工

作，测试合格的溶液可用于患者服用。

工作人员按照工作计划叫号，被叫到的患者验证身份后进入核医学科，在自动分装仪处服药。

本项目甲亢患者服药量小于400MBq的出院标准，因此患者服药后可直接由患者出口离开核医学科。

甲亢治疗流程图及产物环节见图9-10。

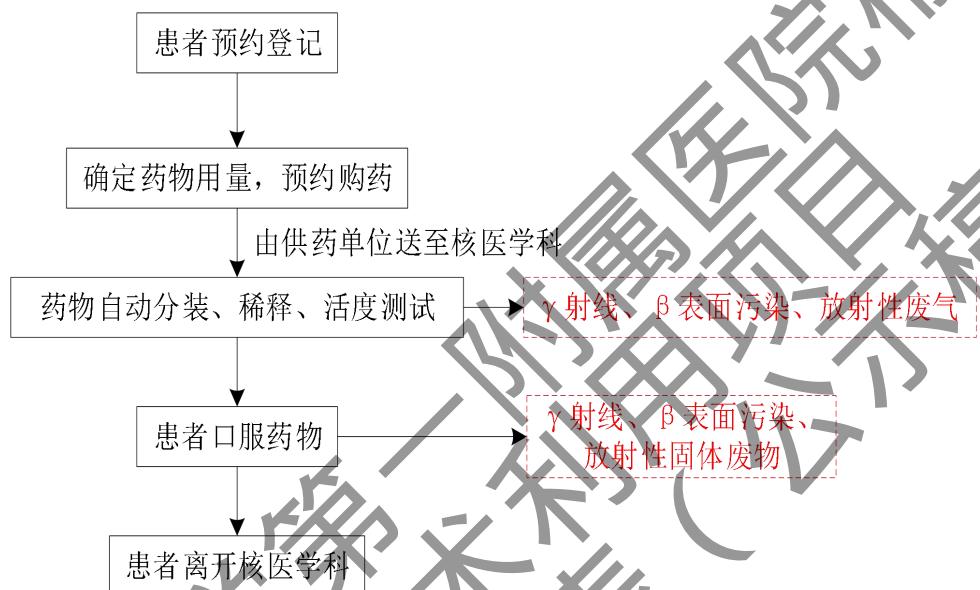


图 9-10 甲亢治疗流程及产污环节示意图

### 3) 甲癌治疗服药治疗流程

#### a) 接收患者

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

#### b) 医生根据患者病情确定核素用量

根据临床诊断需药量，提前一天向供药单位订购所需放射性药物。供药单位按照订购要求在使用当天用专车运送至医院核医学科，核医学科安排专人接收，经确认无误完成相关交接手续，并将放射性药物暂存在自动分装柜中。

#### c) 患者经预约问诊后，前往 $^{131}\text{I}$ 自动分装仪口服药物，服药后对号进入甲癌治疗病房住院观察。

甲癌患者进入病房后不再接触辐射工作人员，配餐时间和诊疗时间不重叠，配餐期间治疗区域无患者活动。配餐由物流配送至护士站后，患者依次前往指定地点

自取。查房、出院检测等工作由工作人员通过视频监控和对讲系统远程完成。

甲癌治疗的工作流程及产污环节见图9-11。

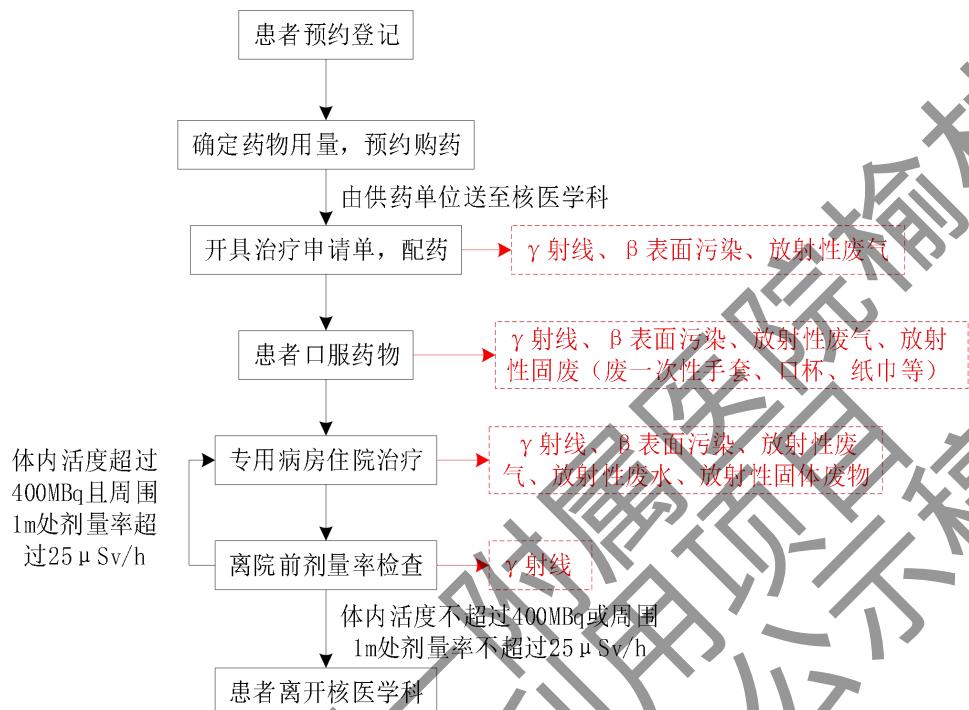


图 9-11 项目甲癌治疗工作流程及产污环节示意图

$^{131}\text{I}$ 核素诊疗过程中的污染因子主要为 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线、X射线、放射性废气、放射性废水、放射性固体废物。

#### 9.1.1.6 核素注射治疗

##### (1) 工作原理

核医学科使用 $^{35}\text{S}$ 、 $^{47}\text{Sc}$ 、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{153}\text{Sm}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ 、 $^{186}\text{Re}$ 、 $^{188}\text{Re}$ 、 $^{211}\text{At}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ 、 $^{225}\text{Ac}$ 、 $^{227}\text{Th}$ 共11种治疗核素开展核素注射治疗。

$^{177}\text{Lu}$ 是一种优良的治疗性核素，半衰期为161h，可以标记较小的肽类，靶向性较好。 $^{177}\text{Lu}$ 衰变时发射 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线， $\beta$ 射线能量为0.497MeV，在组织中的平均射程为2mm，治疗过程较为安全。用于实体性肿瘤治疗。

$^{211}\text{At}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ 、 $^{225}\text{Ac}$ 、 $^{227}\text{Th}$ 是优良的 $\alpha$ 治疗核素，主要释放 $\alpha$ 射线，其 $\alpha$ 射线具有很短的射程和较高的能量线密度，利用自身的化学特性或标记在特异性载体上利用载体的靶向性，能够定向富集在患者体内病灶处，并释放 $\alpha$ 射线，杀死周围病变组织。

$^{89}\text{Sr}$ 是一种亲骨元素，半衰期为50.5d，属于 $\beta$ 核素，其 $\beta$ 射线最大能量为1.5MeV。 $^{89}\text{Sr}$ 进入体内后以钙元素相同方式参与骨矿物质代谢，易富集并滞留在癌灶中，其辐射能有效杀死癌细胞，缩小病灶，缓解疼痛。用于转移性骨肿瘤治疗。

为减小对正常组织的辐射影响,本项目核素注射治疗选用放射性核素均为 $\alpha$ 核素或 $\beta$ 核素,其产生的 $\alpha$ 射线射程很短,常规人体组织、角质层、衣物等即可阻挡,产生的 $\beta$ 射线在人体组织内射程不超过1cm,人体即可将其完全屏蔽。

本项目注射治疗药物均为外购成品药物,可直接用于注射,不涉及分装、质控等环节。

### (2) 用药量情况

本项目门诊核素治疗用药量情况见表9-7。

表 9-7 门诊核素治疗使用放射性核素相关情况一览表

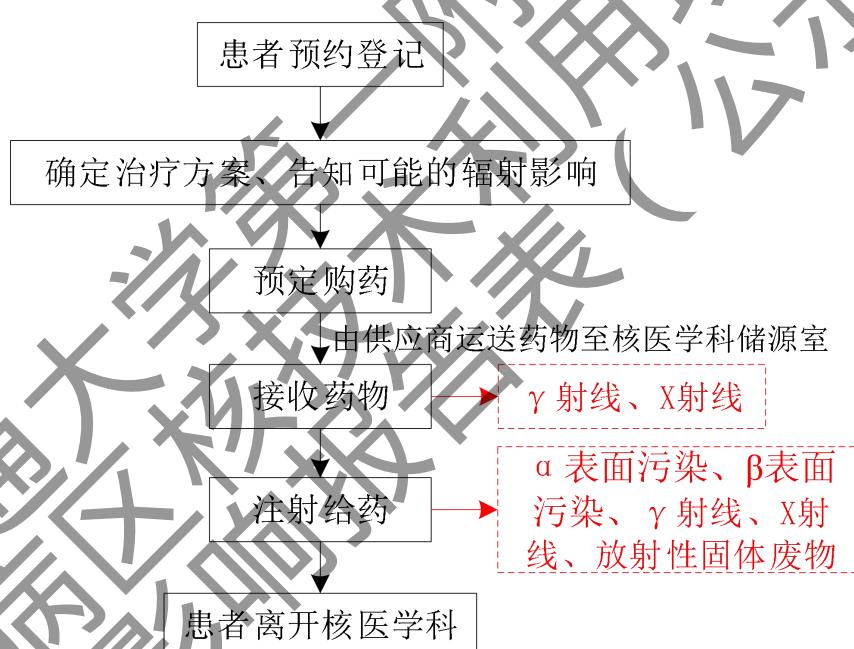
核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量(Bq)	日最大接诊人数	日最大操作量(Bq)	年最大操作量(Bq)	用途
$^{47}\text{Sc}$	液体	3.35d	$\beta^-$	$3.70 \times 10^8$	1人	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{10}$	核素治疗
$^{89}\text{Sr}$		50.6d	$\beta^-$	$1.85 \times 10^8$	2人	$3.70 \times 10^8$	$9.25 \times 10^{10}$	
$^{153}\text{Sm}$		1.93d	$\beta^-$	$9.25 \times 10^8$	2人	$1.85 \times 10^9$	$4.63 \times 10^{11}$	
$^{177}\text{Lu}$		6.64d	$\beta^-$	$3.70 \times 10^9$	1人	$3.70 \times 10^9$	$9.25 \times 10^{11}$	
$^{186}\text{Re}$		3.72d	EC (7.5%) $\beta^-$ (92.5%)	$3.70 \times 10^9$	1人	$3.70 \times 10^9$	$9.25 \times 10^{11}$	
$^{188}\text{Re}$		17h	$\beta^-$	$1.85 \times 10^9$	1人	$1.85 \times 10^9$	$4.63 \times 10^{11}$	
$^{221}\text{At}$		7.2h	EC (58.2%) $\alpha$ (41.8%)	$7.40 \times 10^8$	1人	$7.40 \times 10^8$	$1.85 \times 10^{11}$	
$^{223}\text{Ra}$		11.4d	$\alpha$	$1.11 \times 10^7$	1人	$1.11 \times 10^7$	$2.78 \times 10^9$	
$^{225}\text{Ac}$		10d	$\alpha$	$1.11 \times 10^7$	1人	$1.11 \times 10^7$	$2.78 \times 10^9$	
$^{227}\text{Th}$		18.7d	$\alpha$	$1.11 \times 10^7$	1人	$1.11 \times 10^7$	$2.78 \times 10^9$	

### (3) 工作流程及产污环节

核素治疗流程主要为患者预约就诊、确定治疗方案并告知患者可能受到的辐射影响、剂量确定、病人注射药物等。

工作人员按照工作计划叫号,被叫到的患者验证身份后进入核医学科,在注射窗口处接受放射性药物注射。

注射 $^{177}\text{Lu}$ 的患者需要住院进行医学观察,以及时应对服药后的不良反应并及时检查, $^{177}\text{Lu}$ 住院治疗流程及产污环节见图9-12;其余注射治疗患者完成注射后即可离开核医学科,门诊治疗流程及产污环节见图9-13。



核素注射治疗过程中的污染因子主要为 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线、X射线（轫致辐射）、放射性废水、放射性固体废物。

### 9.1.1.7 敷贴治疗

#### (1) 工作原理

敷贴治疗是一种近距离治疗方式。通过选择适当的放射性核素面状源作为敷贴器覆盖在患者病变部位的表面照射一定时间，从而达到消除瘢痕、皮肤病等浅表疾

病的目的。放射性核素敷贴器是将一定活度与能量的放射性核素，通过一定的方式密封起来，制成具有不同形状和面积的面状源作为敷贴治疗用的放射源，简称敷贴器或敷贴源。放射性核素敷贴治疗器应选用半衰期较长、 $\beta$ 射线能量较高，不伴生 $\gamma$ 辐射或仅伴生低能 $\gamma$ 辐射的放射性核素。本项目拟使用自制 $^{32}\text{P}$ 敷贴器和 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 密封源敷贴器开展敷贴治疗。敷贴治疗过程中放射性核素在敷贴器中，不直接接触患者皮肤，也不进入患者体内。

$^{32}\text{P}$ 的半衰期为 $14.26\pm 0.1\text{d}$ ，衰变方式为纯 $\beta^-$ 衰变，衰变可放出能量为 $1.710\text{MeV}$ 的 $\beta$ 射线； $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 源由 $^{90}\text{Sr}$ 及其子体 $^{90}\text{Y}$ 组成。 $^{90}\text{Sr}$ 半衰期为 $28.5\text{年}$ ，衰变时发射 $546\text{keV}$ 的 $\beta$ 射线； $^{90}\text{Y}$ 半衰期为 $64.2\text{h}$ ，发射 $2280\text{keV}$ 的 $\beta$ 射线。敷贴治疗极少可能伤害到深部正常组织，适合浅表性疾病的治疗。

### （2）用药量情况

本项目敷贴治疗核素使用情况见表9-8。

表 9-8 敷贴治疗使用放射性核素相关情况一览表

核素	形态	半衰期	衰变方式	单人核素最大用量 (Bq)	日最大接诊人数	日最大操作量 (Bq)	年最大操作量 (Bq)	用途
$^{32}\text{P}$	液体	$14.2\text{d}$	$\beta^-$	$1.85\times 10^8$	2 人	$3.70\times 10^8$	$9.25\times 10^{10}$	敷贴治疗
核素名称		单枚活度 (Bq)		枚数	放射源分类		使用场所	用途
$^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$		$1.85\times 10^9\text{Bq}$		1	V类		敷贴室	敷贴治疗

### （3）工作流程及产污环节

敷贴治疗的主要工作流程包括病人就诊，治疗方法介绍并告知可能收到的辐射危害、取出敷贴器放置在病变部位、回收敷贴器等。敷贴器日常存放在敷贴室的保险箱中。

- a) 治疗前根据病变的部位、形状、面积、病变程度合理计算治疗方案，精确计算疗程的分次照射剂量和累积照射剂量。
- b) 在手套箱中将预定剂量的 $^{32}\text{P}$ 药物滴加在敷料上，再使用胶带或塑料薄膜将其密封，制成敷贴器。
- c) 实施治疗时，采用 $3\text{mm}$ 厚的橡胶板或橡皮泥屏蔽周围的正常组织。对颜面部位的病变，屏蔽其周围正常皮肤；对其他部位的病变，则在病变周围露出正常皮肤 $0.5\text{cm}$ 。
- d) 在已屏蔽的皮肤上覆盖一张玻璃纸或塑料薄膜后，将敷贴器紧密贴在病变部

位。每次治疗时应由专人使用能报警的计时器控制照射时间，治疗过程中应密切观察治疗反应和病变治疗情况，及时调整照射剂量，防止产生并发症。

e) 每次治疗结束后，由工作人员收回敷贴器，检查治疗效果。

敷贴治疗工作流程及产污环节见图9-14。

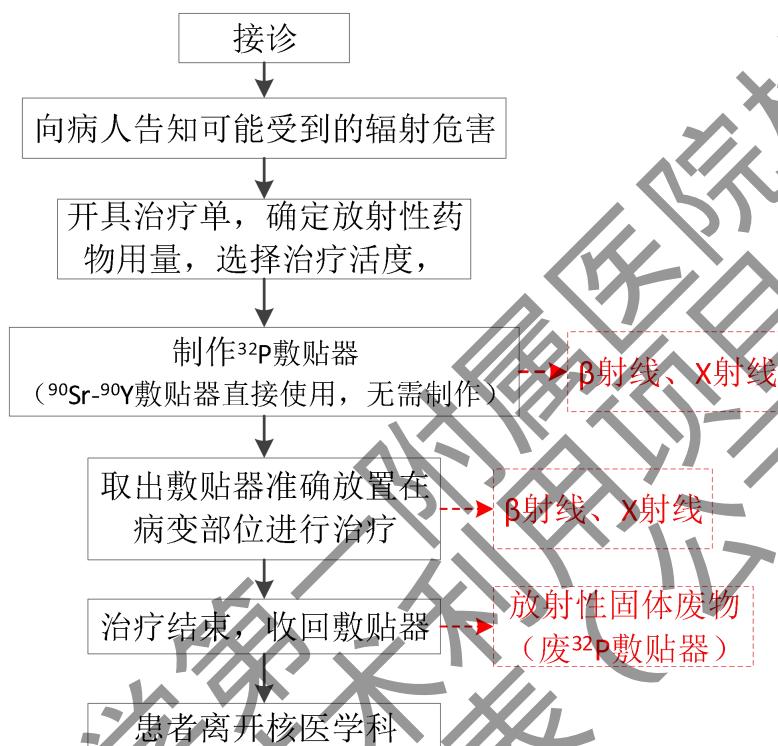


图 9-14 敷贴治疗工作流程及产污环节示意图

敷贴治疗过程的污染因子主要是：β射线、X射线（轫致辐射）、放射性固体废物等。

### 9.1.1.8 后装治疗

#### (1) 设备组成及工作原理

后装治疗是放射治疗的一种方法，所谓后装就是预先在病人需要治疗的部位正确地放置施源器，然后通过遥控操作，将储源器内放射源输入施源器内，实施治疗的技术。后装机由治疗计划系统、控制系统和治疗系统三部分组成，其中治疗计划系统包括计算机、数字化仪、打印机及治疗系统软件等，治疗系统包括专用控制微机系统、步进电机、放射源、储源器、真假源传输结构、紧急回源机构、计时器和治疗通道等。

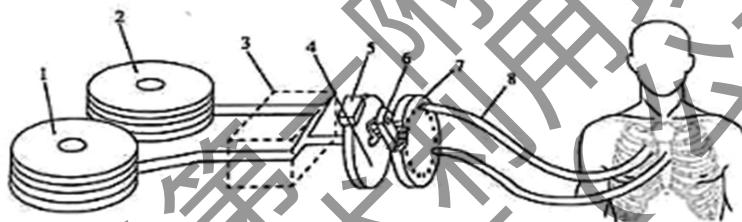
后装治疗具有治疗距离短，源周局部剂量高，周围剂量迅速跌落的特点，因而在提高肿瘤局部照射剂量的同时，可有效保护周边正常组织和重要器官，后装治疗

技术的应用使医护人员摆脱了以往近距离治疗时手持放射源直接受照的危害，明显降低了医务人员的受照剂量，提高了摆位和固定的精度，也缩短了照射时间，减轻了患者的痛苦。

典型后装机见图9-15，典型后装机内部结构见图9-16。



图 9-15 典型后装机



说明：1. 模拟源轮 2. 真源轮 3. 安全区 4. 换路器 5. 编码 6. 换路导管 7. 接盘器 8. 施源器

图 9-16 典型后装机内部结构

## （2）工作流程及产污环节

后装机治疗流程如下：

①预约登记：患者经医生进行诊断、治疗正当性判断后，确定需要治疗的患者预约登记，以确定模拟定位和治疗时间。

②模拟定位：预约患者先通过模拟定位机进行肿瘤定位，确定肿瘤具体位置和形状，确定治疗中心。

③制定治疗计划：确定肿瘤位置和形状后，物理人员根据医生给出的治疗剂量，通过治疗计划系统（TPS）制定治疗计划。根据患者肿瘤的性质、部位和大小，确定照射剂量和照射时间。

④治疗前准备：治疗计划制定后，工作人员在准备间对肿瘤患者病变部位进行施源器插入。

⑤工作人员将患者推进后装机房，检查设备状况，将施源管和施源器送达腔道的病灶，将预置管与后装机施源管相连接。确认除患者外无其他人员滞留，工作人

员离开机房，并关闭防护门。

⑥在控制室控制台通过计算机系统，先用假源轮进行试运行，验证无误后，再用真源轮将放射源从后装机机体通过输源管送达病灶进行治疗，治疗结束后真源自动复位。

⑦治疗结束，源回到屏蔽体内。打开防护门，拆除输源管等设备，工作人员协助患者离开治疗机房。

后装机一般治疗流程及产污环节见图9-17。

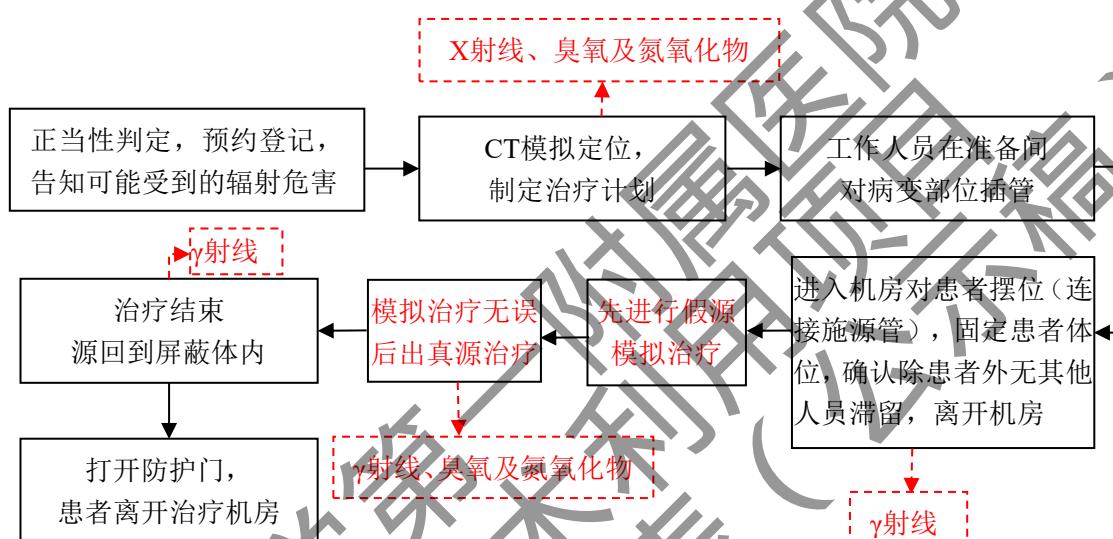


图 9-17 后装机近距离治疗流程及产污环节简图

后装治疗过程中的污染因子主要为： $\gamma$ 射线，臭氧和氮氧化物，废放射源。

### 9.1.1.9 直线加速器放射治疗

#### (1) 设备组成及工作原理

医用电子直线加速器属于II类射线装置，它的结构单元包括：加速管、微波系统、电子枪、调制器、束流传输系统及准直系统、真空系统、恒温水冷系统、电源及控制系统、照射头、治疗床。电子枪产生的电子经微波加速器导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子束由电子窗口射出形成电子线，也可通过2cm左右的空气射到金属钨靶，产生大量高能X线，经一级准直器和滤线器，形成剂量均匀稳定的X线束，再通过监测电离室和二次准直器限束到达患者病灶，实现治疗目的。

医用直线加速器在开机状态下产生电子线和X射线，电子线贯穿能力弱，射程短，因此只适合治疗表浅部位的肿瘤。电子线靠电离效应来破坏生物组织，并在此过程中损失其能量，能量在35~45MeV以下的电子线有一个明确的射程，而电子线的大部分能量都损失在射程的末端，射程随能量延长，只要我们调节电子线的能量，使

电子线射程恰好超过肿瘤的范围，就能对肿瘤灶有较大的破坏作用，而病灶后面的组织及表层组织则受到很少损害。X射线主要依靠康普顿散射效应，破坏生物组织细胞，并在此过程中损失能量，X射线有较强的穿透能力，但没有明显的射程，适合治疗人体深部肿瘤。在等于或低于10MV模式下，发生光核反应的概率极低，加速器产生的中子辐射影响极小，对应的感生放射性影响极小，根据《放射治疗辐射安全与防护》（HJ1198-2021）和《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）相关规定，X射线能量超过10MV的加速器，屏蔽设计时应考虑中子防护。本项目10MV医用直线加速器不考虑中子辐射防护。

医用电子直线加速器具备CBCT图像引导系统，使用锥形束X射线进行信息采集的计算机体层成像技术。它与传统多排探测器CT最显著的区别是使用二维数字平板探测器，在一次旋转中产生三维容积图像。CBCT由kV imager影像板和kV tube球管等硬件及控制软件组成，球管产生kV级X射线，X射线穿过物体投影到影像板成像。

治疗计划选择CBCT图像验证时，病人在加速器治疗室开始治疗前，先完成病人肿瘤位置的验证，控制系统使CBCT高压发生器产生高压，球管产生X射线，控制系统将使用CBCT功能扫描病人，信号经过处理和图像完成重建后，对治疗计划中肿瘤位置图像进行优化和确认，完成图像引导，随后根据控制系统指令，加速器的电子枪产生电子，经加速管加速电子到相应能量打靶形成治疗所需的加速器X射线，根据物理师的治疗计划完成肿瘤的照射。CBCT图像引导和加速器出束治疗不会同时进行。通常是交替开机。

典型医用电子直线加速器内部结构见图9-18，典型医用电子直线加速器见图9-19。

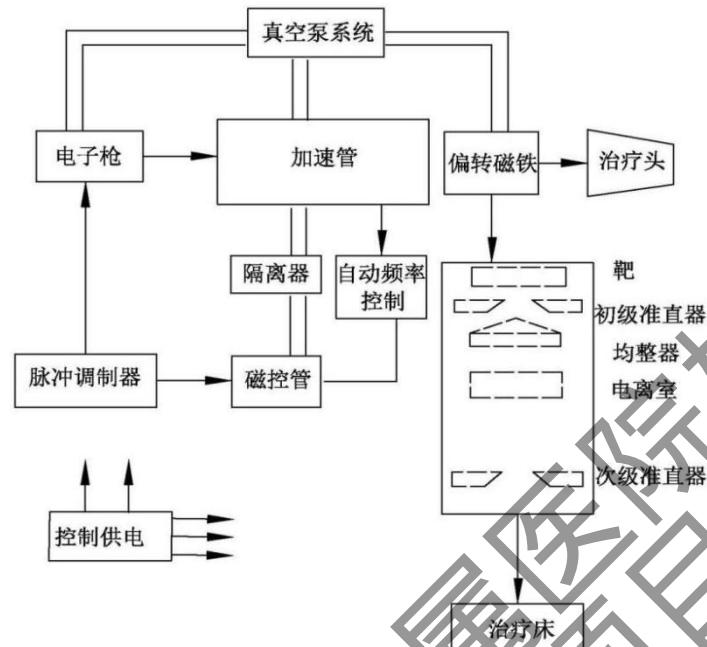


图 9-18 典型医用电子直线加速器内部结构框图

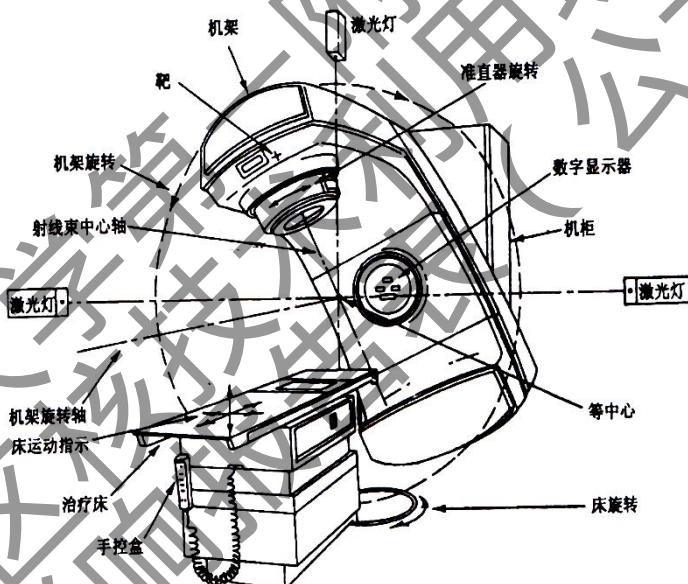


图 9-19 典型医用电子直线加速器示意图

## (2) 工作流程及产污环节

医用电子直线加速器在进行放射治疗时，患者位于机房内，医务人员位于机房外，进行隔室操作。治疗时，加速器机房可为医务人员以及墙外停留或通过的人员提供足够的屏蔽防护，并可防止在开机过程中，无关人员误入机房。

医用电子直线加速器治疗流程如下：

①模拟定位：借助CT模拟定位机确定肿瘤的位置和范围，CT模拟定位机主要操作流程为：依据检查单→核对摄影部位→确定投照条件→曝光。

②治疗计划设计阶段：借助计算机治疗计划系统（TPS）进行治疗计划设计，选择好能量、照射野大小、治疗剂量与剂量比、楔形滤过板等。

③铅模制作：电子线治疗的患者需要根据模拟定位勾画的靶区范围，制作适当形状的铅模，用于遮挡靶区周围正常组织，X射线治疗无需使用铅模，可直接通过多叶准直器遮挡正常组织。

④治疗计划的确认：根据上述设计好的治疗计划，以跟治疗时同等的摆位条件（如垫肩、加固定器等）放到CBCT图像引导系统上进行核对。经证实可行后，在病人体表上做出相应的照射野标记，填写治疗单，做好治疗固定器、挡野铅块和组织补偿块等，确定后的治疗计划。

⑤治疗计划的执行：

- a、设置治疗机的物理、几何参数。
- b、辐射工作人员将病人送入治疗室并进行摆位。
- c、固定治疗体位，肿瘤中心位于等中心点。
- d、除了待治疗病人，其余人员撤出治疗室，关闭防护门。
- e、加速器出束，进行治疗。
- f、治疗完毕，加速器停止出束，打开防护门，护理人员将病人送出治疗室。

医用电子直线加速器治疗流程及产污环节见图 9-20。

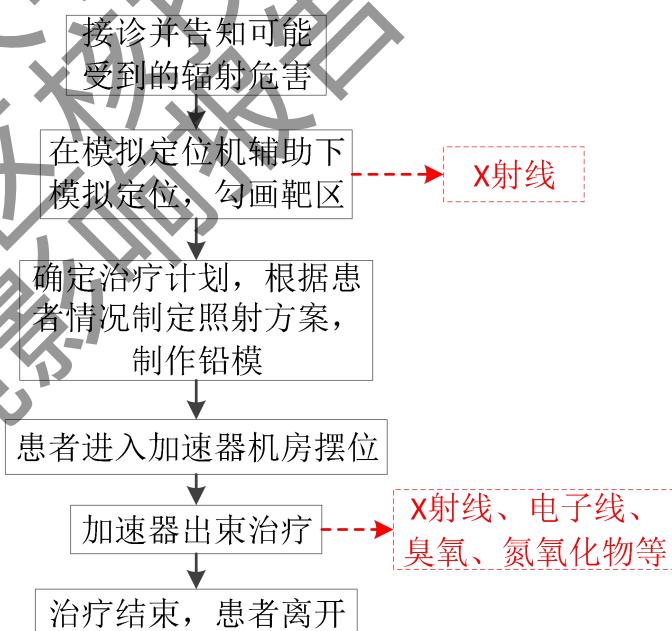


图 9-20 直线加速器治疗流程及产污环节示意图

直线加速器放射治疗过程中污染因子主要为：电子束、X射线、臭氧和氮氧化物

等。

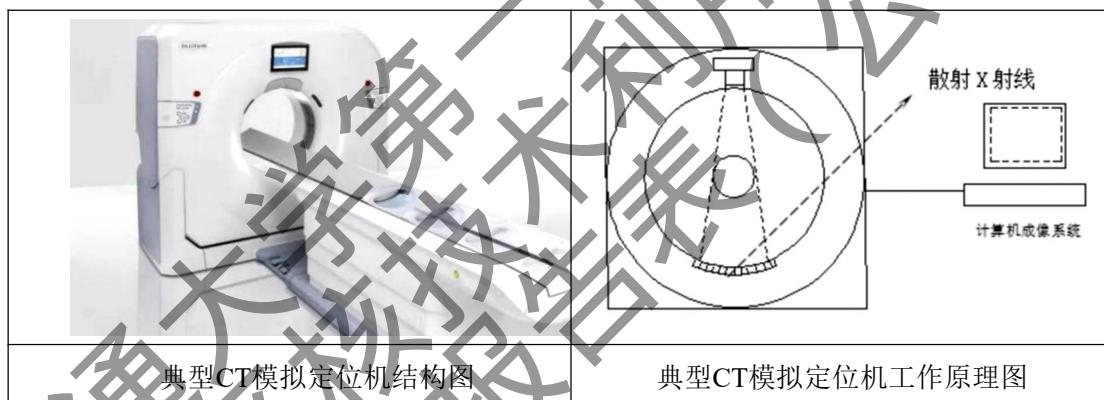
#### 9.1.1.10 CT 模拟定位

##### (1) 设备组成及工作原理

CT模拟定位机是在肿瘤放射治疗中制定放疗计划的关键设备之一，常用作放射治疗之前的需放射部位的定位，属于放射治疗辅助设备。CT模拟定位机一般由主机、支臂、机架、诊断床、操作台、X射线高压发生装置、X射线球管影像增强系统、专用图像处理系统和数字化工作站组成。

该机是利用X射线穿透人体组织时，会因为组织结构和薄厚的不同而损失能量，然后通过探测器收集穿透人体的X射线能量强度变化信息，利用计算机程序进行分析，还原人体内部组织结构和变化信息，并将其进行图像化处理，准确定位出肿瘤的照射位置、照射面积、肿瘤深度、等中心位置等几何参数，为放射治疗摆位提供依据，确保放射治疗的正确实施。

典型CT模拟定位机结构及工作原理见图9-21。



##### (2) 工作流程及产污环节

- ①待诊断的患者经过身份核实，进入机房，工作人员帮助患者摆位；
- ②摆位完成后，除患者外，无关人员退出机房；
- ③工作人员检查无误后，即开机进行扫描成像；
- ④出束结束后，工作人员进入机房，指导患者离开机房。

CT 模拟定位机治疗流程及产污环节示意图见图 9-22。

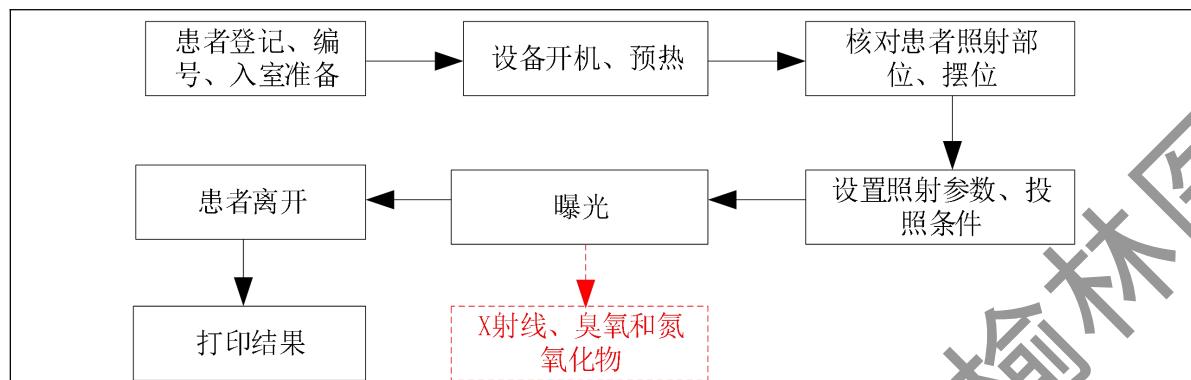


图 9-22 CT 模拟定位机治疗流程及产污环节示意图

CT模拟定位过程的污染因子主要为：X射线、臭氧和氮氧化物等。

### 9.1.1.11 DSA 介入诊疗

#### (1) 设备组成及工作原理

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

常见数字减影血管造影机外观见图 9-23。

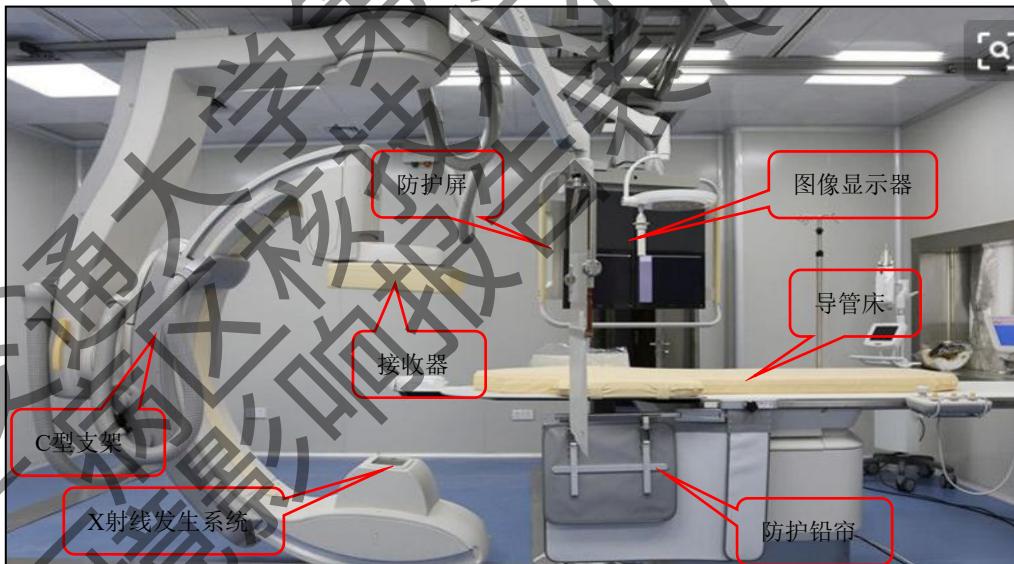


图 9-23 常见数字减影血管造影机外观图

DSA 是通过电子计算机进行辅助成像的血管造影方法，它是应用计算机程序进行两次成像完成的。在注入造影剂之前，首先进行第一次成像，并用计算机将图像转换成数字信号储存起来。注入造影剂后，再次成像并转换成数字信号。两次数字相减，消除相同的信号，得到一个只有造影剂的血管图像。这种图像较以往所用的常规脑血管造影所显示的图像更清晰和直观，一些精细的血管结构亦能显示出来，

对比度分辨率高，减去了血管以外的背景，尤其使与骨骼重叠的血管能清楚显示。由于造影剂用量少，浓度低，损伤小，较安全。通过 DSA 处理的图像，使血管的影像更为清晰，在进行介入手术时更为安全。在进行 DSA 手术时，医务人员将介入导管经皮下血管注入，通过 DSA 的 X 射线成像系统，将导管在血管内的影像显现出来。通过 DSA 处理的图像，使血管的影像更为清晰，在进行介入手术时更为安全。

DSA 工作原理示意图见图 9-24。

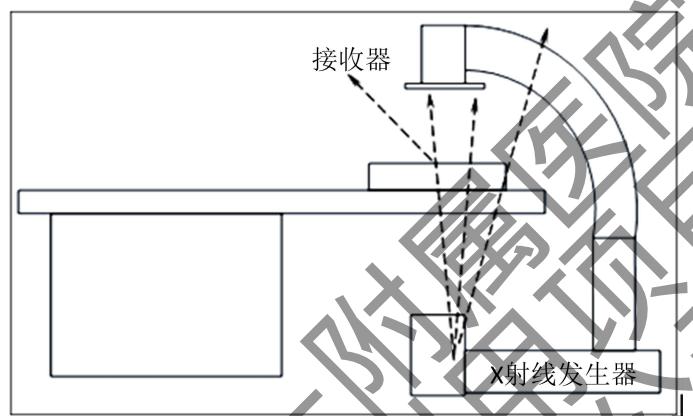


图 9-24 DSA 机工作原理示意图

## (2) 工作流程及产污环节

DSA 出束曝光时分为诊断和介入治疗两种情况。

### (1) 诊断

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

### (2) 介入治疗

DSA 介入治疗采用近台同室操作方式，通过控制 DSA 的 X 线系统曝光，对患者的部位进行间隙式透视。具体方法是受检者位于手术床上，介入手术医生和护士位于手术床旁，配备个人防护用品（如铅衣、铅围脖、铅眼镜、介入防护手套等），屏蔽挂帘和铅防护帘。手术过程中手术医生踩动手术床下的脚踏开关启动 DSA 的 X 线系统进行透视（DSA 的 X 线系统连续发射 X 射线），在悬挂显示屏上显示的透视画面的引导下，完成介入操作。每台手术的透视的次数及透视时间因患者的部位、

手术的复杂程度而不同。介入手术结束后关机，病人和医护人员离开 DSA 手术室。

DSA 在正常曝光期间主要的污染因子为 X 射线、臭氧、氮氧化物等。项目使用的造影剂不含放射性，不产生放射性废物。DSA 采用数字显影技术，不产生废显影液、废定影液和废胶片。

DSA 操作流程及产污环节见图 9-25。

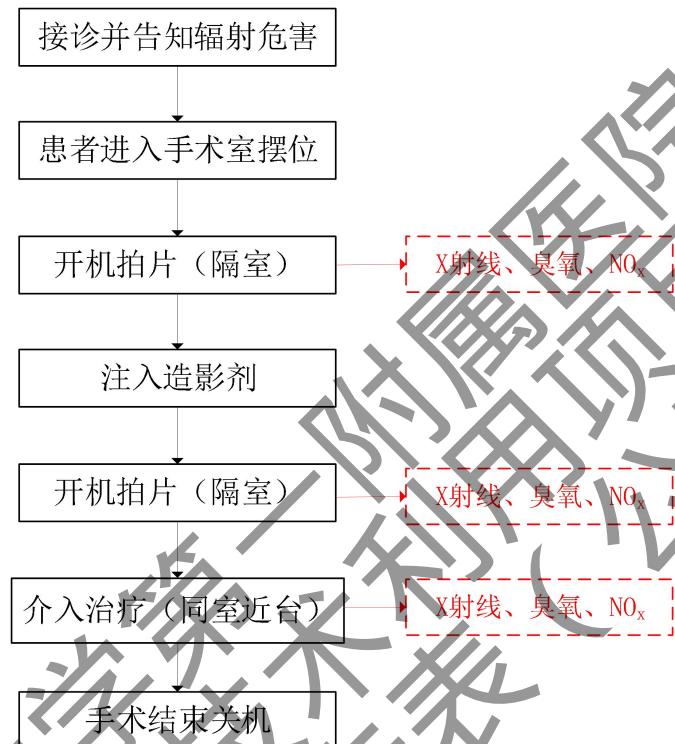


图 9-25 DSA 操作流程及产污环节示意图

DSA 介入诊疗的污染因子主要为：X 射线、臭氧和氮氧化物等。

## 9.2 污染源项描述

### 9.2.1 核医学科

#### 9.2.1.1 正常工况下的污染途径

根据本项目核医学科使用的放射性核素的特性，本项目放射性核素生产、使用过程中主要污染因子为： $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线、中子、放射性废气、放射性废水、放射性固体废物；PET-CT、SPECT-CT仅在CT模式下时、扫描产生X射线，X射线电离空气会产生少量的臭氧、氮氧化物等非放射性废气。

##### （1）电离辐射

###### ① $\alpha$ 射线

本项目核医学科使用的 $\alpha$ 核素衰变会产生 $\alpha$ 射线，在使用活动过程中不可避免地

会在工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾染，污染途径为 $\alpha$ 射线表面污染。

$\alpha$ 射线在空气中、人体组织中的射程均很短，人体组织、皮肤角质层、普通衣物等即可将其完全阻挡，对周围环境影响。因此，本次评价不考虑 $\alpha$ 射线外照射影响。

### ② $\beta$ 射线

本项目核医学科使用的 $\beta$ 核素衰变会产生 $\beta$ 射线，在使用活动过程中不可避免地会在工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾染，污染途径为 $\beta$ 射线表面污染。

$\beta$ 射线在人体组织中的射程通常在毫米量级，人体组织、屏蔽容器等即可将其完全阻挡。因此，本次评价不考虑 $\beta$ 射线外照射影响，仅考虑屏蔽 $\beta$ 射线时产生的轫致辐射的外照射影响。

### ③ $\gamma$ 射线

本项目使用的PET核素、SPECT核素、 $^{131}\text{I}$ 等会产生 $\gamma$ 射线。由于 $\gamma$ 射线具有较强的穿透性，放射性药物在储源室暂存、分装质控注射室注射过程中，对其周围环境和工作人员会产生一定辐射影响；经注射或口服进入患者体内后，患者本身短时间内成为“辐射体”，在衰变过程中产生的 $\gamma$ 射线造成患者周围辐射水平升高；患者在候诊、显像诊断、留观过程中，短期内对近距离接触的人员造成影响，部分 $\gamma$ 射线穿透候诊室、诊断机房、留观室的实体屏蔽对屏蔽体外活动人员产生一定辐射影响，污染途径为 $\gamma$ 射线外照射。

### ④中子

回旋加速器生产放射性药物的过程中会产生中子，中子穿过屏蔽体会对周围区域的人员产生外照射影响，污染途径为中子外照射。

### ⑤X射线

核医学科使用的PET-CT和SPECT-CT属于射线装置，检查时会产生X射线， $\beta$ 射线被屏蔽体阻挡时产生的轫致辐射也属于X射线。X射线穿透屏蔽体造成周围环境辐射水平升高，人员在此区域活动时受到一定的照射剂量影响，污染途径为X射线外照射。

## （2）废气

### ①放射性废气

核医学科使用的 $^{123}\text{I}$ 、 $^{124}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ 等放射性核素有挥发性，在分装、注射、候诊、留观、住院治疗等环节会挥发或随患者代谢进入周围环境，产生放射性废气； $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等核素无挥发性，仅在分装、质控等操作时产生放射性废气；其余放射性核素为外购成品药物，从采购到注射所有使用环节均不接触空气，不产生放射性废气。

## ②非放射性废气

核医学科PET-CT和SPECT-CT运行时X射线与空气发生电离作用产生臭氧和氮氧化物等废气。

## （3）废水

### ①放射性废水

根据医院提供的资料，本项目核医学科辐射工作场所产生的放射性废水包括工作人员清洗去污废水、给药后患者的排泄物及冲洗废水、场所清洁废水等。

a. 门诊注射治疗、 $^{131}\text{I}$ 甲亢治疗、甲功测定患者给药后可直接离开核医学科，不产生放射性废水；敷贴治疗不使用放射性核素，不产生放射性废水；

b. PET诊断和SPECT诊断患者每日最多接诊101人次，考虑患者注射至离院期间平均每人如厕1次，参考《节水型卫生洁具》（GB/T31436-2015），节水型便器平均每次冲水用水量不大于6L，从保守角度考虑每名受检者注射后均如厕1次，每次排泄物排出量约300mL，患者洗手废水产生量按1L/次计，则显像检查患者用水量为7.3L/人；

c. 核医学科同时最多收治住院患者5人，参考《综合医院建筑设计规范》（GB51039-2014），公共浴室、病房设卫生间、盥洗的病房，最高用水量为150~180L/床·日，由于核医学科住院病房区域属限制用水区域，本区域用水量取150L/床·日；

d. 直接参与药物质控、注射等操作的辐射工作人员放射性废水产生量以50L/人·d计，远程操作设备进行自动分装的辐射工作人员不产生放射性废水。

e. 核医学科辐射工作场所清洁会产生放射性废水，三个核医学科工作场所清洁废水产生量均按 $0.05\text{m}^3/\text{d}$ 估算。

f. 核医学科回旋加速器循环冷却水量约为10L。正常情况下循环使用不外排。仅在发生管道破裂事故或检修时排放，考虑每年排放2次。

上述用水环节综合产物系数按0.9考虑。

本项目衰变池接纳废水情况见表9-9。

表 9-9 衰变池废水接纳量估算

产污环节	用水量	产生规模	废水产生量		去向
			m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /a	
核医学科 药物制备 区域	淋洗质控人员去污	50L/人·d	1人×250d	0.045	11.25
	回旋加速器操作人 员区域	50L/人·d	1人×250d	0.045	11.25
	回旋加速器冷却水	10L/次	2次	0.009	0.018
	场所清洁	0.05m <sup>3</sup> /d	250d	0.045	11.25
核医学科 门诊诊疗 区域	诊断患者	7.3L/人·d	91人×250d	0.598	149.4
合计				0.787	194
核医学科 门诊诊疗 区域	分装、注射人员	50L/人·d	2人×250d	0.09	22.5
	诊断患者	7.3L/人·d	10人×250d	0.0657	16.425
	场所清洁	0.05m <sup>3</sup> /d	250d	0.045	11.25
核医学科 住院治疗 区域	<sup>177</sup> Lu注射人员	50L/人·d	1人×50d	0.045	11.25
	住院患者	150L/床·d	5床×365d	0.675	135
	场所清洁	0.05m <sup>3</sup> /d	250d	0.045	11.25
合计				0.966	207.7

注：放射性废水产生总量=总用水量×产物系数（0.9）。

本项目半衰期小于24h的放射性废水的年产生量为0.787m<sup>3</sup>/d（194m<sup>3</sup>/a）；半衰期大于24的放射性废水的年产生量为0.966m<sup>3</sup>/d（207.7m<sup>3</sup>/a）。

## ②非放射性废水

本项目核医学科产生的医疗废水、生活废水等非放射性废水均已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》（榆政环批复〔2025〕103号）中分析论述，本次不再评价。

## （4）固体废物

核医学科开展核技术利用项目过程中，将产生一定量的放射性固废、医疗废物、生活垃圾等。

### ①放射性固体废物

根据医院提供的资料，本项目产生的放射性固体废物主要包括：工作人员产生的废手套、废口罩、废防护服等一次性防护用品，注射给药产生的废注射器、吸水纸等，口服药物产生的口杯，住院患者产生的沾染放射性核素的生活垃圾，发生器淋洗过程产生的废发生器，场所清洁产生的废拖布、抹布等清洁用品，回旋加速器

产生的废靶，放射性废气处理产生的废活性炭等。

- a. 本项目每次发生器淋洗产生3个废淋洗瓶及注射器、吸水纸等放射性固体废物，每次淋洗产生约0.1kg。本项目每日淋洗2个放射性核素发生器，每日放射性固体废物产生量为0.2kg；
- b. 每日药物分装、标记、质控等环节产生注射器、吸水纸等放射性固体废物约0.1kg；
- c. 每日最多接诊门诊注射治疗患者12人，甲亢治疗患者10人，甲功测定患者30人，每人产生放射性固体废物约0.05kg，共计2.6kg/d；
- d. 每日最多同时收治5名住院患者，对住院患者采取管控措施，尽可能减少其放射性固体废物产生量。每人产生放射性固体废物约0.5kg，共计2.5kg/d；
- e. 核医学科工作场所清洁产生沾染放射性同位素的抹布、拖把等放射性固体废物，产生量约25kg/a；
- f. 放射性废气处理产生的废活性炭按放射性固体废物处置，产生量约125kg/a。

本项目核医学科放射性固废产生情况见表9-10。

表 9-10 核医学科放射性固废产生情况一览表

产污环节	固废产生系数/kg·人·d	日接诊患者人数/人	年工作日/d	年产生量/kg	暂存位置
负一层核医学科药物制备区域					
发生器淋洗	0.2	/	250	50	负一层核医学科固废间
药物分装、标记、质控	0.1	/	250	25	
清洁用废抹布及拖布	/	/	250	5	
废活性炭	/	/	250	25	
小计				105	
一层核医学科门诊诊疗区域					
诊断患者	0.05	101	250	1262.5	一层核医学科固废间
门诊治疗患者	0.05	12	250	150	
清洁用废抹布及拖布等	/	/	250	10	
废活性炭	/	/	250	50	
小计				1472.5	
一层核医学科住院治疗区域					
住院患者	0.5	5	365	912.5	一层核医学科固废间
甲亢治疗	0.05	10	250	125	
甲功测定	0.05	30	250	375	
敷贴治疗患者	0.05	5	250	62.5	

清洁用废抹布、废拖布等	/	/	250	10	
废活性炭	/	/	365	50	
小计			1535		
合计					3112.5

综上，本项目核医学科放射性废物产生量为3112.5kg/a。

## ②非放射性固体废物

本项目核医学科产生的医疗废物、生活垃圾等非放射性固体废物均已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》（榆政环批复（2025）103号）中分析论述，本次不再评价。

### 9.2.1.2 事故工况下的污染途径

- ①非密封放射性物质或放射源管理不善，导致其丢失或被盗造成事故照射；
- ②辐射工作场所门禁措施失效，导致给药后患者未经许可离开核医学科或无关人员误入辐射工作场所，造成事故照射；
- ③放射性药物操作不当，导致放射性药物泼洒，造成工作场所放射性表面污染；
- ④工作人员或物品离开核医学科时未进行检测去污，造成监督区或清洁区域放射性表面污染；
- ⑤射线装置机房防护措施失效，导致无关人员在射线装置开机时误入机房或出束时机房内未清场，造成事故照射。
- ⑥回旋加速器设备故障或管道破裂，导致活化的循环冷却水排放，循环冷却水量约为10L，考虑事故工况下全部排放。根据医院提供的资料，其他同类单位的同类设备每年检维修1次，管道破裂事故最多1次。因此本项目预计每年最多发生2次设备故障检修或管道破裂，事故废水年产生量为20L。
- ⑦衰变池罐体、池体结构、放射性废管道破损或阀门泄漏导致未达到解控要求的放射性废水排入环境，造成放射性污染。

核医学科事故工况下的污染因子主要为： $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线、X射线、中子、表面污染、放射性废气、放射性废水、放射性固体废物。

## 9.2.2 放疗科

### 9.2.2.1 正常工况下的污染途径

#### （1）后装机

项目后装机使用的放射源为微型单颗 $^{192}\text{Ir}$ ，源活度不大于 $3.7 \times 10^{11}\text{Bq}$ （10Ci），

为密封源，外有不锈钢包壳， $\beta$ 射线被完全屏蔽，源活性物质不会泄漏。因此，在正常使用情况下，后装机主要环境汚染因子是放射源发射的 $\gamma$ 射线（0.37MeV）。

后装机正常运行状态下可能产生的汚染途径如下：

#### ① $\gamma$ 射线

后装机正常运行时的主要环境汚染因子为能量流形式的 $\gamma$ 射线。在正常治疗条件下，后装机 $^{192}\text{Ir}$ 放射源发出的 $\gamma$ 射线经过屏蔽体屏蔽后对周围工作人员和公众产生外照射影响。

在治疗前、治疗后连接或拆卸输源导管时， $^{192}\text{Ir}$ 放射源处于贮源状态，贮源器表面产生的 $\gamma$ 射线杂散辐射会对工作人员产生 $\gamma$ 射线外照射。

#### ②废源

由于放射性衰变，随着放射性活度的降低，放射源 $^{192}\text{Ir}$ 的半衰期为74天。根据医院诊疗计划，项目放射源使用达到2个半衰期以后将无法继续满足放射治疗要求需要更换新的放射源，即148天更换一次，每年最多产生3枚废放射源。项目更换的废 $^{192}\text{Ir}$ 放射源由供源单位回收，不在项目工作场所内存放，供源单位更换后直接带回处置，不存在废放射源对周边环境的影响。放射源的更换由供源单位进行，换源时的环保责任主体为供源单位，医院仅负责外围警戒。

③臭氧、氮氧化物：后装机在正常工作状态下，会使机房内的空气电离产生少量臭氧和氮氧化物。

④废水、固体废物：本项目后装机房产生的生活废水和医疗废物、生活垃圾等固体废物均已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》（榆政环批复〔2025〕103号）中分析论述，本次不再评价。

### （2）直线加速器

医用电子直线加速器产生的辐射可分为瞬时辐射和剩余辐射两类。瞬时辐射包括初级辐射（指被加速的带电粒子）及其与金属靶或加速器的结构材料相互作用产生X射线等次级辐射。初级辐射和次级辐射在加速器开机时产生，停机后消失。剩余辐射是指加速器产生的初级粒子束和次级辐射在加速器结构材料及环境介质（包括空气、屏蔽物等）中诱发生成的感生放射性，它们在加速器停止运行后继续存在。

