

核技术利用建设项目
成都医投华西国际肿瘤治疗中心（重离子质子）项目一期
环境影响报告书

成都医投质子重离子医院管理有限公司

2023年6月

环境保护部监制

核技术利用建设项目
成都医投华西国际肿瘤治疗中心（重离子质子）项目一期
环境影响报告书

建设单位名称：成都医投质子重离子医院管理有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）：蒲旭峰

通讯地址：成都市高新区泰和二街175号

邮政编码：610094

联系人：平煜

电子邮箱：[REDACTED]

联系电话：[REDACTED]



目录

1	概述	1
1.1	项目名称、地点	1
1.2	项目概况	1
1.2.1	建设单位概况	1
1.2.2	项目背景、意义	2
1.2.3	本次环评内容	2
1.2.4	产业政策和规划符合性	3
1.2.5	周围环境概况	5
1.2.6	核技术利用现状	9
1.3	编制依据	9
1.3.1	法律、法规和规章	9
1.3.2	技术导则、标准	10
1.3.3	其它文件、资料	11
1.4	评价标准	12
1.4.1	剂量限值和剂量约束值	12
1.4.2	辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	13
1.4.3	工作场所表面污染控制水平	21
1.4.4	非密封放射性物质工作场所分级	21
1.4.5	核医学工作场所分类	22
1.4.6	核医学科工作场所安全措施要求	22
1.4.7	放射性三废控制要求	23
1.4.8	其他标准	29
1.5	评价范围和保护目标	34
1.5.1	评价范围	34
1.5.2	环境保护目标	35
2	自然环境与社会环境状况	43
2.1	地理位置	43
2.2	自然环境状况	43
2.2.1	地形地貌	43
2.2.2	气候气象	43
2.2.3	水文	44
2.3	社会环境概况	44
2.3.1	人口分布	44
2.3.2	社会发展	44
2.3.3	经济发展	44
2.4	环境质量和辐射现状	45
2.4.1	辐射环境质量现状监测与评价	45
2.4.2	场址适宜性评价	54
3	工程分析与源项	56

3.1	项目规模与基本参数.....	56
3.1.1	项目规模.....	56
3.1.2	基本参数.....	73
3.2	工艺设备.....	74
3.2.1	质子治疗装置.....	74
3.2.2	直线加速器.....	88
3.2.3	DSA、ERCP	92
3.2.4	Ⅲ类射线装置	98
3.2.5	PET 药物制备区.....	99
3.2.6	核医学科.....	105
3.3	辐射源项分析.....	111
3.3.1	质子治疗装置.....	111
3.3.2	直线加速器.....	129
3.3.3	DSA、ERCP	129
3.3.4	Ⅲ类射线装置	130
3.3.5	PET 药物制备.....	130
3.3.6	核医学科.....	132
3.4	小结.....	133
4	辐射安全与防护设施.....	136
4.1	质子治疗装置.....	136
4.1.1	场所布局与屏蔽.....	136
4.1.2	辐射安全与防护措施.....	145
4.1.3	放射性三废处理.....	166
4.2	直线加速器.....	171
4.2.1	辐射工作场所分区.....	171
4.2.2	机房布局与辐射屏蔽.....	173
4.2.3	拟采取的安全防护措施.....	179
4.2.4	通风系统.....	183
4.2.5	放射性三废.....	187
4.3	DSA、ERCP.....	187
4.3.1	辐射工作场所布局及分区.....	187
4.3.2	辐射防护屏蔽设计方案.....	190
4.3.3	其他辐射安全防护措施.....	191
4.3.4	机房辐射安全与防护设施小结.....	194
4.3.5	三废的治理.....	195
4.4	Ⅲ类射线装置.....	196
4.4.1	辐射工作场所分区.....	196
4.4.2	机房布局和辐射屏蔽.....	197
4.4.3	拟采取的其他安全与防护措施.....	199
4.4.4	放射性三废.....	199
4.5	PET 药物制备区	200
4.5.1	辐射工作场所分区.....	200
4.5.2	辐射屏蔽.....	202

4.5.3	防护设备和个人防护用品.....	205
4.5.4	辐射防护和安全管理措施.....	206
4.5.5	通风系统.....	211
4.5.6	放射性三废.....	215
4.6	核医学科.....	217
4.6.1	辐射工作场所分区.....	217
4.6.2	人流、物流.....	217
4.6.3	布局合理性分析.....	219
4.6.4	非密封放射性物质工作场所分级、分类.....	221
4.6.5	辐射屏蔽设计方案.....	224
4.6.6	SPECT-CT、PET-CT 机房设计方案.....	226
4.6.7	辐射安全防护措施.....	226
4.6.8	放射性三废产生及管理.....	228
5	辐射环境影响.....	235
5.1	质子治疗装置.....	235
5.1.1	正常运行的环境影响分析.....	235
5.1.2	事故工况的环境影响分析.....	256
5.2	直线加速器.....	258
5.2.1	正常运行期间环境影响分析.....	258
5.2.2	事故影响分析.....	286
5.3	DSA、ERCP.....	288
5.3.1	正常运行的环境影响分析.....	288
5.3.2	事故工况的环境影响分析.....	294
5.4	模拟定位 CT 机.....	295
5.4.1	正常运行的环境影响分析.....	295
5.4.2	事故影响分析.....	297
5.5	PET 药物制备区.....	297
5.5.1	回旋加速器正常运行环境影响.....	298
5.5.2	药物正常制备的环境影响.....	310
5.5.3	工作人员受照剂量.....	314
5.5.4	公众受照剂量.....	314
5.5.5	非放射性气体环境影响.....	315
5.5.6	事故影响分析.....	316
5.6	核医学科.....	318
5.6.1	正常运行环境影响.....	318
5.6.2	事故影响分析.....	330
6	辐射安全管理.....	333
6.1	辐射安全与环境保护管理机构.....	333
6.1.1	机构和人员.....	333
6.1.2	辐射工作人员管理.....	334
6.2	辐射安全管理规章制度.....	335
6.3	辐射监测.....	335
6.4	辐射事故应急预案.....	340

6.5	年度评估报告	342
6.6	申请者从事辐射工作能力评价	343
6.6.1	辐射安全与环境保护管理	343
6.6.2	辐射工作人员培训	343
6.6.3	工作场所的安全防护措施	344
6.6.4	个人防护用品及监测仪器	344
6.6.5	规章制度	345
6.6.6	辐射事故应急	345
6.6.7	辐射工作能力综合评价	345
6.7	环保投资一览表	346
6.8	竣工环保验收一览表	347
7	利益-代价分析	353
7.1	利益分析	353
7.2	代价分析	353
8	结论	355
8.1	项目工程概况	355
8.2	实践的正当性	355
8.3	选址、布局合理性分析	356
8.4	辐射安全与防护措施	356
8.5	辐射环境影响分析	357
8.6	放射性三废排放和处理	357
8.7	辐射安全管理	357
8.8	公众参与	358
8.9	总结	358

表目录

表 1-1 本项目拟使用射线装置情况	4
表 1-2 本项目核医学科拟使用刻度源	5
表 1-3 PET 药物制备区使用放射性同位素情况	1
表 1-4 核医学科使用放射性同位素情况	1
表 1-5 质子治疗装置屏蔽体外剂量率控制水平	15
表 1-6 直线加速器屏蔽体外剂量率控制水平	17
表 1-7 非密封放射性物质工作场所的表面放射性物质污染控制水平	21
表 1-8 非密封放射性物质工作场所的分级	22
表 1-9 核医学工作场所分类一览表	22
表 1-10 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值中总 B 的排放标准	25
表 1-11 质子治疗系统放射性废液中相关核素的豁免水平	25
表 1-12 核医学放射性废液中相关核素的豁免水平	25
表 1-13 部分含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平	27
表 1-14 X 射线设备机房（照射室）使用面积、单边长度执行标准	31
表 1-15 X 射线设备机房屏蔽防护铅当量厚度要求	31
表 1-16 个人防护用品和辅助防护设施配置要求	33
表 1-17 O ₃ 和 NO _x 排放标准	34
表 1-18 本项目电离辐射环境影响评价范围	35
表 1-19 质子治疗中心周围环境保护目标情况	35
表 1-20 直线加速器机房周围环境保护目标情况	36
表 1-21 核医学科周围环境保护目标情况	39
表 1-22 PET 药物制备区周围环境保护目标情况	39
表 1-23 回旋加速器机房周围环境保护目标情况	40
表 1-24 DSA 机房周围环境保护目标情况	40
表 1-25 ERCP 机房周围环境保护目标情况	41
表 1-26 模拟 CT 机房周围环境保护目标情况	41
表 2-1 监测对象和项目	46
表 2-2 仪器设备及性能指标	49
表 2-3 监测方法	49
表 2-4 本项目拟建场址内环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果	51
表 2-5 土壤样品中放射性监测结果，BQ/KG	53
表 2-6 地表水中总 A、总 B 及相关核素的活度浓度分析结果	54
表 3-1 本项目拟配备的医用射线装置一览表	73
表 3-2 质子治疗系统主要技术参数	74
表 3-3 治疗前模拟定位的工作人员工作内容和操作时间	85
表 3-4 质子治疗系统工作过程中污染物产生环节及主要污染因子	86
表 3-5 质子治疗系统的年使用规划	87
表 3-6 质子治疗辐射工作人员配置情况	88
表 3-7 本项目拟使用电子直线加速器的主要技术参数	88
表 3-8 直线加速器辐射工作人员配置情况	92
表 3-9 DSA、ERCP 主要技术参数及工作负荷	92

