核技术利用建设项目

南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目

环境影响报告表

南通市肿瘤医院

2023 年 4 月

生态环境部监制

目 录

表 1　项目基本情况 ..... - 1 -
表 2　放射源 ..... - 7 -
表 3　非密封放射性物质 ..... - 7 -
表 4　射线装置 ..... - 8 -
表 5　废弃物（重点是放射性废弃物） ..... - 10 -
表 6　评价依据 ..... - 11 -
表 7　保护目标与评价标准 ..... - 15 -
表 8　环境质量和辐射现状 ..... - 27 -
表 9　项目工程分析与源项 ..... - 32 -
表 10　辐射安全与防护 ..... - 50 -
表 11　环境影响分析 ..... - 67 -
表 12　辐射安全管理 ..... - 124 -
表 13　结论与建议 ..... - 129 -
表 14　审批 ..... - 136 -

表 1　项目基本情况

<table>
<tr><td colspan="2">建设项目名称</td><td colspan="6">南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设单位</td><td colspan="6">南通市肿瘤医院</td></tr>
<tr><td colspan="2">法人代表</td><td></td><td>联系人</td><td></td><td>联系电话</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">注册地址</td><td colspan="6">江苏省南通市通州区平潮镇通扬北路 30 号</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目建设地点</td><td colspan="6">江苏省南通市通州区平潮镇通扬北路 30 号</td></tr>
<tr><td colspan="2">立项审批部门</td><td colspan="2">/</td><td>批准文号</td><td colspan="3">/</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设项目总投资（万元）</td><td></td><td>项目环保总投资（万元）</td><td></td><td>投资比例（环保投资/总投资）</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">项目性质</td><td colspan="3">☐新建 ☐改建 ☑扩建 ☐其他</td><td>占地面积（m^2）</td><td>/</td></tr>
<tr><td rowspan="9">应用类型</td><td rowspan="2">放射源</td><td>☐销售</td><td colspan="5">☐Ⅰ类 ☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类 ☐Ⅳ类 ☐Ⅴ类</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="5">☐Ⅰ类（医疗使用） ☐Ⅱ类 ☑Ⅲ类 ☐Ⅳ类 ☐Ⅴ类</td></tr>
<tr><td rowspan="3">非密封放射性物质</td><td>☐生产</td><td colspan="5">☐制备 PET 用放射性药物</td></tr>
<tr><td>☐销售</td><td colspan="5">/</td></tr>
<tr><td>☐使用</td><td colspan="5">☐乙　☐丙</td></tr>
<tr><td rowspan="3">射线装置</td><td>☐生产</td><td colspan="5">☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类</td></tr>
<tr><td>☐销售</td><td colspan="5">☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="5">☑Ⅱ类 ☑Ⅲ类</td></tr>
<tr><td>其他</td><td colspan="6">/</td></tr>
</table>

项目概述：

一、建设单位基本情况、项目建设规模及由来

南通市肿瘤医院暨南通大学附属肿瘤医院、南通市第五人民医院，建于 1972 年，是一所集医、教、研、防、康于一体的三级甲等肿瘤专科医院，由位于南通市通州区平潮镇的北院和位于南通市崇川区的南院组成。

南通市肿瘤医院（以下简称“医院”）北院位于南通市通州区平潮镇通扬北路 30 号，院区东侧为民主路和通扬运河，南侧为居民区、平潮镇政府及宝盛苑（居民区），

西侧为居民楼和平潮一中，北侧为平潮一中、通州市平潮食品公司及居民区。北院院区被通扬北路从南至北贯通，划分为东、西两个地块，两侧地块主出入口均位于通扬北路。

随着医院的快速发展，为满足区域内百姓日益增长的医疗需求，医院拟拆除北院西侧地块相关危房，建设1栋医疗综合楼（地下2层、地上13层建筑），总建筑面积约77400m^2，其中地上建筑面积约54980m^2，地下建筑面积约22420m^2，建成后，设床位800张。南通市肿瘤医院医疗综合楼项目环境影响报告书由南通国信环境科技有限公司编制，已于2022年5月26日取得南通市行政审批局关于该项目的批复文件（见附件8），文号：通行审批〔2022〕83号。

为了更好地为患者服务，提高医院的医疗质量，根据规划，拟在北院医疗综合楼负二层放疗中心新建6座医用直线加速器机房（1#~6#医用直线加速器机房），于1#、2#医用直线加速器机房内分别配备1台医用直线加速器（型号未定，X射线能量为6、15MV，电子线能量≤20MeV）、于3#医用直线加速器机房配备1台医科达SYNERGY型医用直线加速器（X射线能量为6、10MV，电子线能量为4、6、9、12、15、18MeV，由北院加速器楼一1号加速器机房搬迁至此）、于4#~6#医用直线加速器机房内分别配备1台医用直线加速器（型号未定，X射线能量为6、10MV，电子线能量≤20MeV）；新建1座后装机房并由北院放射楼后装机房搬迁1台KL-HDR-C型后装治疗机（内含1枚^{192}Ir放射源，单枚最大装源活度为3.70×10^{11}Bq，为Ⅲ类放射源）；新建2座模拟定位机房并分别配备1台CT模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）、1台X线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA）；拟在北院医疗综合楼三层手术中心新建2座DSA机房（OR1、2手术室）并分别配备1台数字减影血管造影机（Digital Subtraction Angiography，以下简称“DSA”，型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA）。

本次扩建放射诊疗项目位于北院医疗综合楼内，建设地点为：在北院医疗综合楼负二层放疗中心新建6座医用直线加速器机房、1座后装机房和2座模拟定位机房，在北院医疗综合楼三层手术中心新建2座DSA机房。

为保护环境和公众利益，防止辐射污染，根据《中华人民共和国环境影响评价法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《建设项目环境保护管理条例》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规的规定，南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目需进行环境影响评价。受南通市肿

瘤医院的委托，南京瑞森辐射技术有限公司承担了该单位扩建放射诊疗项目的环境影响评价工作（见附件 1）。依照《建设项目环境影响评价分类管理名录》（生态环境部令 第 16 号，2021 年版），本项目为扩建放射诊疗项目，属于“172 核技术利用建设项目”中的“使用Ⅲ类放射源的；使用Ⅱ类射线装置的”项目，确定为编制环境影响报告表。我公司通过资料调研、项目工程分析、现场勘察及现场监测等工作的基础上，编制了该项目环境影响报告表。该医院扩建放射诊疗项目情况见表 1-1：

表 1-1 扩建放射诊疗项目情况一览表*

放射源

序号	放射源名称	数量	活度（Bq）	放射源类别	工作场所名称	活动种类	环评情况	备注
1	^{192}Ir	1	3.70×10^{11}	Ⅲ类	北院医疗综合楼负二层放疗中心后装机房	使用	本次环评	搬迁，后装治疗机（KL-HDR-C 型）

射线装置

序号	射线装置名称型号	数量	管电压（kV）	管电流（mA）	射线装置类别	工作场所名称	活动种类	环评情况	备注
1	医用直线加速器（型号未定）	2	X 射线：6、15MV 电子线：≤20MeV		Ⅱ类	北院医疗综合楼负二层放疗中心 1#、2#医用直线加速器机房	使用	本次环评	/
2	医用直线加速器（SYNERGY 型）	1	X 射线：6、10MV 电子线：4、6、9、12、15、18MeV		Ⅱ类	北院医疗综合楼负二层放疗中心 3#医用直线加速器机房	使用	本次环评	搬迁
3	医用直线加速器（型号未定）	3	X 射线：6、10MV 电子线：≤20MeV		Ⅱ类	北院医疗综合楼负二层放疗中心 4#~6#医用直线加速器机房	使用	本次环评	/
4	CT 模拟定位机（型号未定）	1	≤140	≤800	Ⅲ类	北院医疗综合楼负二层放疗中心 CT 模拟定位机房	使用	本次环评	/
5	X 线模拟定位机（型号未定）	1	≤150	≤1000	Ⅲ类	北院医疗综合楼负二层放疗中心 X 线模拟定位机房	使用	本次环评	/
6	DSA（型号未定）	2	≤125	≤1250	Ⅱ类	北院医疗综合楼三层手术中心 OR1、2 手术室	使用	本次环评	/

注：本项目型号未定的设备，参数为建设单位招标意向及主流供货商的主要技术参数。

二、项目选址情况

南通市肿瘤医院北院位于南通市通州区平潮镇通扬北路30号，院区东侧为民主路和通扬运河，南侧为居民区、平潮镇政府及宝盛苑（居民区），西侧为居民楼和平潮一中，北侧为平潮一中、通州市平潮食品公司及居民区。本项目地理位置示意见附图1，南通市肿瘤医院周围环境示意图及总平面图见附图2。

本次扩建放射诊疗项目主要包括：

1、于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建2座医用直线加速器机房（1#、2#医用直线加速器机房），各配备1台医用直线加速器（型号未定，X射线能量为6、15MV，电子线能量≤20MeV），用于肿瘤的放射治疗。1#、2#医用直线加速器机房东侧为楼梯间和等候休息区，南侧为准备区、控制室及水冷机房，西侧为后装机房及其控制室、准备室，北侧、下方均为土层，上方为封闭空间。

2、于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建4座医用直线加速器机房（3#~6#医用直线加速器机房），由北院加速器楼一1号加速器机房搬迁1台医科达SYNERGY型医用直线加速器（X射线能量为6、10MV，电子线能量为4、6、9、12、15、18MeV，已于2019年11月21日取得江苏省生态环境厅的批复，文号：苏环辐（表）审[2019]033号，2021年1月8日通过自主竣工环境保护验收）至3#医用直线加速器机房，于4#~6#医用直线加速器机房内分别配备1台医用直线加速器（型号未定，X射线能量为6、10MV，电子线能量≤20MeV），用于肿瘤的放射治疗。3#~6#医用直线加速器机房东侧为消防器具间，南侧为准备区、控制室及水冷机房，西侧为下沉庭院和等候休息区，北侧及下方均为土层，上方为封闭空间。

3、于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建1座后装机房，由北院放射楼后装机房搬迁1台KL-HDR-C型后装治疗机（内含1枚^{192}Ir放射源，单枚最大装源活度为$3.70\times10^{11}Bq$，为Ⅲ类放射源，已于2019年11月21日取得江苏省生态环境厅的批复，文号：苏环辐（表）审[2019]033号，2021年1月8日通过自主竣工环境保护验收），用于腔内、组织间等肿瘤的放射治疗。后装机房东侧为1#医用直线加速器机房，南侧为控制室和室内走廊，西侧、北侧及下方均为土层，上方为封闭空间。

4、于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建2座模拟定位机房，分别配备1台CT模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）、1台X线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA），用于模拟定位。2座模拟定位机房东侧为准备间，南侧为控制廊，西侧、北侧均为室内走廊，下方为土层，上方为新风机房和气体灭火间。南通市肿瘤医院北院医疗综合楼负二层放疗中

心平面布置示意图见附图3，负一层平面布置图见附图4。

5、于北院医疗综合楼三层手术中心新建2座DSA机房（OR1、2手术室），分别配备1台DSA（型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA），用于医学诊断及介入治疗。2座DSA机房东侧为控制室、设备间及室内走廊，南侧为设备间和室内走廊，西侧、北侧均为室内走廊，下方为检验科，上方为大会议室和室内走廊。南通市肿瘤医院北院医疗综合楼三层手术中心DSA机房平面布置示意图见附图5。

表1-2 南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目分布情况表

工作场所		项目
南通市肿瘤医院	北院医疗综合楼负二层放疗中心	2台医用直线加速器（型号未定，X射线能量为6、15MV，电子线能量≤20MeV）
		1台医科达SYNERGY型医用直线加速器（X射线能量为6、10MV，电子线能量为4、6、9、12、15、18MeV）
		3台医用直线加速器（型号未定，X射线能量为6、10MV，电子线能量≤20MeV）
		1台后装治疗机（内含1枚^{192}Ir放射源，单枚最大装源活度为3.70×10^{11}Bq，为Ⅲ类放射源）
		1台CT模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）
		1台X线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA）
	北院医疗综合楼三层手术中心	2台DSA（型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA）

本次扩建放射诊疗项目周围50m评价范围内，东侧为通扬北路（距DSA机房最近约8m）、南侧为院内道路、西侧为居民楼（距放疗中心最近约17m）、北侧为平潮一中（距放疗中心最近约41m）。项目运行后的环境保护目标主要为医院辐射工作人员、院区内的其他医护人员、病患及陪同家属和院外通扬北路、居民楼、平潮一中处其他公众等。

本项目评价范围内不涉及国家公园、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74号）、《江苏省生态空间管控区域规划》（苏政发〔2020〕1号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域；根据现场监测和环境影响预测，项目建设满足环境质量底线要求，不会造成区域环境质量下降；本项目对资源消耗极少，不涉及违背生态环境

准入清单的问题；本项目的建设符合江苏省“三线一单”生态环境分区管控要求。本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系图见附图10。

三、原有核技术利用项目许可情况

南通市肿瘤医院现持有江苏省生态环境厅核发的辐射安全许可证（苏环辐证[01321]），有效期至：2028年3月17日，许可种类和范围为“使用III类、V类放射源；使用II类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所”。医院辐射安全许可证正副本见附件6，原有核技术利用项目情况见附件7。

医院已开展的核技术利用项目均已履行环保手续，无环保遗留问题。

四、实践正当性分析

本项目的运行，可为患者提供放射诊疗服务，并可提高当地医疗卫生水平，具有良好的社会效益和经济效益，经辐射防护屏蔽和安全管理后，本项目的建设和运行对受照个人或社会所带来的利益能够弥补其可能引起的辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）“实践的正当性”的原则。

表 2　放射源

序号	核素名称	总活度（Bq）/ 活度（Bq）×枚数	类别	活度种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
1	^{192}Ir	$3.7\times10^{11}Bq\times1$	III类	使用	近距离放射治疗	北院医疗综合楼 负二层放疗中心后装机房	随机器存放于后装治疗机屏蔽体内	约 180 天更换一次，半衰期为 74.0 天
/	/	/	/	/	/	/	/	/

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

表 3　非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量（Bq）	日等效最大操作量（Bq）	年最大用量（Bq）	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

注：日等效最大操作量和操作方式见《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）。

表 4　射线装置

（一）加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量（MeV）	额定电流（mA）/剂量率（Gy/h）	用途	工作场所	备注
1	医用直线加速器	II 类	2 台	型号未定	电子	X 射线：6、15MV 电子线：≤20MeV	X 线最高剂量率： 15MV 时 600cGy/min 6MV 时 1400cGy/min （3F 束流模式） 电子线最高剂量率： 1400cGy/min	放射治疗	北院医疗综合楼负二层放疗中心 1#、2#医用直线加速器机房	/
2	医用直线加速器	II 类	1 台	医科达 SYNERGY 型	电子	X 射线：6、10MV 电子线：4、6、9、12、15、18MeV	X 线最高剂量率： 10MV 时 600cGy/min 6MV 时 1400cGy/min （3F 束流模式） 电子线最高剂量率： 1400cGy/min	放射治疗	北院医疗综合楼负二层放疗中心 3#医用直线加速器机房	搬迁
3	医用直线加速器	II 类	3 台	型号未定	电子	X 射线：6、10MV 电子线：≤20MeV	X 线最高剂量率： 10MV 时 600cGy/min 6MV 时 1400cGy/min （3F 束流模式） 电子线最高剂量率： 1400cGy/min	放射治疗	北院医疗综合楼负二层放疗中心 4#~6#医用直线加速器机房	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

（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	CT 模拟定位机	III类	1 台	型号未定	≤140	≤800	放射检查	北院医疗综合楼负二层 放疗中心 CT 模拟定位机房	/
2	X 线模拟定位机	III类	1 台	型号未定	≤150	≤1000	放射检查	北院医疗综合楼负二层 放疗中心 X 线模拟定位机房	/
3	DSA	II类	2 台	型号未定	≤125	≤1250	介入治疗	北院医疗综合楼三层 手术中心 OR1、2 手术室	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

（三）中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

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

表 5　废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
医用直线加速器（X 射线能量最大为 15MV）退役废靶	固体	/	/	/	/	/	暂存于铅罐中	为活化部件，送有资质单位回收处理。
退役放射源	固体	^{192}Ir	使用约 180 天更换一次，退役时活度约为 $6.9\times10^{10}Bq$	/	/	/	暂存在后装治疗机设备内	退役放射源送生产厂家回收处理。
DSA 手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物	固体	/	/	约 6.67kg	约 80kg	/	暂存在机房内的废物桶	手术结束后集中收集，作为医疗废物由医院统一委托有资质单位进行处置。
臭氧、氮氧化物	气态	/	/	少量	少量	/	不暂存	通过排风系统排入外环境，臭氧在常温下约 50 分钟可自行分解为氧气，对环境影响较小。
/	/	/	/	/	/	/	/	/

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/L，固体为 mg/kg，气态为 mg/m^3；年排放总量用 kg。

2.含有放射性的废物要注明，其排放浓度、年排放总量分别用比活度（Bq/L 或 Bq/kg 或 Bq/m^3）和活度（Bq）。

表 6　评价依据

法规文件	（1）《中华人民共和国环境保护法》（修订版），中华人民共和国主席令第9号，2015年1月1日起实施； （2）《中华人民共和国环境影响评价法》（2018年修正版），中华人民共和国主席令 第二十四号，2018年12月29日发布施行； （3）《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日起实施； （4）《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，2005年12月1日起施行；2019年修改，国务院令 第709号，2019年3月2日施行； （5）《建设项目环境保护管理条例》（修订版），国务院令 第682号，2017年10月1日发布施行； （6）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2021年修正本），生态环境部部令 第20号，2021年1月4日起施行； （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日起施行； （8）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环保部令 第18号，2011年5月1日起施行； （9）《关于发布〈射线装置分类〉的公告》，环境保护部、国家卫生和计划生育委员会，公告2017年 第66号，2017年12月5日起施行； （10）《放射源分类办法》，国家环境保护总局公告 2005年 第62号，2005年12月23日起施行； （11）《江苏省辐射污染防治条例》（2018年修正本），江苏省第十三届人民代表大会常务委员会第二次会议第2号公告，2018年5月1日起实施； （12）《关于发布<建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法>配套文件的公告》，生态环境部公告 2019年 第38号，2019年10月25日发布； （13）《关于启用环境影响评价信用平台的公告》，生态环境部公告 2019年 第39号，2019年10月25日发布；

	（14）《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，2019年12月24日发布； （15）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部部令 第9号，2019年11月1日起施行； （16）《省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》，苏政发〔2018〕74号，2018年6月9日发布； （17）《省生态环境厅关于进一步做好建设项目环境影响报告书（表）编制单位监管工作的通知》，苏环办〔2021〕187号，2021年5月28日发布； （18）《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》，苏政发〔2020〕1号，2020年1月8日发布； （19）《江苏省政府关于印发江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知》，苏政发〔2020〕49号，2020年6月21日发布； （20）《江苏省辐射事故应急预案》（2020年修订版），苏政办函〔2020〕26号，2020年2月19日发布。
技术标准	（1）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）； （2）《电离辐射监测质量保证通用要求》（GB 8999-2021）； （3）《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523-2011）； （4）《辐射防护仪器 中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T 14318-2019）； （5）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）； （6）《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）； （7）《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）； （8）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）； （9）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）； （10）《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）； （11）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）； （12）《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）； （13）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）；

	（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/T 201.2-2011）； （15）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第3部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）。
其他	附图： （1）南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目地理位置示意图； （2）南通市肿瘤医院北院院区总平面及周围环境示意图； （3）南通市肿瘤医院北院医疗综合楼负二层放疗中心平面布置及分区示意图； （4）南通市肿瘤医院北院医疗综合楼负一层平面布置及分区示意图； （5）南通市肿瘤医院北院医疗综合楼三层手术中心DSA机房平面布置及分区示意图； （6）南通市肿瘤医院北院医疗综合楼二层平面布置示意图； （7）南通市肿瘤医院北院医疗综合楼四层平面布置示意图； （8）南通市肿瘤医院北院医疗综合楼负二层放疗中心放疗机房通风管道布设示意图； （9）南通市肿瘤医院北院医疗综合楼屋顶通风管道排风口布设示意图； （10）本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系示意图。 附件： （1）项目委托书； （2）射线装置使用承诺书； （3）放射源使用承诺书； （4）医用直线加速器废靶处置承诺书； （5）退役源处置承诺书； （6）辐射安全许可证正副本； （7）原有核技术利用项目基本情况一览表； （8）《市行政审批局关于南通市肿瘤医院医疗综合楼项目环境影响报告书

	的批复》； （9）搬迁设备原有环保手续相关材料； （10）本项目辐射环境现状监测报告。

表 7　保护目标与评价标准

评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）中“放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围”的规定，结合本项目的特点，确定本项目评价范围为本次扩建放射诊疗项目工作场所实体屏蔽墙体边界外周围 50m 范围内区域，评价范围详见附图 2。

保护目标

本次扩建放射诊疗项目周围 50m 评价范围内，东侧为通扬北路（距 DSA 机房最近约 8m）、南侧为院内道路、西侧为居民楼（距放疗中心最近约 17m）、北侧为平潮一中（距放疗中心最近约 41m）。项目运行后的环境保护目标主要为医院辐射工作人员、院区内的其他医护人员、病患及陪同家属和院外通扬北路、居民楼、平潮一中处其他公众等。详见表 7-1。

表 7-1 本项目保护目标一览表

环境保护目标			方位	距本项目最近距离	保护对象类别	人口规模*
放疗中心项目	北院医疗综合楼负二层放疗中心放疗机房辐射工作人员（物理师、医师、技师等）		控制室	紧临	辐射工作人员	约 25 人
	北院医疗综合楼负二层放疗中心模拟定位机房辐射工作人员		控制室	紧临	辐射工作人员	约 4 人
	北院医疗综合楼	其他医务人员	放疗中心机房四周及上方	约 3m	公众	约 900 名
		病患、周围公众				约 700 张床位，其余为流动人员
	院外居民楼公众		西侧	约 17m	公众	约 10 人
	平潮一中公众		北侧	约 41m	公众	流动人员，若干
手术中心项目	北院医疗综合楼三层手术中心 DSA 机房辐射工作人员	操作技师	控制室	紧临	辐射工作人员	约 2 人
		医师、护士	机房内			约 8 人

	北院医疗综合楼	其他医务人员	DSA 机房四周及上、下方	约 3m	公众	约 500 名
		病患、周围公众				约 400 张床位，其余为流动人员
	院外通扬北路公众		东侧	约 8m	公众	流动人员，若干
	北院门诊楼	其他医务人员	东侧	约 25m	公众	约 80 名
		病患、周围公众				流动人员，若干
	北院洗衣房公众		东侧	约 46m	公众	约 2 人

注：*放疗中心项目于手术中心项目评价范围内，于医疗综合楼有部分区域重叠，该区域约有床位 350 张，医护人员 400 名。

本项目评价范围内不涉及国家公园、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74 号）、《江苏省生态空间管控区域规划》（苏政发〔2020〕1 号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域。根据《江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案》（苏政发〔2020〕49 号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省内优先保护单元；根据现场监测和环境影响预测，项目建设满足环境质量底线要求，不会造成区域环境质量下降；本项目对资源消耗极少，不涉及违背生态环境准入清单的问题；本项目的建设符合江苏省“三线一单”生态环境分区管控要求。本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系图见附图 10。

评价标准

1、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）：

工作人员职业照射和公众照射剂量限值

对象	要求
职业照射剂量限值	应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值： ①由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量，20mSv ②任何一年中的有效剂量，50mSv ③眼晶体的年当量剂量，150mSv ④四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，500mSv
公众照射剂量限值	实践使公众有关关键人群组的成员所受的平均剂量估计值不应超过下述限值： ①年有效剂量，lmSv；

	②特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 lmSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv； ③眼晶体的年当量剂量，15mSv； ④皮肤的年当量剂量，50mSv。

剂量约束值通常应在公众照射剂量限值 10%~30%（即 0.1mSv/a~0.3 mSv/a）的范围之内。

辐射工作场所的分区

应把辐射工作场所分为控制区和监督区，以便于辐射防护管理和职业照射控制。

控制区：

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

监督区：

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

2、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）：

4 一般要求

4.8 辐射工作人员和公众成员的辐射照射应符合 GB 18871-02002 中剂量限值相关规定。

4.9 从事放射治疗的工作人员职业照射和公众照射的剂量约束值应符合以下要求：

a）一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a。

b）公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

4.10 开展放射治疗活动的医疗机构应制定相应的辐射事故应急预案，做好辐射事故应急准备、应急演练和应急响应，确保有效防范辐射事故或缓解辐射事故的后果。

5 选址、布局与分区要求

5.1 选址与布局

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，不得设置在居民、写字楼和商住两用的建筑物内。

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。

5.2 分区原则

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。开展术中放射治疗时，术中放射治疗室应确定为临时控制区。

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）。

6 放射治疗场所辐射安全与防护要求

6.1 屏蔽要求

6.1.4 剂量控制应符合以下要求：

a）治疗室墙和入口门外表面 30cm 处、邻近治疗室的关注点、治疗室房顶外的地面附近和楼层及在治疗室上方已建、拟建二层建筑物或在治疗室旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点治疗室

房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗室顶外表面 30cm 处和在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处的周围剂量当量率应同时满足下列 1）和 2）所确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）：

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

机房外辐射工作人员：$\dot{H}_c$ ≤100μSv/周；

机房外非辐射工作人员：$\dot{H}_c$ ≤5μSv/周。

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

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

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

b）穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量 250μSv 加以控制。

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

6.2 安全防护设施和措施要求

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。

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。

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收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；

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；

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；

f）安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位并通过控制台才能重新启动放射治疗活动；安装调试及维修情况下，任何联锁旁路应通过单位辐射安全管理机构的批准与见证，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。

3、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）：

6.1 布局要求

6.1.1 放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同

时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。

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

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

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

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

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

6.2 空间、通风要求

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

6.2.2 放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部， 进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数应不小于 4 次/h。

6.3 屏蔽要求

6.3.1 治疗机房墙和入口门外关注点周围剂量当量率参考控制水平

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

a）使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子，由周剂量参考控制水平求得关注点的周围剂量当量率参考控制水平 $\dot{H}_c$，见式（1）：

$$\dot{H}_c \le H_e / (t \times U \times T) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

式中：

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

H_e—周剂量参考控制水平，单位为微希沃特每小时（μSv/周），其值按如下方式取值：放射治疗机房外控制区的工作人员：≤100μSv/周；放射治疗机房外非控制区的人员：≤5μSv/周。

t—设备周最大累积照射的小时数，单位为小时每周（h/周）；

U—治疗设备向关注点位置的方向照射的使用因子；

T—人员在关注点位置的居留因子，取值方式参见附录 A。

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

1）人员居留因子 T＞1/2 的场所：$\dot{H}_{c,\max}$ ≤2.5μSv/h；

2）人员居留因子 T≤1/2 的场所：$\dot{H}_{c,\max}$ ≤10μSv/h。

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

6.3.2 治疗机房顶屏蔽的周围剂量当量率参考控制水平

6.3.2.1 在治疗机房上方已建、拟建二层建筑物或在治疗机房旁邻近建筑物的高度超过自辐射

源点至机房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗机房顶外表面 30cm 处，或在该立体角区域内的高层建筑物中人员驻留处，周围剂量当量率参考控制水平 同 6.3.1。

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

6.4 安全装置和警示标志要求

6.4.1 监测报警装置

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

6.4.2 联锁装置

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

6.4.3 标志

医疗机构应当对下列放射治疗设备和场所设置醒目的警告标志：

a）放射治疗工作场所的入口处，设有电离辐射警告标志；

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

6.4.4 急停开关

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

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

4、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）：

4.1.1 治疗机房墙外和入口门外关注点的周围剂量当量率参考控制水平

治疗机房墙和入口门外关注点的周围剂量当量率（一下简称剂量率）应不大于下述 a）、b）和 c）所确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$：

a）使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子，可以依照附录 A，由以下周剂量参考控制水平 H_c（μSv/周）求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$（μSv/h）：

放射治疗机房外控制区的工作人员：H_c≤100μSv/周；

放射治疗机房外非控制区的人员：H_c≤5μSv/周。

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

人员居留因子 T≥1/2 的场所：$\dot{H}_{c,\max}$≤2.5μSv/h；

人员居留因子 T＜1/2 的场所：$\dot{H}_{c,\max}$≤10μSv/h。

c）由上述 a）中的导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$ 和 b）中的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,\max}$，选择其中较小者作为关注点的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）。

4.1.2 治疗机房顶的剂量控制要求

治疗机房顶的剂量应按下述 a）、b）两种情况控制：

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 $\dot{H}_c$ ≤5μSv/周和最高剂量率 $\dot{H}_{c,\max}$ ≤2.5μSv/h，按照 4.1.1 求得关注点的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）加以控制。

b）除 4.1.2 中 a）的条件外，应考虑下列情况：

1）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。该项辐射和穿透机房墙壁辐射在相应处的剂量率的总和，应按 4.1.2 中的 a）确定关注点的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）加以控制；

2）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 250μSv 加以控制；

3）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 1）和 2）之后，机房顶外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 100μSv/h 加以控制（可在相应处设置辐射告示牌）。

5、《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）：

6 X 射线设备机房防护设施的技术要求

6.1 X 射线设备机房布局

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

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。

6.1.3 每台固定使用的 X 射线设备应设有单独的机房，机房应满足使用设备的布局要求；每台牙椅独立设置诊室的，诊室内可设置固定的口内牙片机，供该设备使用，诊室的屏蔽和布局应满足口内牙片机房防护要求。

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，其最小有效使用面积、最小单边长度应符合表 2 的规定。

表 2 X 射线设备机房（照射室）使用面积及单边长度

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

6.2 X 射线设备机房屏蔽

6.2.1 不同类型 X 射线设备（不含床旁摄影设备和便携式 X 射线设备）机房的屏蔽防护应不低于表 3 的规定。

表 3 不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向铅当量 mmPb	非有用线束方向铅当量 mmPb
标称 125kV 以上的摄影机房	3.0	2.0
标称 125kV 及以下的摄影机房	2.0	1.0
C 形臂 X 射线设备机房	2.0	2.0
透视机房、骨密度仪机房、口内牙片机房、牙科全景机房（无头颅摄影）、碎石机房、模拟定位机房、乳腺摄影机房、乳腺 CBCT 机房	1.0	1.0
CT 机房（不含头颅移动 CT） CT 模拟定位机房	2.5	

6.3 X 射线设备机房屏蔽体外剂量水平

6.3.1 机房的辐射屏蔽防护，应满足下列要求：

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 2.5μSv/h；测量时，X 射线设备连续出束时间应大于仪器响应时间；

b）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 2.5μSv/h；

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 25μSv/h，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；

6.4 X 射线设备工作场所防护

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。

6.4.2 机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。

6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。

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。

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。

6.4.6 电动推拉门宜设置防夹装置。

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。

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。

6.4.9 CT 装置的安放应利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。

6.5 X 射线设备工作场所防护用品及防护设施配置要求

6.5.1 每台 X 射线设备根据工作内容，现场应配备不少于表 4 基本种类要求的工作人员、受检者防护用品与辅助防护设施，其数量应满足开展工作需要，对陪检者应至少配备铅橡胶防护衣。

6.5.3 除介入防护手套外，防护用品和辅助防护设施的铅当量应不小于0.25mmPb；介入防护手套铅当量应不小于0.025mmPb；甲状腺、性腺防护用品铅当量应不小于0.5mmPb；移动铅防护屏风铅当量应不小于2mmPb。