加速器正常运行状态下可能产生的汚染因子如下：

#### ①电子束

加速器产生的电子束贯穿能力相对 X 射线和中子而言弱得多，即使是高能电子束，在空气中的射程也仅有几十米。因此在 X 射线得到充分屏蔽的情况下，电子束也就得到了足够的屏蔽，故无须考虑电子防护问题。

#### ②中子及感生放射性

根据《放射治疗辐射安全与防护》（HJ1198-2021）和《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020），对于最大 X 射线能量 $\leq 10\text{MV}$  的加速器不考虑中子及感生放射性的辐射影响。

#### ③X 射线

加速器电子枪产生的电子经过加速后，受到金属靶阻止而产生高能 X 射线，X 射线具有较大的贯穿能力，如果没有采取足够防护措施对其进行屏蔽，一旦泄入环境，势必对工作人员和公众造成不必要的辐射影响，危及人们健康与安全。但这种 X 射线是随加速器的开、关而产生和消失。

两台加速器的图像引导系统最大管电压为 150kV，最大管电流为 630mA，能量远小于直线加速器，故其产生的 X 射线可以忽略。因此，加速器在开机状态下，X 射线成为加速器污染环境的主要污染因子。

#### ④废靶

直线加速器金属靶使用 7~10 年后需要由设备厂家更换，更换时产生 1 个废金属靶。钨靶的  $(\gamma, n)$  反应阈能为 8MeV，可能被直线加速器产生的 10MV 的 X 射线活化产生感生放射性，因此由厂家更换并带回按放射性固体废物处置，不在项目地贮存。

⑤臭氧、氮氧化物：直线加速器或 CBCT 图像引导系统运行产生的 X 射线与空气相互作用，会产生臭氧和氮氧化物等有害气体。臭氧和氮氧化物可通过排风管排出机房，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧气。

⑥废水、固体废物：本项目直线加速器机房产生的生活废水和医疗废物、生活垃圾等固体废物均已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》（榆政环批复〔2025〕103号）中分析论述，本次不再评价。

### （3）CT模拟定位机

CT模拟定位机在正常运行时，会产生 X 射线，在机房相邻区域产生泄漏辐射和散射辐射，需要进行屏蔽防护。如果机房的门、窗、墙体等屏蔽防护措施不当，控

制室内的工作人员、机房门(墙)外的公众人员有可能受到泄漏和散射的X射线辐射。

当设备运行产生X射线时, X射线与空气相互作用, 会产生臭氧和氮氧化物等有害气体。

本项目CT模拟定位机房产生的生活废水和医疗废物、生活垃圾等固体废物均已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》(榆政环批复〔2025〕103号)中分析论述, 本次不再评价。

### 9.2.2.2 事故工况下的污染途径

#### (1) 后装机

①治疗过程中, 门机(源)联锁装置发生故障, 人员误入正在运行的后装机房导致误照射。

②安全联锁系统故障或失效, 机房防护门未关好即开始治疗, 导致射线泄漏, 对防护门外活动人员造成外照射;

③放射源位置异常、卡源等, 造成工作人员或公众的外照射。

④放射源掉落时, 对周围环境或公众造成外照射。

⑤放射源丢失或被盗, 对周围环境或公众造成外照射。

#### (2) 直线加速器

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

②安全联锁系统故障或失效, 加速器运行中人员闯入, 或者人员未退出机房的情况下开机, 受到意外照射;

③工作人员或无关人员在治疗过程中滞留机房, 受到意外照射。

#### (3) CT模拟定位机

①曝光时防护门未关闭, 此时防护门外人员可能受到X射线照射;

②陪检者、受检者未按要求穿戴个人防护用品, 导致受到不必要的照射;

③无关人员在不知情的情况下误入放射机房受到意外照射。

### 9.2.3 DSA 手术室

#### 9.2.3.1 正常工况下的污染途径

##### (1) X射线

DSA 出束时发出 X 射线, X 射线贯穿手术室的屏蔽墙进入外环境, 对控制室的

职业工作人员及手术室周围公众产生外照射影响；在介入手术过程中，对手术室内医护人员造成外照射。DSA 介入诊疗的主要污染因子为 X 射线。

### （2）废气

X 射线与空气作用会产生极少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。DSA 设备的管电压、管电流相对较小，因此产生的有害气体相对较少。

### （3）废水

本项目 DSA 使用的造影剂不含放射性，不排放放射性废水。显像设备采用数字显影技术，不产生废显影液或废定影液。

本项目 DSA 手术室产生的生活废水和冲洗废水均已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》（榆政环批复〔2025〕103 号）中分析论述，本次不再评价。

### （4）固体废物

介入手术产生的医用器具和药棉、纱布、手套等医疗废物。本项目辐射工作人员产生少量生活垃圾。

本项目 DSA 手术室产生的医疗废物、生活垃圾等固体废物均已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》（榆政环批复〔2025〕103 号）中分析论述，本次不再评价。

#### 9.2.3.2 事故工况下的污染途径

（1）DSA 控制系统、电气系统故障或影像人员误操作，导致手术室内辐射工作人员受到超剂量照射。

（2）DSA 出束期间，无关人员未撤离手术室或有无关人员误入，导致其超剂量照射。

（3）介入治疗时，手术医生或护士未穿戴防护用品进入手术室，或防护用品破损失效，导致医生或护士受到超剂量照射。

表 10 辐射安全与防护

## 10.1 项目安全设施

### 10.1.1 核医学科

#### 10.1.1.1 选址布局合理性分析

核医学科位于肿瘤科研楼一层西北角和负一层西北角。根据医院提供的资料，核医学科一层主要功能包括甲亢治疗、甲癌治疗、甲状腺功能测定、敷贴治疗、PET核素诊、SPECT核素诊断、门诊核素治疗等；负一层主要功能包括PET药物生产，发生器淋洗制备，自产药物质控等。

核医学科工作场所布局与《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)、《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)的符合性分析见表10-1。

表 10-1 核医学科工作场所选址布局合理性分析

法规标准	标准要求	设计情况	评价	
《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)	5.1.1 核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内,或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层,设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。	本项目核医学科设置于医院医疗专用建筑物肿瘤科研楼西北角,设置了相应的物理隔离和独立的人员物流通道。		
	5.1.2 核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区,并应与非放射性工作场所有明确的分界隔离。	核医学科西侧和北侧主要为土层和楼外道路,相邻科室主要包括放疗科、放射科、影像中心等辐射工作场所,不涉及产科、儿科、食堂等部门及人员密集区。核医学科设置有明确的墙体隔离。		
	5.1.3 核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。	核医学科放射性废气排放口位于核医学科正上方肿瘤科研楼楼顶,排放口周围50m内无高层建筑。	符合要求	
		5.2.1 核医学工作场所应合理布局,住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置;同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局,控制区应相对集中,高活室集中在一端,防止交叉污染。尽量减小放射性药物、放射性废物的存放范围,限制给药后患者的活动空间。	核医学科诊断场所集中分布于东侧门诊诊疗区域,核医学科治疗场所主要集中于西侧住院区域。 控制区集中设置,高活室集中设置于北侧。 放射性药物及放射性废物集中存放于储源室或手套箱,放射性废物集中暂存于衰变池和固废间。 核医学科设置门禁系统,限制给药后患者的活动空间。	

<p>5.2.2 核医学工作场所应设立相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开,减少给药后患者对其他人员的照射。注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉,人员与放射性药物通道不交叉,放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷。</p>	<p>核医学科通过设置单独通道,实现放射性药物、工作人员、患者、放射性废物路线相对独立;患者通道与工作人员通道分离,注射后患者与注射前患者通道不交叉,人员与放射性药物通道不交叉。放射性废物转运通道已尽可能短捷。</p>	
<p>5.2.3 核医学工作场所宜采取合适的措施,控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动,避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲区,为工作人员和患者提供必要的可更换衣物、防护用品、冲洗设施和表面污染监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。</p>	<p>核医学科控制区的入口和出口设置门禁系统,只有经过授权的人员才能进入辐射活性区,限制患者的随意流动,保证工作场所内的工作人员免受不必要的照射;工作人员出入口设置缓冲/淋浴/更衣间,配备有去污和表面污染监测设备;核素病房、注射后候诊和留观区域均设有专用卫生间。</p>	
<p>5.1.1 在医疗机构内部区域选择核医学场址,应充分考虑周围场所的安全,不应邻接产科、儿科、食堂等部门,这些部门选址时也应避开核医学场所。尽可能做到相对独立布置或集中设置,宜有单独出、入口,出口不宜设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。</p>	<p>本项目相邻区域无产科、儿科、食堂等区域。辐射工作场所集中设置,有独立的出入口,出口设置在人员流动较少的西侧。</p>	符合要求
<p>5.1.2c) 在核医学诊疗工作区域,控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门等安全措施,限制患者或受检者的随意流动。</p>	<p>本项目核医学科控制区的入口和出口设计有门锁权限控制和单向门禁系统等安全措施。</p>	符合要求
<p>5.1.2d) 在分装和给药室的出口处应设计卫生通过间,进行污染检测。</p>	<p>本项目分装质控注射室出口设置缓冲间及冲淋间,可进行表面污染检测。</p>	符合要求
<p>5.1.3a) 对于单一的诊断工作场所应设置给药前患者或受检者候诊区、放射性药物贮存室、分装给药室(可含质控室)、给药后患者或受检者候诊室(根据放射性核素防护特性分别设置)、质控(样品测量)室、控制室、机房、给药后患者或受检者卫生间和放射性废物储藏室等功能用房;</p>	<p>核医学科门诊诊疗区域药物暂存、分装、给药、质控在给药准备室完成,设置了注射后候诊室、留观室、专用卫生间、固废间等功能用房。</p>	符合要求
<p>5.1.3b) 对于单一的治疗工作场所应设置放射性药物贮存室、分装及药物准备室、给药室、病房(使用非密封源治疗患者)或给药后留观区、给药后患者专用卫生间、值班室和放置急救设施的区域等功能用房;</p>	<p>核医学科住院治疗区域药物贮存、分装、准备、给药等分药区完成,设置了核素病房及专用卫生间,设置了值班室和抢救室等功能用房。</p>	符合要求
<p>5.1.3c) 诊断工作场所和治疗工作场</p>	<p>核医学工作场所设计有污洗</p>	符合

<b>《核医学放射防护要求》 (GBZ120-2020)</b>	所都需要设置清洁用品储存场所、员工休息室、护士站、更衣室、卫生间、去污淋浴间、抢救室或抢救功能区等辅助用房。	间、办公室、更衣室、卫生间、去污淋浴间、抢救室等辅助用房。	要求
	5.1.5 核医学工作场所的布局应有助于开展工作，避免无关人员通过。治疗区域和诊断区域应相对分开布置。根据使用放射性药物的种类、形态、特性和活度，确定核医学治疗区（病房）的位置及其放射防护要求，给药室应靠近病房，尽量减少放射性药物和给药后患者或受检者通过非放射性区域。	核医学工作场所的设计布局有助于开展工作，避免无关人员通过。住院区域单独设置和其他诊断场所相对分开布置，给药室靠近病房。	符合要求
	10.1.1 $^{131}\text{I}$ 治疗病房区应为相对独立的场所，病房区入口处应设缓冲区。患者住院后，只能在治疗区活动。	$^{131}\text{I}$ 治疗病房区相对独立，入口处设置有缓冲区和单向门禁系统。患者住院后只能在病房内活动。	符合要求
	10.1.4 病房内应设置患者专用厕所和淋浴间，厕所内应有患者冲厕所和洗手的提示。	核素病房内设计有患者专用卫生间供患者如厕和淋浴，卫生间设置患者冲厕所和洗手的提示。	符合要求
	10.1.7 施用了 $^{131}\text{I}$ 治疗药物的患者如需住院应使用专用病房。专用病房宜为单人间，如不能实现，每间病房最多不应超过2人，并且2人之间应设置适当的防护屏蔽。	设计有4间甲癌患者专用病房，每间病房设计1个床位。	符合要求
	12.4.1 敷贴治疗应设置专用治疗室，该治疗室应与诊断室、登记值班室和候诊室分开设置。治疗室内使用面积应满足治疗要求。	核医学科设有专用敷贴室、敷贴室与诊室、候诊区等分开设置，室内面积满足治疗要求。	

综上所述，核医学科工作场所布局满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 和《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 中工作场所布局相关要求。

### 10.1.1.2 工作场所分区

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 及《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 中相关要求，将一层核医学科门诊诊疗区域的PET-CT机房、PET-MR机房、2间SPECT-CT机房、抢救室、注射后候诊室、留观室、固废间、洁具间、给药后患者卫生间及患者走廊等区域划为控制区，将与控制区相连的PET-CT控制室、SPECT-CT控制室、走廊、缓冲间、设备间、TPS室等区域划为监督区；将一层核医学科住院治疗区域的分药区、给药区、固废间、储源室、核素病房、敷贴室、吸碘率室、抢救室/出院检测室、污染被服间等划为控制区，将与控制区相连的走廊、治疗室、缓冲间等区域划为监督区。

核医学科分区管理情况见图10-1至图10-3。

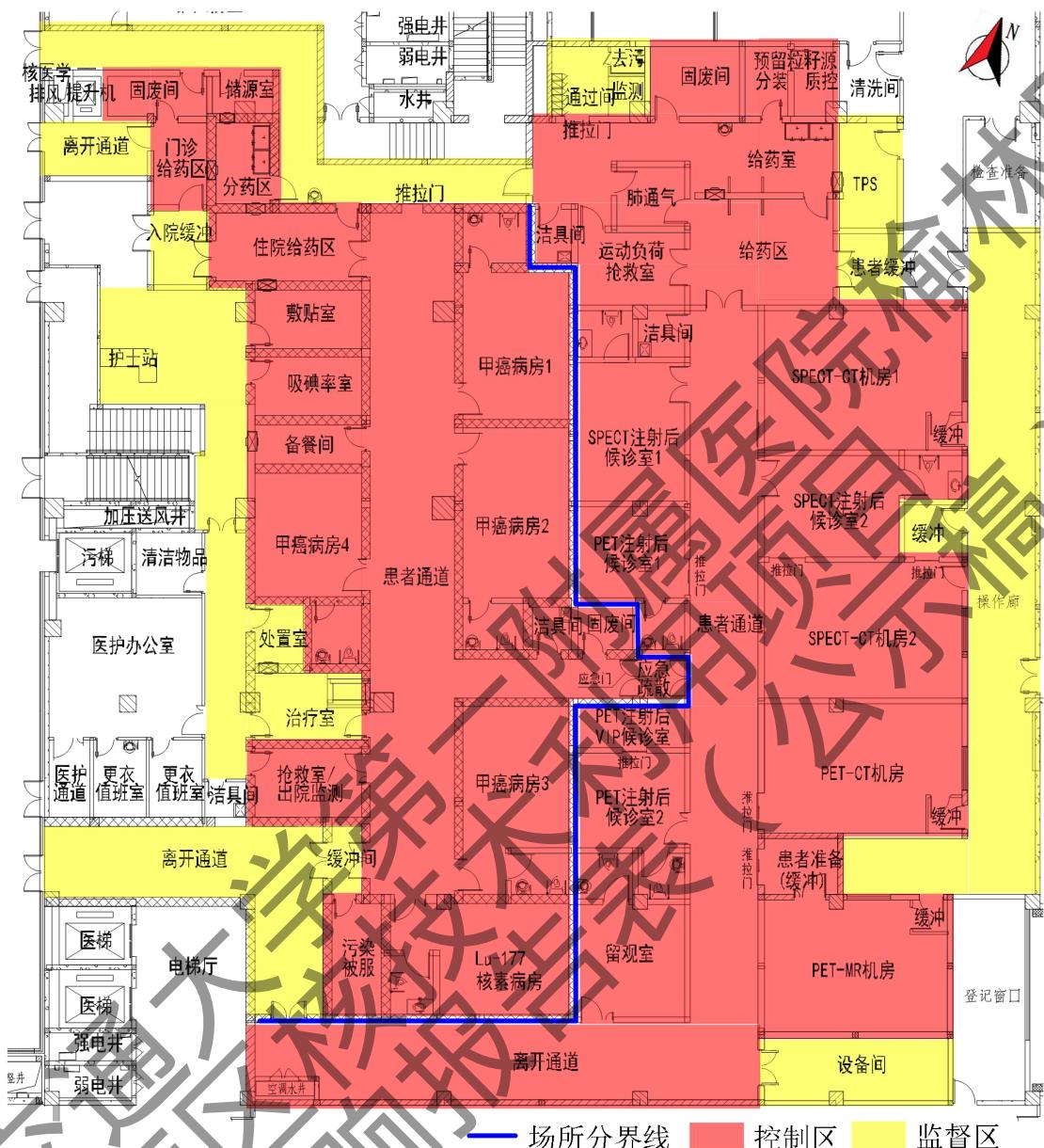
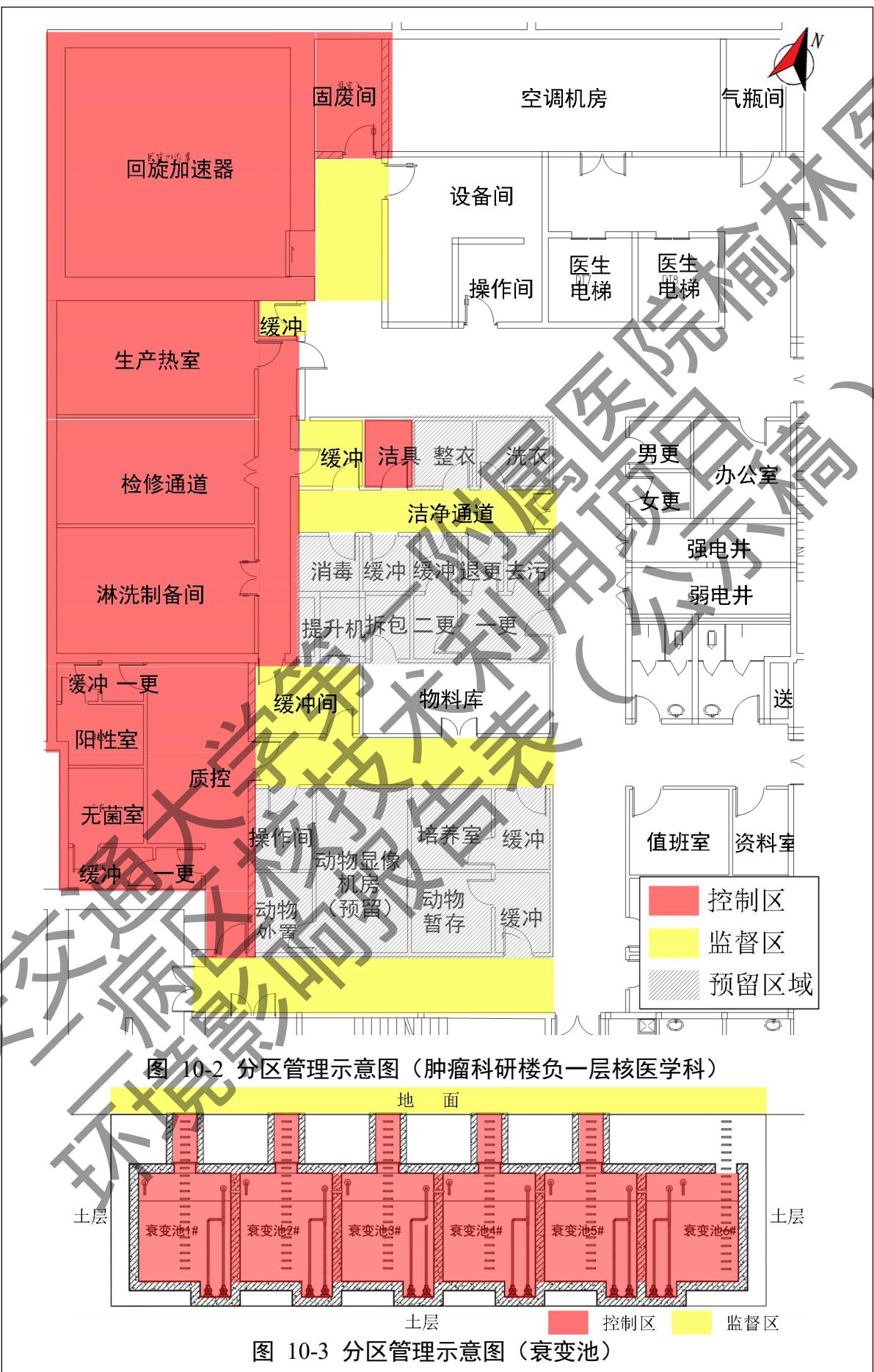


图 10-1 分区管理示意图（肿瘤科研楼一层核医学科）



### 10.1.1.3 工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录C非密封放射性物质工作场所的分级要求，使用以下公式计算日等效最大操作量，确定其工作场所等级。

$$\text{日等效操作量} = \frac{\text{实际操作量 (Bq)} \times \text{该核素毒性组别修正因子}}{\text{与操作方式有关的修正因子}}$$

毒性组别因子根据GB18871-2002附录D取值，操作方式修正因子根据HJ1188-2021表A.2及GB18871-2002表C3取值。

根据环办辐射函〔2016〕430号的要求，一层核医学科门诊诊疗区域和核医学科住院治疗区域控制区和监督区通过物理隔离相互独立，分别有完整且相互独立的工艺流程，且辐射安全防护措施独立设计，互相无依托关系。因此可划为两个独立的场所进行日等效操作量核算。

本项目核医学科分为负一层药物制备区域、一层住院治疗区域和一层门诊诊疗区域，核医学科使用的非密封放射性核素日等效最大操作量见表10-2。

表 10-2 非密封放射性物质（核素）日等效最大操作量

项目	核素种类	毒性分组/毒性组别修正因子	操作方式/操作方式修正因子	实际日最大操作量(Bq)	日等效最大操作量 (Bq)
负一层药物制备区域					
药物生产	<sup>11</sup> C	低毒/0.01	简单操作/1	$4.18 \times 10^9$	$4.18 \times 10^7$
	<sup>13</sup> N	低毒/0.01	简单操作/1	$1.48 \times 10^9$	$1.48 \times 10^7$
	<sup>15</sup> O	低毒/0.01	简单操作/1	$1.48 \times 10^9$	$1.48 \times 10^7$
	<sup>18</sup> F	低毒/0.01	简单操作/1	$2.91 \times 10^{10}$	$3.59 \times 10^8$
淋洗制备	<sup>68</sup> Ge	中毒/0.1	贮存/100	$1.20 \times 10^9$	$1.20 \times 10^6$
	<sup>68</sup> Ga	低毒/0.01	简单操作/1	$1.20 \times 10^9$	$1.20 \times 10^7$
	<sup>99</sup> Mo	中毒/0.1	贮存/100	$7.40 \times 10^{10}$	$7.40 \times 10^7$
	<sup>99m</sup> Tc	低毒/0.01	简单操作/1	$7.40 \times 10^{10}$	$7.40 \times 10^8$
合计					$1.20 \times 10^9$
一层住院治疗区域					
敷贴治疗	<sup>32</sup> P	中毒/0.1	简单操作/1	$9.25 \times 10^8$	$9.25 \times 10^7$
甲功测定	<sup>131</sup> I	中毒/0.1	简单操作/1	$5.55 \times 10^6$	$5.55 \times 10^5$
甲亢治疗	<sup>131</sup> I	中毒/0.1	简单操作/1	$3.70 \times 10^9$	$3.70 \times 10^8$
甲癌治疗	<sup>131</sup> I	中毒/0.1	简单操作/1	$2.96 \times 10^{10}$	$2.96 \times 10^9$
核素治疗	<sup>177</sup> Lu	中毒/0.1	简单操作/1	$3.70 \times 10^9$	$3.70 \times 10^8$
合计					$3.79 \times 10^9$
一层门诊诊疗区域					
PET诊断	<sup>11</sup> C	低毒/0.01	很简单操作/10	$2.09 \times 10^9$	$2.09 \times 10^6$

	<sup>13</sup> N	低毒/0.01	很简单操作/10	$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^5$
	<sup>15</sup> O	低毒/0.01	很简单操作/10	$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^5$
	<sup>18</sup> F	低毒/0.01	很简单操作/10	$4.29 \times 10^{10}$	$4.29 \times 10^7$
	<sup>64</sup> Cu	低毒/0.01	很简单操作/10	$1.04 \times 10^9$	$1.04 \times 10^6$
	<sup>68</sup> Ga	低毒/0.01	很简单操作/10	$1.05 \times 10^9$	$1.05 \times 10^6$
	<sup>89</sup> Zr	中毒/0.1	很简单操作/10	$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^6$
	<sup>124</sup> I	中毒/0.1	很简单操作/10	$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^5$
SPECT诊断	<sup>51</sup> Cr	低毒/0.01	很简单操作/10	$1.85 \times 10^8$	$1.85 \times 10^5$
	<sup>99m</sup> Tc	低毒/0.01	很简单操作/10	$5.54 \times 10^{10}$	$5.54 \times 10^7$
	<sup>123</sup> I	中毒/0.1	很简单操作/10	$2.55 \times 10^8$	$2.55 \times 10^6$
	<sup>201</sup> Tl	低毒/0.01	很简单操作/10	$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^5$
门诊核素治疗	<sup>35</sup> S	中毒/0.1	简单操作/1	$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^7$
	<sup>47</sup> Sc	中毒/0.1	简单操作/1	$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^7$
	<sup>89</sup> Sr	中毒/0.1	简单操作/1	$3.70 \times 10^8$	$3.70 \times 10^7$
	<sup>153</sup> Sm	中毒/0.1	简单操作/1	$1.85 \times 10^9$	$1.85 \times 10^8$
	<sup>177</sup> Lu	中毒/0.1	简单操作/1	$3.70 \times 10^9$	$3.70 \times 10^8$
	<sup>186</sup> Re	中毒/0.1	简单操作/1	$3.70 \times 10^9$	$3.70 \times 10^8$
	<sup>188</sup> Re	中毒/0.1	简单操作/1	$1.85 \times 10^9$	$1.85 \times 10^8$
	<sup>211</sup> At	高毒/1	简单操作/1	$7.40 \times 10^8$	$7.40 \times 10^8$
	<sup>223</sup> Ra	极毒/10	简单操作/1	$1.11 \times 10^7$	$1.11 \times 10^8$
	<sup>225</sup> Ac	极毒/10	简单操作/1	$1.11 \times 10^7$	$1.11 \times 10^8$
	<sup>227</sup> Th	极毒/10	简单操作/1	$1.11 \times 10^7$	$1.11 \times 10^8$
合计					$2.42 \times 10^9$

由表10-2可知，本项目核医学科负一层药物制备区域的日等效最大操作量为 $1.20 \times 10^9$ Bq；核医学科一层住院区域的日等效最大操作量为 $3.33 \times 10^9$ Bq；核医学科一层门诊诊疗区域的日等效最大操作量为 $2.42 \times 10^9$ Bq。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录C，上述场所日等效最大操作量均在 $2 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$ Bq范围，因此本项目核医学科涉及三个乙级非密封放射性物质工作场所。

#### 10.1.1.4 人员物资路径

为了加强辐射安全管理，结合项目工作流程及工作场所布局，在核医学科地面或墙壁设置简明易懂的导向标识或导向提示，或通过对讲形式引导患者，限制其流动方向。项目核医学科区域医护人员、患者、放射性药物及放射性固废流动路线如图10-4、图10-5所示。

负一层核医学科药物制备区域辐射工作人员、放射性药物和放射性固体废物路径如下：

##### （1）辐射工作人员路径

辐射工作人员从医生电梯进入负一层区域，经走廊到达各工作岗位。工作结束

后原路返回，从医生电梯离开负一层核医学科。

### **(2) 放射性药物路径**

淋洗制备间使用的放射性核素发生器从一层西侧送药入口经提升机送至负一层区域，经缓冲间送至淋洗制备间。

回旋加速器生产和发生器淋洗制备得到的成品药物经走廊送至提升机，提升至一层核医学科区域。放射性药物在每日工作开始前（7:30-8:00）运输到指定位置。

### **(3) 放射性固体废物路径**

负一层核医学科各场所产生的放射性固体废物统一收集至北侧固废间暂存。清洁解控的放射性固体废物从提升机送至一层核医学科，最终运离核医学科工作场所。放射性固体废物收集和清运在下班后的无人时段（19:00-19:30）完成。

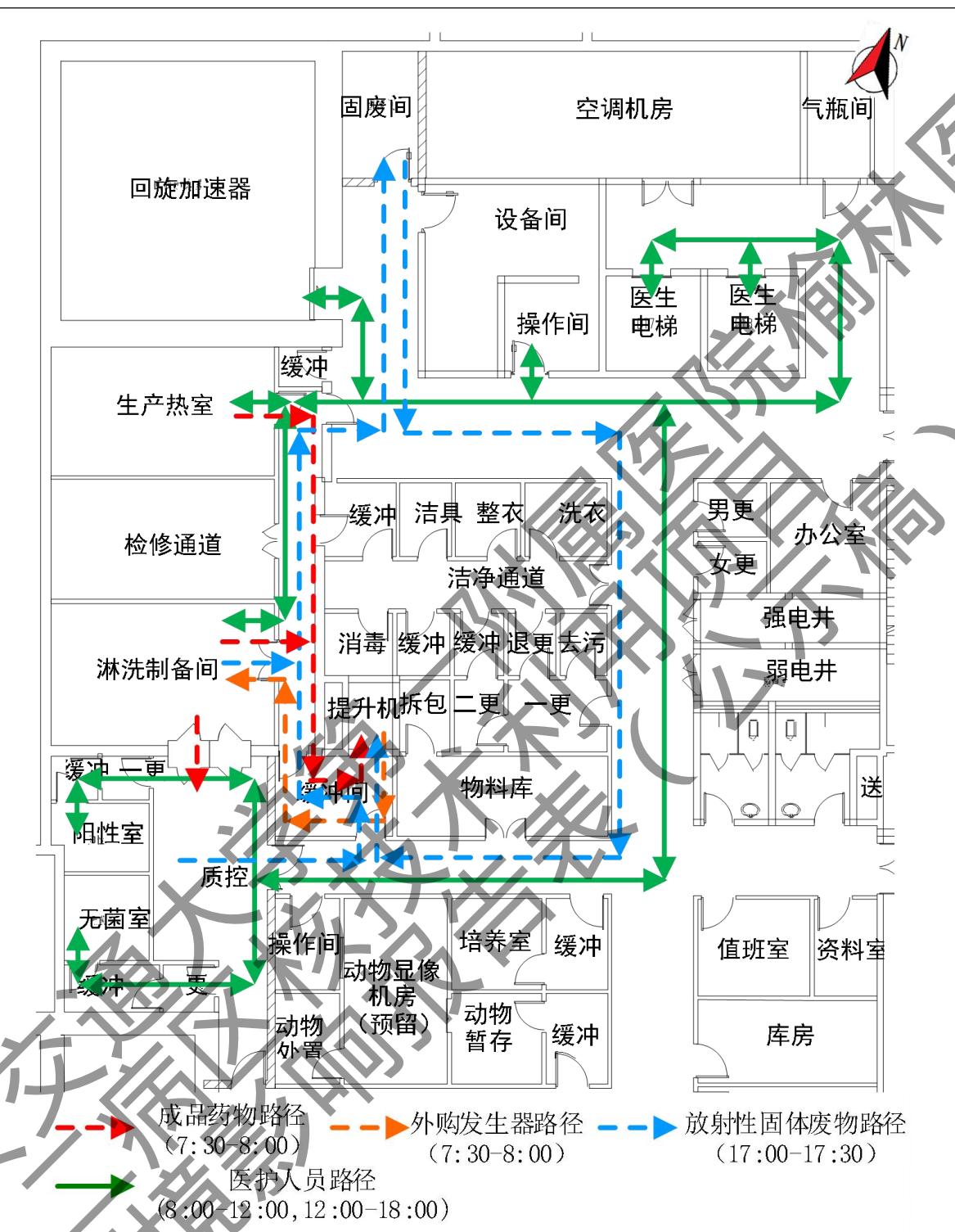


图 10-4 人员物资路径图 (肿瘤科研楼负一层核医学科)

一层核医学科住院治疗区域的辐射工作人员、放射性药物和放射性固体废物路径如下：

### (1) 医护人员路径

敷贴室和吸碘率室工作人员从西侧患者入口进入，经过护士站前往各自工作岗位，工作结束后原路返回。

注射给药人员从北侧通过间进入，住院区域工作人员向西到达岗位，门诊诊疗区域工作人员向东到达岗位。工作结束后原路返回。

影像检查人员从东侧入口进入操作廊，前往各自岗位工作，工作结束后原路返回。

#### **(2) 放射性药物路径**

外购放射性药物从西北角入口进入，自制的放射性药物从西北角提升机到达一层核医学科场所。甲癌药物暂存在甲癌自动分装仪内，<sup>177</sup>Lu药物暂存在储源容器内，甲亢药物和甲功测定药物暂存在甲亢自动分装仪内，敷贴药物经传递窗送至敷贴室暂存在敷贴手套箱内，PET诊断药物暂存在PET手套箱内，SPECT药物暂存在SPECT手套箱内，门诊治疗药物暂存在储源容器内。放射性药物在每日工作开始前（7:30-8:00）运输到指定位置。

#### **(3) 放射性固体废物路径**

住院区域敷贴室、给药区产生的放射性固体废物送至西北角固废间暂存，病房区域产生放射性固体废物送至南侧固废间暂存，门诊诊疗区域产生的放射性固体废物送至东北角固废间暂存。暂存结束后统一从西北角入口运离核医学科。放射性固体废物收集和清运在下班后的无人时段（19:00-19:30）完成。

#### **(4) 患者路径**

住院区域患者由西侧入口进入核医学科。甲功测定患者、甲亢治疗患者在门诊给药区服药窗口服药后直接从离开通道离开核医学科，甲功测定患者按要求的时间前往吸碘率室进行检查；敷贴治疗患者直接前往敷贴室治疗，治疗结束后原路返回；甲癌治疗、<sup>177</sup>Lu注射治疗患者在住院给药区服药后前往指定病房住院治疗，甲癌患者治疗结束后需在出院检测室进行检测，满足出院条件后方可出院，<sup>177</sup>Lu治疗患者住院治疗结束后可直接出院。

门诊诊疗区域患者由东侧入口进入核医学科。门诊治疗患者在给药区注射后直接向南从出口离开核医学科；PET诊断患者在给药区注射后前往对应的注射后候诊室候诊，根据叫号前往PET-CT机房/PET-MR机房检查，检查结束后离开核医学科；SPECT诊断患者在给药区注射、在运动负荷室运动后注射或在肺通气室吸入药物，给药后前往对应的注射后候诊室候诊，根据叫号前往SPECT-CT机房检查，检查结束后在留观室进行短暂留观后离开核医学科。

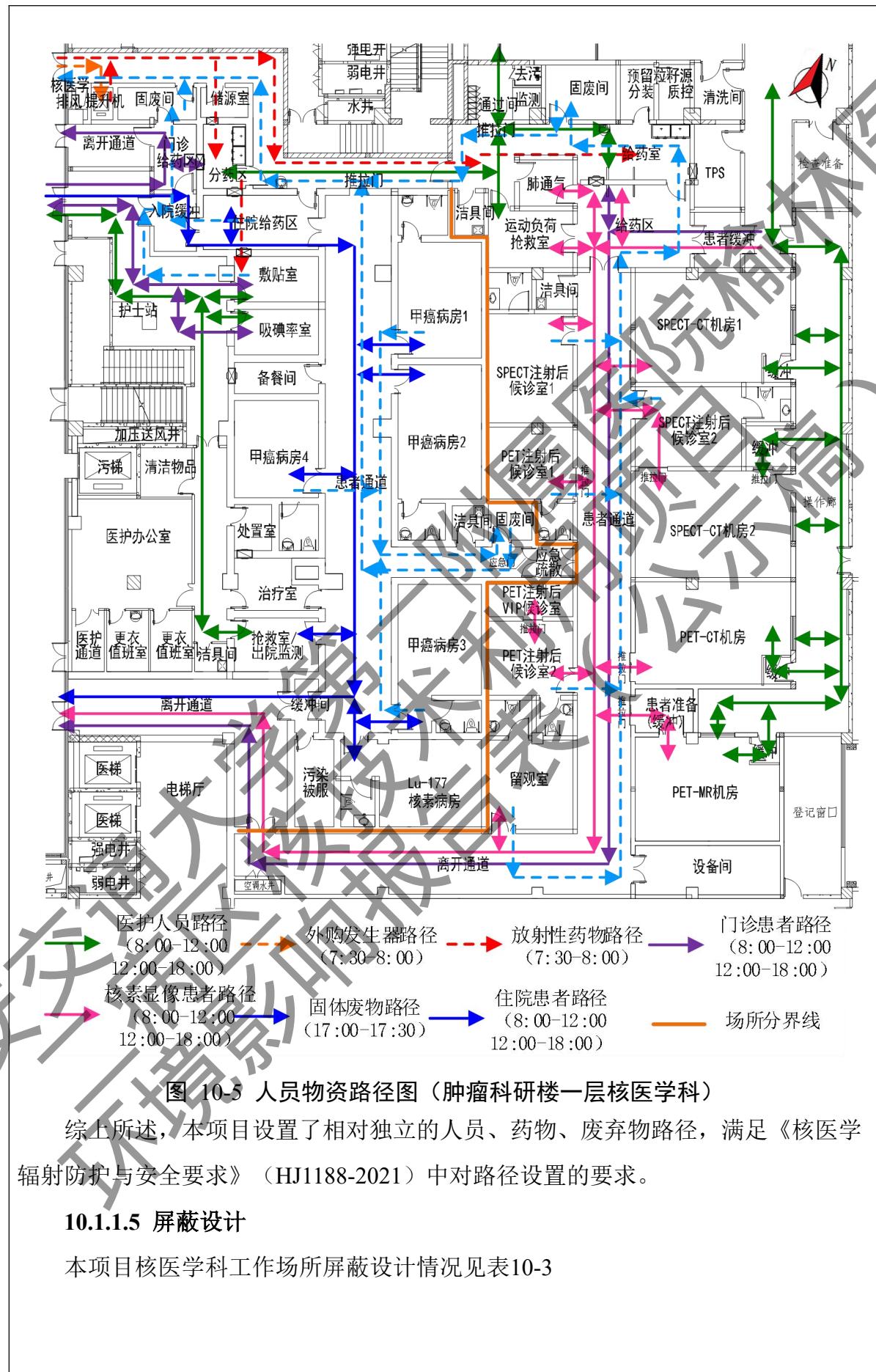


表 10-3 核医学科工作场所屏蔽设计情况

工作场所	屏蔽部位	屏蔽材料及规格
负一层核医学科药物制备区域		
回旋加速器机房	四周墙体	北墙、西墙: 600mm 混凝土 南墙、东墙: 800mm 混凝土
	屋顶	200mm 混凝土楼板
	地面	250mm 混凝土楼板
	防护门	20mmPb+260mm 聚乙烯
生产热室及淋洗制备间	四周墙体	300mm 混凝土
	屋顶	200mm 混凝土楼板
	地面	250mm 混凝土楼板
	防护门 (北侧走廊)	10mmPb 防护门
	防护门 (东侧缓冲间)	10mmPb 防护门
	防护门 (南侧缓冲间)	10mmPb 防护门
	传递窗 (北)	15mmPb 传递窗
	传递窗 (南)	15mmPb 传递窗
质控室	四周墙体	北墙、西墙: 300mm 混凝土 南墙: 700mm 混凝土 东墙: 240mm 实心砖
	屋顶	200mm 混凝土楼板
	地面	250mm 混凝土楼板
	防护门	8mmPb 防护门 (2 个)
	传递窗	15mmPb 传递窗
固废间	四周墙体	北墙: 300mm 混凝土 南墙、东墙: 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料 西墙: 800mm 混凝土
	屋顶	200mm 混凝土楼板+5mm 铅板
	地面	250mm 混凝土楼板+40mm 硫酸钡涂料
	防护门	8mmPb 防护门
一层核医学科住院治疗区域		
固废间	四周墙体	370mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
	防护门 (北)	8mmPb 防护门
	防护门 (南)	6mmPb 防护门
储源室	四周墙体	南墙: 370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料 其余墙体: 370mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
	防护门	8mmPb 防护门
分药区	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料

	屋顶	250mm 混凝土楼板+6mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+6mm 铅板
	防护门	8mmPb 防护门
	传递窗（北）	20mmPb 传递窗
	服药窗（西）	20mmPb 服药窗口
	服药窗（南）	20mmPb 服药窗口
	注射窗（南）	20mmPb 注射窗
门诊给药区	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+16mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
	防护门（北）	6mmPb 防护门
	防护门（南）	10mmPb 防护门
	防护门（西）	8mmPb 防护门
住院给药区	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+16mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+20mm 铅板
	防护门（北）	15mmPb 防护门
	防护门（西）	18mmPb 防护门
	防护门（东）	15mmPb 防护门
	服药窗（北）	20mmPb 服药窗口
	传递窗（南）	20mmPb 传递窗
甲癌病房 1	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+18mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+12mm 铅板
	病房门	15mmPb 防护门
甲癌病房 2	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+8mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+9mm 铅板
	病房门	15mmPb 防护门
甲癌病房 3	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+20mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+16mm 铅板
	病房门	15mmPb 防护门
甲癌病房 4	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+6mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+6mm 铅板
	病房门	15mmPb 防护门
<sup>177</sup> Lu 病房	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+6mm 铅板

	地面	200mm 混凝土楼板+6mm 铅板
	病房门	15mmPb 防护门
抢救室/ 出院检测	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+6mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+4mm 铅板
	防护门（西）	15mmPb 防护门
	防护门（东）	12mmPb 防护门
污染被服库	四周墙体	东墙：370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料 其余墙体：370mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+6mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+4mm 铅板
	防护门	10mmPb 防护门
配餐间	四周墙体	西墙：300mm 混凝土+20mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
	防护门	12mmPb 防护门
	送餐传递窗	20mmPb 传递窗
敷贴室	四周墙体	370mm 实心砖
	屋顶	250mm 混凝土楼板
	地面	200mm 混凝土楼板
	防护门	2mmPb 防护门
吸碘率室	四周墙体	西墙南段：300mm 混凝土 其余墙体：370mm 实心砖
	屋顶	250mm 混凝土楼板
	地面	200mm 混凝土楼板
	防护门	3mmPb 防护门
患者走廊	四周墙体	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+4mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+4mm 铅板
	应急门（北侧）	15mmPb 防护门
	应急门（治疗室）	15mmPb 防护门
	应急门（应急疏散）	10mmPb 防护门
	患者出口门（内侧）	15mmPb 防护门
给药室	患者出口门（外侧）	12mmPb 防护门
	一层核医学科门诊诊疗区域	
	四周墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+4mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
给药室	防护门（预留房间）	6mmPb 防护门
	防护门（固废间）	8mmPb 防护门

给药区	防护门（通过间）	10mmPb 防护门
	防护门（送药通道）	8mmPb 防护门
	防护门（洁具间）	6mmPb 防护门
	防护门（运动负荷室）	10mmPb 防护门
	防护门（肺通气）	4mmPb 防护门
	防护门（患者走廊）	12mmPb 防护门
	注射窗（PET）	50mmPb 注射窗
	注射窗（SPECT）	10mmPb 注射窗
	四周墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
	防护门（给药室）	12mmPb 防护门
	防护门（肺通气）	4mmPb 防护门
	防护门（负荷室）	10mmPb 防护门
	防护门（走廊）	10mmPb 防护门
SPECT 注射后候诊室 1	防护门（患者入口）	10mmPb 防护门
	注射窗（PET）	50mmPb 注射窗
	注射窗（SPECT）	10mmPb 注射窗
	四周墙体	北墙、东墙: 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料 西墙: 370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料 南墙: 240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板
SPECT 注射后候诊室 2	地面	200mm 混凝土楼板
	防护门	4mmPb 防护门
	四周墙体	西墙: 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料 其余墙体: 240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板
	地面	200mm 混凝土楼板
SPECT-CT 机房 1	防护门（西）	4mmPb 防护门
	防护门（南）	4mmPb 防护门
	四周墙体	西墙: 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料 其余墙体: 240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+3mm 铅板
SPECT-CT 机房 2	观察窗	4mmPb 观察窗
	防护门（患者）	4mmPb 防护门
	防护门（医护）	4mmPb 防护门
	四周墙体	北墙、东墙: 240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料 南墙、西墙: 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+3mm 铅板

	观察窗	4mmPb 观察窗
	防护门 (患者)	4mmPb 防护门
	防护门 (缓冲间)	4mmPb 防护门
	防护门 (医护)	4mmPb 防护门
PET 注射后 候诊室 1	四周墙体	西墙: 370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料 其余墙体: 240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+4mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
	防护门	12mmPb 防护门
PET 注射后 候诊室 2	四周墙体	西墙: 370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料 其余墙体: 240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+4mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板
	防护门 (北)	12mmPb 防护门
	防护门 (东)	12mmPb 防护门
PET 注射后 VIP 候诊室	四周墙体	北墙西段、西墙: 370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料 北墙东段、东墙: 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料 南墙: 240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板
	地面	200mm 混凝土楼板
	防护门	12mmPb 防护门
PET-CT 机房	四周墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	观察窗	10mmPb 观察窗
	防护门 (患者)	8mmPb 防护门
	防护门 (医护)	10mmPb 防护门
PET-MR 机房	四周墙体	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料
	屋顶	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	地面	200mm 混凝土楼板+3mm 铅板
	观察窗	10mmPb 观察窗
	防护门 (患者)	8mmPb 防护门
	防护门 (医护)	10mmPb 防护门
留观室	四周墙体	北墙: 240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料 西墙: 370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料 其余墙体: 240mm 实心砖
	屋顶	250mm 混凝土楼板+2mmPb 板
	地面	200mm 混凝土楼板+2mmPb 板
	防护门	10mmPb 防护门
	衰变池	
衰变池	四周墙体	300mm 混凝土池体

	顶面	300mm 混凝土池体/盖板
	底面	300mm 混凝土

注：硫酸钡涂料密度不小于  $3.2\text{g/cm}^3$ 。

#### 10.1.1.6 安全设施要求

本项目核医学科设置的辐射安全防护设施见表10-4，辐射安全防护设施设置位置见图10-6及图10-7。

表 10-4 核医学科辐射安全防护设施/措施

设施/措施名称	位置	功能
门禁装置	核医学科各出口、入口	避免未经许可的人员进入
电离辐射警告标志	核医学科入口, 射线装置机房入口等	提示前方区域可能存在电离辐射影响
工作状态指示灯	射线装置机房门口	显示射线装置的工作状态, 避免人员误入
急停按钮	射线装置机房、设备机身、操作位等	紧急情况下停止出束
红外防夹装置	射线装置机房电动推拉门	避免夹伤人员
自动闭门装置	射线装置机房手动平开门	确保出束时机房门关闭, 避免射线泄漏
视频监控	核素病房、回旋加速器机房等	工作人员无需进入高剂量区域即可了解区域情况
门机联锁装置	回旋加速器机房门	确保出束时防护门已关闭
延迟开门装置		确保开门时机房内感生放射性核素基本衰变
清场装置		开机前确保机房内清场
固定式剂量报警仪		监控并及时发现剂量异常
手动开门装置		避免人员受困

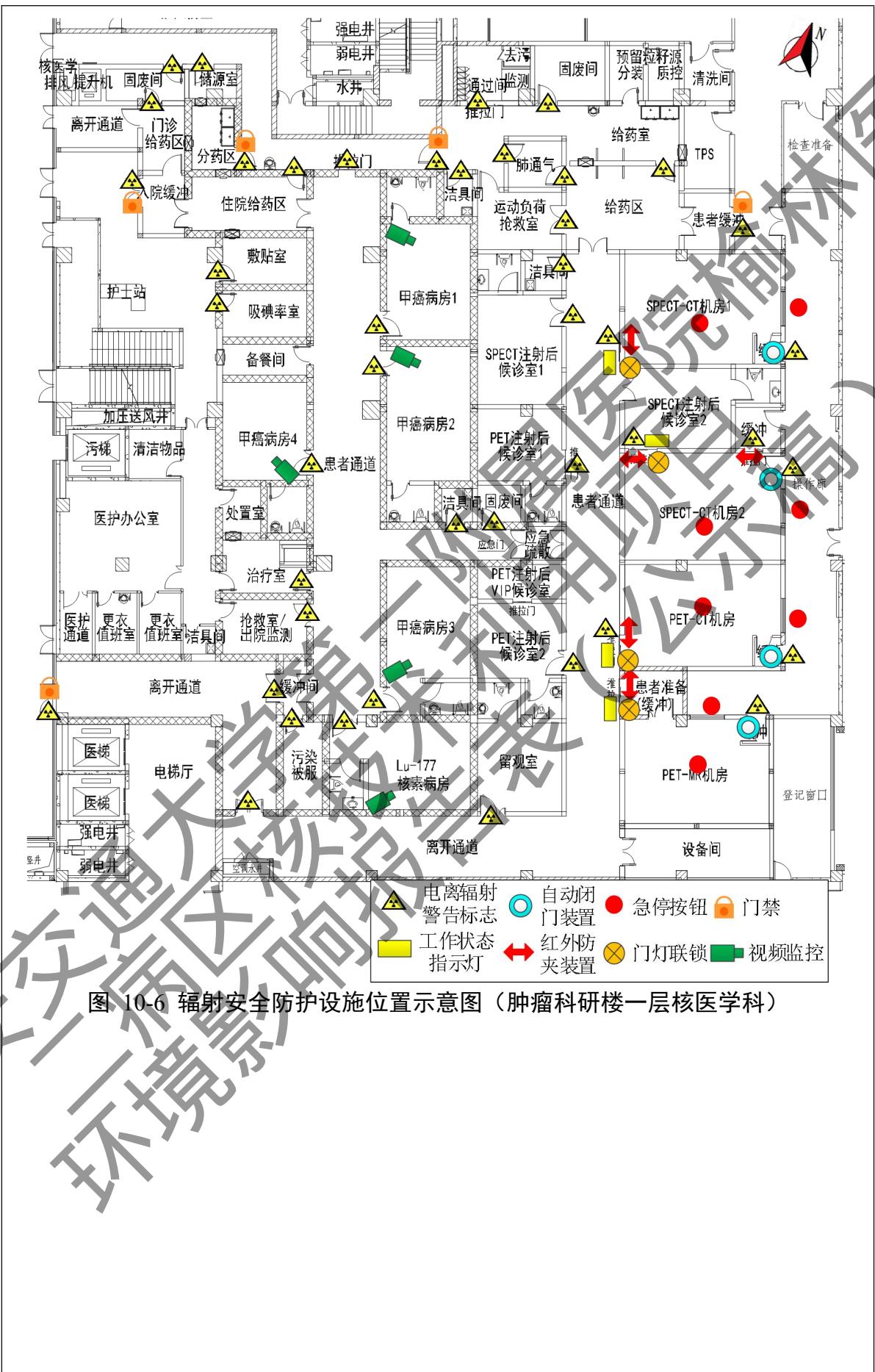


图 10-6 辐射安全防护设施位置示意图（肿瘤科研楼一层核医学科）



图 10-7 辐射安全防护设施位置示意图 (肿瘤科研楼负一层核医学科)

### 10.1.1.7 防护用品

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）相关要求，结合项目实际情况，项目拟配置的防护设施及个人防护用品见表 10-5。

表 10-5 核医学科防护设施及防护用品

名称	场所	数量规格及位置	用途
手套箱	一层门诊诊疗区域给药室	1 个, 70mmPb	PET 药物暂存操作
	一层住院区域 敷贴室	1 个, 5mmPb	SPECT 药物暂存操作
		1 个, 有机玻璃防护	$^{32}\text{P}$ 敷贴器制作
自动分装仪	一层住院区域 分药区	1 个, 60mmPb	甲癌药物分装给药
		1 个, 45mmPb	甲亢药物分装给药
注射窗	一层门诊诊疗区域给药室	1 套, 50mmPb, 两侧设有手套孔	PET 药物注射 门诊治疗药物注射
		1 套, 10mmPb, 两侧设有手套孔	SPECT 药物注射 门诊治疗药物注射
	一层住院区域 分药区	1 个, 10mmPb, 两侧设有手套孔	$^{177}\text{Lu}$ 药物注射
注射器屏蔽套	一层门诊诊疗区域给药室	1 个, 10mmPb	PET 药物注射防护
		1 个, 5mmPb	SPECT 药物注射防护
铅污物桶	一层门诊诊疗区域	2 个, 10mmPb, 给药室	放射性固体废物收集
		2 个, 5mmPb, 设在2间SPECT 注射后候诊室卫生间	
		3 个, 10mmPb, 设在2间PET 注射后候诊室卫生间及留观室卫生间	
	一层住院治疗区域	5 个, 10mmPb, 分别设在5个核素病房	
		1 个, 5mmPb 带有机玻璃内衬, 敷贴室	
	负一层药物制备区域	1 个, 5mmPb, 镉制备间	
		1 个, 10mmPb, 质控室	
储源及转运容器	一层门诊诊疗区域给药室	1 个, 50mmPb	PET 药物转运暂存
		2 个, 20mmPb	
		1 个, 10mmPb	SPECT 药物转运暂存
		1 个, 5mmPb, 带有机玻璃内衬	门诊注射药物暂存
	一层住院治疗区域分药区	1 个, 50mmPb	$^{131}\text{I}$ 药物转运及暂存
		1 个, 20mmPb	
	甲功室	1 个, 5mmPb	标准源转运
	一层住院治疗区域固废间	1 套, 20mmPb	长半衰期放射性固体 废物暂存衰变
	一层门诊诊疗区域固废间	1 套, 10mmPb	短半衰期放射性固体
		1 套, 20mmPb	

	负一层药物制备 区域固废间	1套, 20mmPb	废物暂存衰变
个人防护 用品	敷贴室	远距离操作工具, 有机玻璃眼镜或 面罩(选配), 1套	敷贴器制作和放置等 操作防护
	核医学和SPECT 场所	铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染 防护服、铅橡胶围脖、铅橡胶帽(选 备)、铅玻璃眼镜(选备)	减少辐射工作人员 所受辐射影响
	正电子放射性药 物和 <sup>131</sup> I的场所	放射性污染防护服、口罩、手套等, 根据需要及时补充	
应急去污 用品	核医学科	一次性防水手套、气溶胶防护口罩、 安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污 剂和/或喷雾; 刷子、一次性毛巾或吸 水纸、毡头标记笔、不同大小的塑料 袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、 胶带、标签、不透水的塑料布、一次 性镊子等。	辐射事故应急处置

### 10.1.2 放疗科

#### 10.1.2.1 布局合理性分析

本项目放射治疗机房和CT模拟定位机房均位于肿瘤科研楼负一层北侧一端, 自北向南依次分布有一间后装机房, 一间CT模拟定位机房、一间MR定位机房和两间直线加速器机房, 同时配套设置控制室、准备室、冲洗室、设备机房、水冷机房、制铅室等相关辅助用房。

后装机房与直线加速器机房正下方均为封闭空间, CT模拟定位机房正下方是地下车库; 后装机房、直线加速器机房和CT模拟定位机房正上方是核医学科。

后装机房东侧与准备室相邻, 控制室位于机房南侧, 机房北侧和西侧均为走廊; CT模拟定位机房西侧是控制室和设备机房, 东侧是护士站, 北侧和南侧均为走廊; 两间直线加速器机房自西向东并排布置, 机房北侧是控制室、辅助机房和水冷机房, 东侧与排风排烟机房相邻, 南侧是地下车库, 西侧是设备库和生活泵房。

肿瘤科研楼负一层平面布局详见图1-5。

##### (1) 后装机房

本项目后装机房南北长6.0m、东西宽5.0m, 使用面积30.0m<sup>2</sup> (不含迷路)。后装机房与控制室分开设置, 控制室位于机房南侧, 机房入口处设置直迷路, 迷路入口设置有防护门。

##### (2) 直线加速器机房

本项目两间直线加速器机房尺寸相同, 东西长均为8.0m、南北宽均为7.9m, 使

用面积均为 $63.2\text{m}^2$ （不含迷路），并设置L型迷路，迷路入口均设置有防护门。两间机房分别与控制室、辅助机房、水冷机房分离设置。有用线束设计均为东西方向及屋顶，控制室、辅助机房、水冷机房均位于机房北侧，避免了有用线束直接照射。

### （3）CT模拟定位机房

本项目CT模拟定位机房有效使用面积为 $42.90\text{m}^2$ （南北长 $7.73\text{m}$ ，东西宽 $5.55\text{m}$ ），MR定位机房与本项目CT模拟定位机房共用一间控制室，控制室位于机房西侧，并与机房分离设置。CT模拟定位机房设置有防护门和观察窗。因此，CT模拟定位机房满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“CT机房的最小有效使用面积不小于 $30\text{m}^2$ ，机房内最小单边长度不小于 $4.5\text{m}$ ”的要求。