表 3-10 DSA、ERCP 拟配辐射工作人员情况	93
表 3-11 回旋加速器系统组成及作用	101
表 3-12 回旋加速器主要参数	102
表 3-13 制备不同放射性核素的靶物质参数	102
表 3-14 回旋加速器运行负荷一览表	104
表 3-15 PET 药物制备区工作人员负荷一览表	105
表 3-16 核医学科患者预期工作负荷	110
表 3-17 核医学科工作人员预期工作负荷	110
表 3-18 质子治疗系统束损参数表 1	112
表 3-19 质子治疗系统束损参数表 2	112
表 3-20 质子治疗装置各区域顶板外表面 30CM 剂量率	116
表 3-21 中子天空反散射计算参数	117
表 3-22 不同距离 R 处天空反散射造成的剂量率	117
表 3-23 空气活化产生的主要放射性核素	118
表 3-24 各区域空气感生放射性静态饱和浓度计算结果, BQ/M ³	119
表 3-25 质子治疗装置各区域通风系统设计情况	120
表 3-26 考虑通风的情况下, 空气感生放射性动态饱和浓度计算结果	120
表 3-27 质子治疗装置运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率	121
表 3-28 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数	122
表 3-29 冷却水感生放射性计算结果	123
表 3-30 回旋加速器(铁)的感生放射性计算结果	123
表 3-31 束流闸(Ni)的感生放射性计算结果	124
表 3-32 束流管(不锈钢)的感生放射性核素	124
表 3-33 人体组织等效靶的组成成分	126
表 3-34 质子束单次治疗患者表面 50CM 处感生放射性剂量率随停机时间的变化, MSV/H ...	126
表 3-35 质子治疗机房臭氧饱和浓度计算参数取值	128
表 3-36 质子治疗机房内 O ₃ 和 NO ₂ 饱和浓度计算结果	129
表 3-37 核医学拟使用放射性同位素主要性能参数	132
表 3-38 本项目主要的辐射污染因子	134
表 4-1 质子治疗装置辐射工作场所屏蔽设计及周围环境情况	141
表 4-2 质子治疗系统安全联锁设备数量表	150
表 4-3 质子治疗系统通风系统设计参数	161
表 4-4 活化结构部件主要感生放射性核素及其半衰期	170
表 4-5 直线加速器辐射工作场所分区表	171
表 4-6 直线加速器机房的屏蔽设计及周围环境	174
表 4-7 每间直线加速器机房的安全与防护设施情况表	181
表 4-8 直线加速器机房通风系统参数表	183
表 4-9 DSA、ERCP 机房使用面积及单边长度的对标评价	188
表 4-10 DSA、ERCP 机房辐射工作场所分区	188
表 4-11 DSA、ERCP 机房辐射防护屏蔽设计方案	190
表 4-12 DSA 机房、ERCP 机房辐射安全与防护设施情况小结	194
表 4-13 模拟定位 CT 机等机房屏蔽设计和周围环境分布情况	198
表 4-14 机房尺寸和面积建设要求对标	199

表 4-15 本项目 PET 药物制备区非密封放射性物质工作场所分级	201
表 4-16 PET 药物制备区回旋加速器自屏蔽设计	203
表 4-17 PET 药物制备区工作场所辐射屏蔽设计	203
表 4-18 拟配备的防护设备情况一览表	205
表 4-19 拟配备的防护设备情况一览表	206
表 4-20 本项目核医学科非密封放射性物质工作场所分级	222
表 4-21 核医学工作场所分类计算结果	222
表 4-22 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求	224
表 4-23 核医学科区域辐射屏蔽设计	224
表 4-24 SPECT-CT、PET-CT 机房尺寸对标	226
表 4-25 个人防护用品和应急及去污用品配置一览表	227
表 4-26 核医学科及 PET 药物制备区放射性废水排放量	229
表 4-27 核医学放射性固体废物产生量	234
表 5-1 质子治疗系统屏蔽体外关注点及其剂量率控制水平	236
表 5-2 质子治疗装置屏蔽体外关注点剂量率模拟计算结果汇总	241
表 5-3 质子科室医生年受照剂量估算结果	245
表 5-4 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果	246
表 5-5 每名治疗技师操作 X 射线定位时受相邻治疗室照射时间	246
表 5-6 每名治疗技师操作 X 射线定位时受 X 射线出束照射时间	247
表 5-7 每名治疗技师在治疗室内进行 X 射线定位工作的年受照剂量	247
表 5-8 每名治疗技师在机房内摆位/解除摆位的年工作量	247
表 5-9 每位治疗技师因患者治疗前摆位所致的年受照剂量	247
表 5-10 每位治疗技师因患者治疗后解除摆位所致的年受照剂量	248
表 5-11 治疗技师在控制室内工作期间的受照剂量估算结果	248
表 5-12 每位治疗技师年受照剂量汇总	249
表 5-13 物理师进行治疗计划制定期间的年受照剂量	249
表 5-14 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量	250
表 5-15 物理师 QA 工作期间年受照剂量算结果	250
表 5-16 物理师的年受照剂量	250
表 5-17 护士年受照剂量计算结果	251
表 5-18 维修工程师的年受照剂量	251
表 5-19 质子治疗系统工作人员受照剂量汇总	252
表 5-20 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果	252
表 5-21 关注点处地面空气浓度计算结果	253
表 5-22 剂量转换因子	254
表 5-23 空气浸没外照射剂量计算结果	254
表 5-24 空气吸入内照射剂量计算结果	255
表 5-25 公众受照剂量汇总	256
表 5-26 不同照射量对人体损伤的估计	257
表 5-27 直线加速器用于屏蔽计算的主要参数	258
表 5-28 X 射线对应不同材料的 TVL 值	260
表 5-29 直线加速器机房 1 关注点剂量率计算结果（10MV、24GY/MIN）	263
表 5-30 直线加速器机房 2 关注点剂量率计算结果（10MV、24GY/MIN）	264

表 5-31 直线加速器机房 3 关注点剂量率计算结果 (10MV、24GY/MIN)	265
表 5-32 直线加速器机房 4 关注点剂量率计算结果 (10MV、24GY/MIN)	266
表 5-33 直线加速器机房 5 关注点剂量率计算结果 (10MV、24GY/MIN)	267
表 5-34 直线加速器机房 6 关注点剂量率计算结果 (10MV、24GY/MIN)	268
表 5-35 直线加速器机房 7 关注点剂量率计算结果 (10MV、24GY/MIN)	269
表 5-36 直线加速器机房 8 关注点剂量率计算结果 (10MV、24GY/MIN)	270
表 5-37 H _{ps} 数值计算结果	277
表 5-38 H _s 数值计算结果	277
表 5-39 H _{LS} 数值计算结果	278
表 5-40 H _{LT} 数值计算结果	278
表 5-41 直加机房迷路防护门外剂量率计算结果	279
表 5-42 直加机房主屏蔽墙内凸部分宽度核算结果	280
表 5-43 直加机房主屏蔽墙外凸部分宽度核算结果	280
表 5-44 直线加速器工作人员配置情况	281
表 5-45 直加医生年受照剂量估算结果	282
表 5-46 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果	282
表 5-47 每名技师在机房内摆位/解除摆位的年工作量	283
表 5-48 技师在控制室内工作期间的受照剂量估算结果	283
表 5-49 放疗科技师年总受照剂量	283
表 5-50 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量	284
表 5-51 物理师 QA 工作期间年受照剂量算结果	284
表 5-52 物理师的年受照剂量	284
表 5-53 护士年受照剂量计算结果	285
表 5-54 工程师的年受照剂量	285
表 5-55 放疗科工作人员受照剂量汇总	285
表 5-56 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果	286
表 5-57 不同管电压 X 射线辐射衰减拟合参数	289
表 5-58 DSA 机房周围剂量当量率估算结果	290
表 5-59 ERCP 机房周围剂量当量率估算结果	291
表 5-60 DSA 技师的年受照剂量	291
表 5-61 DSA 医生的年受照剂量	292
表 5-62 ERCP 技师的年受照剂量	293
表 5-63 ERCP 医生的年受照剂量	293
表 5-64 DSA、ERCP 周围公众的年受照剂量	294
表 5-65 模拟 CT 出束时屏蔽体外剂量率计算结果	296
表 5-66 模拟定位 CT 机房周围公众受照剂量计算结果	296
表 5-67 HM-HC+自屏蔽型回旋加速器自屏蔽体外 1M 处中子辐射剂量率和 γ 辐射剂量率 ...	299
表 5-68 加速器机房周围关注点剂量率估算结果	303
表 5-69 第一折迷道出口处剂量率估算结果	305
表 5-70 各折迷道出口处剂量率估算结果	305
表 5-71 加速器机房周围各关注点剂量率	306
表 5-72 单位体积空气中靶核数目的计算结果	308
表 5-73 加速器室空气感生放射性核素的活度浓度, Bq/m ³	308