6.5.4 应为儿童的X射线检查配备保护相应组织和器官的防护用品，防护用品和辅助防护设施的铅当量应不小于0.5mmPb。

6.5.5 个人防护用品不使用时，应妥善存放，不应折叠放置，以防止断裂。

表4 个人防护用品和辅助防护设施配置要求

放射检查类型	工作人员		受检者	
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施
放射诊断学用X射线设备隔室透视、摄影[a]	—	—	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	可调节防护窗口的立位防护屏； 选配：固定特殊受检者体位的各种设备
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	可调节防护窗口的立位防护屏 选配：固定特殊受检者体位的各种设备
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、床侧防护帘/床侧防护屏 选配：移动铅防护屏风	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套 选配：铅橡胶帽子	—

[a] 工作人员、受检者的个人防护用品和辅助防护设施任选其一即可。

7 X射线设备操作的防护安全要求

7.8 介入放射学和近台同室操作（非普通荧光屏透视）用X射线设备操作的防护安全要求。

7.8.1 介入放射学、近台同室操作（非普通荧光屏透视）用X射线设备应满足其相应设备的防护安全操作要求。

7.8.2 介入放射学用X射线设备应具有记录受检者剂量的装置，并尽可能将每次诊疗后受检者受照剂量记录在病历中，需要时，应能追溯到受检者的受照剂量。

7.8.3 除存在临床不可接受的情况外，图像采集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。

7.8.4 穿着防护服进行介入放射学操作的工作人员，其个人剂量计佩戴要求应符合GBZ 128的规定。

6、项目管理目标限值

综合考虑《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（**GB 18871-2002**）、《放射治疗放射防护要求》（**GBZ 121-2020**）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（**HJ 1198-2021**）及《放射诊断放射防护要求》（**GBZ 130-2020**）等评价标准要求，本项目管理目标值为：职业人员年有效剂量不超过**5mSv**，公众年有效剂量不超**0.1mSv**。

根据《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中相关规定及本项目放疗机房周开机治疗时间，估算得到放疗机房外30cm处的周围剂量当量率参考控制水平H_c，见表7-2。

表7-2 放疗机房外30cm处的周围剂量当量率参考控制水平

参考点[1)]			居留因子T	使用因子U	周剂量控制值（μSv/周）	周工作时间（h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）		
							$H_{c,d}$	$H_{c,max}$	**H_c**
1#、2#医用直线加速器机房[2)]	主屏蔽（*a*点）	后装机房	1/2	1/4	100	12.5	64	10	**10**
		楼梯间	1/16	1/4	5		25.6	10	
	主屏蔽（*b*点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1/4	100		64	10	**10**
	屋顶主屏蔽（*l*点）	院内道路/非机动车停放区	1/16	1/4	5		25.6	10	**10**
	次屏蔽（c_1、c_2点）	后装机房/后装机房控制室	1	1	100		8	2.5	**2.5**
		楼梯间/等候休息区	1	1	5		0.4	2.5	**0.4**
	次屏蔽（d_1、d_2点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1	100		16	10	**10**
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2点）	院内道路/机械停车位	1/16	1	5		6.4	10	**6.4**
	北墙（*e*点）	土层	/	1	5		/	/	/
	南侧迷路墙外（*f*点）	控制室	1	1	100		8	2.5	**2.5**
	南侧迷路外墙（*k*点）	水冷机房	1/16	1	5		6.4	10	**6.4**
	迷路入口防护门（*g*点）		1/8	1	5		3.2	10	**3.2**

3#~6#医用直线加速器机房	主屏蔽（a 点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1/4	100	12.5	64	10	**10**
		下沉庭院/消防器具间	1/16	1/4	5		25.6	10	**10**
	主屏蔽（b 点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1/4	100		64	10	**10**
	屋顶主屏蔽(l 点)	院内道路/机械停车位	1/16	1/4	5		25.6	10	**10**
	次屏蔽(c_1、c_2 点)	相邻医用直线加速器机房	1/2	1	100		16	10	**10**
		等候休息区/下沉庭院/消防器具间	1	1	5		0.4	2.5	**0.4**
	次屏蔽（d_1、d_2 点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1	100		16	10	**10**
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	院内道路/机械停车位	1/16	1	5		6.4	10	**6.4**
	北墙（e 点）	土层	/	1	5		/	/	/
	南侧迷路墙外（f 点）	控制室	1	1	100		8	2.5	**2.5**
	南侧迷路外墙（k 点）	水冷机房	1/16	1	5		6.4	10	**6.4**
	迷路入口防护门（g 点）		1/8	1	5		3.2	10	**3.2**
后装机房	东墙（a 点）	1#医用直线加速器机房	1/2	1	100	10	20	10	**10**
	南墙（b 点）	控制室	1	1	100		10	10	**10**
	西墙（c 点）	土层	/	1	5		/	/	/
	北墙（d 点）	土层	/	1	5		/	/	/
	屋顶（l 点）	院内道路/机械停车位	1/16	1	5		8	10	**8**
	迷路入口防护门（g 点）		1/8	1	5		4	10	**4**

注：1、1#、2#医用直线加速器机房参考点点位布设详见图 11-1；3#~6#医用直线加速器机房参考点点位布设详见图 11-2；后装机房参考点点位布设详见图 11-3；

2、1#、2#医用直线加速器机房呈东西向镜像分布，2 座机房内部尺寸及屏蔽防护设计一致，故本次以 1#医用直线加速器机房为例进行关注点剂量率计算；3#和 6#、4#和 5#医用直线加速器机房呈东西向镜像分布，4 座医用直线加速器机房屏蔽防护设计一致，3#和 6#医用直线加速器机房较 4#和 5#医用直线加速器机房内部尺寸略大，故本次以 4#医用直线加速器机房为例进行关注点剂量率计算；居留因子保守选取对应关注点位中较大值进行进行剂量率参考水平的计算。

距 CT 模拟定位机房、X 线模拟定位机房、DSA 机房墙体、门、观察窗表面外 30cm

处、顶棚上方（楼上）距顶棚地面100cm处、地面下方（楼下）距楼下地面170cm处的辐射剂量率目标控制值均为2.5μSv/h。

7、参考资料：

（1）《辐射防护导论》，方杰主编。

（2）《医用外照射源的辐射防护》，国际放射防护委员会第33号出版物。

（3）《江苏省环境天然贯穿辐射水平调查研究》（辐射防护 第13卷第2期，1993年3月），江苏省环境监测站。

江苏省环境天然γ辐射（空气吸收）剂量率（单位：nGy/h）

	原野剂量率	道路剂量率	室内剂量率
测值范围	33.1~72.6	18.1~102.3	50.7~129.4
均值	50.4	47.1	89.2
标准差（s）	7.0	12.3	14.0
（均值±3s）*	50.4±21.0	47.1±36.9	89.2±42.0

注：*测量值已扣除宇宙射线响应值，评价时采用“均值±3s”作为辐射现状评价的参考数值。

表 8　环境质量和辐射现状

环境质量和辐射现状

一、项目位置、布局和周边环境

南通市肿瘤医院北院位于南通市通州区平潮镇通扬北路 30 号，院区东侧为民主路和通扬运河，南侧为居民区、平潮镇政府及宝盛苑（居民区），西侧为居民楼和平潮一中，北侧为平潮一中、通州市平潮食品公司及居民区。

本项目 7 座放疗机房（包括 6 座医用直线加速器机房和 1 座后装机房）位于北院医疗综合楼负二层放疗中心。1#、2#医用直线加速器机房（机房内各配备 1 台 X 射线能量为 6、15MV 的医用直线加速器）东侧为楼梯间和等候休息区，南侧为准备区、控制室及水冷机房，西侧为后装机房及其控制室、准备室，北侧、下方均为土层，上方为封闭空间；3#~6#医用直线加速器机房（机房内各配备 1 台 X 射线能量为 6、10MV 的医用直线加速器）东侧为消防器具间，南侧为准备区、控制室及水冷机房，西侧为下沉庭院和等候休息区，北侧及下方均为土层，上方为封闭空间；后装机房（机房内配备 1 台 KL-HDR-C 型后装治疗机，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源）东侧为 1#医用直线加速器机房，南侧为控制室和室内走廊，西侧、北侧及下方均为土层，上方为封闭空间。

本项目 2 座模拟定位机房（包括 1 座 CT 模拟定位机房和 1 座 X 线模拟定位机房）位于北院医疗综合楼负二层放疗中心。2 座模拟定位机房东侧为准备间，南侧为控制廊，西侧、北侧均为室内走廊，下方为土层，上方为新风机房和气体灭火间。

本项目 2 座 DSA 机房（OR1、2 手术室）位于北院医疗综合楼三层手术中心。2 座 DSA 机房东侧为控制室、设备间及室内走廊，南侧为设备间和室内走廊，西侧、北侧均为室内走廊，下方为检验科，上方为大会议室和室内走廊。

本次扩建放射诊疗项目周围 50m 评价范围内，东侧为通扬北路（距 DSA 机房最近约 8m）、南侧为院内道路、西侧为居民楼（距放疗中心最近约 17m）、北侧为平潮一中（距放疗中心最近约 41m）。本项目所在北院医疗综合楼拟建址周边环境见图 8-1 至图 8-5。



图 8-1 北院医疗综合楼拟建址东侧



图 8-2 北院医疗综合楼拟建址南侧



图 8-3 北院医疗综合楼拟建址西侧



图 8-4 北院医疗综合楼拟建址北侧



图 8-5 北院医疗综合楼拟建址

二、辐射环境现状调查

根据《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）、《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）和《辐射防护仪器 中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T 14318-2019）相关方法和要求，在进行环境现场调查时，于本次扩建放射诊疗项目拟建址周围进行布点，测量γ辐射剂量率及中子剂量当量率。监测结果见表 8-1 至表 8-2，监测点位示

意图见图 8-6。

监测单位：南京瑞森辐射技术有限公司

监测项目：γ辐射剂量率、中子剂量当量率

监测日期：2022 年 8 月 26 日

天气：多云

温度：28℃

湿度：65%RH

监测布点：根据《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）有关布点原则进行布点。

质量控制：本项目监测单位南京瑞森辐射技术有限公司已通过计量认证（证书编号：221020340350，检测资质见附件 10），具备有相应的检测资质和检测能力，监测按照南京瑞森辐射技术有限公司《质量管理手册》和《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）要求，实施全过程质量控制。

监测人员、监测仪器及监测结果：监测人员均经过考核，所有监测仪器均经过计量部门检定，并在有效期内，监测仪器使用前经过检验，监测报告实行三级审核。

数据记录及处理：γ辐射空气吸收剂量率监测每个点位读取 10 个数据，读取间隔不小于 10s，并待计数稳定后读取数值。每组数据计算每个点位的平均值并计算方差。本项目空气比释动能和周围剂量当量的换算系数参照《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），使用 ^{137}Cs 作为检定/校准参考辐射源，换算系数取 1.20Sv/Gy。

评价方法：参照江苏省环境天然γ辐射剂量水平调查结果，评价项目周围的辐射环境质量。

1、γ辐射剂量率

检测仪器：6150AD6/H+6150AD-b/H 型 X-γ辐射监测仪（设备编号：NJRS-126，检定有效期：2021 年 11 月 11 日～2022 年 11 月 10 日，检定单位：江苏省计量科学研究院，检定证书编号：Y2021-0106289）

能量范围：20keV～7MeV

测量范围：1nSv/h～99.9μSv/h

表 8-1 扩建放射诊疗项目拟建址周围γ辐射剂量率

测点编号	测点描述	测量结果（nGy/h）
1	放疗中心拟建址内东部（道路）	46
2	放疗中心拟建址内中部（道路）	44
3	放疗中心拟建址内西部（道路）	45
4	模拟定位机房拟建址内（道路）	40
5	DSA 机房拟建址内（道路）	41
6	北院医疗综合楼拟建址内东部（道路）	45
7	北院医疗综合楼拟建址内中部（道路）	45
8	北院医疗综合楼拟建址内西部（道路）	42
9	北院医疗综合楼拟建址东侧通扬北路（道路）	42
10	北院医疗综合楼拟建址东侧门诊楼（道路）	41
11	北院医疗综合楼拟建址东侧洗衣房（道路）	45
12	北院医疗综合楼拟建址西侧居民楼（道路）	45

注：上表数据已扣除检测仪器宇宙射线响应值。

由表 8-1 监测结果可知，南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目拟建址周围环境天然贯穿辐射剂量率在 40nGy/h～46nGy/h 之间，位于江苏省环境天然γ辐射水平涨落区间，属江苏省道路、建筑物室内γ辐射（空气吸收）剂量率本底水平。

2、中子剂量当量率

检测仪器：FH40G+FHT762 型中子周围剂量当量仪（设备编号：NJRS-022，检定有效期：2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日，检定单位：中国计量科学研究院，检定证书编号：DLjs2022-00700）

能量范围：0.025eV～5GeV

测量范围：1nSv/h～100mSv/h

表 8-2 放疗中心拟建址周围中子剂量率

测点编号	测点描述	测量结果（nSv/h）
1	放疗中心拟建址内东部	＜LLD
2	放疗中心拟建址内中部	＜LLD
3	放疗中心拟建址内西部	＜LLD

注：仪器探测下限（LLD）为 1nSv/h。

由表 8-2 监测结果可知，南通市肿瘤医院放疗中心拟建址及其周围中子剂量当量率低于仪器探测下限。

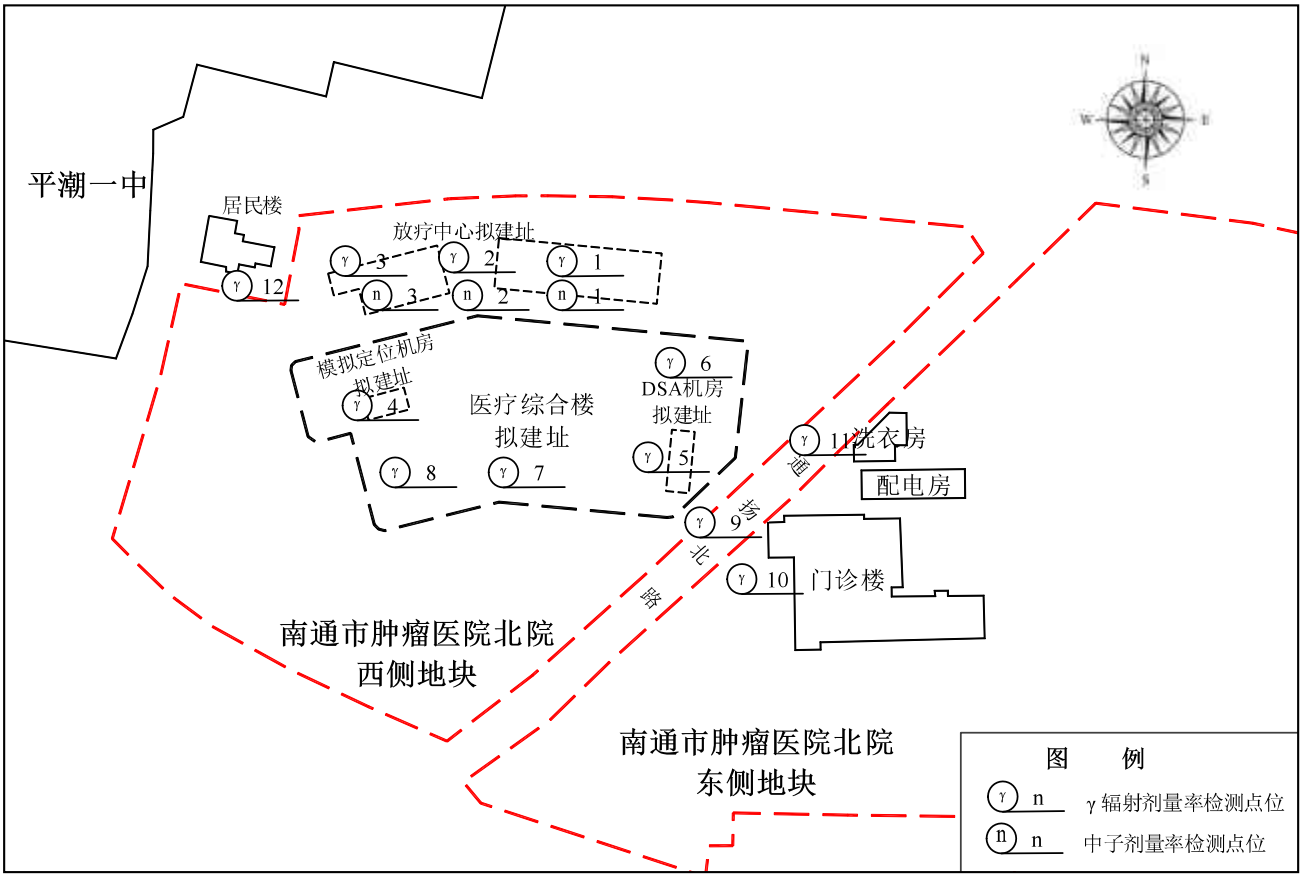

图 8-6 扩建放射诊疗项目拟建址周围环境监测点位示意图

表 9　项目工程分析与源项

工程设备与工艺分析

一、工程设备

南通市肿瘤医院拟在北院医疗综合楼负二层放疗中心内新建 7 座放疗机房（包括 6 座医用直线加速器机房和 1 座后装机房）并分别配备 2 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、15MV，电子线能量≤20MeV）、1 台医用直线加速器（医科达 SYNERGY 型，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量为 4、6、9、12、15、18MeV）、3 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量≤20MeV）、1 台后装治疗机（KL-HDR-C 型，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，为Ⅲ类放射源）；新建 2 座模拟定位机房并分别配备 1 台 CT 模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）、1 台 X 线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA）；拟在北院医疗综合楼三层手术中心内新建 2 座 DSA 机房并分别配备 1 台 DSA（型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA）。

本项目的运行，可为患者提供更精准高效的放射诊疗服务，能够满足日益增长的医疗需求，提高院方医疗卫生服务水平和当地医疗卫生水平，具有良好的社会效益和经济效益。

（一）放疗中心项目

• 医用直线加速器项目

南通市肿瘤医院拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建 6 座医用直线加速器机房（1#~6#医用直线加速器机房），于 1#、2#医用直线加速器机房内各配备 1 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量≤15MV，电子线能量≤20MeV），于 3#医用直线加速器机房内由北院加速器楼一 1 号加速器机房搬迁 1 台医科达 SYNERGY 型医用直线加速器（X 射线能量为 6、10MV，电子线能量为 4、6、9、12、15、18MeV），于 4#~6#医用直线加速器机房内各配备 1 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量≤20MeV），用于肿瘤的放射治疗。常见的医用直线加速器外观见图 9-1。



（a）医科达 SYNERGY 型医用直线加速器



（b）常见医用直线加速器

图 9-1 常见的医用直线加速器外观图

医用直线加速器至少要包括：1 个加速场所（加速管）、1 个大功率微波源和波导系统、控制系统、射线均整和防护系统。医用直线加速器按照微波传输的特点分为行波和驻波两类，其基本结构和系统包括电子枪、微波功率源（磁控管或者速调管）、波导管（隔离器、RF（射频微波源）监测器、移相器、RF 吸收负载、RF 窗等）、DC 直流电源（射频发生器、脉冲调制器、电子枪发射延时电路等）、真空系统（真空泵）、伺服系统（聚焦线圈、对中线圈）、偏转系统（偏转室、偏转磁铁）、剂量监测系统、均整系统、射野形成系统等，分别安装于治疗头、固定机架、旋转机架、治疗床、控制台等处。医用直线加速器系统结构示意图见图 9-2。

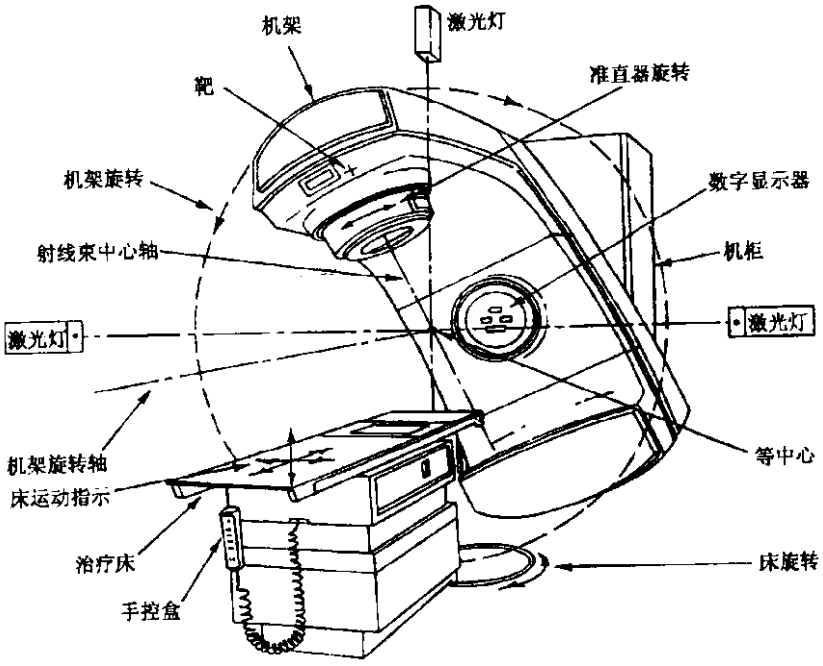

图 9-2 医用直线加速器基本结构示意图

医院拟引进 2 台 15MV 医用直线加速器和 4 台 10MV 医用直线加速器，该加速器

提供两种治疗模式，即 X 射线模式和电子束模式，本项目拟配备医用直线加速器主要技术参数见表 9-1。

表 9-1 本项目医用直线加速器技术参数情况一览表

项目名称	技术参数*		
型号	型号未定	医科达 SYNERGY 型	型号未定
位置	北院医疗综合楼负二层放疗中心 1#、2#医用直线加速器机房	北院医疗综合楼负二层放疗中心 3#医用直线加速器机房	北院医疗综合楼负二层放疗中心 4#~6#医用直线加速器机房
主要技术指标	X 射线：6、15MV；电子线：≤20MeV	X 射线：6、10MV；电子线：4、6、9、12、15、18MeV	X 射线：6、10MV；电子线：≤20MeV
射线最大出射角	28°（等中心点每侧 14°）		
源轴距 SAD	1m		
等中心点至机房地坪的高度	1.25m		
距靶 1m 处 X 辐射剂量率	15MV 时 600cGy/min 6MV 时 1400cGy/min （3F 束流模式）	10MV 时 600cGy/min 6MV 时 1400cGy/min （3F 束流模式）	10MV 时 600cGy/min 6MV 时 1400cGy/min （3F 束流模式）
最大照射野大小	40cm×40cm		
机架旋转	360°		
靶材料	钨合金		
用途	放射治疗		

注：*本项目型号未定的医用直线加速器，参数为建设单位招标意向及主流供货商的常用参数，实际采购设备的源强参数不大于表列源强参数。

• 后装治疗机项目

南通市肿瘤医院拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建 1 座后装机房由北院放射楼后装机房搬迁 1 台 KL-HDR-C 型后装治疗机，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，用于腔内、组织间等肿瘤的放射治疗。常见的后装治疗机外观图见图 9-3。



图 9-3 KL-HDR-C 型后装治疗机外观图

• 模拟定位机项目

南通市肿瘤医院拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建 2 座模拟定位机房，分别配备 1 台 CT 模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）、1 台 X 线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA），用于模拟定位。常见的模拟定位机外观见图 9-4。



（a）CT 模拟定位机　　（b）X 线模拟定位机

图 9-4 常见的模拟定位机外观图

模拟定位机是肿瘤放射治疗过程中用到的重要设备之一，在放射治疗中担负着模拟定位、等中心（位置）验证等重要工作，是整个放射治疗中重要的一环，实际上是一台特殊的 X 射线机。

模拟定位机的机架旋转、机头转动、限束器开闭、距离指示、照射野指示、治疗床

各部分运动，都与医用直线加速器一样，因此它能准确地模拟医用直线加速器的一切机械运动。并通过模拟定位机的X线影像系统准确定出肿瘤的照射位置、照射面积、肿瘤深度、等中心位置等几何参数，以及机架旋转、机头旋转角度、源瘤距、源皮距、限束器开度、升床高度等机械参数，为治疗摆位提供了有力的依据，确保放射治疗的正确实施。

本项目拟配备的模拟定位机主要技术参数见表9-2。

表9-2 本项目模拟定位机技术参数情况一览表

项目名称	技术参数	
设备	CT模拟定位机	X线模拟定位机
型号	型号未定	型号未定
位置	北院医疗综合楼负二层 放疗中心CT模拟定位机房	北院医疗综合楼负二层 放疗中心X线模拟定位机房
额定管电压	≤140kV	≤150kV
额定管电流	≤800mA	≤1000mA

（二）手术中心项目

南通市肿瘤医院拟于北院医疗综合楼三层手术中心新建2座DSA机房（OR1、2手术室），各配备1台DSA（型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA），用于医学诊断及介入治疗。

DSA因其整体结构像大写的“C”，因此也称作C型臂X光机，DSA由X线发生装置（包括X射线球管及其附件、高压发生器、X射线控制器等）和图像检测系统（包括光栅、影像增强管、光学系统、线束支架、检查床、输出系统等）组成。常见的DSA外观图见图9-5。

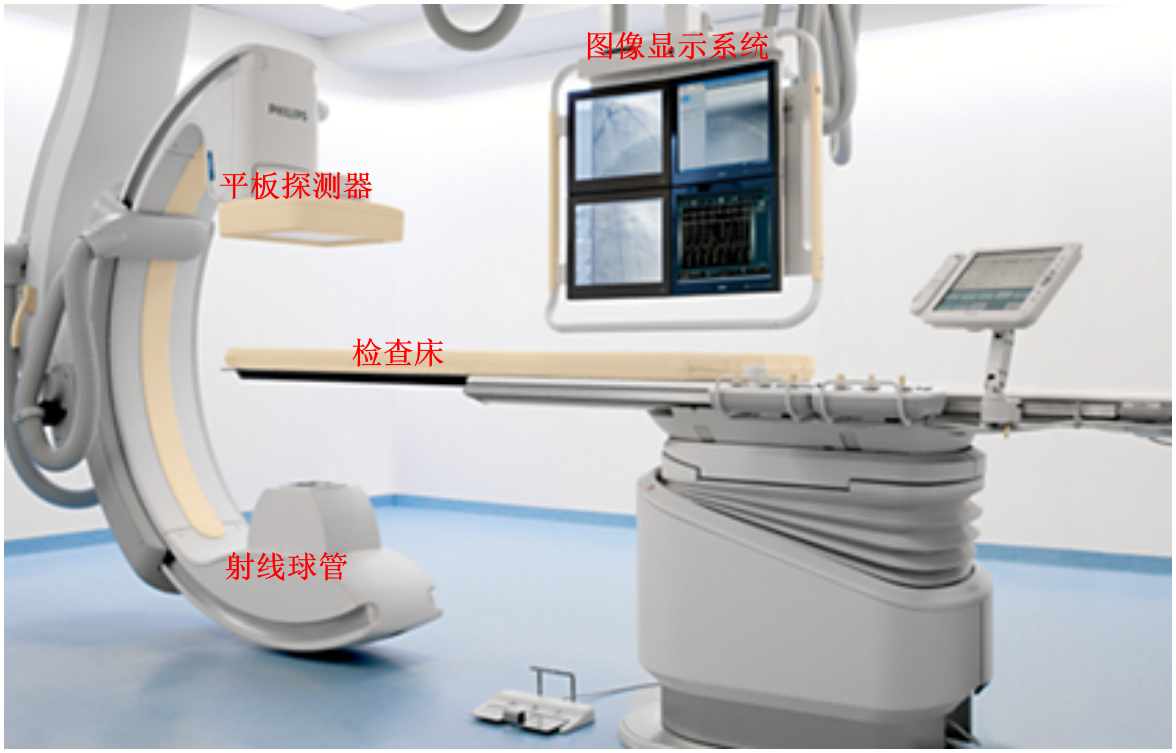

图 9-5 常见的 DSA 外观图

本项目拟配备 2 台 DSA 主要设备技术参数见表 9-3，配套设备配置情况见表 9-4。

表 9-3 本项目 DSA 主要设备技术参数

项目名称	技术参数*
型号	型号未定
位置	北院医疗综合楼三层手术中心 OR1、2 手术室
额定管电压	≤125kV
额定管电流	≤1250mA
X 射线球管滤过条件	≥0.5mmCu
焦皮距	≥45cm
照射野	最小照射野：8cm×8cm 平板探测器范围：30cm×38cm

注：*设备技术参数根据建设单位招标意向及主流供货商的常用参数确定，实际采购设备的源强参数不大于表列源强参数且“总滤过条件”相应的滤过效果不低于表中的“滤过条件”。

表 9-4 本项目每台 DSA 配套设备一览表

序号	名称	数量	用途	位置
1	电源柜	1 套	DSA 配电	设备间
2	高压发生柜	1 套	DSA 高压装置	设备间
3	系统控制柜	1 套	设备控制和数据传输	设备间

4	控制系统	1 套	DSA 设备操作	控制室

二、工作原理及工作流程

（一）放疗中心项目

• 医用直线加速器项目

1、工作原理

放疗是癌症三大治疗手段之一。是用各种不同能量的射线照射肿瘤，以抑制和杀灭癌细胞的一种治疗方法。放疗可单独使用，也可与手术、化疗等配合，作为综合治疗的一部分，以提高癌症的治愈率。放疗的基本目的是努力提高放疗的治疗增益比，即最大限度地将放射线的剂量集中到病变（靶区）内，而使周围的正常组织和器官少受或免受不必要的照射。

医用直线加速器是实现放疗的最常见设备之一，医用直线加速器是利用具有一定能量的高能电子与大功率微波的微波电场相互作用，从而获得更高的能量。这时电子的速度增加不大，主要是质量不断变大。电子直接引出，可作电子线治疗，电子打击重金属靶，产生韧致辐射发射 X 射线，作 X 线治疗。

当医用直线加速器加上高压后，即产生多种类型的辐射，可大致分为瞬时辐射和剩余辐射。瞬时辐射是指被加速的电子束、以及其与靶材料相互作用产生的高能 X 射线，此外，依据《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/T 201.2-2011），当电子束打靶能量＞10MeV 时，其韧致辐射产生的高能 X 射线能量还将与直线加速器的高 Z 重金属靶材产生（γ、n）反应，产生中子。医用直线加速器产生的高能电子束、高能 X 射线和中子，可能会对工作人员和公众产生辐射危害。

剩余辐射是指由于中子活化使加速器及周围环境产生短寿命的感生放射性核素，包括固态感生放射性和气态感生放射性。电子直线加速器中产生的感生放射性从物理机制上可分为直接和间接两个过程。直接过程为韧致辐射光子与加速器部件发生的光核反应；间接过程则主要为光核反应所释放的光中子与加速器部件发生的中子俘获反应，即中子活化。由中子活化产生的放射性核素大多为丰中子核素，其衰变方式多为 β^-衰变。一般停机数小时后，感生放射性即可达到可忽略的水平。医用直线加速器系统示意图见图 9-6。