本项目后装机房与直线加速器机房平面布局合理性分析见表 10-6，CT 模拟定位机房平面布局合理性分析见表 10-7。

表 10-6 后装机房与直线加速器机房平面布局合理性分析

法规标准	标准要求	本项目情况	评价
《放射治疗辐射安全与防护要求》 （HJ1198-2021）	5.1.1 放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	后装机房与直线加速器机房位于医院肿瘤科研楼负一层。用地类型为医疗用地，不涉及民居、写字楼及商住两用的建筑物。	符合
	5.1.2 放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。	后装机房与直线加速器机房位于医院肿瘤科研楼负一层北侧一端，机房下方负二层、负三层对应区域均为封闭空间，上方是核医学科，周围无儿科病房、产房或人员流动性大的商业活动区域。	符合
《放射治疗放射防护要求》 （GBZ121-2020）	6.1.1 放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。	后装机房与直线加速器机房位于医院肿瘤科研楼负一层北侧一端，下方是空腔；机房与控制室、准备室、冲洗室、辅助机房、水冷机房等同时设计建造。	符合
	6.1.4 治疗设备控制室应与治疗机房分开设置，治疗设备辅助机械、电器、水冷设备，凡是可能与治疗设备分离的，尽可能设置于治疗机房外。	后装机房、直线加速器机房与控制室、准备室、冲洗室、辅助机房、水冷机房等分开设置。	符合

6.1.5 应合理设置有用线束的朝向,直接与治疗机房相连的治疗设备的控制室和其他居留因子较大的用室,尽可能避开被有用线束直接照射。	后装机四周及顶部均受到初级辐射,经预测满足屏蔽要求,控制室设置在机房西侧。两台直线加速器有用线束的朝向为东西方向,控制室分别设置在机房北侧,有用线束避开了机房控制室。	符合
6.1.6 X射线管治疗设备的治疗机房可不设迷路;γ刀治疗设备的治疗机房,根据场所空间和环境条件,确定是否选用迷路;其他治疗机房均应设置迷路。	后装机房和直线加速器机房均已设置迷路。	符合
6.2.1 放射治疗机房应有足够的有效使用空间,以确保放射治疗设备的临床应用需要。	后装机房的有效使用面积(不含迷路)为30.0m <sup>2</sup> ,两间直线加速器机房的有效使用面积(不含迷道)均为63.2m <sup>2</sup> ,机房面积均能够满足使用要求。	符合

表 10-7 CT 模拟定位机房平面布局合理性分析

法规标准	标准要求	本项目情况	评价
《放射治疗放射防护要求》(GBZ130-2020)	6.1.2 X射线设备机房(照射室)的设置应充分考虑邻室(含楼上和楼下)及周围场所的人员防护与安全。	根据CT模拟定位机房辐射屏蔽设计,机房可满足相应照射方向的屏蔽厚度要求,对周围场所人员影响很小。	符合
	6.1.3 每台固定使用的X射线设备应设有单独的机房,机房应满足设备的布局要求。	本项目CT模拟定位机配有独立的机房,机房空间满足设备的布局要求。	符合
	6.1.5 除床旁摄影设备、便携式X射线设备和车载式诊断X射线设备外,对新建、改建和扩建项目和技术改造、技术引进项目的X射线设备机房,CT机机房内最小有效使用面积、最小单边长度应符合最小单边长度4.5m,最小有效使用面积30m <sup>2</sup> 的规定。	本项目CT模拟定位机房南北长7.73m,东西宽5.55m,有效使用面积为42.90m <sup>2</sup> 。	符合
	6.4.9 CT装置的安放应利于操作者观察受检者。	CT安装于机房中央位置,CT模拟定位机房设有观察窗,便于操作者观察受检者。	
	6.4.10 机房出入门宜处于散射辐射相对低的位置。	CT机房患者门和工作人员门均处于散射辐射相对低的位置。	

根据表 10-6, 项目后装机房和直线加速器机房工作场所布局均满足《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)中的相关规定; 根据表 10-7, 项目 CT 模拟定位机

房工作场所布局满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）》中的相关规定。因此，本项目放疗科工作场所布局合理。

### 10.1.2.2 辐射工作场所分区

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和《放射治疗辐射安全与防护》（HJ1198-2021），辐射工作场所应分为控制区及监督区，以便于辐射防护管理和职业照射控制。

控制区：把需要或可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。

监督区：未被定为控制区，在其中通常不需要专门的防护手段或安全措施，但要经常对职业照射条件进行监督和评价。

《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）5.2.1 放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下，控制区包括加速器大厅、治疗室（含迷道）等场所，如.....，直线加速器机房、含源装置的治疗室、.....等。5.2.2 与控制区相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区（如直线加速器治疗室相邻的控制室及与机房相邻区域等）。

根据 GB18871-2002 及 HJ1198-2021 相关要求，本项目将后装机房（含迷道）、两间直线加速器机房（含迷道）和 CT 模拟定位机房划分为控制区。将一间后装机房、两间直线加速器机房和一间 CT 模拟定位机房相邻的需要对职业照射条件进行监督和评价的准备室、走廊、控制室、水冷机房、设备库、等区域划分监督区。

本项目放疗科分区管理示意图见图 10-8。

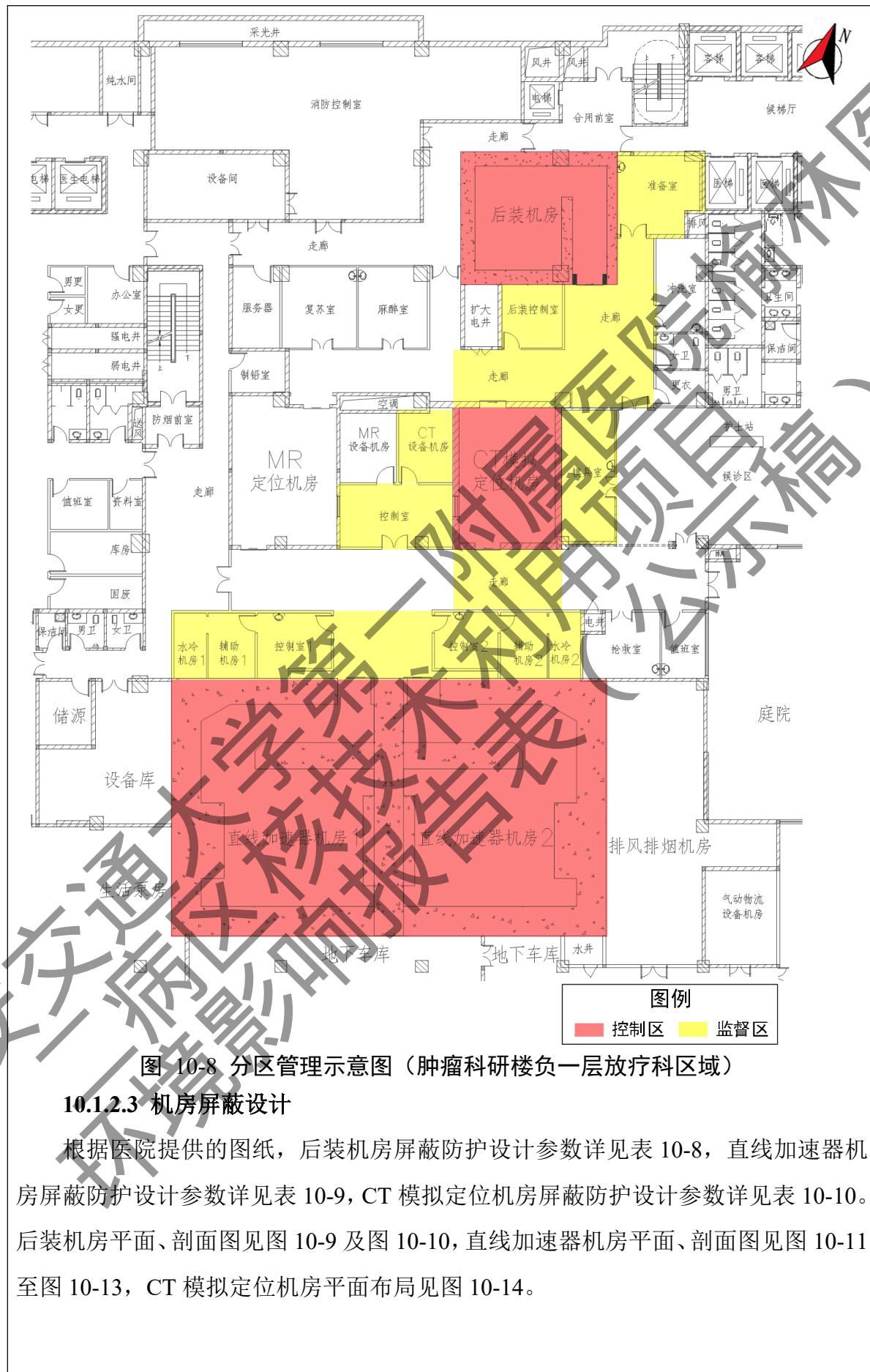


图 10-8 分区管理示意图（肿瘤科研楼负一层放疗科区域）

### 10.1.2.3 机房屏蔽设计

根据医院提供的图纸,后装机房屏蔽防护设计参数详见表 10-8,直线加速器机房屏蔽防护设计参数详见表 10-9,CT 模拟定位机房屏蔽防护设计参数详见表 10-10。后装机房平面、剖面图见图 10-9 及图 10-10,直线加速器机房平面、剖面图见图 10-11 至图 10-13,CT 模拟定位机房平面布局见图 10-14。

表 10-8 后装机房屏蔽防护设计参数一览表

机房	位置		设计方案
后装机房	有效使用面积及净高		有效使用面积30.0m <sup>2</sup> (长6.0m×宽5.0m×高5.45m)
	东墙	迷路外墙	厚0.6m混凝土
		迷路内墙	厚0.6m混凝土
	西墙		厚0.8m混凝土
	南墙		厚0.8m混凝土
	北墙		厚0.8m混凝土
	屋顶		厚0.8m混凝土
	地板		厚0.8m混凝土, 下方为空腔
	防护门		8mmPb电动推拉门

表 10-9 直线加速器机房屏蔽防护设计参数一览表

机房	位置		设计方案
直线加速器机房1	有效使用面积及净高		有效使用面积63.2m <sup>2</sup> (长8.0m×宽7.9m×高3.0m)
	北墙	迷路外墙	厚1.5m混凝土
		迷路内墙	厚1.5m混凝土
	西墙	主屏蔽墙	厚3.0m混凝土, 宽度4.3m
		次屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	南墙	侧屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	东墙 (与东侧直线 加速器机房2共 用)	主屏蔽墙	厚3.0m混凝土, 宽度5.2m
		次屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	屋顶	主屏蔽墙	厚3.0m混凝土, 宽度4.3m
		次屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	地板		厚0.3m混凝土, 下方为空腔,
	防护门		11mmPb电动推拉门
直线加速器机房2	有效使用面积及净高		有效使用面积63.2m <sup>2</sup> (长8.0m×宽7.9m×高3.0m)
	北墙	迷路外墙	厚1.5m混凝土
		迷路内墙	厚1.5m混凝土
	西墙 (与西侧直线 加速器机房1共 用)	主屏蔽墙	厚3.0m混凝土, 宽度5.2m
		次屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	南墙	侧屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	东墙	主屏蔽墙	厚3.0m混凝土, 宽度4.3m
		次屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	屋顶	主屏蔽墙	厚3.0m混凝土, 宽度4.3m
		次屏蔽墙	厚1.7m混凝土
	地板		厚0.3m混凝土, 下方为空腔,

防护门		11mmPb电动推拉门
表 10-10 直线加速器机房屏蔽防护设计参数一览表		
机房	位置	设计方案
CT模拟定位机房	有效使用面积及最小单边长度	有效使用面积42.90m <sup>2</sup> (长7.73m×宽5.55m×高6.3m)
	四周墙体	65mm硫酸钡水泥
	屋顶	150mm混凝土+3mm铅板
	地板	150mm混凝土+65mm硫酸钡水泥
	机房南侧和北侧患者防护门	3mmPb电动推拉门
	工作人员门	3mmPb手动平开门
	观察窗	3mmPb防护玻璃板

表 10-10 直线加速器机房屏蔽防护设计参数一览表

机房	位置	设计方案
CT模拟定位机房	有效使用面积及最小单边长度	有效使用面积42.90m <sup>2</sup> (长7.73m×宽5.55m×高6.3m)
	四周墙体	65mm硫酸钡水泥
	屋顶	150mm混凝土+3mm铅板
	地板	150mm混凝土+65mm硫酸钡水泥
	机房南侧和北侧患者防护门	3mmPb电动推拉门
	工作人员门	3mmPb手动平开门
	观察窗	3mmPb防护玻璃板

注：机房内有效使用面积指机房内可划出的最大矩形的面积。

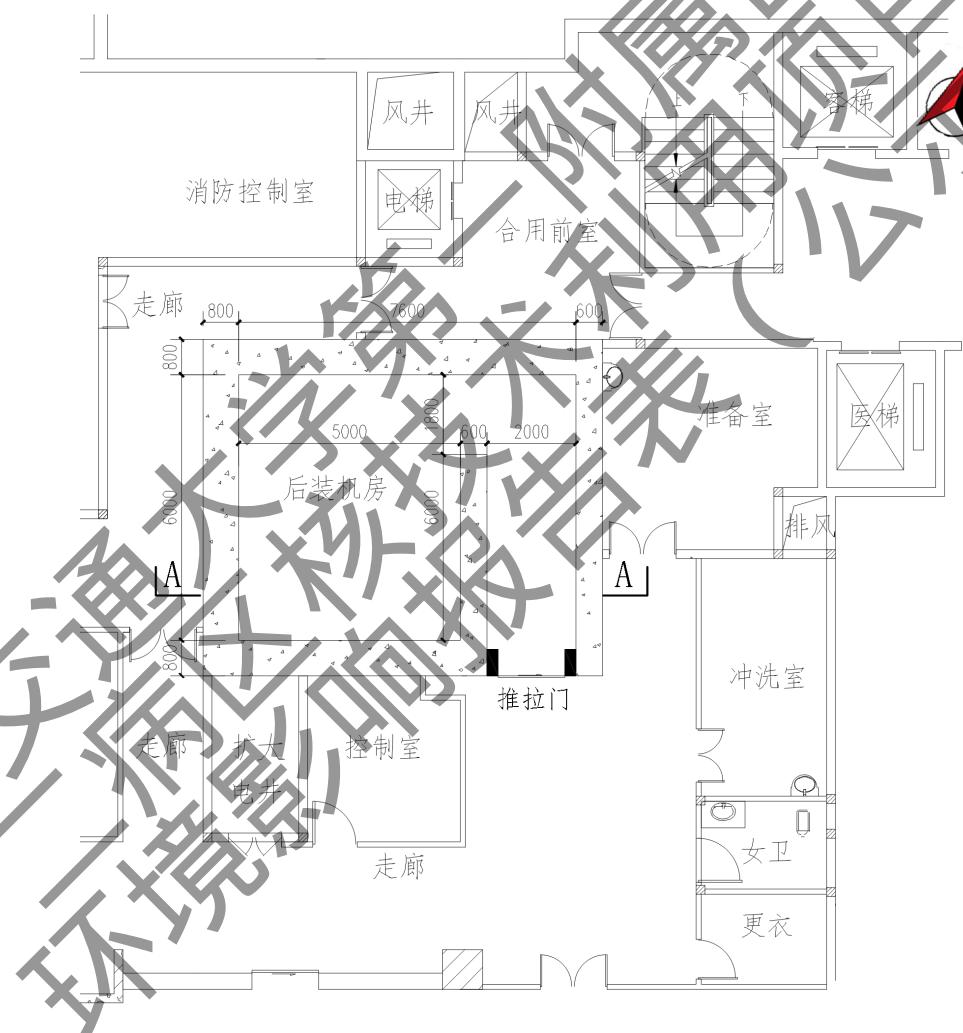


图 10-9 后装机房屏蔽示意平面图 (单位: mm)

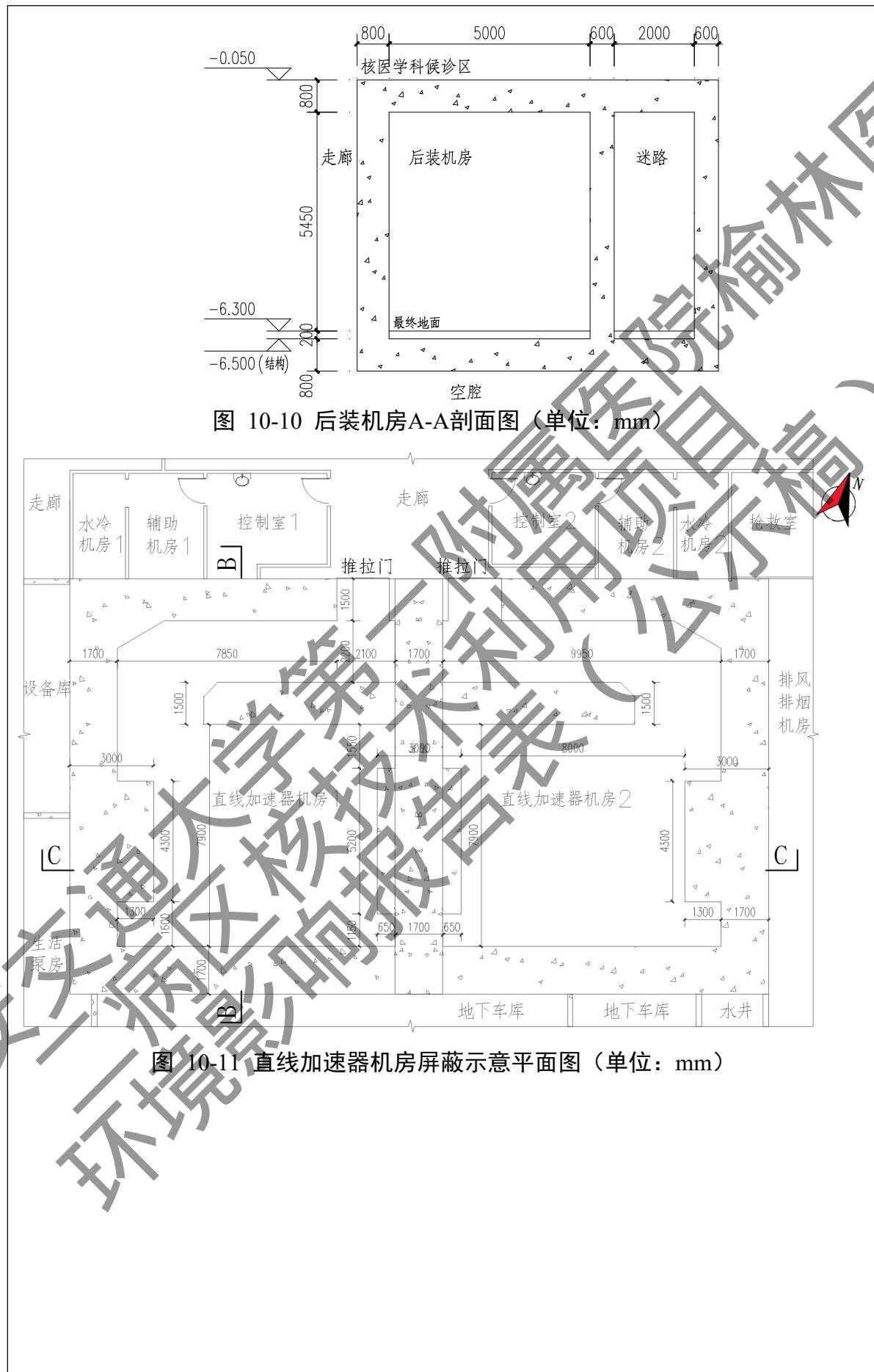


图 10-10 后装机房A-A剖面图 (单位: mm)

图 10-11 直线加速器机房屏蔽示意平面图 (单位: mm)

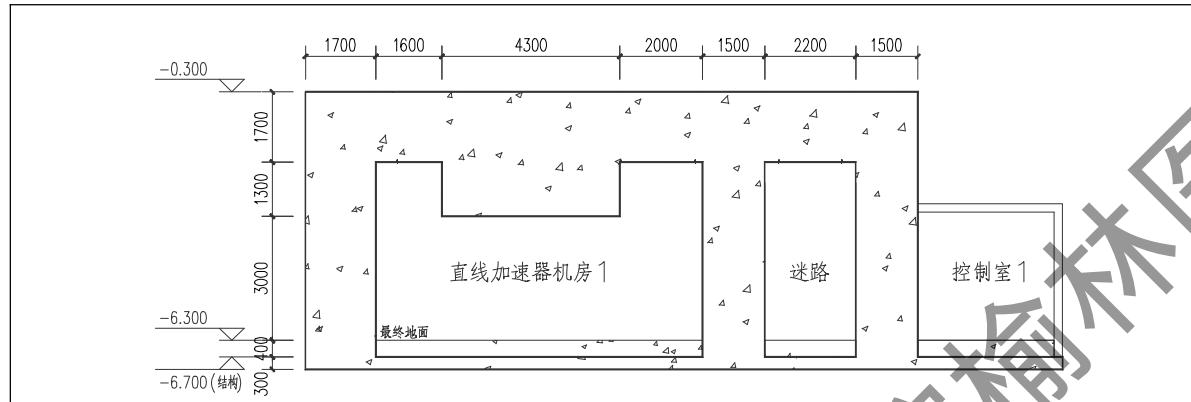


图 10-12 直线加速器机房B-B剖面图 (单位: mm)

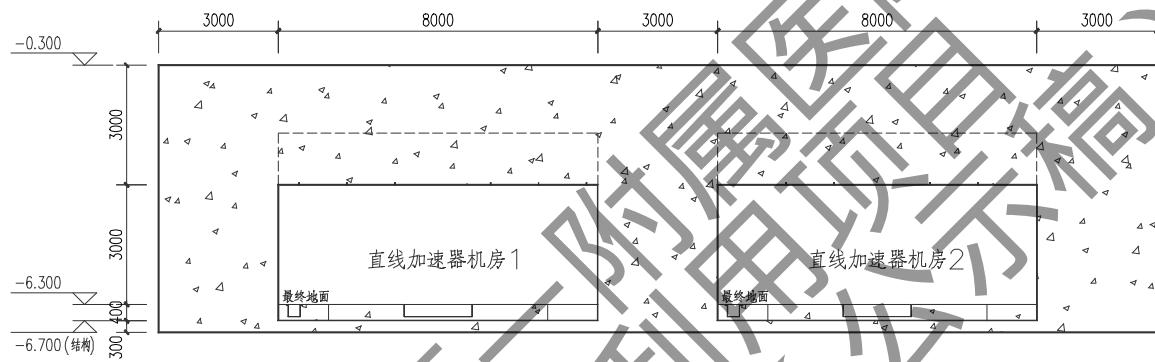


图 10-13 直线加速器机房C-C剖面图 (单位: mm)

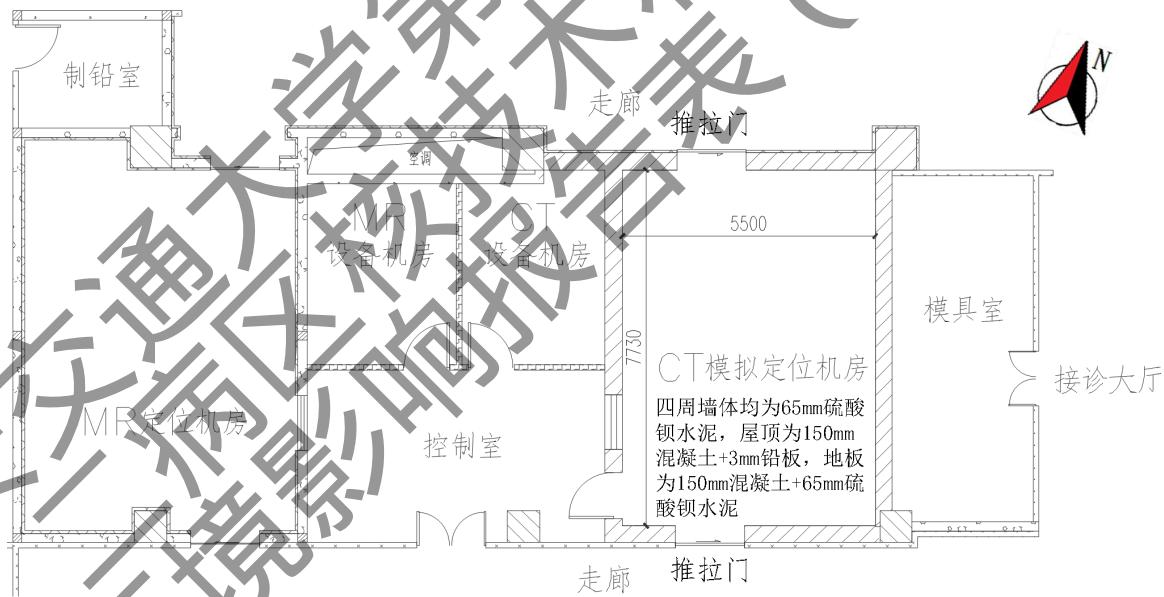


图 10-14 CT模拟定位机房屏蔽示意平面图 (单位: mm)

#### 10.1.2.4 电缆管线穿墙设计

射线装置机房电缆均通过地下电缆沟走线, 从安装设备的地坑出线后沿着电缆沟走线, 在出口处采用“倒梯形”设计, 下沉后穿越屏蔽墙到达机房外。通过多次折返的电缆沟设计和下沉地面穿越屏蔽墙的设计, 增加泄漏射线的散射次数和衰减,

从而保证不减弱屏蔽墙体的屏蔽效果。

电缆沟穿屏蔽墙剖面图见图 10-15。

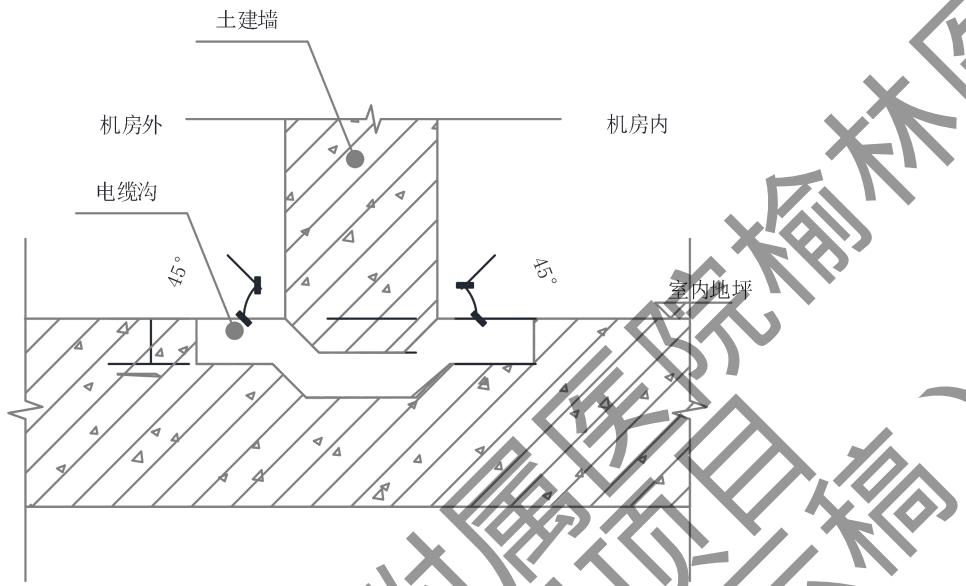


图 10-15 机房电缆沟穿墙示意图

#### 10.1.2.5 通风设计

本项目设备运行过程中，X 射线、 $\gamma$ 射线与空气发生电离作用，产生微量臭氧和氮氧化物等有害气体。

##### (1) 后装机房

后装机房设置了动力送排风装置，采用“上进下排”的进排风形式。在天花板东侧顶部设置一个  $400\text{mm} \times 400\text{mm}$  的新风口，在机房西墙北侧距地面  $0.3\text{m}$  处设置一个  $500\text{mm} \times 300\text{mm}$  的排风口。机房产生的臭氧和氮氧化物等有害气体经排风管道汇入庭院的排风井排放，该风井为地上构筑物，地上高度约  $9\text{m}$ ，周围无门、窗或人流较大的过道。

根据医院提供的设计资料，后装机房容积约为  $234.79\text{m}^3$ （含迷道），排风机额定风量为  $5500\text{m}^3/\text{h}$ ，经理论计算，机房通风换气次数约为 23 次/ $\text{h}$ 。满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中“8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/ $\text{h}$ ，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置”。

##### (2) 医用电子直线加速器机房

为减小臭氧和氮氧化物的危害，两间直线加速器机房均设置了动力送排风装置，采用“上进下排”的进排风形式。两间直线加速器机房均在天花板北侧顶部预留送风管道接口；直线加速器机房 1 西墙北侧和南侧距地面  $0.3\text{m}$  处分别设置一个

500mm×300mm的排风口，直线加速器机房2东墙北侧和南侧距地面0.3m处分别设置一个500mm×300mm的排风口。两间直线加速器机房产生的臭氧和氮氧化物等有害气体经排风管道收集，排风管道出机房后汇成一个总管道，引至庭院的排风井，该风井为地上构筑物，地上高度约9m，周围无门、窗或人流较大的过道。

根据医院提供的设计资料，两间直线加速器机房的体积均为 $421.4\text{m}^3$ （含迷道），排风机额定风量为 $5500\text{m}^3/\text{h}$ ，经计算，两间直线加速器机房的通风换气次数均为13次/h。满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于4次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置”。

直线加速器铅模制作在制铅室内进行，制铅室单独设置一根排风管线，引至庭院内排放。

### （3）CT 模拟定位机房

CT 模拟定位机房设置了动力送排风装置，在天花板东侧顶部设置一个400mm×400mm 的新风口，在机房西墙北侧距地面 0.3m 处设置一个 500mm×300mm 的排风口。机房产生的臭氧和氮氧化物等有害气体经排风管道收集，排风管道出机房后与设备机房、MR 定位机房的排风管道汇成一个总管道，引至庭院排放，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风”的要求。

本项目四间机房送、排风管道路径分别见图 10-16 和图 10-17。

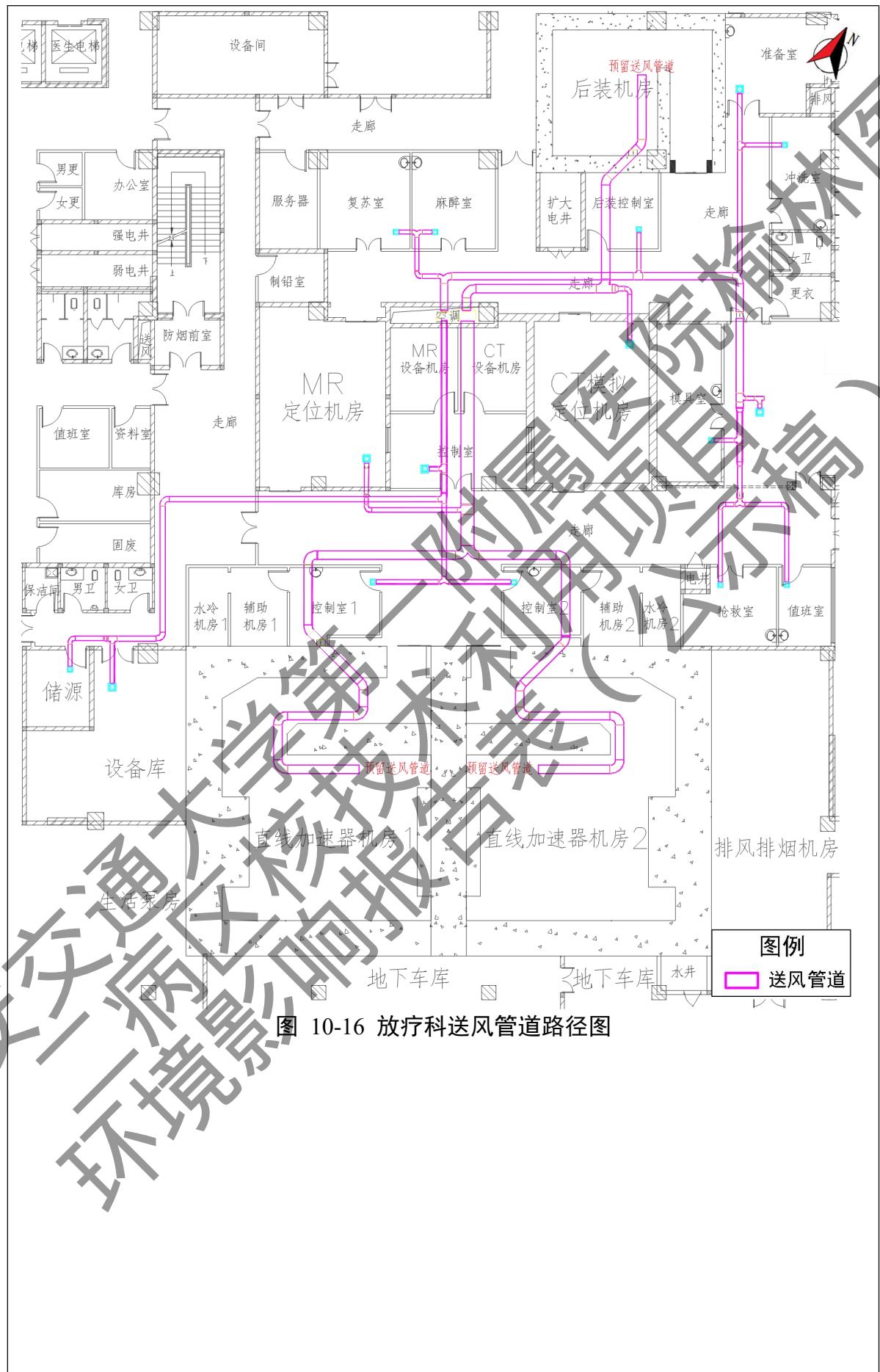


图 10-16 放疗科送风管道路径图

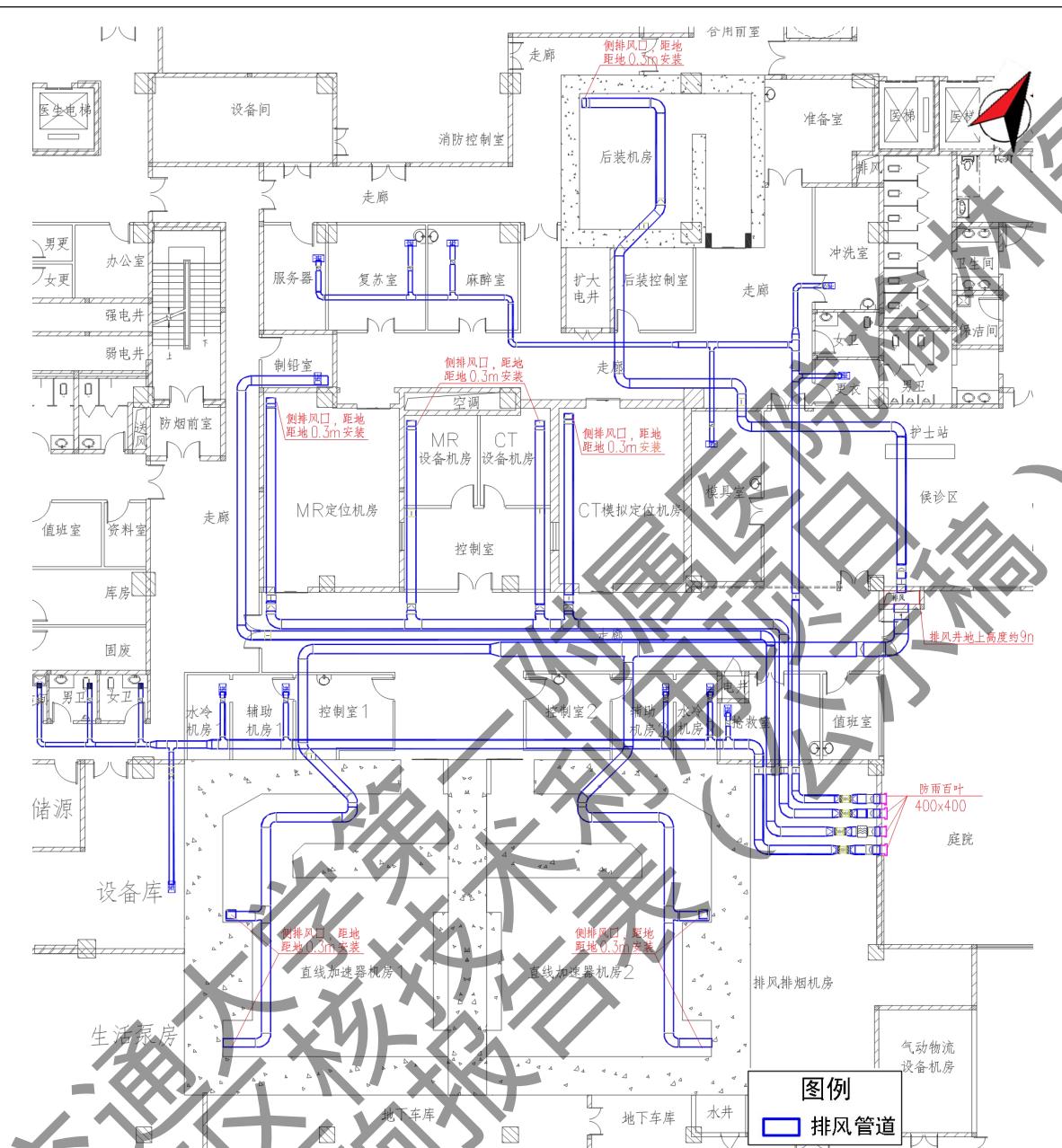


图 10-17 放疗科排风管道路径图

#### 10.1.2.6 其他辐射安全与防护措施

##### (1) 后装机房和直线加速器机房

①标志和指示灯：拟在放疗工作场所入口处设置电离辐射警告标志，在机房防护门上设置醒目且符合GB18871规定的电离辐射警告标志、工作状态指示灯，保证加速器运行时，状态指示灯正常工作。在后装机贮源器外表面设置电离辐射标志和中文警示说明。

②实时摄像监控和对讲系统：拟在两间直线加速器机房和后装机房内，迷路内设摄像监视系统，监视系统显示屏设置在控制室内，使控制室的工作人员可清楚地

观察到机房内加速器和后装机的工作情况，如发生意外情况可及时处理。拟在治疗床附近、控制台安装对讲系统，方便控制室与机房内人员联系，若发生紧急情况，可通过对讲系统及时告知控制室工作人员，避免接受不必要的辐照。

③固定式剂量警报装置：在两间直线加速器机房和后装机房迷道内入口处设置固定式剂量报警装置，显示屏拟设置于控制室内，对监测点进行实时剂量率/累计剂量监测和报警。实时剂量率/累计剂量监测值同时显示在主机面板上，实时剂量率/累计剂量的“报警阈值”可通过面板上的按键进行修改。仪器有声光报警，以警示现场工作人员，确保工作人员安全。

④联锁装置、断电自动回源措施：两间直线加速器机房和后装机房防护门上方设有工作状态指示灯与加速器、后装机联锁，机房门关闭后，装置才能启动，装置启动时工作状态指示灯亮起。加速器治疗过程中一旦防护门意外打开，联锁装置即切断加速器的出束开关，使加速器不能正常出束或立即停止出束。后装机治疗过程中一旦防护门意外打开，系统将自动收回放射源至储源位置。

⑤紧急开门装置和防夹装置：两间直线加速器机房和后装机房防护门内侧拟设置从室内开门的按钮（紧急开门装置），在停电或电动门故障时使用，保障加速器机房、后装机房内工作人员及患者安全。防护门拟设置红外防夹装置。

⑥急停开关：在两间直线加速器机房四周屏蔽墙面、防护门内旁侧、迷路内墙、加速器设备表面人员易触及位置、控制台拟安装急停开关，并设置明显的标志，供应急停机使用。后装机房在控制台、后装机设备表面人员易触及位置、防护门内旁侧、迷路内墙以及机房内四周墙面各设置一个急停开关。一旦人员误入或遇其他紧急情况，按“急停开关”，强迫加速器断电停止出束、后装机断电放射源回到储源器，事故处理完毕后，人工就地复位并通过控制台才能重新启动放射治疗装置。

⑦应急装备：拟在后装机房内配备1个应急贮源容器和长柄镊子等应急工具，日常放置于后装机房内。拟配备的应急贮源器应满足《后装 $\gamma$ 源近距离治疗质量控制检测规范》（WS262-2017）中表1的指标要求，“贮源器表面（5cm、100cm）泄辐射所致周围剂量当量率5cm（50 $\mu$ Sv/h），100cm（5 $\mu$ Sv/h）”。因目前医院尚未采购应急贮源器，为了满足5cm（50 $\mu$ Sv/h），100cm（5 $\mu$ Sv/h）要求，应购置铅当量大于65mmPb的应急贮源器。

⑧放射源在线监控系统：对后装机房使用的放射源建立放射源在线监控系统（数

值监控），并与陕西省核与辐射安全监督站联网。

## （2）CT模拟定位机房

CT 模拟定位机房拟采取以下安全与防护措施：

①CT 模拟定位机房室受检者门和工作人员防护门外设置电离辐射警告标志，防护门上方设置醒目的工作状态指示灯，指示灯的灯箱上设置“射线有害，灯亮勿入”的警示语句。指示灯与患者进出防护门有效联动。

②候诊区设置放射防护注意事项告知栏。

③受检者门设置为感应式电动推拉门，并设置红外防夹装置。

④机房设置观察窗和摄像监控装置，操作人员通过观察窗和摄像监控装置观察机房内工作人员及患者状态；CT 模拟定位机的安放应利于操作者观察受检者。

⑤机房内设置有动力通风装置，设备运行时应打开以保持良好的通风。

⑥机房和操作间内设急停按钮，并设置明显的标志，供应急停机使用。

⑦放射工作人员正确佩戴个人剂量计。机房内应为受检者配备铅当量不小于  $0.5\text{mmPb}$  的铅橡胶性腺防护围脖（方形）或方巾、铅当量不小于  $0.25\text{mmPb}$  的铅橡胶颈套、 $0.25\text{mmPb}$  的铅橡胶帽子（选配）等个人防护用品，以避免病人受到不必要的照射。

本项目后装机房、直线加速器机房和CT模拟定位机房的辐射安全防护设施安装位置见图10-18。

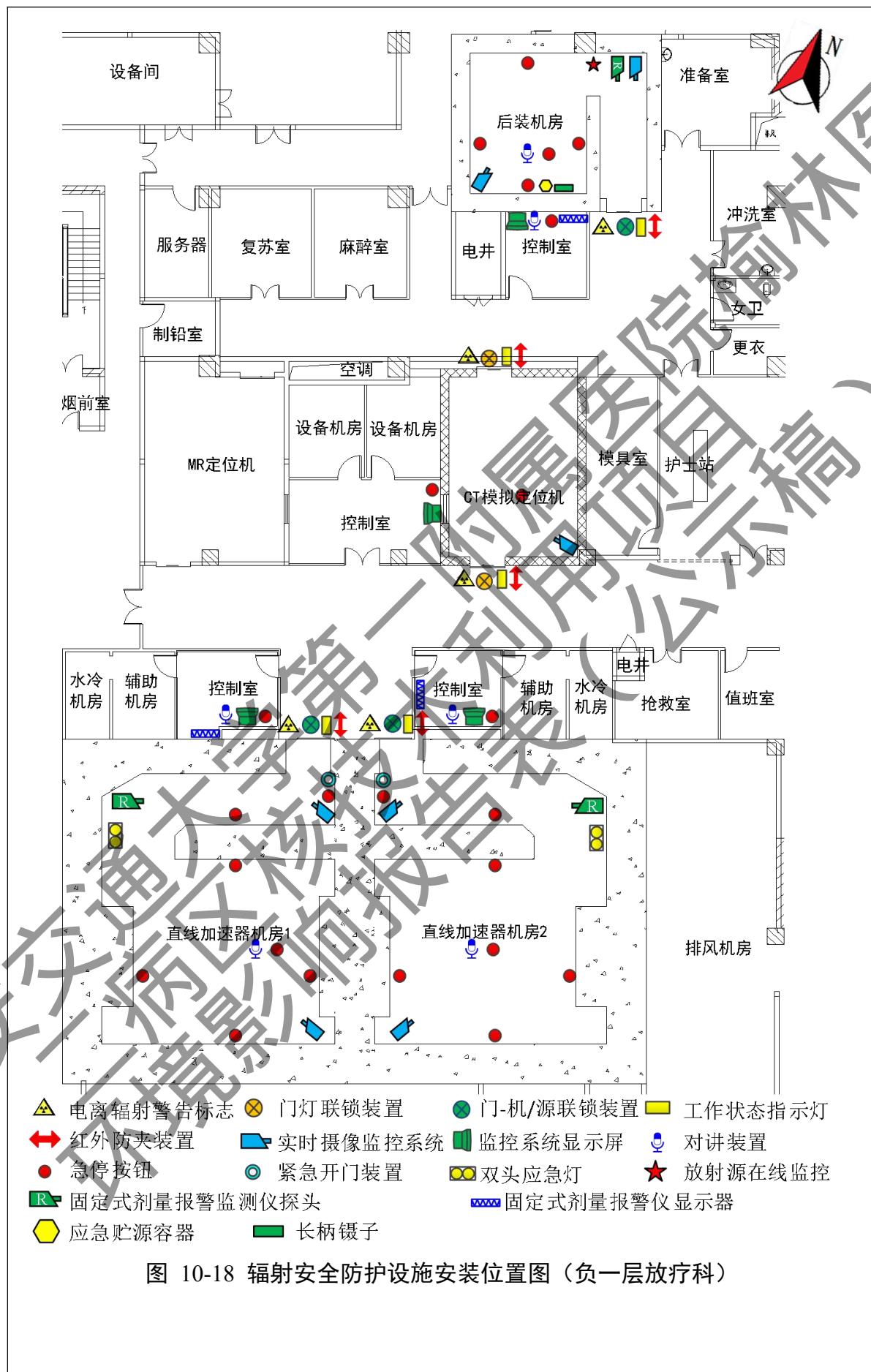


图 10-18 辐射安全防护设施安装位置图（负一层放疗科）

### (3) 其他防护措施

①依托现有的1台便携式X- $\gamma$ 剂量率监测仪，辐射工作人员应定期对项目工作场所及周围辐射水平进行监测，发现异常立即报告负责人，并采取有效措施妥善处理。建立监测数据档案。

②为本项目辐射工作人员配备个人剂量计和个人剂量报警仪（根据辐射工作人员数量配备）。

③控制室内张贴相应的辐射工作制度、操作规程、岗位职责等。

#### 10.1.2.7 防护和安全措施评价

放疗科后装机房和直线加速器机房拟采取的安全防护措施/设施与《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）标准要求的符合情况见表10-11，与《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）标准要求的符合情况见表10-12，CT模拟定位机房拟采取的安全防护措施/设施与《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）标准要求的符合情况见表10-13。

表 10-11 后装机房和直线加速器机房拟采取的安全防护措施和设施

与 HJ 1198-2021 符合情况表

序号	安全防护设施和措施	《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）标准要求	拟采取的安全防护措施和设施		是否符合	
			后装机房	直线加速器机房		
1	标志和指示灯	6.2.1 放射治疗工作场所，应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等：	a) 放射治疗工作场所的入口处应设置电离辐射警告标志，贮源容器外表面应设置电离辐射标志和中文警示说明；  b) 放射治疗工作场所控制区进出口及其他适当位置应设电离辐射警告标志和工作状态指示灯；  c) 控制室应设有在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统。	拟在后装机工作场所入口处设置电离辐射警告标志；贮源容器外表面设置电离辐射标志和中文警示说明；  拟在后装机房防护门上设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯；  拟在后装机房内、迷道转角处安装摄像监控系统，监视屏设在控制室内，使控制室的工作人员	拟在加速器工作场所入口处设置电离辐射警告标志；  拟在两间直线加速器机房防护门上设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯；  拟在两间直线加速器机房内、迷道转角安装摄像监控系统，监视屏设在控制室内，使控制室的工作人员通过监	符合
2	视频监控、对讲交流系统				符合	

				通过监视系统能够对治疗室及迷道内的状况进行实时监控；拟在治疗床附近、控制台安装对讲系统，通过对讲系统可实现与患者双向交流。	视系统能够对治疗室及迷道内的状况进行实时监控；拟在治疗床附近、控制台安装对讲系统，通过对讲系统可实现与患者双向交流。	
3	监测报警装置	6.2.2 质子/重离子加速器大厅和治疗室内、含放射源的放射治疗室、医用电子直线加速器治疗室（一般在迷道的内入口处）应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内或机房门附近。		拟在后装机房迷道内入口处设置固定式剂量报警仪，剂量报警显示仪表拟设置于后装机房的控制室内。	拟在两间直线加速器机房迷道内入口处设置固定式剂量报警仪，剂量报警显示仪表拟设置于加速器机房的控制室内。	符合
	联锁装置、断电自动回源措施	6.2.3 放射治疗相关的辐射工作场所，应设置防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全联锁措施：	a) 放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置门—机/源联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束/出源照射，出束/出源状态下开门停止出束或放射源回到治疗设备的安全位置。含放射源的治疗设备应设有断电自动回源措施；	拟对后装机房防护门与后装机设置联锁，机房门未关闭状态下不能启动后装机；后装机自带断电自动回源装置，设备断电后，放射源自动返回储源器。	拟对两间直线加速器机房防护门与加速器设置联锁，机房门未关闭状态下不能启动加速器。	符合
4	紧急开门装置和防夹装置		b) 放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置室内紧急开门装置，防护门应设置防夹伤功能；	拟在后装机房防护门内侧设置紧急开门装置，防护门设置红外防夹装置。	拟在两间直线加速器机房防护门内侧设置紧急开门装置，防护门设置红外防夹装置。	符合
	急停按钮		c) 应在放射治疗设备的控制室/台、治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁、质子/重离子加速器大厅和束流输运通道内设置急停按钮；急停按钮应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。	拟在控制台、后装机设备表面人员易触及位置、防护门内旁侧、迷路内墙以及后装机房内四周墙面设置急停按钮，急停按钮设置醒目标识和文字且便于触发。	拟在两间直线加速器机房四周墙面、防护门内旁侧、迷路内墙、加速器设备表面人员易触及位置、控制台设置急停按钮，急停按钮设置醒目标识和文字且便于触发。	符合

5	应急贮源容器、长柄镊子	6.2.4 后装治疗室内应配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具	为后装机房配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具。	/	符合
---	-------------	------------------------------------	-----------------------------	---	----

表 10-12 后装机房和直线加速器机房拟采取的安全防护措施和设施

与 GBZ121-2020 符合情况

序号	安全防护设施和措施	《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020) 标准要求	拟采取的安全防护措施和设施		是否符合
			后装机房	直线加速器机房	
1	监测报警装置	6.4.1 含放射源的放射治疗机房内应安装固定式剂量监测报警装置, 应确保其报警功能正常。	拟在后装机房迷道内入口处设置固定式剂量报警仪, 剂量报警显示仪表拟设置于后装机房的控制室内。	拟在两间直线加速器机房迷道内入口处设置固定式剂量报警仪, 剂量报警显示仪表设置于加速器机房的控制室内。	符合
2	联锁装置	6.4.2 放射治疗设备都应安装门机联锁装置或设施, 治疗机房应有从室内开启治疗机房门的装置, 防护门应有防挤压功能。	后装机房防护门与后装机设置联锁, 机房门未关闭状态下不能启动后装机; 后装机房防护门内侧拟设置紧急开门装置, 防护门拟设置红外防夹装置。	两间直线加速器机房防护门与加速器设备设置联锁, 机房门未关闭状态下不能启动加速器; 两间直线加速器机房防护门内侧拟设置紧急开门装置, 防护门拟设置红外防夹装置。	符合
3	标志和指示灯	6.4.3 应当对下列放射治疗设备和场所设置醒目的警告标志: a) 放疗工作场所的入口处, 设有电离辐射警告标志; b) 放疗工作场所应在控制区进出口及其他适当位置, 设有电离辐射警告标志和工作状态指示灯。	拟在后装机工作场所入口处设置电离辐射警告标志, 拟在后装机房防护门上设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯。	拟在加速器工作场所入口处设置电离辐射警告标志, 拟在两间直线加速器机房防护门上设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯。	符合
4	急停开关	6.4.4 放射治疗设备控制台上应设置急停开关, 放疗机房内的急停开关应能使机房内的人员从各	拟在控制台、后装机设备表面人员易触及位置、防护门内旁侧、迷路内	拟在两间直线加速器机房四周墙面、防护门内旁侧、迷路内墙、加速器设备表面	符合

			个方向均能观察到且便于触发。通常应在机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧和控制台等处设置。 放射源后装近距离治疗工作场所，应在控制台、后装机设备表面人员易触及位置以及治疗机房内墙面各设置一个急停开关。	墙以及后装机房内四周墙面设置急停按钮，急停按钮设置醒目标识和文字且便于触发。	人员易触及位置、控制台设置急停按钮，急停按钮设置醒目标识和文字且便于触发。	
5	应急储存设施	6.4.5	$\gamma$ 源后装治疗设施应配备应急储源器。	为后装机房配备合适的应急贮源容器。	/	符合
6	视频监控、对讲交流系统	6.4.6	控制室应设有在实施治疗过程中观察患者状态、治疗床和迷道区域情况的视频装置；还应设置对讲交流系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。	拟在后装机房内、迷道转角处安装摄像监控系统，监视屏设在控制室内，使控制室的工作人员通过监视系统能够对治疗室及迷道内的状况进行实时监控；拟在治疗床附近、控制台安装对讲系统，通过对讲系统可实现与患者双向交流。	拟在两间直线加速器机房内、迷道转角安装摄像监控系统，监视屏设在控制室内，使控制室的工作人员通过监视系统能够对治疗室及迷道内的状况进行实时监控；拟在治疗床附近、控制台安装对讲系统，通过对讲系统可实现与患者双向交流。	符合

表 10-13 CT 模拟定位机房拟采取的安全防护措施和设施

与 GBZ130-2020 符合情况表

序号	安全防护设施和措施	《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020) 标准要求	CT 模拟定位机房拟采取的安全防护措施和设施	是否符合
1	观察窗或摄像监控装置	6.4.1 机房应设有观察窗或摄像监控装置，其设置的位置应便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。	本项目机房与控制室之间设有观察窗和摄像监控装置，工作人员能够方便的观察到患者状态及防护门开闭情况。	符合
2	不堆放杂物	6.4.2 机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。	项目机房内不堆放与诊断工作无关的杂物。	符合

3	动力通风装置	6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。	机房内设置动力通风装置，设备运行时打开，机房内能保持良好的通风。	符合
4	标志和指示灯、可视警示语句、注意事项	6.4.4 机房门外应有电离辐射警告标志；机房门上方应有醒目的工作状态指示灯，灯箱上应设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句；候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。	项目在 CT 模拟定位机房防护门上设置“当心电离辐射”警示牌和工作状态指示灯，灯箱上设置可视警示语句，候诊区设置放射防护注意事项告知栏。	符合
5	自动闭门装置、门机、门灯联锁装置	6.4.5 平开机房门应有自动闭门装置；推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施；工作状态指示灯能与机房门有效关联。	机房设置两扇患者防护门，均为电动推拉门，拟设置门机联锁装置，工作状态指示灯与机房门设置门灯联锁。	符合
6	防夹装置	6.4.6 电动推拉门宜设置防夹装置	患者防护门为电动推拉门，拟设置红外防夹装置。	符合
7	/	6.4.7 受检者不应在机房内候诊；非特殊情况，检查过程中陪检者不应滞留在机房内。	项目拟设置候诊区，位于机房外部。	符合
8	/	6.4.8 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。	项目 CT 模拟定位机房防护设施拟按照 CT 机房设置。	符合

### 10.1.3 DSA 手术室

#### 10.1.3.1 布局合理性分析

项目拟在肿瘤科研楼三层建设1间DSA手术室及操作间、设备间等配套用房，配备1台DSA，用于放射介入诊疗。手术区内一般出现的人员较少，主要为操作间和手术室的医务人员与需要手术的患者。根据医院提供的设计图纸，DSA手术室的机房设计有效使用面积和最小单边长度见表10-14。