表 5-74 本项目加速器系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率	309
表 5-75 1 米处剂量率计算结果	311
表 5-76 TVL 参数	312
表 5-77 PET 药物制备区域屏蔽体外附加剂量率计算结果	312
表 5-78 PET 药物制备区工作人员年受照剂量计算结果	314
表 5-79 PET 药物制备区周围公众受照剂量计算结果	314
表 5-80 臭氧估算参数取值及估算结果	316
表 5-81 TVL 参数	319
表 5-82 核医学科显像诊断区关键场所屏蔽体外剂量率估算结果	320
表 5-83 ^{89}Sr 产生的 β 射线在物质中的最大射程	325
表 5-84 ^{89}Sr 核素裸源状态下吸收剂量率估算结果	326
表 5-85 核医学科工作人员个人最大年有效剂量计算结果	327
表 5-86 核医学科周围公众总年有效剂量计算结果	329
表 6-1 辐射安全与环境保护管理小组人员	333
表 6-2 本项目辐射工作人员计划编配情况	335
表 6-3 本项目辐射工作场所监测计划	337
表 6-4 本项目环境监测计划	338
表 6-5 本项目拟配备的辐射监测设备清单	339
表 6-6 建设单位从事辐射活动能力的评价	346
表 6-7 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表	346
表 6-8 本项目竣工环保验收一览表	348

图目录

图 1-1 本项目地理位置图	6
图 1-2 项目周边关系图	7
图 1-3 项目总平面布置图	8
图 1-4 本项目电离辐射评价范围示意图	42
图 2-1 地下二层环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位图	47
图 2-2 地上三层环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位图	47
图 2-3 地上四层环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位图	48
图 2-4 质子治疗场所及周围环境监测点位图	48
图 3-1 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地下三层平面布局图	58
图 3-2 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地下二层平面布局图	59
图 3-3 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地下一层平面布局图	60
图 3-4 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地上一层平面布局图	61
图 3-5 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地上二层平面布局图	62
图 3-6 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地上三层平面布局图	63
图 3-7 医疗综合楼地上四层和重离子质子治疗楼屋顶层平面布局图	64
图 3-8 医疗综合楼地上五层平面布局图	65
图 3-9 北区住院楼六至九层平面布局图	66
图 3-10 北区住院楼十层至十三层平面布局图	67
图 3-11 北区住院楼机房层平面图	68
图 3-12 南区住院楼六层至八层平面布局图	69
图 3-13 南区住院楼九层至十层平面布局图	70
图 3-14 南区住院楼十一层平面布局图	71
图 3-15 南区住院楼机房层平面图	72
图 3-16 质子治疗系统装置结构组成示意图	75
图 3-17 质子治疗系统平面布局示意图	76
图 3-18 质子治疗系统回旋加速器结构示意图	77
图 3-19 质子治疗系统回旋加速器实物参考图	78
图 3-20 质子治疗系统能量选择系统结构示意图	80
图 3-21 质子治疗系统能量选择系统实物参考图	80
图 3-22 质子治疗系统束流输运系统实物参考图	81
图 3-23 质子治疗系统旋转机架和机架治疗室实物参考图	82
图 3-24 质子治疗系统治疗头模拟图	83
图 3-25 质子治疗系统机架治疗室内 X 射线管安装位置示意图	83
图 3-26 质子治疗系统工作流程及主要产污环节图	87
图 3-27 医用电子直线加速器外观示例图	89
图 3-28 常见医用电子直线加速器外观结构示意图	90
图 3-29 直线加速器的工艺流程及产污环节图	91
图 3-29 典型 DSA 示例图	94
图 3-30 ERCP 设备外观示例图	95
图 3-31 DSA 工作流程及产污环节示意图	97
图 3-32 ERCP 工作流程及产污环节示意图	98

图 3-33 回旋加速器工作原理图	100
图 3-34 回旋加速器粒子加速示意图	100
图 3-35 回旋加速器外观示意图	102
图 3-36 回旋加速器制备 PET 药物工艺流程图	103
图 3-37 PET/CT 示例图	106
图 3-38 SPECT/CT 示例图	107
图 3-39 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器结构示意图及常用外观图	107
图 3-40 核素显像诊断工作流程及产污环节图	108
图 3-41 ^{223}Ra 、 ^{89}Sr 核素治疗工作流程及产物环节示意图	109
图 3-42 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布	114
图 3-43 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布	114
图 3-44 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布	115
图 3-45 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布	115
图 3-46 冷却水活化计算模型示意图	122
图 4-1 质子治疗系统地下三层辐射工作场所分区图	137
图 4-2 质子治疗系统地下二层辐射工作场所分区图	138
图 4-3 质子治疗系统地下一层辐射工作场所分区图	139
图 4-4 电离辐射警告标志	140
图 4-5 质子治疗装置地下二层屏蔽墙体设计平面示意图	143
图 4-6 质子治疗装置屏蔽墙体设计剖面示意图	144
图 4-7 质子治疗装置屏蔽墙体设计剖面示意图	144
图 4-8 质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（地下二层）	149
图 4-9 质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（地下三层）	150
图 4-10 质子治疗系统清场搜索逻辑图	152
图 4-11 质子治疗系统束流闸安装点位示意图	153
图 4-12 质子治疗系统安全联锁逻辑图	155
图 4-13 质子治疗系统允许开机的逻辑图	156
图 4-14 质子治疗系统辐射监测系统结构	160
图 4-15 通风管道穿墙示意图	161
图 4-16 质子治疗系统送、排风管道走向示意图（地下二层）	162
图 4-17 质子治疗系统送、排风管道走向示意图（地下一层）	163
图 4-18 质子治疗系统排风管道走向示意图（地上一层）	164
图 4-19 质子治疗系统排风口所在平面	165
图 4-20 质子治疗系统冷却水集水坑和排水管道示意图	168
图 4-21 质子治疗系统冷却水暂存池和排水管道示意图	169
图 4-18 直加一区辐射工作场所分区图	172
图 4-19 直加二区辐射工作场所分区图	173
图 4-20 直加一区辐射屏蔽尺寸平面图（单位：CM）	177
图 4-21 直加二区辐射屏蔽尺寸平面图（单位：CM）	178
图 4-22 直加机房辐射屏蔽尺寸剖面图（单位：CM）	179
图 4-23 加速器安全联锁逻辑图	181
图 4-24 直线加速器辐射安全与防护设施点位示例图	183
图 4-41 直线加速器机房通风管道穿墙示意图	184

图 4-42 直加一区直线加速器机房 6~8 新风、排风管道走向示意图	185
图 4-42 直加二区直线加速器机房 1~5 新风、排风管道走向示意图	186
图 4-22 DSA 机房辐射工作场所分区图	189
图 4-23 ERCP 机房辐射工作场所分区图	189
图 4-24 2 号和 11 号 DSA 机房排风管道示意图	192
图 4-25 11 号 DSA 机房排风管道示意图	192
图 4-26 三间 DSA 机房排风管道示意图	193
图 4-27 ERCP 机房排风管道示意图	193
图 4-28 模拟 CT 辐射工作场所分区图	196
图 4-29 轨道 CT 机在治疗室内辐射工作场所分区图	197
图 4-30 本项目回旋加速器机房平面图	204
图 4-31 本项目回旋加速器机房剖面图	205
图 4-32 本项目回旋加速器工作场所辐射防护措施示意图	209
图 4-33 本项目回旋加速器机房拟设计的安全联锁逻辑示意图	210
图 4-34 回旋加速器机房通风管道示意图	213
图 4-35 PET 药物制备区排风管道示意图	214
图 4-36 PET 药物制备区放射性废液管道示意图	216
图 4-37 核医学科及 PET 药物制备区辐射工作场所分区图	220
图 4-38 核医学科及 PET 药物制备区人流、物流图	221
图 4-39 核医学科排风管道示意图	231
图 4-40 核医学放射性废水管道示意图	232
图 4-41 核医学科衰变池设计图纸	233
图 5-1 质子治疗中心模拟计算平面模型图	235
图 5-2 质子治疗中心模拟计算剖面模型图	236
图 5-3 地下二层质子治疗装置关注点分布示意图	239
图 5-4 质子治疗装置剖面关注点分布示意图	239
图 5-5 质子治疗装置剖面关注点分布示意图	240
图 5-6 回旋加速器大厅剂量率分布图（平面）	242
图 5-7 回旋加速器最大剂量率分布图（剖面）	242
图 5-8 向左照射时治疗室 2 剂量率分布图（平面）	243
图 5-9 向右照射时治疗室 2 剂量率分布图（平面）	243
图 5-10 向上照射时治疗室剂量率分布图（剖面）	243
图 5-11 向下照射时治疗室剂量率分布图（剖面）	244
图 5-12 向右照射时治疗室 1 剂量率分布图（平面）	244
图 5-13 束流输运线走廊剂量率分布图（平面）	244
图 5-38 直加机房 1~8 屏蔽体外关注点示意图（平面）	272
图 5-39 直加机房 1~8 屏蔽体外关注点示意图（剖面）	273
图 5-14 中子、 γ 剂量率总和分布图	300
图 5-15 中子剂量率分布图	301
图 5-16 γ 剂量率分布图	302
图 5-17 回旋加速器机房周围关注点示意图	304
图 5-18 公众关注点示意图	329