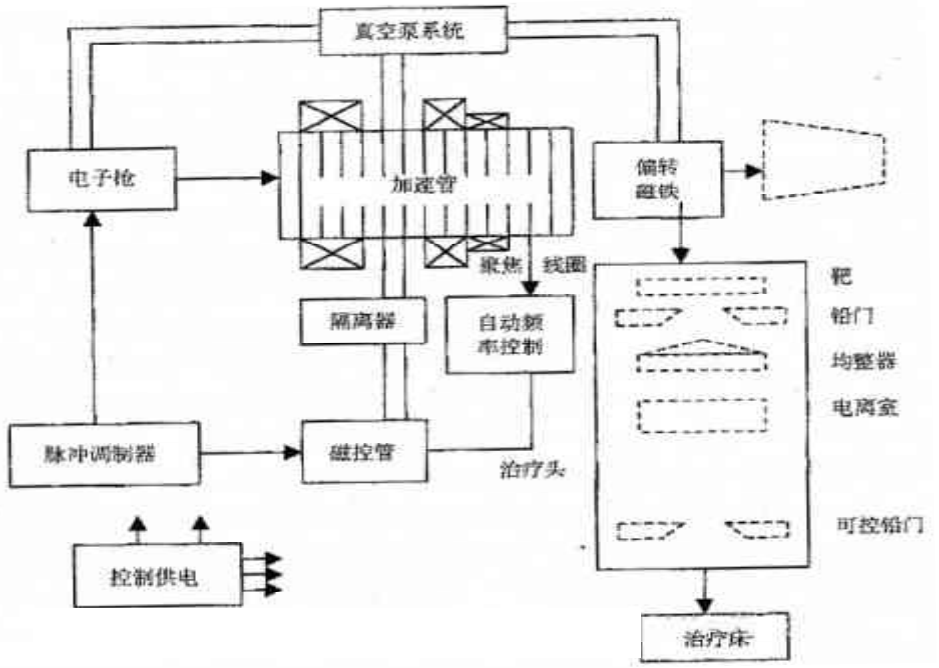

图 9-6 医用直线加速器系统示意图

2、工作流程

医用直线加速器工作流程及产污环节分析见图 9-7，其工作流程如下：

1）患者在经诊断确诊需要进行放射治疗后，根据病灶的部位确定定位体位，通过 CT 模拟定位机或 X 线模拟定位机扫描采集影像资料，用于确定靶区位置、形状和大小；

2）放疗医师根据医学影像临床诊断资料，提出放射治疗方案和精确治疗计划；

3）放射治疗计划完成，并经放疗医师确认后，放疗技师领患者进入治疗室，对患者进行摆位；

4）技师确认治疗室内无其他人员滞留，确认各类按钮工作正常后，关闭防护门；

5）技师在控制室内设置参数，按照医疗方案调整好出束时间、角度、剂量，然后进行出束治疗。治疗过程，会产生 X 射线、电子线、中子、感生放射性，治疗室内的空气会电离产生臭氧和氮氧化物；

6）治疗结束后，停止出束，解除定位，关闭系统，患者离开治疗室。

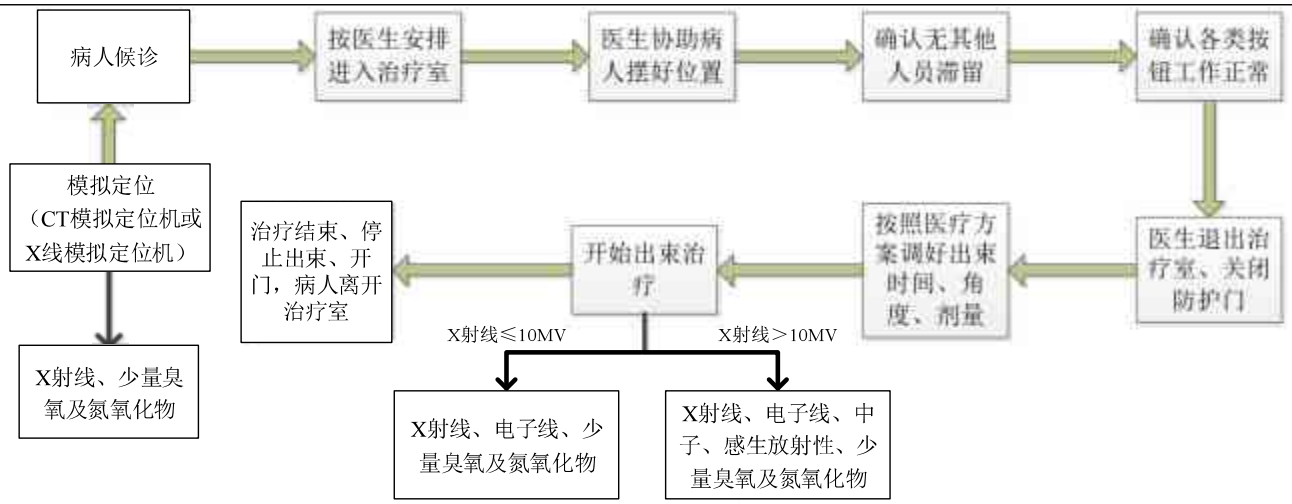

图 9-7 医用直线加速器工作流程及产污环节示意图

• 后装治疗机项目

1、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患者需要治疗的部位正确地放置施源器，然后采用自动或手动控制，将贮源器内放射源输入施源器内实施治疗的技术。后装治疗属近距离放疗，治疗时依照临床要求，使γ放射源在人体自然腔、管道或组织间驻留而达到预定的剂量及其分布的治疗手段，后装治疗具有治疗距离短、局部剂量高、周边剂量迅速跌落的特点，主要治疗不同部位的肿瘤以及手术难以切净，而周围又有重要脏器限制外照射剂量的患者，如胰腺、胆管、膀胱癌、直肠癌及头颈部恶性肿瘤等。

2、工作流程

后装治疗机工作流程及产污环节分析见图 9-8，其工作流程如下：

1）患者在经诊断确诊需要进行放射治疗后，根据病灶的部位确定定位体位，通过 CT 模拟定位机或 X 线模拟定位机扫描采集影像资料，用于确定靶区位置、形状和大小；

2）放疗医师根据医学影像临床诊断资料，提出放射治疗方案和精确治疗计划；

3）放射治疗计划完成，并经放疗医师确认后，放疗技师领患者进入治疗室，对患者进行摆位。将施源器与后装治疗机连接，放入腔内；

4）技师确认治疗室内无其他人员滞留，确认各类按钮工作正常后，关闭防护门；

5）技师在控制室内设置参数，按照医疗方案进行出源治疗。治疗过程，会产生γ射线，治疗室内的空气会电离产生臭氧和氮氧化物；

6）治疗结束，确认放射源回位后，患者离开治疗室。

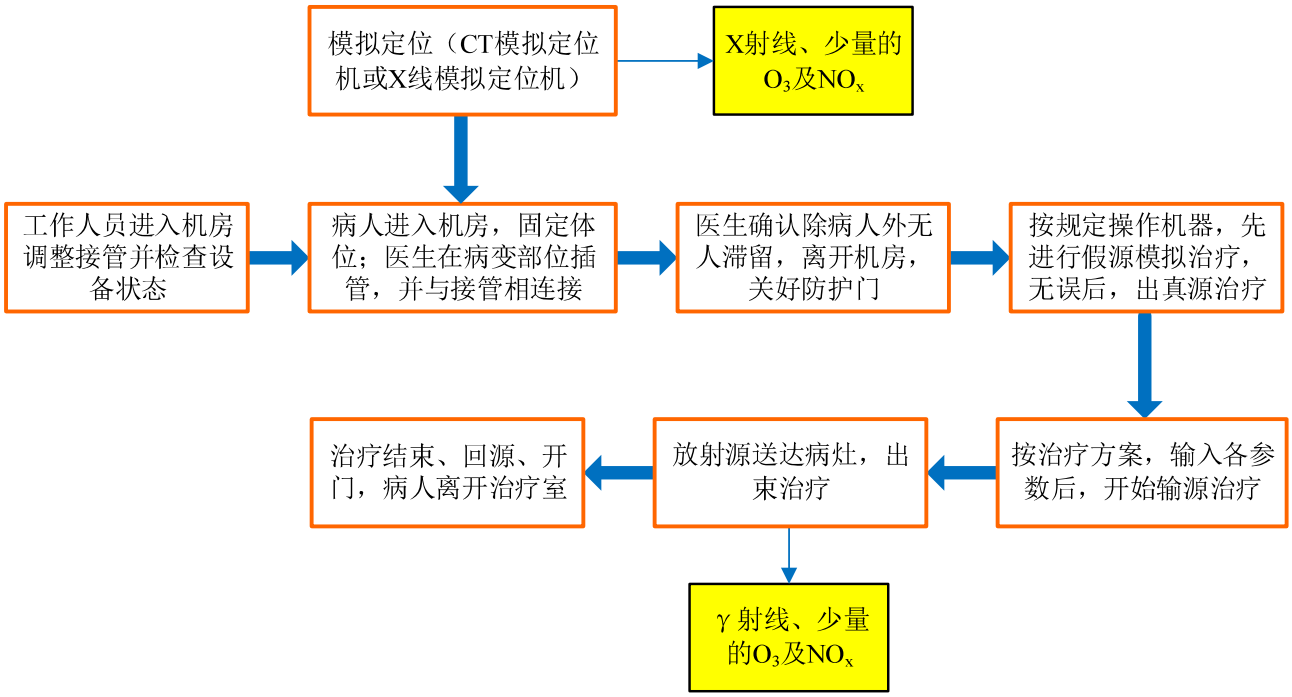

图 9-8 后装治疗机工作流程及产污环节示意图

• 模拟定位机项目

1、工作原理

模拟定位机是肿瘤放射治疗过程中用到的重要设备之一，在放射治疗中担负着模拟定位、等中心（位置）验证等重要工作，是整个放射治疗中重要的一环，实际上是一台特殊的 X 射线机。

模拟定位机等 X 射线诊断装置主要由 X 射线管和高压电源组成。X 射线管由安装在真空玻璃壳中的阴极和阳极组成，阴极是钨制灯丝，它装在聚焦杯中，当灯丝通电加热时，电子就“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚集成束，直接向嵌在金属阳极中的 靶体射击。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成。高电压加在 X 射线管的两极之间，使电子在射到靶体之前被加速达到很高的速度，这些高速电子到达靶面为靶所突然阻挡从而产生 X 射线。X 射线管基本结构如图 9-9 所示。

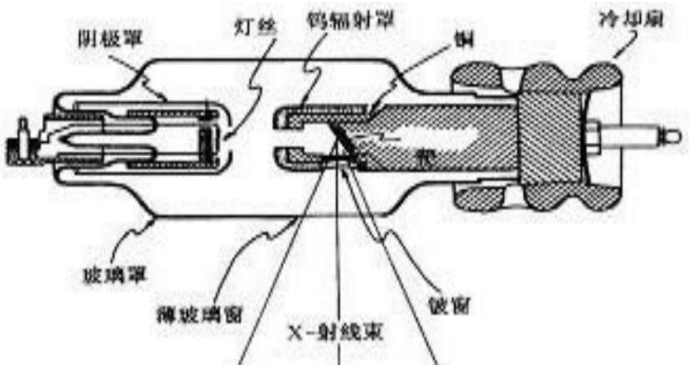

图 9-9 X 射线管基本结构示意图

模拟定位机的机架旋转、机头转动、限束器开闭、距离指示、照射野指示、治疗床各部分运动，都与放射治疗机一样，因此它能准确地模拟放射治疗机的一切机械运动。并通过模拟定位机的X线影像系统准确定出肿瘤的照射位置、照射面积、肿瘤深度、等中心位置等几何参数，以及机架旋转、机头旋转角度、源瘤距、源皮距、限束器开度、升床高度等机械参数，为治疗摆位提供了有力的依据，确保放射治疗的正确实施。

2、工作流程

患者经医生诊断后，预约登记诊断时间。受检者按约定时间在候诊区准备和等候。受检者进入机房在医务人员的指导下正确摆位。摆位完成后，除患者外，无关人员退出机房。工作人员检查无误后，即开启模拟定位机进行拍片/模拟定位。检查结束后，受检者离开机房。

模拟定位机诊断流程及产污环节见图9-10。

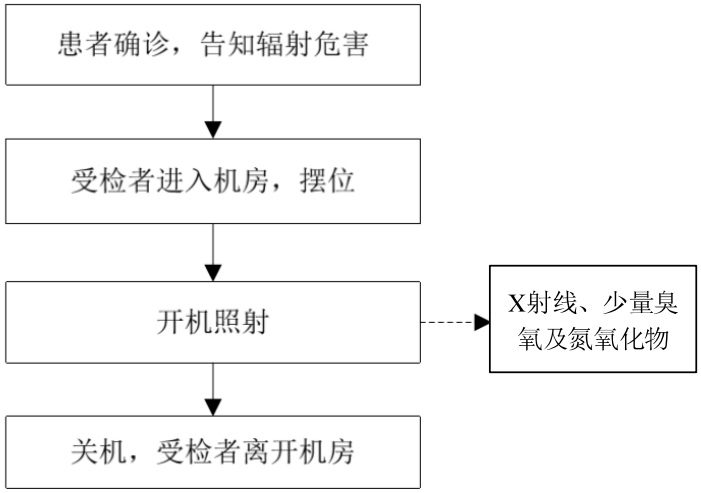

图9-10 模拟定位机工作流程及产污环节示意图

（二）手术中心项目

1、工作原理

数字减影血管造影技术是常规血管造影术和电子计算机图像处理技术相结合的产物。DSA的成像基本原理为：将受检部位没有注入造影剂和注入造影剂后的血管造影X射线荧光图像，分别经影像增强器增益后，再用高分辨率的电视摄像管扫描，将图像分割成许多的小方格，做成矩阵化，形成由小方格中的像素所组成的视频图像，经对数增幅和模/数转换为不同数值的数字，形成数字图像并分别存储起来，然后输入电子计算机处理并将两幅图像的数字信息相减，获得的不同数值的差值信号，再经对比度增强和数/模转换成普通的模拟信号，获得了去除骨骼、肌肉和其他软组织，只留下单纯血管影像

的减影图像，通过显示器显示出来。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系统结构图见图9-11。

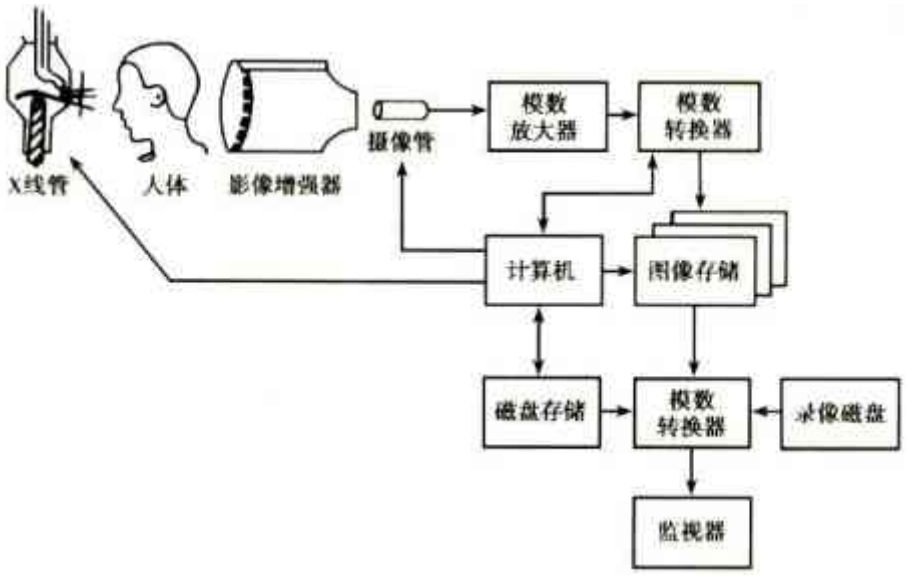

图9-11 DSA系统结构图

DSA是引导介入放射治疗的重要医学影像设备，通过置入体内的各种导管（约1.5-2毫米粗）的体外操作和独特的处理方法，对体内病变进行治疗。介入治疗具有不开刀、创伤小、恢复快、效果好的特点，目前，基于数字血管造影系统指导的介入治疗医生已能把导管或其他器械，介入到人体几乎所有的血管分支和其他管腔结构（消化道、胆道、气管、鼻管、心脏等），以及某些特定部位，对许多疾病实施局限性治疗。

2、工作流程

患者在进行DSA诊断和在DSA引导下进行介入治疗时，先仰卧进行无菌消毒，局部麻醉后，经皮穿刺动脉，送入引导钢丝及扩张血管与外鞘，退出钢丝及扩张管将外鞘保留于静脉内，经鞘插入导管，推送导管，在X线透视下将导管送达静脉，顺序取血测定静、动脉，并留X线片记录，探查结束，撤出导管，穿刺部位止血包扎。本项目DSA在进行曝光时分为两种情况：

第一种情况：血管减影检查。操作人员采取隔室操作的方式（即操作医师在控制室内对患者进行曝光），医生通过铅玻璃观察窗和操作台观察机房内患者情况，并通过对讲系统与患者交流。

第二种情况：引导介入治疗。患者需要进行介入手术治疗时，为更清楚的了解患者情况时会有连续曝光，并采用连续脉冲透视，此时操作医师位于铅帘后身着铅服、铅眼镜在机房内对患者进行直接的介入手术操作。

本项目采用先进的数字显影技术，电脑成像，不使用显（定）影液，不产生废显影液、废定影液和废胶片。注入的造影剂不含放射性。设备运行过程中产生的污染物主要为 X 射线、少量臭氧和氮氧化物以及手术过程中产生的医疗废物。DSA 项目工作流程及产污环节如图 9-12。

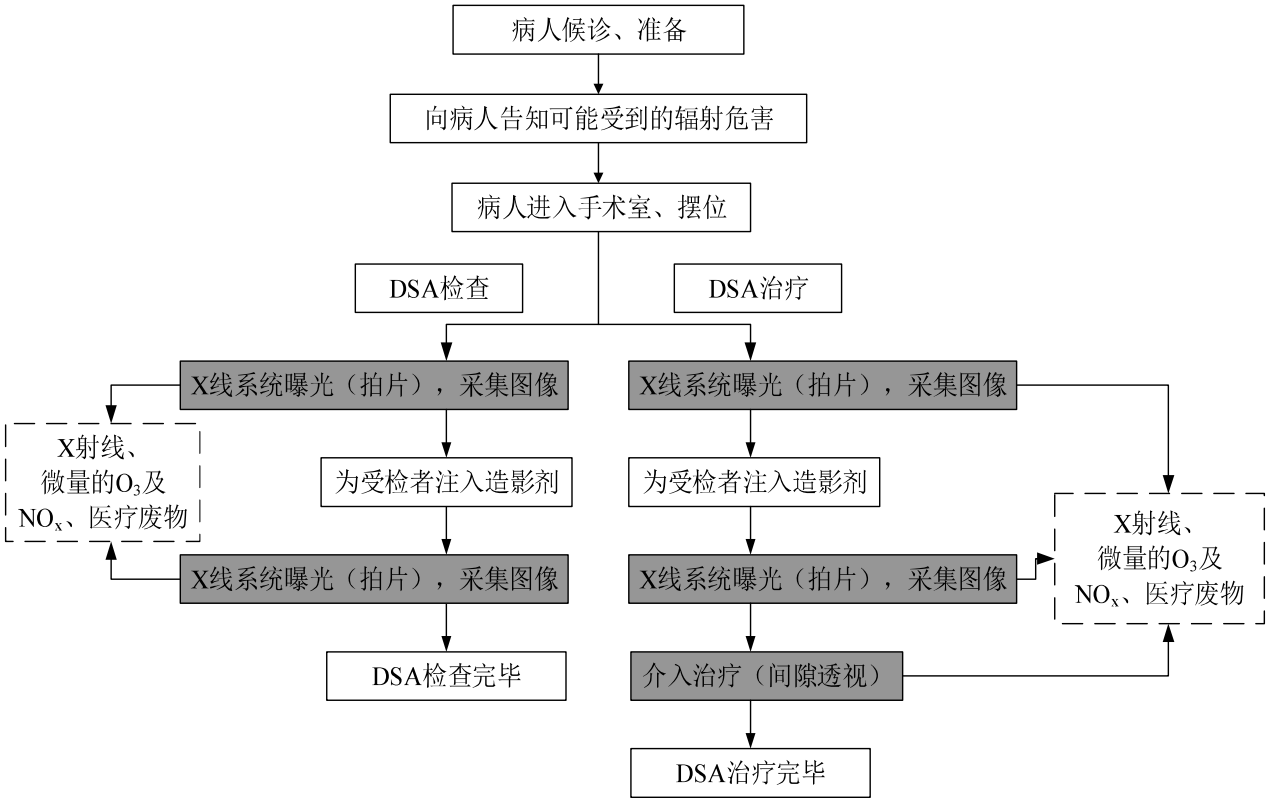

图 9-12 DSA 项目工作流程及产污环节示意图

污染源项描述

一、放疗中心项目

（一）放射性污染

• 医用直线加速器项目

①X 射线外照射：医用直线加速器以 X 射线模式运行时，从加速器电子枪里发出来的电子束，在加速管内经加速电压加速，轰击到钨金靶上，产生 X 射线。发射出来的 X 射线主要用于治疗，治疗剂量与剂量率的大小、加速器电子能量、受照射的靶体材料、电子束流强度、电子入射方向、考察点到源的距离等因素有关。

本项目拟配备 2 台 X 射线能量为 6、15MV 的医用直线加速器，15MV 时 1m 处输出剂量率最高为 600cGy/min，6MV 时 1m 处输出剂量率最高为 1400cGy/min（3F 束流模式），电子线能量≤20MeV，1m 处输出剂量率最高为 1400cGy/min；拟配备 4

台 X 射线能量为 6、10MV 的医用直线加速器，10MV 时 1m 处输出剂量率最高为 600cGy/min，6MV 时 1m 处输出剂量率最高为 1400cGy/min（3F 束流模式），电子线能量≤20MeV，1m 处输出剂量率最高为 1400cGy/min，由于 X 射线的贯穿能力极强，将对工作人员、公众及周围环境辐射造成辐射污染。

本项目医用直线加速器机房位于北院医疗综合楼负二层，不存在天空反射和侧散射。

②电子束：当医用直线加速器按电子束模式运行时，从电子枪里发出来的电子束经加速管加速后直接从加速管引出用于治疗患者。产生的电子属初级辐射，贯穿物质时受物质库仑场的影响，贯穿深度有限。

本项目拟配备的 6 台医用直线加速器电子线最大能量不超过 20MeV，1m 处电子线最高输出剂量率为 1400cGy/min。医用直线加速器在运行时产生的高能电子束，因其贯穿能力远弱于 X 射线，在 X 射线得到充分屏蔽的条件下，电子束亦能得到足够的屏蔽。因此，在医用直线加速器电子束治疗时间时，电子线对周围环境辐射影响小于 X 射线治疗，可忽略对外环境的影响。

③中子：当医用直线加速器的 X 射线能量高于 10MV 时，高能光子会与 X 射线靶、一级准直器、X 射线均整器和治疗准直器多种高原子序数的材料如铅、钨等发生（γ、n）光核反应，产生中子辐射。

由治疗机头中产生的中子分为两部分：一部分是混在 X 射线野内的原射快中子和经治疗机头衰减漏射出来的漏射中子组成的直射中子，另一部分是由治疗室墙壁、天花板、地板多次散射后的散射中子，散射中子其能量较低。上述中子是放射治疗工作中不需要的，所以又统称为污染中子。

中子的辐射生物效应远高于 X、γ射线，按中子能量高低其辐射权重因子（W_R）为 5~20，因此在高能医用电子加速器的防护设计中需要考虑中子的防护。一般情况下，治疗室墙体、天花板的屏蔽厚度满足了对 X 射线的防护要求时也能够满足对污染中子的防护要求，但要特别注意散射中子的防护，散射中子的影响主要考虑其对防护门的影响。

④感生放射性：感生放射性核素主要是中子与加速器结构材料发生的（n，γ）俘获反应产生的，仅适用于电子能量超过 10MeV 的设备。

医用直线加速器运行产生的感生放射性核素中，包括 ^{13}N、^{15}O 等放射性气体，但

是这些产物的半衰期较短，如 ^{13}N 的半衰期为 20.5min，^{15}O 的半衰期为 124s。根据《医用电子直线加速器质量控制检测规范》（WS 674-2020），对于感生放射性的周围剂量当量累积测量 5min，在离外壳表面 5cm 任何易接近处≤10μSv，离外壳表面 1m 处≤1μSv。在≤3min 的时间内，测得感生放射性的周围剂量当量率在离外壳表面 5cm 任何易接近处≤200μSv/h，离外壳表面 1m 处≤20μSv/h。当采用 10MeV 以上 X 射线或者电子线照射结束后，短时间内进入治疗室的人员应注意感生放射性的影响。

因此，本项目医用直线加速器开机期间，产生的 X 射线、中子、感生放射性为主要辐射环境污染因素。

⑤放射性废物：X 射线能量最大为 15MV 的医用直线加速器靶物质（件）以及机头等金属部件由于受电子的轰击会产生较强的感生放射性，机器退役（约使用 10 年）后更换下来的废靶件等应作为放射性废物处理。

• 后装治疗机项目

（一）放射性污染

后装治疗机未使用时，放射源处于屏蔽位，少量的γ射线会穿透屏蔽体，对进入治疗机房治疗室的人员及室外公众等产生照射。

后装机在治疗过程中，机房治疗室内来自放射源的直射、散射和漏射γ射线会穿透屏蔽墙及防护门，对治疗机房治疗室外的工作人员和公众产生外照射影响。

^{192}Ir 放射源使用到一定年限后产生退役的放射源，可能会对周围环境产生一定的危害。

本项目后装治疗机内配备有 1 枚 ^{192}Ir 放射源，最大装源活度为 3.70×10^{11}Bq，^{192}Ir 放射源特性见表 9-5，衰变纲图见图 9-13。

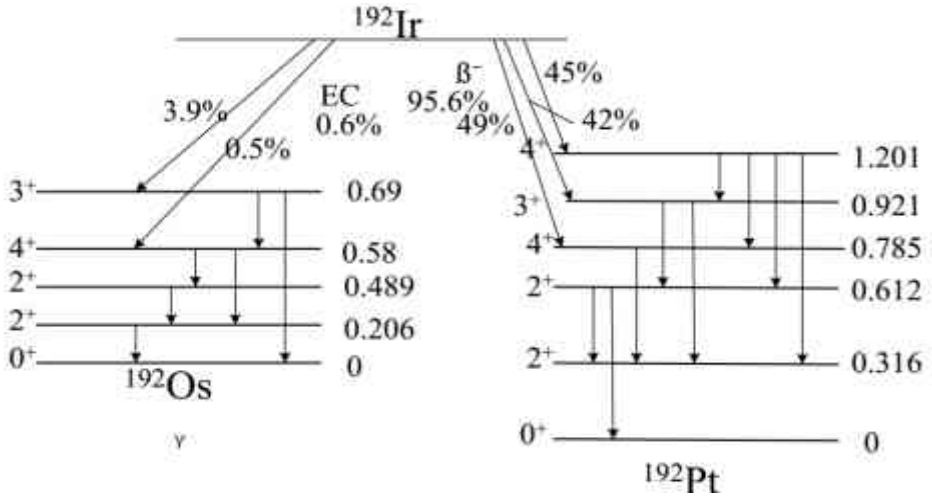

图 9-13 ^{192}Ir 衰变纲图

表 9-5 ^{192}Ir 放射性核素特性

核素名称	半衰期	衰变类型及分支比（%）	主要α、β辐射能量（keV）与绝对强度（%）	主要γ、X 射线能量（keV）与绝对强度（%）	空气比释动能率常数（$Gy \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot h^{-1}$）
^{192}Ir	74.0d	β^-（95.13） ε（4.87）	538.3（41.43） 675.1（48.0） 258.7（5.6）	316.5（82.75） 468.1（47.81） 308.5（29.68） 296.0（28.72） 604.4（8.2）	1.11×10^{-13}

• 模拟定位机项目

本项目模拟定位机采用先进的数字成像技术，不使用显影液、定影液和胶片，因此不会产生废显影液、废定影液和废胶片。

模拟定位机在工作状态下会发出X射线，拟配置的 1 台 CT 模拟定位机最大管电压≤140kV、最大管电流≤800mA，拟配置的 1 台 X 线模拟定位机最大管电压≤150kV、最大管电流≤1000mA，产生的 X 射线会对患者和医务人员有一定的附加辐射剂量。

（二）非放射性污染

①废气：医用直线加速器、后装机、模拟定位机在工作状态时，会使机房内的空气产生电离，产生臭氧和氮氧化物，少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排出治疗室，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

②废水：主要是工作人员产生的生活污水，将进入医院污水处理站，处理达标后排入城市污水管网，对周围环境影响较小。

③固体废物：主要是工作人员产生的生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

二、手术中心项目

（一）放射性污染

DSA 在工作状态下会发出X射线，拟配置的 2 台 DSA 最大管电压≤125kV、最大管电流≤1250mA，其主要用作血管造影检查及配合介入治疗，由于在荧光影像与视频影像之间有影像增强器，从而降低了造影所需的 X 射线能量，再加上一次血管造影检查需要时间很短，因此血管造影检查的辐射影响较小。而介入放射需要长时间的透视和大量的摄片，对患者和医务人员有一定的附加辐射剂量。

DSA 产生的 X 射线是随机器的开、关而产生和消失，其穿透能力与 X 射线管的管

电压和出口滤过有关。在开机出束期间，X 射线是主要污染因子。辐射场中的 X 射线包括有用线束（主束）、漏射线和散射线。由于射线能量较低，不必考虑感生放射性问题。

（1）有用线束

本项目 DSA 的有用线束投射方向为由下至上。有用线束的射线能量、强度与 X 射线管靶物质、管电压、管电流有关。DSA 具有自动照射量控制调节功能（AEC），摄影时，如果受检者体型偏瘦，功率自动降低，照射量率减小；如果受检者体型较胖，功率自动增强，照射量率增大。为了防止球管烧毁并延长其使用寿命，实际使用时，管电压和管电流通常留有一定的裕量。根据医院提供资料，当 DSA 运行管电压为额定电压的极端情况时，透视模式下的电流不大于 110mA，拍片模式下的电流不大于 500mA；DSA 正常运行时，透视模式的工况为（60～80）kV/（5～20）mA，拍片模式的工况为（60～80）kV/（100～500）mA。

DSA 运行时离靶 1 米处的 X 射线发射率根据运行时管电压和 DSA 的 X 射线管的过滤条件从《辐射防护导论》（方杰著）附图 3 中查取。本项目 DSA 过滤材料按照 0.5mmCu 滤片进行剂量预测，查《辐射防护导论》附图 3，额定电压为 125kV 时，离靶 1 米处的发射率约为 3.2mGy·m^2/mA·min；本项目正常运行时最大电压为 80kV，离靶 1 米处的发射率约为 0.8mGy·m^2/mA·min。

（2）泄漏射线

根据国际放射防护委员会第 33 号出版物《医用外照射源的辐射防护》“（77）用于诊断目的的每一个 X 射线管必须封闭在管套内，以使得位于该套管内的 X 射线管在制造厂规定的每个额定值时，离焦点 1m 处所测得的泄漏辐射在空气中的比释动能不超过 1mGy/h”（在距离源 1m 处不超过 100cm^2 的面积上或者在离管或源壳 5cm 处的 10cm^2 面积上进行平均测量），以及《医用电气设备 第一部分：安全通用要求 三、并列标准 诊断 X 射线设备辐射防护通用要求》（GB 9706.12-1997）中 29.204.3 的相应要求，取本项目 DSA 离焦点 1m 处的泄漏辐射空气比释动能率为 1.0mGy/h。

（3）散射线

本项目 DSA 的散射线主要考虑有用线束照射到受检者人体产生的侧向散射线，其强度与有用线束的 X 射线能量、X 射线机的输出量、散射面积和距离等有关。

工作负荷：根据医院提供的资料，本项目每台 DSA 的工作负荷情况见表 9-6。

表 9-6 本项目每台DSA工作负荷

（1）透视

手术类别	年开展工作量	每台手术透视曝光时间	年透视曝光时间
心脏介入	100 台	约 15min	约 25.0h
神经介入	50 台	约 20min	约 16.7h
综合介入	200 台	约 20min	约 66.7h
小计	/	/	约 108.4h