表 10-14 DSA 手术室设计建设规模情况表

机房	机房建设规模
DSA手术室	东西长7.1m，南北宽11.5m，有效使用面积81.6m <sup>2</sup>

项目DSA手术室设计的有效使用面积和最小单边长度均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“机房内最小有效使用面积20m<sup>2</sup>，机房内最小单边长度3.5m”的要求。

#### 10.1.3.2 辐射工作场所分区

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中相关要求，将DSA手术室屏蔽体内范围划为

控制区，将DSA手术室周围需要对职业照射进行控制的操作间和设备间划为监督区。

DSA手术室区管理情况见图10-19。

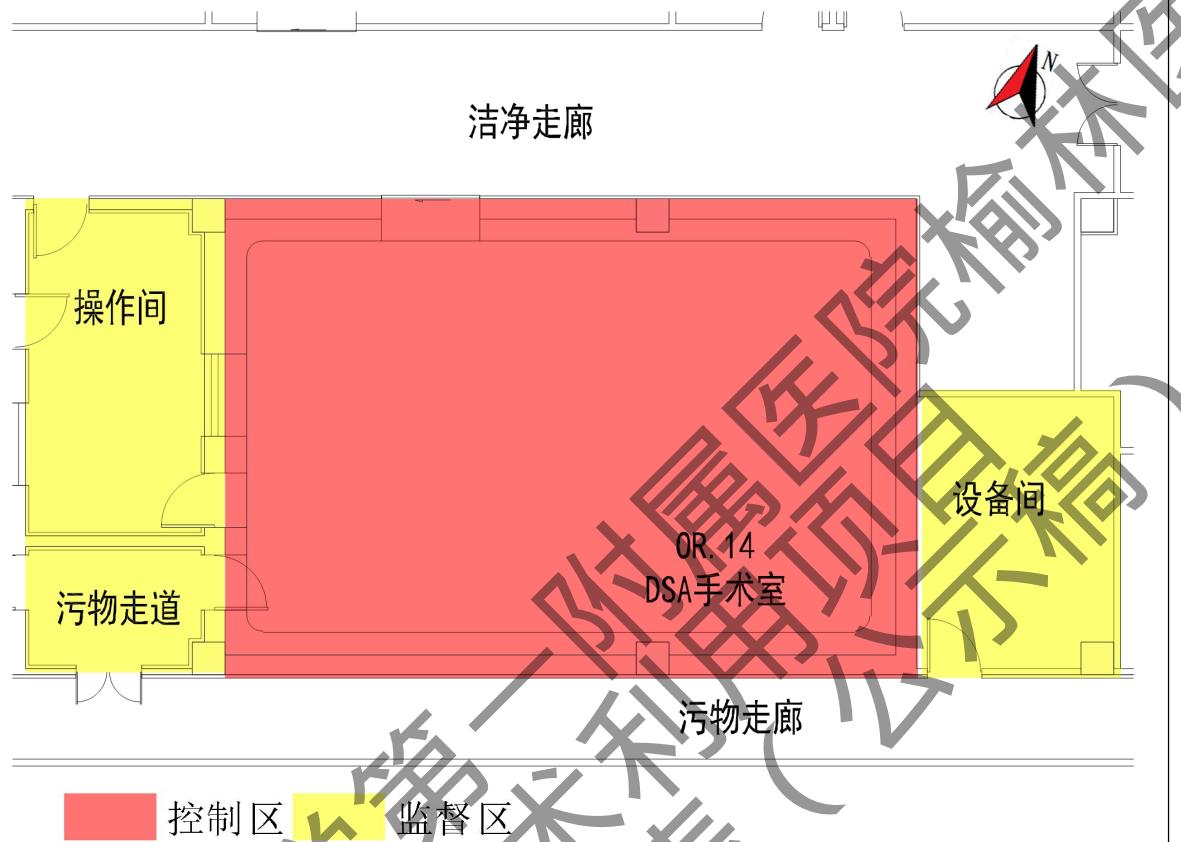


图 10-19 DSA手术室分区管理示意图

### 10.1.3.3 辐射防护屏蔽设计

#### (1) 设备固有的主动防护技术

本项目拟配备的DSA机应配备但不限于以下先进的主动防护技术：

- ①在手术室内具备工作人员在不变换操作位置情况下能成功切换透视和采集功能的控制键。
- ②X射线设备配备有能阻止使用焦皮距小于20cm的装置。
- ③透视曝光开关为常断式开关，并配有透视计时及限时报警装置。
- ④介入操作中，设备控制台和手术室内显示器上能显示当前受检者的辐射剂量测定指示和多次曝光记录。

#### (2) 工作场所辐射屏蔽设计

根据医院提供的设计图纸，项目DSA手术室的辐射防护屏蔽措施具体参数详见表10-10。在125kV下的等效铅当量计算根据GBZ130-2020附录C公式C.1和C.2，其中 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 取值自GBZ130-2020。

$$B = \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha\gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (10-1)$$

$$X = \frac{1}{\alpha\gamma} \ln \left( \frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right) \quad (10-2)$$

表 10-15 X射线辐射衰减的有关的拟合参数

电压	材料	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
125kV	砖	0.02870	0.06700	1.346
	混凝土	0.03502	0.07113	0.6974
	铅	2.219	7.923	0.5386

注：表中 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 取值自GBZ130-2020，DSA参数取值为125kV主束状态下拟合参数。

①计算得管电压 125kV 下 150mm 混凝土等效铅当量约为 1.87mmPb。

②根据《辐射防护手册 第三分册》第 65 页表 3.3，在管电压 150kV 条件下，51mm 钙水泥（3.2g/cm<sup>3</sup>）等效 3mmPb。保守考虑本项目 125kV 下，55mm 硫酸钡涂料等效 3mmPb。

表 10-16 项目 DSA 手术室的辐射防护屏蔽参数一览表

机房	位置	拟采取的屏蔽措施	等效铅当量	标准要求	符合性
DSA 手术室	四周墙体	4mm铅板	4mmPb	2.0mmPb	达标
	屋顶/地面	150mm混凝土楼板+55mm硫酸钡涂料	4.87mmPb		
	患者门、工作人员门、污物门	4mmPb单开门	4mmPb		
	观察窗	4mmPb铅玻璃	4mmPb		

注：项目所用硫酸钡密度为3.2g/cm<sup>3</sup>。

由表10-15可知，项目DSA手术室四周墙体、屋顶、地板及各防护门窗的等效铅当量为4~4.87mmPb，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“介入X射线设备机房有用线束方向2mmPb，非有用线束方向2mmPb”的要求。

#### 10.1.3.4 安全与防护措施

项目DSA手术室拟采取以下安全与防护措施：

①患者门为电动推拉门，张贴电离辐射警告标志，设置工作状态指示灯并建立门灯联锁，设置红外防夹装置；

②工作人员门和污物门为手动平开门，张贴电离辐射警告标志，设置自动闭门

装置：

- ③项目设有观察窗，操作人员通过观察窗观察手术室内工作人员及患者状态；
- ④DSA治疗床侧和控制台上设置急停按钮，供紧急停机使用。
- ⑤手术室设置了动力通风装置，手术室内射线装置产生的臭氧和氮氧化物等废气经排风管道向上引至四层净化机房，最终由风井引至四层上方屋顶排放至大气，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）“机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风”要求。

DSA手术室辐射防护设施安装位置示意图见图10-20。

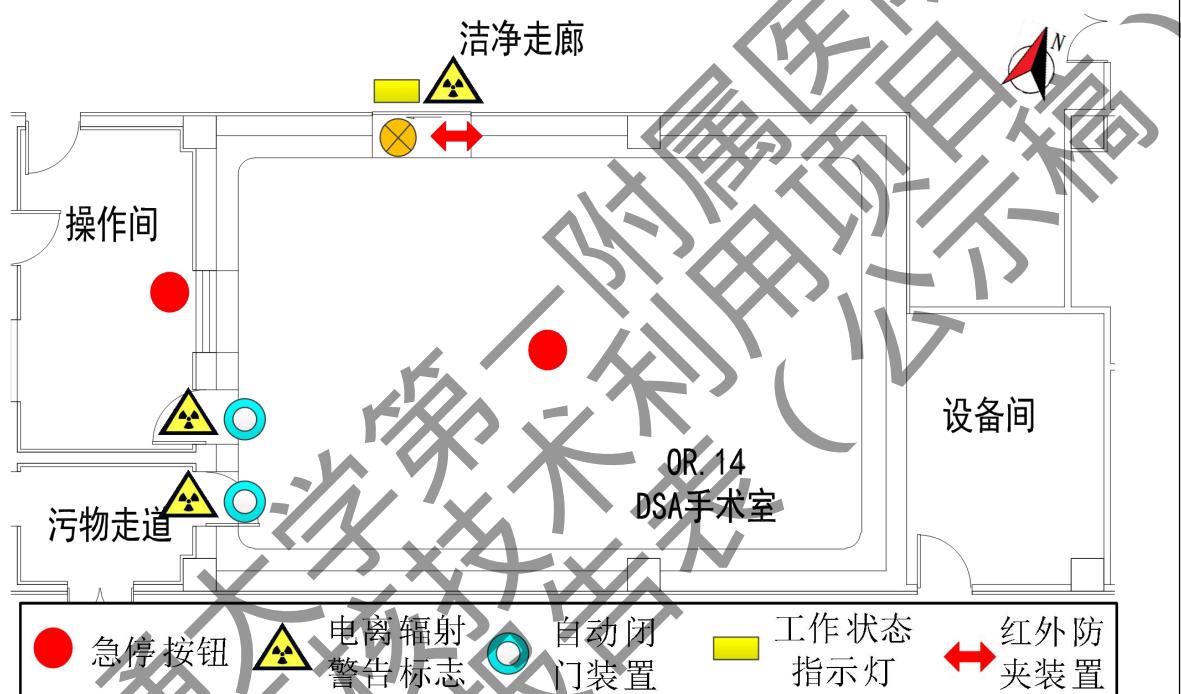


图 10-20 DSA手术室辐射防护设施安装位置示意图

⑦手术室内布局合理，尽量避免了有用线束直接照射门、窗和管线口（包括线缆沟、通风管道等）位置和工作人员操作位。手术室内不堆放与诊断工作无关的杂物。

⑧DSA手术室将配备一台X- $\gamma$ 辐射防护监测仪，定期巡检并建立自行监测数据档案。

⑨辐射工作人员正确佩戴个人剂量计。手术室内可选配铅当量不小于0.5mmPb的铅悬挂防护屏、0.5mmPb铅防护吊帘、0.5mmPb床侧防护帘、0.5mmPb床侧防护屏、2mmPb移动铅防护屏风等辅助防护设施。为放射工作人员配备铅当量不小于0.5mmPb的铅橡胶围裙、0.5mmPb的铅橡胶颈套、0.025mmPb介入防护手套、

0.25mmPb铅防护眼镜、0.25mmPb铅橡胶帽子等个人防护用品。对病人病灶进行照射时，将病人病灶以外的部位用防护用品（其中儿童铅当量不小于0.5mmPb）进行遮盖，以避免病人受到不必要的照射。

项目DSA手术室配备的个人防护用品和辅助防护设施要求见表10-17。

表 10-17 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	
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施
介入放射学操作	铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套 选配：铅橡胶帽子	铅悬挂防护屏/铅防护吊帘/床侧防护屏/床侧防护帘 选配：移动铅防护屏风	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套、 选配：铅橡胶帽子	不需要

注：成人和儿童患者或受检者的个人防护用品各1套。

## 10.2 “三废”治理

### 10.2.1 核医学科

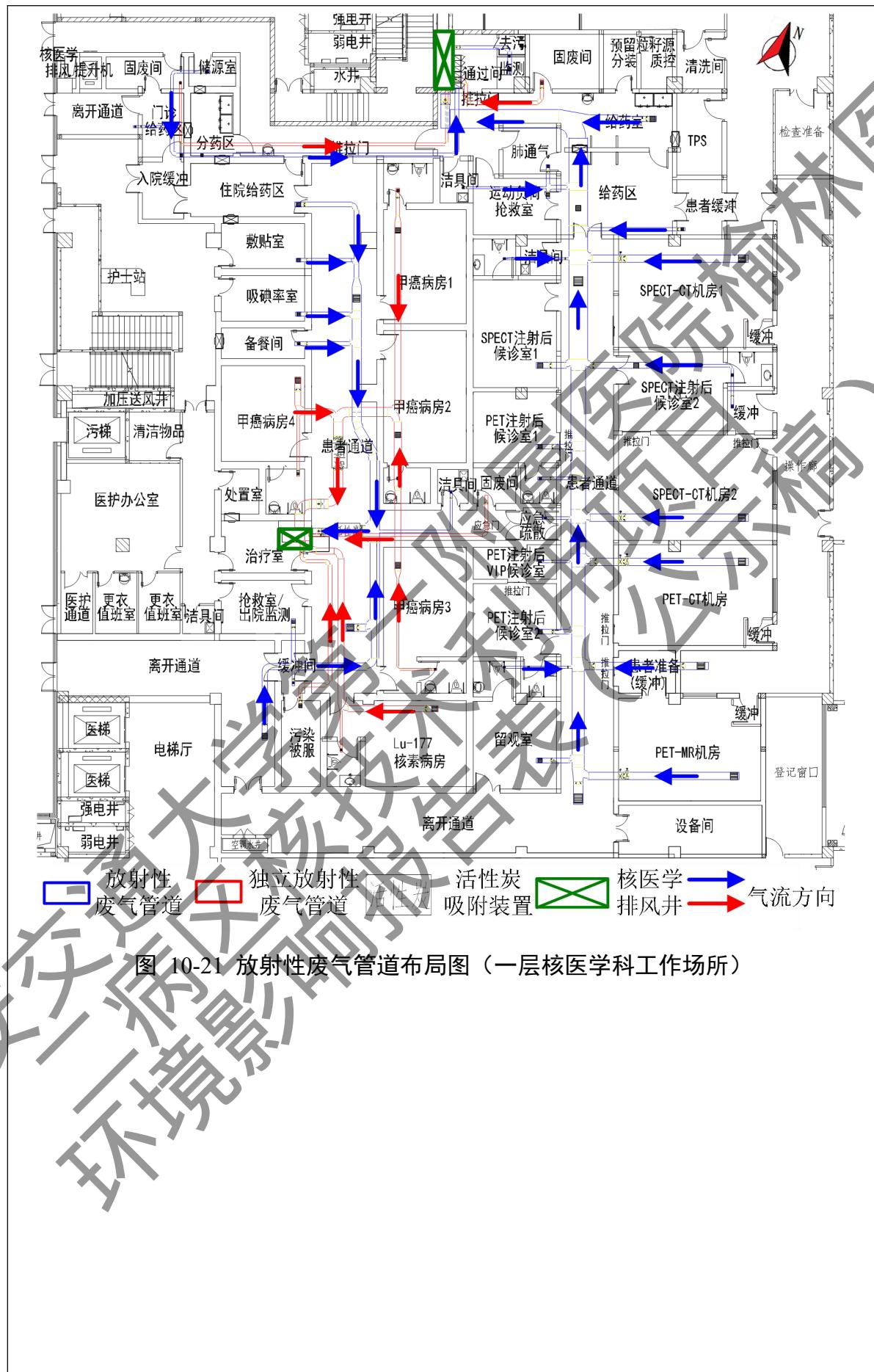
#### 10.2.1.1 放射性废气

本项目设置了独立的排风系统，核医学科工作场所产生的放射性废气通过排风系统收集排放。

核医学科设置独立于常规排风的放射性废气排风管道，管道各风口设置止回阀避免放射性废气倒灌。其中，一层核素病房、固废间，负一层回旋加速器、自动合成仪、淋洗手套箱等按要求单独设置了通风管道。

各工作场所的放射性废气经4个风井分别引至肿瘤科研楼十四层屋顶排放，屋顶对应设置4套排风机和活性炭处理设施，住院治疗区域放射性废气管道在本层进入风井前和屋顶层离开风井后分别经过活性炭处理设施，设置4个放射性废气排放口，排放口高出屋面约3.3m（距地面65.7m），方向竖直向上，未朝向人员密集区域。

一层核医学科工作场所放射性废气管道布局见图10-21，一层核医学科手套箱、自动分装仪等设备放射性废气管道布局见图10-22，负一层核医学科放射性废气管道布局见图10-23。排放口位置见图10-24。





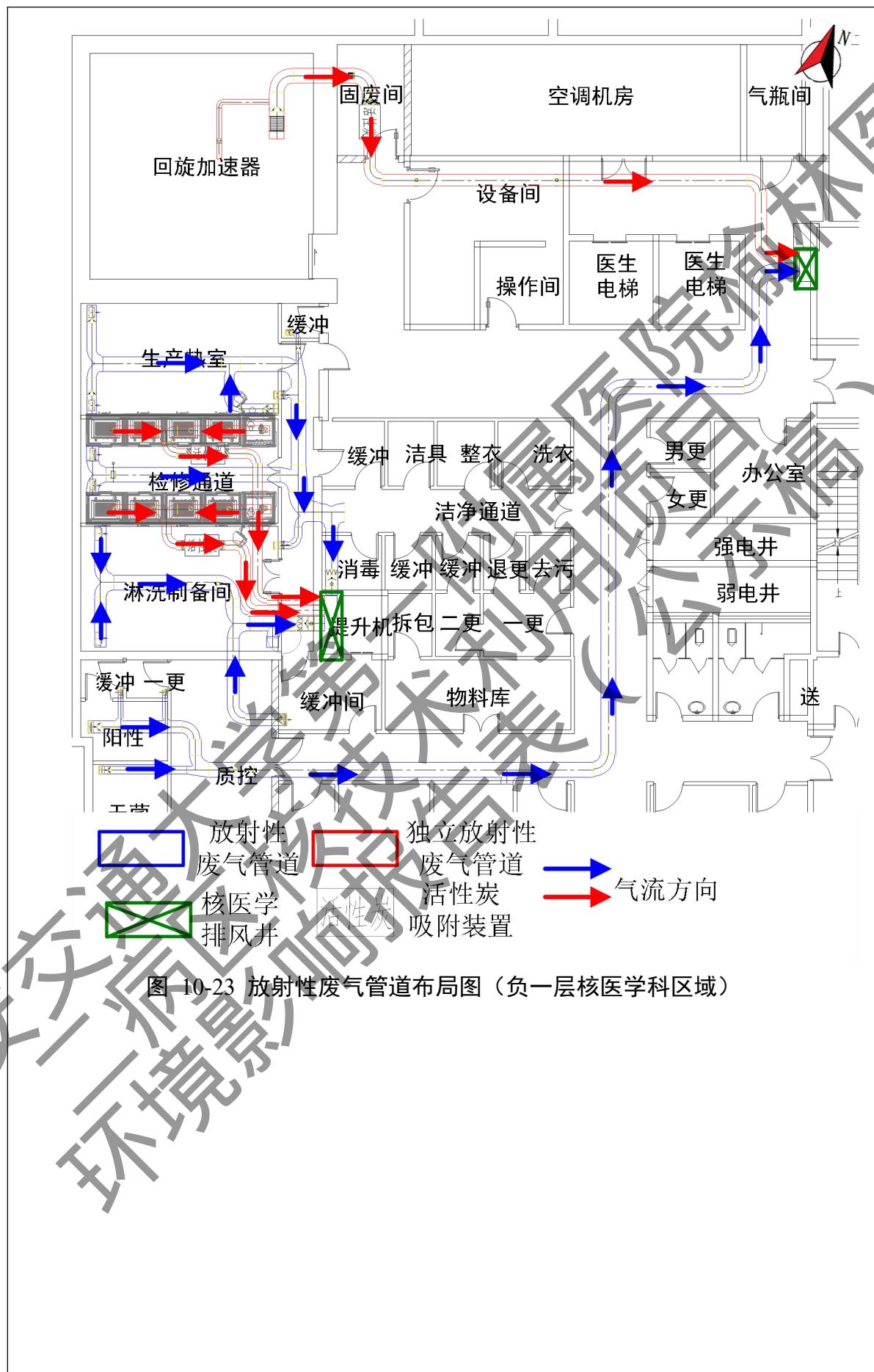
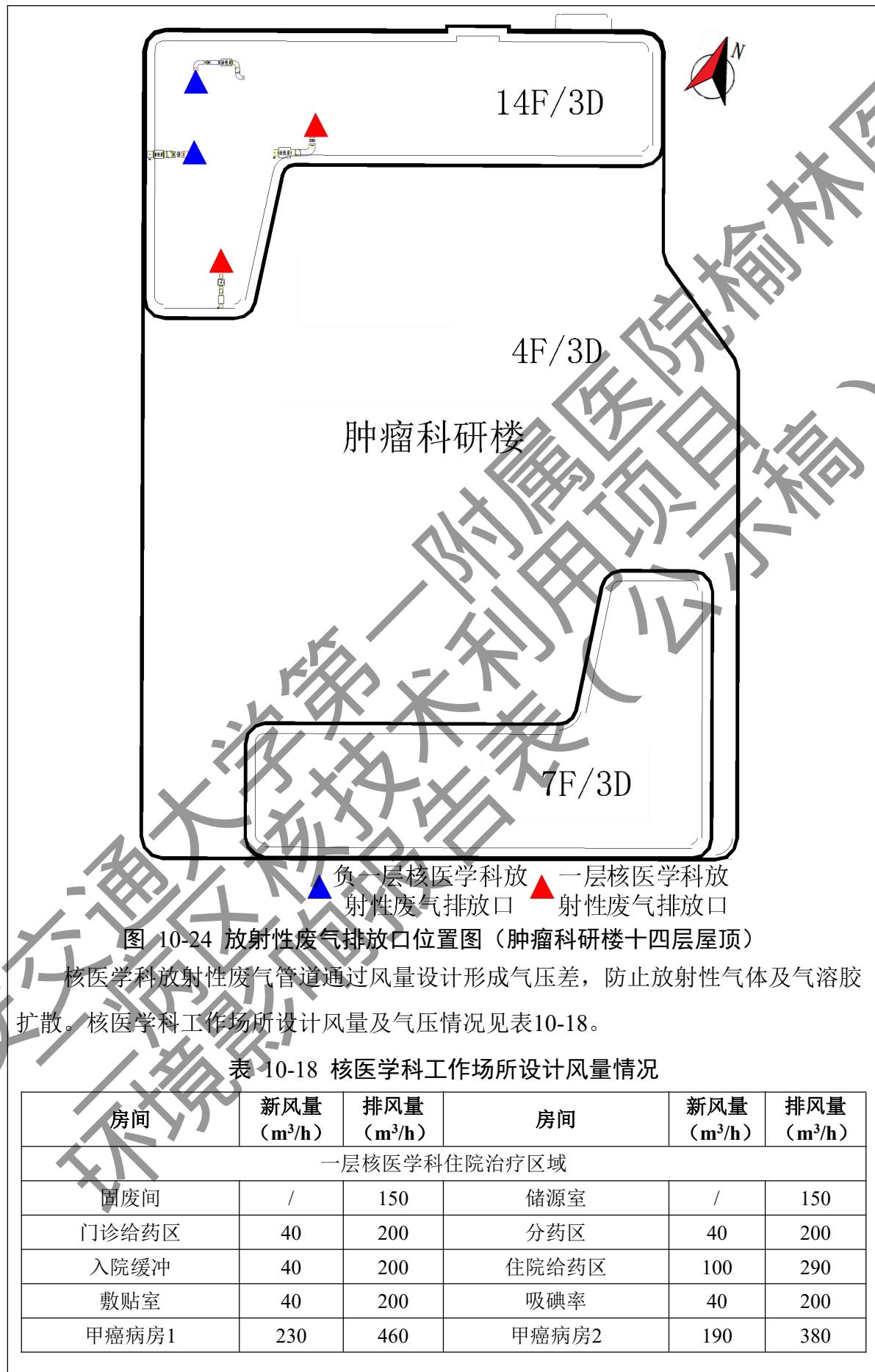


图 10-23 放射性废气管道布局图（负一层核医学科区域）



甲癌病房3	260	520	甲癌病房4	240	480
备餐间	40	200	出院检测/抢救室	70	220
<sup>177</sup> Lu病房	300	570	污染被服库	/	160
出院缓冲间	40	200	—	—	—
一层核医学科门诊诊疗区域					
固废间	/	200	通过间	40	200
患者缓冲	40	200	肺通气	40	200
运动负荷/抢救室	70	230	给药准备	300	580
SPECT注射后候诊室1	210	430	SPECT注射后候诊室2	200	390
SPECT-CT机房1	500	790	SPECT-CT机房2	500	770
PET注射后候诊室1	150	300	PET注射后候诊室2	150	300
PET注射后VIP候诊室	40	200	留观室	200	350
PET-CT机房	490	740	PET-MR机房	490	740

综上所述，本项目核医学科工作场所设置了独立的放射性废气管道，核素病房、固废间及回旋加速器、手套箱、自动合成仪、淋洗柜等密闭设备单独设置通风管道和活性炭处理装置。核医学科通过通风风量设计，在不同区域间形成了气压梯度，从而防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。放射性废气引至十四层楼顶排放，排放口高于十四层屋面约2.7m高空排放，排放口周边无高层建筑。

放射性废气处理设施设计满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中相关要求。

### 10.2.1.2 放射性废水

#### (1) 放射性废水收集

本项目在核医学科工作场所设置了放射性废水管道系统，用于分类收集核医学科各场所产生的放射性废水。

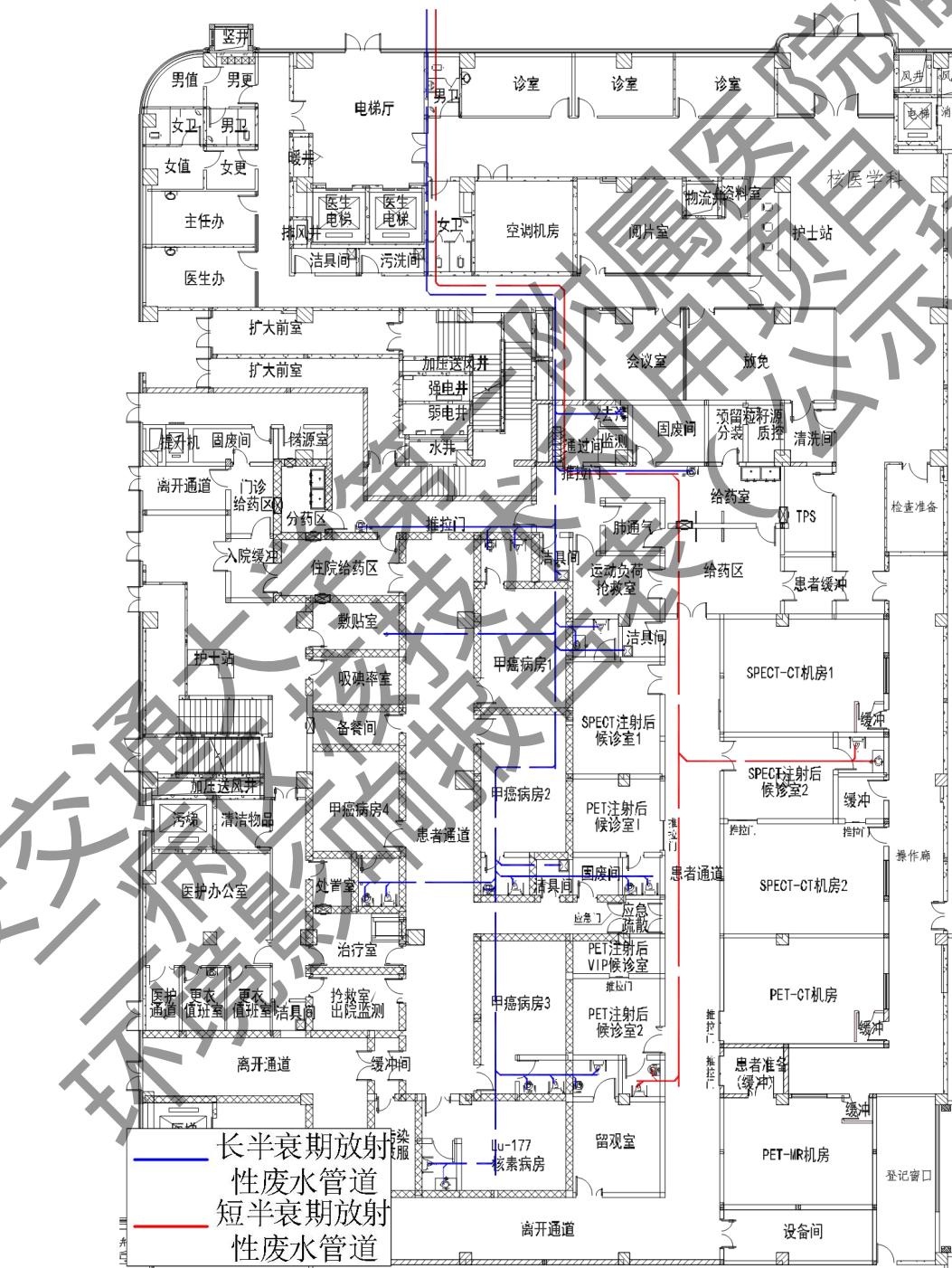
负一层仅产生短半衰期放射性废水，负一层质控废水、回旋加速器检修及事故废水等半衰期小于24h的放射性废水由短半衰期放射性废水管道收集后，经污水立管重力自流至负二层污水预处理及提升间的集水坑内，由提升设备提升至一层地面高度，向北自流至室外地下管道，最终流入衰变池。集水坑长宽均为1.2m，深度1.2m，四周砌筑240mm实心砖防护围堰，做防渗漏耐腐蚀处理，集水坑上方设置8mmPb防护盖板。

一层核医学科核素病房、PET注射后候诊室1，SPECT注射后候诊室2、洁具间等区域产生的半衰期大于24h的放射性废水由长半衰期放射性废水管道收集后，沿一层地面下方向北重力自流至室外地下管道，最终流入衰变池；PET注射后候诊室2，

SPECT注射后候诊室1等区域产生的半衰期小于24h的放射性废水由短半衰期放射性废水管道收集后沿一层地面下方向北重力自流至室外地下管道，最终流入衰变池。

放射性废水管道使用机制含铅管道，一层放射性废水主管道长约150m，负一层放射性废水主管道长约90m。室外管道长度约40m，最小埋深1.5m，管道设计坡度0.026。

一层核医学科放射性废水管道设置情况见图10-25，负一层核医学科放射性废水管道设置情况见图10-26。



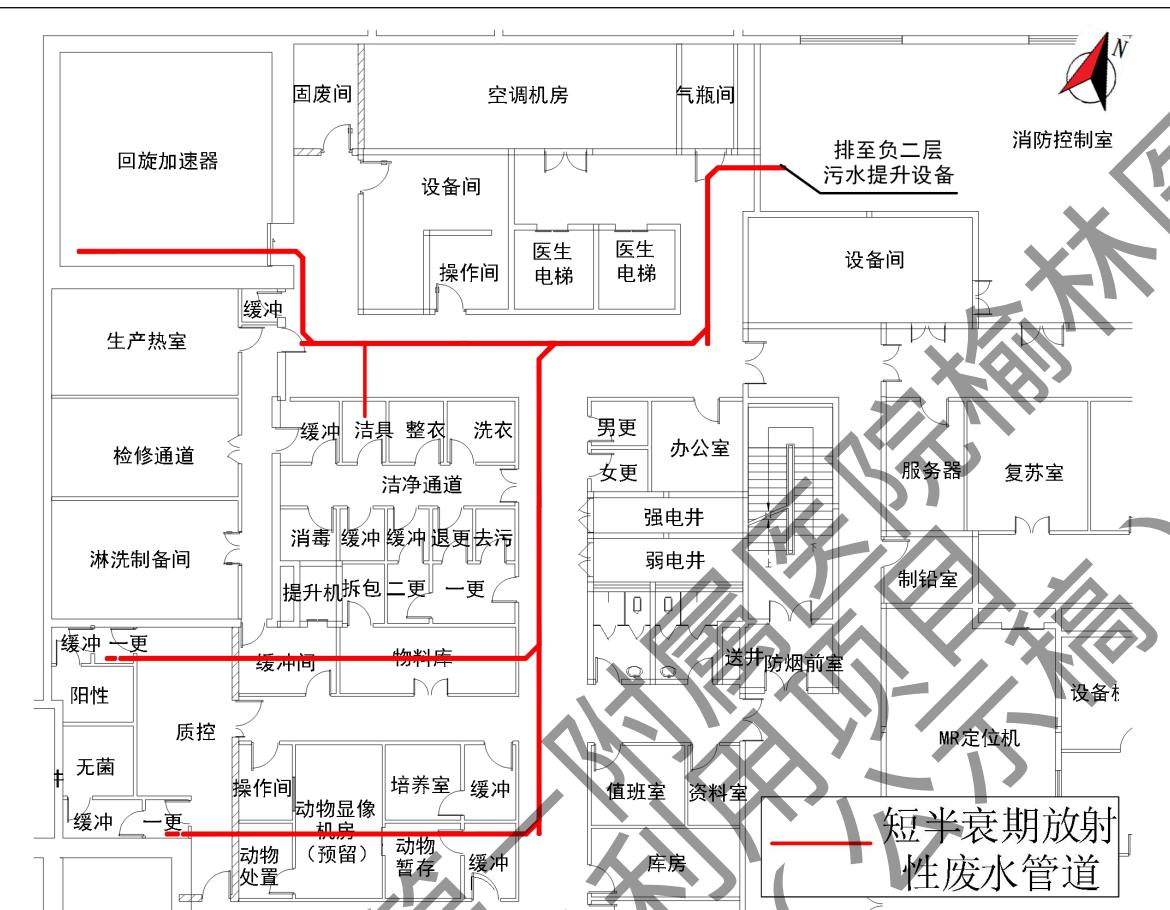


图 10-26 放射性废水管道示意图（肿瘤科研楼负一层核医学科）

## （2）放射性废水暂存处理

本项目在肿瘤科研楼北侧地下新建一座地理式放射性废水衰变池，用于暂存本项目核医学科产生的放射性废水。衰变池由长半衰期衰变池系统和短半衰期衰变池系统组成，分别收集暂存半衰期大于24h的放射性废水和半衰期小于24h的放射性废水。

长半衰期衰变池系统包括2个并联的化粪池（ $3.1m \times 1.7m \times 2.6m$ ，有效容积 $13.7m^3$ ）和6个并联的衰变池（ $7.0m \times 3.0m \times 2.6m$ ，有效容积 $54.6m^3$ ）；短半衰期衰变池系统包括2个并联的化粪池（ $3.1m \times 1.7m \times 2.6m$ ，有效容积 $13.7m^3$ ）和3个并联的衰变池（ $5.4m \times 3.0m \times 2.6m$ ，有效容积 $42.1m^3$ ）。衰变池末端设置1个取样池（ $2.0m \times 1.6m \times 2.6m$ ，有效容积 $8.32m^3$ ）和一个排出池（ $3.1m \times 1.6m \times 2.6m$ ，有效容积 $12.9m^3$ ）。

放射性废水首先进入化粪池，在化粪池中去除悬浮物后注入衰变池①。衰变池①中达到预定水位后，池中水位传感器发出信号，阀门自动控制放射性废水进入衰变池②，同时衰变池①开始衰变计时。首先开始衰变计时的池体在最后一个池体注满前排放清空。如需对衰变池排水进行取样监测，可控制采样系统从待检池体中抽

取水样至取样池，采样人员通过取样池上方竖井采样。

每套衰变池系统的2个化粪池交替运行，长半衰期化粪池至少封闭277天（10倍 $^{51}\text{Cr}$ 半衰期）后清掏，短半衰期化粪池至少封闭30天后清掏。化粪池清掏后轮换使用。

本项目衰变池平面布局见图10-27，衰变池剖面见图10-28。

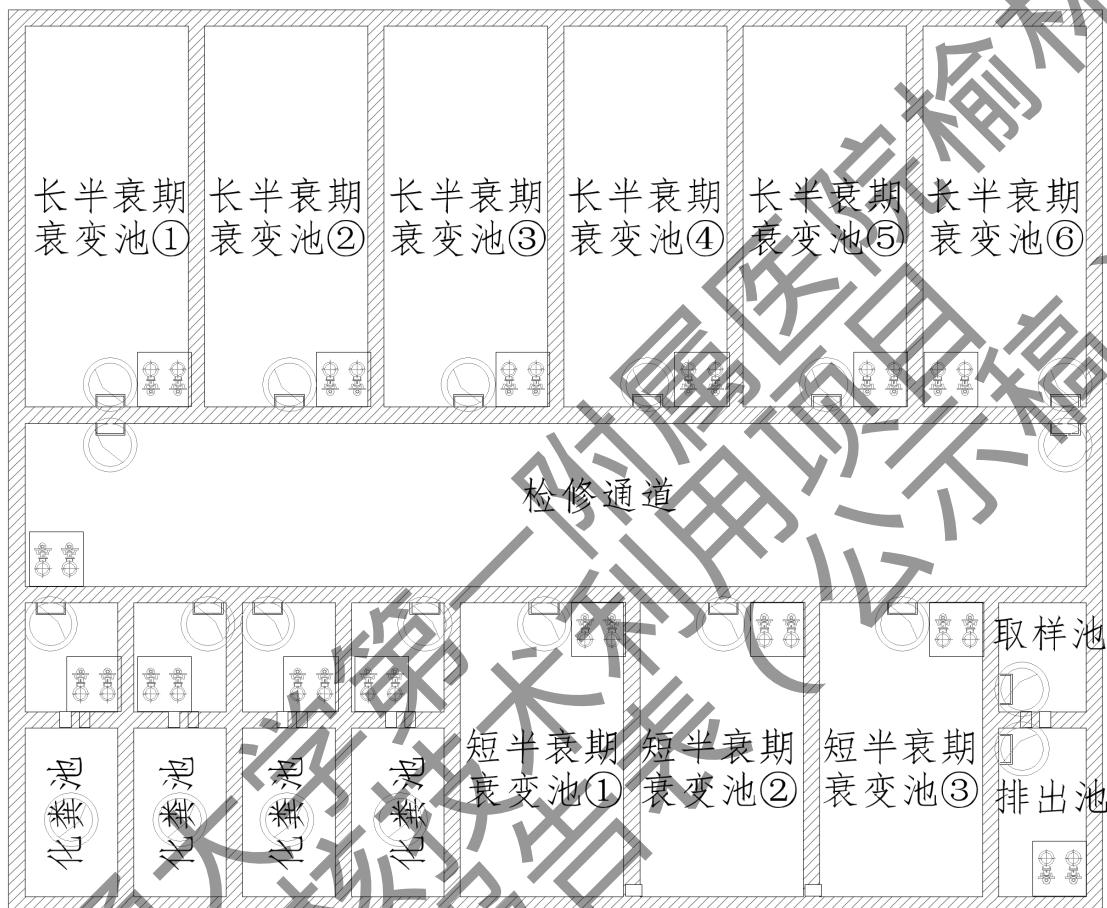


图 10-27 衰变池平面图

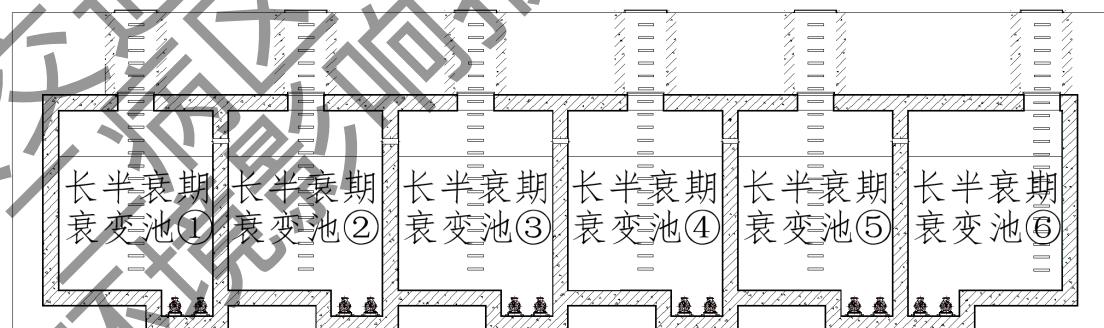


图 10-28 衰变池剖面图

根据表9-9的计算结果，本项目半衰期大于24的放射性废水产生量为 $0.966\text{m}^3/\text{d}$ ，单个长半衰期衰变池注满时间为 $54.6 \div 0.966 = 56.5\text{d}$ ，放射性废水暂存时间为其余5个池体注满时间之和，为 $56.5 \times 5 = 282.5\text{d}$ ；本项目半衰期小于24的放射性废水产生量为 $0.787\text{m}^3/\text{d}$ ，单个短半衰期衰变池注满时间为 $42.1 \div 0.787 = 53.5\text{d}$ ，放射性废水暂存时间

为其余2个池体注满时间之和，为 $53.5 \times 2 = 107$  d。

综上所述，本项目半衰期大于24的放射性废水暂存282.5天后排放，满足至少暂存277天（10倍 $^{51}\text{Cr}$ 半衰期）的要求，半衰期小于24的放射性废水暂存107天后排放，满足至少暂存30天的要求。因此本项目放射性废水处理设施处理能力能满足本项目放射性废水暂存处理的需要。

### 10.2.1.3 放射性固体废物

为减少核医学科放射性固体废物产生量，核医学科工作场所应尽量减少使用一次性物品，确需使用的一次性物品应尽可能轻便。住院患者配餐按量取食，鼓励少量多次，尽可能避免浪费。配餐时尽量避免带骨、带皮、带核的食材，尽可能减少放射性固体废物产生。

核医学科药物制备区域产生的放射性固体废物收集在各场所的铅污物桶中，每日工作结束后收集到对应场所的固废间暂存。

负一层核医学科产生的放射性固体废物送至负一层固废间暂存。

一层敷贴室、门诊给药区、住院给药区等场所产生的放射性固体废物送至西北角固废间暂存；一层核素病房产生的放射性固体废物送至南侧固废间暂存；一层门诊诊疗区域产生的放射性固体废物送至东北角固废间暂存。

放射性固体废物暂存时应记录产生时间、暂存期限、核素种类等信息，注射器、碎玻璃等应先装入利器盒。放射性固体废物每袋不超过20kg，包装并标记信息后检查包装无破漏后，放在固废间指定位置暂存。

一层核医学科东北角固废间同时暂存半衰期大于24h和半衰期小于24h的放射性固体废物，实际建设中可通过在暂存容器张贴标识或在地面划分区域等方式区分其暂存空间。

放射性固体废物满足暂存时间要求后，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， $\alpha$ 表面污染小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ ， $\beta$ 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对其清洁解控并作为医疗废物处理。

### 10.2.2 放疗科

#### (1) 废气

放疗科正常运行期间不产生放射性废气。

直线加速器和CT模拟定位机工作时产生的X射线和后装机工作时产生的 $\gamma$ 射线

与空气作用会产生极少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。上述机房内均设置有动力送排风装置，将臭氧和氮氧化物排放至机房外，有效降低其室内浓度。经计算，后装机房通风换气次数约为23次/h，两间直线加速器机房的通风换气次数均为13次/h。后装机房和两间直线加速器机房产生的臭氧和氮氧化物分别经排风管道汇入庭院的排风井排放，该风井为地上构筑物，地上高度约9m，周围无门、窗或人流较大的过道。满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中“8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于4次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置”。CT模拟定位机房满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风”。

因此本项目放疗科废气处理设施设计满足相关标准的要求。

## （2）废水

放疗科运行期间不产生放射性废水。直线加速器设备冷却水循环使用不外排。

## （3）固体废物

后装机使用1枚放射源<sup>192</sup>Ir，其半衰期为74天。为确保治疗源强度，通常使用达到2个半衰期（148天）时需更换新源，每年最多产生3枚<sup>192</sup>Ir废放射源。医院应在采购放射源时与供源单位签订废旧放射源回收协议。更换放射源全程由供源单位专业技术人员按国家相关规定在医院后装机机房内完成，换下的废放射源直接由供源单位带走回收，不在本项目区域内存放。医院相关工作人员仅在机房外围提供安全警戒等辅助工作，不参与放射源的更换操作。

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）7.4中相关要求，设备厂家在倒装放射源时应对倒装热室周围和含源设备表面进行辐射监测，关注倒源屏蔽体的辐射防护效果和含源设备的表面污染情况，做好安装和更换的放射源清点并记录；倒源结束后对含放射源的放射治疗设备、场所与周围环境进行辐射监测。医院仅负责外围警戒，倒装源时供源单位应制定换源方案，监测、防护、记录等工作均由供源单位负责。

直线加速器检维修由设备厂家完成，设备换下的废金属靶等活化部件直接由设备厂家的技术人员回收处置，不在项目地贮存。

### 10.2.3 DSA 手术室

#### （1）废气

DSA设备在开机并处于出束状态时，X射线与空气作用会产生极少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，由于项目射线装置的管电压、管电流较小，产生的有害气体相对较少。

DSA手术室在东侧天花板设置1个排风口，排风管道向上引至四层ICU净化机房，最终由风井引至四层上方屋顶排放至大气。满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）“机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风”要求。

#### （2）固体废物

项目采用数字显影技术，不会产生废胶片。介入手术时产生的医用器具和药棉、纱布、手套等医疗废物，在手术室由专用包装袋、容器分类收集后，经DSA手术室西南角的污物通道远离DSA手术送至医疗废物暂存间暂存，最终委托有资质的单位处置。

表 11 环境影响分析

## 11.1 建设阶段环境影响分析

医院拟在肿瘤科研楼三层建设 1 间 DSA 手术室及配套区域，在负一层建设核医学科治疗区域和核医学科诊断区域，在负二层建设放疗科和核医学科药物制备区域，在大楼北侧地下建设衰变池，并同步建设配套的屏蔽防护措施，通风排水系统等配套设施。肿瘤科研楼土建部分已在陕环批复（2026）1 号中包含，大楼正在施工建设中。

本项目施工主要内容包括：辐射屏蔽措施施工、衰变池建设施工、通排风管道施工、放射性废水管道施工、设备安装等。项目施工建设阶段对环境的影响主要为施工过程产生的废气、废水、噪声、建筑垃圾等。

（1）废气：施工期料堆应采取防尘措施，清扫过程做到先洒水再清扫，固体废物及时清运，运输物料车采取覆盖等防止散落的措施。

（2）废水：施工期间的机械洗刷污水、生活污水。治理措施为：施工废水和生活污水依托医院污水处理站，处理达标后排入市政污水管网。

（3）噪声：施工现场如电钻、切割机、混凝土搅拌机等产生的噪声。治理措施为：①噪声专人专管：施工现场提倡文明施工。②降噪措施落实：施工设备相对集中，对施工设备可以屏蔽降噪，使用隔声性能好的隔声构件将施工机械噪声源与周围环境隔离，以减少环境污染范围与污染程度，尽量缩小噪声干扰范围，减小对周围环境的影响。合理安排作业时间，限制夜间进行有强噪声污染的施工作业。

（4）固体废物：施工期间建筑垃圾以及建材包装的废包装材料和施工人员产生的生活垃圾等。治理措施为：施工期间的建筑垃圾应在指定的地点堆放，并及时清运；废包装材料和生活垃圾产生量少，分类收集于垃圾桶，由环卫部门统一清运。

本项目施工期主要为室内施工，施工期短，施工范围小，通过控制作业时间、加强施工现场管理等手段，施工期对周围环境影响较小，且施工期影响均为暂时影响，随着施工期的结束而消除。

## 11.2 运行阶段环境影响分析

### 11.2.1 核医学科

#### 11.2.1.1 回旋加速器

（1）计算公式及参数选取

参考《核医学放射防护要求》GBZ120-2020 附录 I, 回旋加速器屏蔽体外剂量率按公式11-1估算。

$$H_R = \left( \frac{r_0^2}{R^2} \right) \times (H_n \times 10^{-X/TVL_n} + H_\gamma \times 10^{-X/TVL_\gamma}) \quad (11-1)$$

式中：

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

$r_0$  —参考点到靶心的距离,  $\text{m}$ ;

$R$  —关注点到靶心的距离,  $\text{m}$

$H_n$  —参考点处中子剂量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$H_\gamma$  —参考点处 $\gamma$ 射线剂量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$x$  —屏蔽体厚度;

$TVL_n$ —中子在对应屏蔽材料中的什值层厚度,  $\text{cm}$ ;

$TVL_\gamma$ — $\gamma$ 射线在对应屏蔽材料中的什值层厚度,  $\text{cm}$ 。

根据医院提供的资料, 本次拟购买的玖源-20系列回旋加速器主要用于生产 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 和 $^{18}\text{F}$ 药物。其中 $^{11}\text{C}$ 和 $^{13}\text{N}$ 通过 $(\text{p}, \alpha)$ 反应生产, 对环境影响较小;  $^{15}\text{O}$ 和 $^{18}\text{F}$ 通过 $(\text{p}, \text{n})$ 反应生产, 其中 $^{18}\text{O}$  ( $\text{p}, \text{n}$ )  $^{18}\text{F}$ 反应最为常用且能量最大。

$^{18}\text{O}$  ( $\text{p}, \text{n}$ )  $^{18}\text{F}$ 反应产生中子为连续谱, 最大能量为 $15\text{MeV}$ , 剂量峰值位于 $2\text{MeV}$ , 主要剂量贡献来自 $3\text{-}5\text{MeV}$ 区间;  $\gamma$ 射线为各向同性连续谱, 最大能量为 $10\text{MeV}$ , 主要剂量贡献来自 $5\text{-}7\text{MeV}$ 区间。入射质子能量影响反应截面, 与产生的瞬发中子及中子俘获射线能量无关, 回旋加速器生产的PET药物产生能量为 $0.511\text{MeV}$ 的 $\gamma$ 射线, 其能量远小于回旋加速器运行中的中子俘获 $\gamma$ 射线, 因此回旋加速器内部PET药物产生的 $\gamma$ 射线的影响可忽略不计。

因此本项目回旋加速器中子及 $\gamma$ 射线在各屏蔽材料中的什值层厚度参考《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 表I.3中,  $5\text{MeV}$ 的中子及 $8\text{MeV}$ 的 $\gamma$ 射线在各屏蔽材料中的什值层厚度, 详见表11-1。

表 11-1 中子 ( $5\text{MeV}$ ) 及 $\gamma$ 射线 ( $8\text{MeV}$ ) 在各屏蔽材料什值层厚度

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

根据设备厂家提供的资料，在20MeV，100 $\mu$ A下正常运行时，自屏蔽体外各方向剂量率见表11-2。

表 11-2 玖源-20 系列回旋加速器正常运行时自屏蔽外剂量率

测量参数 20MeV, 100 $\mu$ A	自屏蔽外30cm		自屏蔽外100cm	
	中子剂量率 ( $\mu$ Sv/h)	$\gamma$ 剂量率 ( $\mu$ Sv/h)	中子剂量率 ( $\mu$ Sv/h)	$\gamma$ 剂量率 ( $\mu$ Sv/h)
束流水平0°	32.33	1.34	<b>23.40</b>	1.42
束流水平90°	0.81	0.23	1.19	0.25
束流水平180°	1.91	0.28	1.98	0.30
束流水平270°	22.13	2.84	17.30	<b>2.13</b>
靶位上方	13.70	1.46	11.27	0.16

根据上述资料，本次评价回旋加速器自屏蔽外壳表面1m参考点处按中子剂量率23.40 $\mu$ Sv/h， $\gamma$ 射线剂量率2.13 $\mu$ Sv/h进行估算。

### (2) 剂量率限值

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)及《关于核医学标准相关条款咨询的复函》(辐射函〔2023〕20号)中工作场所屏蔽要求，本评价报告中工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面30cm处的周围剂量当量率应小于2.5 $\mu$ Sv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于10 $\mu$ Sv/h。

### (3) 屏蔽能力估算

回旋加速器机房选择四周屏蔽体外30cm处作为关注点，上方选择地面上30cm处作为关注点，下方为土层，不设置关注点。关注点位置示意图见图11-3及图11-4。

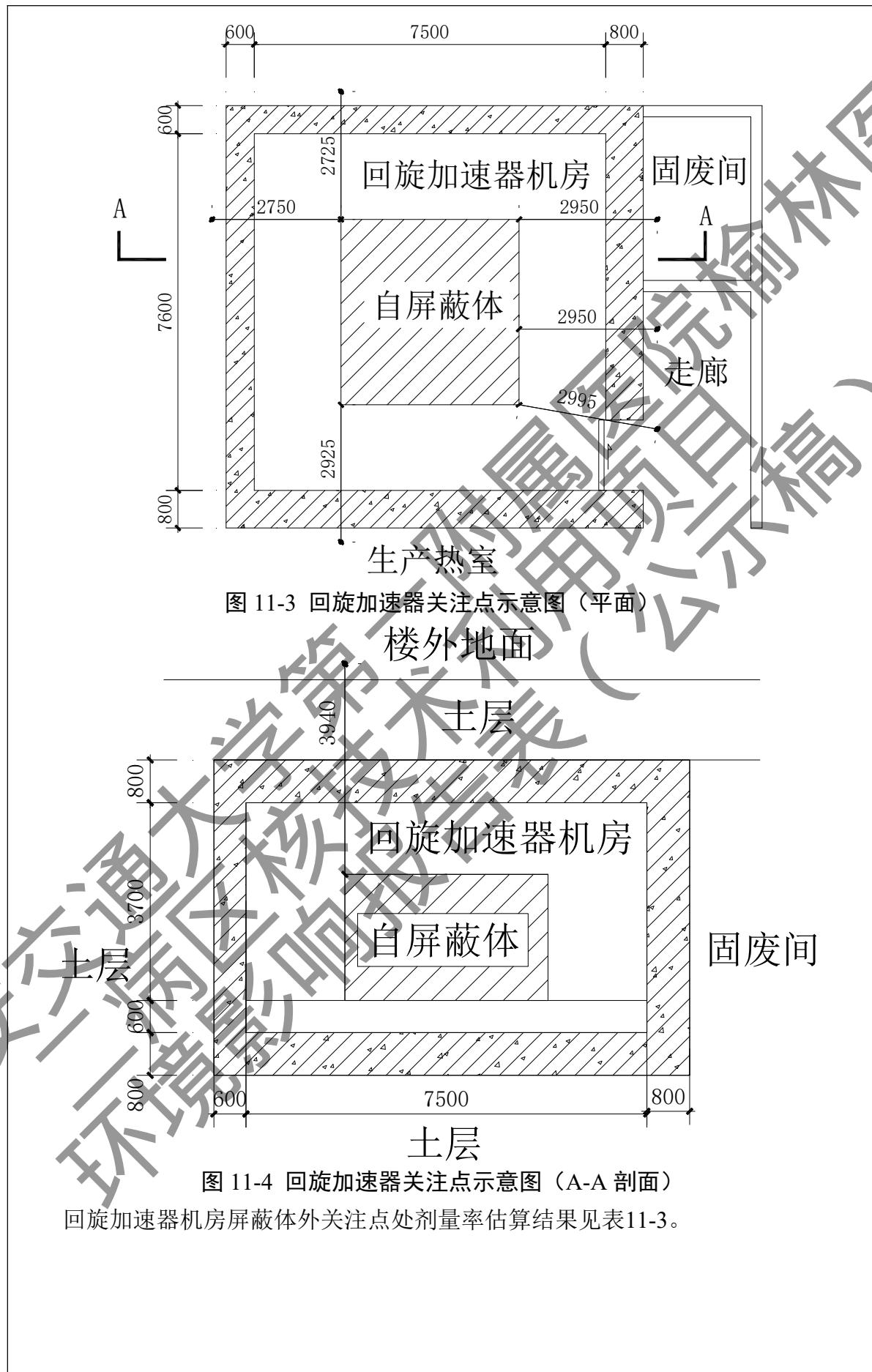


表 11-3 回旋加速器机房屏蔽体外中子剂量率估算结果

关注点	$H_n$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$H_\gamma$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	R (m)	x (cm)	$H_R$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
北侧土层	23.40	2.13	2.72	60cm混凝土	$4.59 \times 10^{-2}$
西侧土层			2.75	60cm混凝土	$4.49 \times 10^{-2}$
南侧生产热室			2.92	80cm混凝土	$3.98 \times 10^{-2}$
东侧走廊			2.95	80cm混凝土	$3.90 \times 10^{-2}$
东侧固废间			2.95	80cm混凝土	$3.90 \times 10^{-2}$
上方地面			3.94	20cm混凝土	0.425
防护门			3.00	26cm聚乙烯+2cm铅防护门	0.139

根据表11-3的计算结果，回旋加速器机房屏蔽体外剂量率最大为 $0.425\mu\text{Sv/h}$ ，满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)及辐射函(2023)20号中，控制区内工作人员经常性停留的场所(人员居留因子 $\geq 1/2$ )，周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，控制区内工作人员较少停留或无需到达的场所(人员居留因子 $< 1/2$ )，周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