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：成都医投华西国际肿瘤治疗中心（重离子质子）项目一期

建设地点：成都市双流区永安镇付家坝社区 1 组

建设性质：新建

建设单位：成都医投质子重离子医院管理有限公司

建设规模：本项目建设总用地面积 68562.52 平方米，总建筑面积约 146761.75 平方米，项目一期拟建设住院楼、医疗综合楼、重离子质子治疗楼连体建筑，开展放射诊疗和诊断工作。其中，医疗综合楼地下三层、地上五层；重离子质子治疗楼地下三层、局部地上三层；住院楼位于医疗综合楼上，分为南北两区，北区为地上六至十三层，南区为地上六至十一层。

拟使用 1 套质子治疗系统（Ⅰ类射线装置）、8 台直线加速器（Ⅱ类射线装置）、3 台 DSA（Ⅱ类射线装置）、1 台 ERCP（Ⅱ类射线装置）、1 台制备 PET 放射性药物的回旋加速器（Ⅱ类射线装置）、若干Ⅲ类医用射线装置；拟设 2 个乙级非密封放射性物质工作场所。

项目投资：项目总投资约 36 亿元，其中环保投资约 6365 万元，占总投资约 1.77%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

成都医投华西国际肿瘤治疗中心（重离子质子）项目一期位于成都市双流区天府国际生物城园区内，占地 103 亩，总建筑面积 146761.75 平方米，规划床位 500

张，总投资 390744 万元。建设内容包括医疗综合楼（门诊医技部分、北区住院部分、南区住院部分），重离子质子治疗楼等。

1.2.2 项目背景、意义

癌症是严重危害人类健康的重大慢性疾病，根据国家癌症中心最新癌症统计数据，2015 年我国恶性肿瘤发病约 392.9 万人，死亡约 233.8 万人，恶性肿瘤死亡占居民全部死因的 23.91%。当前我国癌症治疗水平与美国等国家相比还有很大差距。随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。

质子治疗装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备，目前我国多地都在建设/筹建质子治疗中心。为提高成都市医疗服务保障水平，建设单位拟建华西国际肿瘤治疗中心（重离子质子）项目，是为了顺应放疗“精确诊断、精确定位、精确计划、精确治疗”的新时代，顺应政府鼓励社会办医打造多元化医疗服务的政策，顺应成都市及周边地区肿瘤患者高端治疗的迫切需求，通过引进质子治疗装置，满足成都市及周边地区的恶性肿瘤精准高端治疗的需求，提升癌症治疗水平。

2019 年 6 月 18 日，成都医投质子重离子医院管理有限公司取得四川省固定资产投资备案表，备案号为川投资备【2019-510122-84-03-366002】FGQB-0243 号（见附件 1）。

1.2.3 本次环评内容

本项目选址位于成都市双流区永安镇付家坝社区 1 组，新建地下建筑、医疗综合楼、重离子质子治疗楼等，规划建设总用地面积 68562.52 平方米，总建筑面积约 146761.75 平方米。

目前，本项目常规项目环评已于 2021 年 5 月 20 日取得“成都市生态环境局关于成都医投质子重离子医院管理有限公司成都医投华西国际肿瘤治疗中心（重离子质子）项目环境影响报告书的批复”，批复文号成环承诺环评审【2021】13 号（具体见附件 2）。本次环评为本项目的辐射环境影响评价，主要针对项目中涉及核技术利用活动的建设内容开展评价，具体如下：

（1）质子治疗装置。拟在重离子质子治疗楼使用 1 套质子治疗装置，属 I 类医用射线装置，厂家为中广核核技术发展股份有限公司（以下简称“中广核技”），质子最高能量为 230MeV，建设 2 间机架治疗室。

（2）电子直线加速器。拟在医疗综合楼地下二层直加一区使用 3 台电子直线加速器，在医疗综合楼地下二层直加二区使用 5 台电子直线加速器，X 射线最高能量为 10MV，电子线最高能量为 18MeV。其中，X 射线能量为 10MV 时，等中心点最大输出剂量率为 24Gy/min；电子线能量为 18MV 时，等中心点最大输出剂量率为 10Gy/min。

（3）经内镜逆行胰胆管造影（ERCP）。拟在医疗综合楼地上三层内镜中心使用 1 台 ERCP，管电压 125kV，最大管电流 1250mA。

（4）血管造影用 X 射线装置（DSA）。拟在医疗综合楼地上四层介入中心使用 3 台 DSA，管电压 150kV，管电流 1250mA。

（5）模拟定位 CT。拟在医疗综合楼地下二层模拟定位使用 2 台模拟定位 CT，管电压 140kV，管电流 900mA；拟在质子治疗装置的 2 间治疗室内各使用 1 台滑轨 CT，共 2 台滑轨 CT，管电压 140kV，管电流 677mA。

（6）其它 III 类医用射线装置。拟在医疗综合楼地上一层的放射科使用 2 台 DR、1 台钼靶、1 台胃肠 X 射线机、1 台骨密度仪、4 台 CT；在医疗综合楼地上四层使用 1 台移动 CT 共 10 台 III 类射线装置，每间射线装置均设独立机房，这些射线装置将通过四川省建设项目环境影响登记表备案系统备案。

（7）使用非密封放射性物质

本项目非密封放射性物质工作场所共两个，具体如下：

场所一：PET 药物制备区

拟在医疗综合楼地下二层北侧新建一间回旋加速器机房，使用 1 台自屏蔽回旋加速器，加速粒子为质子，最大能量为 10MeV，最大设计电流为 100 μ A，拟配套设置 1 个非密封放射性物质工作场所制备放射性药物，制备的放射性药物仅限于本项目核医学使用，不外销，放射性同位素操作量和场所分级情况列于表 1-3。根据医院规划用量，由《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 C 计算得到的 PET 药物制备区日等效最大操作量 1.79E+09Bq。对照（GB18871-2002）附录 C 中表 C1，该区域属于乙级非密封放射性物质工作场所。

场所二：核医学科

核医学科位于医疗综合楼地下二层北侧，拟开展放射性药物诊断和放射性药物治疗，拟使用的放射性同位素列于表 1-4，使用射线装置情况列于表 1-1，PET/CT 拟配备校准源见表 1-2。

根据医院规划工作量，由（GB18871-2002）附录 C 计算得到核医学科工作场所的日等效最大操作量为 1.00E+09Bq，对照（GB18871-2002）附录 C 表 C1，该辐射工作场所属于乙级非密封放射性物质工作场所。

表 1-1 本项目拟使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量，台	类别	所在位置
1	质子治疗系统	1	I	重离子质子治疗楼
2	电子直线加速器	8	II	医疗综合楼地下二层直加一区 and 直加二区
3	经内镜逆行胰胆管造影装置（ERCP）	1		医疗综合楼地上三层内镜中心
4	血管造影用 X 射线装置（DSA）	1		医疗综合楼地上四层介入中心
5	回旋加速器（自屏蔽）	1		医疗综合楼地下二层 PET 药物制备区
6	模拟定位 CT 机	4	III	医疗综合楼地下二层放疗科模拟定位区，地下二层治疗室 1 和治疗室 2
7	X 射线摄影装置（DR）	2		医疗综合楼地上一层放射科
8	乳腺 X 射线装置（钼靶）	1		

9	胃肠 X 射线机	1		
10	骨密度仪	1		
11	CT 机	4		
12	移动 CT 机	1		医疗综合楼地上四层
13	PET-CT	1		医疗综合楼地下二层核医学
14	SPECT-CT	1		
备注：其中序号 7-12 中医疗综合楼使用的 10 台Ⅲ类射线装置将另外通过四川省建设项目环境影响登记表备案系统备案。				