（2）拍片

手术类别	年开展工作量	单次采集时间	单台手术采集次数	单台手术最大采集时间	年采集时间
心脏介入	100 台	0.5~1s	6~10 次	约 0.2min	约 0.3h
神经介入	50 台	0.5~1s	4~10 次	约 0.2min	约 0.1h
综合介入	200 台	0.5~1s	7~15 次	约 0.3min	约 0.8h
小计	/	/	/	/	约 1.2h
总　计					约 109.6h

南通市肿瘤医院拟为DSA项目配备10名辐射工作人员，其中手术医生6人，技师2人，护士2人，辐射工作人员年工作250天。

（二）非放射性污染

①废气：DSA在工作状态时，会使机房内的空气电离产生少量臭氧和氮氧化物，少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排至室外，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

②废水：主要是工作人员产生的生活污水，将进入医院污水处理站，处理达标后排入城市污水管网，对周围环境影响较小。

③固体废物：DSA手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物暂存在机房内的废物桶，手术结束后集中收集，作为医疗废物由医院统一委托有资质单位进行处置；工作人员产生的生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

表 10　辐射安全与防护

项目安全措施

一、工作场所布局及分区

南通市肿瘤医院拟在北院医疗综合楼负二层放疗中心内新建 7 座放疗机房（包括 6 座医用直线加速器机房和 1 座后装机房）、2 座模拟定位机房；拟在北院医疗综合楼三层手术中心内新建 2 座 DSA 机房。

（一）放疗中心项目

• 医用直线加速器项目

本项目 6 座医用直线加速器机房位于北院医疗综合楼负二层放疗中心，位于建筑物底部的一端，周围无儿科病房、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，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中关于选址的规定。

本项目拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建 6 座医用直线加速器机房（由西向东依次为 1#~6#医用直线加速器机房），于 1#、2#医用直线加速器机房内分别配备 1 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、15MV，电子线能量≤20MeV）、于 3#医用直线加速器机房内配备 1 台医用直线加速器（医科达 SYNERGY 型，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量为 4、6、9、12、15、18MeV）、于 4#~6#医用直线加速器机房内分别配备 3 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量≤20MeV），用于肿瘤的放射治疗。1#、2#医用直线加速器机房东侧为楼梯间和等候休息区，南侧为准备区、控制室及水冷机房，西侧为后装机房及其控制室、准备室，北侧、下方均为土层，上方为封闭空间；3#~6#医用直线加速器机房东侧为消防器具间，南侧为准备区、控制室及水冷机房，西侧为下沉庭院和等候休息区，北侧及下方均为土层，上方为封闭空间。

医用直线加速器机房控制室与治疗室分离，控制室位于治疗室南侧；均设置“L”型迷路，迷路口设有防护门；有用线束仅向东墙、西墙、地面及屋顶照射。1#~6#医用直线加速器机房布局符合《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）中“治疗装置控制室应与治疗机房分离”的规定及《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中“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求”、“治疗机房均应设置迷路”等规定，本项目1#~6#医用直线加速器机房布局合理。

为加强辐射防护管理和职业照射控制，本项目拟将屏蔽产生射线的1#~6#医用直线加速器机房治疗室作为辐射防护控制区，严格控制人员进出，并在治疗室入口处设置电离辐射警告标志；拟将准备区、控制室及水冷机房作为辐射防护监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定要求。

·后装治疗机项目

本项目1座后装机房位于北院医疗综合楼负二层放疗中心，位于建筑物底部的一端，周围无儿科病房、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，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中关于选址的规定。

本项目拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建1座后装机房，由北院放射楼后装机房搬迁1台后装治疗机（KL-HDR-C型），内含1枚^{192}Ir放射源，单枚最大装源活度为$3.70\times10^{11}Bq$，用于腔内、组织间等肿瘤的放射治疗。后装机房东侧为1#医用直线加速器机房，南侧为控制室和室内走廊，西侧、北侧及下方均为土层，上方为封闭空间。

后装机房控制室与治疗室分离，控制室位于治疗室南侧；治疗室入口处设置直迷路，迷路口设有防护门。后装机房布局符合《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中“治疗设备控制室应与治疗机房分开设置”、“其他治疗机房均应设置迷路”的规定，布局合理。

为加强辐射防护管理和职业照射控制，本项目拟将后装机房治疗室作为辐射防护控制区，严格控制人员进出，并在治疗室入口处设置电离辐射警告标志；将控制室和准备室作为辐射防护监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌。本项目后装机房辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定。

·模拟定位机项目

本项目拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建2座模拟定位机房，分别配备1

台 CT 模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）、1 台 X 线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA），用于模拟定位。2 座模拟定位机房东侧为准备间，南侧为控制廊，西侧、北侧均为室内走廊，下方为土层，上方为新风机房和气体灭火间。模拟定位机房控制室与诊断机房分开单独布置，区域划分明确，项目布局合理。

本项目拟将模拟定位机所在机房作为辐射防护控制区，在机房入口处粘贴有电离辐射警告标志；与机房相邻的控制廊划为监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定。南通市肿瘤医院北院医疗综合楼负二层放疗中心平面布置及分区见附图 3。

（二）手术中心项目

本项目拟于北院医疗综合楼三层手术中心新建 2 座 DSA 机房（OR1、2 手术室），分别配备 1 台 DSA（型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA），用于医学诊断及介入治疗。2 座 DSA 机房东侧为控制室、设备间及室内走廊，南侧为设备间和室内走廊，西侧、北侧均为室内走廊，下方为检验科，上方为大会议室和室内走廊。DSA 配套独立用房，房间由射线装置机房和控制室组成。DSA 机房控制室与诊断机房分开单独布置，区域划分明确，项目布局合理。

本项目 DSA 所在机房作为辐射防护控制区，在机房入口处粘贴有电离辐射警告标志；与机房相邻的控制室、设备间划为监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定。南通市肿瘤医院北院医疗综合楼三层手术中心 DSA 机房平面布置及分区分别见附图 5。

二、辐射防护屏蔽设计

（一）放疗中心项目

• 医用直线加速器、后装治疗机项目

本项目 6 座医用直线加速器机房和 1 座后装机房位于北院医疗综合楼负二层放疗中心，采用混凝土浇筑结构。1#~3#、6#医用直线加速器机房治疗室东西长 8.0m、南北长 8.0m、净面积为 70.12m^2（不含迷路），4#、5#医用直线加速器机房治疗室东西长 8.0m、南北长 8.0m、净面积为 68.08m^2（不含迷路），机房顶部屏蔽内表面至地面

均为3.9m（装饰面层下机房高3.0m），均设置“L”型迷路，迷路横宽2.0m，迷路内口宽2.2m，迷路口设有防护门。后装机房治疗室面积东西长4.2m、南北长5.0m、面积约为21.0m^2（不含迷路），机房顶部屏蔽内表面至地面约4.9m（装饰面层下机房高3.3m），治疗室入口处设置直迷路，迷路横宽1.5m，迷路内口宽1.5m，迷路口设有防护门。

具体屏蔽设计参数见表10-1，屏蔽设计图见图10-1。

表10-1 放疗机房屏蔽设计参数

场所名称[1)]	分类[2)]		屏蔽设计（厚度及材质）3[2)]
1#医用直线加速器机房	东墙	主屏蔽区	300cm混凝土（宽度为4.6m）
		次屏蔽区	180cm混凝土
	南墙	迷路内墙	80~150cm混凝土
		迷路外墙	100~150cm混凝土
	西墙	主屏蔽区	300cm混凝土（宽度为4.6m）
		次屏蔽区	180cm混凝土
	北墙	侧屏蔽区	160cm混凝土
	屋顶	主屏蔽区	300cm混凝土（宽度为4.6m）
		次屏蔽区	180cm混凝土
	防护门		20mm铅板+150mm含硼聚乙烯
3#医用直线加速器机房	东墙	主屏蔽区	300cm混凝土（宽度为4.6m）
		次屏蔽区	180cm混凝土
	南墙	迷路内墙	80~150cm混凝土
		迷路外墙	100~150cm混凝土
	西墙	主屏蔽区	300cm混凝土（宽度为4.6m）
		次屏蔽区	180cm混凝土
	北墙	侧屏蔽区	177cm混凝土
	屋顶	主屏蔽区	300cm混凝土（宽度为4.6m）
		次屏蔽区	180cm混凝土
	防护门		20mm铅板
4#医用直线加	东墙	主屏蔽区	300cm混凝土（宽度为4.6m）

速器机房		次屏蔽区	180cm 混凝土
	南墙	迷路内墙	80~150cm 混凝土
		迷路外墙	100~150cm 混凝土
	西墙	主屏蔽区	300cm 混凝土（宽度为 4.6m）
		次屏蔽区	180cm 混凝土
	北墙	侧屏蔽区	177cm 混凝土
	屋顶	主屏蔽区	300cm 混凝土（宽度为 4.6m）
		次屏蔽区	180cm 混凝土
	防护门		20mm 铅板
后装机房	东墙		180~300cm 混凝土 （与 1#医用直线加速器机房共墙）
	南墙		80cm 砼
	西墙	迷路内墙	50~80cm 砼
		迷路外墙	80cm 砼
	北墙		80cm 砼
	顶部		80cm 砼
	防护门		10mm 铅板

注：1、本项目 1#和 2#、3#和 6#、4#和 5#医用直线加速器机房两两呈东西向镜像分布，屏蔽防护设计一致，故仅列出 1#、3#、4#医用直线加速器机房屏蔽防护设计参数；

2、放疗机房下方为土层，人员不可达；

3、混凝土密度为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3。

• 模拟定位机项目

本项目 2 座模拟定位机房位于北院医疗综合楼负二层放疗中心，2 座机房东西长 5.43m，南北长 6.03m，有效使用面积为 32.7m^2，层高 4.5m，具体屏蔽设计参数见表 10-2。

表 10-2 模拟定位机房屏蔽设计一览表

序号	射线装置名称型号	数量	管电压 kV	管电流 mA	工作场所名称	屏蔽设计参数（厚度及材质）*
1	CT模拟定位机（型号未定）	1	≤140	≤800	北院医疗综合楼负二层放疗中心 CT 模拟定位机房	四侧墙体：240mm 实心砖+2mm铅当量钡水泥； 顶面：200mm混凝土+2mm铅当量钡水泥； 地面：800mm 混凝土； 防护门：3mm铅当量铅板； 铅玻璃窗：3mm铅当量铅玻璃
2	X线模拟定位机（型号未定）	1	≤150	≤1000	北院医疗综合楼负二层放疗中心 X 线模拟定位机房	四侧墙体：240mm 实心砖+2mm铅当量钡水泥； 顶面：200mm混凝土+2mm铅当量钡水泥； 地面：800mm 混凝土； 防护门：3mm铅当量铅板； 铅玻璃窗：3mm铅当量铅玻璃

注：实心砖密度为 1.65g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，混凝土密度为 2.35g/cm^3，钡水泥密度为 3.2g/cm^3。

（二）手术中心项目

本项目 2 座 DSA 机房（OR1、2 手术室）位于北院医疗综合楼三层手术中心，OR1 手术室东西长 5.50m，南北长 7.85m，有效使用面积为 43.1m^2，层高 4.5m（装饰面层下机房高 3.0m）；OR2 手术室东西长 5.50m，南北长 8.40m，有效使用面积为 46.2m^2，层高 4.5m（装饰面层下机房高 3.0m），具体屏蔽设计参数见表 10-3。

表 10-3 DSA 机房屏蔽设计一览表

序号	射线装置名称型号	数量	管电压（kV）	管电流（mA）	工作场所名称	屏蔽设计参数（厚度及材质）*
1	DSA（型号未定）	2	≤125	≤1250	北院医疗综合楼三层手术中心 OR1、2 手术室	四侧墙体：轻钢龙骨架+3mm铅当量铅板； 顶面：150mm混凝土+2mm铅当量钡水泥； 地面：200mm混凝土+2mm铅当量钡水泥； 防护门：3mm 铅当量铅板； 铅玻璃窗：3mm 铅当量铅玻璃

注：实心砖密度为 1.65g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3，混凝土密度为 2.35g/cm^3，钡水泥密度为 3.2g/cm^3。

三、辐射安全和防护措施

（一）放疗中心项目

• 医用直线加速器项目

1、电线电缆布设：医用直线加速器机房电缆线穿墙方式拟采用地下“U”型穿墙管道，穿墙处埋地深度为 0.45m，电缆沟不会破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

2、防护门搭接方式：机房防护门设计制作时，除要考虑足够的防护厚度外，拟考虑防护门与周围墙壁及地面的重叠搭接，以防止门缝处射线泄漏。本项目医用直线加速器机房门与墙之间的间隙小于 1cm，防护门与墙之间的搭接不小于 10cm，可有效防止门缝处射线泄漏。

3、本项目放疗机房拟设计有通风装置，治疗室内拟采用机械进、出风，通风换气频率为不低于 4 次/h。进风口拟设在放疗机房治疗室东北角或西北角顶部吊顶处，排风口拟设在放疗机房治疗室东南角或西南角，下沿距治疗室地面 0.3m 高，进风口与排风口位置拟对角设置，以确保室内空气充分交换。放疗机房进排风管道避开主射线方向，射线经多次散射后，进出风管道进出口处辐射剂量将在控制范围内。

4、电离辐射警告标志和工作状态指示灯：放疗机房入口拟设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯，防止无关人员逗留和误入。

5、紧急停机装置：在放疗机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧、防护门内迷路入口处、控制室控制台及设备壳体上均拟设置急停按钮，以避免放疗机房内人员尚未完全清空的情况下开机，产生误照射。

6、开门装置：放疗机房拟设置从室内开启治疗机房门的装置，防护门拟设有防挤压功能。

7、安全联锁装置：除放疗设备自身所带的安全联锁外，机房拟设置门-机联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束照射，出束状态下开门停止出束。安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位并通过控制台才能重新启动放射治疗活动；安装调试及维修情况下，任何联锁旁路应通过医院辐射安全管理机构的批准与见证，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。

8、视频装置和双向交流对讲装置：本项目放疗机房控制室拟设置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，实时观察机房内的动态。

9、固定式辐射剂量监测仪：本项目放疗机房治疗室迷道的内入口处拟设置固定式辐射剂量监测仪并拟有异常情况下报警功能，其显示单元拟设置在控制室内。

•后装治疗机项目

1、门-源联锁装置：后装机房防护门拟设置门-源联锁装置，防护门未完全关闭时不能出源照射，出源状态下开门放射源回到治疗设备的安全位置。后装治疗机拟设有断电自动回源措施。

2、工作状态指示灯及电离辐射警告标志：治疗室外防护门上方拟设置工作状态指示灯，机房入口拟设置醒目、规范的电离辐射警告标志，防止无关人员逗留和误入。后装治疗机表面设置醒目、规范的电离辐射警告标志和中文警示说明，

3、急停按钮：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拟各设置安装急停按钮，并设有醒目标识及文字，若人员误留治疗室或其它事故情况，可在治疗室内立即按下急停开关，后装机会执行紧急收源程序。后装治疗设备控制系统拟设置有安全锁等多重保护和联锁装置。治疗室内拟配有合适的储源容器、长柄镊子等应急设备。

4、开门装置：后装机房拟设置从室内开启治疗机房门的装置，防护门拟设有防挤压功能。

5、视频装置和双向交流对讲装置：本项目放疗机房控制室拟设置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，实时观察机房内的动态。

6、固定式辐射剂量监测仪：在治疗室迷道出、入口处设置固定式辐射剂量监测仪并拟有异常情况下报警功能，其显示单元拟设置在控制室内。

7、设备自带自检系统，包括机器自检、复位自检和通道自检。进行治疗前，先进行自检和模拟治疗，确保放射源通道通畅，再进行治疗。

8、治疗过程中，若出现故障或意外情况，利用设备自带安全系统，放射源能够自动回到贮存位。当自动回源装置功能失效时，应有手动回源的应急处置措施。

9、本项目后装机房内拟配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具。

10、设备购置于正规厂家，满足质检要求。后装治疗机工作贮源器内装载最大容许活度的放射源时，应满足《后装γ源近距离治疗质量控制检测规范》（WS 262-2017）中的相关要求：距离贮源器表面 5cm 处的任何位置，因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 50μSv/h，距离贮源器表面 100cm 处的球面上，任何一点因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 5μSv/h。

• 模拟定位机项目

1、电离辐射警告标志

模拟定位机房入口处拟设置有“当心电离辐射”警告标志和中文警示说明。

2、工作状态指示灯

模拟定位机房患者入口防护门上方拟设置工作状态指示灯，灯箱上拟设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，并与机房防护门有效关联。

3、闭门装置

平开机房门拟设有自动闭门装置，推拉式机房门拟设有曝光时关闭机房门的管理措施，防护门关闭的情况下，设备才能出束照射。

4、急停按钮

在模拟定位机房控制室及设备上均设置有急停按钮，在出现紧急情况下，按下急停按钮，即可停止 X 射线系统出束。

5、观察窗

模拟定位机房控制室侧墙体上设置有观察窗，可有效观察到患者和受检者状态。

6、防护用品

医院拟为患者配备的个人防护用品主要有铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套等，防护用品防护能力均不低于 0.5mm 铅当量。

（二）手术中心项目

1、电离辐射警告标志

DSA 机房入口处拟设置有“当心电离辐射”警告标志和中文警示说明。

2、门灯联动

DSA 机房患者入口防护门上方拟设置工作状态指示灯，灯箱上拟设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动，防护门关闭的情况下，工作状态指示灯才亮。平开机房门应设有自动闭门装置，推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施。

3、急停按钮

DSA 控制室设置 1 个急停按钮，机房内的治疗床边操作面板自带 1 个急停按钮，各按钮分别与 X 射线系统连接，在出现紧急情况下，按下急停按钮，即可停止 X 射线系统出束。

4、观察窗或摄像监控装置和对讲装置

DSA机房控制室墙体上设置有观察窗，可有效观察到患者和受检者状态防护门开闭情况。DSA机房控制室拟设置对讲装置，方便机房外工作人员与患者交流。

5、防护用品

医院拟为 DSA 项目工作人员配备的辐射防护装置及个人防护用品主要有铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套、剂量报警仪、个人剂量计等，医院拟购置的各类防护用品除介入防护手套防护能力不低于 0.025mm 铅当量外，其余防护用品防护能力均不低于 0.5mm 铅当量。本项目 DSA 设备自带铅防护吊帘、床侧防护帘等辅助防护设施。

6、人员监护

医院拟为 DSA 项目配备 10 名辐射工作人员，应为辐射工作人员配备个人剂量计，采用双剂量计监测方法，定期送检且需做好个人剂量档案管理工作。该医院应开展辐射工作人员的职业健康监护，定期安排其在有相应资质医院体检，建立个人剂量档案。

7、完善并落实射线装置相关的安全使用制度、管理制度，从事辐射工作的医务人员均须参加放射工作的培训与辐射安全培训考核。医务人员在操作过程中遵守以上制度，严格按操作程序，避免发生事故。

8、其他辐射安全措施

介入治疗需要长时间的透视和大量的摄片，对患者和医务人员来说辐射剂量较高，因此在评估介入放射治疗的效应和操作时，其辐射损伤必须要加以考虑。由于需要医务人员在机房内，X 射线球管工作时产生的散射线对医务人员有较大影响，根据辐射防护“三原则”，医院还应在以下方面加强对介入治疗的防护工作：

1）操作中减少透视时间和减少照相的次数可以显著降低工作人员的辐射剂量，介入人员在操作时应尽量远离检查床。

2）一般说来，降低患者剂量的措施可以同时降低工作人员的辐射剂量，应加强对介入人员的培训，包括放射防护的培训，参与介入的人员应该技术熟练、动作迅速，以减少患者和介入人员的剂量。

3）所有在介入治疗手术室内的工作人员都应开展个人剂量监测，医院应结合工作人员个人剂量监测的数据采取措施，控制和减少工作人员的受照剂量。

4）引入的 DSA 及配套设备必须符合国际的或者国家的标准，满足各种特殊操作的要求，其性能必须与操作性质相符合；设备应该常规调节到满足低剂量的有效范围内，并尽可能提高图像质量。

5）介入人员应该结合 DSA 设备的特点，了解一些降低剂量的方法，比如脉冲透视、优化滤线器、除滤线栅、图像处理、低剂量透视等方法。

6）加强 DSA 设备的质量保证工作，设备的球管与发生器、透视和数字成像的性能以及其它相关设备应该定期进行检测。

7）临床介入手术时，介入医生需站在 DSA 床边操作，仅依赖于医务人员身着铅橡胶围裙、机器自带的铅防护吊帘等防护设备被动防护。一般来说，床下球管机对医务人员的辐射剂量，由头、颈、胸至腹部呈现剂量逐渐上升的趋势，故操作人员除个人防护用品（铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜及介入防护手套等）外，应着重考虑 X 射线机操作侧的屏蔽，该屏蔽要做到既不影响操作者的操作，又能达到防护目的，且能消毒。本项目 DSA 设备自带床侧防护帘、铅防护吊帘及铅悬挂防护屏，以上组合屏蔽防护措施的设置，能够有效降低介入手术医务人员的吸收剂量。

四、监测仪器和防护用品

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，开展放射诊疗的单位应配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。

表 10-4 个人防护用品和辅助防护设置配置符合性

项目	分项		《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）要求	本项目拟采取措施
模拟定位机项目	工作人员	个人防护用品	/	/
		辅助防护设施	/	/
	受检者	个人防护用品	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	2 件铅方巾、2 件铅橡胶颈套
		辅助防护设施	可调节防护窗口的立位防护屏 选配：固定特殊受检者体位的各种设备	/
DSA 项目	工作人员	个人防护用品	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	6 件铅橡胶围裙、6 件铅橡胶颈套、6 顶铅橡胶帽子、4 副铅防护眼镜、4 副介入防护手套
		辅助防护设施	铅悬挂防护屏/铅防护吊帘、床侧防护帘/床侧防护屏 选配：移动铅防护屏风	铅防护吊帘、床侧防护帘
	受检者	个人防护用品	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	2 件铅橡胶围脖、2 顶铅橡胶帽子、2 件铅方巾
		辅助防护设施	/	/

南通市肿瘤医院拟为本项目配备辐射巡测仪 1 台、固定式剂量监测报警装置 7 套（每座放疗机房均配备 1 套）及个人剂量报警仪 20 台（放疗中心、手术中心分别配备 16 台、4 台）。医院拟为辐射工作人员配备铅橡胶围裙、铅橡胶围脖、铅橡胶帽子、铅防护眼镜（不低于 0.5mm 铅当量）及介入防护手套（不低于 0.025mm 铅当量）等个人防护用品（具体配备情况见表 10-4）。辐射工作人员工作时将佩戴个人剂量计，开展 DSA 介入治疗的辐射工作人员采用双剂量计监测方法，以监测累积受照情况。医院拟定期组织辐射工作人员进行健康体检，并将按相关要求建立辐射工作人员个人剂量监测档案和职业健康监护档案。

三废的治理

一、放射性“三废”

放射性固体废物：医用电子直线加速器长时间运行后，一些长寿命的放射性核素

会随着医用电子直线加速器运行时间的增加而不断积累。加速器运行约10年后，检修更换下来的靶物质及其他强感生放射性部件均应作为放射性废物处理，不得随意丢弃。医院已承诺将X射线能量最大为15MV的医用直线加速器的退役废靶交由有资质单位回收处理（见附件4）。

^{192}Ir放射源使用到一定期限后产生退役的放射源，医院已承诺将退役^{192}Ir放射源交由放射源生产厂家回收处理（见附件5）。

二、非放射性“三废”

①废气：放疗机房、模拟定位机房、DSA机房内的空气在X射线、γ射线作用下分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，通过动力排风装置排入大气。

根据《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）第6.2.2条款的要求：放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数应不小于4次/h。

本项目7座放疗机房内均设有通风装置，采用机械排风方式。放疗机房采用上进下出的通风系统，从防护门上方至机房内。医用直线加速器机房内进风口拟设在放疗机房治疗室东北角或西北角顶部吊顶处，排风口拟设在放疗机房治疗室东南角或西南角，下沿距治疗室地面0.3m高。后装机房内进风口拟设在治疗室西南角顶部吊顶处，排风口拟设在治疗室东北角，下沿距治疗室地面0.3m高。放疗中心放疗机房通风设计平面图详见附图8。

本项目1#~3#、6#医用直线加速器机房治疗室容积约278m^3（包括迷路），4#、5#医用直线加速器机房治疗室容积约272m^3（包括迷路），各医用直线加速器机房内排风机的设计通风量均为2700m^3/h，每小时通风换气次数约为9次；后装机房治疗室容积约103m^3（包括迷路），机房内排风机的设计通风量为800m^3/h，每小时通风换气次数约为7次，均能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）及《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“通风换气次数应不小于4次/h”的相关要求。

②废水：工作人员和部分患者产生的生活污水，由医院污水处理站统一处理。

③固体废物：工作人员产生的生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理。

本项目DSA手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物暂存在机房

内的废物桶，手术结束后集中收集，作为医疗废物由医院统一委托有资质单位进行处置。

表 11　环境影响分析

建设阶段对环境的影响

本项目各机房及工作场所建设属于整个院区基础建设的部分工程，施工期阶段环境影响已于《南通市肿瘤医院医疗综合楼项目环境影响报告书》详细描述，建设时将产生施工噪声、扬尘，同时会产生一定的废水、废气和建筑垃圾等。

建设施工时对环境会产生如下影响：

1、大气：本项目在建设施工期需进行的挖掘地基、打桩、混凝土浇筑等作业，各种施工将产生地面扬尘，另外机械和运输车辆作业时排放废气和扬尘，但这些方面的影响仅局限在施工现场附近区域。针对上述大气污染采取以下措施：

①及时清扫施工场地，并保持施工场地一定的湿度；

②车辆在运输建筑材料时尽量采取遮盖、密闭措施，以减少沿途抛洒；

③施工路面保持清洁、湿润，减少地面扬尘。

2、噪声：整个建筑施工阶段，如打桩机、混凝土搅拌机、卷扬机及载重车辆等在运行中都将产生不同程度的噪声，对周围环境造成一定的影响。在施工时需严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523-2011）的要求，尽量使用噪声低的先进设备，同时严禁夜间进行强噪声作业，如需连续施工，在夜间施工而产生环境噪声污染时，按《中华人民共和国噪声污染防治法》的规定，需取得当地人民政府或有关主管部门的证明，并公告附近居民。

3、固体废物：项目施工期间，会产生一定量以建筑垃圾为主的固体废弃物，委托有有资质的单位清运，并做好清运工作中的装载工作，防止建筑垃圾在运输途中散落。

4、废水：项目施工期间，有一定量含有泥浆的建筑废水产生，对这些废水进行初级沉淀处理，并经隔渣后排放。在施工阶段，将合理安排施工计划，先行修建临时化粪池，施工人员生活污水排入临时化粪池，及时清理。

医院在施工阶段计划采取上述污染防治措施，将施工期的影响控制在内局部区域，对周围环境影响较小。

运行阶段对环境的影响

一、辐射环境影响分析

（一）放疗中心项目

·医用直线加速器项目（X 射线能量为 6、15MV）

根据建设单位提供的资料，医院拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建 2 座医用直线加速器机房（由西向东依次为 1#、2#医用直线加速器机房），各配备 1 台医用直线加速器，型号未定，主要参数为：X 射线能量：6、15MV；电子线能量：≤20MeV；射线最大出射角：28°；1m 处最大输出剂量率：15MV 时最高剂量率为 600cGy /min，6MV 时最高剂量率为 1400cGy /min（3F 束流模式），故本项目以 X 射线能量为 15MV、6MV 的情况下，分别进行辐射影响分析。

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/T 201.2-2011）的要求，在本项目 1#、2#医用直线加速器机房外设定关注点。从保守角度出发，在 1#、2#医用直线加速器机房设计的尺寸厚度基础上，假定医用直线加速器最大功率运行并针对关注点最不利的情况进行预测计算。

本项目 1#、2#医用直线加速器机房呈东西向镜像分布，2 座医用直线加速器机房内部尺寸及屏蔽防护设计一致，故本次计算仅对 1#医用直线加速器机房进行防护分析。

本项目 1#医用直线加速器机房的关注点设定如图 11-1。

1、有用线束主屏蔽区的宽度核算

使用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）中的相关公式计算有用线束主屏蔽区的宽度：

$$Y_p = 2\left[\left(a + SAD\right)\cdot \tan\theta + 0.3\right] \qquad \text{公式 11-1}$$

式中：Y_p—机房有用束主屏蔽区的宽度，m；

SAD—源轴距，m；

θ—治疗束的最大张角（相对束中的轴线），即射线最大出射角的一半；

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

将各参数代入公式 11-1，可估算出本项目的主屏蔽宽度核算结果并评价如表 11-1：

图 11-1 1#医用直线加速器机房估算点位示意图

表 11-1 1#医用直线加速器机房主屏蔽区的宽度设计评价表

参数	东墙主屏蔽	西墙主屏蔽	屋顶主屏蔽
SAD（m）	1	1	1
θ（°）	14	14	14
a（m）	7.00	5.20	5.65
Y_p 计算值（m）	4.59	3.69	3.92
Y_p 设计值（m）	4.60	4.60	4.60
评价结果	满足	满足	满足

由表 11-1 的理论估算结果可知，1#、2#医用直线加速器机房东墙、西墙及屋顶主屏蔽区域屏蔽宽度均能够满足医用直线加速器的有用射线束的防护宽度要求。

2、辐射防护效果预测

（1）有用线束主屏蔽设计核算（西墙 *a* 点、东墙 *b* 点和屋顶 *l* 点）

①主射线路径：西墙 $o_2 \rightarrow a$，东墙 $o_1 \rightarrow b$，屋顶 $o_3 \rightarrow l$。

②计算模式及参数选择

使用《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）的相关公式进行有用线束主屏蔽设计核算，在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先按照公式 11-2 计算有效厚度 X_e（cm），按照公式 11-3 估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B，再按照公式 11-4 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）。

$$X_e = X/\cos\theta = X \cdot \sec\theta \qquad \text{公式 11-2}$$

式中：X—设计屏蔽厚度，cm；

θ—斜射角。

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \qquad \text{公式 11-3}$$

式中，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，当未指明 TVL_1 时，TVL_1=TVL。可根据加速器 X 射线能量查 GBZ/T 201.2-2011 的附录 B 表 B.1。本项目中，对应 15MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=44cm，TVL=41cm；对应 10MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=41cm，TVL=37cm；对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=37cm，TVL=33cm。本项目中，*a* 点、*b* 点、*l* 点相应厚度主屏蔽的 B 值核算见表 11-2。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \qquad \text{公式 11-4}$$

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（以下简称靶）1m 处的常用最高剂量率，μSv·m²/h，本项目中，对应 15MV、10MV 的 X 射线能量，1m 处的常用最高剂量率为 3.60E+08μSv·m²/h；对应 6MV 的 X 射线能量，1m 处的常用最高剂量率为 8.40E+08μSv·m²/h；

R—靶点至参考点的距离，m，本项目参考点均为相应墙外 30cm；

f—对有用线束为 1，对泄漏辐射为泄漏辐射比 0.1%。

③预测计算结果

将相应主屏蔽厚度得出的辐射屏蔽透射因子 B 值代入，得到相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h），将其与本项目确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表 11-2。

表 11-2（a） 1#医用直线加速器机房主屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（15MV）

参数	西墙主屏蔽（a 点）	东墙主屏蔽（b 点）	屋顶主屏蔽（l 点）
X（cm）	120 砼+180 砼	60 砼+180 砼+60 砼	120 砼+180 砼
X_e（cm）	300 砼	300 砼	300 砼
TVL_1（cm）	44		
TVL（cm）	41		
B	5.70E-08	5.70E-08	5.70E-08
R（m）	8.300	8.300	9.750
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08		
f	1		
$\dot{H}$（μSv/h）	0.298	0.298	0.216
$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）	10	10	10
评价	满足	满足	满足