### 11.2.1.2 核医学工作场所

#### (1) $\alpha$ 射线影响

本项目使用的 $^{211}\text{At}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ 、 $^{225}\text{Ac}$ 、 $^{227}\text{Th}$ 等 $\alpha$ 核素主要产生 $\alpha$ 射线， $\alpha$ 射线穿透能力很弱，无法穿透普通衣物、人体皮肤角质层等实体屏蔽，因此辐射工作人员穿戴的放射性污染防护服、医用口罩、一次性橡胶手套等防护用品后， $\alpha$ 射线对其造成的外照射影响可忽略不计。因此本次评价不再考虑 $\alpha$ 射线外照射影响。

#### (2) $\beta$ 射线影响

##### ① $\beta$ 射线射程估算

本项目使用的 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{47}\text{Sc}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{124}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{153}\text{Sm}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ 、 $^{186}\text{Re}$ 、 $^{188}\text{Re}$ 等主要产生 $\beta$ 射线，其中 $\beta^+$ 射线产生后迅速与环境中的正常电子发生湮灭反应，射程很短， $\beta^-$ 射线射程参考《辐射防护导论》中给出的能量在 $0.01\text{MeV}$ 至 $2.5\text{MeV}$ 之间的 $\beta$ 射线在低原子序数屏蔽物质中的射程公式(公式11-2)计算。

$$d=0.412E^{(1.265-0.0954\ln E)}/\rho \quad (11-2)$$

式中：

d — 电子在低原子序数物质中的射程，cm；

E —  $\beta$ 射线最大能量，MeV；

$\rho$  —屏蔽物质密度, 按有机玻璃取 $1.18\text{g/cm}^3$ 。

表 11-4  $\beta$  射线射程估算结果

核素名称	$\beta$ 射线最大能量 (MeV)	屏蔽材料密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	最大射程 (cm)
$^{32}\text{P}$	0.695	1.18	0.218
$^{35}\text{S}$	0.049		0.003
$^{47}\text{Sc}$	0.204		0.037
$^{64}\text{Cu}$	0.579		0.170
$^{89}\text{Sr}$	1.50		0.574
$^{124}\text{I}$	0.974		0.181
$^{131}\text{I}$	0.969		0.338
$^{153}\text{Sm}$	0.807		0.265
$^{177}\text{Lu}$	0.501		0.139
$^{186}\text{Re}$	0.359		0.086
$^{188}\text{Re}$	2.121		0.856

注:  $\beta$ 射线最大能量引自中国核数据中心核物理主题数据库。

根据计算结果可知, 本项目使用的 $\beta$ 核素产生的 $\beta$ 射线在有机玻璃中的射程最长仅 $0.856\text{cm}$ , 屏蔽容器、患者身体组织即可完全阻挡 $\beta$ 射线。因此本次评价不考虑 $\beta$ 射线外照射影响。

## ②轫致辐射影响分析

本项目使用的 $\beta$ 核素放出的 $\beta$ 射线被屏蔽体阻挡时会产生轫致辐射。对于平均能量为 $E_b$ 的 $\beta$ 射线在屏蔽材料中产生的轫致辐射可采用《辐射防护导论》中的公式(公式11-3)进行计算:

$$D = 4.58 \times 10^{-14} A \cdot Z \left( \frac{E_b}{r} \right)^2 \left( \frac{\mu_{\text{em}}}{\rho} \right) \quad (11-3)$$

式中:

$D$  — $\beta$ 射线轫致辐射在 $r$ 米处的剂量当量率,  $\text{Sv/h}$ ;

$A$  —放射源活度,  $\text{Bq}$ ;

$Z$  —屏蔽材料的有效原子序数, 按塑料/有机玻璃取5.85;

$E_b$  —轫致辐射的平均能量, 按公式取 $\beta$ 射线最大能量的 $1/3$ ,  $\text{MeV}$ ;

$r$  —参考点距放射源的距离,  $\text{m}$ ;

$\mu_{\text{em}}/\rho$ —轫致辐射在聚乙烯中的质量能量吸收系数,  $\text{m}^2/\text{kg}$ ;

根据前文的数据及《辐射防护导论》中数据，考虑放射性药物日最大用量，本项目 $\beta$ 核素屏蔽体表面1m处轫致辐射剂量率见表11-5。

表 11-5  $\beta$ 核素所致轫致辐射剂量率估算结果

核素	源活度A	屏蔽材料 原子序数	$E_b$ (MeV)	r (m)	$\mu_{em}/\rho$ ( $m^2/kg$ )	轫致辐射 剂量率 ( $\mu Sv/h$ )
$^{32}P$	$3.70 \times 10^8$	5.85	0.570	1	$3.295 \times 10^{-3}$	0.106
$^{35}S$	$3.70 \times 10^8$	5.85	0.056	1	$1.868 \times 10^{-2}$	$5.74 \times 10^{-3}$
$^{47}Sc$	$3.70 \times 10^8$	5.85	0.147	1	$3.275 \times 10^{-3}$	$7.02 \times 10^{-3}$
$^{89}Sr$	$3.70 \times 10^8$	5.85	0.448	1	$3.029 \times 10^{-3}$	0.241
$^{124}I$	$1.48 \times 10^9$	5.85	0.500	1	$3.388 \times 10^{-3}$	$8.40 \times 10^{-2}$
$^{153}Sm$	$1.85 \times 10^9$	5.85	0.852	1	$3.337 \times 10^{-3}$	0.961
$^{177}Lu$	$3.70 \times 10^9$	5.85	0.235	1	$3.275 \times 10^{-3}$	$8.94 \times 10^{-2}$
$^{186}Re$	$3.70 \times 10^9$	5.85	0.166	1	$3.029 \times 10^{-3}$	$8.24 \times 10^{-2}$
$^{188}Re$	$1.85 \times 10^9$	5.85	0.357	1	$3.337 \times 10^{-3}$	0.421

由表11-2可知，仅考虑有机玻璃屏蔽的情况下，本项目 $\beta$ 核素产生的轫致辐射在距源1m处的剂量率最大为 $0.691\mu Sv/h$ ，在考虑屏蔽容器或墙体的屏蔽后，本项目的轫致辐射剂量率满足小于 $2.5\mu Sv/h$ 的要求。

### (3) $\gamma$ 射线影响

#### ①计算公式及参数选取

放射性药物相比所在场所尺寸，可按点源考虑，其在屏蔽体外关注点处的剂量率按公式11-4估算。

$$H_R = A \times \Gamma \times r^{-2} \times 10^{-\frac{x}{TVL}} \quad (11-4)$$

式中：

$H_R$ —经屏蔽后关注点的剂量率，单位 $\mu Sv/h$ ；

$r$ —为参考点与放射源间距离，单位m；

$A$ —放射源活度，单位MBq；

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

TVL—射线在防护材料的十分之一值层厚度，单位mm；

$x$ —屏蔽体的屏蔽厚度，mm。

不同材料的等效屏蔽厚度按公式11-5折算。

$$X_1 = X_2 \times \frac{TVL_1}{TVL_2} \quad (11-5)$$

式中：

$X_1$  —等效物质1厚度, cm;

$X_2$  —物质2实际厚度, cm;

$TVL_1$ —对应射线在物质1中的什值层厚度, cm;

$TVL_2$ —对应射线在物质2中的什值层厚度, cm;

核医学科门诊诊疗区域主要使用<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F、<sup>35</sup>S、<sup>47</sup>Sc、<sup>51</sup>Cr、<sup>68</sup>Ga、<sup>89</sup>Sr、<sup>89</sup>Zr、<sup>99m</sup>Tc、<sup>124</sup>I、<sup>131</sup>I、<sup>153</sup>Sm、<sup>177</sup>Lu、<sup>186</sup>Re、<sup>188</sup>Re、<sup>211</sup>At、<sup>223</sup>Ra、<sup>225</sup>Ac、<sup>227</sup>Th、<sup>201</sup>Tl等放射性核素。其中PET诊断场所使用<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F、<sup>68</sup>Ga、<sup>89</sup>Zr、<sup>124</sup>I等核素，以辐射影响较大<sup>11</sup>C作为代表核素进行估算；SPECT诊断场所使用<sup>51</sup>Cr、<sup>99m</sup>Tc、<sup>131</sup>I、<sup>201</sup>Tl等核素，以辐射影响较大且总用量较大的<sup>99m</sup>Tc作为代表核素进行估算；PET诊断和SPECT诊断共用场所以<sup>11</sup>C作为代表核素进行估算，手套箱等药物贮存场所按<sup>18</sup>F药物及其用量计算；<sup>35</sup>S、<sup>47</sup>Sc、<sup>89</sup>Sr、<sup>153</sup>Sm、<sup>177</sup>Lu、<sup>186</sup>Re、<sup>188</sup>Re、<sup>211</sup>At、<sup>223</sup>Ra、<sup>225</sup>Ac、<sup>227</sup>Th等核素以 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线为主，根据11.2.1.2节结论不考虑其外照射影响。

核医学科病房区域使用<sup>131</sup>I进行甲功测定、甲亢治疗、甲癌治疗，使用<sup>177</sup>Lu开展住院治疗，以辐射影响及用量较大的<sup>131</sup>I作为代表核素进行估算；敷贴室使用<sup>32</sup>P开展敷贴治疗，根据11.2.1.2节结论不考虑其外照射影响。

回旋加速器工作场所涉及<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F和<sup>68</sup>Ga，生产热室以辐射影响较大<sup>11</sup>C作为代表核素进行估算；药物淋洗区域涉及<sup>99m</sup>Tc，以<sup>99m</sup>Tc作为代表核素进行估算。

表 11-6 核医学科代表核素计算参数

核素	裸源单位放射性活度所致 1m 处的周围剂量当量率 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2(\text{h}\cdot\text{MBq})^{-1}$	人体内单位放射性活度所致 1m 处的周围剂量当量率 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2(\text{h}\cdot\text{MBq})^{-1}$	TVL (mm)		
			混凝土 (2.35g/cm <sup>3</sup> )	砖(1.65g/cm <sup>3</sup> )	铅(11.3g/cm <sup>3</sup> )
<sup>11</sup> C	0.148	0.095	176	263	16.6
<sup>18</sup> F	0.143	0.092	176	263	16.6
<sup>68</sup> Ga	0.134	0.086	176	263	16.6
<sup>99m</sup> Tc	0.0303	0.0207	110	160	1
<sup>131</sup> I	0.0595	0.0583	170	240	11

注1：混凝土、砖和铅数据来源《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录H、I、L；

注<sub>2</sub>: 正电子核素产生511keV的 $\gamma$ 射线, 因此<sup>11</sup>C和<sup>68</sup>Ga在各物质中什值层厚度参考<sup>18</sup>F取值。

各工作场所的辐射源点按放射性药物或服药后患者位置考虑, 检查机房取检查床位置, 注射场所取注射位, 候诊留观场所取座位位置, 核素病房取病床位置。核素病房、注射后候诊室、留观室等辐射工作场所的卫生间作为场所的一部分考虑。

各辐射工作场所关注点设在屏蔽墙体、防护门、传递窗外0.3m处, 储源容器、手套箱等设备考虑设备内部空间和厚度, 关注点距辐射源距离按0.5m考虑。

## ②剂量率控制目标值

根据《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)及生态环境部关于《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)相关条款咨询的复函(辐射函〔2023〕20号)中工作场所屏蔽要求, 本评价报告中工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面30cm处的周围剂量当量率应小于2.5 $\mu$ Sv/h, 如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域, 其周围剂量当量率应小于10 $\mu$ Sv/h; 手套箱、注射窗外表面30cm处人员操作位的周围剂量当量率应小于2.5 $\mu$ Sv/h; 手套箱非正对人员操作位表面的周围剂量当量率应小于25 $\mu$ Sv/h。

## ③屏蔽能力估算

核医学科工作场所屏蔽体外关注点处剂量率估算结果见表11-7。

表 11-7 核医学科屏蔽体外剂量率估算结果

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	$R$ (m)	$H_p$ $\mu\text{Sv}/\text{h}$	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
储源容器								
$^{18}\text{F}$ 转运暂存容器	29100	0.143 (裸源)	转运人员处	0.5	2.5	65mmPb铅容器	1.52	符合
$^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 转运暂存容器	8340	0.148 (裸源)	转运人员处	0.5	2.5	60mmPb铅容器	1.20	符合
$^{64}\text{Cu}$ 、 $^{89}\text{Zr}$ 、 $^{124}\text{I}$ 暂存容器	2830	0.148 (裸源)	转运人员处	0.5	2.5	50mmPb铅容器	1.63	符合
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 转运容器	111000	0.0303 (裸源)	转运人员处	0.5	2.5	6mmPb铅容器	$1.35 \times 10^{-2}$	符合
$^{51}\text{Cr}$ 、 $^{123}\text{I}$ 、 $^{201}\text{Tl}$ 暂存容器	810	0.0303 (裸源)	转运人员处	0.5	2.5	3mmPb铅容器	$9.82 \times 10^{-2}$	符合
负一层核医学科药物制备区域								
$^{18}\text{F}$ 合成柜 ( $^{18}\text{F}$ , 考虑全部用量)	29100	0.143 (裸源)	正面	0.5	2.5	65mmPb合成柜	1.52	符合
			其余面	0.5	25	65mmPb合成柜	1.52	符合
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 淋洗柜 ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , 考虑全部用量)	111000	0.0303 (裸源)	正面	0.5	2.5	6mmPb淋洗柜	$1.35 \times 10^{-2}$	符合
			其余面	0.5	25	6mmPb淋洗柜	$1.35 \times 10^{-2}$	符合
$^{68}\text{Ga}$ 淋洗柜 ( $^{68}\text{Ga}$ , 考虑全部用量)	1200	0.134 (裸源)	正面	0.5	2.5	45mmPb淋洗柜	1.25	符合
			其余面	0.5	25	45mmPb淋洗柜	1.25	符合
质控手套箱 ( $^{11}\text{C}$ , 考虑单次质控用量)	37	0.148 (裸源)	正面	0.5	2.5	20mmPb手套箱	1.37	符合
			其余面	0.5	25	20mmPb手套箱	1.37	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	R (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
一层核医学科门诊诊疗区域								
PET手套箱 ( <sup>18</sup> F, 考虑全部用量)	42900	0.143 (裸源)	正面	0.5	2.5	70mmPb 手套箱	1.49	符合
			其余面	0.5	25	70mmPb 手套箱	1.49	符合
SPECT手套箱 ( <sup>99m</sup> Tc, 考虑全部用量)	55400	0.0303 (裸源)	正面	0.5	2.5	5mmPb 手套箱	$4.59 \times 10^{-2}$	符合
			其余面	0.5	25	5mmPb 手套箱	$4.59 \times 10^{-2}$	符合
给药区 ( <sup>11</sup> C, 考虑单人用量)	370	0.095 (人体源)	北墙	1.0	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	2.25	符合
			西墙	1.5	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	1.00	符合
			南墙	4.3	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.122	符合
			东墙	2.3	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.426	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+3mm 铅板	1.05	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板	0.142	符合
			防护门(给药室)	2.3	2.5	12mmPb 防护门	1.26	符合
			防护门(肺通气)	1.5	10	4mmPb 防护门	8.97	符合
			防护门(负荷室)	2.8	10	10mmPb 防护门	1.12	符合
			防护门(走廊)	4.3	10	10mmPb 防护门	0.475	符合
			防护门(患者入口)	2.3	2.5	10mmPb 防护门	1.66	符合
PET注射窗 ( <sup>11</sup> C, 考虑单人用量)	370	0.095 (人体源)	PET 注射位	0.5	2.5	40mmPb 注射窗	0.547	符合
SPECT注射窗 ( <sup>99m</sup> Tc, 考虑单人用量)	925	0.0207 (人体源)	SPECT注射位	0.5	2.5	10mmPb 注射窗	$7.66 \times 10^{-9}$	符合
肺通气 ( <sup>99m</sup> Tc,	925	0.0207	北墙	1.8	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$6.03 \times 10^{-2}$	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	$R$ (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
考虑单人用量)		(人体源)	西墙	1.9	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$5.42\times 10^{-2}$	符合
			南墙	1.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$6.03\times 10^{-2}$	符合
			东墙	1.9	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$5.42\times 10^{-2}$	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板	$3.93\times 10^{-3}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板	$9.28\times 10^{-3}$	符合
			工作人员门	1.9	2.5	4mmPb 防护门	$5.30\times 10^{-4}$	符合
			患者门	1.9	10	4mmPb 防护门	$5.30\times 10^{-4}$	符合
运动负荷抢救室 ( <sup>11</sup> C, 考虑单人 用量)	370	0.095 (人体源)	北墙	2.0	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.528	符合
			西墙	2.8	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.269	符合
			南墙	2.0	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.528	符合
			东墙	2.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.269	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板	$5.13\times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板	$8.19\times 10^{-2}$	符合
			工作人员门	2.5	2.5	10mmPb 防护门	1.40	符合
SPECT候诊1 ( <sup>99m</sup> Tc, 考虑2 人同时候诊)	1850	0.0207 (人体源)	患者门	2.8	10	10mmPb 防护门	1.12	符合
			北墙	3.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$2.94\times 10^{-2}$	符合
			西墙	2.8	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	$4.13\times 10^{-2}$	符合
			南墙	3.8	10	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料	$2.94\times 10^{-2}$	符合
			东墙	2.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$2.61\times 10^{-2}$	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板	$7.86\times 10^{-3}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板	$1.86\times 10^{-2}$	符合
SPECT候诊2	1850	0.0207	防护门	3.1	10	4mmPb 防护门	$3.98\times 10^{-4}$	符合
SPECT候诊2	1850	0.0207	北墙	2.6	10	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	0.387	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	$R$ (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
(99mTc, 考虑2人同时候诊)		(人体源)	西墙	3.0	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	$4.35\times 10^{-3}$	符合
			南墙	2.6	10	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$8.43\times 10^{-2}$	符合
			东墙	3.0	2.5	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$6.33\times 10^{-2}$	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板	$7.86\times 10^{-3}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板	$1.86\times 10^{-2}$	符合
			西侧防护门	3.4	10	4mmPb 防护门	$3.31\times 10^{-4}$	符合
			南侧防护门	3.0	10	4mmPb 防护门	$4.26\times 10^{-4}$	符合
SPECT-CT机房1 (99mTc, 考虑1人检查)	925	0.0207 (人体源)	北墙	3.4	2.5	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$2.47\times 10^{-2}$	符合
			西墙	4.6	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$1.00\times 10^{-2}$	符合
			南墙	3.4	10	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$2.47\times 10^{-2}$	符合
			东墙	4.6	2.5	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$1.35\times 10^{-2}$	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+3mmPb 板	$3.93\times 10^{-6}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+3mmPb 板	$9.28\times 10^{-6}$	符合
			工作人员门	5.0	2.5	4mmPb 防护门	$7.66\times 10^{-5}$	符合
			患者门	4.8	10	4mmPb 防护门	$8.31\times 10^{-5}$	符合
			观察窗	4.6	2.5	4mmPb 观察窗	$9.05\times 10^{-5}$	符合
SPECT-CT机房2 (99mTc, 考虑1人检查)	925	0.0207 (人体源)	北墙	3.3	10	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$2.62\times 10^{-2}$	符合
			西墙	4.6	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	$1.00\times 10^{-2}$	符合
			南墙	3.3	10	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$2.62\times 10^{-2}$	符合
			东墙	4.6	2.5	240mm 实心砖+30mm 硫酸钡涂料	$1.35\times 10^{-2}$	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+3mmPb 板	$3.93\times 10^{-6}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+3mmPb 板	$9.28\times 10^{-6}$	符合
			工作人员门(北)	5.0	2.5	4mmPb 防护门	$7.66\times 10^{-5}$	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	R (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
			工作人员门(东)	5.0	2.5	4mmPb 防护门	$7.66 \times 10^{-5}$	符合
			患者门	4.4	10	4mmPb 防护门	$9.89 \times 10^{-5}$	符合
			观察窗	4.6	2.5	4mmPb 观察窗	$9.05 \times 10^{-5}$	符合
PET候诊室1 ( <sup>11</sup> C, 考虑1人候诊)	740	0.095 (人体源)	北墙	2.4	10	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料	0.618	符合
			西墙	2.8	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.121	符合
			南墙	2.4	10	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料	0.618	符合
			东墙	2.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.538	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+4mmPb 板	$6.75 \times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+2mmPb 板	0.124	符合
			防护门	3.1	10	12mmPb 防护门	1.38	符合
			北墙	2.5	10	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料	0.570	符合
PET候诊室2 ( <sup>11</sup> C, 考虑1人候诊)	740	0.095 (人体源)	西墙	2.8	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.121	符合
			南墙	2.5	10	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料	0.570	符合
			东墙	2.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.538	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+4mmPb 板	$6.75 \times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+3mmPb 板	0.109	符合
			北侧防护门	2.5	10	12mmPb 防护门	2.13	符合
			东侧防护门	2.8	10	12mmPb 防护门	1.70	符合
			北墙	1.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	1.30	符合
VIP候诊室 ( <sup>11</sup> C, 考虑2人候诊)	740	0.095 (人体源)	西墙	2.8	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.224	符合
			南墙	1.8	10	240mm 实心砖+50mm 硫酸钡涂料	1.06	符合
			东墙	2.8	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.538	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板	0.103	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	$R$ (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
PET-CT机房 ( <sup>11</sup> C, 考虑2人 检查)	740	0.095 (人体源)	地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板	0.164	符合
			防护门	1.8	10	12mmPb 防护门	4.11	符合
			北墙	3.1	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.439	符合
			西墙	4.6	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.199	符合
			南墙	3.1	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.439	符合
			东墙	4.6	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.199	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+3mmPb 板	$6.84 \times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+3mmPb 板	0.109	符合
			工作人员门	4.9	2.5	10mmPb 防护门	0.731	符合
			患者门	4.8	10	8mmPb 防护门	1.01	符合
			观察窗	4.6	2.5	10mmPb 观察窗	0.830	符合
PET-MR机房 ( <sup>11</sup> C, 考虑1人 检查)	740	0.095 (人体源)	北墙	3.3	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.388	符合
			西墙	4.6	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.199	符合
			南墙	3.3	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.388	符合
			东墙	4.6	2.5	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.199	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+3mmPb 板	$6.84 \times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+3mmPb 板	0.109	符合
			工作人员门	4.5	2.5	10mmPb 防护门	0.867	符合
			患者门	3.6	10	8mmPb 防护门	1.79	符合
			观察窗	3.3	2.5	10mmPb 观察窗	1.61	符合
			北墙	2.9	10	240mm 实心砖+40mm 硫酸钡涂料	0.502	符合
留观室	740	0.095 (人体源)	西墙	2.8	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.121	符合
			南墙	2.9	10	240mm 实心砖	1.03	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	$R$ (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
			东墙	2.8	10	240mm 实心砖	1.11	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+2mmPb 板	$7.80\times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+2mmPb 板	0.124	符合
			防护门	3.0	10	10mmPb 防护门	1.95	符合
一层核医学科治疗场所								
甲癌自动分装仪 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲癌全部用量)	29600	0.0595 (裸源)	正面	0.5	2.5	60mmPb自动分装仪	1.71	符合
			其余面	0.5	25	60mmPb自动分装仪	1.71	符合
碘手套箱 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲亢全部用量)	3700	0.0595 (裸源)	正面	0.5	2.5	45mmPb自动分装仪	0.857	符合
			其余面	0.5	25	45mmPb自动分装仪	0.857	符合
门诊给药区 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲亢1人用量)	370	0.0583 (人体源)	北墙	2.3	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	$5.20\times 10^{-2}$	符合
			西墙	2.0	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	$6.88\times 10^{-2}$	符合
			南墙	1.9	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	$7.63\times 10^{-2}$	符合
			东墙	1.0	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.275	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+16mm 铅板	$9.81\times 10^{-4}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+2mm 铅板	$7.02\times 10^{-4}$	符合
			南侧入口门	1.9	2.5	10mmPb防护门	0.737	符合
			西侧出口门	1.9	2.5	8mmPb防护门	1.12	符合
			固废间门	2.3	10	6mmPb防护门	1.16	符合
			门诊服药窗	1.0	10	20mmPb服药窗	0.328	符合
住院给药区 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲癌1人用量)	7400	0.0583 (人体源)	北墙	1.0	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	5.51	符合
			西墙	2.3	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	1.04	符合
			南墙	3.2	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.538	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	R (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
甲癌病房1 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲癌 1人用量)	7400	0.0583 (人体源)	东墙	5.0	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.220	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+16mmPb 板	$1.96\times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+20mmPb 板	$1.40\times 10^{-2}$	符合
			北侧工作人员门	1.0	10	15mmPb 防护门	2.38	符合
			西侧入口门	1.0	2.5	18mmPb 防护门	1.27	符合
			东侧出口门	1.0	2.5	15mmPb 防护门	2.38	符合
			住院注射窗	1.0	2.5	20mmPb 注射窗	0.836	符合
			住院服药窗	1.0	2.5	20mmPb 服药窗	0.836	符合
			敷贴室传递窗	1.0	2.5	20mmPb 传递窗	0.836	符合
			北墙	3.7	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.303	符合
甲癌病房2 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲癌 1人用量)	7400	0.0583 (人体源)	西墙	2.9	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.493	符合
			南墙	3.7	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.303	符合
			东墙	2.9	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.493	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+18mmPb 板	$2.04\times 10^{-2}$	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+12mmPb 板	$1.38\times 10^{-2}$	符合
			防护门	3.5	2.5	15mmPb 防护门	1.52	符合
			北墙	3.2	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.405	符合
			西墙	2.5	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.663	符合
			南墙	3.2	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.405	符合
			东墙	2.5	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.663	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	R (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
甲癌病房3 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲癌 1人用量)	7400	0.0583 (人体源)	北墙	4.0	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.259	符合
			西墙	2.9	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.493	符合
			南墙	4.0	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.259	符合
			东墙	2.9	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.493	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+20mmPb 板	0.161	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+16mmPb 板	0.264	符合
			防护门	3.9	2.5	15mmPb 防护门	1.23	符合
甲癌病房4 ( $^{131}\text{I}$ , 考虑甲癌 1人用量)	7400	0.0583 (人体源)	北墙	4.5	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.205	符合
			西墙	2.9	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.493	符合
			南墙	4.5	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.205	符合
			东墙	2.9	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.493	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+6mmPb 板	0.161	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+6mmPb 板	0.264	符合
			防护门	4.3	2.5	15mmPb 防护门	1.01	符合
备餐间 ( $^{131}\text{I}$ , 考 虑甲癌1人用量)	7400	0.0583 (人体源)	北墙	1.1	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	4.55	符合
			西墙	1.0	10	370mm实心砖+20mm硫酸钡涂料	5.51	符合
			南墙	1.1	10	370mm实心砖+120mm硫酸钡涂料	4.55	符合
			东墙	4.0	10	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	0.344	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板	0.561	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+2mmPb 板	0.608	符合
			防护门	4.0	10	12mmPb 防护门	2.19	符合
出院检测/抢救	7400	0.0583	传递窗	1.0	2.5	25mmPb 传递窗	2.30	符合
			北墙	2.1	2.5	370mm实心砖+60mm硫酸钡涂料	1.27	符合

场所名称	$A$ (MBq)	$\Gamma$ $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	关注点位置	R (m)	$H_p$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽设计/等效铅当量	关注点处剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否符合
$(^{131}\text{I}$ , 考虑甲癌 1人用量)	(人体源)		西墙	2.9	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.668	符合
			南墙	2.1	2.5	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	1.25	符合
			东墙	2.9	10	370mm 实心砖+60mm 硫酸钡涂料	0.655	符合
			屋顶	5.1	2.5	250mm 混凝土楼板+6mm Pb 板	0.159	符合
			地面	5.6	2.5	200mm 混凝土楼板+4mm Pb 板	0.400	符合
			西侧防护门	3.1	2.5	15mm Pb 防护门	1.94	符合
			东侧防护门	2.9	10	12mm Pb 防护门	4.16	符合
注: 表中计算结果不包含PET-CT及SPECT-CT的CT部分产生的X射线影响。								

根据表11-7的计算结果,核医学科正常运行时,屏蔽体外剂量率满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)及辐射函(2023)20号中,控制区内工作人员居留因子小于1/2的区域不大于 $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ ,其他区域不大于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 的要求。评价范围内其他环境保护目标距本项目距离更远,间隔的墙体等结构更多,因此受到的辐射影响将小于表中区域,也满足上述剂量率要求。

### 11.2.1.3 X 射线影响

#### (1) 计算公式及参数选取

本项目拟安装的 PET-CT 设备中 CT 部分最大管电压 140kV、最大管电流 1000mA; SPECT-CT 设备中 CT 部分最大管电压 140kV、最大管电流 800mA。

参考《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020) 表E.2中数据, CT在75%位数下, 焦点处的剂量率最大为60mGy (扫描时间2s), 因此CT扫描时焦点处的最大剂量率保守取 $1.08 \times 10^8 \mu\text{Sv}/\text{h}$ , 考虑机房外关注点处剂量率同时存在漏射线和散射线影响。

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

$$H = \frac{f \cdot H_0 \cdot B}{R^2} \quad (11-6)$$

$$B = \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (11-7)$$

式中: H—关注点处的泄漏周围剂量当量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ; 周围剂量当量率与空气吸收剂量率换算系数在辐射屏蔽计算时通常取 1Sv/Gy;

f—泄漏射线比率, 取 0.1%;

$H_0$ —距靶点 1m 处的最大剂量率,  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ;

R—靶点至关注点的距离, m;

B—屏蔽透射因子;

X—铅厚度, mm。

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为铅对 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数, 见表 11-8。

表 11-8 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

电压	材料	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
140kV (CT)	铅	2.009	3.99	0.3420

注:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 取值参考《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020) 附录C。

散射周围剂量当量率计算公式参考《辐射防护手册第一分册》(李德平、潘自强主编, 原子能出版社, 1987) 中给出的公式计算。

$$H = \frac{H_0 \cdot \alpha \cdot B \cdot (S/400)}{(d_0 \cdot d_s)^2} \quad (11-8)$$

式中：

$H$  —关注点处的患者散射周围剂量当量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ; 周围剂量当量率与空气吸收剂量率换算系数在辐射屏蔽计算时通常取1Sv/Gy;

$H_0$  —距靶点1m处的最大剂量率,  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ;

$\alpha$  —患者对X射线的散射比, 参考《辐射防护手册 第一分册》P437表10.1取0.0015 (125kV, 90° 散射) ;

$S$  —散射面积, 取 $20\text{cm}^2$  (CT照射野按宽1cm, 长20cm计);

$d_0$  —源与患者的距离, 一般取0.5m;

$d_s$  —患者与关注点的距离, m;

$B$  —屏蔽透射因子。

根据《辐射防护手册 第三分册》第62页表3.3, 本项目管电压140kV下, 240mm砖 ( $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ ) 等效1.75mmPb, 30mm硫酸钡涂料等效1.83mmPb, 40mm硫酸钡涂料等效2.39mmPb。

根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)附录C公式C.1和C.2, 混凝土的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 取值自附录C表C.2, 计算得出在管电压140kV (CT) 下, 200mm混凝土等效铅当量2.26mmPb, 250mm混凝土等效3.01mmPb。

## (2) 屏蔽能力估算

设备等中心点设置在机房中心, 距地面高度约1m。正常工作时本项目2间SPECT-CT机房及PET-CT机房屏蔽体外X射线剂量率估算结果见表11-9至表11-11。

表 11-9 CT 部分泄漏辐射剂量率估算结果

机房名称	屏蔽位置	距离 (m)	等效铅当量 (mmPb)	$H_0$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	透射因子 $B$	$H$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
SPECT-CT 机房	北墙	3.4	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.340
	西墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.71 \times 10^{-2}$
	南墙	3.4	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.340
	东墙	4.6	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.186
	屋顶	5.1	6.01	$1.08 \times 10^8$	$2.40 \times 10^{-7}$	$9.98 \times 10^{-4}$
	地面	5.6	5.26	$1.08 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{-6}$	$3.82 \times 10^{-3}$
	工作人员门	5.0	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$6.48 \times 10^{-2}$
	患者门	4.8	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$7.03 \times 10^{-2}$
	观察窗	4.6	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$7.66 \times 10^{-2}$

SPECT-CT 机房 2	北墙	3.3	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.361
	西墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.71 \times 10^{-2}$
	南墙	3.3	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.361
	东墙	4.6	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.186
	屋顶	5.1	6.01	$1.08 \times 10^8$	$2.40 \times 10^{-7}$	$9.98 \times 10^{-4}$
	地面	5.6	5.26	$1.08 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{-6}$	$3.82 \times 10^{-3}$
	工作人员门	5.0	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$6.48 \times 10^{-2}$
	患者门	4.4	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$8.37 \times 10^{-2}$
	观察窗	4.6	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$7.66 \times 10^{-2}$
PET-CT 机房	北墙	3.1	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	0.126
	西墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.71 \times 10^{-2}$
	南墙	3.1	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	0.126
	东墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.71 \times 10^{-2}$
	屋顶	5.1	6.01	$1.08 \times 10^8$	$2.40 \times 10^{-7}$	$9.98 \times 10^{-4}$
	地面	5.6	5.26	$1.08 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{-6}$	$3.82 \times 10^{-3}$
	工作人员门	4.9	10	$1.08 \times 10^8$	$7.70 \times 10^{-11}$	$3.47 \times 10^{-7}$
	患者门	4.8	8	$1.08 \times 10^8$	$4.31 \times 10^{-9}$	$2.02 \times 10^{-5}$
	观察窗	4.6	10	$1.08 \times 10^8$	$7.70 \times 10^{-11}$	$3.93 \times 10^{-7}$

表 11-10 CT 部分散射辐射剂量率估算结果

机房名称	屏蔽位置	距离 (m)	等效铅当量 (mmPb)	$H_0$ (μSv/h)	透射因子 B	H (μSv/h)
SPECT-CT 机房 1	北墙	3.4	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.102
	西墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-2}$
	南墙	3.4	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.102
	东墙	4.6	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	$5.58 \times 10^{-2}$
	屋顶	5.1	6.01	$1.08 \times 10^8$	$2.40 \times 10^{-7}$	$2.99 \times 10^{-4}$
	地面	5.6	5.26	$1.08 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-3}$
	工作人员门	5.0	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-2}$
	患者门	4.8	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$2.11 \times 10^{-2}$
	观察窗	4.6	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$2.30 \times 10^{-2}$
SPECT-CT 机房 2	北墙	3.3	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.108
	西墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-2}$
	南墙	3.3	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	0.108

PET-CT 机房	东墙	4.6	3.58	$1.08 \times 10^8$	$3.64 \times 10^{-5}$	$5.58 \times 10^{-2}$
	屋顶	5.1	6.01	$1.08 \times 10^8$	$2.40 \times 10^{-7}$	$2.99 \times 10^{-4}$
	地面	5.6	5.26	$1.08 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-3}$
	工作人员门	5.0	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-2}$
	患者门	4.4	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$2.51 \times 10^{-2}$
	观察窗	4.6	4	$1.08 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{-5}$	$2.30 \times 10^{-2}$
PET-CT 机房	北墙	3.1	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$3.77 \times 10^{-2}$
	西墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-2}$
	南墙	3.1	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$3.77 \times 10^{-2}$
	东墙	4.6	4.14	$1.08 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-2}$
	屋顶	5.1	6.01	$1.08 \times 10^8$	$2.40 \times 10^{-7}$	$2.99 \times 10^{-4}$
	地面	5.6	5.26	$1.08 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-3}$
	工作人员门	4.9	10	$1.08 \times 10^8$	$7.70 \times 10^{-11}$	$1.04 \times 10^{-7}$
	患者门	4.8	8	$1.08 \times 10^8$	$4.31 \times 10^{-9}$	$6.06 \times 10^{-6}$
	观察窗	4.6	10	$1.08 \times 10^8$	$7.70 \times 10^{-11}$	$1.18 \times 10^{-7}$

表 11-11 总辐射剂量率估算结果

机房名称	屏蔽防护体名称	CT 泄漏剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	CT 散射剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	CT 剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	患者辐射剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	总辐射剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
SPECT-CT 机房 1	北墙	0.340	0.102	0.443	$2.47 \times 10^{-2}$	0.467
	西墙	$5.71 \times 10^{-2}$	$1.71 \times 10^{-2}$	$7.42 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-2}$	$8.42 \times 10^{-2}$
	南墙	0.340	0.102	0.443	$2.47 \times 10^{-2}$	0.467
	东墙	0.186	$5.58 \times 10^{-2}$	0.242	$1.35 \times 10^{-2}$	0.255
	屋顶	$9.98 \times 10^{-4}$	$2.99 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-3}$	$3.93 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-3}$
	地面	$3.82 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$	$4.96 \times 10^{-3}$	$9.28 \times 10^{-6}$	$4.97 \times 10^{-3}$
	工作人员门	$6.48 \times 10^{-2}$	$1.94 \times 10^{-2}$	$8.42 \times 10^{-2}$	$7.66 \times 10^{-5}$	$8.43 \times 10^{-2}$
	患者门	$7.03 \times 10^{-2}$	$2.11 \times 10^{-2}$	$9.14 \times 10^{-2}$	$8.31 \times 10^{-5}$	$9.15 \times 10^{-2}$
SPECT-CT 机房 2	北墙	0.361	0.108	0.470	$2.62 \times 10^{-2}$	0.496
	西墙	$5.71 \times 10^{-2}$	$1.71 \times 10^{-2}$	$7.42 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-2}$	$8.42 \times 10^{-2}$
	南墙	0.361	0.108	0.470	$2.62 \times 10^{-2}$	0.496
	东墙	0.186	$5.58 \times 10^{-2}$	0.242	$1.35 \times 10^{-2}$	0.255
	屋顶	$9.98 \times 10^{-4}$	$2.99 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-3}$	$3.93 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-3}$
	地面	$3.82 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$	$4.96 \times 10^{-3}$	$9.28 \times 10^{-6}$	$4.97 \times 10^{-2}$

	工作人员门	$6.48 \times 10^{-2}$	$1.94 \times 10^{-2}$	$8.42 \times 10^{-2}$	$7.66 \times 10^{-5}$	$8.43 \times 10^{-2}$
	患者门	$8.37 \times 10^{-2}$	$2.51 \times 10^{-2}$	0.109	$9.89 \times 10^{-5}$	0.109
	观察窗	$7.66 \times 10^{-2}$	$2.30 \times 10^{-2}$	$9.95 \times 10^{-2}$	$9.05 \times 10^{-5}$	$9.96 \times 10^{-2}$
PET-CT 机房	北墙	0.126	$3.77 \times 10^{-2}$	0.163	0.439	0.602
	西墙	$5.71 \times 10^{-2}$	$1.71 \times 10^{-2}$	$7.42 \times 10^{-2}$	0.199	0.273
	南墙	0.126	$3.77 \times 10^{-2}$	0.163	0.439	0.602
	东墙	$5.71 \times 10^{-2}$	$1.71 \times 10^{-2}$	$7.42 \times 10^{-2}$	0.199	0.273
	屋顶	$9.98 \times 10^{-4}$	$2.99 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-3}$	$6.84 \times 10^{-2}$	$6.97 \times 10^{-2}$
	地面	$3.82 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$	$4.96 \times 10^{-3}$	0.109	0.114
	工作人员门	$3.47 \times 10^{-7}$	$1.04 \times 10^{-7}$	$4.51 \times 10^{-7}$	0.731	0.731
	患者门	$2.02 \times 10^{-5}$	$6.06 \times 10^{-6}$	$2.63 \times 10^{-5}$	1.01	1.01
	观察窗	$3.93 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$5.11 \times 10^{-7}$	0.830	0.830

综上所述, 考虑患者辐射影响与射线装置 X 射线影响叠加效果后, 本项目屏蔽体外剂量率满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 及辐射函(2023) 20 号中控制区内工作人员居留因子小于 1/2 的区域不大于  $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 其他区域不大于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$  的要求。

#### 11.2.1.4 人员剂量估算

##### (1) 计算公式

人员受到的附加剂量可由下式计算得到:

$$H_E = H_R \times T \times t \times 10^{-3} \quad (11-9)$$

式中:

$H_E$  — 外照射附加剂量,  $\text{mSv}/\text{a}$ ;

$H_R$  — 辐射剂量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$t$  — 一年工作时间,  $\text{h}$ ;

$T$  — 居留因子, 关注点处保护目标活动的时间占总辐射影响时间的比例。

##### (2) 辐射工作人员附加剂量估算

###### ① 核医学科药物制备区域

核医学科药物制备区域回旋加速器操作间配备 1 名工作人员负责操作回旋加速器进行 PET 药物生产、标记和药物运输。操作人员在操作室远程操作, 与药物生产区域间隔较远, 受其辐射影响可忽略不计, 药物转运时间为 5min。

淋洗制备间配备 1 名工作人员负责  $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$  发生器和  $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$  发生器淋洗分装

及自制药物质控。

$^{99m}\text{Tc}$ 药物和 $^{68}\text{Ga}$ 药物淋洗制备、标记、分装时间为30min/次。药物质控总时间为5min。

### ②核医学科门诊诊疗区域

核医学科诊断区域配备在给药准备间配备2名给药/注射人员负责药物注射，在操作廊为每间PET-CT机房和SPECT-CT机房配备2名影像/摆位人员（4间机房共配备8人）负责指导摆位和影像检查。

注射：每日最多接诊44名PET患者和57名SPECT患者，药物注射时间为1min/人次，每次注射时间为1min，PET年注射时间为183.4h，SPECT年注射时间为237.5h。

检查摆位：PET扫描和SPECT扫描时间为15min/人次，CT扫描时间为1min/人次，摆位时间为1min/人次。考虑项目分期运行、设备检维修等情况，保守按每间机房每日最多接诊30人估算。每间机房患者影响时间为1875h/a，CT影响时间为125h/a，摆位时间为125h/a。

每次患者抢救约30min，每年最多2次，年抢救时间为1h。保守按 $^{11}\text{C}$ 诊断患者考虑，抢救时距患者1m处剂量率为 $35.2\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

### ③核医学科住院治疗区域

核医学科辐射治疗区域 $^{131}\text{I}$ 均为远程给药，对工作人员影响可忽略。甲功测定患者服药量很小，周围剂量率已小于本底水平，其环境影响可以忽略。治疗区域使用的其他核素均为 $\beta$ 核素，根据表11-4和表11-5的结论，其环境影响可以忽略。

每次患者抢救约30min，每年最多2次，年抢救时间为1h。保守按甲癌患者考虑，抢救时距患者1m处剂量率为 $431\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

核医学科辐射工作人员附加剂量见表11-12。

表 11-12 辐射工作人员附加剂量估算结果

岗位	剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	年受照时间	岗位轮班数	附加剂量 ( $\text{mSv}/\text{a}$ )
$^{99m}\text{Tc}$ 药物淋洗、标记、分装	$1.35 \times 10^{-2}$	125h	1	0.187
$^{68}\text{Ga}$ 药物淋洗、标记、分装	1.25	125h		
药物质控	1.37	20.9h		
药物转运	$1.35 \times 10^{-2}$	20.9h	1	$2.82 \times 10^{-4}$
PET药物注射	0.547	183.4h	1	0.100
SPECT药物注射	$7.66 \times 10^{-9}$	237.5h	1	$1.82 \times 10^{-9}$

PET检查 (PET-CT室)	0.830 (患者) $5.11 \times 10^{-7}$ (CT)	1875h 125h	2	0.778
PET检查 (PET-MR室)	1.61 (患者)	1875h	2	1.51
SPECT检查 (SPECT-CT室1)	9.95×10 <sup>-2</sup> (患者)	1875h	2	9.33×10 <sup>-2</sup>
	9.28×10 <sup>-6</sup> (CT)	125h		
SPECT检查 (SPECT-CT室2)	9.95×10 <sup>-2</sup> (患者)	1875h	2	9.33×10 <sup>-2</sup>
	9.28×10 <sup>-6</sup> (CT)	125h		
诊断患者抢救	35.2	1h	1	3.52×10 <sup>-2</sup>
住院患者抢救	431	1h	1	0.431

考虑患者抢救由对应场所辐射工作人员进行, 核医学科辐射工作人员所受附加剂量最大为1.51mSv/a, 叠加最大抢救剂量0.431mSv/a后为1.94mSv/a, 仍满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中规定的工作人员的职业照射剂量限值(20mSv/a)及本项目剂量约束值(5mSv/a)的要求。

### (3) 公众附加剂量估算

核医学科正常运行时对周围公众辐射影响见表 11-13。

表 11-13 公众成员年受照剂量估算结果

工作场所	关注点	患者辐射影响		居留因子	年有效剂量(mSv/a)	
		周围剂量当量率 ( $\mu$ Sv/h)	年受照射时间(h)			
负一层核医学科药物制备区域						
回旋加速器机房	上	地面绿化	0.425	125h	1/40	1.33×10 <sup>-3</sup>
一层核医学科门诊诊疗区域						
SPECT 注射后候诊室 1	上	静配中心大厅	7.86×10 <sup>-3</sup>	1875h	1/5	2.95×10 <sup>-3</sup>
	下	放疗科走廊	1.86×10 <sup>-2</sup>		1/5	6.98×10 <sup>-3</sup>
SPECT 注射后候诊室 2	上	静配中心大厅	7.86×10 <sup>-3</sup>		1/5	2.95×10 <sup>-3</sup>
	下	放疗科走廊	1.86×10 <sup>-2</sup>		1/5	6.98×10 <sup>-3</sup>
PET 注射后候诊室 1	上	配药间	6.75×10 <sup>-2</sup>		1/2	6.35×10 <sup>-2</sup>
PET 注射后候诊室 2	上	设备机房	6.75×10 <sup>-2</sup>		1/20	6.33×10 <sup>-3</sup>
PET 注射后 VIP 候诊室	上	设备机房	0.103		1/20	9.66×10 <sup>-3</sup>
PET-CT 机房	上	预留诊室	6.84×10 <sup>-2</sup> (患者)		1/2	6.41×10 <sup>-2</sup>
			1.30×10 <sup>-3</sup> (CT)		1/2	6.41×10 <sup>-2</sup>
	下	放疗科走廊	0.109 (患者)		1/5	8.13E-05
			4.96×10 <sup>-3</sup> (CT)		1/5	8.13E-05
PET-MR 机房	上	预留诊室	6.84×10 <sup>-2</sup> (患者)	1875h	1/2	4.09×10 <sup>-2</sup>

	下	停车场	0.109 (患者)	1875h	1/40	$1.24 \times 10^{-4}$
SPECT-CT 机房 1	上	静配中心大厅	3.93×10 <sup>-6</sup> (患者)	1875h	1/5	$6.41 \times 10^{-2}$
			1.30×10 <sup>-3</sup> (CT)	125h		
SPECT-CT 机房 2	上	配药间	3.93×10 <sup>-6</sup> (患者)	1875h	1	$5.11 \times 10^{-3}$
			1.30×10 <sup>-3</sup> (CT)	125h		
留观室	上	配电室	$7.80 \times 10^{-2}$	1875h	1/20	$1.47 \times 10^{-6}$
	下	停车场	0.124		1/40	$3.25 \times 10^{-5}$
<b>一层核医学科住院治疗区域</b>						
甲癌病房 1	上	静配中心大厅	$2.04 \times 10^{-2}$	2000*	1/5	$6.33 \times 10^{-2}$
	下	放疗科走廊	$1.38 \times 10^{-2}$		1/5	$4.36 \times 10^{-2}$
甲癌病房 2	西	走廊	0.633		1/20	$1.38 \times 10^{-2}$
	上	静配中心大厅	0.109		1/5	$6.44 \times 10^{-2}$
甲癌病房 3	下	设备机房	0.138		1/20	$1.61 \times 10^{-2}$
	上	静配中心大厅	0.161		1/5	$1.96 \times 10^{-3}$
甲癌病房 4	上	设备机房	0.161		1/20	$1.40 \times 10^{-3}$
注*: 肿瘤科研楼为医用建筑, 相邻楼层科室每日工作8h, 因此甲癌病房影响时间取2000h。						

核医学科周边公众所受附加剂量最大为  $6.44 \times 10^{-2}$ mSv/a, 满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 中规定的公众照射剂量限值 (1mSv/a) 及本项目剂量约束值 (0.1mSv/a) 的要求。评价范围内其他环境保护目标距本项目距离更远, 间隔的墙体等结构更多, 因此受到的辐射影响小于相邻区域, 也满足上述年剂量要求。

### 11.2.1.5 废弃物影响分析

#### (1) 放射性废气

本项目产生的放射性废气经管道收集，经活性炭过滤后引至肿瘤科研楼楼顶排放，对环境影响很小。

#### (2) 放射性废水

本项目产生的放射性废水根据半衰期长短分类收集暂存在核医学科配套衰变池内，满足暂存时限要求后排放至医院污水处理站处理，对环境影响很小。

#### (3) 放射性固体废物

本项目核医学科产生的放射性固体废物根据半衰期长短分别送至对应的放射性固体废物暂存间暂存衰变，满足清洁解控标准后送至医院医疗废物暂存间，最终交有资质单位处理，对环境影响很小。

### 11.2.2 后装机

#### 11.2.2.1 机房屏蔽体厚度核算

本项目后装机房内拟配置一台<sup>192</sup>Ir后装机，含<sup>192</sup>Ir放射源1枚，最大装源活度为 $3.7 \times 10^{11}$ Bq，产生的 $\gamma$ 射线平均能量为0.37MeV，源距地面高度1.0m。

依据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第3部分： $\gamma$ 射线源放射治疗机房》(GBZ/T201.3-2014)标准中的公式，估算本项目屏蔽设计是否符合要求。保守考虑，计算时将<sup>192</sup>Ir源当作裸源。

#### (1) 关注点的选取

后装机房应考虑治疗源 $4\pi$ 发射的 $\gamma$ 射线（即初级辐射）对墙和室顶的直接照射及其散射辐射在机房入口处的照射。图中红色虚线框区域为治疗源可能使用的区域，后装机移动时，放射源距西墙、南墙和迷路内墙最近距离取1m，放射源距北墙最近距离取1.8m，放射源距地面高度取1m。

后装机房辐射影响分析关注点设置详见图11-1、图11-2。

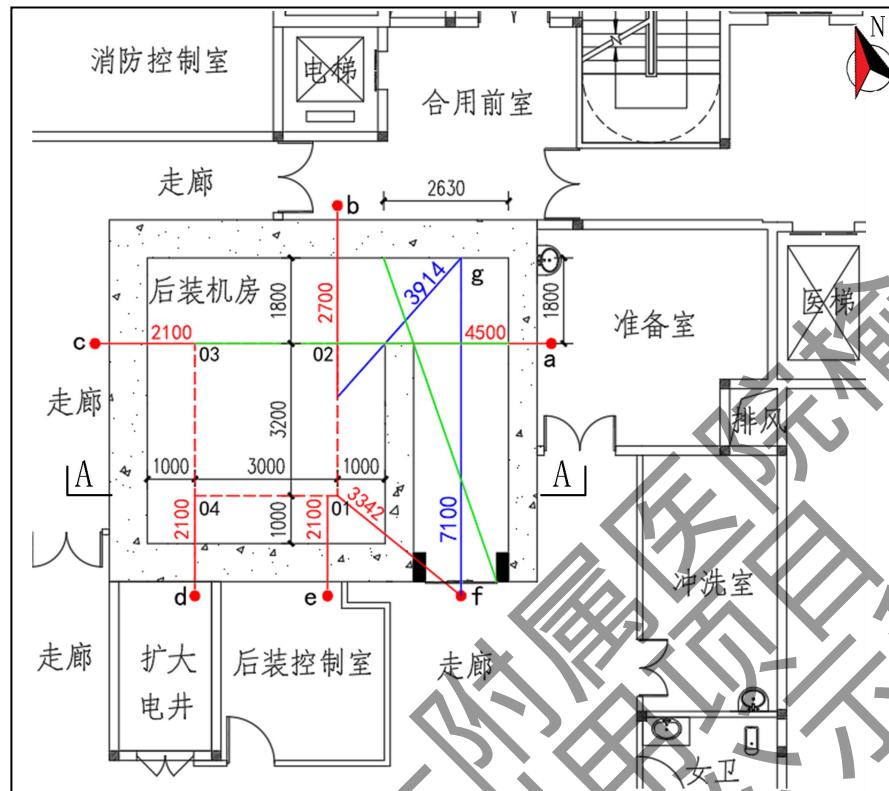


图 11-1 后装机房关注点设定示意图 (平面)

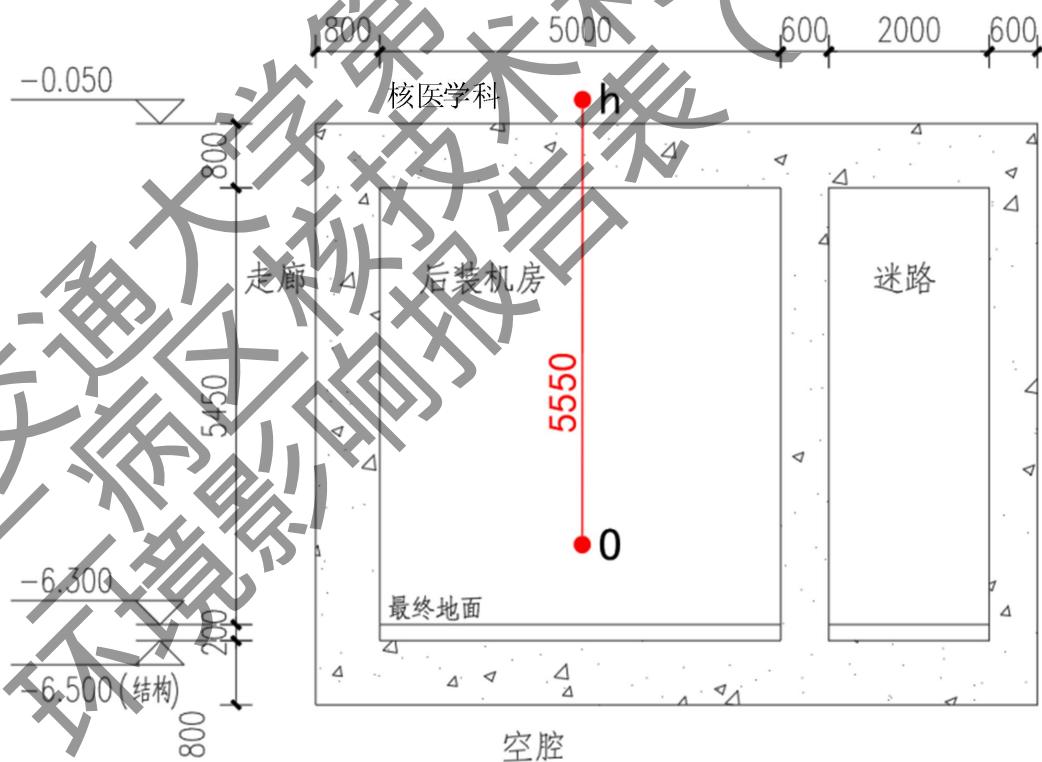


图 11-2 后装机房关注点设定示意图 (A-A 剖面)

(2) 关注点的剂量率参考控制水平

a) 使用放射治疗周工作负荷、关注点使用因子和居留因子，根据《放射治疗辐

射安全与防护要求》(HJ1198-2021) 6.1.4, 由以下周剂量参考控制水平 ( $H_c$ ) 求得关注点的导出剂量率参考控制水平  $\dot{H}_{c,d}$ :

放射治疗机房外控制区的工作人员,  $H_c \leq 100 \mu\text{Sv}/\text{周}$ ;

放射治疗机房外非控制区的人员,  $H_c \leq 5 \mu\text{Sv}/\text{周}$ 。

b) 按照关注点人员居留因子 (T) 的不同, 分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平  $\dot{H}_{c,max}$  按以下情况取值:

人员居留因子  $T > 1/2$  的场所: 最高剂量率参考控制水平  $\dot{H}_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

人员居留因子  $T \leq 1/2$  的场所: 最高剂量率参考控制水平  $\dot{H}_{c,max} \leq 10 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

c) 取 a)、b) 中较小者作为关注的剂量率参考控制水平 ( $H_c$ )。

◆根据GBZ/T201.3-2014中4.1剂量控制要求及附录A, 关注点的周剂量参考控制水平为  $H_c$  时, 该关注点的导出剂量率控制水平按公式11-10计算。

$$\dot{H}_{c,d} = H_c / (t \cdot U \cdot T) \quad (11-10)$$

式中:

$H_c$ —周参考剂量控制水平,  $\mu\text{Sv}/\text{周}$ ;