表 1-2 本项目核医学科拟使用刻度源

序号	刻度源使用情况	备注
1	1 枚 Ge-68 V 类源：1 枚 9.25E+07 Bq	PET/CT

表 1-3 PET 药物制备区使用放射性同位素情况

核素	加速器产额, Bq/min	实际打靶时间, min	日实际最大产额, Bq	合成效率 ¹	药物日最大合成量,Bq	理化性质	毒性因子	操作因子	日等效最大操作量, Bq	用途	活动种类
¹⁸ F	9.25E+10Bq/2h	120	9.25E+10	50%	4.63E+10	液体	0.01	1	9.25E+08	PET 药物制备	生产、使用
¹³ N	4.10E+09 Bq /0.5h	30	4.10E+09	50%	2.05E+09	液体	0.01	1	4.10E+07		
¹¹ C	4.88E+10 Bq /0.5h	30	4.88E+10	50%	2.44E+10	液体	0.01	1	4.88E+08		
⁶⁸ Ga	1.11E+10 Bq /0.5h	30	1.11E+10	50%	5.55E+09	液体	0.01	1	1.11E+08		
⁶⁴ Cu	3.33E+09 Bq /1.5h	90	3.33E+09	50%	1.67E+09	液体	0.01	1	3.33E+07		
⁸⁹ Zr	9.62 E+08 Bq /3h	360	1.92E+09	50%	9.62E+08	液体	0.1	1	1.92E+08		
合计									1.79E+09	乙级	
备注：1.综合考虑放射性同位素的半衰期及放射性药物的合成效率，合成效率保守按 50%考虑											

表 1-4 核医学科使用放射性同位素情况

放射性同位素			理化性质	日最大使用量, Bq	毒性组别操作因子	状态与操作方式 修正因子	日等效最大操作量, Bq	年使用最大天数, 天	年最大操作量, Bq	来源	存放地点
显像诊断	PET/CT	¹⁸ F	液体	9.25E+09	0.01	1（简单操作）	9.25E+07	250	2.31E+12	PET 药物制备区 自制	储源间
		¹¹ C	液体	1.85E+09	0.01	1（简单操作）	1.85E+07	50	9.25E+10		
		¹³ N	液体	1.85E+09	0.01	1（简单操作）	1.85E+07	50	9.25E+10		
		⁶⁸ Ga	液体	1.85E+09	0.01	1（简单操作）	1.85E+07	100	1.85E+11		
		⁶⁴ Cu	液体	9.25E+08	0.01	1（简单操作）	9.25E+06	50	4.63E+10		

		⁸⁹ Zr	液体	9.25E+08	0.1	1（简单操作）	9.25E+07	50	4.63E+10	
		¹²⁴ I	液体	9.25E+08	0.1	1（简单操作）	9.25E+07	50	4.63E+10	外购
	SPECT /CT	^{99m} Tc	液体	2.22E+10	0.01	1（简单操作）	2.22E+08	250	5.55E+12	发生器淋洗/外购
		⁹⁹ Mo	液体	3.70E+10	0.1	100（贮存）	3.70E+07	50	1.85E+12	外购
治疗	²²³ Ra	液体	3.70E+07	10	1（简单操作）	3.70E+08	250	9.25E+09	外购	
	⁸⁹ Sr	液体	2.96E+08	0.1	1（简单操作）	2.96E+07	250	7.40E+10	外购	
合计							1.00E+09	乙级		
备注：1.PET/CT 显像诊断用放射性核素中 ¹⁸ F 每个工作日均使用， ³ N、 ¹¹ C、 ⁸⁹ Zr、 ¹²⁴ I、 ⁶⁴ Cu 显像每周安排一次， ⁶⁸ Ga 显像每周二次。										

根据《射线装置分类》的规定，质子治疗系统管理类别属于 I 类射线装置。根据《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）以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第 20 号，2021 年）的规定，本项目环境影响评价文件类别确定为编制环境影响报告书。因此，中国原子能科学研究院受建设单位的委托，负责本项目的环评工作（委托书见附件 3）。

1.2.4 产业政策和规划符合性

1.2.4.1 产业政策符合性

本项目属于《产业政策调整目标》（发改委 2021 第 49 号令修改，2021 年 12 月 30 日）中“鼓励类”第六条第 6 项——同位素、加速器及辐照应用技术开发及第三十七条第 5 项——医疗卫生服务设施建设的范畴。因此，本项目建设符合国家产业政策。

1.2.4.2 规划符合性分析

1.2.4.2.1 与医疗卫生相关规划符合性

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要（2016-2020）》指出：加强重大疾病防治和基本公共卫生服务，完善国家基本公共卫生服务项目和重大公共卫生服务项目，提高服务质量效率和均等化水平。提升集成公共卫生服务能力，加强妇幼健康、公共卫生、肿瘤、精神疾病防控、儿科等薄弱环节能力建设。2016 年中共中央政治局会议上审议通过的《“健康中国 2030”规划纲要》中，也多次提出将重大疾病防治、癌症诊治工作作为重要目标，加强医药技术创新发展以及医药体系的完善。“十三五”时期也是成都市建立健全覆盖城市居民的基本医疗卫生制度、创建国家医疗卫生服务中心的决胜阶段。因此，本项目的建设与国家、成都市医疗卫生事业相关规划是相符的。

1.2.4.2.2 与土地利用规划的符合性

本项目选址位于成都市双流区永安镇付家坝社区 1 组。根据规划条件(编号：成规设[2020]J0247 号)，位于双流区永安镇付家坝社区 1 组（编号：SWC2019-03-010）地块，土地使用性质为其他服务设施用地（主要为医疗用途）。建设单位已于 2022 年 2 月 21 日取得该建设用地的使用权，具体见附件 4。因此，拟建项目符合土地利用规划要求。

1.2.4.2.3 “三线一单”相符性

（1）生态保护红线

根据《四川省生态保护红线方案》（川府发[2018]24 号）及《关于发布生态保护红线市县级行政区汇总表和登记表的函》（川环函[2018]1201 号），项目不涉及自然保护区、风景名胜区、饮用水水源保护区等敏感区，项目建设符合四川省生态保护红线实施意见的相关要求。

（2）环境质量底线

本项目可能产生的 O_3 和 NO_2 浓度均低于《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》（GBZ2.1-2007）中规定的 O_3 和 NO_2 浓度限值， NO_x 排放浓度低于《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）中硝酸使用及其他有组织氮氧化物排放限值，因此本项目的建设不会突破环境质量底线。

（3）资源利用上线

本项目为新建项目，建设总用地面积 68562.52 平方米，总建筑面积约 146761.75 平方米，根据《中华人民共和国土地管理法》、《中华人民共和国城乡规划法》和国家有关规定，本项目建设工程符合国土空间规划和用途管制要求。在项目运行期间需用水、电等能源。项目的建设不会突破区域资源利用上线。

（4）环境准入负面清单

本项目属于《产业政策调整目标》发改委 2012 第 49 号令修改（2021 年 12 月

30 日)中“鼓励类”的范畴,不属于国家及地方产业政策的“限制类”及“禁止类”。

综上所述,本项目的建设符合相关政策和规划的要求。

1.2.5 周围环境概况

本项目建设地点位于成都市双流区永安镇付家坝社区 1 组,地理位置见图 1-1。项目周边关系见图 1-2。重离子质子治疗楼位于项目用地的东南角,医疗综合楼位于项目用地的北侧,项目北侧为环湖路,西侧为规划路,东侧为康复路,南侧为农田。