表 11-2（b） 1#医用直线加速器机房主屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（6MV）

参数	西墙主屏蔽（a 点）	东墙主屏蔽（b 点）	屋顶主屏蔽（l 点）
X（cm）	120 砼+180 砼	60 砼+180 砼+60 砼	120 砼+180 砼
X_e（cm）	300 砼	300 砼	300 砼
TVL_1（cm）	37		
TVL（cm）	33		
B	1.07E-09	1.07E-09	1.07E-09
R（m）	8.300	8.300	9.750
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	8.40E+08		
f	1		
$\dot{H}$（μSv/h）	0.013	0.013	0.009

$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）	10	10	10
评价	满足	满足	满足

（2）与主屏蔽区相连的次屏蔽区屏蔽设计核算（西墙 c_1 点、c_2 点、东墙 d_1 点、d_2 点及屋顶 m_1 点、m_2 点）

①射线路径（射线类型）：$o_2 \rightarrow o \rightarrow c_1$（散射射线），$o_2 \rightarrow o \rightarrow c_2$（散射射线），$o_1 \rightarrow o \rightarrow d_1$（散射射线），$o_1 \rightarrow o \rightarrow d_2$（散射射线），$o_3 \rightarrow o \rightarrow m_1$（散射射线），$o_3 \rightarrow o \rightarrow m_2$（散射射线）。

$o \rightarrow c_1$（泄漏射线），$o \rightarrow c_2$（泄漏射线），$o \rightarrow d_1$（泄漏射线），$o \rightarrow d_2$（泄漏射线），$o \rightarrow m_1$（泄漏射线），$o \rightarrow m_2$（泄漏射线）。

对于位置 c_1 点、c_2 点、d_1 点、d_2 点和 m_1 点、m_2 点，考虑泄漏辐射和散射辐射的复合作用。

②泄漏辐射计算模式及参数选择

泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。f=0.001（泄漏辐射比率，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/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}），公式 11-3 的 TVL_1 和 TVL 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 15MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=36cm，TVL=33cm；对应 10MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=35cm，TVL=31cm；对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=34cm，TVL=29cm。

③散射辐射计算模式及参数选择

在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先用公式 11-2 计算或直接在结构图中量出该屏蔽墙的有效厚度 X_e（cm），按照公式 11-3 估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B_s（其中患者散射辐射在混凝土中的什值层，查表 B.4 知，当散射角 30°时，对于 15MV 射线，患者散射辐射在混凝土中什值层为 31cm；对于 10MV 射线，患者散射辐射在混凝土中什值层为 28cm；对于 6MV 射线，患者散射辐射在混凝土中什值层为 26cm），再按照公式 11-5 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）；

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^2} \cdot B \qquad \text{公式 11-5}$$

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（以下简称靶）

1m 处的常用最高剂量率，μSv·m²/h，本项目中，对应 15MV、10MV 的 X 射线能量，1m 处的常用最高剂量率为 3.60E+08μSv·m²/h；对应 6MV 的 X 射线能量，1m 处的常用最高剂量率为 8.40E+08μSv·m²/h；

α_{ph}—患者 400cm² 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，又称 400cm² 面积上的散射因子。根据散射线能量和考察点斜射角，查 GBZ/T 201.2-2011 表 B.2。本项目按 15MV、30°取值，为 3.18×10^{-3}；按 10MV、30°取值，为 3.18×10^{-3}；按 6MV、30°取值，为 2.77×10^{-3}。

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

R_s—患者（位于等中心点）至关注点的距离，m。

④预测计算结果

叠加次屏蔽墙外泄漏辐射与患者一次散射辐射的瞬时剂量率值，将其与本项目确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表 11-3，其中 X_e、*R* 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 11-3（a） 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（15MV）

参数		西墙次屏蔽		东墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）
		（c_1 点）	（c_2 点）		
X（cm）		180 砼		180 砼	180 砼
X_e（cm）		207.6 砼		207.6 砼	202.6 砼
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		3.60E+08			
泄漏辐射	TVL_1（cm）	36			
	TVL（cm）	33			
	B	6.31E-07		6.31E-07	6.86E-07
	R（m）	8.421		7.729	9.850
	f	0.001			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.003		0.004	0.003
散射辐射	TVL_1（cm）	31			
	TVL（cm）	31			

	R_s（m）	8.421		7.729	9.850
	α_{ph}	3.18E-03			
	B	2.01E-07		2.01E-07	2.91E-07
	F（cm²）	1600			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.013		0.015	0.014
$\dot{H}$（μSv/h） 泄漏辐射和散射辐射的复合作用		0.016		0.019	0.017
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平		2.5	0.4	10	6.4
评价		满足	满足	满足	满足

表 11-3（b） 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（6MV）

参数		西墙次屏蔽		东墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）
		（c_1 点）	（c_2 点）		
X（cm）		180 砼		180 砼	180 砼
X_e（cm）		207.6 砼		207.6 砼	202.6 砼
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		8.40E+08			
泄漏辐射	TVL_1（cm）	34			
	TVL（cm）	29			
	B	1.03E-07		1.03E-07	1.54E-07
	R（m）	8.421		7.729	9.850
	f	0.001			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.001		0.001	0.001
散射辐射	TVL_1（cm）	26			
	TVL（cm）	26			
	R_s（m）	8.421		7.729	9.850
	α_{ph}	2.77E-03			
	B	1.04E-08		1.04E-08	1.61E-08
	F（cm²）	1600			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.001		0.002	0.002

$\dot{H}$（μSv/h） 泄漏辐射和散射辐射的复合作用	0.002		0.003	0.003
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平	2.5	0.4	10	6.4
评价	满足	满足	满足	满足

（3）侧屏蔽墙屏蔽设计核算（北墙*e*点、迷路墙外*f*点）

①射线路径（射线类型）：*o*→*e*（泄漏射线），*o*→*f*（泄漏射线）。

②计算模式及参数选择

该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。公式 11-4 中，f=0.001（泄漏辐射比率，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/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}）。公式 11-3 的 TVL_1 和 TVL 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 15MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=36cm，TVL=33cm；对应 10MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=35cm，TVL=31cm；对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=34cm，TVL=29cm。

③预测计算结果

e 点、*f* 点的辐射剂量率预测结果见下表 11-4，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 11-4（a） 1#医用直线加速器机房迷路墙外泄漏辐射剂量率核算值（15MV）

参数	北墙（*e* 点）	南侧迷路墙外（*f* 点）
X（cm）	160 砼	150 砼（迷路内墙）+100 砼（迷路外墙）
X_e（cm）	160 砼	250 砼
TVL_1（cm）	36	
TVL（cm）	33	
B	1.75E-05	3.27E-08
R（m）	5.900	9.000
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08	
f	0.001	
$\dot{H}$（μSv/h）	0.181	1.46E-04
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平	/	2.5

评价	/	满足

表 11-4（b） 1#医用直线加速器机房迷路墙外泄漏辐射剂量率核算值（6MV）

参数	北墙（e 点）	南侧迷路墙外（f 点）
X（cm）	160 砼	150 砼（迷路内墙）+100 砼（迷路外墙）
X_e（cm）	160 砼	250 砼
TVL_1（cm）	34	
TVL（cm）	29	
B	4.52E-06	3.56E-09
R（m）	5.900	9.000
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	8.40E+08	
f	0.001	
$\dot{H}$（μSv/h）	0.109	3.69E-05
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平	/	2.5
评价	/	满足

（4）迷路外墙屏蔽设计核算（迷路外墙 *k* 点）

①射线路径（射线类型）：o_2→k（泄漏射线）。

②计算模式及参数选择

本项目有用线束不向迷路内墙照射，该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。公式 11-4 中，f=0.001（泄漏辐射比率，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/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}）。公式 11-3 的 TVL_1 和 TVL 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 15MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=36cm，TVL=33cm；对应 10MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=35cm，TVL=31cm；对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=34cm，TVL=29cm。

③预测计算结果

k 点的辐射剂量率预测结果见下表 11-5，o_2 至 k 的泄漏辐射的斜射角较小，通常以 0°垂直入射保守估算，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 11-5 迷路外墙泄漏辐射剂量率核算值

参数	南侧迷路外墙（*k* 点）	
	15MV	6MV
X（cm）	150 砼	
X_e（cm）	161.6 砼	
TVL_1（cm）	36	34
TVL（cm）	33	29
B	1.56E-05	3.98E-06
R（m）	9.693	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08	8.40E+08
f	0.001	
$\dot{H}$（μSv/h）	0.060	0.036
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平	6.4	
评价	满足	

（5）迷路内墙屏蔽设计核算（*g* 点）

①射线路径（射线类型）：$o_1 \rightarrow g$（泄漏射线）。

②计算模式及参数选择

g 点泄漏辐射剂量核算方法同 *e* 点。取泄漏因子 f=0.001。公式 11-3 的 TVL_1 和 *TVL* 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 15MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=36cm，*TVL*=33cm；对应 10MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=35cm，*TVL*=31cm；对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=34cm，*TVL*=29cm。

③预测计算结果

g 点的辐射剂量率预测结果见表 11-6，其中 X_e、*R* 的取值由 CAD 图纸上读出。

表 11-6 1#医用直线加速器机房迷路入口处的泄漏辐射剂量率核算值

参数	迷路入口处（*g* 点）	
	15MV	6MV
X（cm）	150 砼	
X_e（cm）	156.9 砼	

TVL_1（cm）	36	34
TVL（cm）	33	29
B	2.17E-05	5.78E-06
R（m）	8.367	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08	8.40E+08
f	0.001	
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	0.112	0.069
$\dot{H}_c$（μSv/h）* 剂量率参考控制水平	0.5	
评价	满足	

注：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/T 201.2-2011）中4.3.2.5.1b），“核算加速器的泄漏辐射（以偏离 o 的位置 o_1 为中心）经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 g 的辐射剂量。……核算结果应为 g 处的参考控制水平的一个分数（应小于1/4）”，故本项目取0.5μSv/h。

（6）机房入口防护门屏蔽设计核算（*g* 点）

• X射线能量为15MV时，机房的迷路散射辐射

本项目配置的医用直线加速器X射线最大为15MV，且有用线束不向迷路照射，根据GBZ/T 201.2-2011，对于＞10MV的医用直线加速器机房迷路散射辐射需要估算下列各项：

①总中子注量Φ_B

迷路的中子散射路径为“$o \rightarrow B \rightarrow g$”。$B$ 点是从等中心点与迷路内墙端的连线和迷路长轴中心线之间的交点。在 B 点的总中子注量Φ_B按照公式11-6计算。

$$\Phi_B = \frac{Q_n}{4\pi d_1^2} + \frac{5.4Q_n}{2\pi S} + \frac{1.26Q_n}{2\pi S} \qquad \text{公式 11-6}$$

式中三项分别是加速器机头外的杂散中子、杂散中子在治疗室内壁的散射中子及所形成的热中子。

式中：Φ_B—等中心处1Gy治疗照射时 B 处的总中子注量，（中子数/m²）/Gy；

Q_n—在等中心处每1Gy治疗照射时射出加速器机头的总中子数，根据NCRP No.151中表B.9中列出的参数，本项目 Q_n 按照15MV瓦里安型加速器保守取 0.76×10^{12}（中子数/m²）/Gy；

d_1—等中心点 o 至 B 点的距离，m；

S—治疗机房的总内表面积（m^2），包括四壁墙、顶面和底面，不包括迷路内各面积。上式用于铅屏蔽加速器机头。对于钨屏蔽的加速器机头，公式 11-6 的第一项和第二项均乘以衰减因子 0.85。

在 B 点的总中子注量Φ_B计算结果见表 11-7。

表 11-7 总中子注量核算值

工作场所	Q_n（中子数/Gy）	d_1（m）	S（m^2）	Φ_B（（中子数/m^2）/Gy）
1#医用直线加速器机房	0.76E+12	7.011	285.3	3.53E+09

②机房入口的中子俘获γ射线的剂量率$\dot{H}_\gamma$

机房内及迷路中的中子在与屏蔽物质作用时产生中子俘获γ射线，机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的中子俘获γ射线的剂量率$\dot{H}_\gamma$（μSv/h）按公式 11-7 计算。

$$\dot{H}_\gamma = 6.9\times10^{-16}\cdot\Phi_B\cdot10^{-d_2/TVD}\cdot\dot{H}_0 \qquad \text{公式 11-7}$$

式中：6.9×10^{-16}—该方法中的经验因子，Sv/（中子数/m^2）；

Φ_B—等中心处 1Gy 治疗照射时 B 处的总中子注量，（中子数/m^2）/Gy；

d_2—B 点至机房入口（g）点的距离，m；

TVD—将γ辐射剂量减至其十分之一的距离（称为什值距离），对于 15MV 加速器为 3.9m；

$\dot{H}_0$—等中心点处治疗 X 射线剂量率，本项目为 3.60E+08μSv·m^2/h。

对于二阶迷路，公式 11-7 中以二阶迷路 d_{2a} 和 d_{2b} 之和代替 d_2，并且$\dot{H}_\gamma$为公式 11-7 的 1/3。

机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的中子俘获γ射线的剂量率$\dot{H}_\gamma$计算结果见表 11-8。

表 11-8 机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的中子俘获γ射线的剂量率核算值

工作场所	Φ_B（（中子数/m^2）/Gy）	d_2（m）	TVD（m）	$\dot{H}_\gamma$（μSv/h）
1#医用直线加速器机房	3.53E+09	9.007	3.9	1.43

③机房入口的中子剂量率$\dot{H}_n$

机房内的中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的剂量率$\dot{H}_n$

（μSv/h）按公式 11-8 计算。

$$\dot{H}_n = 2.4\times10^{-15}\cdot\Phi_B\cdot\sqrt{\frac{S_0}{S_1}}\cdot\left[1.64\times10^{-(d_2/1.9)}+10^{-(d_2/T_n)}\right]\cdot\dot{H}_0 \qquad \text{公式 11-8}$$

式中：2.4×10^{-15}—该计算方法中的经验因子，Sv/（中子数/m^2）；

S_0—迷路内口的面积，m^2；

S_1—迷路横截面积，m^2；

d_2—B 点至机房入口（g）点的距离，m；

T_n—迷路中能量相对高的中子剂量组分公式 11-8 方括号中的第二项衰减至十分之一行经的距离（m），称为什值距离。T_n 是一个经验值，与迷路横截面积有关，T_n 按公式 11-9 计算：

$$T_n = 2.06\sqrt{S_1} \qquad \text{公式 11-9}$$

机房内的中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的剂量率 $\dot{H}_n$ 计算结果见表 11-9。

表 11-9 中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的剂量率核算值

工作场所	Φ_B（（中子数/m^2）/Gy）	S_0（m^2）	S_1（m^2）	T_n（m）	$\dot{H}_n$（μSv/h）
1#医用直线加速器机房	3.53E+09	7.8	8.58	6.03	93.5

④入口门屏蔽

入口门屏蔽设计时，通常使中子和中子俘获γ射线屏蔽后有相同的辐射剂量率，对于中子俘获γ射线，以铅屏蔽；对于中子，以含硼（5%）聚乙烯板屏蔽。

本项目防护门屏蔽设计为 20mm 铅板+150mm 含硼（5%）聚乙烯板，门外表面包裹有一定厚度的结构钢板。当给定防护门屏蔽厚度 X_γ 和 X_n 时，防护门外的辐射剂量率 $\dot{H}$（μSv/h）按公式 11-10 计算。

$$\dot{H} = \dot{H}_\gamma\cdot10^{-(X_\gamma/TVL_\gamma)}+\dot{H}_n\cdot10^{-(X_n/TVL_n)}+\dot{H}_{og}\cdot B_{og} \qquad \text{公式 11-10}$$

式中：B_{og}—防护门对 $\dot{H}_{og}$ 的屏蔽透射因子，在 $\dot{H}_{og}$ 相对 g 处的总剂量率较小时，可以忽略 $\dot{H}_{og}\cdot B_{og}$ 项。

本项目中，$\dot{H}_{og}$ 相对 g 处的总剂量率较小，可以忽略 $\dot{H}_{og}\cdot B_{og}$ 项。

入口处中子和中子俘获γ射线的能量均不是单一能量，TVL_γ 和 TVL_n 参见附录 C。因本项目中子屏蔽层为 150mm 含硼（5%）聚乙烯板，根据 GBZ/T 201.2 中附录 C 知，

对于入口处平均能量为0.1MeV的中子，含硼（5%）聚乙烯板TVL_n为45mm；对于入口处中子俘获γ射线，GBZ/T 201.2中附录C认为平均能量为3.6MeV，铅的TVL_γ取值31mm。

防护门外的辐射剂量率计算结果见表11-10。

表11-10 1#医用直线加速器机房防护门外的辐射剂量率核算值

工作场所	$\dot{H}_\gamma$（μSv/h）	X_γ（mm）	$\dot{H}_n$（μSv/h）	X_n（mm）	$\dot{H}$（μSv/h）	$\dot{H}_c$（μSv/h）	评价
1#医用直线加速器机房	1.43	20	93.5	150	0.367	3.2	满足

·X射线能量为6MV时，机房的迷路散射辐射

根据GBZ/T201.2-2011，g点处受到迷道内散射辐射（$o_1 \rightarrow o \rightarrow i \rightarrow g$）的辐射剂量。

①射线路径（射线类型）：$o_1 \rightarrow o \rightarrow i \rightarrow g$（散射射线）。

②散射辐射计算模式及参数选择

根据GBZ/T 201.2-2011，入口g点处的散射辐射剂量率$\dot{H}_g$按公式11-10计算。

$$\dot{H}_g = \frac{\alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_1^2} \cdot \frac{\alpha_2 \cdot A}{R_2^2} \dot{H}_0 \qquad \text{公式 11-10}$$

式中：$\dot{H}_g$—g处的散射辐射剂量率，μSv/h；

α_{ph}—患者400cm²面积上的散射因子，见附录B表B.2，通常取45°散射角的值；

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积，cm²；

α_2—砼墙入射的患者散射辐射（能量见附录B表B.6）的散射因子，通常取i处的入射角为45°，散射角为0°；α_2值见附录B表B.6，通常使用其0.5MeV栏内的值；

A—i处的散射面积，m²；

R_1—“$o \rightarrow i$”之间的距离，m；

R_2—“$i \rightarrow g$”之间的距离，m；

$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距靶1m处的最高剂量率，μSv·m²/h。

表 11-11 迷路入口处的散射辐射剂量率核算值

参数	迷路入口处（g 点）
α_{ph}	1.39×10^{-3}
F（cm^2）	1600
α_2	22×10^{-3}
R_1（m）	7.066
R_2（m）	9.544
A（m^2）	12.48
$\dot{H}_0$（μSv·m^2/h）	8.40E+08
$\dot{H}_g$（μSv/h）	289.18

③预测计算结果

在给定防护门的铅屏蔽厚度 X（cm）时，防护门外 g 点处的辐射剂量率 $\dot{H}$（μSv/h）按公式 11-11 计算，预测结果见表 11-12。

$$\dot{H}=\dot{H}_g\cdot10^{-(X/TVL)}+\dot{H}_{og} \qquad \text{公式 11-11}$$

式中：$\dot{H}_{og}$—g 处的泄漏辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_g$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

TVL—辐射在铅中的什值层，cm。

表 11-12 迷路入口防护门外的辐射剂量率核算值

参数	机房入口防护门外（g 点）
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	0.069
$\dot{H}_g$（μSv/h）	289.18
X（cm）	2.0（铅）
TVL（cm）	0.5（铅）
防护门外的辐射剂量率 $\dot{H}$（μSv/h）	0.098
剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）	3.2
评价	满足

4、预测计算结果汇总及评价

综上所述，1#、2#医用直线加速器机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇

总见表 11-13。

表 11-13 1#、2#医用直线加速器机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇总

参考点		剂量率估算值（μSv/h）		剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
		X 射线能量为 15MV	X 射线能量为 6MV		
东/西侧主屏蔽	*a* 点	0.298	0.013	10	满足
	b 点	0.298	0.013	10	满足
顶部主屏蔽	*l* 点	0.216	0.009	10	满足
东/西侧次屏蔽	c_1 点	0.016	0.002	2.5	满足
	c_2 点			0.4	满足
	d_1、d_2 点	0.019	0.003	10	满足
顶部次屏蔽	m_1、m_2 点	0.017	0.003	6.4	满足
北墙（*e* 点）		0.181	0.109	/	/
南侧迷路墙外（*f* 点）		1.46E-04	3.69E-05	2.5	满足
南侧迷路外墙（*k* 点）		0.060	0.036	6.4	满足
迷路入口防护门（*g* 点）		0.367	0.098	3.2	满足

由表 11-1 和表 11-13 可知，本项目 1#、2#医用直线加速器机房主屏蔽区宽度及屏蔽防护设计能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求。

5、保护目标有效剂量评价

考察点人员的年有效剂量由《辐射防护导论》给出的公式进行估算：

$$D_{Eff} = H \cdot t \cdot T \cdot U \qquad \text{公式 11-12}$$

式中：D_{Eff}—考察点人员有效剂量，Sv；

H—考察点的辐射剂量率，Sv/h；

t—考察点处年受照时间，h；

T—居留因子；

U—使用因子。

将表 11-13 中 1#、2#医用直线加速器机房外各典型参考点处的辐射剂量率估算值代入公式 11-12。本项目每台医用直线加速器年出束运行时间约 625h（日接诊量最大

50人次，周工作5天，每年工作50周，患者治疗照射时间平均按3min计，故年出束运行时间为625h），考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，根据公式11-12估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，计算结果列于表11-14。

表11-14 1#、2#医用直线加速器机房周围人员年有效剂量

参考点		参考点所在场所	居留因子T[1)]	使用因子U	剂量率估算值[2)]（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
1#、2#医用直线加速器机房	主屏蔽（*a*点）	后装机房	1/2	1/4	0.298	0.02	5	满足
		楼梯间	1/16	1/4		＜0.01	0.1	满足
	主屏蔽（*b*点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1/4	0.298	0.02	5	满足
	屋顶主屏蔽（*l*点）	院内道路/非机动车停放区	1/16	1/4	0.216	＜0.01	0.1	满足
	次屏蔽（c_1、c_2点）	后装机房/后装机房控制室	1	1	0.016	0.01	5	满足
		楼梯间/等候休息区	1	1		0.01	0.1	满足
	次屏蔽（d_1、d_2点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1	0.019	0.01	5	满足
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2点）	院内道路/机械停车位	1/16	1	0.017	＜0.01	0.1	满足
	北墙（*e*点）	土层	/	1	0.181	/	/	/
	南侧迷路墙外（*f*点）	控制室	1	1	1.46E-04	＜0.01	5	满足
	南侧迷路外墙（*k*点）	水冷机房	1/16	1	0.06	＜0.01	0.1	满足
迷路入口防护门（*g*点）			1/8	1	0.367	0.03	0.1	满足

注：1、居留因子取值见HJ 1198-2021附录A；
2、剂量率估算值取15MV和6MV两种工况下的较大值。

医用直线加速器运行过程中靶中产生的高能光子可以与靶、准直器和限束系统中的金属材料的原子核发生各种核反应产生感生放射性，感生放射性水平取决于加速器电子的能量、束流强度、靶物质及运行时间等多种因素。感生放射性核素的活度和半衰期的范围都很宽，但大多数放射性核素的半衰期比较短，停机5-10min就可减弱到初始值的一半，因此放射性有效的防护措施之一就是等其自然衰变。

医用直线加速器运行期间，由于机房有足够的屏蔽，由部件产生的感生放射性不会对机房外的环境产生辐射污染。但每次治疗结束后，辐射工作人员需进入治疗室引导治疗后患者离开并对下一位患者进行摆位。往往由于放射治疗患者较多，辐射工作人员一般在医用直线加速器停机后 2min 左右就进入治疗室内，此时大部分感生放射性核素未能充分衰变。本项目使用 15MV 能量进行出束治疗的日就诊人数每台设备保守取 10 人/天，平均每位患者摆位时间为 30s，一年 250 个工作日，保守采用《医用电子直线加速器质量控制检测规范》（WS 674-2020）标准规定限值最大值（距离外壳表面 1m 处≤20μSv/h）进行估算，辐射工作人员在摆位时受到的年有效剂量为 0.42mSv。

根据表 11-14 结果分析知，该项目医用直线加速器投入运行后，机房外辐射工作人员的年有效剂量最大为 0.02mSv，叠加摆位时受到的辐射影响，本项目辐射工作人员的年有效剂量最高为 0.44mSv；周围公众的年有效剂量最大为 0.03mSv（已考虑南侧水冷机房处公众可能受到 2 台医用直线加速器同时出束时造成的叠加辐射影响），均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

6、电子线治疗时辐射防护评价

医用直线加速器处于电子束模式下使用初始电子线进行浅层治疗时，会产生电子线。本项目医用直线加速器最大 X 射线能量为 15MV，电子线最大能量为 20MeV，由于电子束的穿透能力远小于 X 射线，对治疗 X 射线的屏蔽机房完全满足屏蔽电子束的要求。电子束治疗时，平均束流为 nA 量级，X 射线治疗时平均束流为μA 量级，治疗电子束所产生的韧致辐射远小于 X 射线治疗时的辐射，即使电子线能量大于 X 射线最大能量，对屏蔽电子束的韧致辐射所需要的厚度也低于对于 MV 级 X 射线的屏蔽要求。

• 医用直线加速器项目（X 射线能量为 6、10MV）

根据建设单位提供的资料，医院拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建 4 座医用直线加速器机房（由西向东依次为 3#~6#医用直线加速器机房），于 3#医用直线加速器机房内由北院加速器楼一 1 号加速器机房搬迁 1 台医科达 SYNERGY 型医用直线加速器，主要参数为：X 射线能量：6、10MV；电子线能量：4、6、9、12、15、18MeV；

射线最大出射角：28°；1m 处最大输出剂量率：10MV 时最高剂量率为 600cGy /min，6MV 时最高剂量率为 1400cGy /min（3F 束流模式）；于 4#~6#医用直线加速器机房内各配备 1 台医用直线加速器，型号未定，主要参数为：X 射线能量：6、10MV；电子线能量：≤20MeV；射线最大出射角：28°；1m 处最大输出剂量率：10MV 时最高剂量率为 600cGy /min，6MV 时最高剂量率为 1400cGy /min（3F 束流模式），故本项目以 X 射线能量为 10MV、6MV 的情况下，分别进行辐射影响分析。

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/T 201.2-2011）的要求，在本项目 3#~6#医用直线加速器机房外设定关注点。从保守角度出发，在 3#~6#医用直线加速器机房设计的尺寸厚度基础上，假定医用直线加速器最大功率运行并针对关注点最不利的情况进行预测计算。

本项目 3#和 6#、4#和 5#医用直线加速器机房呈东西向镜像分布，4 座医用直线加速器机房屏蔽防护设计一致，3#和 6#医用直线加速器机房较 4#和 5#医用直线加速器机房内部尺寸略大，故本次计算仅对 4#医用直线加速器机房进行防护分析。

本项目 4#医用直线加速器机房的关注点设定如图 11-2。

1、有用线束主屏蔽区的宽度核算

使用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）中的相关公式计算有用线束主屏蔽区的宽度：

$$Y_p = 2\left[\left(a + SAD\right)\cdot \tan\theta + 0.3\right] \qquad \text{公式 11-1}$$

将各参数代入公式 11-1，可估算出本项目的主屏蔽宽度核算结果并评价如表 11-15：

表 11-15 4#医用直线加速器机房主屏蔽区的宽度设计评价表

参数	东墙主屏蔽	西墙主屏蔽	屋顶主屏蔽
SAD（m）	1	1	1
θ（°）	14	14	14
a（m）	7.00	7.00	5.65
Y_p 计算值（m）	4.59	4.59	3.92
Y_p 设计值（m）	4.60	4.60	4.60
评价结果	满足	满足	满足

由表 11-15 的理论估算结果可知，3#~6#医用直线加速器机房东墙、西墙及屋顶主屏蔽区域屏蔽宽度均能够满足医用直线加速器的有用射线束的防护宽度要求。

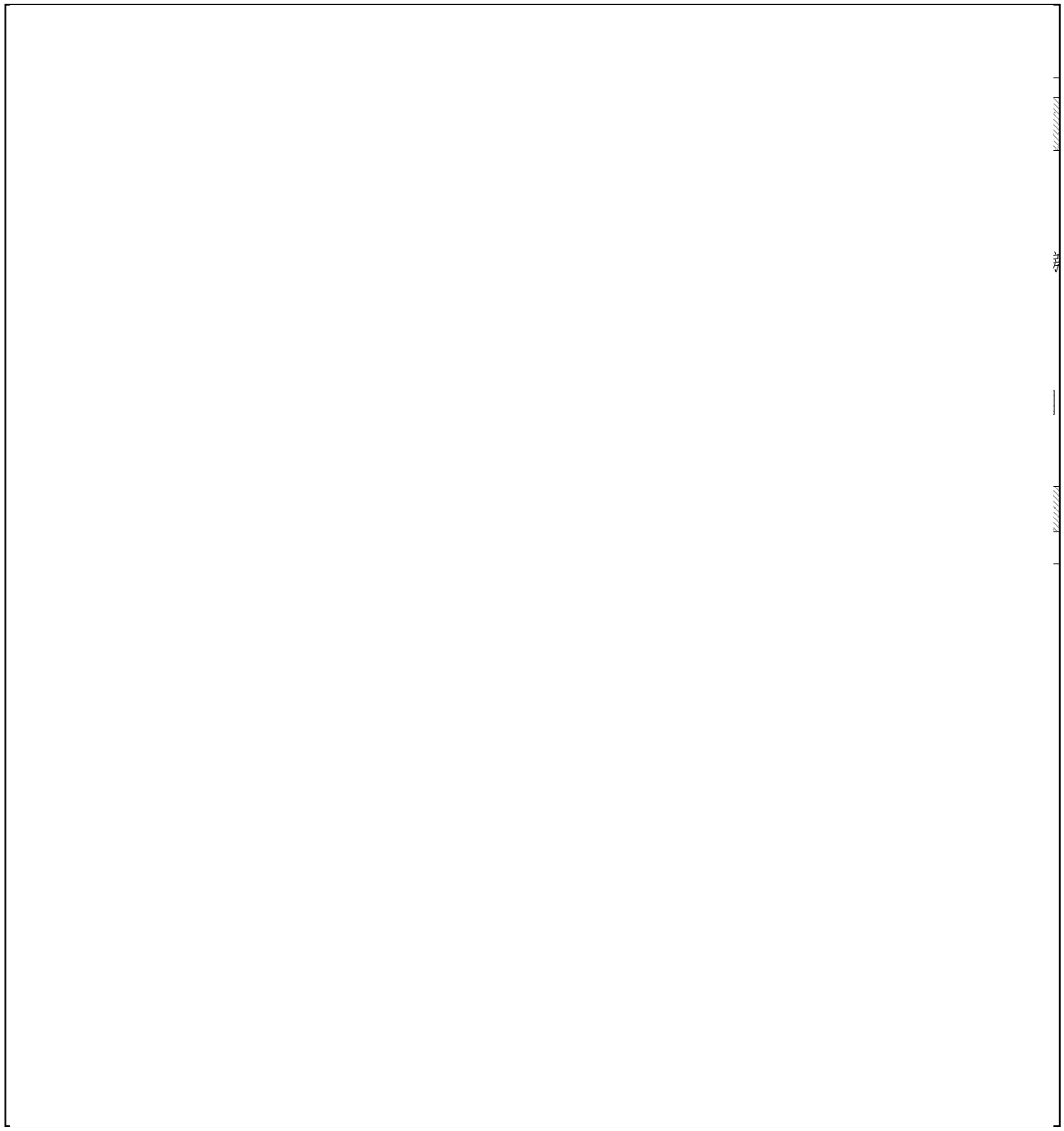

图 11-2 4#医用直线加速器机房估算点位示意图

2、辐射防护效果预测

（1）有用线束主屏蔽设计核算（东墙 *a* 点、西墙 *b* 点和屋顶 *l* 点）

①主射线路径：东墙 $o_2 \rightarrow a$，西墙 $o_1 \rightarrow b$，屋顶 $o_3 \rightarrow l$。

②计算模式及参数选择

使用《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）的相关公式进行有用线束主屏蔽设计核算，在给定的屏蔽物质