$t$ —治疗装置周治疗照射时间,  $\text{h}$ ; 每天接待放射治疗患者最多为20人, 每周工作5d, 每位患者的治疗时间6min, 周治疗照射时间为10h;

$U$ —关注位置方向照射的使用因子;

$T$ —人员在相应关注点驻留的居留因子, 取值参考HJ1198-2021附录A表A.1。

后装机房外关注点剂量率参考控制水平见表11-1。

表 11-14 后装机房关注点剂量率参考控制水平一览表

关注点	辐射类型	t	U	T	$H_c$ ( $\mu\text{Sv}/\text{周}$ )	$\dot{H}_{c,d}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) 计算值	$\dot{H}_{c,max}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	最终取值 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
a (东侧准备室)	初级	10	1	1	100	10	10	10
b (北侧走廊)	初级	10	1	1/5	5	2.5	10	2.5
c (西侧走廊)	初级	10	1	1/5	5	2.5	10	2.5
d (南侧扩大电井)	初级	10	1	1/20	5	10	10	10
e (南侧控制室)	初级	10	1	1	100	10	2.5	2.5

h (上方核医学科)	初级	10	1	1	5	0.5	2.5	0.5
f (防护门外)	初级、 散射	10	1	1/8	5	4	10	4

注：上方核医学科的居留因子保守取值为1。

### (3) 机房防护墙体屏蔽厚度核算

后装机房四周墙体和屋顶考虑初级辐射的直接照射。根据后装机房的平面布置图，得出放射源到各关注点的距离  $R$ 。

依据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第3部分： $\gamma$ 射线源放射治疗机房》(GBZ/T201.3-2014) 5.2 中公式(3)、(5)和(6)，本项目当关注点达到剂量率参考控制水平  $\dot{H}_c$  时，设计的屏蔽所需要的屏蔽透射因子  $B$  按公式(11-2)计算，按公式(11-3)估算所需要的有效屏蔽厚度  $X_e$  (cm)，再按照公式(11-4)获得屏蔽厚度  $X$  (cm)，计算结果与设计厚度进行比较，分析是否满足屏蔽厚度要求。

$$B = \frac{\dot{H}_c}{\dot{H}_o} \cdot \frac{R^2}{f} \quad (11-11)$$

$$X_e = TVL \cdot \log B^{-1} + (TVL_1 - TVL) \quad (11-12)$$

$$X = X_e \cdot \cos \theta \quad (11-13)$$

式中：

$B$ —屏蔽透射因子；

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

$\dot{H}_o$ —活度为A的放射源在距其1m处的剂量率， $\dot{H}_o = A \times K_r = 3.7 \times 10^5 \times 0.111 = 4.107 \times 10^4 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

$R$ —辐射源点至关注点的距离，m；

$f$ —对有用束为1，对泄漏辐射为0.01；

$\theta$ —为斜射角，即入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角；

$TVL_1$  (cm) 和  $TVL$  (cm) —为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度。根据GBZ/T201.3-2014的附录C表C.1，对 $^{192}\text{Ir}$ 放射源， $TVL_1 = TVL = 15.2\text{cm}$ ；

$X_e$ —有效屏蔽厚度，cm；

$X$ —墙体屏蔽厚度，cm。

后装机房墙体屏蔽厚度核算结果见表11-14。

表 11-15 后装机房墙体屏蔽厚度核算结果

关注点位	辐射类型	$\dot{H}_c$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	R (m)	B	计算厚度 (混凝土, cm)	设计厚度 (混凝土, cm)	结论
a (东侧准备室)	初级	10	4.50	$4.93 \times 10^{-3}$	35.07	60	满足
b (北侧走廊)	初级	2.5	2.70	$4.44 \times 10^{-4}$	50.96	60	满足
c (西侧走廊)	初级	2.5	2.10	$2.68 \times 10^{-4}$	54.28	60	满足
d (南侧扩大电井)	初级	10	2.10	$1.07 \times 10^{-3}$	45.13	60	满足
e (南侧控制室)	初级	2.5	2.10	$2.68 \times 10^{-4}$	54.28	60	满足
h (上方核医学科)	初级	0.5	5.55	$3.75 \times 10^{-4}$	45.05	80	满足

根据以上计算, 后装机机房墙体设计屏蔽厚度能满足防护要求。

### 11.2.2.2 机房防护门屏蔽厚度核算

(1) 机房入口处的散射辐射剂量  $\dot{H}$  按下式计算:

$$\dot{H} = \frac{A \cdot K_\gamma \cdot S_w \cdot \alpha_w}{R_1^2 \cdot R_2^2} \quad (11-14)$$

式中:

A—放射源的活度, 本项目后装源取  $3.7 \times 10^5 \text{ MBq}$ ;

$K_\gamma$ —放射源的空气比释动能率常数(或称  $K_\gamma$  常数)在屏蔽计算中以周围剂量当量作为空气比释动能的近似, 此时  $K_\gamma$  的单位记为  $\mu\text{Sv}/(\text{h} \cdot \text{MBq})$ ; 对  $^{192}\text{Ir}$  放射源,  $K_\gamma = 0.111 \mu\text{Sv}/(\text{h} \cdot \text{MBq})$ ;

$S_w$ —迷路内口墙的散射面积, 其为辐射源和机房入口共同可视见的墙区面积,

$$(2.63+1.8) \times 5.45 = 24.14 \text{ m}^2;$$

$\alpha_w$ —散射体的散射因子,  $\text{m}^2$ , GBZ/T201.3-2014 表 C.4 中 0.25MeV 时  $45^\circ$  入射  $0^\circ$  散射因子  $3.39 \times 10^{-2}$ ;

$R_1$ —辐射源点至散射体中心的距离, 3.91m;

$R_2$ —散射体中心至关注点的距离, 7.10m;

计算得机房入口g处 ( $O_3-h-g$ ) 的散射辐射剂量  $\dot{H} = 43.62 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

(2) 由于后装治疗过程中, 放射源外没有屏蔽, 因此只产生有用线束, 没有泄漏辐射。有用线束经迷路内墙屏蔽后在f处 ( $O_4-f$ ) 的剂量率按公式11-14计算。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \quad (11-15)$$

式中：

$\dot{H}_0$ —活度为 A 的放射源在距其 1m 处的剂量率,  $\dot{H}_0 = A \times K_r = 3.7 \times 10^5 \times 0.111 = 4.107 \times 10^4 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$K_r$ —放射源的空气比释动能率常数(或称  $K_r$  常数)在屏蔽计算中以周围剂量当量作为空气比释动能的近似, 此时  $K_r$  的单位记为  $\mu\text{Sv}/(\text{h} \cdot \text{MBq})$ ; 对  $^{192}\text{Ir}$  放射源,  $K_r = 0.111 \mu\text{Sv}/(\text{h} \cdot \text{MBq})$ ;

B—屏蔽透射因子, 根据 GBZ/T201.3-2014 的附录 C 表 C.1, 对  $^{192}\text{Ir}$  放射源,  $\text{TVL}_1 = \text{TVL} = 15.2 \text{cm}$ ;  $B = 10^{-(X_e + \text{TVL} - \text{TVL}_1)/\text{TVL}} = 10^{-(60/\cos 39^\circ + 15.2 - 15.2)/15.2} = 8.33 \times 10^{-6}$ ;

R—辐射源点至关注点的距离, 为 3.34m;

$f$ —一对有用线束为 1。

经计算, 有用线束经迷路内墙屏蔽后在 f 处的剂量率为  $H = 3.07 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}/\text{h}$  (小于  $4 \mu\text{Sv}/\text{h} \times 1/4 = 1 \mu\text{Sv}/\text{h}$ )

无防护门屏蔽时, 机房入口处的剂量率为  $43.62 + 3.07 \times 10^{-2} = 43.65 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

后装机房防护门所需要的屏蔽透射因子  $B = \dot{H}_c / \dot{H} = 4 \div 43.65 = 9.16 \times 10^{-2}$ , 迷路入口 f 处散射辐射能量约为 0.2MeV, 铅的 TVL 值为 5mm, 相应的铅厚度(X)为:  
 $X = \text{TVL} \cdot \log B^{-1} = 5.19 \text{mmPb}$ 。

根据医院提供的设计方案, 机房防护门为 8mmPb, 能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021)、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范-第3部分:  $\gamma$  射线源放射治疗机房》(GBZ/T201.3-2014) 相关要求。

### 11.2.2.3 机房屏蔽体外剂量率核算

(1) 根据 GBZ/T201.3-2014 的相关公式计算, 首先根据机房各屏蔽墙体的设计厚度 X (cm) 根据式 (11-15) 计算出有效厚度  $X_e$  (cm), 按照式 (11-16) 估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B, 再按照式 (11-17) 计算初级辐射在屏蔽墙体外关注点的剂量率见表 11-9。

$$X_e = X \cdot \sec \theta \quad (11-16)$$

$$B = 10^{-(X_e + \text{TVL} - \text{TVL}_1) / \text{TVL}} \quad (11-17)$$

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \quad (11-18)$$

式中：

$X_e$ —有效屏蔽厚度, cm;

$X$ —屏蔽厚度, cm;

$\theta$ —入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角;

$B$ —辐射屏蔽透射因子;

$TVL_1$  (cm) 和  $TVL$  (cm) —为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度。根据 GBZ/T201.3-2014 的附录 C 表 C.1, 对  $^{192}\text{Ir}$  放射源,  $TVL_1 = TVL = 15.2\text{cm}$ ;

$\dot{H}$ —关注点的剂量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$\dot{H}_0$ —活度为 A 的放射源在距其 1m 处的剂量率,  $\dot{H}_0 = A \times K_f = 3.7 \times 10^5 \times 0.111 = 4.107 \times 10^4 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$R$ —辐射源点至关注点的距离, m;

$f$ —对有用线束为 1。

后装机房外各关注点的初级辐射剂量率水平计算结果见表 11-16。

表 11-16 后装机房各关注点初级辐射剂量率预测结果

点位描述	辐射类型	X (cm 混凝土)	$\theta$ (°)	$X_e$ (cm)	R (m)	B	$\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
a (东侧准备室)	初级	60	0	60	4.50	$1.13 \times 10^{-4}$	0.23
b (北侧走廊)	初级	60	0	60	2.70	$1.13 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-2}$
c (西侧走廊)	初级	60	0	60	2.10	$1.13 \times 10^{-4}$	$5.08 \times 10^{-2}$
d (南侧扩大电井)	初级	60	0	94	2.10	$6.54 \times 10^{-7}$	$5.08 \times 10^{-2}$
e (南侧控制室)	初级	60	0	87	2.10	$1.89 \times 10^{-6}$	$5.08 \times 10^{-2}$
h (上方核医学科)	初级	80	0	65	5.55	$5.29 \times 10^{-5}$	$7.28 \times 10^{-3}$

由表 11-3 可知, 本项目后装机运行后, 机房实体屏蔽墙外各关注点处剂量率均满足各关注点剂量率参考控制水平, 符合《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)、《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020) 和《放射治疗机房的辐射屏蔽规范-第3部分:  $\gamma$  射线源放射治疗机房》(GBZ/T201.3-2014) 相关要求。

(2) 机房入口屏蔽前的剂量率为  $43.62 \mu\text{Sv}/\text{h}$ , 铅中的  $TVL$  值为  $5\text{mm}$ , 本项目后

装机房防护门设计为8mmPb，经计算防护门外30cm处的剂量率为 $43.65 \times 10^{-(8/5)} = 1.10 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ，满足防护门外剂量率参考控制水平 $4 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

#### 11.2.2.4 个人剂量估算

辐射工作人员与公众所照射的辐射年剂量按下式计算：

$$H = t \cdot T \cdot \dot{H} \cdot U \times 10^{-3} \quad (11-19)$$

式中：

H—辐射工作人员与公众受照射的辐射年剂量， $\text{mSv}/\text{a}$ ；

t—受照射时间， $\text{h}$ ；

T—居留因子，根据HJ1198-2021附录A表A.1取值；

$\dot{H}$ —关注点的周围剂量当量率， $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

U—使用因子。

##### (1) 后装机房外人员受照剂量

后装机计划每年治疗人数最大为5000人次，每人治疗时间约为6min，则操作人员年工作时间500h。

后装机房外关注点处的人员年有效剂量按公式11-10计算，计算参数和计算结果见表11-17。

表 11-17 后装机辐射工作人员及周边环境公众年附加剂量估算结果

点位描述	人员类型	最大周围剂量当量率( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	年出束时间h	居留因子T	使用因子U	年受照剂量( $\text{mSv}$ )	剂量约束值( $\text{mSv}/\text{a}$ )
a (东侧准备室)	职业人员	0.23	500	1	1	0.114	5
b (北侧走廊)	公众	$3.07 \times 10^{-2}$	500	1/5	1	$3.07 \times 10^{-3}$	0.1
c (西侧走廊)	公众	$5.08 \times 10^{-2}$	500	1/5	1	$5.08 \times 10^{-3}$	0.1
d (南侧扩大电井)	公众	$5.08 \times 10^{-2}$	500	1/20	1	$1.27 \times 10^{-3}$	0.1
e (南侧控制室)	职业人员	$5.08 \times 10^{-2}$	500	1	1	$2.54 \times 10^{-2}$	5
h (上方核医学科)	公众	$7.28 \times 10^{-3}$	500	1	1	$3.64 \times 10^{-3}$	0.1
f (防护门外)	公众	1.10	500	1/8	1	$6.88 \times 10^{-2}$	0.1

根据表11-17可知，后装机正常运行所致本项目辐射工作人员附加剂量最大为

0.139mSv/a。

机房周围公众年附加剂量最大为 $6.88 \times 10^{-2}$ mSv/a。低于本项目剂量约束值（公众人员不超过0.1mSv/a），满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)剂量限值相关要求。

#### （2）进入后装机房内的工作人员受照剂量

后装治疗前，辐射工作人员需要在闭源状态下进入后装机房内协助患者进行摆位等准备工作，在该过程会受到放射源的照射。辐射工作人员在准备室进行插管等准备工作时，后装机处于闭源状态，无需考虑其剂量影响。

辐射工作人员进入后装机房之前，必须确保放射源处于后装机的储源器中，并佩戴个人剂量报警仪进入机房。保守按辐射工作人员协助患者摆位及连接施源器时在机房内停留时间按2min计，年摆位时间166.7h，与工作储源器的平均距离按1m考虑。

根据建设单位的采购意向及提供的相关技术资料，后装机闭源状态下，距设备表面100cm处的泄漏辐射剂量率最大不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ ，据此估算储源容器铅当量不小于74mmPb。

经计算后装工作人员摆位过程剂量为0.167mSv/a。

综上所述，本项目后装机房辐射工作人员与机房外公众所受有效剂量均低于本项目剂量约束值（辐射工作人员不超过5mSv/a，公众人员不超过0.1mSv/a），满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)剂量限值相关要求，《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)剂量约束值要求。评价范围内其他环境保护目标距本项目距离更远，间隔的墙体等结构更多，因此受到的辐射影响小于相邻区域，也满足上述剂量要求。

### 11.2.2.5 废气影响分析

#### （一）臭氧

根据《辐射防护手册》（第三分册），假设在辐照期间无进行通风且臭氧无分解，臭氧在辐照室内均匀分布，则机房内臭氧产额由下式进行估算。

$$Q_0=2.28 \times 10^{-4} \cdot A \cdot G \cdot V^{1/3} \quad (11-20)$$

式中：

$Q_0$ —照射时间内臭氧产额，mg/h；

$A$ —放射源活度, 本项目 $^{192}\text{Ir}$ 源活度为10Ci;

$G$ —空气吸收100eV的电离辐射能量产生的臭氧分子数,  $\gamma$ 辐照室取6;

$V$ —机房体积, 本项目后装机房体积为 $234.79\text{m}^3$ ;

根据以上公式估算臭氧产额为 $0.08\text{mg}/\text{h}$ 。

项目机房内产生的臭氧一部分由动力排风装置排到室外, 另一部分自然分解。

机房内臭氧的平均浓度估算公式如下:

$$Q = \frac{Q_0 T}{V} (1 - e^{-t/T}) \quad (11-21)$$

式中:

$Q$ —后装机房内 $\text{O}_3$ 平衡浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$Q_0$ — $\text{O}_3$ 的化学产额,  $\text{mg}/\text{h}$ , 经上文计算后装机房为 $0.07\text{mg}/\text{h}$ ;

$t$ —照射时间;

$T$ —有效清除时间;

$V$ —治疗室体积,  $\text{m}^3$ ;

有效清除时间 $T$ 由下式计算:

$$T = \frac{T_v \cdot T_d}{T_v + T_d} \quad (11-22)$$

式中:  $T_d$ —臭氧的有效分解时间, 取 $0.83\text{h}$ ;

$T_v$ —换气一次所需时间, 后装机房容积为 $234.79\text{m}^3$ , 后装机房拟设置一个风量为 $5500\text{m}^3/\text{h}$ 的排风口, 则换气一次需要时间 $T_v$ 约为 $0.043\text{h}$ 。经计算, 有效清除时间 $T=0.04\text{h}$ 。

后装机单次治疗照射时间6min, 即 $t=0.1\text{h}$ , 代入公式 $Q=3.41 \times 10^{-5}\text{mg}/\text{m}^3$ , 低于《工作场所有害因素职业接触限值-第一部分: 化学有害因素》(GBZ2.1-2019) 中最高容许浓度 $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ 。

## (二) 氮氧化物

$\text{O}_3$ 容许浓度限值为 $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $\gamma$ 射线电离空气产生多种氮氧化物( $\text{NO}_x$ )中, 以 $\text{NO}_2$ 为主, 其产额约为 $\text{O}_3$ 的一半, 则浓度为 $1.70 \times 10^{-5}\text{mg}/\text{m}^3$ , 且工作场所 $\text{NO}_2$ 容许浓度限值远大于 $\text{O}_3$ 的容许浓度, 因此在 $\text{O}_3$ 浓度可以满足标准要求时,  $\text{NO}_x$ 的浓度也可以满足标准要求。

后装机房产生极少量的臭氧和氮氧化物经排风管道引至排风井排至外环境。后

装机房容积约234.79m<sup>3</sup>（含迷道），机房设置一个风量为5500m<sup>3</sup>/h的排风口，机房通风换气次数约为23次/h。因此，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中机房换气次数不小于4次/h的要求。对外环境影响较小。

#### 11.2.2.6 固体废物环境影响

项目更换的废<sup>192</sup>Ir放射源由供源单位回收，不在项目工作场所内存放，对周围环境影响很小。

#### 11.2.3 直线加速器

项目拟配置的医用电子直线加速器是可以开展X射线和电子线两种束流的放射治疗装置。因本项目拟配置的10MV直线加速器型号未定，结合市面流通的直线加速器机型，比较普遍使用的X射线能量档有6MV、10MV，等中心剂量率范围在400cGy/min~2400cGy/min之间，根据医院提供的资料和调研，目前市场上流通的10MV直线加速器，X射线能量10MV时等中心最大剂量率可达2400cGy/min，故本项目保守考虑按X射线能量10MV时等中心最大剂量率2400cGy/min进行计算。设备运行参数如下：等中心点（距靶约1m处）X线最大照射野为40cm×40cm，有用线束最大张角28°，X射线最大输出剂量率为2400cGy/min。X射线的泄漏率≤0.1%，等中心处距地面高度1295mm。

考虑到电子线治疗次数有限（工作负荷不足X射线治疗的1%），且电子线治疗过程中，电子线被机头、治疗床、人体组织等阻挡产生轫致辐射的能量和剂量均低于电子束撞击钨靶产生的X射线强度，如果X射线治疗模式下直线加速器机房及其防护门能够满足屏蔽防护要求，则电子线治疗模式下直线加速器机房及其防护门也能够满足屏蔽防护要求，因此本次评价回旋加速器按X射线治疗模式进行屏蔽防护计算，不再分析电子线的环境影响。

##### 11.2.3.1 主屏蔽宽度核算

###### （1）核算公式

主屏蔽墙宽度按GBZ/T201.1-2007中公式核算：

$$Y_p=2[(\alpha+SAD)\tan\theta+0.3] \quad (11-23)$$

式中：

$Y_p$ —机房有用射线束主屏蔽墙的宽度，m；

SAD—源轴距，m，项目取1m；

θ—治疗束的最大张角（相对束中的轴线）。项目拟配置的加速器治疗束可达到最大张角 $28^{\circ}$ ，项目θ值取 $14^{\circ}$ ；

α—等中心点至“墙”的距离，m，当主屏蔽墙向机房内凸时，“墙”指与主屏蔽相连接的次屏蔽墙（或顶）的内表面；当主屏蔽墙向机房外凸时，“墙”指主屏蔽墙（或顶）的外表面。

本项目两间直线加速器机房屋顶主屏蔽宽度一致，以直线加速器机房1的2-2剖面图为例，直线加速器机房主屏蔽宽度示意见图11-3和图11-4。

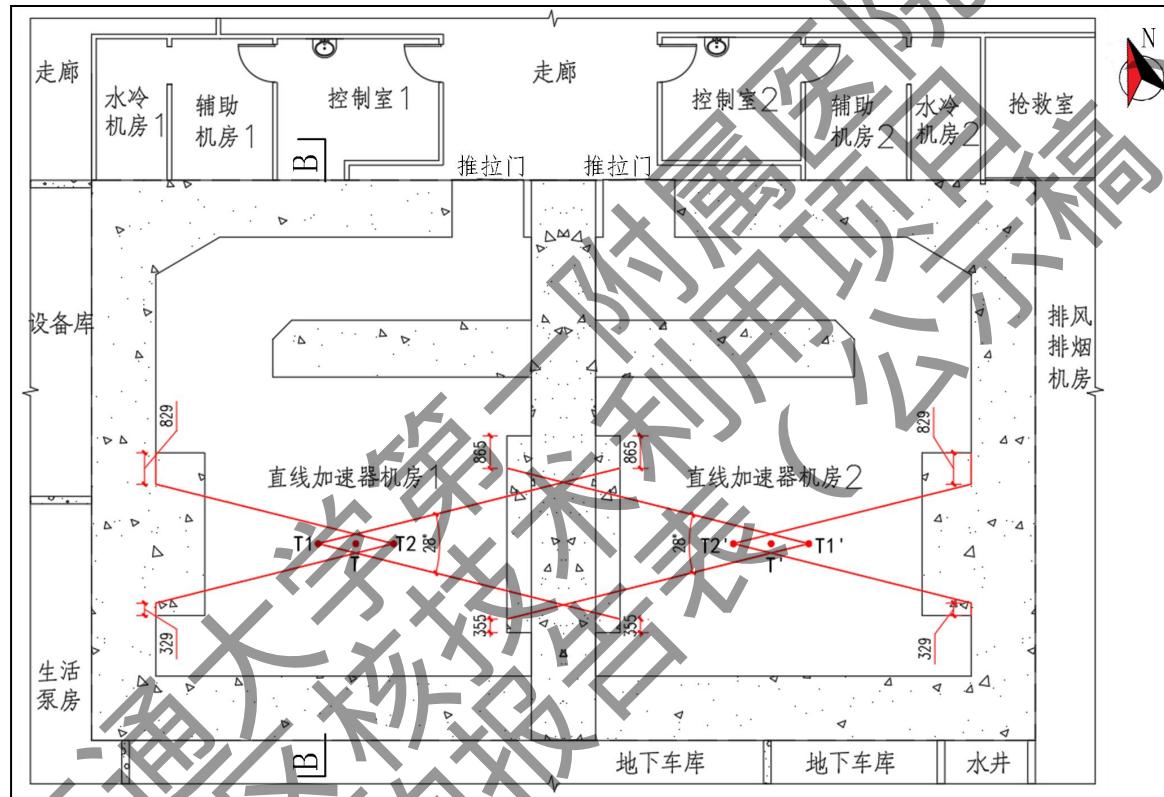


图 11-3 直线加速器机房主屏蔽区宽度示意图（平面）

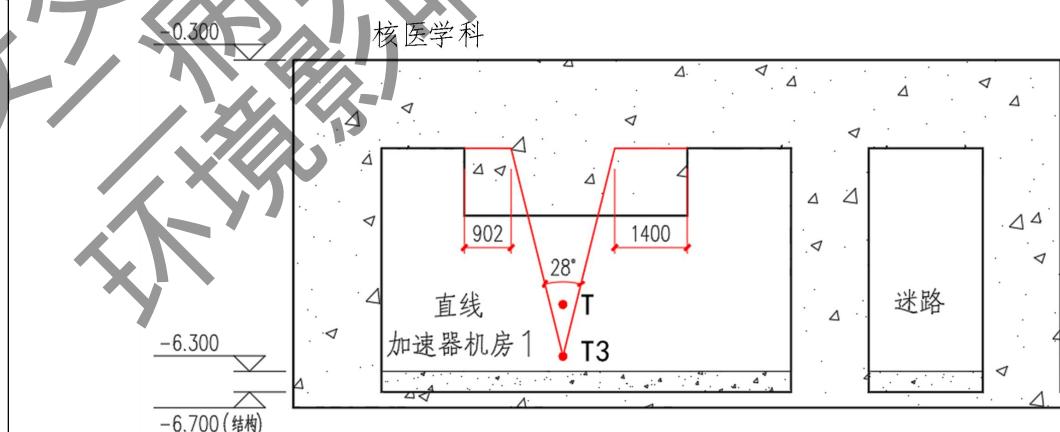


图 11-4 直线加速器机房1主屏蔽区宽度示意图（B-B剖面）

## (2) 核算结果

按照公式11-20, 项目直线加速器机房主屏蔽墙的宽度核算结果详见表11-18。

表 11-18 直线加速器机房主屏蔽墙的宽度核算结果一览表

项目	主屏蔽区位置	主屏蔽墙类型	等中心点至“墙”的距离 (m)	核算宽度 (m)	设计宽度 (m)	评价
直线加速器机房 1	西墙主屏蔽区	内凸	5.4	3.8	4.3	符合
	东墙主屏蔽区	外凸	7.0	4.6	5.2	符合
	屋顶主屏蔽区	内凸	3.0	2.6	4.3	符合
直线加速器机房 2	东墙主屏蔽区	内凸	5.4	3.8	4.3	符合
	西墙主屏蔽区	外凸	7.0	4.6	5.2	符合
	屋顶主屏蔽区	内凸	3.0	2.6	4.3	符合

根据表11-6可知, 项目直线加速器机房主屏蔽墙设计宽度均满足有用射线束屏蔽宽度要求。

### 11.2.3.2 X 射线辐射影响分析

#### (1) 关注点的选取

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第2部分: 电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011) 的要求, 在本项目直线加速器机房外设定关注点。从保守角度出发, 在直线加速器机房设计的尺寸厚度基础上, 假定加速器最大功率运行并针对关注点最不利情况对机房进行辐射屏蔽核算。

本项目直线加速器机房下方为空腔, 人员不可到达, 因此未设置关注点。

本项目直线加速器机房上方为核医学科, 居留因子保守取值为1。

本项目两间直线加速器机房 X 射线辐射影响分析关注点设定情况见表 11-19 和图 11-5~图 11-6。

表 11-19 直线加速器机房计算参考点和辐射线路

项目	屏蔽体	关注点	屏蔽类型	辐射线路	距离(m)
直线加速器机房 1	北墙 (迷路内墙+迷路外墙)	A	侧屏蔽墙, 泄漏辐射	T1-A	9.90
	北墙 (迷路外墙)	B	侧屏蔽墙, 泄漏辐射	T1-B	10.26
	西墙	C	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T-C、T2-T-C	8.51

		D	主屏蔽, 有用线束	T2-D	8.30
		E	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T-E、T2-T-E	8.08
	南墙	F	侧屏蔽墙, 泄漏辐射	T-F	5.50
	东墙	G	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T-G、T1-T-G	7.38
		H	主屏蔽, 有用线束	T1-H	8.30
		I	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T-I、T1-T-I	9.09
	屋顶	M	主屏蔽, 有用线束	T3-M	6.01
		N	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T3-T-N、T-N	7.34
		P	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T3-T-P、T-P	8.03
直线 加速器 机房 2	北墙 (迷路内墙+ 迷路外墙)	A'	侧屏蔽墙, 泄漏辐射	T'-A'	10.42
		B'	侧屏蔽墙, 泄漏辐射	T1-B'	10.26
	东墙	C'	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T'-C'、 T2'-T'-C'	8.51
		D'	主屏蔽, 有用线束	T2'-D'	8.30
		E'	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T'-E'、 T2'-T'-E'	8.08
	南墙	F'	侧屏蔽墙, 泄漏辐射	T'-F'	5.51
	西墙	G'	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T'-G'、 T1'-T'-G'	7.38
		H'	主屏蔽, 有用线束	T1'-H'	8.30
		I'	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T'-I'、T1'-T'-I'	9.09
	屋顶	M'	主屏蔽, 有用线束	T3'-M'	6.01
		N'	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T3'-T'-N'、 T'-N'	7.34
		P'	次屏蔽墙, 人体散射辐射和加速器泄漏辐射	T3'-T'-P'、 T'-P'	8.03

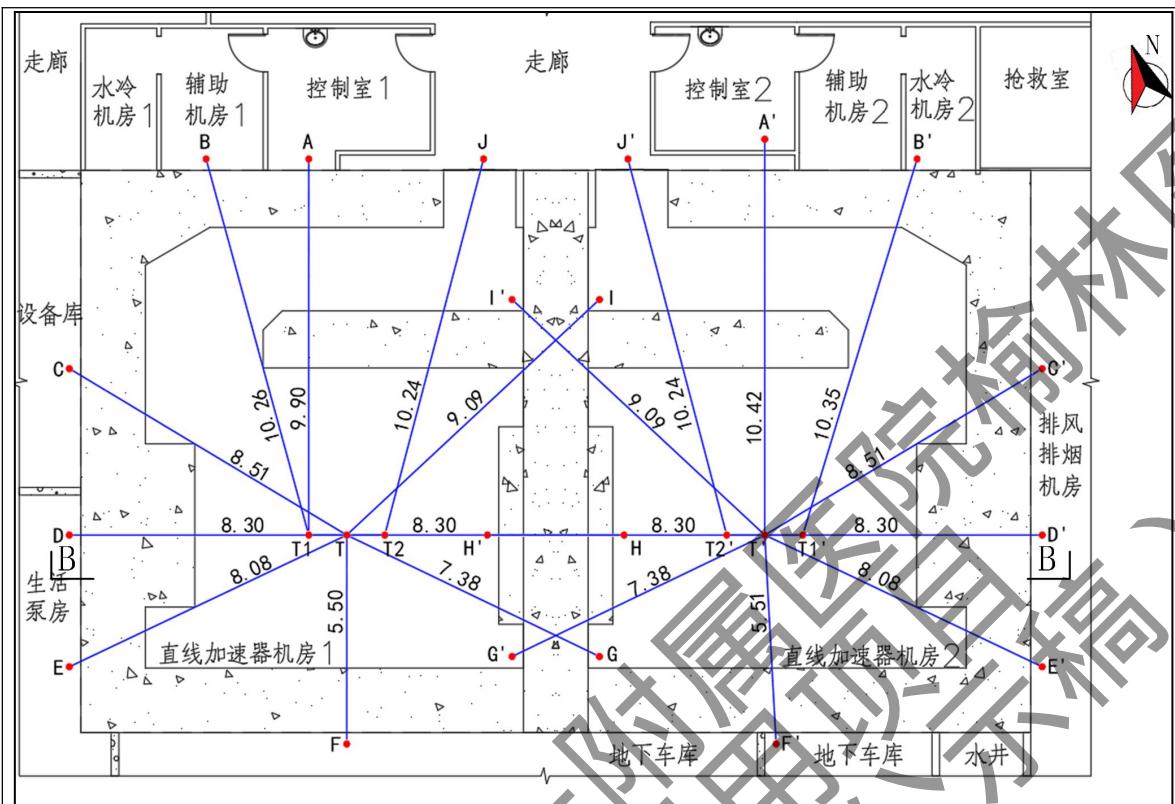


图 11-5 直线加速器机房关注点设定示意图（平面）

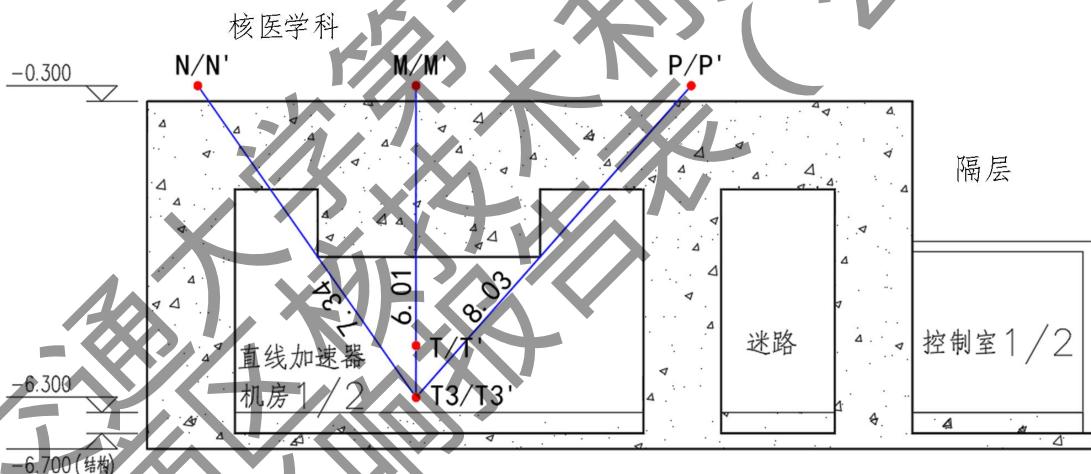


图 11-6 直线加速器机房关注点设定示意图 (B-B 剖面)

## (2) 关注点的导出剂量率参考控制水平

各关注点的剂量率参考控制水平由《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）附录A方法确定：

a) 使用放射治疗周工作负荷、关注点使用因子和居留因子(HJ1198-2021附录A)，由以下周剂量参考控制水平( $H_c$ )求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $H_{c,d}$ ：

放射治疗机房外控制区的工作人员,  $H_c \leq 100 \mu\text{Sv/周}$ ;

放射治疗机房外非控制区的人员,  $H_c \leq 5\mu\text{Sv/周}$ 。

b) 关注点的最高剂量率参考控制水平  $\dot{H}_{c,max}$  按以下情况取值:

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

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

c) 取 a)、b) 中较小者作为关注的剂量率参考控制水平 ( $\dot{H}_c$ )。

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

a、估算公式

◆根据 GBZ/T 201.2-2011 附录 A.2, 单一有用线束在关注点的导出剂量率控制水平按公式 11-21 计算。

$$\dot{H}_{c,d} = H_c / (t \cdot U \cdot T) \quad (11-24)$$

式中:

$H_c$ —周参考剂量控制水平,  $\mu\text{Sv}/\text{周}$ ;

$t$ —治疗装置周治疗照射时间,  $\text{h}$ ;

$U$ —有用线束向关注位置的方向照射的使用因子;

$T$ —人员在相应关注点驻留的居留因子, 居留因子取值参考 HJ1198-2021 附录 A 表 A.1。

◆根据 GBZ/T 201.2-2011 附录 A.2, 单一泄漏辐射在关注点的导出剂量率控制水平按公式 11-22 计算。

$$\dot{H}_{c,d} = H_c / (t \cdot N \cdot T) \quad (11-25)$$

式中:

$H_c$ —周参考剂量控制水平,  $\mu\text{Sv}/\text{周}$ ;

$t$ —治疗装置周治疗照射时间,  $\text{h}$ ;

$N$ —调强治疗时用于泄漏辐射的调强因子, 通常  $N=5$ ;

$T$ —人员在相应关注点驻留的居留因子。

◆对于与主屏蔽直接相连的次屏蔽区, 属于复合辐射, 根据 (GBZ/T 201.2-2011) 中附录 A2.2 复合辐射, 需考虑加速器的泄漏辐射和有用线束水平照射的患者散射辐射。以关注点最高剂量率参考控制水平的一半  $\dot{H}_{c,max}/2$  估算屏蔽患者散射辐射所需要

的屏蔽厚度，将式11-16中  $H_c$  以  $0.5H_c$  代替来估算屏蔽泄漏辐射所需要的屏蔽厚度，选取屏蔽厚度较厚者作为该关注点的屏蔽设计。相应屏蔽下，泄漏辐射和散射辐射在关注点的剂量率之和为该处的剂量控制值。

项目拟配置的 2 台直线加速器 X 线最大能量为 10MV，等中心处最大剂量率为 2400cGy/min；预计每台加速器日诊疗人数 30 人，周工作时间为 5d，平均每人治疗剂量为 4.5Gy（平均每人每野次治疗剂量 1.5Gy，平均每人治疗照射 3 野次），常规放射治疗下周工作负荷为 675Gy/周，则周治疗照射时间  $t=W/D_0=675/24=28.125\text{min}=0.47\text{h}$ ；调强放射治疗中，对泄漏辐射，周工作负荷为 3375Gy/周（当调强因子  $N=5$  时），调强下的工作时间  $N \cdot t=2.35\text{h}$ 。常规放射治疗下年治疗照射时间 23.5h，调强放射治疗中，年治疗照射时间 117.5h。X 射线的泄漏率  $\leq 0.1\%$ 。

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范-第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.2-2011）4.3.2.2 有用线束水平照射或向顶照射（使用因子  $U=0.25$ ）时人体的散射辐射，以等中心点 O 处为散射体中心，散射角  $\theta$  接近  $30^\circ$ ，屏蔽墙的斜射角与散射角相同……加速器的泄漏辐射，以位置 O 为中心，使用因子  $U=1$ ，屏蔽墙的斜射角接近  $30^\circ$ ，调强因子  $N=5$ 。依据该标准并结合医院现有直线加速器的实际工况，本项目直线加速器的有用线束使用因子取 1/4。

#### b、估算结果

根据公式11-21和公式11-22，直线加速器机房关注点剂量率参考控制水平详见表 11-20。

表 11-20 直线加速器机房关注点剂量率参考控制水平一览表

项目	关注点点位	射线类型	照射时间 t h	使用因子 U	调强因子 N	居留因子 T	$H_c$ ( $\mu\text{Sv}/\text{周}$ )	$\dot{H}_{c,d}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	$\dot{H}_{c,max}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	最终取值 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
直线 加速器 机房 1	控制室 1 (A)	泄漏	0.47	1	5	1	100	42.55	2.5	2.5
	辅助机房 1 (B)	泄漏	0.47	1	5	1/20	100	851.06	10	10
	设备库 (C)	泄漏	0.47	1	5	1/20	5/2	21.28	/	21.28
		散射	0.47	1/4	/	1/20	/	/	10/2	5
	生活泵房 (D)	有用线束	0.47	1/4	/	1/20	5	851.06	10	10
	生活泵房 (E)	泄漏	0.47	1	5	1/20	5/2	21.28	/	5
		散射	0.47	1/4	/	1/20	/	/	10/2	5
	地下车库 (F)	泄漏	0.47	1	5	1/40	5	85.11	10	10
	直线加速器机房 2 (G)	泄漏	0.47	1	5	1/2	100/2	42.55	/	42.55
		散射	0.47	1/4	/	1/2	/	/	10/2	5
	直线加速器机房 2 (H)	有用线束	0.47	1/4	/	1/2	100	1702.13	10	10
	直线加速器机房 2 迷路 内墙处 (I)	泄漏	0.47	1	5	1/2	100/2	42.55	/	42.55
		散射	0.47	1/4	/	1/2	/	/	10/2	5
	核医学科 (M)	有用线束	0.47	1/4	/	1	5	42.55	2.5	2.5
	核医学科 (N)	泄漏	0.47	1	5	1	5/2	1.06	/	1.06
		散射	0.47	1/4	/	1	/	/	2.5/2	1.25
	核医学科 (P)	泄漏	0.47	1	5	1	5/2	1.06	/	1.06
		散射	0.47	1/4	/	1	/	/	2.5/2	1.25
	防护门外 (J)	泄漏	0.47	1	5	1/8	5	17.02	10	10

		散射							
直线 加速器 机房 2	控制室 2 (A')	泄漏	0.47	1	5	1	100	42.55	2.5
	水冷机房 2 (B')	泄漏	0.47	1	5	1/20	100	851.06	10
	排风排烟机房 (C')	泄漏	0.47	1	5	1/20	5/2	21.28	/
		散射	0.47	1/4	/	1/20	/	/	10/2
	排风排烟机房 (D')	有用线束	0.47	1/4	/	1/20	5	851.06	10
	排风排烟机房 (E')	泄漏	0.47	1	5	1/20	5/2	21.28	/
		散射	0.47	1/4	/	1/20	/	/	10/2
	地下车库 (F')	泄漏	0.47	1	5	1/40	5	85.11	10
	直线加速器机房 1 (G')	泄漏	0.47	1	5	1/2	100/2	42.55	/
		散射	0.47	1/4	/	1/2	/	/	10/2
	直线加速器机房 1 (H')	有用线束	0.47	1/4	/	1/2	100	85.11	10
	直线加速器机房 1 迷路 内墙处 (I')	泄漏	0.47	1	5	1/2	100/2	42.55	/
		散射	0.47	1/4	/	1/2	/	/	10/2
	核医学科 (M')	有用线束	0.47	1/4	/	1	5	42.55	2.5
	核医学科 (N')	泄漏	0.47	1	5	1	5/2	1.06	/
		散射	0.47	1/4	/	1	/	/	2.5/2
	核医学科 (P')	泄漏	0.47	1	5	1	5/2	1.06	/
		散射	0.47	1/4	/	1	/	/	2.5/2
	防护门外 (J)	泄漏 散射	0.47	1	5	1/8	5	17.02	10
注：核医学科的居留因子保守取值为 1。									

### (3) 机房屏蔽墙体厚度核算

主屏蔽区仅考虑有用线束，侧屏蔽墙仅考虑泄漏辐射，计算结果与设计厚度进行比较，分析是否满足屏蔽厚度要求。与主屏蔽区相连的次屏蔽区需考虑泄漏辐射和患者一次散射辐射的复合作用，分别计算其所需屏蔽厚度，取较厚者。

有用线束和泄漏辐射屏蔽所需要的透射因子B按公式（11-17）计算，散射辐射的透射因子按公式（11-18）进行计算，再按公式（11-19）估算所需的有效屏蔽厚度 $X_e$ (cm)，然后按照公式（11-20）获得屏蔽厚度。

$$B = \frac{\dot{H}_c}{\dot{H}_0} \cdot \frac{R^2}{f} \quad (11-26)$$

$$B = \frac{\dot{H}_c \cdot R_s^2}{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F / 400)} \quad (11-27)$$

$$X_e = TVL \cdot \lg B^{-1} + (TVL_1 - TVL) \quad (11-28)$$

$$X = X_e \cdot \cos \theta \quad (11-29)$$

式中：

$B$ —屏蔽透射因子；

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

$\dot{H}_0$ —加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶1m处的最高剂量率，本项目为 $1.44 \times 10^9 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ；

$R$ —辐射源点至关注点的距离，m；

$f$ —对有用束为1，对泄漏辐射为0.001；

$R_s$ —患者（位于等中心点）至关注点的距离，m；

$\alpha_{ph}$ —与X射线的MV值及散射角有关，患者 $400\text{cm}^2$ 面积上垂直入射X线散射至距其1m（关注点方向）处的剂量比例，又称 $400\text{cm}^2$ 面积上的散射因子。10MV下散射角 $30^\circ$ 时， $\alpha_{ph}$ 取 $3.18 \times 10^{-3}$ ；散射角 $20^\circ$ 时， $\alpha_{ph}$ 取 $5.79 \times 10^{-3}$ 。

$F$ —治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积， $\text{cm}^2$ 。项目治疗最大照射野为 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ ，则 $F$ 取值 $1600\text{cm}^2$ ；

$\theta$ —斜射角，即入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角；

$TVL_1$ 、 $TVL$ —辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层；根据GBZ/T201.2-2011附录B表B.1和表B.4，10MV医用电子直线加速器有用束在混凝土什值层为 $TVL_1=41\text{cm}$ ， $TVL=37\text{cm}$ ； $90^\circ$ 泄漏辐射在混凝土中的什值层为 $TVL_1=35\text{cm}$ ， $TVL=31\text{cm}$ ；患者散射辐射（按 $30^\circ$ 散射角）在混凝土中的什值层为 $TVL_1=28\text{cm}$ ， $TVL=28\text{cm}$ 。

$X_e$ —有效屏蔽厚度， $\text{cm}$ ；

$X$ —墙体屏蔽厚度， $\text{cm}$ 。

将相关参数代入公式进行计算，结果见表 11-21。

表 11-21 直线加速器治疗模式下机房四周墙体屏蔽厚度核算

关注点点位		距离 (m)	$\dot{H}_c$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	$\dot{H}_0$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	B	计算厚度 ( $\text{cm}$ )	设计厚度 ( $\text{cm}$ )	结论	
直线 加速器 机房 1	A	9.90	2.5	$1.44 \times 10^9$	$1.70 \times 10^{-4}$	120.84	300 (迷路外墙 150+迷路内墙 150)	满足	
	B	10.26	10	$1.44 \times 10^9$	$7.31 \times 10^{-4}$	97.77	150	满足	
	C	8.51	5 (泄漏)	$1.44 \times 10^9$	$2.51 \times 10^{-4}$	99.08	112.90	170	满足
		8.51	5 (散射)	$1.44 \times 10^9$	$1.98 \times 10^{-5}$	112.90			
	D	8.30	10	$1.44 \times 10^9$	$4.78 \times 10^{-7}$	237.85	300	满足	
	E	8.08	5 (泄漏)	$1.44 \times 10^9$	$2.27 \times 10^{-4}$	106.02	127.12	170	满足
		8.08	5 (散射)	$1.44 \times 10^9$	$9.79 \times 10^{-6}$	127.12			
	F	5.50	10	$1.44 \times 10^9$	$2.10 \times 10^{-4}$	118.01	170	满足	
	G	7.38	5 (泄漏)	$1.44 \times 10^9$	$1.89 \times 10^{-4}$	107.34	128.05	170	满足
		7.38	5 (散射)	$1.44 \times 10^9$	$8.17 \times 10^{-6}$	128.05			
	H	8.30	10	$1.44 \times 10^9$	$4.78 \times 10^{-7}$	237.85	300		
	I	9.09	5 (泄漏)	$1.44 \times 10^9$	$2.87 \times 10^{-4}$	83.24	95.16	170	满足
		9.09	5 (散射)	$1.44 \times 10^9$	$5.31 \times 10^{-5}$	95.16			
	M	6.01	2.5	$1.44 \times 10^9$	$6.27 \times 10^{-8}$	270.50	300	满足	
	N	7.34	1.06	$1.44 \times 10^9$	$3.97 \times 10^{-5}$	115.05	124.65	170	满足

直线 加速器 机房 2	P	(泄漏)						
		7.34 (散射)	1.25 $1.44 \times 10^9$	$3.68 \times 10^{-6}$	124.65			
		8.03 (泄漏)	1.06 $1.44 \times 10^9$	$4.75 \times 10^{-5}$	102.58	111.46	170	满足
		8.03 (散射)	1.25 $1.44 \times 10^9$	$4.40 \times 10^{-6}$	111.46			
	A'	10.42	2.5	$1.44 \times 10^9$	$1.89 \times 10^{-4}$	119.47		300 (迷路外墙 150+迷路内墙 150)
		10.35	10	$1.44 \times 10^9$	$7.44 \times 10^{-4}$	96.80		150
	C'	8.51 (泄漏)	5 $1.44 \times 10^9$	$2.51 \times 10^{-4}$	99.08	112.90	170	满足
		8.51 (散射)	5 $1.44 \times 10^9$	$1.98 \times 10^{-5}$	112.90			
	D'	8.30	10	$1.44 \times 10^9$	$4.78 \times 10^{-7}$	237.85		300
		8.08 (泄漏)	5 $1.44 \times 10^9$	$2.27 \times 10^{-4}$	106.02	127.12	170	满足
	E'	8.08 (散射)	5 $1.44 \times 10^9$	$9.79 \times 10^{-6}$	127.12			
		5.51	10	$1.44 \times 10^9$	$2.11 \times 10^{-4}$	117.80		170
	G'	7.38 (泄漏)	5 $1.44 \times 10^9$	$1.89 \times 10^{-4}$	107.34	128.05	170	满足
		7.38 (散射)	5 $1.44 \times 10^9$	$8.17 \times 10^{-6}$	128.05			
	H'	8.30	10	$1.44 \times 10^9$	$4.78 \times 10^{-7}$	237.85		300
		9.09 (泄漏)	5 $1.44 \times 10^9$	$2.87 \times 10^{-4}$	83.24	95.16	170	满足
	I'	9.09 (散射)	5 $1.44 \times 10^9$	$2.26 \times 10^{-5}$	95.16			
		6.01	2.5	$1.44 \times 10^9$	$6.27 \times 10^{-8}$	270.50		300
	N'	7.34 (泄漏)	1.06 $1.44 \times 10^9$	$3.97 \times 10^{-5}$	115.05	124.65	170	满足
		7.34 (散射)	1.25 $1.44 \times 10^9$	$3.68 \times 10^{-6}$	124.65			
	P'	8.03 (泄漏)	1.06 $1.44 \times 10^9$	$4.75 \times 10^{-5}$	102.58	111.46	170	满足
		8.03 (散射)	1.25 $1.44 \times 10^9$	$4.40 \times 10^{-6}$	111.46			

注: 结合医院提供的设计图纸, B 处斜射角 15°, B' 处斜射角 17°, C/C' 处斜射角 31°, E/E' 处斜射角 25°, F' 处斜射角 3°, G/G' 处斜射角 26°, I/I' 处斜射角 43°, N/N' 处斜射角 35°, P/P' 处斜射角 42°。

#### (4) 机房屏蔽墙体周围剂量当量率估算

根据机房屏蔽墙体的设计厚度,首先按公式(11-29)估算有效厚度,再按公式(11-30)估算屏蔽物质的屏蔽透射因子B;有用线束或泄漏辐射在关注点处的剂量率按公式(11-31)计算;患者一次散射辐射在关注点处的剂量率按公式(11-32)计算。

$$X_e = X \cdot \sec \theta \quad (11-30)$$

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1) / TVL} \quad (11-31)$$

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \quad (11-32)$$

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F / 400)}{R_s^2} \cdot B \quad (11-33)$$

式中:

$\theta$ —斜射角,即入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角。

TVL<sub>1</sub>、TVL—辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层;

$\dot{H}_0$ —加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶1m处的最高剂量率,项目为 $1.44 \times 10^9 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ;

R—辐射源点至关注点的距离, m;

B—屏蔽透射因子;

$f$ —对有用束为1,对90°泄漏辐射为0.001;

$\alpha_{ph}$ —与X射线的MV值及散射角有关,患者400cm<sup>2</sup>面积上垂直入射X射线散射至距其1m(关注点方向)处的剂量比例;

$R_s$ —患者(位于等中心点)至关注点的距离, m;

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积, cm<sup>2</sup>。项目治疗最大照射野为40cm×40cm,则F取值1600cm<sup>2</sup>。

直线加速器机房屏蔽墙体外周围剂量当量率结果详见表11-22。

表 11-22 项目直线加速器机房屏蔽墙体周围剂量当量率估算结果一览

关注点点位		辐射防护实体屏蔽材料和规格	$\theta$	辐射防护有效厚度(cm)	什值层	屏蔽透射因子 B	辐射源点/等中心点至关注点的距离(m)	$f$	$\alpha_{ph}$	关注点辐射剂量率(μSv/h)	控制值(μSv/h)	结论
直线加速器机房 1	控制室 1 (A)	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm	$2.83 \times 10^{-10}$	9.90	0.001	/	$4.16 \times 10^{-6}$	2.5	满足
	辅助机房 1(B)	150cm 混凝土	15°	155.3	TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm	$1.32 \times 10^{-5}$	10.26	0.001	/	0.18	10	满足
	设备库 (C)	170cm 混凝土	31°	198.3	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: $5.39 \times 10^{-7}$ 散射: $8.26 \times 10^{-8}$	8.51	0.001	$3.18 \times 10^{-3}$ (按 30°取值)	泄漏: $1.07 \times 10^{-2}$ 散射: $2.09 \times 10^{-2}$ 合计: $3.16 \times 10^{-2}$	5	满足
	生活泵房 (D)	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =41cm TVL=37cm	$1.00 \times 10^{-8}$	8.30	1	/	0.21	10	满足
	生活泵房 (E)	170cm 混凝土	25°	187.6	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: $1.20 \times 10^{-6}$ 散射: $2.00 \times 10^{-7}$	8.08	0.001	$5.79 \times 10^{-3}$ (按 20°取值)	泄漏: $2.64 \times 10^{-2}$ 散射: 0.10 合计: 0.13	5	满足
	地下车库 (F)	170cm 混凝土	0°	170	TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm	$4.42 \times 10^{-6}$	5.50	0.001	/	0.21	10	满足
	直线加速器机房 2 (G)	170cm 混凝土	25°	187.6	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: $1.20 \times 10^{-6}$ 散射: $2.00 \times 10^{-7}$	7.38	0.001	$5.79 \times 10^{-3}$ (按 20°取值)	泄漏: $3.17 \times 10^{-2}$ 散射: 0.12 合计: 0.15	5	满足
	直线加速器机房 2 (H)	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =41cm TVL=37cm	$1.00 \times 10^{-8}$	8.30	1	/	0.21	10	满足
	直线加速器机房 2 迷路内墙处 (I)	170cm 混凝土	43°	232.4	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: $4.27 \times 10^{-8}$ 散射: $4.99 \times 10^{-9}$	9.09	0.001	$1.35 \times 10^{-3}$ (按 45°取值)	泄漏: $7.45 \times 10^{-4}$ 散射: $4.70 \times 10^{-4}$ 合计: $1.21 \times 10^{-3}$	5	满足

	核医学科 (M)	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =41cm TVL=37cm	1.00×10 <sup>-8</sup>	6.01	1	/	0.40	2.5	满足
	核医学科 (N)	170cm 混凝土	35°	207.5	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: 2.72×10 <sup>-7</sup> 散射: 3.87×10 <sup>-8</sup>	7.34	0.001	3.18×10 <sup>-3</sup> (按 30°取值)	泄漏: 7.27×10 <sup>-3</sup> 散射: 1.32×10 <sup>-2</sup> 合计: 2.04×10 <sup>-2</sup>	1.06	满足
	核医学科 (P)	170cm 混凝土	41°	225.3	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: 7.29×10 <sup>-8</sup> 散射: 9.02×10 <sup>-9</sup>	8.03	0.001	3.18×10 <sup>-3</sup> (按 30°取值)	泄漏: 1.63×10 <sup>-3</sup> 散射: 2.56×10 <sup>-3</sup> 合计: 4.19×10 <sup>-3</sup>	1.06	满足
直线 加速器 机房 2	控制室 2 (A')	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm	2.83×10 <sup>-10</sup>	10.42	0.001	/	3.75×10 <sup>-6</sup>	2.5	满足
	水冷机房 2 (B')	150cm 混凝土	17°	156.9	TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm	1.17×10 <sup>-5</sup>	10.35	0.001	/	0.16	10	满足
	排风排烟机房 (C')	170cm 混凝土	31°	198.3	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: 5.39×10 <sup>-7</sup> 散射: 8.26×10 <sup>-8</sup>	8.51	0.001	3.18×10 <sup>-3</sup> (按 30°取值)	泄漏: 1.07×10 <sup>-2</sup> 散射: 2.09×10 <sup>-2</sup> 合计: 3.16×10 <sup>-2</sup>	5	满足
	排风排烟机房 (D')	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =41cm TVL=37cm	1.00×10 <sup>-8</sup>	8.30	1	/	0.21	10	满足
	排风排烟机房 (E')	170cm 混凝土	25°	187.6	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: 1.20×10 <sup>-6</sup> 散射: 2.00×10 <sup>-7</sup>	8.08	0.001	5.79×10 <sup>-3</sup> (按 20°取值)	泄漏: 2.64×10 <sup>-2</sup> 散射: 0.10 合计: 0.13	5	满足
	地下车库 (F')	170cm 混凝土	3°	300	TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm	4.34×10 <sup>-6</sup>	5.51	0.001	/	0.21	10	满足
	直线加速器机	170cm 混凝土	25°	232.4	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm	泄漏: 1.20×10 <sup>-6</sup> 散射: 2.00×10 <sup>-7</sup>	7.38	0.001	5.79×10 <sup>-3</sup> (按 20°取值)	泄漏: 3.17×10 <sup>-2</sup> 散射: 0.12	5	满足