项目总平面布局图见图 1-3。

成都市地图

四川省标准地图·基础要素版

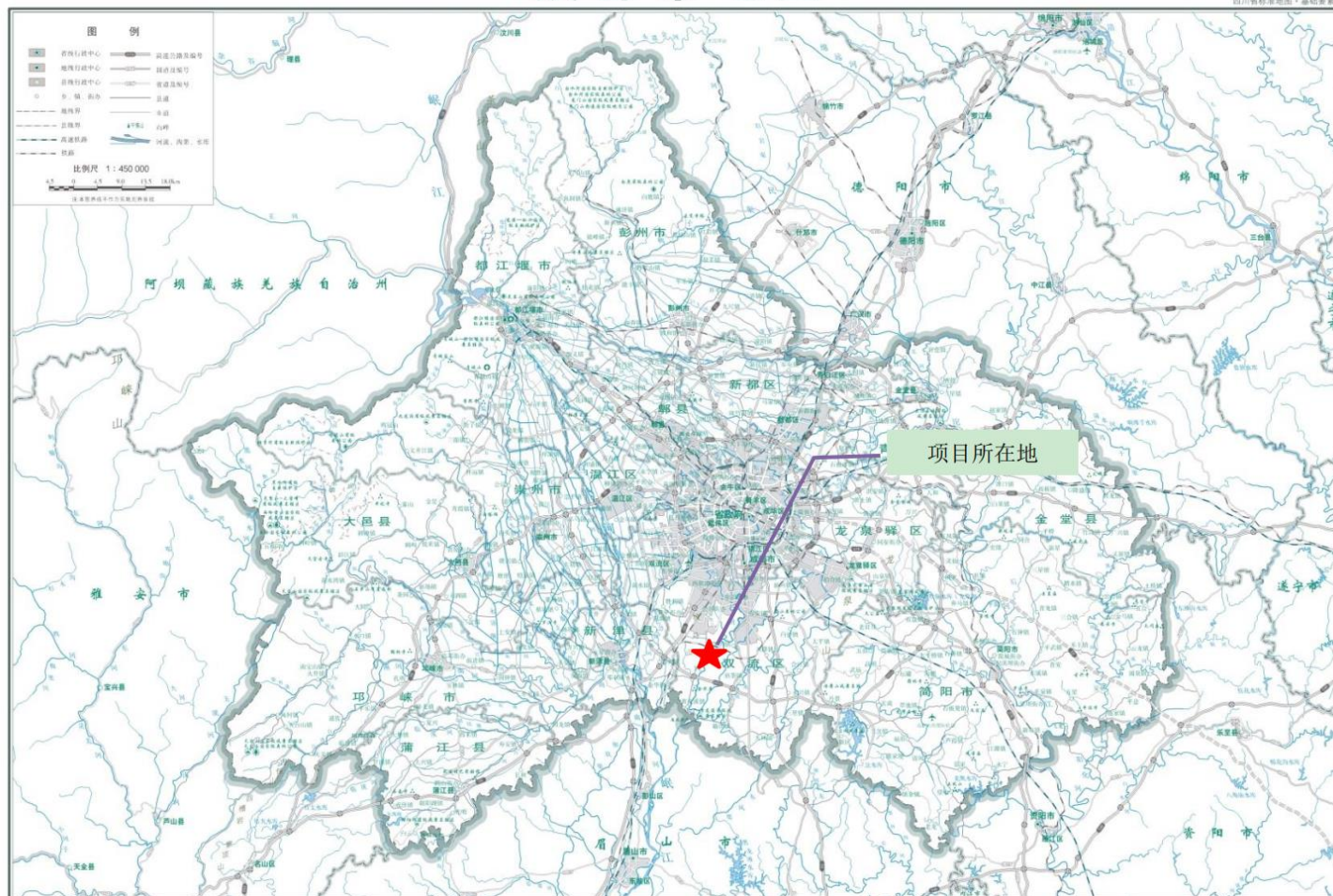


图 1-1 本项目地理位置图



图 1-2 项目周边关系图

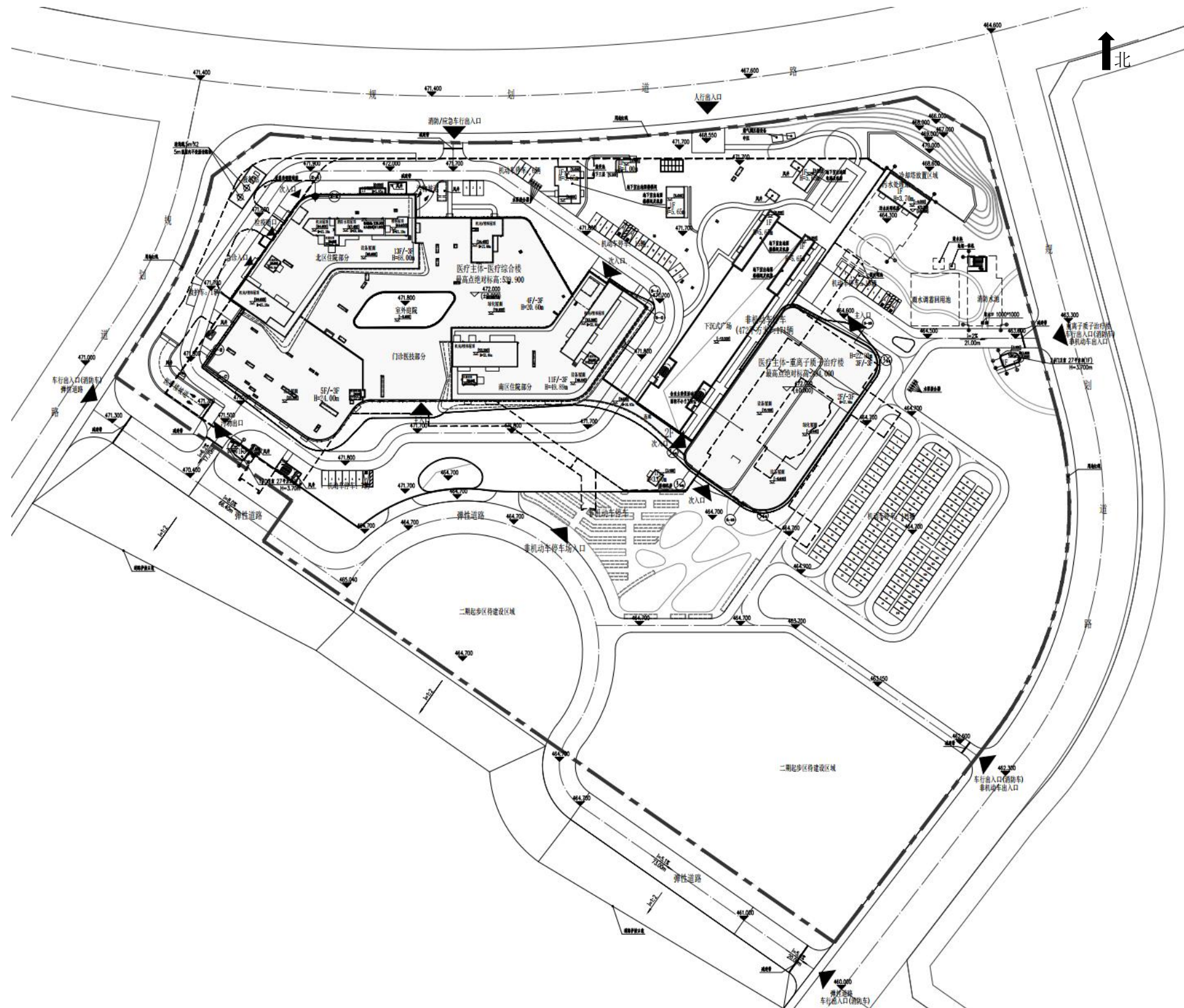


图 1-3 项目总平面布置图

1.2.6 核技术利用现状

建设单位此前未从事过核技术利用相关活动，本次为首次申请环境影响评价审批和辐射安全许可。

1.3 编制依据

1.3.1 法律、法规和规章

(1) 《中华人民共和国环境保护法》(中华人民共和国主席令 第 9 号，2015 年 1 月 1 日施行)；

(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》(全国人民代表大会常务委员会，2018 年 12 月 29 日施行)；

(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 6 号，2003 年 10 月 1 日)；

(4) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》(国务院令 第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版)；

(5) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》(生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日修订版)；

(6) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》(环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日施行)；

(7) 《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)；

(8) 《建设项目环境保护管理条例》(国务院令 第 682 号，2017 年 10 月 1 日起施行)；

(9) 《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)；

(10) 《产业结构调整指导目录》(发改委 2021 年第 49 号令修改, 2021 年 12 月 30 日);

(11) 《建设项目环境影响报告书(表)编制监督管理办法》(生态环境部令 第 9 号, 2019 年 11 月 1 日);

(12) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》(生态环境部公告 2019 年第 57 号, 2019 年 12 月 23 日);

(13) 《发布<建设项目竣工环境保护验收暂行办法>的公告(国环规环评[2017]4 号, 2017 年 11 月 22 日起施行);

(14) 《辐射安全与防护监督检查技术程序》(生态环境部, 2020 年);

(15) 《关于明确辐射安全监管有关事项的通知》(生态环境部, 环办辐射函[2016]430 号)。

1.3.2 技术导则、标准

(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002);

(2) 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ 10.1-2016);

(3) 《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021);

(4) 《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);

(5) 《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);

(6) 《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);

(7) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分: 质子加速器放射治疗机房》(GBZ/T 201.5-2015);

- (8) 《放射治疗放射防护要求》(GBZ 121-2020);
- (9) 《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020);
- (10) 《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021);
- (11) 《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020);
- (12) 《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021);
- (13) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157-2021);
- (14) 《电离辐射工作场所监测的一般规定》(EJ 381-1989);
- (15) 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ 128-2019);
- (16) 《职业性内照射个人监测规范》(GBZ 129-2016);
- (17) 《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466-2005);
- (18) 《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》(GBZ 2.1-2019)。

1.3.3 其它文件、资料

- (1)《成都医投华西国际肿瘤治疗中心(重离子质子)项目环境影响报告书》
(成都医投质子重离子医院管理有限公司, 2021 年);
- (2)《成都医投华西国际肿瘤治疗中心(重离子质子)项目一期环境影响评价委托书》(成都医投质子重离子医院管理有限公司, 2021 年);
- (3) NCRP. Report NO.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP,2005;
- (4) NCRP. Report NO.151. Structural shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma- Ray Radiotherapy facilities. NCRP,2005;
- (5) IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001;
- (6) 成都医投质子重离子医院管理有限公司提供的与本项目相关的初步设

计资料等其他技术资料。

1.4 评价标准

1.4.1 剂量限值和剂量约束值

1.4.1.1 剂量限值

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定, 工作人员的**职业照射和公众照射的剂量限值如下:

(1) 职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制, 使之不超过下述限值:

1) 审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量(但不可作任何追溯性平均), 20mSv;

2) 任何一年中的有效剂量, 50mSv。

(2) 公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值:

1) 年有效剂量, 1mSv;

2) 特殊情况下, 如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv, 则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

1.4.1.2 剂量约束值

执行《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)和《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021):

本次评价以职业照射剂量限值的 1/4 即 5mSv/a 作为本项目职业人员的年剂量约束值, 以公众照射剂量限值的 1/10 即 0.1mSv/a 作为本项目公众人员的年剂

量约束值。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

1.4.2.1 放射治疗场所屏蔽体外剂量控制要求

根据 HJ 1198-2021 的 6.1.4 小节，本项目放射治疗场所屏蔽体外剂量控制应符合以下要求：

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

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

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

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

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

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

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

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

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

根据上述要求计算得到本项目放射治疗场所屏蔽体外剂量率控制水平见下表，各关注点位置见图 5-3~图 5-5，图 5-14~图 5-15。

表 1-5 质子治疗装置屏蔽体外剂量率控制水平

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$, $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,\text{max}}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	H_c , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
回旋加速器大厅及束流输运线	A1	回旋加速器大厅迷道口外走道	1/5	1	41	100	12.20	10	10.00
	A2	SSA 机房	1/20	1	41	5	2.44	10	2.44
	A3	储藏间	1/20	1	41	5	2.44	10	2.44
	A4	治疗室 1 机架区北侧	1/2	1	41	100	4.88	10	4.88
	A5	治疗室 1 机架区南侧	1/2	1	41	100	4.88	10	4.88
	A6	楼梯	1/40	1	41	5	4.88	10	4.88
	A7	电梯	1/40	1	41	5	4.88	10	4.88
	A8	弱电间	1/20	1	41	5	2.44	10	2.44
	A9	排烟机房	1/20	1	41	5	2.44	10	2.44
	A10	结构预留连通口	1/5	1	41	100	12.20	10	10.00
	A11	束流输运线东北屏蔽墙外土壤	—	—	—	—	—	—	5000
	A12	束流输运线迷道口外走道	1/5	1	20.5	100	1.22	10	1.22
	A13	主控室	1	1	41	100	2.44	2.5	2.44
	A14	不上人屋面	—	—	—	—	—	—	100
	A15	土壤	—	—	—	—	—	—	5000
	A16	不上人屋面	—	—	—	—	—	—	100
	A17	土壤	—	—	—	—	—	—	5000
治疗室 1	B1	治疗控制室 1	1	1	20.5	100	4.88	2.5	2.50
	B2	治疗室 1 迷道口外走道	1/5	1	20.5	100	24.39	10	10.00
	B3	走道	1/5	1	20.5	5	1.22	10	1.22
	B4	治疗室 2 治疗区	1/2	1	20.5	100	9.76	10	9.76

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$, $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,max}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	H_c , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
	B5	治疗室 2 机架区	1/2	1	20.5	100	9.76	10	9.76
	B6	质子候诊区	1	1	20.5	5	0.24	2.5	0.24
	B7	剂量验证设备存储室	1/20	1	20.5	5	4.88	10	4.88
	B8	不上人屋面	—	—	—	—	—	—	100
	B9	土壤	—	—	—	—	—	—	5000
治疗室 2	C1	治疗控制室 2	1	1	20.5	100	4.88	2.5	2.50
	C2	治疗室 2 迷道口外走道	1/5	1	20.5	100	24.39	10	10.00
	C3	患者固定装置存储房间	1/20	1	20.5	100	97.56	10	10.00
	C4	患者治疗设备存储房间	1/20	1	20.5	100	97.56	10	10.00
	C5	楼梯	1/40	1	20.5	5	9.76	10	9.76
	C6	电梯	1/40	1	20.5	5	9.76	10	9.76
	C7	走道	1/5	1	20.5	5	1.22	10	1.22
	C8	服务台/接待	1	1	20.5	5	0.24	2.5	0.24
	C9	治疗室 1 机架区	1/2	1	20.5	100	9.76	10	9.76
	C10	治疗室 1 治疗区	1/2	1	20.5	100	9.76	10	9.76
	C11	不上人屋面	—	—	—	—	—	—	100
	C12	土壤	—	—	—	—	—	—	5000

备注：1. 根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5mSv/h”作为各辐射工作场所地下区域屏蔽体外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

2. 根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），对于不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 100 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。

表 1-6 直线加速器屏蔽体外剂量率控制水平

辐射源项所在区域	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$, $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,max}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	H_c , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
直线加速器 1	东南	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东北	新风/排烟机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
		电话机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
	西北	新风/排烟机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
	西南	直线加速器 2	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	顶板	夹层机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
直线加速器 2	东南	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东北	直线加速器 1	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	西北	走廊	1/5	1	50	5	0.5	10	0.5
	西南	直线加速器 3	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	顶板	夹层机房、水冷机房、补风机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
直线加速器 3	东南	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东北	直线加速器 2	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	西北	走廊	1/5	1	50	5	0.5	10	0.5
	西南	直线加速器 4	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	顶板	夹层机房、水冷机房、补风机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
直线加速器 4	东南	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0

辐射源项所在区域	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$, $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,max}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	H_c , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东北	直线加速器 3	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	西北	走廊	1/5	1	50	5	0.5	10	0.5
	西南	直线加速器 5	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	顶板	夹层机房、水冷机房、新风机房、补风机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
直线加速器 5	东南	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东北	直线加速器 4	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	西北	走廊	1/5	1	50	5	0.5	10	0.5
	西南	弱电	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
		走廊	1/5	1	50	5	0.5	10	0.5
	顶板	夹层机房、排烟机房、水冷机房、补风机房、冷库	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
直线加速器 6	东北	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东南	咨询室	1	1	50	5	0.1	10	0.1
		前室	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
	西北	直线加速器 7	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	顶板	夹层空调机房、水冷机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
直线加速器 7	东北	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东南	直线加速器 6	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	西北	直线加速器 8	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	顶板	夹层空调机房、正压送风机房、水冷机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6

辐射源项所在区域	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$, $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,max}$, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	H_c , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
直线加速器 8	东北	控制室	1	1	50	100	2.0	2.5	2.0
		防护门外	1/8	1	50	100	16.0	10	10.0
	东南	直线加速器 7	1/2	1	50	100	4.0	10	4.0
	西北	呼吸训练	1/4	1	50	5	0.4	10	0.4
		3D 打印补偿物制作	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6
	顶板	新风机房、正压送风机房、水冷机房	1/16	1	50	5	1.6	10	1.6

1.4.2.2 核医学屏蔽体外剂量率控制要求

核医学屏蔽体外剂量率控制要求执行 HJ 1188-2021 的有关规定：

“6.1.5 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv/h}$ 。”

“6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 $25\mu\text{Sv/h}$ 。”

1.4.2.3 DSA、ERCP 机房屏蔽体外剂量率控制要求

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）6.3.1 小节：

“a) 具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；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 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；

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 $25\mu\text{Sv/h}$ ，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 。”

综上，本项目 DSA 机房、ERCP 机房屏蔽体外周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

1.4.2.4 CT 机房屏蔽体外剂量率控制要求

参照《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）6.3.1 小节：

“a) 具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ；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 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ；

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 25 $\mu\text{Sv/h}$ ，当超过时应进行机房外人员的年有效剂量评估，应不大于 0.25 mSv。”

综上，本项目模拟 CT 机房、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房屏蔽体外周围剂量当量率应不大于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。

1.4.3 工作场所表面污染控制水平

本项目非密封放射性物质工作场所的放射性表面污染控制水平执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的有关规定，见表 1-7。

表 1-7 非密封放射性物质工作场所的表面放射性物质污染控制水平

表面类型		α 放射性物质， Bq/cm^2 （极毒性）	β 放射性物质， Bq/cm^2
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	4	40
	监督区	0.4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	0.4	4
	监督区		
手、皮肤、内衣、工作袜		0.04	0.4

1.4.4 非密封放射性物质工作场所分级

根据 GB18871-2002 表 C1，应按表 1-8 将非密封放射性物质工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级。放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量（Bq）与该核素毒性组别修正因子的积除以与操作方式有关的修正因子所得的商。

表 1-8 非密封放射性物质工作场所的分级

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

依据 HJ1188-2021 表 A.2，医疗机构使用发生器淋洗过程中，母体操作方式视为“贮存”，子体操作方式视为“简单操作”，放射性液体药物生产（分装、标记）操作方式视为“简单操作”。

1.4.5 核医学工作场所分类

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）表 G.1，核医学工作场所分类参照下表执行：

表 1-9 核医学工作场所分类一览表

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

1.4.6 核医学科工作场所安全措施要求

执行《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的规定：

“6.2.1 核医学工作场所的放射性核素操作设备的表面、工作台台面等平整光滑，室内地面与墙壁衔接处应无接缝，易于清洗、去污。

6.2.2 操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。应为从事放射性药物操作的工作人员配备必要的防护用品。放射性药物给药器应有适当的屏蔽，给药后患者候诊室内应设有铅屏风等屏蔽体，以减少对其他患者和医护人员的照射。