厚度 X（cm）时，首先按照公式 11-2 计算有效厚度 X_e（cm），按照公式 11-3 估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B，再按照公式 11-4 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）。

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta \qquad \text{公式 11-2}$$

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \qquad \text{公式 11-3}$$

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \qquad \text{公式 11-4}$$

③预测计算结果

将相应主屏蔽厚度得出的辐射屏蔽透射因子 B 值代入，得到相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h），将其与本项目确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表 11-16。

表 11-16（a） 4#医用直线加速器机房主屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（10MV）

参数	东墙主屏蔽（a 点）	西墙主屏蔽（b 点）	屋顶主屏蔽（l 点）
X（cm）	60 砼+180 砼+60 砼	60 砼+180 砼+60 砼	120 砼+180 砼
X_e（cm）	300 砼	300 砼	300 砼
TVL_1（cm）	41		
TVL（cm）	37		
B	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
R（m）	8.300	8.300	9.750
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08		
f	1		
$\dot{H}$（μSv/h）	0.052	0.052	0.038
$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）	10	10	10
评价	满足	满足	满足

表 11-16（b） 4#医用直线加速器机房主屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（6MV）

参数	东墙主屏蔽（a 点）	西墙主屏蔽（b 点）	屋顶主屏蔽（l 点）
X（cm）	60 砼+180 砼+60 砼	60 砼+180 砼+60 砼	120 砼+180 砼
X_e（cm）	300 砼	300 砼	300 砼

TVL_1（cm）	37		
TVL（cm）	33		
B	1.07E-09	1.07E-09	1.07E-09
R（m）	8.300	8.300	9.750
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	8.40E+08		
f	1		
$\dot{H}$（μSv/h）	0.013	0.013	0.009
$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）	10	10	10
评价	满足	满足	满足

（2）与主屏蔽区相连的次屏蔽区屏蔽设计核算（东墙 c_1 点、c_2 点、西墙 d_1 点、d_2 点及屋顶 m_1 点、m_2 点）

①射线路径（射线类型）：$o_2 \rightarrow o \rightarrow c_1$（散射射线），$o_2 \rightarrow o \rightarrow c_2$（散射射线），$o_1 \rightarrow o \rightarrow d_1$（散射射线），$o_1 \rightarrow o \rightarrow d_2$（散射射线），$o_3 \rightarrow o \rightarrow m_1$（散射射线），$o_3 \rightarrow o \rightarrow m_2$（散射射线）。

$o \rightarrow c_1$（泄漏射线），$o \rightarrow c_2$（泄漏射线），$o \rightarrow d_1$（泄漏射线），$o \rightarrow d_2$（泄漏射线），$o \rightarrow m_1$（泄漏射线），$o \rightarrow m_2$（泄漏射线）。

对于位置 c_1 点、c_2 点、d_1 点、d_2 点和 m_1 点、m_2 点，考虑泄漏辐射和散射辐射的复合作用。

②泄漏辐射计算模式及参数选择

泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。

③散射辐射计算模式及参数选择

在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先用公式 11-2 计算或直接在结构图中量出该屏蔽墙的有效厚度 X_e（cm），按照公式 11-3 估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B_s，再按照公式 11-5 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）；

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^{\,2}} \cdot B \qquad \text{公式 11-5}$$

④预测计算结果

叠加次屏蔽墙外泄漏辐射与患者一次散射辐射的瞬时剂量率值，将其与本项目确

定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表 11-17，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 11-17（a） 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（10MV）

参数		东墙次屏蔽		西墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）
		（c_1 点）	（c_2 点）		
X（cm）		180 砼		180 砼	180 砼
X_e（cm）		207.6 砼		207.6 砼	202.6 砼
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		3.60E+08			
泄漏辐射	TVL_1（cm）	35			
	TVL（cm）	31			
	B	2.71E-07		2.71E-07	3.92E-07
	R（m）	7.729		7.729	9.850
	f	0.001			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.002		0.002	0.001
散射辐射	TVL_1（cm）	28			
	TVL（cm）	28			
	R_s（m）	7.729		7.729	9.850
	α_{ph}	3.18E-03			
	B	3.85E-08		3.85E-08	5.81E-08
	F（cm²）	1600			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.003		0.003	0.003
$\dot{H}$（μSv/h）泄漏辐射和散射辐射的复合作用		0.005		0.005	0.004
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平		10	0.4	10	6.4
评价		满足	满足	满足	满足

表 11-17（b） 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值（6MV）

参数	东墙次屏蔽		西墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）
	（c_1 点）	（c_2 点）		
X（cm）	180 砼		180 砼	180 砼

X_e（cm）		207.6 砼		207.6 砼	202.6 砼
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		8.40E+08			
泄漏辐射	TVL_1（cm）	34			
	TVL（cm）	29			
	B	1.03E-07		1.03E-07	1.54E-07
	R（m）	7.729		7.729	9.850
	f	0.001			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.001		0.001	0.001
散射辐射	TVL_1（cm）	26			
	TVL（cm）	26			
	R_s（m）	7.729		7.729	9.850
	α_{ph}	2.77E-03			
	B	1.04E-08		1.04E-08	1.61E-08
	F（cm²）	1600			
	$\dot{H}$（μSv/h）	0.002		0.002	0.002
$\dot{H}$（μSv/h） 泄漏辐射和散射辐射的复合作用		0.003		0.003	0.003
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平		10	0.4	10	6.4
评价		满足	满足	满足	满足

（3）侧屏蔽墙屏蔽设计核算（北墙 *e* 点、迷路墙外 *f* 点）

①射线路径（射线类型）： *o*→*e*（泄漏射线），*o*→*f*（泄漏射线）。

②计算模式及参数选择

该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。

③预测计算结果

e 点、*f* 点的辐射剂量率预测结果见下表 11-18，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 11-18（a） 4#医用直线加速器机房迷路墙外泄漏辐射剂量率核算值（10MV）

参数	北墙（*e* 点）	南侧迷路墙外（*f* 点）
X（cm）	177 砼	150 砼（迷路内墙）+100 砼（迷路外墙）

X_e（cm）	177 砼	250 砼
TVL_1（cm）	35	
TVL（cm）	31	
B	2.63E-06	1.16E-08
R（m）	6.070	9.000
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08	
f	0.001	
$\dot{H}$（μSv/h）	0.026	5.16E-05
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平	/	2.5
评价	/	满足

表 11-18（b） 4#医用直线加速器机房迷路墙外泄漏辐射剂量率核算值（6MV）

参数	北墙（e 点）	南侧迷路墙外（f 点）
X（cm）	177 砼	150 砼（迷路内墙）+100 砼（迷路外墙）
X_e（cm）	177 砼	250 砼
TVL_1（cm）	34	
TVL（cm）	29	
B	1.17E-06	3.56E-09
R（m）	6.070	9.000
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	8.40E+08	
f	0.001	
$\dot{H}$（μSv/h）	0.027	3.69E-05
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平	/	2.5
评价	/	满足

（4）迷路外墙屏蔽设计核算（迷路外墙 *k* 点）

①射线路径（射线类型）：$o_2 \rightarrow k$（泄漏射线）。

②计算模式及参数选择

本项目有用线束不向迷路内墙照射，该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。

③预测计算结果

k 点的辐射剂量率预测结果见下表 11-19，o_2 至 k 的泄漏辐射的斜射角较小，通常以 0°垂直入射保守估算，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 11-19 迷路外墙泄漏辐射剂量率核算值

参数	南侧迷路外墙（k 点）	
	10MV	6MV
X（cm）	150 砼	
X_e（cm）	161.6 砼	
TVL_1（cm）	35	34
TVL（cm）	31	29
B	8.24E-06	3.98E-06
R（m）	9.693	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08	8.40E+08
f	0.001	
$\dot{H}$（μSv/h）	0.032	0.036
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平	6.4	
评价	满足	

（5）迷路内墙屏蔽设计核算（*g* 点）

根据 GBZ/T201.2-2011，g 点处同时受到迷道内散射辐射（$o_1 \rightarrow o \rightarrow i \rightarrow g$）及加速器的泄漏辐射 o_1 经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 g 点的辐射剂量。

①射线路径（射线类型）：$o_1 \rightarrow g$（泄漏射线），$o_1 \rightarrow o \rightarrow i \rightarrow g$（散射射线）。

②泄漏辐射计算模式及参数选择

g 点泄漏辐射剂量核算方法同 f 点。

其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读出，g 点的辐射剂量率预测结果见表 11-20。

表 11-20 4#医用直线加速器机房迷路入口处的泄漏辐射剂量率核算值

参数	迷路入口处（g 点）	
	10MV	6MV
X（cm）	150 砼	

X_e（cm）	156.9 砼	
TVL_1（cm）	35	34
TVL（cm）	31	29
B	1.17E-05	5.78E-06
R（m）	8.367	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08	8.40E+08
f	0.001	
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	0.060	0.069
$\dot{H}_c$（μSv/h）* 剂量率参考控制水平	0.5	
评价	满足	

注：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/T 201.2-2011）中 4.3.2.5.1b），“核算加速器的泄漏辐射（以偏离 o 的位置 o_1 为中心）经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 g 的辐射剂量。……核算结果应为 g 处的参考控制水平的一个分数（应小于 1/4）”，故本项目取 0.5μSv/h。

③散射辐射计算模式及参数选择

根据 GBZ/T 201.2-2011，入口 g 点处的散射辐射剂量率 $\dot{H}_g$ 按公式 11-10 计算。

$$\dot{H}_g = \frac{\alpha_{ph}\cdot(F/400)}{R_1^2}\cdot\frac{\alpha_2\cdot A}{R_2^2}\dot{H}_0 \qquad \text{公式 11-10}$$

表 11-21 迷路入口处的散射辐射剂量率核算值

参数	迷路入口处（g 点）	
	10MV	6MV
α_{ph}	1.35×10^{-3}	1.39×10^{-3}
F（cm²）	1600	
α_2	22×10^{-3}	
R_1（m）	7.068	
R_2（m）	9.544	
A（m²）	12.80	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.60E+08	8.40E+08
$\dot{H}_g$（μSv/h）	120.30	289.02

③预测计算结果

在给定防护门的铅屏蔽厚度X（cm）时，防护门外g点处的辐射剂量率$\dot{H}$（μSv/h）按公式11-11计算，预测结果见表11-22。

$$\dot{H}=\dot{H}_g\cdot 10^{-(X/TVL)}+\dot{H}_{og} \qquad \text{公式 11-11}$$

表11-22 迷路入口防护门外的辐射剂量率核算值

参数	机房入口防护门外（g点）	
	10MV	6MV
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	0.060	0.069
$\dot{H}_g$（μSv/h）	120.30	289.02
X（cm）	2.0（铅）	
TVL（cm）	0.5（铅）	
防护门外的辐射剂量率$\dot{H}$（μSv/h）	0.072	0.098
剂量率参考控制水平$\dot{H}_c$（μSv/h）	3.2	
评价	满足	

4、预测计算结果汇总及评价

综上所述，3#~6#医用直线加速器机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇总见表11-23。

表11-23 3#~6#医用直线加速器机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇总

参考点		剂量率估算值（μSv/h）		剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
		X射线能量为10MV	X射线能量为6MV		
东/西侧主屏蔽	a点	0.052	0.013	10	满足
	b点	0.052	0.013	10	满足
顶部主屏蔽	l点	0.038	0.009	10	满足
东/西侧次屏蔽	c_1点	0.005	0.003	10	满足
	c_2点			0.4	满足
	d_1、d_2点	0.005	0.003	10	满足
顶部次屏蔽	m_1、m_2点	0.004	0.003	6.4	满足

北墙（*e* 点）	0.026	0.027	/	/
南侧迷路墙外（*f* 点）	5.16E-05	3.69E-05	2.5	满足
南侧迷路外墙（*k* 点）	0.032	0.036	6.4	满足
迷路入口防护门（*g* 点）	0.072	0.098	3.2	满足

由表 11-15 和表 11-23 可知，本项目 3#~6#医用直线加速器机房主屏蔽区宽度及屏蔽防护设计能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求。

5、保护目标有效剂量评价

考察点人员的年有效剂量由《辐射防护导论》给出的公式进行估算：

$$D_{Eff} = H \cdot t \cdot T \cdot U \qquad \text{公式 11-12}$$

将表 11-23 中 3#~6#医用直线加速器机房外各典型参考点处的辐射剂量率估算值代入公式 11-12。本项目每台医用直线加速器年出束运行时间约 625h（日接诊量最大 50 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，患者治疗照射时间平均按 3min 计，故年出束运行时间为 625h），考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，根据公式 11-12 估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，计算结果列于表 11-24。

表 11-24 3#~6#医用直线加速器机房周围人员年有效剂量

参考点		参考点所在场所	居留因子 T[1)]	使用因子 U	剂量率估算值[2)]（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
3#~6#医用直线加速器机房	主屏蔽（*a* 点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1/4	0.052	＜0.01	5	满足
		下沉庭院/消防器具间	1/16	1/4		＜0.01	0.1	满足
	主屏蔽（*b* 点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1/4	0.052	＜0.01	5	满足
	屋顶主屏蔽（*l* 点）	院内道路/机械停车位	1/16	1/4	0.038	＜0.01	0.1	满足
	次屏蔽（c_1、c_2 点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1	0.005	＜0.01	5	满足
		等候休息区/下沉庭院/消防器具间	1	1		＜0.01	0.1	满足
	次屏蔽（d_1、d_2 点）	相邻医用直线加速器机房	1/2	1	0.005	＜0.01	5	满足

	屋顶次屏蔽（m_1、m_2点）	院内道路/机械停车位	1/16	1	0.004	＜0.01	0.1	满足
	北墙（e点）	土层	/	1	/	/	/	/
	南侧迷路墙外（f点）	控制室	1	1	5.16E-05	＜0.01	5	满足
	南侧迷路外墙（k点）	水冷机房	1/16	1	0.036	＜0.01	0.1	满足
迷路入口防护门（g点）			1/8	1	0.098	0.01	0.1	满足

注：1、居留因子取值见HJ 1198-2021附录A；
2、剂量率估算值取10MV和6MV两种工况下的较大值。

根据表11-24结果分析知，该项目医用直线加速器投入运行后，机房外辐射工作人员的年有效剂量最大＜0.01mSv，周围公众的年有效剂量最大为0.01mSv（考虑到南侧准备区处公众可能受到2台医用直线加速器同时出束时造成的叠加辐射影响），均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过5mSv，公众年有效剂量不超过0.1mSv）。

6、电子线治疗时辐射防护评价

医用直线加速器处于电子束模式下使用初始电子线进行浅层治疗时，会产生电子线。本项目医用直线加速器最大X射线能量为10MV，电子线最大能量为20MeV，由于电子束的穿透能力远小于X射线，对治疗X射线的屏蔽机房完全满足屏蔽电子束的要求。电子束治疗时，平均束流为nA量级，X射线治疗时平均束流为μA量级，治疗电子束所产生的韧致辐射远小于X射线治疗时的辐射，即使电子线能量大于X射线最大能量，对屏蔽电子束的韧致辐射所需要的厚度也低于对于MV级X射线的屏蔽要求。

·后装治疗机项目

1、辐射防护效果预测

根据建设单位提供的资料，医院拟于北院医疗综合楼负二层放疗中心新建1座后装机房，由北院放射楼后装机房搬迁1台KL-HDR-C型后装治疗机，内含1枚^{192}Ir放射源，最大装源活度为3.70×10^{11}Bq，用于腔内、组织间等肿瘤的放射治疗。

本项目后装机治疗时，假设放射源全部被输送至施源器，则辐射环境影响预测时保守将其视为点源来预测计算机房治疗室屏蔽防护能力。辐射屏蔽防护及估算点位示

意图见图 11-3（预测点位取墙体或者防护门外 30cm 处）。

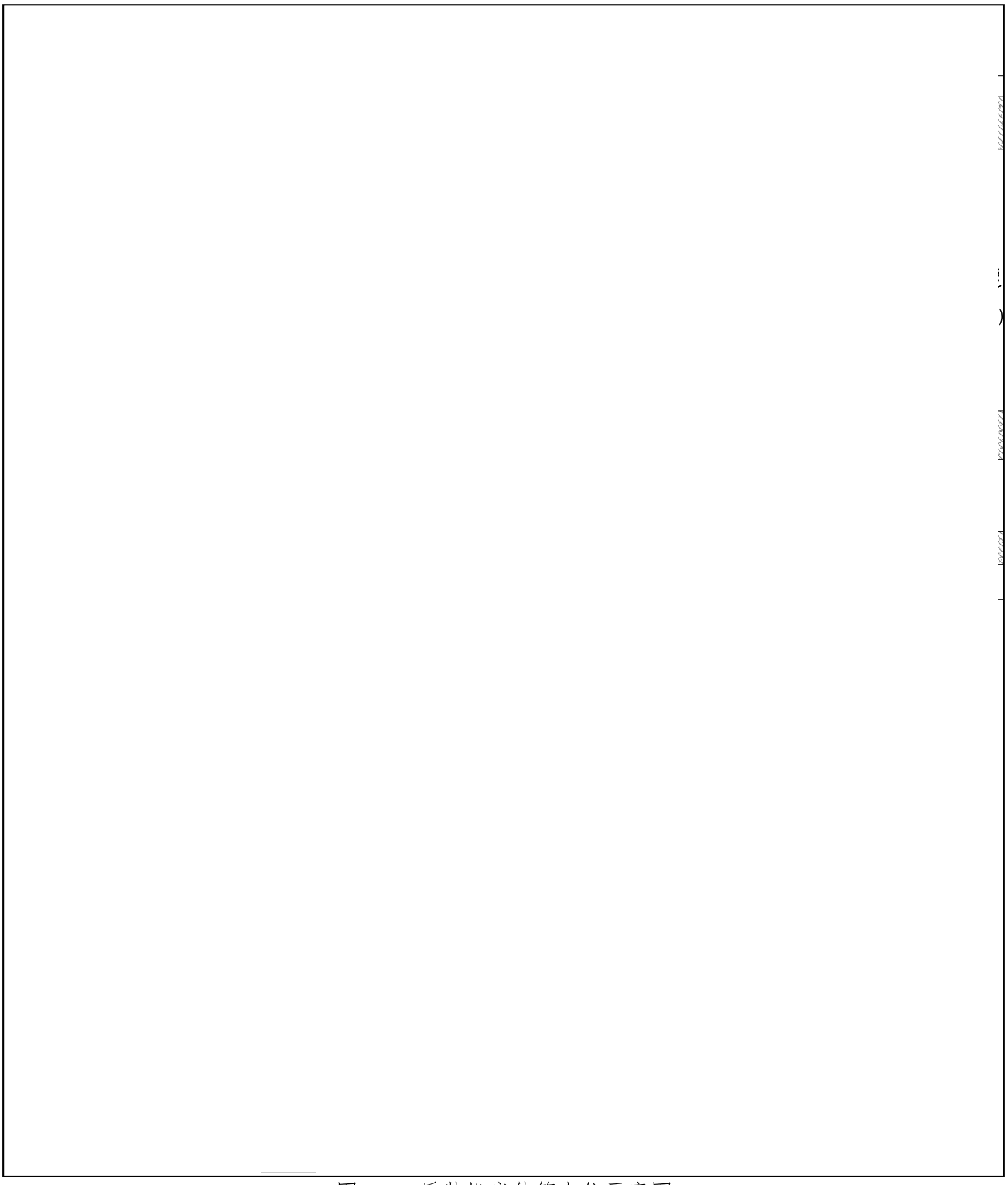

图 11-3 后装机房估算点位示意图

（1）后装机房墙体及顶部辐射防护设计核算

在给定的屏蔽物质厚度X(mm)时，相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率$\dot{H}$(μSv/h)依据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）中的公式进行预测计算：

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B$$ 公式 11-4

式中：$\dot{H}_0$—活度为 A 的放射源在距其 1m 处的剂量率，μSv/h；

f—对有用线束为 1；

R—辐射源至关注点的距离，m；

B—辐射屏蔽透射因子。

$$\dot{H}_0 = A \cdot K_\gamma$$ 公式 11-13

式中：A—放射源的活度，MBq；

K_γ—放射源的空气比释动能率常数，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_γ的单位记为μSv/（h·MBq），查自（GBZ/T 201.3-2014）附录 C；

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL}$$ 公式 11-3

式中：X_e—有效屏蔽厚度，mm；

TVL_1—辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度，mm；

TVL—辐射在屏蔽物质中的平衡什值层厚度，mm。

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta$$ 公式 11-2

式中：X—屏蔽物厚度，mm；

θ—斜射角，即入射角与物质平面的法线的夹角。

表 11-25 后装机房辐射屏蔽防护效果预测结果

参数	东墙（a 点）	南墙（b 点）	西墙（c 点）	北墙（d 点）	顶部（l 点）	防护门*（g 点）
屏蔽厚度 X（mm）	1800 砼	800 砼				800 砼+10 铅
等效厚度 X_e（mm）	1800 砼	800 砼	926 砼	800 砼	800 砼	1007 砼+10 铅
TVL_1（mm）	砼：152；铅：16					
TVL（mm）	砼：152；铅：16					
B	1.44E-12	5.46E-06	8.09E-07	5.46E-06	5.46E-06	5.62E-08
A（MBq）	3.70E+05					
K_r（μSv/h·MBq）	0.111					

R（m）	3.100	2.100	5.325	3.600	9.000	3.460
f	1					
$\dot{H}_0$（μSv/h）	4.11E+04					
$\dot{H}$（μSv/h）	6.15E-09	0.051	0.001	0.017	0.003	1.93E-04
控制剂量率（μSv/h）	10	10	/	/	8	4
是否满足	满足	满足	/	/	满足	满足

注：*此处为直接透过迷路内墙和防护门的剂量估算。

（2）后装机房迷路防护门辐射防护设计核算

本项目后装机房入口设有“L”型迷路，迷路口用10mmPb防护当量的防护门屏蔽散射至迷路入口处的散射线。

入口 g 处的散射辐射剂量采用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第3部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）中公式计算：

$$H_s=\frac{A\cdot K_\gamma\cdot S_w\cdot \alpha_w}{R_1^2\cdot R_2^2} \qquad \text{公式 11-14}$$

式中：A—放射源的活度，MBq；本项目 ^{192}Ir 放射源活度 A 为 3.70×10^5MBq；

K_γ—放射源的空气比释动能率常数，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_γ的单位记为μSv/（h·MBq），查自（GBZ/T 201.3-2014）附录C；

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，m^2；

a_w—散射体的散射因子，本项目取 3.39×10^{-2}；（取值参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第3部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）表 C.4。

R_1—辐射源至散射体中心点的距离，m；

R_2—散射体中心点至计算点的距离，m。

表11-26 后装机房入口 g 点处辐射剂量率计算结果

参数	取值
A 放射源活度（MBq）	3.70E+05
K_γ空气比释动能率常数（μSv/（h·MBq））	0.111

S_w（m^2）	11.52
a_w（散射体的散射因子）	3.39E-02
R_1（m）	3.412
R_2（m）	6.115
$\dot{H}$ 预测值（μSv/h）	36.86

根据公式 11-14 计算得机房入口前的散射辐射剂量率为 36.86μSv/h，后装机房迷路设有铅当量为 10mm 的防护门，保守取 ^{192}Ir 产生的γ射线经过散射后至迷路入口 *g* 处的能量约为 0.2MeV，铅中的 *TVL* 值为 5.0mm，因此，经过机房入口防护门的屏蔽，*g* 点处的辐射剂量率为 0.369μSv/h。叠加直接透过迷路内墙和防护门的剂量（1.93E-04μSv/h），合计 *g* 点处的辐射剂量率为 0.369μSv/h。

2、预测计算结果汇总及评价

综上所述，后装机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇总见表 11-27。

表 11-27 后装机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇总

参数 \ 关注点	东墙（*a* 点）	南墙（*b* 点）	西墙（*c* 点）	北墙（*d* 点）	顶部（*l* 点）	防护门（*g* 点）
H（μSv/h）	6.15E-09	0.051	0.001	0.017	0.003	0.369
剂量率参考控制水平（μSv/h）	10	10	/	/	8	4
结论	满足	满足	/	/	满足	满足

根据表 11-27 结果分析知，该后装治疗机投入运行后，后装机房外辐射剂量率均小于各关注点的剂量率参考控制水平，满足《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）的要求。

3、保护目标有效剂量评价

后装治疗机周治疗时间约为 10h，年运行时间约 500h，根据各考察点处年受照时间，并考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，则后装机房外辐射剂量预测结果见表 11-28。

表 11-28 后装机房外辐射剂量预测结果

参考点	参考点所在场所	居留因子*	使用因子	辐射剂量率（μSv/h）	年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
东墙（*a* 点）	1#医用直线加速器机房	1/2	1	6.15E-09	＜0.01	5	满足
南墙（*b* 点）	控制室	1	1	0.051	0.03	5	满足
西墙（*c* 点）	土层	/	1	0.001	/	/	/
北墙（*d* 点）	土层	/	1	0.017	/	/	/
屋顶（*l* 点）	院内道路/机械停车位	1/16	1	0.003	＜0.01	0.1	满足
迷路入口防护门（*g* 点）		1/8	1	0.369	0.02	0.1	满足

注：*居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A。

在进行放射治疗前，工作人员需进入机房对患者进行摆位，此时放射源处于贮存状态，工作人员进行摆位及取消摆位时距离设备约 1m，根据《后装γ源近距离治疗质量控制检测规范》（WS 262-2017）中的相关要求：距离贮源器表面 100cm 处的球面上，任何一点因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 5μSv/h，平均每位患者摆位及取消摆位分别为 1min，年门诊量最大 2000 人次，则辐射工作人员摆位过程中年最大有效剂量为 0.33mSv。根据表 11-28 理论计算结果，控制室辐射工作人员年剂量估算值为 0.03mSv，叠加后，后装治疗项目辐射工作人员年最大有效剂量为 0.36mSv；根据表 11-28 结果分析知，本项目后装治疗机运行后周围公众年有效剂量最大值为 0.02mSv，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

• 放疗机房门缝、通风系统及电缆沟辐射防护评价

本项目放疗机房防护门设计制作时，除要考虑足够的防护厚度外，拟考虑防护门与周围墙壁及地面的重叠搭接，以防止门缝处射线泄漏。本项目放疗机房门与墙之间的间隙小于 1cm，防护门与墙之间的搭接不小于 10cm，可有效防止门缝处射线泄漏。

本项目放疗机房进、排风管道穿墙处均采用“S”型设计，管道为方管，医用直线加速器机房进风管道内径为 400mm×200mm，排风管道内径为 500mm×250mm；后装机房进风管道内径为 320mm×160mm，排风管道内径为 400mm×250mm。管道均经

防护门上方由迷路到达机房内，管道穿迷路上方屏蔽到达机房内，管道系统均避开主射线方向，射线经几次散射后，通风管道出口处辐射剂量将在控制范围内。

电缆沟埋设在地下，电缆线布设采用地下“U”型穿墙管道，穿墙处埋地深度为450mm，未破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

电缆沟埋设在地下，电缆线布设采用地下“U”型穿墙管道，穿墙处埋地深度为0.4m，未破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

图 11-4 预留电缆管道示意图	图 11-5 预留穿墙风管示意图

根据表 11-13、表 11-23 和表 11-27 中机房外辐射剂量率估算结果可知，本项目放疗机房顶部剂量率最大值为 0.216μSv/h，其天空散射和侧散射辐射对治疗机房外的附近地面和楼层中公众的照射较小，能够满足防护要求。

• 模拟定位机项目

本项目 2 座模拟定位机房实体屏蔽防护设计与《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中 X 射线设备机房屏蔽防护要求对照分析见表 11-29。

表 11-29 模拟定位机房屏蔽防护设计一览表

工作场所	参数	设计厚度 [1)]	铅当量	屏蔽要求	评价
北院医疗综合楼负二层放疗中心 CT 模拟定位机房 [2)]	墙体	240mm 实心砖+2mm 铅当量钡水泥	4.14mm	CT 模拟定位机房有用线束方向、非有用线束方向铅当量均不小于 2.5mmPb。	满足
	防护门	3mm 铅当量铅板	3mm		满足
	观察窗	3mm 铅当量铅玻璃	3mm		满足
	顶面	200mm 混凝土+2mm 铅当量钡水泥	4.26mm		满足
	地面	800mm 混凝土	12.1mm		满足

	机房面积	32.7m²，单边最短长度 5.43m		CT 模拟定位机房内最小有效新建面积不小于 30m²，单边长度不小于 4.5m。	满足
北院医疗综合楼负二层放疗中心 X 线模拟定位机房 3)	墙体	240mm 实心砖+2mm 铅当量钡水泥	4.03mm	模拟定位机房有用线束方向、非有用线束方向铅当量均不小于 1.0mmPb。	满足
	防护门	3mm 铅当量铅板	3mm		满足
	观察窗	3mm 铅当量铅玻璃	3mm		满足
	顶面	200mm 混凝土+2mm 铅当量钡水泥	4.17mm		满足
	地面	800mm 混凝土	12.8mm		满足
	机房面积	32.7m²，单边最短长度 5.43m		单管头 X 射线设备机房内最小有效新建面积不小于 20m²，单边长度不小于 3.5m。	满足

注：1、实心砖密度为 1.65g/cm³，铅密度为 11.3g/cm³，混凝土密度为 2.35g/cm³，钡水泥密度为 3.2g/cm³；

2、混凝土在 140kV（CT）管电压X射线下的等效铅当量厚度参照GBZ 130-2020 附录C中提供的公式（C.1）~公式（C.2）及铅、混凝土对不同管电压X射线辐射衰减的有关的拟合参数求取；由于标准中未给出实心砖对不同管电压X射线辐射衰减的有关的拟合参数，本项目参考《辐射防护手册（第三分册）》表 3.3 中根据黄砖（密度为 1.6g/cm³）、砖（密度为 1.8g/cm³）在 100kV、150kV的X线束下的近似铅当量厚度使用插值法求取 140kVX射线下实心砖的等效铅当量；

3、混凝土在 150kV管电压X射线下的等效铅当量厚度参照GBZ 130-2020 附录C中提供的公式（C.1）~公式（C.2）及铅、混凝土对不同管电压X射线辐射衰减的有关的拟合参数求取；由于标准中未给出实心砖对不同管电压X射线辐射衰减的有关的拟合参数，本项目参考《辐射防护手册（第三分册）》表 3.3 中根据黄砖（密度为 1.6g/cm³）、砖（密度为 1.8g/cm³）在 150kV的X线束下的近似铅当量厚度使用插值法求取 150kVX射线下实心砖的等效铅当量。

由上表对照结果可知，本项目 CT 模拟定位机房、X 线模拟定位机房实体屏蔽防护满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的要求，机房实体屏蔽设计合理。

（二）DSA 项目

1、DSA 机房的屏蔽防护铅当量厚度与标准要求的相符性分析评价

（1）评价标准

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）表 3 规定，主束方向、非有用线束方向屏蔽体的铅当量均应不小于 2.0mmPb。