房 1 (G')				TVL=31cm 散射: TVL=28cm					合计: 0.15		
直线加速器机房 1 (H')	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =41cm TVL=37cm	1.00×10 <sup>-8</sup>	8.30	1	/	0.21	10	满足
直线加速器机房 1 迷路内墙处 (I')	170cm 混凝土	43°	232.4	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: 4.27×10 <sup>-8</sup> 散射: 4.99×10 <sup>-9</sup>	9.09	0.001	3.18×10 <sup>-3</sup> (按 30°取值)	泄漏: 7.45×10 <sup>-4</sup> 散射: 1.11×10 <sup>-3</sup> 合计: 1.85×10 <sup>-3</sup>	5	满足
核医学科 (M')	300cm 混凝土	0°	300	TVL <sub>1</sub> =41cm TVL=37cm	1.00×10 <sup>-8</sup>	6.01	1	/	0.40	2.5	满足
核医学科 (N')	170cm 混凝土	35°	207.5	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: 2.72×10 <sup>-7</sup> 散射: 3.87×10 <sup>-8</sup>	7.34	0.001	3.18×10 <sup>-3</sup> (按 30°取值)	泄漏: 7.27×10 <sup>-3</sup> 散射: 1.32×10 <sup>-2</sup> 合计: 2.04×10 <sup>-2</sup>	1.06	满足
核医学科 (P')	170cm 混凝土	41°	225.3	泄漏: TVL <sub>1</sub> =35cm TVL=31cm 散射: TVL=28cm	泄漏: 7.29×10 <sup>-8</sup> 散射: 9.02×10 <sup>-9</sup>	8.03	0.001	3.18×10 <sup>-3</sup> (按 30°取值)	泄漏: 1.63×10 <sup>-3</sup> 散射: 2.56×10 <sup>-3</sup> 合计: 4.19×10 <sup>-3</sup>	1.06	满足

注: 根据 NCRP151 有关资料, 10MV 医用电子直线加速器有用束在混凝土什值层为 TVL<sub>1</sub>=41cm, TVL=37cm; 90°泄漏辐射在混凝土中的什值层为 TVL<sub>1</sub>=35cm, TVL=31cm; 30°散射辐射在混凝土中的什值层为 TVL<sub>1</sub>=28cm, TVL=28cm。

### 11.2.3.3 防护门 X 射线防护能力分析

本项目两间直线加速器机房尺寸相同，拟安装使用的医用电子直线加速器技术参数一致，因此以直线加速器机房 1 为例估算机房迷路入口防护门处的辐射剂量率。

由于项目医用电子直线加速器有用线束不向迷路内墙照射，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.2-2011），有用线束不向迷路内墙照射时，直线加速器机房 1 迷路入口防护门处（J 点）的辐射剂量率主要考虑如下：

1) 人体受有用线束照射时，散射至 K 点的辐射并再次受到墙的两次散射至 L 处的辐射（T2-T-K-L-J）；

2) 至 K 点的泄漏辐射受墙散射至 J 处的辐射（T2-K-L-J）；

3) 有用线束穿出人体达到位置 Q，受主屏蔽墙的散射至 R 处迷路外墙再次散射，到达 J 处的辐射（T2-Q-R-L-J）；

在估算 J 处的辐射剂量率时，以加速器向 D 方向水平照射时的 1) 项为上述三项之和的近似估计，通常可忽略 2)、3) 项。

4) 还需考虑加速器的泄漏辐射经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 J 处的辐射剂量（T2-J）。

本项目直线加速器机房 1 迷路入口防护门处（J 点）考虑的辐射情况见表 11-23，辐射路径示意见图 11-7。

表 11-23 直线加速器机房迷路入口处考虑的辐射

机房	屏蔽体	关注点	关注点考虑的辐射	路径	距离（m）
直线 加速器 机房 1	防护门	J	人体受有用线束照射时，散射至 K 点后，再次受到墙的两次散射辐射至 L 处的辐射	T2-T-K-L-J	T-K: 8.83 K-L: 8.60 L-J: 2.81
			至 K 点的泄漏辐射受墙散射至 J 处的辐射	T2-K-L-J (可忽略)	/
			有用线束穿出人体达到位置 Q，受主屏蔽墙的散射至 R 处迷路外墙再次散射，到达 J 处的辐射	T2-Q-R-L-J (可忽略)	/
			泄漏辐射经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 J 处的辐射	T2-J	10.24

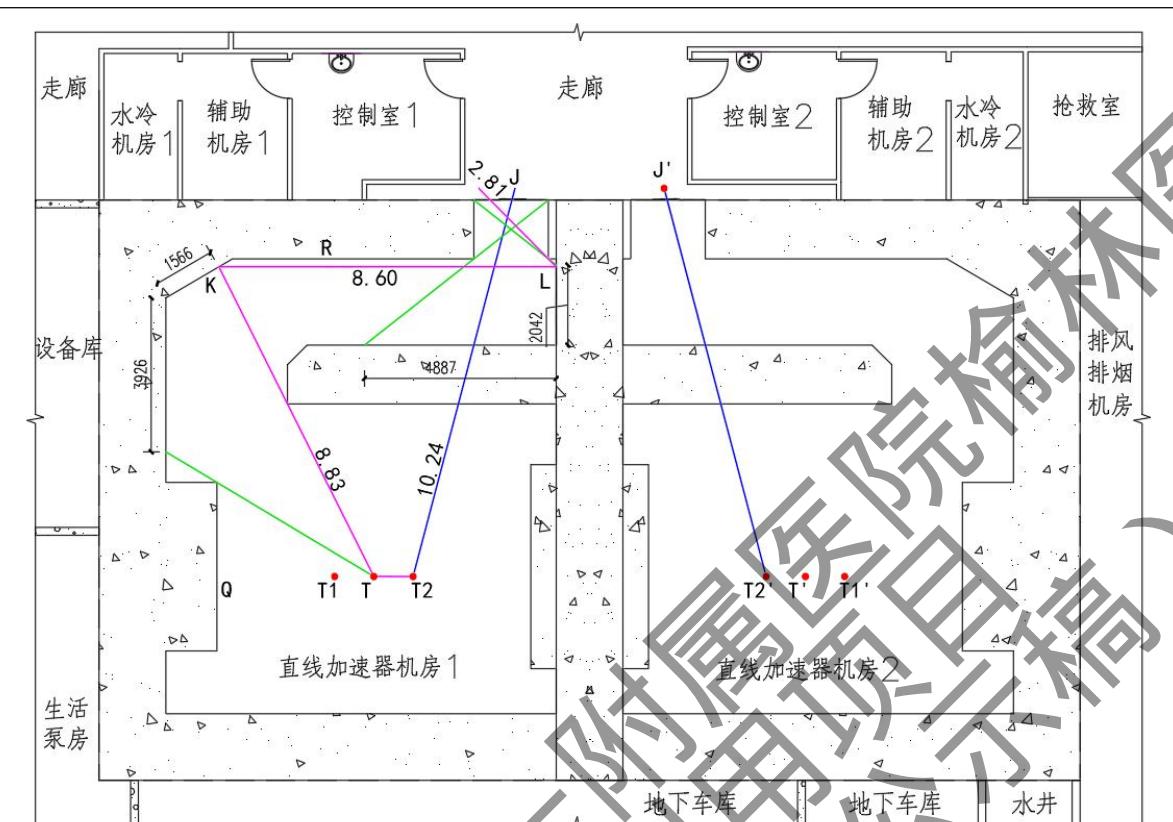


图 11-7 直线加速器机房防护门处辐射路径示意图

①机房的防护门外散射辐射剂量按公式 11-27 计算 (路径 T2-T-K-L-J)

$$\dot{H}_J = \frac{\alpha_{ph} \cdot F/400}{R_1^2} \cdot \frac{\alpha_2 \cdot A}{R_2^2} \cdot \frac{\alpha_3 \cdot A_1}{R_3^2} \cdot \dot{H}_0 \quad (11-34)$$

式中：

$\dot{H}_J$ —J 点的散射辐射剂量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$\alpha_{ph}$ —患者  $400\text{cm}^2$  面积上的散射因子, 本项目患者散射角按  $45^\circ$  取值, 即  $\alpha_{ph}$  取  $1.35 \times 10^{-3}$ ;

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积,  $\text{cm}^2$ , 本项目等中心处最大治疗野  $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ ;

$\alpha_2$ —砼墙入射的患者散射辐射的散射因子, 本项目按混凝土墙  $0^\circ$  入射、 $45^\circ$  散射、 $1\text{m}^2$  散射面积、 $0.5\text{MeV}$  栏的散射因子保守取值, 即  $\alpha_2 = 15 \times 10^{-3}$ ;

$\alpha_3$ —砼墙入射的散射辐射的散射因子, 本项目按混凝土墙  $0^\circ$  入射、 $45^\circ$  散射、 $1\text{m}^2$  散射面积、 $0.5\text{MeV}$  栏的散射因子保守取值, 即  $\alpha_3 = 15 \times 10^{-3}$ ;

A—K 处的散射面积,  $23.65\text{m}^2$  (长  $3.93+1.57\text{m}$ , 机房迷路处高  $4.3\text{m}$ ) ;

$A_1$ —L 处的散射面积,  $29.80\text{m}^2$  (长  $4.89+2.04\text{m}$ , 机房迷路处高  $4.3\text{m}$ ) ;

$R_1$ —“T-K”之间的距离, 8.83m;

$R_2$ —“K-L”之间的距离, 8.60m;

$R_3$ —“L-J”之间的距离, 2.81m;

$\dot{H}_0$ —有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 100cm 处的最高剂量率, 项目为 2400cGy/min, 即  $1.44 \times 10^9 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ;

经计算, J 点的散射辐射剂量率为 **27.11 $\mu\text{Sv/h}$** 。

②泄漏辐射经迷路内墙屏蔽后在 J 点的剂量率按公式 11-28 计算 (路径 T2-J)。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \quad (11-35)$$

式中:

$\dot{H}_0$ —有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 100cm 处的最高剂量率, 项目为 2400cGy/min, 即  $1.44 \times 10^9 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ;

$R$ —辐射源点至关注点的距离, T2-J 之间的距离为 10.24m;

$B$ —屏蔽透射因子; 保守按照迷路内墙厚度 150cm,  $90^\circ$  泄漏辐射  $\text{TVL}_1=35\text{cm}$ ,  $\text{TVL}=31\text{cm}$ ,  $B = 10^{-(X_0+\text{TVL}-\text{TVL})/\text{TVL}} = 10^{-(150/\cos 16^\circ + 31 - 35)/31} = 1.26 \times 10^{-5}$ ;

$f$ —对有用束为 1, 对  $90^\circ$  泄漏辐射为 0.001。

经计算, 泄漏辐射穿透迷路内墙后在 J 点的剂量率为 **0.17 $\mu\text{Sv/h}$** , 小于 J 点剂量率参考控制水平的  $1/4$  ( $2.5\mu\text{Sv/h}$ )。

③机房防护门需要的屏蔽透射因子按照公式 11-29 估算:

$$B = \frac{\dot{H}_c - \dot{H}_{TJ}}{\dot{H}_J} \quad (11-36)$$

式中:

$\dot{H}_c$ —防护门外辐射剂量率控制水平;

$\dot{H}_{TJ}$ —泄漏辐射穿过迷路内墙在 J 点的剂量率, 经计算 J 点的泄漏辐射剂量率为 **0.17 $\mu\text{Sv/h}$** ;

$\dot{H}_J$ —J 点的散射辐射剂量率,  $\mu\text{Sv/h}$ , 经计算 J 点的散射辐射剂量率为 **27.11 $\mu\text{Sv/h}$** 。

J 处的散射辐射能量约为 0.2MeV, 铅的 TVL 为 5mm。防护门外剂量控制水平

取  $10\mu\text{Sv}/\text{h}$  时, 直线加速器机房 1 防护门需要的屏蔽透射因子  $B=0.36$ , 相应铅厚度 (X) 为:  $X=\text{TVL} \cdot \log B^{-1}=2.20\text{mm}$ 。防护门外剂量控制水平取  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$  时, 直线加速器机房 1 防护门需要的屏蔽透射因子  $B=0.086$ , 相应铅厚度 (X) 为:  $X=\text{TVL} \cdot \log B^{-1}=5.33\text{mm}$ 。

本项目两间直线加速器机房防护门均为  $11\text{mmPb}$  电动推拉门, 满足铅当量要求。

④在给定防护门的铅屏蔽厚度 X (cm) 时, 防护门外的辐射剂量率按公式 11-30 计算:

$$\dot{H} = \dot{H}_J \cdot 10^{-(X/TVL)} + \dot{H}_{TJ} \quad (11-37)$$

式中  $TVL=5\text{mm}$ 。经计算直线加速器机房 1 防护门外  $30\text{cm}$  处 (J 点) 的剂量率为  $\dot{H}=27.11 \times 10^{-(11/5)} + 0.17 = 0.34\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

#### 11.2.3.4 加速器机房关注点剂量评价

参照《辐射防护手册》(第一分册), 项目放射工作人员与周边环境公众所受年附加剂量按下式计算。

$$H = t \cdot T \cdot \dot{H} \cdot U \times 10^{-3} \quad (11-38)$$

式中:

$H$ —放射工作人员与公众的年附加剂量,  $\text{mSv}/\text{a}$ ;

$t$ —年出束时间 (h);

$T$ —居留因子, 参照 HJ1198-2021 中附录 A 取值;

$\dot{H}$ —关注点的周围剂量当量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$U$ —使用因子。

本次评价按照最不利情况估算辐射工作人员和周边环境公众所受的年附加剂量, 估算结果见表 11-24。

表 11-24 项目辐射工作人员及周边环境公众年附加剂量估算结果

关注点点位		最大周围剂量当量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	年出束时间 h	居留因子 T	使用因子 U	年受照剂量( $\text{mSv}$ )		约束限值 ( $\text{mSv}/\text{a}$ )
直线加速器机房 1	控制室 1 (A)	$4.16 \times 10^{-6}$	117.5	1	1	$4.88 \times 10^{-7}$		5
	辅助机房 1 (B)	0.18	117.5	1/20	1	$1.06 \times 10^{-3}$		5
	设备库 (C)	泄漏 $1.07 \times 10^{-2}$	117.5	1/20	1	$6.29 \times 10^{-5}$	$6.91 \times 10^{-5}$	0.1
		散射	23.5	1/20	1/4	$6.14 \times 10^{-6}$		

直线 加速器 机房2		$2.09 \times 10^{-2}$							
	生活泵房 (D)	0.21	23.5	1/20	1/4	$6.14 \times 10^{-5}$		0.1	
	生活泵房 (E)	泄漏 $2.64 \times 10^{-2}$	117.5	1/20	1	$1.55 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-4}$	0.1	
		散射 0.10	23.5	1/20	1/4	$3.00 \times 10^{-5}$			
	地下车库 (F)	0.21	117.5	1/40	1	$6.18 \times 10^{-4}$		0.1	
	直线加速器 机房2 (G)	泄漏 $3.17 \times 10^{-2}$	117.5	1/2	1	$1.86 \times 10^{-3}$	$2.22 \times 10^{-3}$	5	
		散射 0.12	23.5	1/2	1/4	$3.60 \times 10^{-4}$			
	直线加速器 机房2 (H)	0.21	23.5	1/2	1/4	$6.14 \times 10^{-4}$		5	
	直线加速器机 房2 迷路内墙处 (I)	泄漏 $7.45 \times 10^{-4}$	117.5	1/2	1	$4.38 \times 10^{-5}$	$4.51 \times 10^{-5}$	5	
		散射 $4.70 \times 10^{-4}$	23.5	1/2	1/4	$1.38 \times 10^{-6}$			
	核医学科 (M)	0.40	23.5	1	1/4	$2.34 \times 10^{-3}$		0.1	
	核医学科 (N)	泄漏 $7.27 \times 10^{-3}$	117.5	1	1	$8.54 \times 10^{-4}$	$9.31 \times 10^{-4}$	0.1	
		散射 $1.32 \times 10^{-2}$	23.5	1	1/4	$7.74 \times 10^{-5}$			
	核医学科 (P)	泄漏 $1.63 \times 10^{-3}$	117.5	1	1	$1.91 \times 10^{-4}$	$2.06 \times 10^{-4}$	0.1	
		散射 $2.56 \times 10^{-3}$	23.5	1	1/4	$1.51 \times 10^{-5}$			
	防护门外 (J)	0.34	117.5	1/8	1	$4.99 \times 10^{-3}$		0.1	
	控制室 2 (A')	$3.75 \times 10^{-6}$	117.5	1	1	$4.41 \times 10^{-7}$		5	
	水冷机房 2 (B')	0.16	117.5	1/20	1	$9.26 \times 10^{-4}$		5	
	排风排烟机房 (C')	泄漏 $1.07 \times 10^{-2}$	117.5	1/20	1	$6.29 \times 10^{-5}$	$6.91 \times 10^{-5}$	0.1	
		散射 $2.09 \times 10^{-2}$	23.5	1/20	1/4	$6.14 \times 10^{-6}$			
	排风排烟机房 (D')	0.21	23.5	1/20	1/4	$6.14 \times 10^{-5}$		0.1	
	排风排烟机房 (E')	泄漏 $2.64 \times 10^{-2}$	117.5	1/20	1	$1.55 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-4}$	0.1	
		散射 0.10	23.5	1/20	1/4	$3.00 \times 10^{-5}$			
	地下车库 (F')	0.21	117.5	1/40	1	$6.05 \times 10^{-4}$		0.1	
	直线加速器 机房 1 (G')	泄漏 $3.17 \times 10^{-2}$	117.5	1/2	1	$1.86 \times 10^{-3}$	$2.22 \times 10^{-3}$	5	
		散射 0.12	23.5	1/2	1/4	$3.60 \times 10^{-4}$			
	直线加速器机 房 1 (H')	0.21	23.5	1/2	1/4	$6.14 \times 10^{-4}$		5	

直线加速器机房1迷路内墙处 (I')	泄漏 $7.45 \times 10^{-4}$	117.5	1/2	1	$4.38 \times 10^{-5}$	$4.70 \times 10^{-5}$	5
	散射 $1.11 \times 10^{-3}$	23.5	1/2	1/4	$3.25 \times 10^{-6}$		
核医学科 (M')	0.40	23.5	1	1/4	$2.34 \times 10^{-3}$		0.1
核医学科 (N')	泄漏 $7.27 \times 10^{-3}$	117.5	1	1	$8.54 \times 10^{-4}$	$9.31 \times 10^{-4}$	0.1
	散射 $1.32 \times 10^{-2}$	23.5	1	1/4	$7.74 \times 10^{-5}$		
核医学科 (P')	泄漏 $1.63 \times 10^{-3}$	117.5	1	1	$1.91 \times 10^{-4}$	$2.06 \times 10^{-4}$	0.1
	散射 $2.56 \times 10^{-3}$	23.5	1	1/4	$1.51 \times 10^{-5}$		
防护门外 (J')	0.34	117.5	1/8	1	$4.99 \times 10^{-3}$		0.1

注：核医学科的居留因子保守取值为1。

结合表11-11，项目正常运行期间，未考虑剂量叠加情况下，直线加速器控制室1内辐射工作人员年累计附加剂量为 $4.88 \times 10^{-7}$ mSv，直线加速器控制室2内辐射工作人员年累计附加剂量为 $4.41 \times 10^{-7}$ mSv，两间加速器机房周边环境公众年累计附加剂量最大为 $4.99 \times 10^{-3}$ mSv。

### 11.2.3.5 叠加影响分析

#### (1) 剂量率叠加影响

本项目直线加速器机房外剂量率叠加影响见表11-25。

表 11-25 项目辐射工作人员及周边环境公众年附加剂量估算结果

关注点	影响来源	关注点剂量率 $\mu\text{Sv/h}$	叠加后剂量率 $\mu\text{Sv/h}$	剂量限值/ 控制水平 $\mu\text{Sv/h}^{**}$	是否合格
两间直线加速器机房 防护门外	直线加速器1	0.34	0.68	10	合格
	直线加速器2	0.34			
两间直线加速器机房 南侧地下车库	直线加速器1	0.21	0.42	10	合格
	直线加速器2	0.21			
两间直线加速器机房 上方核医学科	直线加速器1	0.40	0.80	2.5	合格
	直线加速器2	0.40			

注：剂量限值/控制水平取自表11-8。

经叠加计算，直线加速器机房外各关注点剂量率满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)及《放射治疗机房的辐射屏蔽规范-第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011)相应的剂量率参考控制水平。

## (2) 年有效剂量叠加影响

本项目直线加速器机房外公众受到的年剂量叠加影响见表11-26。

表 11-26 本项目公众年剂量叠加影响情况

关注点	影响来源	年有效剂量 mSv	叠加后有效剂量 mSv/a	剂量约束值 mSv/a	是否 合格
两间直线加速器机房 防护门外	直线加速器1	$4.99 \times 10^{-3}$	$9.98 \times 10^{-3}$	0.1	合格
	直线加速器2	$4.99 \times 10^{-3}$			
两间直线加速器机房 南侧地下车库	直线加速器1	$6.18 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-3}$	0.1	合格
	直线加速器2	$6.18 \times 10^{-4}$			
两间直线加速器机房 上方核医学科	直线加速器1	$2.34 \times 10^{-3}$	$4.68 \times 10^{-3}$	0.1	合格
	直线加速器2	$2.34 \times 10^{-3}$			

根据表11-26, 考虑叠加影响后, 两间直线加速器机房外公众有效剂量最大值为  $9.98 \times 10^{-3}$  mSv/a。

本项目直线加速器的辐射工作人员所受年剂量需考虑人员在控制室内两台加速器同时开机, 以及在机房内摆位时隔壁加速器开机造成的辐射影响。

根据表11-14, 两台直线加速器同时开机时机房防护门外人员叠加后有效剂量很低 ( $9.98 \times 10^{-3}$  mSv/a)。直线加速器2辐射源点与直线加速器1控制室(控制室1)的距离大于直线加速器1辐射源点至其防护门的距离, 直线加速器1辐射源点与直线加速器2控制室(控制室2)的距离大于直线加速器2辐射源点至其防护门的距离, 同时考虑直线加速器控制室隔墙对辐射影响的进一步削弱, 因此直线加速器2、直线加速器1开机时分别对直线加速器1控制室(控制室1)和直线加速器2控制室(控制室2)内辐射工作人员的辐射影响更小, 叠加计算辐射工作人员年有效剂量时可忽略不计。

根据表11-12, 控制室1内辐射工作人员有效剂量为  $4.88 \times 10^{-7}$  mSv/a, 工作人员在直线加速器机房1内摆位时, 直线加速器2开机所致有效剂量为  $2.22 \times 10^{-3}$  mSv/a, 叠加后有效剂量约为  $2.22 \times 10^{-3}$  mSv/a; 控制室2内辐射工作人员有效剂量为  $4.41 \times 10^{-7}$  mSv/a, 工作人员在直线加速器机房2内摆位时, 直线加速器1开机所致有效剂量为  $2.22 \times 10^{-3}$  mSv/a, 叠加后有效剂量约为  $2.22 \times 10^{-3}$  mSv/a。

因此, 本项目直线加速器的辐射工作人员与机房外公众所受有效剂量均低于本项目剂量约束值(辐射工作人员不超过5mSv/a, 公众人员不超过0.1mSv/a), 满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)剂量限值相关要求, 《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)剂量约束值要求。

### 11.2.3.6 废气影响分析

#### (1) 臭氧

依据《辐射所致臭氧的估算与分析》(中华放射医学与防护杂志VoL14, 2, P101, 1994) 及《辐射防护手册》中的公式, 估算辐射所致臭氧的产额和浓度。

##### 1) 有用线束的臭氧产额

有用射线束所致的臭氧产额计算公式如下:

$$P_1=2.43D_0(1-\cos\theta) RG \quad (11-39)$$

式中:

$P_1$ —有用线束的臭氧产额, mg/h;

$D_0$ —辐射有用线束在距 1m 处的输出量, Gy/min, 10MV 加速器取 24Gy/min;

$R$ —射线束中心点到屏蔽物(墙)的距离, m, 直线加速器机房 1 和直线加速器机房 2 均取 4.4m;

$G$ —空气吸收 100eV 辐射能量产生的臭氧分子数, 文献估算时取值为 10;

$\theta$ —有用束的半张角, 项目取 $+14^\circ$  或 $-14^\circ$ 。

##### 2) 泄漏辐射的臭氧产额

将泄漏辐射看成为 $4\pi$ 方向均匀分布的点源(包括有用束区限定的空间区), 并考虑加速器机房墙壁的散射线使室内的 $O_3$ 产额增加10%,  $O_3$ 的产额 $P_2$ (mg/h)计算公式如下:

$$P_2=3.32\times 10^{-3}D_0GV^{1/3} \quad (11-40)$$

式中:

$P_2$ —泄漏辐射的臭氧的产额;

$D_0$ —辐射有用线束在距 1m 处的输出量, Gy/min, 10MV 加速器取 24Gy/min;

$G$ —空气吸收 100eV 辐射能量产生的臭氧分子数, 文献估算时取值为 10;

$V$ —加速器治疗机房容积(含迷道), 直线加速器机房 1 和直线加速器机房 2 取值均为 $421.4m^3$ ;

经计算, 直线加速器机房 1 和直线加速器机房 2 有用线束的臭氧产额均为  $P_1=76.22mg/h$ ; 直线加速器机房 1 和直线加速器机房 2 泄漏辐射的臭氧产额均为  $P_2=5.97mg/h$ , 则臭氧产额合计均为 $82.19mg/h$ 。直线加速器考虑泄漏辐射调强治疗下年出束时间, 则直线加速器机房 1 和直线加速器机房 2 臭氧的年产生量均为 $9.66g/a$ 。

### 3) 臭氧浓度

项目机房内产生的臭氧一部分由动力排风装置排到室外，另一部分自然分解。机房内臭氧的平均浓度估算公式如下：

$$Q = \frac{Q_0 T}{V} (1 - e^{-t/T}) \quad (11-41)$$

式中：

Q—加速器治疗室内O<sub>3</sub>平衡浓度，mg/m<sup>3</sup>；

Q<sub>0</sub>—O<sub>3</sub>的化学产额，mg/h，经上文计算，臭氧产额合计均为82.19mg/h；

t—照射时间，h；

T—有效清除时间；

V—治疗室体积，m<sup>3</sup>；

有效清除时间T由下式计算：

$$T = \frac{T_v \cdot T_d}{T_v + T_d} \quad (11-42)$$

式中：T<sub>d</sub>—臭氧的有效分解时间，取0.83h；

T<sub>v</sub>—换气一次所需时间，直线加速器机房1和直线加速器机房2容积均为421.4m<sup>3</sup>，两间直线加速器机房拟设置排风机风量为5500m<sup>3</sup>/h，则换气一次需要时间T<sub>v</sub>均为0.077h。经计算，有效清除时间T=0.07h。

两台直线加速器单次治疗照射时间为0.1875min，即t=3.13×10<sup>-3</sup>h，代入公式11-34计算Q均为2.66×10<sup>-5</sup>mg/m<sup>3</sup>，均低于《工作场所有害因素职业接触限值-第一部分：化学有害因素》（GBZ2.1-2019）中最高容许浓度0.3mg/m<sup>3</sup>。

### (2) 氮氧化物

在多种氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 中，以NO<sub>2</sub>为主，其产额约为O<sub>3</sub>的一半，因此氮氧化物浓度符合《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）中相关要求。

两间直线加速器机房均设置动力通风装置，产生极少量的臭氧和氮氧化物经排风管道汇入庭院的排风井排放，该风井为地上构筑物，地上高度约9m。两间直线加速器机房体积均为421.4m<sup>3</sup>，排风机额定风量5500m<sup>3</sup>/h，经计算，两间加速器机房的通风换气次数均为13次/h。因此，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)中机房换气次数不小于4次/h的要求。

综上所述，本项目直线加速器产生的臭氧和氮氧化物对周围大气环境影响极小。

### 11.2.3.7 固体废物影响分析

直线加速器产生的放射性固体废物为废金属靶，只有在需要更换金属靶时才产生（通常1个金属靶使用7~10年才更换），根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）8.2.2.1的要求，废金属靶件作为放射性固废处理，由厂家更换并处置，不在项目地贮存。产生的医疗废物及生活垃圾不含放射性，最终分别交由有资质的单位和环卫部门统一清运。因此，本项目产生的固体废物对外环境影响较小。

### 11.2.3.8 废水影响分析

加速器运行时，设备中内循环冷却水可能产生感生放射性，冷却水中被活化形成的放射性核素主要为<sup>15</sup>O、<sup>16</sup>N，其半衰期较短。加速器冷却水封闭循环，不外排。事故状态下因管道破裂泄漏，水中的放射性核素也会很快衰减到本底水平，对周围环境影响也很小。设备检维修在设备停机10min后进行即可避免感生放射性的辐射影响。

本项目辐射工作人员和患者产生的生活污水，依托医院污水处理站处理后达标排放。

### 11.2.4 CT 模拟定位机

本项目配备有1台CT模拟定位机用于肿瘤患者肿瘤部位的定位。

#### 11.2.4.1 机房空间符合性分析

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020），CT模拟定位机使用面积及最小单边长度符合性分析详见表11-27。

表 11-27 CT 模拟定位机房使用面积及最小单边长度符合性分析一览表

机房名称	参数	设计值	标准要求	是否符合
CT模拟定位机房	使用面积	42.36m <sup>2</sup>	≥30m <sup>2</sup> （按CT评价）	符合
	最小单边长	5.48m	≥4.5m（按CT评价）	符合

注：评价标准依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）。

由上表可知，CT模拟定位机房使用面积及最小单边长度满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中CT机房相关要求。

#### 11.2.4.2 机房屏蔽能力分析

根据建设单位提供的资料，本项目拟安装的CT模拟定位机最大管电压140kV、最大管电流1000mA。

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）表3中的要求，机房的X射线防护屏蔽措施符合性分析见表11-28。

(1) 根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）附录C公式C.1和C.2，混凝土的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 取值自附录C表C.2，计算得出在管电压140kV（CT）下，150mm混凝土等效铅当量约为1.57mmPb。

(2) 根据《辐射防护手册 第三分册》第62页表3.3，在管电压150kV条件下，65mm钡水泥（ $2.7\text{g/cm}^3$ ）等效3mmPb。本项目CT模拟定位机最大管电压为140kV，本次保守按照150kV条件下计算等效铅当量。

表 11-28 CT 模拟定位机房辐射防护屏蔽参数一览表

机房	位置	设计方案	等效铅当量 (mmPb)	标准要求 (mmPb)
CT模拟定位机房	四周墙体	65mm硫酸钡水泥	3.00	2.5
	屋顶	150mm混凝土+3mm铅板	4.57	
	地板	150mm混凝土+65mm硫酸钡水泥	4.57	
	2个患者防护门	3mmPb电动推拉门	3.00	
	工作人员门	3mmPb手动平开门	3.00	
	观察窗	3mmPb防护玻璃板	3.00	

由上表可知，CT模拟定位机房四周墙体的等效铅当量均为3.00mmPb，屋顶和地板的等效铅当量均为4.57mmPb，工作人员门、患者防护门和观察窗的铅当量均为3.00mmPb。均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中CT机房屏蔽防护铅当量厚度2.5mmPb的要求。

#### 11.2.4.3 剂量率分析

CT模拟定位机用于肿瘤患者肿瘤部位的定位，根据前文分析，机房有效使用面积、最小单边长度、机房防护铅当量水平均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）相关要求，本项目拟安装的CT模拟定位机最大管电压140kV、最大管电流1000mA。

参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）表E.2中数据，CT在75%位数下，焦点处的剂量最大为60mGy（扫描时间2s），因此CT扫描时焦点处的最大剂量率保守取 $1.08 \times 10^8 \mu\text{Sv/h}$ ，考虑机房外关注点处剂量率同时存在漏射线和散射线影响。CT模拟定位机房上方关注点的选取考虑相对较近且居留因子较大的操作廊，若CT模拟定位机对上方操作廊的辐射影响满足要求，因TPS计划室和检查准备室距辐射源点

距离更远，患者缓冲和走廊居留因子更小，则对其辐射影响也满足要求，故未设置关注点。

关注点选取示意图见图11-8和图11-9。

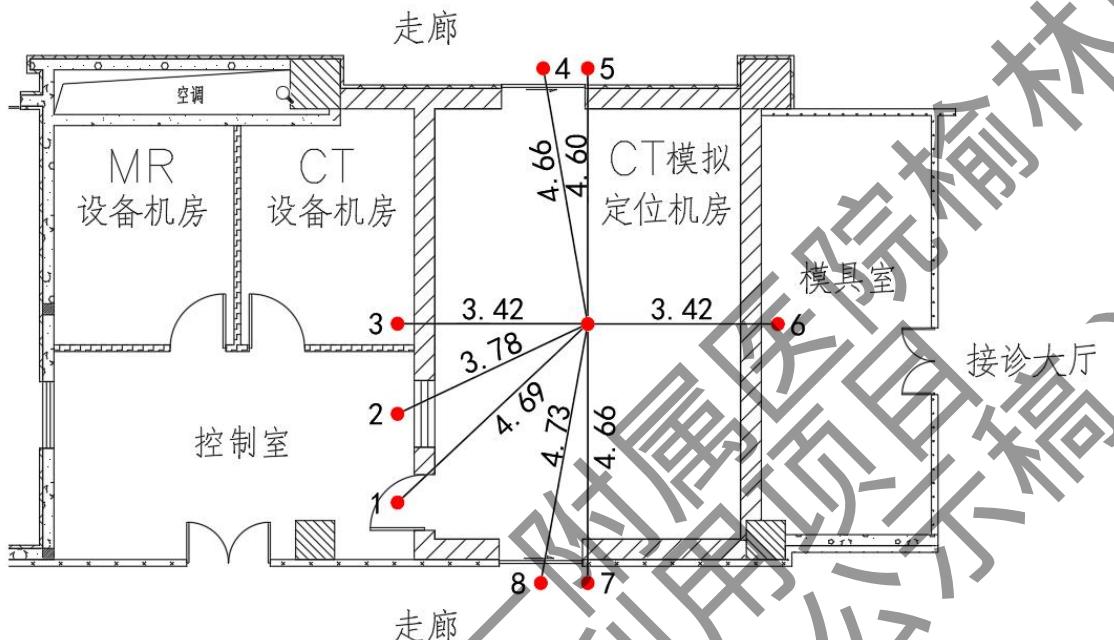


图 11-8 CT 模拟定位机房关注点设定平面示意图

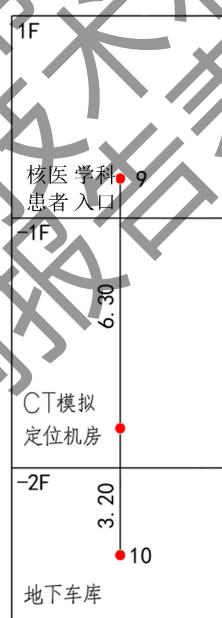


图 11-9 CT 模拟定位机房关注点设定剖面示意图

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

$$H = \frac{f \cdot H_0 \cdot B}{R^2} \quad (11-43)$$

$$B = \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (11-44)$$

式中：H—关注点处的泄漏周围剂量当量率， $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；周围剂量当量率与空气吸收剂量率换算系数在辐射屏蔽计算时通常取 $1\text{Sv}/\text{Gy}$ 。

f—泄漏射线比率，取 $0.1\%$ ；

$H_0$ —距靶点 $1\text{m}$ 处的最大剂量率， $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ；

R—靶点至关注点的距离， $\text{m}$ ；

B—屏蔽透射因子；

X—铅厚度， $\text{mm}$ 。

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为铅对X射线辐射衰减的有关的拟合参数，见表11-30。

表 11-29 X射线辐射衰减的有关的拟合参数

电压	材料	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
140kV (CT)	铅	2.009	3.99	0.3420

注： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 取值参考《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)附录C。

散射周围剂量当量率计算公式参考《辐射防护手册第一分册》(李德平、潘自强主编，原子能出版社，1987)中给出的公式计算。

$$H = \frac{H_0 \cdot \alpha \cdot B \cdot (S/400)}{(d_0 \cdot d_s)^2} \quad (11-45)$$

式中：

H—关注点处的患者散射周围剂量当量率， $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；周围剂量当量率与空气吸收剂量率换算系数在辐射屏蔽计算时通常取 $1\text{Sv}/\text{Gy}$ ；

$H_0$ —距靶点 $1\text{m}$ 处的最大剂量率， $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ；

$\alpha$ —患者对X射线的散射比，参考《辐射防护手册 第一分册》P437表10.1取 $0.0016$ ( $150\text{kV}$ ,  $45^\circ$  散射)；

S—散射面积，取 $20\text{cm}^2$ (CT照射野宽 $1\text{cm}$ ，长 $20\text{cm}$ )；

$d_0$ —源与患者的距离，一般取 $0.5\text{m}$ ；

$d_s$ —患者与关注点的距离， $\text{m}$ ；

B—屏蔽透射因子。

本项目CT模拟定位机出束状态下屏蔽体外各关注点的泄漏辐射剂量率估算结

果见表 11-30。

表 11-30 CT 模拟定位机房各关注点泄漏 X 射线剂量率

关注点		序号	距离 (m)	屏蔽设计厚 度等效铅厚 度 (mmPb)	$H_0$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	透射因子 $B$	关注点剂量 率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	
CT 模 拟 定 位 机 房	西 侧	工作人员门	1	4.69	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.63
		观察窗	2	3.78	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.96
		控制室墙	3	3.42	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	1.18
	北 侧	患者门	4	4.66	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.63
		走廊	5	4.60	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.65
	东 侧	模具室	6	3.42	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	1.18
	南 侧	走廊	7	4.66	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.63
		患者门	8	4.73	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.62
	上 方	操作廊	9	6.30	4.57	$1.08 \times 10^8$	$4.58 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-2}$
	下 方	地下车库	10	3.20	4.57	$1.08 \times 10^8$	$4.58 \times 10^{-6}$	$4.83 \times 10^{-2}$

本项目 CT 模拟定位机出束状态下屏蔽体外各关注点的散射辐射剂量率估算结果见表 11-31。

表 11-31 CT 模拟定位机房各关注点散射 X 射线剂量率

关注点		序号	距离 (m)	屏蔽设计厚 度等效铅厚 度 (mmPb)	$H_0$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	透射因子 $B$	关注点剂量 率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	
CT 模 拟 定 位 机 房	西 侧	工作人员门	1	4.69	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.20
		观察窗	2	3.78	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.31
		控制室墙	3	3.42	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.38
	北 侧	患者门	4	4.66	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.20
		走廊	5	4.60	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.21
	东 侧	模具室	6	3.42	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.38
	南 侧	走廊	7	4.66	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.20
		患者门	8	4.73	3.00	$1.08 \times 10^8$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.20
	上 方	核医学科	9	6.30	4.57	$1.08 \times 10^8$	$4.58 \times 10^{-6}$	$3.99 \times 10^{-3}$
	下 方	地下车库	10	3.20	4.57	$1.08 \times 10^8$	$4.58 \times 10^{-6}$	$1.54 \times 10^{-2}$

本项目 CT 模拟定位机出束状态下各关注点的总辐射剂量率估算结果见表 11-33。

表 11-32 CT 模拟定位机房各关注点总剂量率

关注点		序号	CT泄漏剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	CT散射剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	CT总剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
CT 模 拟 定 位 机 房	西 侧	工作人员门	1	0.63	0.20
		观察窗	2	0.96	0.31
		控制室墙	3	1.18	0.38
	北 侧	患者门	4	0.63	0.20
		走廊	5	0.65	0.21
	东 侧	模具室	6	1.18	0.38
		走廊	7	0.63	0.20
	南 侧	患者门	8	0.62	0.20
		核医学科	9	$1.25 \times 10^{-2}$	$3.99 \times 10^{-3}$
	下 方	地下车库	10	$4.83 \times 10^{-2}$	$1.54 \times 10^{-2}$

由上表可知，本项目 CT 模拟定位机房各屏蔽体外 30cm 处的瞬时剂量率均满足“周围剂量当量率控制目标值不大于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ”的要求。

#### 11.2.4.4 个人剂量估算

两台直线加速器每天治疗人数最大为60人，后装机每天治疗人数最大为20人，因此CT模拟定位机工作量以每天诊断80人计。每名患者使用CT定位的开机照射时间约为10s，年工作250天，则年出束时间为55.56h。根据表11-20计算结果，CT运行时机房周围人员受到的年有效剂量见表11-33。

表 11-33 CT 模拟定位机房周围人员受到的年有效剂量估算结果一览表

关注点位置描述			辐射剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	出束时间 ( $\text{h}/\text{a}$ )	居留 因子	年受照剂量 ( $\text{mSv}$ )	约束限值 ( $\text{mSv}$ )
CT 模 拟 定 位 机 房	西 侧	工作人员门	0.83	55.56	1	$4.59 \times 10^{-2}$	5
		观察窗	1.27	55.56	1	$7.07 \times 10^{-2}$	
		控制室墙	1.55	55.56	1	$8.64 \times 10^{-2}$	
北 侧	患者门	公众	0.84	55.56	1/8	$5.81 \times 10^{-3}$	0.1
	走廊	公众	0.86	55.56	1/5	$9.55 \times 10^{-3}$	0.1
东 侧	模具室	公众	1.55	55.56	1/4	$2.16 \times 10^{-2}$	0.1
	走廊	公众	0.84	55.56	1/5	$9.30 \times 10^{-3}$	0.1
南 侧	患者门	公众	0.81	55.56	1/8	$5.64 \times 10^{-3}$	0.1

上方	核医学科	公众	$1.64 \times 10^{-2}$	55.56	1	$9.13 \times 10^{-4}$	0.1
下方	地下车库	公众	$6.37 \times 10^{-2}$	55.56	1/40	$8.85 \times 10^{-5}$	0.1

结合表11-21, 项目正常运行期间, CT模拟定位机房辐射工作人员年累计附加剂量为 $8.64 \times 10^{-2}$ mSv, 机房周边环境公众年累计附加剂量最大为 $2.16 \times 10^{-2}$ mSv, 满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中对辐射工作人员及公众受照剂量限值要求以及本项目的目标管理限值要求。

#### 11.2.4.5 废气影响分析

CT模拟定位机在开机并处于出束状态时, X射线与空气作用会产生极少量的臭氧、氮氧化物等有害气体, 机房设置动力通风装置, 机房内产生的少量臭氧、氮氧化物等废气通过排风管道排出室外, 满足《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)相关要求。

#### 11.2.4.6 固体废物影响分析

CT模拟定位机定位时产生的一次性床单、手套等废物, 采用专用容器收集, 在机房就地打包, 最终转运至医院的医疗废物暂存间, 委托有资质单位处置。生活垃圾由环卫部门统一清运, 项目产生的固体废物均得到妥善处置, 对环境影响较小。

#### 11.2.4.7 废水影响分析

工作人员和患者产生的生活污水依托医院污水处理站处理达标后排至市政管网。

### 11.2.5 DSA 手术室

#### 11.2.5.1 使用空间

本项目DSA手术室(OR.14)使用面积及最小单边长度见表11-33。

表 11-34 DSA 手术室使用面积及最小单边长度一览表

机房名称	参数	设计值	GBZ130-2020 要求	符合情况
OR.14	有效使用面积 (m <sup>2</sup> )	81.5	$\geq 30$	符合
	最小单边长度 (m)	7.1	$\geq 4.5$	符合

由上表可知, 本项目DSA手术室使用面积及最小单边长度满足《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中相关要求。

#### 11.2.5.2 关注点选取

以设备机头位置为泄漏辐射源点, 以设备等中心点(DSA手术室中心位置)为散射辐射源点。通常情况下设备机头距地面约0.5m, 有用线束向上照射。等中心点

高度约 1m。

关注点位置取四周墙体、防护门、观察窗外 0.3m 处，机房上方（楼上）距上方地面 1.0m 处，机房下方（楼下）距楼下地面 1.7m 处。

本项目 DSA 手术室位于肿瘤科研楼三层，层高 5.0m，下方二层层高 4.5m，上方四层层高 4.5m。泄漏辐射源点位置按 X 射线球管距关注点的最近位置考虑；散射辐射源点位置按等中心点位置考虑。

本项目所选关注点见图 11-10 至图 11-11。

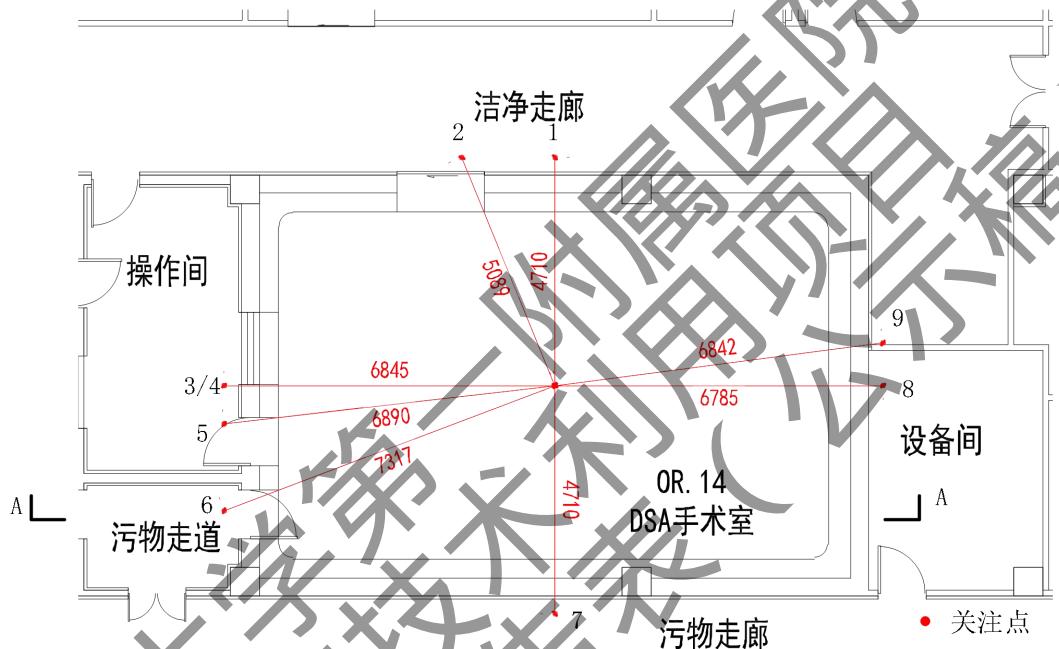


图 11-10 DSA 手术室关注点示意图（平面）

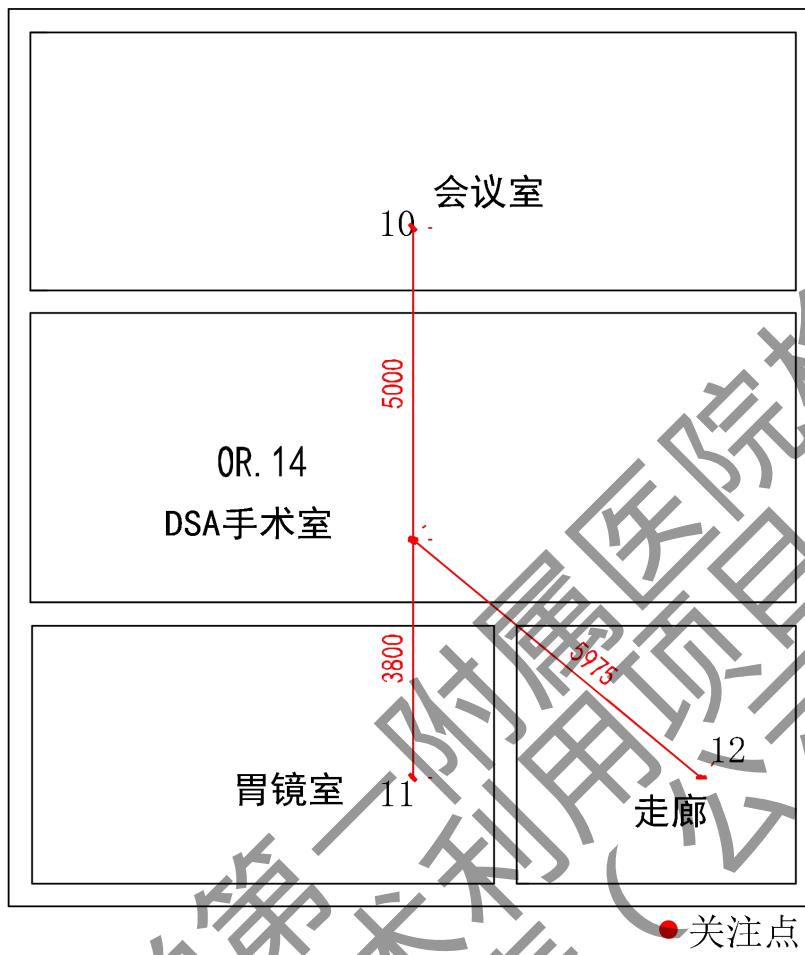


图 11-11 DSA 手术室关注点示意图 (A-A 剖面)

### 11.2.5.3 各关注点剂量率估算

医院拟配置的 DSA 设备尚未确定生产厂家与型号, 根据医院采购意向, 结合市面 DSA 设备参数, 本次评价按照最大管电压 125kV, 最大管电流 1250mA 进行屏蔽能力核算。

医院在 DSA 手术室配置 1 台 DSA(最大管电压为 125kV, 最大管电流为 1250mA)。DSA 有透视和摄影两种工作模式。根据《医用电气设备 第1-3部分: 基本安全和基本性能的通用要求 并列标准: 诊断 X 射线设备的辐射防护》(GB9706.103-2020) 表 3 X 射线设备的半价层, X 射线管电压 90kV 下允许的最小第一半价层是 3.2mmAl, 120kV 下允许的最小第一半价层是 4.3mmAl。因此, 90kV 以上允许的最小第一半价层不小于 3.2mmAl, 本次评价保守取 3mmAl 滤过。根据 ICRP 33《医用外照射源的辐射防护》P55 图 2, 125kV 的 X 射线在 3mmAl 滤过下离靶 1m 处的剂量率保守取 9mGy/mA•min, 因此本次评价离靶 1m 处的剂量率取 9mGy/mA•min。

结合市场流通的设备机型及医院提供的资料, 选取最大管电压下的最大工作电

流进行估算，最大连续功率为 4kW，透视时管电压取 125kV，管电流取 32mA；摄影时最大功率不超过 100kW，管电压取 125kV，管电流取 800mA。本项目 DSA 设备不同运行条件下 1m 处剂量率见表 11-35。

表 11-35 DSA 机不同运行条件下的参数取值

设备	运行条件		离靶1m处的剂量率读值 (mGy/mA•min)	距靶点1m处的剂量率 $H_0$ ( $\mu$ Gy/h)
DSA	透视	125kV, 32mA	9	$1.73 \times 10^7$
	摄影	125kV, 800mA		$4.32 \times 10^8$

### (1) 估算方法

DSA 有用线束被患者及影像平板吸收阻挡，各关注点处仅考虑泄漏线和散射线影响，射线泄漏率取 0.1%。

#### 1. 泄漏周围剂量当量率估算

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

$$H = \frac{f \cdot H_0 \cdot B}{R^2} \quad (11-46)$$

$$B = \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma X} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (11-47)$$

式中:  $H$ —关注点处的泄漏周围剂量当量率,  $\mu$ Sv/h; 周围剂量当量率与空气吸收剂量率换算系数在辐射屏蔽计算时通常取 1Sv/Gy;

$f$ —泄漏射线比率, 取 0.1%;

$H_0$ —距靶点 1m 处的最大剂量率,  $\mu$ Gy/h;

$R$ —靶点至关注点的距离, m;

$B$ —屏蔽透射因子;

$X$ —铅厚度, mm。

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为铅对 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数, 见表 11-36。

表 11-36 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

电压	材料	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
125kV (主束)	铅	2.219	7.923	0.5386
	混凝土	0.03502	0.07113	0.6974

125kV (散射)	铅	2.233	7.888	0.7295
	混凝土	0.0351	0.066	0.7832

注:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 取值参考《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)附录C。

评价以设备等中心点作为辐射源点;有用线束向上照射,设备机头距地面0.5m,治疗床高1m;取辐射源点与关注点线性正交距离进行预测分析。根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)B.2.1关注点检测的位置要求,关注点位距墙体、门、窗表面30cm;顶棚上方(楼上)距顶棚地面100cm,底板下方(楼下)距楼下地面170cm。

## 2. 散射周围剂量当量率

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

$$H = \frac{H_0 \cdot \alpha \cdot B \cdot (S/400)}{(d_0 \cdot d_s)^2} \quad (11-48)$$

式中:

$H$  —关注点处的患者散射周围剂量当量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ; 周围剂量当量率与空气吸收剂量率换算系数在辐射屏蔽计算时通常取1Sv/Gy;

$H_0$  —距靶点1m处的最大剂量率,  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ;

$\alpha$  —患者对X射线的散射比, 取自《辐射防护手册第一分册 辐射源与屏蔽》P437表10.1, 125kV射线散射与入射X- $\gamma$ 射线照射量之比值 $\alpha$ 为0.0015(90°散射, 相对于400cm<sup>2</sup>散射面积);

$S$  —散射面积, 取典型值400cm<sup>2</sup>;

$d_0$  —源与患者的距离, 一般取0.5m;

$d_s$  —患者与关注点的距离, m;

$B$  —屏蔽透射因子。

### (2) 估算结果

本项目DSA手术室透视和摄影状态下各关注点的泄漏辐射剂量率估算结果见表11-37。

表 11-37 DSA 手术室各关注点泄漏周围剂量当量率计算结果

工作模式	关注点位置描述		序号	屏蔽厚度 (mmPb)	R (m)	H <sub>0</sub> (μSv/h)	B	H (μSv/h)
透视	北	洁净走廊	1	4mmPb	4.71	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$6.56 \times 10^{-3}$
		患者门	2	4mmPb	5.09	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$5.61 \times 10^{-3}$
	西	观察窗	3	4mmPb	6.84	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$3.11 \times 10^{-3}$
		操作间	4	4mmPb	6.84	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$3.11 \times 10^{-3}$
		工作人员门	5	4mmPb	6.89	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$3.06 \times 10^{-3}$
		污物门	6	4mmPb	7.32	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$2.71 \times 10^{-3}$
	南	污物走廊	7	4mmPb	4.71	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$6.56 \times 10^{-3}$
	东	设备间	8	4mmPb	6.78	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$3.16 \times 10^{-3}$
		洁净走廊	9	4mmPb	6.84	$1.73 \times 10^7$	$8.42 \times 10^{-6}$	$3.11 \times 10^{-3}$
	上	会议室	10	4.87mmPb	5.00	$1.73 \times 10^7$	$1.21 \times 10^{-6}$	$8.37 \times 10^{-4}$
	下	胃镜室	11	4.87mmPb	3.80	$1.73 \times 10^7$	$1.21 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^{-3}$
		走廊	12	4.87mmPb	5.98	$1.73 \times 10^7$	$1.21 \times 10^{-6}$	$5.85 \times 10^{-4}$
摄影	北	洁净走廊	1	4mmPb	4.71	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	0.164
		患者门	2	4mmPb	5.09	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	0.140
	西	观察窗	3	4mmPb	6.84	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	$7.77 \times 10^{-2}$
		操作间	4	4mmPb	6.84	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	$7.77 \times 10^{-2}$
		工作人员门	5	4mmPb	6.89	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	$7.66 \times 10^{-2}$
		污物门	6	4mmPb	7.32	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	$6.79 \times 10^{-2}$
	南	污物走廊	7	4mmPb	4.71	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	0.164
	东	设备间	8	4mmPb	6.78	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	$7.91 \times 10^{-2}$
		洁净走廊	9	4mmPb	6.84	$4.32 \times 10^8$	$8.42 \times 10^{-6}$	$7.77 \times 10^{-2}$
	上	会议室	10	4.87mmPb	5.00	$4.32 \times 10^8$	$1.21 \times 10^{-6}$	$2.09 \times 10^{-2}$
	下	胃镜室	11	4.87mmPb	3.80	$4.32 \times 10^8$	$1.21 \times 10^{-6}$	$3.62 \times 10^{-2}$
		走廊	12	4.87mmPb	5.98	$4.32 \times 10^8$	$1.21 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-2}$

本项目 DSA 手术室透视和摄影状态下各关注点的散射辐射剂量率估算结果见表 11-38。

表 11-38 DSA 手术室各关注点散射周围剂量当量率计算结果

工作模式	关注点位置描述		序号	屏蔽厚度 (mmPb)	R (m)	H <sub>0</sub> (μSv/h)	B	H (μSv/h)
透视	北	洁净走廊	1	4mmPb	4.71	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$7.79 \times 10^{-2}$
		患者门	2	4mmPb	5.09	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$6.67 \times 10^{-2}$
	西	观察窗	3	4mmPb	6.84	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$3.69 \times 10^{-2}$
		操作间	4	4mmPb	6.84	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$3.69 \times 10^{-2}$
		工作人员门	5	4mmPb	6.89	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$3.64 \times 10^{-2}$
		污物门	6	4mmPb	7.32	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$3.23 \times 10^{-2}$
	南	污物走廊	7	4mmPb	4.71	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$7.79 \times 10^{-2}$

摄影	东	设备间	8	4mmPb	6.78	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$3.76 \times 10^{-2}$	
		洁净走廊	9	4mmPb	6.84	$1.73 \times 10^7$	$1.67 \times 10^{-5}$	$3.69 \times 10^{-2}$	
	上	会议室	10	4.87mmPb	5.00	$1.73 \times 10^7$	$2.39 \times 10^{-6}$	$9.89 \times 10^{-3}$	
		胃镜室	11	4.87mmPb	3.80	$1.73 \times 10^7$	$2.39 \times 10^{-6}$	$1.71 \times 10^{-2}$	
	北	走廊	12	4.87mmPb	5.98	$1.73 \times 10^7$	$2.39 \times 10^{-6}$	$6.92 \times 10^{-3}$	
		洁净走廊	1	4mmPb	4.71	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	1.95	
		患者门	2	4mmPb	5.09	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	1.67	
	西	观察窗	3	4mmPb	6.84	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	0.923	
		操作间	4	4mmPb	6.84	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	0.923	
		工作人员门	5	4mmPb	6.89	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	0.910	
		污物门	6	4mmPb	7.32	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	0.806	
	南	污物走廊	7	4mmPb	4.71	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	1.95	
	东	设备间	8	4mmPb	6.78	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	0.940	
		洁净走廊	9	4mmPb	6.84	$4.32 \times 10^8$	$1.67 \times 10^{-5}$	0.923	
	上	会议室	10	4.87mmPb	5.00	$4.32 \times 10^8$	$2.39 \times 10^{-6}$	0.247	
		胃镜室	11	4.87mmPb	3.80	$4.32 \times 10^8$	$2.39 \times 10^{-6}$	0.428	
		走廊	12	4.87mmPb	5.98	$4.32 \times 10^8$	$2.39 \times 10^{-6}$	0.173	

本项目 DSA 手术室透视和摄影状态下各关注点的总辐射剂量率估算结果见表 11-39。

表 11-39 DSA 手术室不同工作模式下各关注点总周围剂量当量率计算结果

工作模式	关注点位置描述		序号	泄漏剂量率	散射剂量率	总剂量率
透视	北	洁净走廊	1	$6.56 \times 10^{-3}$	$7.79 \times 10^{-2}$	$8.45 \times 10^{-2}$
		患者门	2	$5.61 \times 10^{-3}$	$6.67 \times 10^{-2}$	$7.23 \times 10^{-2}$
		观察窗	3	$3.11 \times 10^{-3}$	$3.69 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$
		操作间	4	$3.11 \times 10^{-3}$	$3.69 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$
		工作人员门	5	$3.06 \times 10^{-3}$	$3.64 \times 10^{-2}$	$3.95 \times 10^{-2}$
	西	污物门	6	$2.71 \times 10^{-3}$	$3.23 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-2}$
		污物走廊	7	$6.56 \times 10^{-3}$	$7.79 \times 10^{-2}$	$8.45 \times 10^{-2}$
		设备间	8	$3.16 \times 10^{-3}$	$3.76 \times 10^{-2}$	$4.08 \times 10^{-2}$
		洁净走廊	9	$3.11 \times 10^{-3}$	$3.69 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$
	东	会议室	10	$8.37 \times 10^{-4}$	$9.89 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-2}$
		胃镜室	11	$1.45 \times 10^{-3}$	$1.71 \times 10^{-2}$	$1.86 \times 10^{-2}$
	摄影	走廊	12	$5.85 \times 10^{-4}$	$6.92 \times 10^{-3}$	$7.50 \times 10^{-2}$
		洁净走廊	1	0.164	1.95	2.11
		患者门	2	0.140	1.67	1.81
		观察窗	3	$7.77 \times 10^{-2}$	0.923	1.00
		操作间	4	$7.77 \times 10^{-2}$	0.923	1.00
		工作人员门	5	$7.66 \times 10^{-2}$	0.910	0.987

		污物门	6	$6.79 \times 10^{-2}$	0.806	0.874
	南	污物走廊	7	0.164	1.95	2.11
东		设备间	8	$7.91 \times 10^{-2}$	0.940	1.02
		洁净走廊	9	$7.77 \times 10^{-2}$	0.923	1.00
上		会议室	10	$2.09 \times 10^{-2}$	0.247	0.268
	下	胃镜室	11	$3.62 \times 10^{-2}$	0.428	0.464
		走廊	12	$1.46 \times 10^{-2}$	0.173	0.188

由表11-19可知，透视状态下DSA手术室各屏蔽体外表面0.3m处的周围剂量当量率最大为 $2.11\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“具有透视功能的X射线机在透视条件下检测时，周围剂量当量率控制目标值应不大于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ”的要求。评价范围内其他环境保护目标距本项目距离更远，间隔的墙体等结构更多，因此受到的辐射影响小于相邻区域，也满足上述剂量率要求。

#### 11.2.5.4 人员剂量估算

##### (1) 工作负荷

本项目DSA手术室年最大手术台数均为1000台，保守全部按介入手术考虑。每台手术透视状态下出束时间约为10min，摄影状态下出束时间约为0.5min。本项目辐射工作人员透视状态下工作时间为166.7h/年，摄影状态下工作时间为8.3h/年。

##### (2) 估算方法

相关人员受到的年有效剂量计算公式如下：

$$H_w = H_R \cdot K \cdot t \cdot T \cdot 10^{-3} \quad (11-49)$$

式中： $H_w$  ——年有效剂量， $\text{mSv}/\text{a}$ ；

$H_R$  ——手术室外周围剂量当量率， $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

$K$  ——有效剂量与吸收剂量换算系数，取 $1\text{Sv}/\text{Gy}$ ；

$t$  ——出束时间， $\text{h}/\text{a}$ ；

$T$  ——人员居留因子，参照GBZT201.1-2007附录A取值。

##### (3) 估算结果

###### ①控制室职业人员附加年有效剂量估算

本项目DSA手术室配备1名影像工作人员，该工作人员不参与其他科室辐射工作。

影像工作人员全程在控制室操作位处，其剂量率按

影像工作人员受到的附加剂量见表11-40。

表 11-40 DSA 所致影像工作人员附加剂量估算结果一览表

关注点位	透视状态		摄影状态		居留因子	年附加有效剂量 (mSv/a)
	总剂量率 (μSv/h)	出束时间 (h/a)	总剂量率 (μSv/h)	出束时间 (h/a)		
控制室	$4.00 \times 10^{-2}$	166.7	1.00	8.3	1	$1.50 \times 10^{-2}$

本项目 DSA 手术室控制室辐射工作人员年附加有效剂量为  $1.50 \times 10^{-2}$ mSv。

## ②手术室医护人员附加剂量估算

透视状态下，手术医生护士穿戴 0.5mmPb 铅防护用品，在 DSA 自带的 0.5mmPb 床旁铅帘和铅吊屏后进行手术。根据《医用 X 射线诊断设备质量控制检测规范》（WS76-2020）附录 B 中表 B.1 X 射线透视设备的检测项目及技术要求“7、非直接荧光屏透视设备透视防护区检测平面上周围剂量当量率不大于  $400\mu\text{Sv}/\text{h}$ ”，因此本次评价保守按照 X 射线设备在确保铅悬挂防护屏和床侧铅挂帘等防护设施正常使用的情况下，手术医生和护士铅衣外按照在透视防护区检测平面上允许的最大剂量率  $400\mu\text{Sv}/\text{h}$  进行计算。

摄影状态下，影像工作人员在控制室操作 DSA 出束，手术医生护士在按照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中 7.8.3 “除存在临床不可接受的情况外，图像摄影时工作人员应尽量不在机房内停留；对受检者实施照射时，禁止与诊疗无关的其他人员在机房内停留”的要求，在控制室等待。因此摄影状态下的剂量均按控制室处剂量率估算。

本项目 DSA 手术室配备 3 名医护人员。手术室配备的医护人员不参与其他科室的辐射工作，按辐射工作人员不轮班的情况保守计算。根据公式 11-39 和公式 11-40 计算可知，DSA 手术透视管电压 125kV 下，0.5mmPb 防护用品+0.5mmPb 铅帘和铅吊屏的辐射透射因子 B 为  $1.70 \times 10^{-2}$ 。手术室医生护士附加剂量估算结果见表 11-41。

表 11-41 医生护士附加年有效剂量估算结果一览表

场所	工作模式	剂量率( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	屏蔽防护( $\text{mmPb}$ )	透射因子	时间( $\text{h/a}$ )	有效剂量( $\text{mSv/a}$ )	
DSA 手术室 (医生)	透视 (同室)	400	0.5	$1.70 \times 10^{-2}$	166.7	1.13	1.14
	摄影 (隔室)	1.00	/	/	8.3	$8.30 \times 10^{-3}$	
DSA 手术室 (护士)	透视 (同室)	400	0.5	$1.70 \times 10^{-2}$	166.7	1.13	1.14
	摄影 (隔室)	1.00	/	/	8.3	$8.30 \times 10^{-3}$	

根据计算, 本项目手术医生护士附加有效剂量最大为  $1.14\text{mSv/a}$ , 低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 中年剂量限值(职业人员  $20\text{mSv}$ ) 及本次评价所取的年剂量约束限值(职业人员  $5.0\text{mSv}$ )。

上述估算并未考虑 DSA 自身材料及患者的屏蔽作用, 且 DSA 装置的床边操作系统、床边剂量控制系统等防护设施可实时显示剂量率、调节运行档位, 有效控制照射剂量。因此, 项目 DSA 在正常运行情况下, 医护人员实际受到的年附加剂量率将小于理论计算值。

## 2.公众

根据表11-39计算结果, 结合公式11-42, 项目正常运行时, 公众受到的年有效剂量见表11-42。

表 11-42 DSA 介入手术室周边公众受到的年有效剂量估算结果一览表

关注点位置描述	透视状态		摄影状态		居留因子	年有效剂量估算( $\text{mSv/a}$ )
	周围剂量当量率( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	出束时间( $\text{h/a}$ )	周围剂量当量率( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	出束时间( $\text{h/a}$ )		
北侧洁净走廊	$8.45 \times 10^{-2}$	166.7	2.11	8.3	1/5	$6.32 \times 10^{-3}$
西侧污物走道	$3.50 \times 10^{-2}$	166.7	0.874	8.3	1/5	$2.62 \times 10^{-3}$
南侧污物走廊	$8.45 \times 10^{-2}$	166.7	2.11	8.3	1/5	$6.32 \times 10^{-3}$
东侧设备间	$4.08 \times 10^{-2}$	166.7	1.02	8.3	1/20	$7.63 \times 10^{-4}$
东侧洁净走廊	$4.00 \times 10^{-2}$	166.7	1.00	8.3	1/5	$2.99 \times 10^{-3}$
上方会议室	$1.07 \times 10^{-2}$	166.7	0.268	8.3	1/20	$2.00 \times 10^{-4}$
下方胃镜室	$1.86 \times 10^{-2}$	166.7	0.464	8.3	1/2	$3.48 \times 10^{-3}$
下方走廊	$7.50 \times 10^{-2}$	166.7	0.188	8.3	1/5	$2.81 \times 10^{-3}$

由表11-42可知, 本项目DSA手术室正常运行时, 手术室周围公众受到的年有效剂量最大值为  $7.94 \times 10^{-3}\text{mSv}$ , 满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》

(GB18871-2002) 中年剂量限值(公众人员1mSv)及本次评价所取的年剂量约束值(公众人员0.1mSv)。评价范围内其他环境保护目标距本项目距离更远,间隔的墙体等结构更多,因此受到的辐射影响小于相邻区域,也满足上述年剂量要求。

### 11.3 事故影响分析

#### 11.3.1 核医学科

##### 11.3.1.1 可能发生的辐射事故

- ①放射性药物洒漏导致工作场所受到污染。
- ②放射性物质丢失、被盗,导致环境放射性污染或人员事故照射。
- ③工作场所门禁失效,人员误入辐射工作场所或给药后患者未经许可离开指定区域。
- ④衰变池池体或管道破损导致放射性废水泄漏。

##### 11.3.1.2 应对措施

- ①药物操作人员应熟悉操作流程,在手套箱内操作,操作时台面应铺设吸水纸。
- ②严格执行放射性药物和放射性废物台账管理制度,出入库登记,定期清点。
- ③定期检查门禁系统、电离辐射警告标志、工作状态指示灯等安全措施,确保其正常运行。
- ④衰变池池体和放射性废水管道设有耐腐蚀、防渗漏措施,衰变池内设置液位监控,监控液位异常变化,运维人员应熟悉设备操作,避免误操作。

#### 11.3.2 放疗科

##### 11.3.2.1 后装机

###### (1) 可能发生的辐射事故

- ①安全联锁失效,人员可能在防护门未关闭时误入后装机房,如果这时运行放射源,则可能造成误照射事故。
- ②除受治疗患者以外,机房中仍有其他人员未撤离时,操作人员未严格按照操作规程确认机房环境便运行后装机,则会造成机房中人员误照射。
- ③后装机设备故障,在使用过程中卡源事故。
- ④放射源掉落,使工作人员或公众受到外照射。
- ⑤放射源丢失或被盗事故,属于较大辐射事故。

## (2) 事故影响分析

当放射源处于裸源状态，估算在距放射源 $^{192}\text{Ir}$ 不同距离、不同接触时间人员所接受的有效剂量， $^{192}\text{Ir}$ 裸露可能导致的有效剂量计算结果见表11-23。

表 11-43 裸源情况下达到剂量限值所需时间

剂量限值 \ 距离	0.05m	0.1m	0.5m	1m	2m	2.5m
20mSv	4.38s	17.53s	7.3min	29.22min	116.87min	182.62min
1mSv	0.22s	0.87s	21.91s	1.46min	5.84min	9.13min

事故情景假设及后果估算：

若发生警示灯和联锁装置损坏，人员误入治疗室，当距离放射源1m超过1.46min时会造成1mSv剂量照射。若治疗过程中出现卡源事故，人员进入治疗室进行手动回源，当超过7.3min（与放射源距离以0.5m计算），会造成20mSv的剂量照射。

放射源掉落时，需用长柄镊子将放射源暂放于应急储源器，此时对辐射工作人员会产生辐射。人员短时间近距离接触，假设放射源处于最大 $3.7 \times 10^5 \text{ MBq}$ 活度时，采用长柄镊子放源时，与放射源距离以0.5m计算，短时间接触30s，受照剂量为13.7mSv。放置于应急储源器之后，辐射工作人员及时撤离机房，待供源单位进行维修。

## (3) 应对措施

①医院应对从事辐射的操作人员进行定期培训，进行考核，考核不合格的，不得上岗。加强设备运行管理，使放射源的安全管理制度规范化和制度化。

②设备安装调试时必须由设备厂家专业人员负责完成，安装调试时关闭防护门，并在机房门外设立辐射警示标志。更换放射源时应对治疗室实行封闭管理，并在机房门外设立警戒线，无关人员严禁进入，更换放射源工作必须由设备厂家专业人员负责完成，换源结束后应对现场进行详细的辐射剂量率测量。

③应经常检查治疗系统的安全装置，确保处于正常工作状态，安全装置发生故障时应及时排除，安全装置的故障未排除前，治疗系统不得进行开机操作。

④每天开机前应检查联锁装置、报警装置的工作状态，保证其处于良好的工作状态，防止带故障开机操作。

⑤治疗过程中出现卡源事故或掉源事故

后装机本身设计具有放射源应急自动返回贮源器的功能。从而保证在实施治疗

期间，当发生停电、卡源或意外中断照射时，放射源能自动返回工作贮源器。

治疗过程如果出现停电或者系统故障导致卡源时，使用“急停按钮”和使后装机断电都不能将放射源收回到储源罐中心，辐射工作人员将第一时间通过手动回源措施进行应急处理，使用手动收源扳手将放射源收回到储源罐中心。由于设备未定，使用手动回源扳手的具体操作措施应在设备确定后按照设备说明书进行操作。放射源掉落时，辐射工作人员采用长柄镊子将放射源放置在应急储源器中，待供源单位维修，医院辐射工作人员不参与。

在处理卡源、落源的过程中，工作人员需佩戴个人剂量报警仪，穿戴辐射防护用品。事故处理期间，安全系统同时显示和记录已照射的时间和剂量，直到下一次照射开始，同时应发出声光报警信号。操作间内的剂量监测系统可以实时监测机房内辐射剂量水平，剂量水平回归正常时代表处理完成。辐射工作人员进入机房内操作手动回源措施进行应急处理时，必须通过监测设施记录当时的辐射剂量率水平，记录处理时间和受照累积剂量。事故处理后及时总结并记录，包括事故发生的时间和地点、对任何可能受到照射的人员所做的辐射剂量估算结果、采取的纠正措施、事故的可能原因、为防止类似事件再次发生所采取的措施。

⑥为防止放射源丢失、被盗，应加强安保工作，实行 24 小时监控。

**应急措施：**当发生放射源丢失被盗事故，事故发现者应立即上报医院辐射事故应急领导机构。接到报告后，医院应立即启动辐射事故应急预案。同时，保护事故现场，防止无关人员进入现场，在 2 小时内填写《医院辐射事故初始报告表》，并通过电话联系方式向当地生态环境主管部门和公安部门报告，协助公安、生态环境主管部门对被盗的密封源进行侦察和追缴。禁止缓报、瞒报、谎报或者漏报辐射事故。

### 11.3.2.2 直线加速器

#### （1）可能发生的辐射事故

①医用电子直线加速器的安全联锁系统失效，在机房内部有放射工作人员停留，或者病人家属在防护门关闭后尚未撤离，或者机房防护门未关闭的情况下启动出束。

②放射工作人员对医用电子直线加速器进行误操作或医用电子直线加速器出现故障，导致出束剂量超过放射治疗要求。

③医用电子直线加速器所在房间的局部屏蔽防护遭受损坏，导致射线泄漏，机

房外部辐射剂量率超标。

## (2) 事故分析

本项目 10MV 直线加速器主射束 1m 处最高剂量率为 2400cGy/min, 在对病人开机治疗时, 若出现人员误入、误留治疗室, 则相关人员均会受到不同程度的辐射影响。本次评价按照环境影响评价最不利原则, 分别估算患者家属位于治疗室的不同位置时, 一次治疗所受到的剂量 (保守以最大剂量率出束、考虑到平均每次治疗剂量 4.5Gy, 则 10MV 电子直线加速器一次治疗照射时间 4.5Gy/2400cGy/min=0.1875min=11.25s) 和公众成员位于迷路内入口, 和防护门外 30cm 时, 一次治疗所受到的剂量。

有用线束方向和泄漏辐射的剂量率按公式 11-43 估算, 在非有用线束方向受到散射辐射剂量率按公式 11-44 计算:

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \quad (11-50)$$

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^2} \quad (11-51)$$

式中:

$\dot{H}_0$ —加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最高剂量率, 本项目 10MV 加速器为 24Gy/min;

$f$ —对有用束为 1, 对 90° 泄漏辐射为 0.001;

$R$ —辐射源点至关注点的距离, m;  $R^2 = (1^2 + R_s^2)$ ;

$\alpha_{ph}$ —患者 400cm<sup>2</sup> 面积上的散射因子, 取 10MV 加速器散射角 90° 中的较大值, 为  $3.81 \times 10^{-4}$ ;

$R_s$ —患者 (位于等中心点) 至关注点的距离, m;

$F$ —治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积, cm<sup>2</sup>。项目治疗最大照射野为 40cm×40cm, 则  $F$  取值 1600cm<sup>2</sup>。

根据公式 11-43、公式 11-44, 主束方向、非有用线束方向不同距离不同受照时间所致人员剂量见表 11-44。

表 11-44 不同照射方向人员滞留机房内受照剂量限值估算表

估算点		吸收剂量率 (mSv/min)	单次治疗所受剂量 (mSv)
直线加速器 (1) 直线加速器 (2)	有用线束方向, 距 靶点 1m 处	24000	4500
	非有用线束方向, 距等中心 1.0m 处	48.6	9.11
	迷路转角处, 距等 中心约 4.8m 处	2.59	0.49

注: 直线加速器一次治疗人员所受剂量均为4.5Gy。

根据表11-24可知, 在直线加速器出束治疗期间, 若出现人员误留治疗室的情况, 人员处于非主束方向受到泄漏辐射和散射辐射照射剂量在一次治疗中最低为0.49mSv; 防护门未关闭情况下, 公众位于2间加速器机房防护门处的辐射剂量率根据前文计算结果最大为 $141.04\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 计算可得相关人员在直线加速器一次治疗中受到的剂量为 $4.41 \times 10^{-4}\text{mSv}$ 。

综上所述, 当出现人员误入、误留治疗机房时, 相关人员所受剂量较高, 会发生一般辐射事故, 因此医院应加强管理, 杜绝人员误入、误留治疗机房, 当出现上述事故时, 医院应及时启动应急预案, 并根据应急预案的程序及时报告主管部门。

### (3) 应对措施

针对以上突发事故, 本次环评提出以下防范措施:

①医院应按操作规程定期对各个联锁装置进行检查, 发现故障及时清除, 严禁在门-机、门-灯联锁装置失效的情况下违规操作; 通过故障报警系统及时发现故障, 及时修复; 通过纵深防御以减少由于某个联锁失效或在某个联锁失效期间产生辐射。

②辐射工作人员应在开机运行前认真检查机房内人员情况, 除病人外, 一律不得停留。待确认无误后, 方可进行下一步操作。

③辐射工作人员须加强专业知识学习, 加强防护知识培训; 加强职业道德修养, 增强责任感, 严格遵守操作规程和规章制度; 管理人员应强化管理, 落实安全责任制, 经常督促检查。

④医院在采购加速器时应充分考虑生产企业的售后产品技术支持, 提高产品可靠性; 在维护和维修时, 禁止擅自解除或旁路联锁系统。

⑤医院应保证电子直线加速器紧急停机按钮、设备控制台紧急停机按钮以及机房内的紧急开门按钮、紧急停机按钮、固定式剂量报警仪正常工作, 同时应确保辐

射工作人员做好定期辐射巡测工作，熟知相关辐射事故应急措施，在辐射事故发生后及时上报、估算意外照射剂量，并将受意外照射人员及时送医。

针对以上突发事故，本次环评提出以下应急措施：

①事故性出束的应急：工作人员在治疗室内为患者摆位或者其他工作时，控制台处工作人员误开机出束；在治疗设备维修过程中，因检修人员误操作导致出束。在上述两种情况下，应立即就近按下急停开关，切断电源，迫使机器停止出束。

②人员误留情况下的应急：为防止治疗病人的陪人或者其他人员误留在治疗室的误照射，工作人员摆位后应最后出来关防护门，如通过监视器发现这种情况操作者应立即按下控制台上的急停开关，迫使机器停止出束。

③人员受到意外照射的应急：应立即停机，尽快安排受照射人员进行医学检查，确认意外辐射的剂量并采取适当措施尽量减轻辐射效应。并按《放射事故报告制度》进行处理，尽快向主管部门报告，在主管部门的监督指导下做好善后处理工作。

④个人剂量报警仪报警或个人剂量监测值异常，应立即停止辐射工作，分析原因。若因剂量卡泡水、污染、遗忘在机房内等，应对相关人员加强培训管理；如该异常剂量为真实剂量，应尽快安排对应辐射工作人员进行职业健康体检。

### 11.3.2.3 CT 模拟定位机

#### （1）可能发生的辐射事故

项目运行中，可能出现的事故风险如下：

①射线装置失控、损坏，或者工作状态指示灯、紧急开关、电离辐射警告标志等防护设施不完善或失灵，或者防护门发生故障，导致人员误入或误停留在 CT 机房内而超剂量照射。

②操作人员违反操作规程或误操作，造成意外照射。

#### （2）应对措施

针对 CT 运行中可能出现的辐射事故，应采取以下预防措施，尽可能减少或控制事故的危害和影响。

①制定自检制度且严格进行经常性自检，如发现门-灯联锁、工作状态指示灯、电离辐射警告标志不完善或失灵，或者防护门出现故障，应立即补充、修复；

②射线装置运行过程中，如发现有人误入机房，应立即停机，终止照射。立即向单位领导汇报，并控制现场区域，防止无关人员进入；

③当发生辐射照射事故时，应在第一时间通报当地生态环境部门和卫生部门；  
④对可能受到大剂量照射的人员，及时送医院检查和治疗；  
⑤总结事故原因，写出事故报告，及时修改应急预案，避免事故再次发生。建设单位应加强管理，严格要求辐射工作人员按照操作规程开展工作，并在实际工作中不断对辐射安全管理制度进行完善，加强辐射防护知识的培训，定期检查射线装置及各项安全防护装置的性能，尽可能避免辐射事故的发生。

### 11.3.3 DSA 手术室

#### 11.3.3.1 可能发生的辐射事故

①DSA 控制系统、电气系统故障或影像人员误操作，导致手术室内辐射工作人员受到超剂量照射。

②DSA 出束期间，无关人员未撤离手术室或有无关人员误入，导致其超剂量照射。

③介入治疗时，手术医生或护士未穿戴防护用品进入手术室，或防护用品破损失效，导致医生或护士受到超剂量照射。

#### 11.3.3.2 应对措施

①建立健全设备检维修制度，按照要求定期进行设备检查维护。

②工作人员出束前应确认手术室内情况，确认没有无关人员后方可出束。

③定期检查门灯联锁等辐射安全防护措施，确保其正常运行。

④个人防护用品应妥善保存，避免弯折，发现破损应及时上报更换。

## 11.4 辐射环境影响评价结论

本项目辐射工作场所采取辐射屏蔽措施后，对评价范围内环境保护目标的辐射环境影响满足相关标准限值要求；项目正常运行所致工作人员、公众附加有效剂量分别满足本次评价 5mSv/a、0.1mSv/a 剂量约束值要求；项目产生的废弃物均能按要求妥善处置，满足相关标准要求。

综上所述，本项目严格落实本环评提出的设施和措施后，对周围环境的辐射影响在可接受范围之内。

表 12 辐射安全管理

### 12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

为了保证辐射防护措施得到有效落实，指导和督促从事放射活动的人员做好辐射安全和放射防护工作，医院按照《中华人民共和国环境保护法》《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》《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等要求，成立了辐射防护与环境保护领导小组，发布了正式文件（西交一院榆医发〔2024〕34号）明确了余军军与赵文玉为组长，张哲、李明军、白万祥、和水祥为副组长，郭永华为辐射安全防护管理员，常娜、贾喆、鱼永卫等为领导小组成员，并明确了相关工作职责。

辐射防护与环境保护领导小组主要职责如下：

- (1) 负责制定辐射防护计划、工作制度和辐射事故应急预案演练，并定期组织实施；
- (2) 负责对工作人员辐射防护与安全培训管理，辐射防护档案建立、工作人员岗前、岗中及离岗后职业健康检查，建立个人健康监护档案，实施一人一档健康管理；
- (3) 负责辐射工作场所及周围辐射环境定期监测，指导个人及患者做好辐射防护，杜绝辐射安全事故的发生；
- (4) 负责工作人员个人剂量监测管理，每季度实施更换，对异常结果开展复查及异常人员调岗管理；
- (5) 负责辐射工作场所及周围辐射环境年度检测，委托具有资质的辐射安全检测机构进行检测，并出具年度检测报告；
- (6) 负责辐射安全管理信息系统内容实时维护更新以及辐射安全年度报告上报；
- (7) 负责辐射安全许可证内容变更、新增、换发等事宜具体办理。

医院现有辐射防护与环境保护领导小组人员配备和相关人员职责，能够满足对辐射安全与环境保护管理机构设置的管理要求。本项目投入使用后，应将其纳入医院现有管理体系，并根据人事变动情况及时调整人员名单，明确相关人员职责。

## 12.2 辐射安全管理规章制度

### 12.2.1 辐射安全管理制度

医院已有在运行的核医学科、后装治疗机房、直线加速器机房和 DSA 手术室，已按照陕环办发〔2018〕29 号的要求制定了较为完善的辐射安全管理规章制度，包括：《全国核技术利用辐射安全申报系统运行管理制度》《放射性同位素与射线装置管理制度》《放射性同位素与射线装置岗位职责及操作规程》《辐射工作人员培训管理制度和培训计划》《辐射工作人员个人剂量管理制度》《关于放射工作人员个人剂量仪管理规定的通知》《辐射工作人员职业健康体检管理制度》《辐射安全防护设施的维护与维修制度》《辐射环境监测制度》《辐射环境监测设备使用与检定管理制度》《放射性同位素与射线装置购买及处理程序》《DSA 操作规程》《直线加速器操作规程》《防护用品管理制度》《放射性药品采购登记使用核对保管登记注销制度》《放射性废物处理管理办法》《放射性药品采购使用及废物处理流程图》《放疗科后装铱-192 放射源购置处理和安全管理制度》《放射源转移转让及收贮制度》《ECT 操作规程》《ECT 维护保养制度》等，用于医院的辐射安全与防护管理。

医院应根据《陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的<陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表>的通知》（陕环办发〔2018〕29 号），针对本次新增的核医学科，补充《PET-CT 操作规程》《PET-CT、SPECT-CT 设备检维修制度》《回旋加速器操作规程》等，将本项目辐射工作场所纳入对应制度管理体系和辐射事故应急体系，并在今后日常工作中应严格落实各项辐射安全管理制度，根据实际工作对其进行不断完善，使之更满足辐射安全管理要求。

### 12.2.2 职业人员能力建设保障要求

本项目配备的辐射工作人员应满足以下要求：

(1) 医院应组织辐射工作人员参加国家核技术利用辐射安全与防护培训平台的考核，取得对应类别的成绩单后方可上岗。辐射工作人员取得上岗证后，应按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的规定，每五年进行再培训。项目运行期若新增人员，同样需要参加辐射安全培训并取得成绩单。

(2) 辐射工作人员上岗前，应当进行上岗前的职业健康检查，符合放射工作人员健康标准的，方可参加相应的放射工作；上岗后的放射工作人员应定期进行职业

健康检查，两次检查的时间间隔不应超过 2 年，必要时可增加临时性检查；放射工作人员脱离放射工作岗位时，医院应当对其进行离岗前的职业健康检查；工作人员职业健康检查工作应由职业健康检查机构承担。

（3）辐射工作人员要接受个人剂量监测，医院负责建立个人剂量档案。放射工作人员调动时，个人剂量档案将随其转给调入单位，个人剂量档案终身保存；个人剂量计的监测周期一般为 1 个月，最长不得超过 3 个月；工作人员个人剂量监测工作应委托具有相关资质的个人剂量监测技术服务机构进行。

（4）应建立辐射工作人员培训档案、个人剂量监测档案和职业健康监护档案，其中培训档案应包括每次培训的课程名称、培训时间、考试或考核成绩等资料；个人剂量监测档案应包括：1) 历年常规监测的方法和结果等相关资料；2) 应急或者事故中受到照射的剂量和调查报告等相关资料；职业健康监护档案应包括：1) 职业史、既往病史和职业照射接触史；2) 历次职业健康检查结果及评价处理意见；3) 职业性放射性疾病诊疗、医学随访观察等健康资料。

### 12.2.3 辐射安全管理标准化建设

根据《陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的<陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表>的通知》（陕环办发〔2018〕29 号）的相关要求，核技术利用单位应进行辐射安全管理标准化建设。

医院现有的辐射安全管理与标准化建设的具体要求对照情况见表 12-1。

表 12-1 辐射安全管理标准化建设项目表—辐射安全管理部分

管理内容	管理要求	落实情况
决策层	就确保辐射安全目标做出明确的文字承诺，并指派有决策层级的负责人分管辐射安全工作。	已落实
	年初工作安排和年终工作总结时，应包含辐射环境安全管理工作内容。	已落实
	明确辐射安全管理部门和岗位的辐射安全职责。	已落实
	提供确保辐射安全所需的人力资源及物质保障。	已落实
人员管理	参加辐射安全与防护培训并通过考核取得合格证，持证上岗；熟知辐射安全法律法规及相关标准的具体要求，向员工和公众宣传辐射安全相关知识。	已落实
	负责编制辐射安全年度评估报告，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度评估报告。	已落实
	建立健全辐射安全管理制度，跟踪落实各岗位辐射安全职责。	已落实
	建立辐射环境安全管理档案。	已落实
	对辐射工作场所定期巡查，发现安全隐患及时整改，并有巡查及整改记录。	已落实

	录。	
直接从事放射工作的作业人员	岗前进行职业健康体检，结果无异常。	已落实
	参加辐射安全与防护培训并通过考核取得合格证，持证上岗。	已落实
	了解本岗位工作性质，熟悉本岗位辐射安全职责，并对确保岗位辐射安全做出承诺。	已落实
	熟悉辐射事故应急预案的内容，发生异常情况后，能有效处理。	已落实
机构建设	设立辐射环境安全管理机构和专（兼）职人员，以正式文件明确辐射环境安全管理机构和负责人。	已落实
制度建立与执行	建立全国核技术利用辐射安全申报系统运行管理制度，指定专人负责系统使用和维护，确保业务申报、信息更新真实、准确、及时、完整。	已落实
	建立放射性同位素与射线装置管理制度，严格执行进出口、转让、转移、收贮等相关规定，并建立放射性同位素、射线装置台账。	已落实
	建立本单位放射性同位素与射线装置岗位职责、操作规程，严格按照规程进行操作，并对规程执行情况进行检查考核，建立检查记录档案。	已落实
	建立辐射工作人员培训管理制度及培训计划，并对制度的执行情况及培训的有效性进行检查考核，建立相关检查考核资料档案。	已落实
	建立辐射工作人员个人剂量管理制度，每季度对辐射工作人员进行个人剂量监测，对剂量超标人员分析原因并及时报告相关部门，保证个人剂量监测档案的连续有效性。	已落实
	建立辐射工作人员职业健康体检管理制度，定期对辐射工作人员进行职业健康体检，对体检异常人员及时复查，保证职业人员健康监护档案的连续有效性。	已落实
	建立辐射安全防护设施的维护与维修制度（包括维护维修内容与频次、重大问题管理措施、重新运行审批级别等），建立维护与维修工作记录档案（包括检查项目、检查方法、检查结果、处理情况、检查人员、检查时间）。	已落实
	建立辐射环境监测制度，定期对辐射工作场所及周围环境进行监测，并建立有效的监测记录或监测报告档案。	已落实
	建立辐射环境监测设备使用与检定管理制度，定期对监测仪器设备进行检定，并建立检定档案。	已落实
*应急管理	结合单位实际，制定可操作性的辐射事故应急预案，定期进行应急演练。	已落实
	辐射事故应急预案应报所在地县级环境保护行政主管部门备案。应急预案应当包括下列内容：①可能发生的辐射事故及危害程度分析；②应急组织指挥体系和职责分工；③应急人员培训和应急物资准备；④辐射事故应急响应措施；⑤辐射事故报告和处理程序。	已落实
注：表中标注有“*”内容为关键项，为强制性规范要求。		

根据表 12-1 可知，医院现有的辐射安全管理制度基本满足陕环办发〔2018〕29号相关要求，但辐射事故应急预案内容不够完整，医院应进一步完善并细化现有辐射事故应急预案并加强演练。

## 12.3 辐射监测

### 1、放射工作场所日常监测

本项目运行前医院应按要求配备 X- $\gamma$ 剂量监测仪、 $\alpha$ 、 $\beta$ 表面污染仪、中子剂量率仪等自主监测仪器，并按照需要配备个人剂量计、个人剂量报警仪，每年委托有资质单位对辐射工作场所进行一次定期监测。按要求为辐射工作人员配备个人剂量计，委托有资质单位定期对辐射工作人员进行个人剂量检测并存档。

医院还应配备 $\beta$ 表面污染检测仪，每年委托有资质单位对核医学科辐射工作场所进行一次定期监测，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度医院的评估报告。

医院应要求所有辐射工作人员正确佩戴个人剂量计，每季度委托有资质单位进行监测，并建立个人剂量档案，安排专人负责个人剂量监测管理。

项目辐射监测计划见表 12-2。

表 12-2 项目辐射监测计划

位置	监测内容	监测点位	监测因子	监测频次
核医学科	辐射水平	①核医学科各功能用房四周墙体、顶棚、防护门（缝隙和中央）、观察窗外 30cm 处、操作位、管线洞口/通风口，机房顶棚 30cm 处，机房地面下方（楼下）距楼下地面 1.7m 高度处，核医学科工作场所控制区边界外 30cm 处；②手套箱、手孔位、操作位、柜身周围 5cm 处；③药物屏蔽容器表面 5cm 处；注射台的观察窗、手孔位、操作位；④放射性废物桶表面 5cm 处。	X- $\gamma$ 辐射剂量率	每月自测一次，委托有资质单位每年监测一次
		回旋加速器机房屏蔽体外 30cm 处，地下输药管道管沟口处。	中子剂量率	
核医学科	表面污染	放射性药物分装、注射后候诊等场所：工作台面、设备表面、墙壁、地面、座椅、洗手池、患者卫生间地面以及可能受到污染位置。	$\alpha$ 、 $\beta$ 表面污染	每次工作结束（出现放射性药物洒漏应及时进行监测）
		核医学科工作人员手、皮肤暴露部分以及工作服手套、手套、鞋、帽等。		人员及物品离开前
		放射性废物桶表面 5cm 及表面 100cm 处。放射性固废包装袋外表面。		每次人员离开前

	放射性废水	衰变池排放口	总α、总β	委托有资质单位 每次排放前监测一次
放疗科	辐射水平	四周屏蔽墙外 30cm 处、机房楼上 30cm 处、控制室、防护门外 30cm 处、电缆沟	X-γ辐射 剂量率	每月自测一次，委托有资质单位每年监测一次
		储源器表面5cm、100cm		每次换源或维修后
DSA 手术室	辐射水平	四周屏蔽墙外 30cm 处、机房楼上 30cm 处、控制室、防护门外 30cm 处、电缆沟	X-γ辐射 剂量率	每月自测一次，委托有资质单位每年监测一次
个人剂量监测				
监测内容	监测范围	监测类别	监测频次	
个人剂量	所有辐射工作人员	个人剂量	委托有资质单位每季度监测一次	

## 12.4 辐射事故应急

### 12.4.1 辐射事故应急预案

为有效防护、及时控制辐射事故所致的伤害，加强射线装置安全监测和控制等管理工作，保障放射相关工作人员以及射线装置周围人员的健康安全，避免环境辐射污染，根据《陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的<陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设工作项目表>的通知》要求，医院已制定的辐射事故应急预案包括辐射事故分级、现有射线装置的应急处置流程、辐射事故报告流程等内容，针对本项目医院还应在辐射事故应急预案中补充下列内容：

- (1) 可能发生的辐射事故及危害程度分析；
- (2) 应急组织指挥体系和职责分工；
- (3) 应急人员培训和应急物资准备；
- (4) 辐射事故应急响应措施；
- (5) 辐射事故调查、报告和处理程序。

依照《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》（环发〔2006〕145号）有关要求，针对可能发生的辐射事故，医院应根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围，执行辐射事故应急预案。

一旦发生辐射事故，应立即启动应急预案，采取必要的防范措施，并在2小时内填写《辐射事故初始报告表》，由辐射事故应急小组上报当地主管部门，同时上报公安部门；造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。及时组织专业技术人员排除事故，配合各相关部门做好辐射事故调查工作。

#### 12.4.2 本项目辐射事故应急

根据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性核素与射线装置安全与防护条例》、《放射性核素与射线装置安全许可管理办法》等相关法律法规规定，医院已制定《辐射事故应急预案》，规定了应急组织机构与职责，确定了应急联络、报警及现场指挥程序，提出了事故处理及应急措施，符合《陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的<陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表>的通知》（陕环办发〔2018〕29号）的应急管理要求。

根据现场调查，医院运行至今尚未发生辐射事故，未启动过上述应急预案。

医院应结合本项目放射性核素和射线装置的应用情况，对应急预案进行补充修改、完善，将本项目新增的后装机、直线加速器、回旋加速器、PET-CT、SPECT-CT、新增核素等纳入医院辐射事故应急预案。补充针对后装机卡源、新增放射性核素操作过程和分装药物等操作过程中可能出现的辐射事故（放射性药品洒漏、丢失、被盗等事故情况），对医院辐射事故应急预案进行修订。依据国家相关法律法规、标准要求等，不断对应急预案进行补充修改和完善，使应急预案更具有操作性、可行性。同时应加强辐射事故应急预案的演练，提高事故应急处置能力。辐射事故应急预案应报所在地区级生态环境行政主管部门备案。

### 12.5 环境保护投资与“三同时”环保验收一览表

#### 12.5.1 环保投资

项目总投资 12000 万元，其中环保投资 241 万元，占总投资的 2.01%。环保投资主要用于辐射防护施工、辐射安全设施购买安装、放射性废弃物处理措施、辐射工作人员职业健康体检、个人防护用品采购以及个剂监测、工作场所监测等。项目环保投资明细一览表见表 12-3。

表 12-3 项目环保投资明细一览表

实施时段	类别	污染源		污染防治措施或设施	费用(万元)
运营期	屏蔽措施	核医学科	γ射线、中子	屏蔽墙体、屏蔽门窗、屋顶地面防护施工、储源屏蔽容器	20
			表面污染	去污用品	1
	放疗科、DSA 手术室	X 射线、γ射线	屏蔽墙体、屏蔽门窗、屋顶地面防护施工		40
	废气	放疗科机房、DSA	NOx、O <sub>3</sub>	动力通风系统	5

固体废物	手术室				
		核医学科	放射性废气	带止逆阀的放射性废气管道、活性炭处理设施 10	
	废水	核医学科	放射性废水	专用放射性废水衰变池及配套放射性废水管道 50	
	后装机房	废后装治疗源		由供应商更换收回处置 /	
	直线加速器机房、回旋加速器机房	废靶、废活化部件		由设备厂家回收 /	
	核医学科	放射性固体废物	铅放射性收集废物桶、放射性废物暂存间及铅暂存容器	5	
	放疗机房	X射线、 $\gamma$ 射线	机房防护墙体、防护门等	5	
			门灯联锁装置、红外防夹装置、自动闭门装置、工作状态指示灯、电离辐射警示标志、摄像监控装置、固定式剂量报警装置、放射源在线监控装置或定位装置等 应急贮源容器、长柄镊子等应急物资	2	
	核医学科	X射线、 $\gamma$ 射线、 $\alpha$ 、 $\beta$ 表面污染	门灯联锁装置、红外防夹装置、自动闭门装置、工作状态指示灯、视频监控、电离辐射警示标志等	15	
			放射性污染防护服等	5	
辐射安全防护措施			手套箱、淋洗模块箱、合成柜、转运注射箱、注射屏蔽套、铅罐、移动铅屏风等辅助防护设施	15	
			门灯联锁装置、红外防夹装置、自动闭门装置、工作状态指示灯、视频监控、电离辐射警示标志等	4	
	DSA手术室	X射线	铅衣、铅围裙、铅颈套、介入防护手套等个人防护用品	2	
			成立辐射安全防护管理领导小组，建立完善辐射安全管理制度	/	
	辐射工作人员培训			1	
人员管理	职业健康体检			1	
	个人剂量监测			1	
	建立个人剂量及职业健康档案			/	
	新增5台X- $\gamma$ 辐射剂量率仪、3台 $\alpha$ 、 $\beta$ 表面污染监测仪、1台中子剂量率仪、患者出院检测仪			12	
环境监测	定期委托监测			5	
	环境影响评价、竣工环境保护验收及其他环保管理和咨询费用			40	
合计				304	

### 12.5.2 竣工环境保护验收

为规范项目竣工环境保护验收的程序和标准,强化医院环境保护主体责任,根据《建设项目环境保护管理条例》(国务院第682号令,2017年10月1日起实施)以及《建设项目竣工环境保护验收管理办法》的规定,项目竣工后应及时进行自主验收,编制验收监测报告。验收合格后,并取得新的辐射安全许可证后,方可投入生产或使用。项目竣工环境保护验收清单见表12-4。

表 12-4 竣工环境保护验收清单

序号	验收内容	
1	辐射安全管理机构	设立辐射安全防护管理领导小组并明确成员职责,负责项目辐射安全与环境管理工作。
2	辐射安全管理制度	根据环评要求以及陕环办发〔2018〕29号文件要求,按照项目的实际情况,补充《PET-CT操作规程》《PET-CT、SPECT-CT设备检维修制度》《回旋加速器操作规程》等制度并完善其他现有辐射安全管理制度。针对本项目运行过程中可能存在的辐射风险,完善辐射事故应急预案,落实必要的应急物资。定期进行辐射事故应急演练。
3	辐射安全防护措施	<p>放疗科</p> <p>①后装机房设置固定式剂量警报装置、工作状态指示灯、电离辐射警告标识、实时摄像监控系统、门灯联锁装置、对讲装置、急停按钮、红外防夹装置、紧急开门装置等。 ②直线加速器机房设置固定式剂量警报装置、工作状态指示灯、电离辐射警告标识、实时摄像监控系统、门灯联锁装置、对讲装置、急停按钮、红外防夹装置、紧急开门装置等。 ③CT模拟定位机房设置观察窗或视频监控装置、门灯联锁装置、急停按钮、电离辐射警告标志、工作状态指示灯、红外防夹装置、自动闭门装置等辐射安全防护措施。</p> <p>核医学科</p> <p>①项目核医学科工作场所设置电离辐射警告标志,划分控制区和监督区,控制区出入口安装门禁;在地面设置路径导向标识,引导各类人员按规定路径活动; ②机房墙体、防护门、观察窗防护当量满足标准限值要求,门窗搭接良好,开闭正常; ③PET-CT机房、PET-MR机房和SPECT-CT机房内设置对讲装置,观察窗或视频监控装置、门灯联锁装置、电离辐射警告标志、工作状态指示灯、红外防夹装置、自动闭门装置等辐射安全防护措施, PET-CT机房和SPECT-CT机房设置急停按钮。 ④回旋加速器机房内设置视频监控装置、门灯联锁装置、急停开关、电离辐射警告标志、工作状态指示灯、固定式剂量报警仪、清场措施等辐射安全防护措施; ⑤核素病房设置门禁管理,病房区域出口处设置出院检测</p>

			设备： ⑥核素操作场所按要求和数量设置手套箱或自动分装仪，并设置活性炭过滤装置和通风装置； ⑦配备铅防护容器、钨合金注射器防护套等； ⑧注射后等待室、留观室、注射窗口处、核素病房等位置按要求配置带铅污物桶，桶外张贴电离辐射警示标识，用于收集放射性固体废物。
		DSA 手术室	设置对讲装置、观察窗或视频监控装置、门灯联锁装置、急停按钮、电离辐射警告标志、工作状态指示灯、红外防夹装置、自动闭门装置等辐射安全防护措施。
4	防护用品	后装机房	配备应急储源罐、长柄镊子等应急用品。
		核医学科	敷贴室配备有机玻璃防护用品，其余区域配备放射性污染防护服。
5	机房面积	核医学科	装修后 SPECT-CT、PET-CT 机房有效使用面积 $\geq 30m^2$ ，机房内最小单边长度 $\geq 4.5m$ 。
6	放射性废气	核医学科	核医学科设置专用排风管道，放射性废气采取活性炭过滤装置处理后，由楼顶排放。回旋加速器、手套箱、自动合成设备等密闭设备应有专用的排风装置，风速应不小于0.5m/s。回旋加速器工作区域、 $^{131}I$ 治疗病房以及设有通风橱、手套箱等场所的通风系统排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。
7	放射性废水	核医学科	应按环评要求建设衰变池，衰变池容积、运行方式、防护措施等均应满足要求。
8	放射性固体废物	核医学科	设置放射性废物暂存间，有放射性废物处理台账。满足暂存时间要求和清洁解控水平的要求后，可作为医疗废物处理。
			所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 10 倍半衰期；含 $^{131}I$ 的放射性固体废物暂存时间超过 180 天。满足暂存时间后经检测表面辐射剂量率 $\leq 0.1mSv/h$ ；废物包装盒外表面： $\beta < 0.8Bq/cm^2$ 的可以解控按医疗废物处理。
			废敷贴源、放射性核素发生器、回旋加速器靶件等由供源单位或设备厂家回收。
9	环境监测仪器		根据环评要求及验收部分的范围配备 X- $\gamma$ 辐射剂量监测仪器、中子检测仪和表面污染监测仪，自主检测仪器应按要求进行检定/校准，并在有效期内使用。
10	职业教育培训		辐射工作人员应定期参加辐射安全和防护知识培训考核，取得成绩报告单后方能上岗。
11	个人剂量档案		每名辐射工作人员应按要求佩戴个人剂量计，其中介入手术人员应佩戴双个人剂量计。剂量计应定期送检，医院应建立辐射工作人员个人剂量监测档案。
12	健康档案		辐射工作人员应按要求的周期进行职业健康体检，检查满足要求的方可上岗，并建立职业健康检查档案。
13	剂量管理	剂量限值	项目公众剂量约束值取 $0.1mSv/a$ ，职业工作人员剂量约束值取 $5mSv/a$ 。

限值	剂量率限值	放疗科	后装机房在正常工况下机房外关注点处剂量率应满足表 11-13 的要求。 直线加速器机房在正常工况下机房外关注点处剂量率应满足表 11-20 的要求。
		核医学科	屏蔽体外工作人员居留因子小于 1/2 的控制区关注点处剂量率应不大于 $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 其余区域关注点处剂量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ; 合成柜、手套箱、淋洗模块箱、自动分装仪等设备外表面 30cm 处人员操作位的剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 非正对人员操作位表面的剂量率不大于 $25\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。
		DSA 手术室	透视状态下屏蔽体外关注点剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 摄影状态下屏蔽体外关注点剂量率归一至 100mA 后不大于 $25\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

表 13 结论与建议

## 13.1 结论

### 13.1.1 项目概况

为了满足广大患者的诊疗需求和自身发展需要，建设单位在医院西侧规划建设了二病区，并计划在二病区肿瘤科研楼建设核医学科、放疗科和1间DSA手术室。

本项目核医学科涉及3个乙级非密封放射性物质工作场所，负一层核医学科药物制备区域配备1台回旋加速器，用于生产<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>F等PET药物自用，建设1间淋洗制备间，使用放射性核素发生器淋洗制备<sup>99m</sup>Tc和<sup>68</sup>Ga药物；一层核医学科住院治疗区域建设5间核素病房、1间敷贴室、1间吸碘率室及配套区域，开展甲功测定、甲亢治疗、甲癌治疗、<sup>177</sup>Lu住院治疗、敷贴治疗等多种治疗；一层核医学科门诊诊疗区域建设1间PET-CT机房、1间PET-MR机房和2间SPECT-CT机房，使用放射性药物开展PET诊断和SPECT诊断，使用多种核素开展核素门诊注射治疗。

本项目放疗科建设2间直线加速器机房，使用直线加速器开展放射治疗；建设1间后装机房，使用1枚III类<sup>192</sup>Ir放射源开展后装治疗；建设1间CT模拟定位机房，使用CT模拟定位机开展放射治疗前模拟定位。

本项目DSA手术室配备1台DSA，开展放射介入诊疗。

### 13.1.2 实践正当性

本项目开展多种肿瘤相关疾病的诊断、治疗，扩大了医院诊疗范围，提升接收患者数量，使更多患者能够就近就医，具有明显的社会效益；同时本项目提升医院诊疗能力，提升患者体验，提升医院的医疗能力和服务水平，在保障患者健康的同时也为医院创造了更大的经济效益。因此，本项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）“实践的正当性”的要求。

### 13.1.3 辐射环境质量现状

根据辐射环境质量监测结果，项目拟建辐射工作场所的环境 $\gamma$ 辐射剂量率与榆林市 $\gamma$ 辐射剂量率调查结果相当，属天然辐射本地水平，辐射环境现状无异常。

### 13.1.4 辐射安全与防护分析结论

#### 13.1.4.1 核医学科

本项目核医学科屏蔽体外剂量率均满足标准要求，辐射工作人员和周围公众的

附加剂量未超出剂量控制水平的要求。核医学科辐射工作场所按要求设置了电离辐射警告标志、视频监控和对讲装置、急停按钮、红外防夹装置、自动闭门装置等辐射安全防护措施，配备了手套箱、自动分装仪、储源容器、注射屏蔽套等防护用品，合理规划了人员、物资路径，按要求设置了放射性废弃物处置措施。

核医学科正常运行对周围环境的影响满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中相关要求。

#### 13.1.4.2 放疗科

本项目放疗科屏蔽体外剂量率均满足剂量控制水平的要求，辐射工作人员和周围公众的附加剂量未超出剂量控制水平的要求。放疗机房按要求设置了电离辐射警告标志、固定式剂量报警仪、视频监控、急停按钮、红外防夹装置等辐射安全防护措施，后装机房设置应急储源容器等应急装置。放疗机房均按要求设置了通风装置。

放疗科正常运行对周围环境的影响满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中相关要求。

#### 13.1.4.3 DSA 手术室

本项目DSA手术室屏蔽体外剂量率均满足相关标准的要求，辐射工作人员和周围公众的附加剂量未超出剂量控制水平的要求。DSA手术室内按要求设置了电离辐射警告标志、急停按钮、红外防夹装置、自动闭门装置等辐射安全防护措施，机房内设置了动力通风装置。

DSA 手术室正常运行对周围环境的影响满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）相关要求。

#### 13.1.4.4 废弃物影响分析

本项目运行后，核医学科产生的放射性废水经过排水管道收集，暂存于放射性废水衰变池内，经暂存规定期限后排放，废水排放满足《核医学辐射防护和安全要求》（HJ1188-2021）和《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）中相关要求。核医学科非密封放射性物质的分装操作在自动分装仪器、手套箱或自动合成柜设备内进行，上述设备设计有独立的排风系统，负压操作，顶部设置活性炭吸附装置。放射性废气经活性炭处理后汇集至肿瘤科研楼十四层屋顶排放；放射性固体废物分类收集后，送至核医学科对应场所的固废间。

暂存，暂存规定期限后，达到清洁解控水平后，按照医疗废物处置；直线加速器机房和后装机房设置通风装置，其产生的NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>等废气经通风管道引至庭院排风井排放。

本项目放疗科和DSA手术室不产生放射性废弃物。

工作人员和患者产生的生活垃圾、生活污水等已在《西安交通大学第一附属医院榆林医院二病区建设项目环境影响报告书》（榆政环批复〔2025〕103号）中分析论述。

### 13.1.5 辐射安全管理

医院成立了辐射安全防护管理机构，并明确了相关成员职责。医院制定了一系列辐射安全管理制度，用于指导和规范从事放射活动的人员做好辐射安全和放射防护工作。医院应根据实际使用情况不断完善操作规程、岗位职责、辐射安全和防护制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案等，使其具有更强的针对性和可操作性。项目开展后将其纳入医院现有辐射安全管理体系，并根据人事变动情况及时调整人员名单，明确相关人员职责，满足项目对辐射安全管理的要求。

### 13.1.6 项目可行性分析结论

项目在落实本报告提出的各项污染防治措施、辐射安全防护措施和辐射安全管理制度后，运行期对周围环境的辐射影响可达到合理且尽可能低的水平，满足辐射防护最优化原则。项目运行所致放射工作人员和公众年附加有效剂量满足国家相关标准限值要求，符合剂量限值约束原则，产生的废弃物均按相关要求处置。因此，从辐射安全和环境保护角度分析，项目建设可行。

## 13.2 建议与承诺

(1) 项目建设期间，医院应严格按照《陕西省环境保护厅办公室关于印发新修订的<陕西省核技术利用单位辐射安全管理标准化建设项目表>的通知》（陕环办发〔2018〕29号）相关要求，建立健全各项辐射防护管理规章制度，规范管理与操作，认真开展自查自评工作，发现问题及时整改，竣工验收前须达到辐射安全管理标准化要求。

(2) 项目竣工后，医院应按照国务院环境保护行政主管部门规定的标准和程序，对项目配套建设的环境保护设施进行自主验收，经验收合格并取得辐射安全许可证后方可投入运行。

(3) 项目建成运行后,应严格执行辐射环境监测制度,每年应对射线装置应用的安全和防护状况进行年度评估,并于每年1月31日前向辐射安全许可证发证机关报送上一年度辐射安全年度评估报告。

表 14 审批

<p>下一级环保部门预审意见:</p> <p>经办人</p> <p>年 月 日</p>		<p>公 章</p>
<p>审批意见</p> <p>经办人</p> <p>年 月 日</p>	<p>公 章</p>	