（2）本项目 DSA 机房各屏蔽部位的铅当量厚度核算

由表 10-3 可知，本项目 DSA 机房使用的屏蔽材料除铅以外，还涉及顶面（有用

线束投射方向）和地面（非有用线束投射方向）的混凝土；机房观察窗的铅玻璃。本项目按额定管电压 125kV 的极端条件核算 DSA 机房各屏蔽部位屏蔽材料的等效铅当量厚度。

按照 GBZ 130-2020 中 C.1.2 b）给出的计算公式进行计算：

$$X=\frac{1}{\alpha\gamma}In\left(\frac{B^{-\gamma}+\frac{\beta}{\alpha}}{1+\frac{\beta}{\alpha}}\right) \qquad \text{公式 11-15}$$

式中：X—不同屏蔽物质的铅当量厚度；

α、β、γ—相应屏蔽物质（本项目为混凝土）对相应管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

B—给定铅厚度的屏蔽透射因子；给定铅厚度的屏蔽透射因子 B 值对照 GBZ 130-2020 中 C.1.2 a）相应要求采用给出的计算公式进行计算：

$$B=\left[\left(1+\frac{\beta}{\alpha}\right)e^{\alpha\gamma X}-\frac{\beta}{\alpha}\right]^{-\frac{1}{\gamma}} \qquad \text{公式 11-16}$$

式中：B—给定铅厚度的屏蔽透射因子；

α、β、γ—铅对对相应管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

X—铅厚度。

由 GBZ 130-2020 中表 C.2 查取 125kV 管电压工况下 X 射线（主束）辐射衰减的有关的拟合参数，由 NCRP147 报告 TABLE A.1、TABLE C.1 查取 80kV 管电压工况下 X 射线（主束）辐射衰减的有关的拟合参数和 70kV 管电压工况下 X 射线（散射）辐射衰减的有关的拟合参数，列于表 11-30：

表 11-30 不同管电压工况下 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

管电压	屏蔽材料	α	β	γ
125kV（主束）	铅	2.219	7.923	0.5386
	混凝土	0.03502	0.07113	0.6974
80kV（主束）	铅	4.040	21.69	0.7187
70kV（散射）	铅	5.369	23.49	0.5883

本项目机房屏蔽部位涉及的 150mm 混凝土、200mm 混凝土，分别按公式 11-16、公式 11-15 计算其屏蔽透射因子 B、铅当量厚度 X，计算结果列于表 11-31。

表 11-31 混凝土屏蔽透射因子 B、铅当量厚度 X 计算结果

管电压	屏蔽材料	屏蔽透射因子 B	铅当量厚度 X（mm）
125kV（主束）	150mm 混凝土	1.09E-03	1.87
	200mm 混凝土	1.87E-04	2.63
80kV（主束）	150mm 混凝土	5.44E-05	1.79
	200mm 混凝土	5.30E-06	2.37

（3）DSA 机房的屏蔽防护铅当量厚度与标准要求的相符性

根据前述各屏蔽材料的等效铅当量厚度核算情况，可对本项目 DSA 机房屏蔽体等效铅当量进行汇总，结果见下表：

表 11-32 DSA 机房屏蔽体等效铅当量厚度核算及其与标准要求对比

工作场所	参数	设计厚度 [1)]		等效铅当量	屏蔽要求*	评价
				125kV		
北院医疗综合楼三层手术中心 OR1、2 手术室	墙体 [2)]	轻钢龙骨架+3mm 铅当量铅板		3mm	介入 X 射线设备机房屏蔽防护铅当量厚度要求：有用线束方向铅当量 2.0mm，非有用线束方向铅当量 2.0mm。	满足
	防护门 [2)]	3mm 铅当量铅板		3mm		满足
	观察窗 [2)]	3mm 铅当量铅玻璃		3mm		满足
	顶面 [3)]	150mm 混凝土+2mm 铅当量钡水泥		3.87mm		满足
	地面 [2)]	200mm 混凝土+2mm 铅当量钡水泥		4.63mm		满足
	面积	OR1 手术室	东西长 5.50m（最小单边长度），南北长 7.85m，有效使用面积为 43.1m^2，层高 4.5m（装饰面层下机房高 3.0m）。		单管头 X 射线机机房内最小有效新建面积不小于 20m^2，单边长度不小于 3.5m。	满足
		OR2 手术室	东西长 5.50m（最小单边长度），南北长 8.40m，有效使用面积为 46.2m^2，层高 4.5m（装饰面层下机房高 3.0m）。			

注：1、屏蔽要求引自《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）表 3；

2、为非有用线束方向；

3、为有用线束方向。

由表 11-32 可知，本项目 DSA 机房的有效使用面积、最小单边长度及在额定最大管电压 125kV 和常用最大工况 80kV 下屏蔽防护措施均满足《放射诊断放射防护要求》

（GBZ 130-2020）中 C 形臂 X 射线设备机房的相关要求，即：屏蔽铅当量不少于 2mm，最小单边长度不少于 3.5m，有效使用面积不少于 20m^2。因此可推断 DSA 机房周围剂量当量率能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中“具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h”的要求。

2、DSA 机房的辐射影响预测

本项目北院医疗综合楼三层手术中心 2 座 DSA 机房屏蔽防护参数一致，OR1 手术室单边最短长度及有效使用面积较小，故本次仅针对北院医疗综合楼三层手术中心 OR1 手术室进行防护分析。为了进一步评价屏蔽效果辐射防护效果，采用理论预测的方法进行影响分析。

北院医疗综合楼三层手术中心 OR1 手术室预测点选取如下：

1#-东侧防护门外 30cm 处，控制室；

2#-东侧观察窗外 30cm 处，控制室；

3#-东侧屏蔽墙外 30cm 处，设备间；

4#-南侧屏蔽墙外 30cm 处，OR2 手术室；

5#-西侧防护门外 30cm 处，室内走廊；

6#-西侧屏蔽墙外 30cm 处，室内走廊；

7#-北侧屏蔽墙外 30cm 处，室内走廊；

8#-北侧防护门外 30cm 处，室内走廊；

9#-下方，检验科；

10#-上方，大会议室。

共布设 10 个预测点，预测点布设见图 11-6 所示。

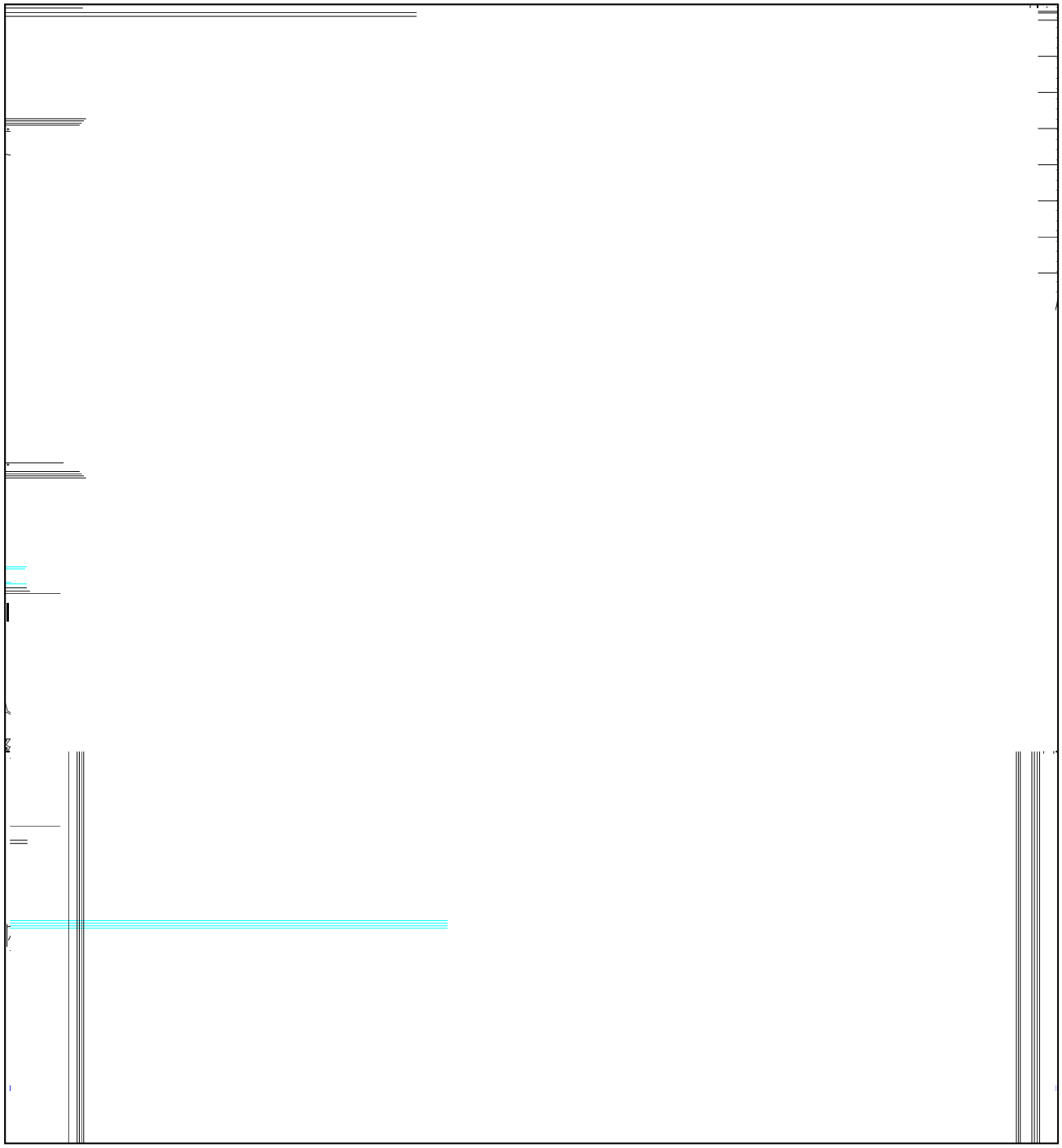

图 11-6 北院医疗综合楼三层手术中心 OR1 手术室预测点布设示意图

本项目 DSA 的辐射影响情况见表 11-33。

表 11-33 本项目 DSA 的辐射影响情况

操作模式	正常运行时最大工况	辐射影响对象
拍片模式	80kV/500mA	机房外公众、控制室操作人员
透视模式	80kV/20mA	机房外公众、控制室操作人员； 机房内介入治疗操作人员

（1）DSA 有用线束辐射影响预测

由《辐射防护手册（第一分册）》（李德平 潘自强著）给出的X射线机散射线在

关注点的周比释动能计算公式（公式 10.8）进行推导，得到有用线束在关注点处的辐射剂量率 H 的计算公式（推导中，将原公式中的使用因子、居留因子均取为 1）继而在式中增加“有效剂量与空气比释动能转换系数”修正因子，得到有用线束有效剂量计算公式：

$$H=\frac{H_0\cdot I\cdot B}{d^2}\cdot K \qquad \text{公式 11-17}$$

式中：H—关注点处有用线束有效剂量率，μSv/h；

H_0—X 射线机发射率常数（当管电流为 1mA 时，距离阳极靶 1m 处由主束产生的比释动能率），$mGy\cdot m^2\cdot mA^{-1}\cdot min^{-1}$；具体数值可根据 X 射线机管电压、过滤片等条件从《辐射防护导论》附图 3 查取，按本项目正常使用的最大管电压为 80kV、过滤片为 0.5mmCu 的条件从《辐射防护导论》附图 3 查得 H_0 为 $0.8mGy\cdot m^2\cdot mA^{-1}\cdot min^{-1}$，即 $48000\mu Gy\cdot m^2\cdot mA^{-1}\cdot h^{-1}$；

I—管电流，mA；本项目透视、拍片模式下正常使用的最大管电流分取 20mA、500mA；

d—关注点至 X 射线源的距离；

B—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见公式 11-16；

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2，对于本项目 DSA 运行时常用最大管电压 80kV，K 值取 1.67。

鉴于本项目 DSA 运行时最大常用管电压为 80kV，从 NCRP147 报告 TABLE A.1 中查取铅和混凝土对 80kV 管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数α、β、γ值，具体见表 11-30。

将前述有关参数代入公式 11-17，计算 OR1 手术室上方关注点处有用线束辐射影响水平，计算结果见表 11-34。

表 11-34 OR1 手术室上方关注点处有用线束辐射剂量率计算结果

关注点位置	操作模式	H_0（$\mu Gy\cdot m^2/(mA\cdot h)$）	I（mA）	B	d（m）	H（μSv/h）
10#-上方（大会议室）	透视模式	48000	20	1.23E-08	5.0	7.91E-04
	拍片模式		500			0.02

（2）DSA 非有用线束辐射影响预测

• 关注点处散射辐射剂量率计算

由《辐射防护手册（第一分册）》（李德平 潘自强著）给出的X射线机散射线在关注点的周比释动能计算公式（公式 10.10）进行推导，得到散射线在关注点处的有效剂量率 H_s 的计算公式（推导中，将原公式中的使用因子、居留因子均取为 1），继而在公式中增加“有效剂量与空气比释动能转换系数”修正因子，得到散射辐射有效剂量率计算公式：

$$H_s = \frac{H_0 \cdot I \cdot a \cdot (s/400) \cdot B_s}{d_0^2 \cdot d_s^2} \cdot K \qquad \text{公式 11-18}$$

式中：H_s—关注点处散射辐射有效剂量率，μSv/h；

H_0—X 射线机发射率常数（当管电流为 1mA 时，距离阳极靶 1 m 处由主束产生的比释动能率），$mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，本项目取 $48000\mu Gy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot h^{-1}$；

I—管电流，mA；本项目透视、拍片模式下正常使用的最大管电流分取 20mA、500mA；

a—人体对 X 射线的散射照射量与入射照射量之比值，由《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1 中查取。本项目最大常用管电压为 80kV，对于散射线向机房四侧墙体投射的情况，从《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1 中采用内插法查取散射角 90º时 80kV 对应的 a 值为 0.0008（该取值适用于机房四侧关注点相应预测计算）；对于散射线向机房底面投射的情况，因《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1 中无散射角 180º的数据，表中所列散射角中以 135º最接近 180º，故从该表中散射角为 135º、管电压为 70kV、100kV 对应的 a 值采用内插法求取 80kV 对应的 a 值为 0.0016（该取值适用于机房底面关注点相应预测计算）；对于散射线向机房顶面投射的情况，因《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1 中无散射角 0° 的数据，表中所列散射角中以 30° 最接近 0°，故从该表中散射角为 0°、管电压为 70kV、100kV 对应的 a 值采用内插法求取 80kV 对应的 a 值为 0.0009（该取值适用于机房顶面关注点相应预测计算）；

S—主束在受照人体上的散射面积，根据建设单位提供参数，照射野最小为 8cm×8cm=64cm²，最大为 30cm×38cm=1140cm²，考虑手术需要的最大照射面积约为 16cm×16cm，本项目取 256cm²；

d_0—源至受照点的距离，根据设备参数确定，本项目取 d_0 取最小值 0.45m（符合 ICRP 33 号报告第 98 段关于使用固定式 X 线透视检查设备的焦皮距的要求）；

d_s—受照体至关注点的距离，m；

B_s—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见式 11-16。此处散射线是指本项目最大常用管电压（80kV，即 0.08MV）下有用线束（初级 X 射线）的散射线，其能量偏保守取有用线束侧向（散射角θ=90°）的一次散射线能量，可借鉴康普顿散射定律计算一次散射线能量 E 与入射的初级 X 射线能量 E_0 之比值 $E/E_0=1/[1+E_0（1-\cos\theta）/0.511]= 1/[1+ 0.08×（1-\cos90°）/0.511]=0.865$，继而计算一次散射线能量 E 对应的 kV 值为 80kV×0.865=69.2 kV，近似取为 70kV，查取对应于 70kV 的α、β、γ数值，具体见表 11-30；将机房屏蔽体和介入操作人员防护用屏蔽物的铅当量厚度、表 11-30 中α、β、γ值代入公式 11-16，计算响应的散射辐射屏蔽透射因子值，列于表 11-35；

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2，按前述 90°方向一次散射线能量对应的 kV 值为 70kV，K 值取 1.60。

将前述有关参数代入公式 11-18，计算透视模式下 OR1 手术室外公众、控制室操作人员、机房内介入操作人员处散射辐射剂量率，计算结果见表 11-35。

表 11-35 关注点处散射辐射剂量率计算结果

关注点位置	操作模式	H_0（μGy·m²/（mA·h））	I（mA）	X[1)]（mm）	B_s	d_0（m）	d_s[2)]（m）	H_s（μSv/h）
1#-东侧防护门外 30cm 处（控制室）	透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	4.92	9.29E-07
	拍片模式		500					2.32E-05
2#-东侧观察窗外 30cm 处（控制室）	透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	3.98	1.42E-06
	拍片模式		500					3.55E-05
3#-东侧屏蔽墙外 30cm 处（设备间）	透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	3.80	1.56E-06
	拍片模式		500					3.90E-05
4#-南侧屏蔽墙外 30cm 处（OR2 手术室）	透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	4.67	1.03E-06
	拍片模式		500					2.58E-05
5#-西侧防护门外 30cm 处（室内走廊）	透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	4.76	9.93E-07
	拍片模式		500					2.48E-05
6#-西侧屏蔽墙外	透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	3.60	1.74E-06

30cm 处（室内走廊）		拍片模式		500					4.34E-05
7#-北侧屏蔽墙外 30cm 处（室内走廊）		透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	4.77	9.89E-07
		拍片模式		500					2.47E-05
8#-北侧防护门外 30cm 处（室内走廊）		透视模式	48000	20	3	5.79E-09	0.45	5.06	8.79E-07
		拍片模式		500					2.20E-05
9#-下方（检验科）		透视模式	48000	20	4.63	9.17E-13	0.45	3.30	6.54E-10
		拍片模式		500					1.63E-08
10#-上方（大会议室）		透视模式	48000	20	3.87	5.42E-11	0.45	5.00	9.48E-09
		拍片模式		500					2.37E-07
第一术者	铅衣内	透视模式	48000	20	1	2.83E-04	0.45	0.5	4.40
	铅衣外	透视模式		20	0.5	5.34E-03	0.45	0.5	83.02
第二术者	铅衣内	透视模式	48000	20	1	2.83E-04	0.45	1.0	1.10
	铅衣外	透视模式		20	0.5	5.34E-03	0.45	1.0	20.76

注：1、X 为 70kV 时屏蔽物质等效铅厚度；

2、机房四侧屏蔽体外关注点位于屏蔽体外 30cm 处，机房下方关注点位于距下方（楼下）地面 170cm 处，机房上方关注点位于距上方（楼上）地面 100cm 处。

• 关注点处泄漏辐射剂量率计算

泄漏辐射剂量率 H_L 采用下式计算：

$$H_L = \frac{H_i \cdot B}{r^2} \cdot K \qquad \text{公式 11-19}$$

式中：H_L—关注点处泄漏辐射有效剂量率，μSv/h；

H_i—距靶 1m 处泄漏射线的空气比释动能率，mGy/h。本项目 1m 处泄漏射线的空气比释动能率取 1.0mGy/h；

B—机房各屏蔽体的泄漏射线屏蔽透射因子，本项目 DSA 管电压为 80kV（本项目正常运行最大管电压）工况下 OR1 手术室屏蔽体及介入操作人员防护用屏蔽物的泄漏射线屏蔽透射因子见表 11-36；

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2，对于本项目 DSA 运行时常用最大管电压 80kV，K 值取 1.67。

将有关参数代入公式 11-19，计算 OR1 手术室周围关注点处、机房内介入操作人

员操作位关注点处的泄漏辐射剂量率，计算结果见表 11-36。

表 11-36 关注点处漏辐射剂量率计算结果

关注点位置		H_i（mGy/h）	$X^{1)}$（mm）	$r^{2)}$（m）	B	H_L（μSv/h）
1#-东侧防护门外 30cm 处（控制室）		1	3	4.92	4.15E-07	2.86E-05
2#-东侧观察窗外 30cm 处（控制室）		1	3	3.98	4.15E-07	4.37E-05
3#-东侧屏蔽墙外 30cm 处（设备间）		1	3	3.80	4.15E-07	4.80E-05
4#-南侧屏蔽墙外 30cm 处（OR2 手术室）		1	3	4.67	4.15E-07	3.18E-05
5#-西侧防护门外 30cm 处（室内走廊）		1	3	4.76	4.15E-07	3.06E-05
6#-西侧屏蔽墙外 30cm 处（室内走廊）		1	3	3.60	4.15E-07	5.34E-05
7#-北侧屏蔽墙外 30cm 处（室内走廊）		1	3	4.77	4.15E-07	3.04E-05
8#-北侧防护门外 30cm 处（室内走廊）		1	3	5.06	4.15E-07	2.70E-05
9#-下方（检验科）		1	4.63	3.30	5.72E-10	8.78E-08
10#-上方（大会议室）		1	3.87	5.00	5.42E-11	3.62E-09
第一术者	铅衣内	1	1	0.5	1.43E-03	9.55
	铅衣外	1	0.5	0.5	1.37E-02	91.54
第二术者	铅衣内	1	1	1.0	1.43E-03	2.39
	铅衣外	1	0.5	1.0	1.37E-02	22.88

注：1、X 为 80kV 时屏蔽物质等效铅厚度；

2、机房四侧屏蔽体外关注点位于屏蔽体外 30cm 处，机房下方关注点位于距下方（楼下）地面 170cm 处，机房上方关注点位于距上方（楼上）地面 100cm 处。

（3）关注点处预测计算结果汇总

综上所述，OR1 手术室外关注点处的辐射剂量率理论估算结果汇总见表 11-37。

表 11-37 关注点处辐射剂量率计算统计结果

关注点位置	操作模式	X 射线辐射剂量率（μSv/h）			
		有用线束	散射线	漏射线	合计
1#-东侧防护门外 30cm 处（控制室）	透视模式	/	9.29E-07	2.86E-05	2.95E-05
	拍片模式	/	2.32E-05		5.18E-05
2#-东侧观察窗外 30cm 处（控制室）	透视模式	/	1.42E-06	4.37E-05	4.51E-05
	拍片模式	/	3.55E-05		7.92E-05

3#-东侧屏蔽墙外 30cm 处（设备间）		透视模式	/	1.56E-06	4.80E-05	4.95E-05
		拍片模式	/	3.90E-05		8.69E-05
4#-南侧屏蔽墙外 30cm 处（OR2 手术室）		透视模式	/	1.03E-06	3.18E-05	3.28E-05
		拍片模式	/	2.58E-05		5.75E-05
5#-西侧防护门外 30cm 处（室内走廊）		透视模式	/	9.93E-07	3.06E-05	3.16E-05
		拍片模式	/	2.48E-05		5.54E-05
6#-西侧屏蔽墙外 30cm 处（室内走廊）		透视模式	/	1.74E-06	5.34E-05	5.52E-05
		拍片模式	/	4.34E-05		9.68E-05
7#-北侧屏蔽墙外 30cm 处（室内走廊）		透视模式	/	9.89E-07	3.04E-05	3.14E-05
		拍片模式	/	2.47E-05		5.52E-05
8#-北侧防护门外 30cm 处（室内走廊）		透视模式	/	8.79E-07	2.70E-05	2.79E-05
		拍片模式	/	2.20E-05		4.90E-05
9#-下方（检验科）		透视模式	/	6.54E-10	8.78E-08	8.84E-08
		拍片模式	/	1.63E-08		1.04E-07
10#-上方（大会议室）		透视模式	7.91E-04	9.48E-09	3.62E-09	7.91E-04
		拍片模式	0.02	2.37E-07		0.02
第一术者	铅衣内	透视模式	/	4.40	9.55	13.95
	铅衣外	透视模式	/	83.02	91.54	174.6
第二术者	铅衣内	透视模式	/	1.10	2.39	3.49
	铅衣外	透视模式	/	20.76	22.88	43.64

由表 11-37 结果分析知，拍片模式的非有用线束在 DSA 机房外关注点处的辐射剂量率明显大于透视模式；机房外辐射工作人员关注点剂量率最大为 7.92E-05μSv/h，出现在东侧观察窗外控制室关注点处，公众关注点剂量率最大为 0.02μSv/h，出现在机房上方大会议室关注点处，本项目 DSA 机房屏蔽设计能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的要求。

3、周围公众及辐射工作人员年有效剂量估算

（1）年有效剂量估算模式

DSA 复合手术室周围公众、控制室辐射工作人员年有效剂量计算采用联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）2000 年报告附录 A 中的计算公式进行估算：

$$H_{Er} = H_r \times T \times t$$ 公式 11-20

式中：H_{Er}—X射线外照射年有效剂量，mSv/a；

H_r—关注点处剂量率，μSv/h；

T—居留因子；

t—年照射时间，h。

OR1 手术室内介入操作人员的外照射辐射年有效剂量计算借鉴《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）给出的公式进行估算：

$$E = \alpha H_u + \beta H_o$$ 公式 11-21

式中：α—系数，有甲状腺屏蔽时，取 0.79，无屏蔽时，取 0.84；

H_u—铅围裙内佩戴的个人剂量计测得的 H_p（10），mSv；

β—系数，有甲状腺屏蔽时，取 0.051，无屏蔽时，取 0.100；

H_o—铅围裙外锁骨对应的衣领位置佩戴的个人剂量计测得的 H_p（10），mSv。

（2）年有效剂量估算

将有关参数代入公式 11-20，估算 OR1 手术室四周公众及控制室辐射工作人员的年附加剂量，见表 11-38。

表 11-38 OR1 手术室四周公众及控制室辐射工作人员的年附加剂量

关注点位置	操作模式	t（h）	T	辐射剂量率（μSv/h）	年有效剂量 H_{Er}（mSv/a）	
1#-东侧防护门外 30cm 处（控制室）	透视模式	108.4	1/8	2.95E-05	4.00E-07	＜0.01
	拍片模式	1.2		5.18E-05	7.78E-09	
2#-东侧观察窗外 30cm 处（控制室）	透视模式	108.4	1	4.51E-05	4.89E-06	＜0.01
	拍片模式	1.2		7.92E-05	9.51E-08	
3#-东侧屏蔽墙外 30cm 处（设备间）	透视模式	108.4	1/16	4.95E-05	3.35E-07	＜0.01
	拍片模式	1.2		8.69E-05	6.52E-09	
4#-南侧屏蔽墙外 30cm 处（OR2 手术室）	透视模式	108.4	1/2	3.28E-05	1.78E-06	＜0.01
	拍片模式	1.2		5.75E-05	3.45E-08	
5#-西侧防护门外 30cm 处（室内走廊）	透视模式	108.4	1/8	3.16E-05	4.28E-07	＜0.01
	拍片模式	1.2		5.54E-05	8.31E-09	

6#-西侧屏蔽墙外 30cm 处（室内走廊）	透视模式	108.4	1/5	5.52E-05	1.20E-06	＜0.01
	拍片模式	1.2		9.68E-05	2.32E-08	
7#-北侧屏蔽墙外 30cm 处（室内走廊）	透视模式	108.4	1/5	3.14E-05	6.81E-07	＜0.01
	拍片模式	1.2		5.52E-05	1.32E-08	
8#-北侧防护门外 30cm 处（室内走廊）	透视模式	108.4	1/8	2.79E-05	3.78E-07	＜0.01
	拍片模式	1.2		4.90E-05	7.35E-09	
9#-下方（检验科）	透视模式	108.4	1	8.84E-08	9.59E-09	＜0.01
	拍片模式	1.2		1.04E-07	1.25E-10	
10#-上方（大会议室）	透视模式	108.4	1	7.91E-04	8.57E-05	＜0.01
	拍片模式	1.2		0.02	2.37E-05	

由表 11-38，OR1 手术室四周公众、控制室辐射工作人员的年附加剂量均＜0.01mSv，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）

将有关参数代入公式 11-21，计算第一术者、第二术者年有效剂量，结果列于表 11-39。

表 11-39 介入操作人员年有效剂量估算结果

位置	α	β	部位	辐射剂量率（μSv/h）			年照射时间（h）	年有效剂量 E（mSv）
				散射线	漏射线	合计		
第一术者	0.79	0.051	铅衣内	4.40	9.55	13.95	108.4	2.16
			铅衣外	83.02	91.54	174.5		
第二术者			铅衣内	1.10	2.39	3.49		0.54
			铅衣外	20.76	22.88	43.64		

由表 11-39，本项目 DSA 机房内的介入操作第一、第二术者操作位的年有效剂量分别为 2.16mSv、0.54mSv；即使第一、第二术者操作位分别由 1 人承担，手术室内护士保守参考第二术者操作位估算年有效剂量，均能满足工作人员项目管理目标 5mSv 的要求。

对于介入手术，由于其实际工作中 DSA 透视工况及操作时间的不确定性，辐射

工作人员需要依靠佩戴个人剂量计进行跟踪性监测才能准确的测定其受照剂量的大小，按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）要求进行佩戴，开展DSA介入治疗的辐射工作人员采用双剂量计监测方法，医院应加强对介入手术工作人员的个人剂量监测管理，在日常检测中发现个人剂量异常的，应当对有关人员采取保护措施，并在接到监测报告之日起五日内报告发证的生态环境、卫生部门调查处理。介入手术工作人员均按照《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）穿戴防护用品（铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套等），并充分利用自带的铅悬挂防护屏及床侧防护帘等做好自身防护，确保其年有效剂量满足标准限值要求。

综上所述，根据上述理论估算结果，本项目DSA机房在经实体屏蔽后，对DSA机房外辐射工作人员和周围公众的环境影响较小，同时在开展介入工作时，在采取有效的辐射防护措施和医院良好的管理情况下，辐射工作人员的年有效剂量可以满足标准限值要求。

（三）辐射剂量叠加分析

1、辐射工作人员辐射剂量叠加

辐射工作人员辐射剂量叠加主要考虑辐射工作人员在同时开展多项放射性工作的情况下，致辐射工作人员所受辐射剂量的总和。

本项目北院医疗综合楼负二层放疗中心后装机房、1#和2#医用直线加速器机房相邻建设，共用屏蔽墙体，故位于其余两座放疗机房中间的1#医用直线加速器机房的辐射工作人员在进入治疗室协助患者进行摆位过程中，可能受到相邻机房内设备出束（源）状态下对其的辐射影响（＜0.01mSv+0.02mSv），根据表11-14计算结果，叠加相应辐射影响后，1#医用直线加速器机房的辐射工作人员的年有效剂量最大约为0.46mSv（0.44mSv+＜0.01mSv+0.02mSv），同理，后装机房、2#医用直线加速器机房的辐射工作人员的年有效剂量最大分别约为0.38mSv、0.44mSv；由于3#~6#医用直线加速器机房相邻布设，共用屏蔽墙体，故辐射工作人员进入治疗室协助患者进行摆位过程中，可能受到相邻机房内设备出束状态下对其的辐射影响（＜0.01mSv+＜0.01mSv），根据表11-24计算结果，叠加相应辐射影响后，3#~6#医用直线加速器机房的辐射工作人员的年有效剂量最大约为0.01mSv（0.01mSv+＜0.01mSv+＜0.01mSv），均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂

量不超过 5mSv）。

本项目北院医疗综合楼三层手术中心 2 座 DSA 机房相邻建设，共用屏蔽墙体，辐射工作人员在手术室内进行近台操作过程中，可能受到相邻机房内设备出束状态下对其的辐射影响（＜0.01mSv），由表 11-38 可知，叠加相应辐射影响后，手术中心的辐射工作人员的年有效剂量能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv）。

2、公众辐射剂量叠加

公众辐射剂量叠加主要考虑公众同时接近不同辐射工作场所的情况下，致公众年所受辐射剂量的总和。

本项目北院医疗综合楼负二层放疗中心 1#、2#医用直线加速器机房南侧水冷机房处公众可能受到 2 台医用直线加速器同时出束时造成的叠加影响，该处公众的年有效剂量最大约为＜0.01mSv；3#~6#医用直线加速器机房南侧水冷机房、准备区处公众可能受到相邻 2 台医用直线加速器同时出束时造成的叠加影响，该处公众的年有效剂量最大分别约为＜0.01mSv、0.01mSv。

考虑距离对射线的衰减作用，本项目放疗机房周围 50m 评价范围内环境保护目标处辐射剂量率及公众年受照剂量见表 11-40 至表 11-41。

表 11-40 机房周围 50m 评价范围内环境保护目标处辐射剂量率理论估算结果

环境保护目标	放疗机房名称	计算模式	距离 R（m）	X（cm）	B	所致剂量率估算值（μSv/h）
院外居民楼公众	后装机房	同 c 点	5.325+17	926 砼	8.09E-07	6.67E-05
	1#医用直线加速器机房	同 a 点	8.300+24	300 砼	5.70E-08	0.020
	2#医用直线加速器机房	同 b 点	8.300+35			0.011
平潮一中公众	后装机房	同 d 点	2.100+50	800 砼	5.46E-06	8.26E-05
	1#医用直线加速器机房	同 e 点	5.900+50	160 砼	1.75E-05	0.002
	2#医用直线加速器机房		5.900+49			0.002
	3#医用直线加速器机房	同 e 点	6.070+41	177 砼	2.63E-06	4.27E-04
	4#医用直线加速器机房		6.070+45			3.63E-04
	5#医用直线加速器机房		6.070+51			2.90E-04

	6#医用直线加速器机房		6.070+59			2.23E-04

表 11-41 机房周围 50m 评价范围内环境保护目标处公众年有效剂量

环境保护目标	放疗机房名称	所致剂量率估算值（μSv/h）		居留因子 T	使用因子 U	年有效剂量（mSv/a）
院外居民楼公众	后装机房	6.67E-05	0.031	1	1	0.03
	1#医用直线加速器机房	0.020				
	2#医用直线加速器机房	0.011				
平潮一中公众	后装机房	8.26E-05	0.004	1	1	＜0.01
	1#医用直线加速器机房	0.002				
	2#医用直线加速器机房	0.002				
	3#医用直线加速器机房	4.27E-04				
	4#医用直线加速器机房	3.63E-04				
	5#医用直线加速器机房	2.90E-04				
	6#医用直线加速器机房	2.23E-04				

由表 11-41 计算结果可知，放疗机房周围 50m 评价范围内环境保护目标处公众年受照剂量最大为 0.03mSv，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对公众的剂量限值要求和本项目管理目标值要求（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

本项目 DSA 机房周围 50m 范围内院外环境保护目标主要为通扬北路公众、北院门诊楼其他医务人员、病患和其他公众及北院洗衣房公众等。根据表 11-38 计算结果，DSA 机房周围公众可达处（取机房屏蔽墙外 30cm 处参考点）最大年附加剂量＜0.01mSv，其他保护目标位置由于辐射影响的距离平方反比衰减规律以及墙体、楼体结构的屏蔽作用，最大年附加剂量均＜0.01mSv。因此本项目周围保护目标的年有效剂量能够满足 0.1mSv 的剂量限值要求。

二、放射性“三废”影响分析

（一）放疗中心项目

放射性固体废物：X 射线能量最大为 15MV 的医用直线加速器长时间运行后，一些长寿命的放射性核素会随着医用直线加速器运行时间的增加而不断积累。加速器运行约 10 年后，根据实际运行情况，对检修更换下来的靶物质及相关部件进行放射性

监测，对产生感生放射性的靶物质及部件，不得随意丢弃。医院已承诺将X射线能量最大为15MV的医用直线加速器的退役废靶交由有资质单位回收处理（见附件4）。

^{192}Ir放射源使用到一定年限后产生退役的放射源，医院已承诺将退役^{192}Ir放射源交由放射源生产厂家回收处理（见附件5）。

三、非放射性“三废”影响分析

①废气：医用直线加速器机房、后装机房、CT模拟定位机房、X线模拟定位机房、DSA机房内的空气在X射线、γ射线作用下分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，通过动力排风装置排入大气，常温下可自行分解为氧气，对周围环境影响较小。

②废水：工作人员和部分患者产生的生活污水，由医院污水处理站统一处理。

③固体废物：工作人员产生的生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理。

本项目DSA手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物暂存在机房内的废物桶，手术结束后集中收集，作为医疗废物由医院统一委托有资质单位进行处置。

事故状态下影响分析

本项目新建的医用直线加速器、DSA为II类射线装置，CT模拟定位机、X线模拟定位机为III类射线装置，搬迁的后装治疗机内含III类放射源。医院在开展放射治疗和诊断过程中，如果安全管理或防护不当，可能对人员产生误照射。

一、主要事故风险

（一）医用直线加速器项目主要事故风险

1、操作人员违反操作规程或误操作，造成意外超剂量照射；

2、设备工作过程中，未按工作流程进行清场，人员误留、误入机房内，导致发生误照射；

3、放疗机房门机联锁失效，导致防护门无法自动关闭，开机时防护门外工作人员或公众受到误照射。

（二）后装治疗机项目主要事故风险

1、操作人员违反操作规程或误操作，造成意外超剂量照射；

2、后装治疗机工作过程中，未按工作流程进行清场，人员误留、误入机房内，

导致发生误照射；

3、后装机房门机联锁失效，导致防护门无法自动关闭，开机时防护门外工作人员或公众受到误照射；

4、后装治疗机运行一定时限后产生的退役放射源，因管理不善发生被盗、丢失、遗失以及正常使用的含源后装治疗机被盗等，使公众受到误照射；

5、后装治疗机实施治疗期间因电气故障、机械故障，自动回源装置及手动回源应急措施均失效的情况下，源体不能回归安全位，工作人员须进入治疗机房迅速将患者转移出机房，会对患者及进入机房的辐射工作人员造成意外超剂量照射。

（三）DSA 项目主要事故风险

1、在介入手术操作过程中，有未穿戴铅衣、配套铅手套和铅防护眼镜等个人防护用品的公众误留机手术室，室内人员位于手术室床旁，导致发生误照射；

2、DSA 控制系统失灵持续拍片，而此时手术室内人员未穿戴铅衣、配套铅手套和铅防护眼镜等个人防护用品，室内人员位于手术室床旁，导致发生误照射；

3、设备维护人员在维护 DSA 射线管或测量探测器时，射线管正处于出束状态，维修人员处于机头上方，导致发生误照射。

（四）Ⅲ类射线装置项目主要事故风险

1、操作人员违反操作规程或误操作，造成意外超剂量照射；

2、射线装置曝光过程中，未按工作流程进行清场，人员误留、误入机房内，导致发生误照射；

3、射线装置机房门机联锁失效，导致防护门无法自动关闭，开机时防护门外工作人员或公众受到误照射。

二、事故处理方法及预防措施

（一）医用直线加速器项目事故处理方法及预防措施

1、当发生误照射时，应立即按下急停开关，确保设备停止工作；

2、辐射工作人员应定期检查放疗机房门机联锁装置，确保其运行正常；

3、设备工作时，应定期使用辐射巡测仪进行巡检，发生异常情况应立即停止出束，并检查排除异常，做好记录；

4、对工作人员造成额外照射时，应及时检测个人剂量计，剂量超标则人员应及时就医检查并调岗。

（二）后装治疗机项目事故处理方法及预防措施

1、当发生误照射时，应立即按下急停开关，确保后装治疗机执行紧急收源程序；

2、辐射工作人员应定期检查后装机房门机联锁装置，确保其运行正常；

3、后装治疗机工作时，应定期使用辐射巡测仪进行巡检，发生异常情况应立即停止出束，并检查排除异常，做好记录；

4、对工作人员造成额外照射时，应及时检测个人剂量计，剂量超标则人员应及时就医检查并调岗；

5、对于放射源被盗事故，医院应第一时间启动应急预案，上报生态环境主管部门、公安部门及卫生健康部门，并配合好相关部门找回放射源；

6、后装治疗机应有紧急回源装置，发生事故时放射源回收至装置内，对发生事故的后装治疗机或其他设备故障，请设备厂家或相关单位进行检测或维修，分析事故发生原因，不得擅自进行维修。

（三）DSA 项目事故处理方法及预防措施

1、当发生误照射时，应立即按下急停开关，确保 DSA 停止工作；

2、对工作人员造成额外照射时，应及时检测个人剂量计，剂量超标则人员应及时就医检查并调岗；

3、对发生事故的 DSA 或其他设备故障，请设备厂家或相关单位进行检测或维修，分析事故发生原因，不得擅自进行维修。

（四）Ⅲ类射线装置项目事故处理方法及预防措施

1、当发生误照射时，应立即按下急停开关，确保射线装置停止工作；

2、射线装置曝光前，检查机房内是否有人员误留，确保在机房内无其他人员情况下进行曝光；

3、对发生事故的射线装置或其他设备故障，请设备厂家或相关单位进行检测或维修，分析事故发生原因，不得擅自进行维修；

4、对工作人员造成额外照射时，应及时检测个人剂量计，剂量超标则人员应及时就医检查并调岗。

医院应定期对放疗机房、CT 模拟定位机房、X 线模拟定位机房、DSA 机房辐射安全措施进行检查、维护，发现问题及时维修；每次工作前均应检查相应辐射安全装置的有效性，定期对工作场所进行检测。医院还应在平时工作中加强工作人员的辐射

防护知识的培训，尽可能避免辐射事故的发生。

医院应根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》和《江苏省辐射污染防治条例》等要求，发生辐射事故的，立即启动事故应急方案，采取必要防范措施，在事故发生后1小时内向所在地生态环境和公安部门报告，并在2小时内填写《辐射事故初始报告表》。造成或者可能造成人员超剂量照射的，还应当同时向卫生健康部门报告；对于可能受到大剂量照射的人员，迅速安排医学检查和救治，积极配合政府管理部门做好事故调查和善后工作。

表 12　辐射安全管理

辐射安全与环境保护管理机构的设置

南通市肿瘤医院拟在北院医疗综合楼负二层放疗中心内新建 7 座放疗机房（包括 6 座医用直线加速器机房和 1 座后装机房）并分别配备 2 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、15MV，电子线能量≤20MeV）、1 台医用直线加速器（医科达 SYNERGY 型，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量为 4、6、9、12、15、18MeV）、3 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量≤20MeV）、1 台后装治疗机（KL-HDR-C 型，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，为Ⅲ类放射源）；新建 2 座模拟定位机房并分别配备 1 台 CT 模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）、1 台 X 线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA）；拟在北院医疗综合楼三层手术中心内新建 2 座 DSA 机房并分别配备 1 台 DSA（型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA）。根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置和Ⅲ类放射源的单位，应设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作，并以文件形式明确管理人员职责。从事辐射工作的人员均可通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习辐射安全和防护专业知识及相关法律法规并考核。

南通市肿瘤医院已成立专门的辐射安全与环境保护管理机构，由院长做小组组长，组员覆盖各辐射科室，并以文件形式明确管理人员职责。医院应根据本次扩建放射诊疗项目修订相关文件，明确医院相关辐射项目的管理人员及其职责，将该项目辐射安全管理纳入全院的辐射安全管理工作中。本项目辐射工作人员拟由南通市肿瘤医院新聘用，不兼职其它放射工作，放疗中心、手术中心拟分别配备 29 名、10 名辐射工作人员，新进的辐射工作人员须通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习辐射安全和防护专业知识及相关法律法规，考核合格后方可上岗。

辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的有关要求，使用放射源和射线装置的单位要“有健全操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案等，并有完善的辐射事故应急措施”。目前南通市肿瘤医院已制定相关辐射安全与防护管理制度，如《岗位职责》《辐射防护和安全保卫制度》《设备维修保养制度》《医用射线装置使用登记、台帐管理制度》《放射源使用登记制度》《放射工作人员培训管理制度》《放射工作人员职业健康管理制度》《个人剂量监测管理制度》《放射防护检测与评价制度》《放射事故应急预案》及不同设备相应的《操作规程》等。医院现有管理制度内容较为全面，基本满足医院从事相关辐射活动辐射安全和防护管理的要求，拟根据扩建放射诊疗项目的特点及以下内容制定并完善相关制度，并落实到实际工作中，严格执行，加强辐射安全管理。

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

①确保开展辐射工作时所有辐射屏蔽措施均已到位，严格按照规定操作流程操作，防止发生辐射事故；

②从事辐射工作时必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪；

③在工作场所严禁吸烟、进食。

2）岗位职责：明确放射源、射线装置使用工作人员、台帐管理人员及辐射安全管理人员的岗位责任，并落实到个人，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任。

3）辐射防护和安全保卫制度：根据放射源、射线装置的具体情况制定相应的辐射防护和安全保卫制度。重点是：

①定期检查相关的辐射安全装置及检测仪器，发现问题及时修理或更换，确保辐射安全联锁装置、个人剂量报警仪、环境辐射剂量监测仪保持良好工作状态；

②工作人员定期开展个人剂量检测和职业健康监护。

4）设备维修制度：明确射线装置和辐射监测设备维修计划、维修的记录和在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施，并做好记录。确保射线检测装置、安全措施（联锁装置、警示标志、工作指示灯、急停按钮）、剂量报警仪等仪器设备保持良好工作状态。

5）放射源使用登记制度：建立放射源台帐，重点是：规范放射源台帐使用登记记录，对购入的放射源进行登记和跟踪记录。

6）人员培训计划和健康管理制度：明确培训对象、内容、周期、方式以及考核的办法等内容，并强调对培训档案的管理，做到有据可查。相关辐射工作人员应及时学习最新的国家政策法规及标准，熟练掌握放射性防护知识、最新的操作技术。根据18号令及《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》，辐射工作人员均可通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习辐射安全和防护专业知识及相关法律法规并通过考核。医院应组织新进辐射工作人员定期参加职业健康体检（不少于1次/2年），并为其建立辐射工作人员职业健康监护档案。

7）监测方案：明确监测频次和监测项目。监测结果定期上报生态环境行政主管部门。为了确保III类放射源、II类、III类射线装置的辐射安全，该单位应制定监测方案，重点是：

①明确监测项目和频次；

②辐射工作人员个人剂量监测数据应建立个人剂量档案，依据《江苏省辐射污染防治条例》（2018年修正），在日常检测中发现个人剂量异常的，应当对有关人员采取保护措施，并在接到监测报告之日起五日内报告发证的生态环境、卫生和健康部门调查处理；

③医院应当按照有关标准、规范的要求定期对工作场所及周围环境进行监测或者委托有资质的机构进行监测，发现异常情况的，应当立即采取措施，并在一小时内向县（市、区）或者设区的市生态环境行政主管部门报告；

④委托有资质监测单位对本单位的射线装置的安全和防护状况进行年度检测，每年1月31日前将年度评估报告上传至全国核技术利用辐射安全申报系统，年度评估发现安全隐患的，应当立即整改。

辐射监测

根据辐射管理要求，南通市肿瘤医院拟为本项目配备辐射巡测仪1台、固定式剂量监测报警装置7套及个人剂量报警仪20台，用于辐射防护监测和报警，同时结合本项目实际情况，已制定如下监测计划：

1）委托有资质的单位定期对项目周围环境X-γ辐射剂量率进行监测，周期：1～2次/年；

2）辐射工作人员配备个人剂量计监测累积剂量，定期（不少于1次/季）送有资质机构进行个人剂量监测，建立个人剂量档案；

3）定期使用辐射监测仪器对项目周围辐射环境进行自检，并保留自检记录；

4）所有辐射工作人员上岗前进行职业健康体检，以排除职业禁忌症。开展辐射工作后，定期开展职业健康体检（不少于1次/2年），并建立个人职业健康档案；

5）出现外照射事故，立即采取应急措施，并在1小时之内向县（市、区）或者设区的市生态环境行政主管部门报告。

南通市肿瘤医院已根据上述监测计划，明确监测项目，定期（不少于1次/季）使用辐射监测仪器对项目周围辐射环境进行自检，并保留自检记录，每年委托有资质的单位定期对项目周围环境X-γ辐射剂量率进行监测，监测结果上报生态环境行政主管部门。

南通市肿瘤医院已为辐射工作人员配备个人剂量计，组织辐射工作人员进行个人剂量监测（1次/季）和职业健康体检（1次/2年），医院公共卫生科负责全院人员个人剂量的收发和管理，职业健康监护、个人剂量监测档案均存放于公共卫生科。

南通市肿瘤医院每年编写放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告年度评估报告，包括放射性同位素与射线装置台账、辐射安全和防护设施的运行与维护、辐射安全和防护制度及措施的建立和落实、事故和应急以及档案管理等方面的内容，每年1月31日前将年度评估报告上传至全国核技术利用辐射安全申报系统。

辐射事故应急

按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等相关规定，辐射事故应急方案应明确以下几个方面：

①应急机构和职责分工；

②应急的具体人员和联系电话；

③应急人员的组织、培训以及应急和救助的装备、资金、物资准备；

④辐射事故发生的可能、分级及应急响应措施；

⑤辐射事故调查、报告和处理程序。

对于在医院定期监测或委托监测时发现异常情况时，应根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》和《江苏省辐射污染防治条例》等要求，在1小时之内向所在地生态环境和公安部门报告，造成或者可能造成人员超剂量照射的还应当同时向卫生健康部门报告。在发生辐射事故时，事故单位应当立即启动本单位的辐射事故应急方案，采取必要防范措施，并在2小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门和公安部门报告，造成或可能造成人员超剂量照射的，同时向当地卫生健康行政部门报告。

南通市肿瘤医院已经制定了《放射事故应急预案》，该预案已包括成立辐射事故应急处理领导小组、应急预案领导小组的职责、放射性事故应急处理的责任划分、放射性事故应急处理程序和放射性事故的调查等内容。由辐射事故应急处理领导小组组织各相关科室，定期（1次/年）开展应急培训演练，在物资、通讯、技术、人员、经费等准备方面均加以落实。医院开展核技术利用项目至今，暂未发生辐射事故。

表 13　结论与建议

结论

一、项目概况

为了更好地为患者服务，提高医院的医疗质量，根据规划，南通市肿瘤医院拟在北院院区内扩建放射诊疗项目，主要包括：

于北院医疗综合楼负二层放疗中心内新建 7 座放疗机房（包括 6 座医用直线加速器机房和 1 座后装机房）并分别配备 2 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、15MV，电子线能量≤20MeV）、1 台医用直线加速器（医科达 SYNERGY 型，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量为 4、6、9、12、15、18MeV）、3 台医用直线加速器（型号未定，X 射线能量为 6、10MV，电子线能量≤20MeV）、1 台后装治疗机（KL-HDR-C 型，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 3.70×10^{11}Bq，为Ⅲ类放射源），用于肿瘤的放射治疗；新建 2 座模拟定位机房并分别配备 1 台 CT 模拟定位机（型号未定，最大管电压≤140kV，最大管电流≤800mA）、1 台 X 线模拟定位机（型号未定，最大管电压≤150kV，最大管电流≤1000mA），用于模拟定位；拟在北院医疗综合楼三层手术中心内新建 2 座 DSA 机房并分别配备 1 台 DSA（型号未定，最大管电压≤125kV，最大管电流≤1250mA），用于医学诊断及介入治疗。

二、项目建设的必要性

本项目的建设，可为医院提供多种诊断、治疗手段，有着重要临床应用价值，可为患者提供放射诊断及治疗服务，并可提高当地医疗卫生水平。

三、实践正当性

本项目的运行，具有良好的社会效益和经济效益，经辐射防护屏蔽和安全管理后，本项目的建设和运行对受照个人或社会所带来的利益能够弥补其可能引起的辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）“实践的正当性”的原则。

四、项目产业政策符合性分析

本项目不属于《产业结构调整指导目录（2019 年本）》（2021 年修改）中“限制类”、“淘汰类”项目，项目符合国家产业政策。

五、选址合理性

南通市肿瘤医院北院位于南通市通州区平潮镇通扬北路30号，院区东侧为民主路和通扬运河，南侧为居民区、平潮镇政府及宝盛苑（居民区），西侧为居民楼和平潮一中，北侧为平潮一中、通州市平潮食品公司及居民区。

本次扩建放射诊疗项目周围50m评价范围内，东侧为通扬北路（距DSA机房最近约8m）、南侧为院内道路、西侧为居民楼（距放疗中心最近约17m）、北侧为平潮一中（距放疗中心最近约41m）。项目运行后的环境保护目标主要为医院辐射工作人员、院区内的其他医护人员、病患及陪同家属和院外通扬北路、居民楼、平潮一中处其他公众等。

本项目评价范围内不涉及国家公园、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74号）、《江苏省生态空间管控区域规划》（苏政发〔2020〕1号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域。根据《江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案》（苏政发〔2020〕49号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省内优先保护单元；根据现场监测和环境影响预测，项目建设满足环境质量底线要求，不会造成区域环境质量下降；本项目对资源消耗极少，不涉及违背生态环境准入清单的问题；本项目的建设符合江苏省“三线一单”生态环境分区管控要求。

本项目放疗中心位于北院医疗综合楼负二层，周围无儿科病房、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。放疗机房控制室与治疗室分离，区域划分明确；有用线束不直接朝控制室和其他居留因子较大的用室照射；设置直迷路或“L”型迷路，迷路口设有铅防护门。本项目选址与布局符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）的要求。

本项目DSA机房治疗室与控制室分开，区域划分明确，选址及布局合理。

六、辐射环境现状评价

南通市肿瘤医院本次扩建放射诊疗项目拟建址周围环境辐射剂量率在40nGy/h～46nGy/h之间，位于江苏省环境天然γ辐射水平涨落区间。

南通市肿瘤医院放疗中心拟建址周围中子剂量当量率低于仪器探测下限。

七、环境影响评价

根据理论估算结果，南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目在做好个人防护措施和安全措施的情况下，项目对辐射工作人员及周围的公众产生的年有效剂量均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员和公众受照剂量限值要求以及本项目的目标管理值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

八、“三废”的处理处置

医用直线加速器运行约 10 年后，检修更换下来的靶物质及其他强感生放射性部件，医院已承诺将退役废靶交由有资质单位回收处理。

^{192}Ir 放射源使用到一定年限后产生退役的放射源，医院已承诺将退役 ^{192}Ir 放射源交由放射源生产厂家回收处理。

放疗机房、CT 模拟模拟机房、X 线模拟模拟机房、DSA 机房内的空气在 X 射线、γ射线作用下分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，放疗机房拟设计有机械通风装置，进风口拟设在放疗机房上部，排风口拟设在放疗机房下部，进风口与排风口位置拟对角设置，通风换气频率为不低于 4 次/h。机房内产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体通过动力排风装置排入大气，常温下可自行分解为氧气，对周围环境影响较小；工作人员和部分患者产生的生活污水，由医院污水处理站统一处理；工作人员产生的生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小；本项目 DSA 手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物暂存在机房内的废物桶，手术结束后集中收集，作为医疗废物由医院统一委托有资质单位进行处置。

九、主要污染源及拟采取的主要辐射安全防护措施

南通市肿瘤医院拟配备的 6 台医用直线加速器的 X 射线最大能量分别为 15MV、10MV，医用直线加速器开机期间，产生的 X 射线、中子、感生放射性为主要辐射环境污染因素。本项目医用直线加速器机房入口处拟设置“当心电离辐射”警告标志、工作状态指示灯和门机联锁装置，机房内外均设置有急停按钮及监控装置，控制室通过监视器与对讲机与治疗室联络，放疗机房拟设置从室内开启治疗机房门的装置，防护门拟设有防挤压功能，放疗机房治疗室迷道的内入口处拟设置固定式辐射剂量监测仪并拟有报警功能，其显示单元拟设置在控制室内，符合《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的安全管理要求。

南通市肿瘤医院拟配备的后装治疗机内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，最大装源活度为 $3.7\times10^{11}Bq$，为Ⅲ类放射源。后装治疗机在治疗及储源过程中，机房治疗室内来自放射源的直射、散射和漏射γ射线会穿透屏蔽墙及防护门，对机房外的工作人员和公众产生外照射影响。本项目后装机房入口处拟设置“当心电离辐射”警告标志、工作状态指示灯和门源联锁装置，机房内外均设置有急停按钮及监控装置，控制室通过监视器与对讲机与治疗室联络。在后装机房内设置固定式剂量监测报警装置，其显示单元拟设置在控制室内，后装机房拟设置从室内开启治疗机房门的装置，防护门拟设有防挤压功能，开门状态下不能出源照射，出源照射状态下若开门放射源自动回到后装机治疗设备的安全位置。医院 ^{192}Ir 放射源由生产厂家负责放射源运输、换装。医院承诺退役 ^{192}Ir 放射源委托原厂家回收处理，符合《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）及放射源安全管理要求。

南通市肿瘤医院拟配备的 1 台 CT 模拟定位机最大管电压≤140kV、最大管电流≤800mA，拟配置的 1 台 X 线模拟定位机最大管电压≤150kV、最大管电流≤1000mA，开机期间，产生的 X 射线为主要辐射环境污染因素。本项目模拟定位机房入口处拟设置“当心电离辐射”警告标志和工作状态指示灯，模拟定位机房设有门机联锁装置，射线装置机房内外均设置有急停按钮，符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的安全管理要求。

南通市肿瘤医院拟配备的 2 台 DSA 最大管电压≤125kV、最大管电流≤1000mA，DSA 开机期间，产生的 X 射线为主要辐射环境污染因素。本项目 DSA 机房入口处拟设置“当心电离辐射”警告标志和工作状态指示灯，DSA 机房设有闭门装置，射线装置机房内外均设置有急停按钮，符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的安全管理要求。

十、辐射安全管理评价

南通市肿瘤医院已设立辐射安全与环境保护管理机构，指定专人专职负责辐射安全与环境保护管理工作，并以医院内部文件形式明确其管理职责。医院拟制定辐射安全管理制度，建议根据本报告的要求，对照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，建立符合本院实际情况的、完善可行的辐射安全管理制度，并在日常工作中落实。

南通市肿瘤医院需为本项目辐射工作人员配置个人剂量计，定期送有资质部门监测个人剂量，建立个人剂量档案；定期进行健康体检，建立个人职业健康监护档案。南通市肿瘤医院还需为本项目配备辐射巡测仪1台、固定式剂量监测报警装置7套及个人剂量报警仪20台。此外，医院应根据相关标准要求，为DSA项目工作人员和受检者配备足够数量的个人防护用品和辅助防护设施。

综上所述，南通市肿瘤医院扩建放射诊疗项目在落实本报告提出的各项污染防治措施和管理措施后，该医院将具有与其所从事的辐射活动相适应的技术能力和相应的辐射安全防护措施，其运行对周围环境产生的影响能够符合辐射环境保护的要求，从环境保护角度论证，本项目的建设和运行是可行的。

建议和承诺

1、该项目运行中，应严格遵循操作规程，加强对操作人员的培训，杜绝麻痹大意思想，以避免意外事故造成对公众和职业人员的附加影响，使对环境的影响降低到最低。

2、各项安全措施及辐射防护设施必须正常运行，严格按国家有关规定要求进行操作，确保其安全可靠。

3、定期进行辐射工作场所的检查及监测，及时排除事故隐患。

4、医院取得本项目环评批复后，应及时申请辐射安全许可证，按照法规要求开展竣工环境保护验收工作，环境保护设施的验收期限一般不超过3个月，最长不超过12个月。

辐射污染防治“三同时”措施一览表

项目	“三同时”措施		预期效果	预计投资（万元）
辐射安全管理机构	建立辐射安全与环境保护管理机构，或配备不少于 1 名大学本科以上学历人员从事辐射防护和环境保护管理工作。医院已设立专门的辐射安全与环境保护管理机构，并以文件形式明确管理人员职责。		满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》相关要求。	/
辐射安全和防护措施	屏蔽措施：放疗机房四侧墙体及顶面采用混凝土结构进行辐射防护，CT 模拟定位机房、X 线模拟定位机房四侧墙体采用实心砖+钡水泥、顶面及地面采用混凝土或混凝土+钡水泥进行辐射防护，DSA 机房四侧墙体采用轻钢龙骨架+铅板、顶面及地面采用混凝土+钡水泥进行辐射防护，各防护门均采用铅防护门，观察窗均为铅玻璃观察窗进行辐射防护。详见表 10-1 至表 10-3。		满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中对职业人员和公众受照剂量限值要求以及本项目的目标管理值要求。	1955
	安全措施	放疗机房设置门机联锁装置，并设置急停按钮、视频监控系统及对讲装置，防护门外设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯，放疗机房拟设置从室内开启治疗机房门的装置，防护门拟设有防挤压功能。在治疗室内设置固定式剂量监测报警装置。放疗机房内拟设置强制排风系统，进风口拟设在放疗机房上部，排风口拟设在放疗机房下部，进风口与排风口位置拟对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数拟不小于 4 次/h。	满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的相关要求。	
		后装机房防护门设置门源联锁装置，开门状态下不能出源照射，出源照射状态若开门放射源自动回到后装治疗机设备的安全位置。治疗室外防护门上方拟设置工作状态指示灯，机房入口设置电离辐射警告标志，机房内及控制室内安装急停按钮，配备监视器及对讲装置，后装机房拟设置从室内开启治疗机房门的装置，防护门拟设有防挤压功能，在治疗室内设置固定式剂量监测报警装置。后装机房内拟设置强制排风系统，进风口与排风口位置拟对角设置，通风换气次数拟不小于 4 次/h。		
		CT 模拟定位机房、X 线模拟定位机房入口处拟设置“当心电离辐射”警告标志和工作状态指示灯，模拟定位机房设有门机	满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的相关要求。	

		联锁装置，射线装置机房内外均设置有急停按钮。		
		DSA 机房入口处均拟设置“当心电离辐射”警告标志和工作状态指示灯；DSA 机房设有闭门装置，机房内外均设置有急停按钮。	满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的相关要求。	
	放射性“三废”处理措施： X 射线能量最大为 15MV 的医用直线加速器运行约 10 年后，检修更换下来的靶物质及其他强感生放射性部件，医院已承诺将退役废靶交由有资质单位回收处理。 ^{192}Ir 放射源使用到一定年限后产生退役的放射源，医院已承诺将退役 ^{192}Ir 放射源交由放射源生产厂家回收处理。		满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的相关要求。	
人员配备	辐射安全管理人员和辐射工作人员均可通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习辐射安全和防护专业知识及相关法律法规并考核，考核合格后上岗。		满足《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》要求。	/
	辐射工作人员在上岗前佩戴个人剂量计，并定期送检（两次监测的时间间隔不应超过 3 个月），加强个人剂量监测，建立个人剂量档案。			
	辐射工作人员定期进行职业健康体检（不少于 1 次/2 年），并建立放射工作人员职业健康档案。			
监测仪器和防护用品	拟配备辐射巡测仪 1 台。		满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》有关要求。	25
	拟配备固定式剂量监测报警装置 7 套。			
	拟配备个人剂量报警仪 20 台（放疗中心 16 台、手术中心 4 台）。			
	DSA 介入治疗医生配备铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套等，同时设置铅悬挂防护屏、铅防护吊帘、床侧防护帘、床侧防护屏等防护用品。		满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的相关要求。	20
辐射安全管理制度	制定操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案、辐射事故应急措施等制度：根据环评要求，按照项目的实际情况，补充相关内容，建立完善、内容全面、具有可操作性的辐射安全规章制度。		满足《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》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》有关要求。	/
总计	/		/	2000

以上污染防治的措施必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用。

表 14　审批

下一级环保部门预审意见：   公 章 经办人　　年　月　日
审批意见   公 章 经办人　　年　月　日