6.2.3 操作放射性药物的控制区出口应配有表面污染监测仪器，从控制区离开的人员和物品均应进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，应采取相应的去污措施。

6.2.4 放射性物质应贮存在专门场所的贮存容器或保险箱内，定期进行辐射水平监测，无关人员不应入内。贮存的放射性物质应建立台账，及时登记，确保账物相符。”

1.4.7 放射性三废控制要求

1.4.7.1 放射性废气控制要求

1.4.7.1.1 放射治疗机房放射性废气控制要求

本项目射线装置放射性废气的管理按照 HJ 1198-2021 执行，具体如下：

“8.4 气态废物管理要求

8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采用全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。

8.4.2 质子/重离子加速器停机后，加速器大厅应加强通风排气，采取措施使人员延时进入，以降低活化空气的感生放射性水平，减少人员受照剂量。”

另外，本项目射线装置放射性废气的管理还按照 GBZ 121-2020 执行，具体如下：

“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。

1.4.7.1.2 核医学放射性废气控制要求

本项目核医学放射性废气的管理按照 HJ 1188-2021 执行，具体如下：

“6.2.2 操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。

6.3.1 核医学工作场所应保持良好的通风，工作场所的气流流向应遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，

以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

6.3.2 使用回旋加速器制备放射性药物的工作场所应设有单独的通风系统，加速器自屏蔽区内应有单独排气管道，并相对加速器室呈负压状态。

6.3.4 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。

6.3.5 通风橱应有足够的通风能力。设有通风橱、手套箱等场所的通风系统排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。

7.2.2.2 放射性废物贮存场所应安装通风换气装置。

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

7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。”

另外，本项目核医学放射性废气的管理还按照 GBZ 120-2020 执行：

“5.2.3 核医学工作场所的通风按表 1 要求，通风系统独立设置，应保持核医学工作场所良好的通风条件，合理设置工作场所的气流组织，遵循自非放射区向监督区再向控制区的流向设计，保持含放射性核素场所负压以防止放射性气体交叉污染，保证工作场所的空气质量。合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5 m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。”

1.4.7.2 放射性废液

本项目的放射性废液主要包括质子治疗系统的活化冷却水以及核医学科排水管道及衰变池中的放射性废液。

上述放射性废液排放前需进行取样监测，满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）“表 2 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值（日均值）”中总 β 的排放标准要求（列于表 1-10），方可排放。

表 1-10 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值中总 β 的排放标准

控制项目	排放标准, Bq/L
总 β	10

此外，放射性废液需同时满足 GB 18871-2002 中的豁免水平方可排放。根据 GB 18871-2002，质子治疗系统及核医学科放射性废液中相关核素的豁免水平列于表 1-11 和表 1-12。

表 1-11 质子治疗系统放射性废液中相关核素的豁免水平

核素	豁免活度浓度, Bq/g	豁免活度, Bq
^3H	1E+06	1E+09
^7Be	1E+03	1E+07

表 1-12 核医学放射性废液中相关核素的豁免水平

核素	豁免活度浓度, Bq/g	豁免活度, Bq
^{18}F	1E+01	1E+06
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1E+02	1E+07

1.4.7.2.1 放射治疗机房放射性废液控制要求

本项目放射治疗机房放射性废液管理按照 HJ 1198-2021 执行，具体如下：

“8.3 液态废物管理要求

事故或检修状况下质子/重离子加速器的活化冷却水按照放射性废液管理要求妥善收集贮存，暂存衰变至低于豁免水平后可作为普通废液处理，并做好存档记录。”

1.4.7.2.2 核医学放射性废液控制要求

本项目核医学放射性废液管理按照 HJ 1188-2021 执行，具体如下：

“7.3.1 放射性废液收集

7.3.1.1 核医学工作场所应设置有槽式或推流式放射性废液衰变池或专用容器，收集放射性药物操作间、给药后患者卫生间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液。

7.3.1.2 核医学工作场所放射性药物标记、分装、注射后的残留液和含放射性核素的其他废液应收集在专用容器中。含有长半衰期核素的放射性废液应单独收集存放。盛放放射性废液的容器表面应张贴电离辐射标志。

7.3.1.3 核医学工作场所的上水需配备洗消处理设备（包括洗消液）。控制区和卫生通过间内的淋浴间、盥洗水盆、清洗池等应选用脚踏式或自动感应式的开关，以减少场所内的设备放射性污染。头、眼和面部宜采用向上冲淋的流动水。

7.3.1.4 放射性废液收集的管道走向、阀门和管道的连接应设计成尽可能少的死区，下水道宜短，大水流管道应有标记，避免放射性废液集聚，便于检测和维修。

7.3.2 放射性废液贮存

7.3.2.1 经衰变池和专用容器收集的放射性废液，应贮存至满足排放要求。衰变池或专用容器的容积应充分考虑场所内操作的放射性药物的半衰期、日常核医学诊疗及研究中预期产生贮存的废液量以及事故应急时的清洗需要；衰变池池体应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施。

7.3.3 放射性废液排放

7.3.3.1 对于槽式衰变池贮存方式：

a)所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放；

b)所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期，监测结果经审管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10 Bq/L。

7.3.3.3 放射性废液的暂存和处理应安排专人负责，并建立废物暂存和处理

台账，详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。”

1.4.7.3 放射性固体废物控制要求

本项目的放射性固体废物主要为质子治疗系统拆卸下来的活化部件、处理活化冷却水的废树脂、加速器靶及核医学科的废注射器、通风系统更换下来的过滤器等。

1.4.7.3.1 放射治疗机房放射性固体废物控制要求

本项目放射治疗机房放射性固体废物管理按照 HJ 1198-2021 执行，具体如下：

“8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固体废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。

8.2.2.2 低水平的活化部件如质子/重离子加速器治疗头器件、磁铁等，以及处理质子/重离子加速器冷却水的废树脂，集中放置在固体废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平的（放射性废物豁免的活度、活度浓度见附录 B）送交有资质的单位收贮。

8.2.2.3 建立放射性固体废物台账，存放及处置前进行监测，记录部件名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息，低于清洁解控水平的可作为一般固体废物处置，并做好存档记录。”

HJ 1198-2021 附录 B 表 B.1 列出了对放射治疗活动中可能产生的含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平，具体见下表。

表 1-13 部分含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平

核素	活度浓度 ^a （Bq/g）	活度浓度 ^b （Bq/g）	活度 ^b （Bq）
³ H	1E+02	1E+06	1E+09
¹⁴ C	1E+00	1E+04	1E+07

^{54}Mn	1E-01	1E+01	1E+06
^{55}Fe	1E+03	1E+04	1E+06
^{59}Fe	1E+00	1E+01	1E+06
^{58}Co	1E+00	1E+01	1E+06
^{60}Co	1E-01	1E+01	1E+05
^{59}Ni	1E+02	1E+04	1E+08
^{63}Ni	1E+02	1E+05	1E+08
a 固体物质的解控水平以及批量固体物质的解控水平。 b 小批量固体物质的豁免水平（通常适用于小规模使用放射性物质的实践，所涉及的数量最多为吨量级）。			

另外，根据 GB 18871-2002，如果存在一种以上的放射性核素，仅当各种放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比的和小于 1 时，才可能考虑给予豁免。

1.4.7.3.2 核医学放射性固体废物控制要求

本项目核医学放射性固体废物管理按照 HJ 1188-2021 执行，具体如下：

“7.2.1 固体放射性废物收集

7.2.1.1 固体放射性废物应收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶。废物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物。

7.2.1.2 含尖刺及棱角的放射性废物，应预先进行包装处理，再装入废物桶，防止刺破废物袋。

7.2.1.3 放射性废物每袋重量不超过 20kg。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至放射性废物暂存间贮存。

7.2.2 固体放射性废物贮存

7.2.2.1 产生少量放射性废物和利用贮存衰变方式处理放射性废物的单位，经审管部门批准可以将废物暂存在许可的场所和专用容器中。暂存时间和总活度不能超过审管部门批准的限制要求。

7.2.2.2 放射性废物贮存场所应安装通风换气装置。入口处应设置电离辐射警告标志，采取有效的防火、防丢失、防射线泄漏等措施。

7.2.2.3 废物暂存间内应设置专用容器盛放固体放射性废物袋（桶），不同类别废物应分开存放。容器表面应注明废物所含核素的名称、废物的类别、入库日期等信息，并做好登记记录。

7.2.2.5 废物暂存间内不得存放易燃、易爆、腐蚀性物品。

7.2.3 固体放射性废物处理

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 表面污染小于 0.08 Bq/cm^2 、 β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：

a)所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；

b)所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍；

7.2.3.2 不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1 mSv/h ，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 4 Bq/cm^2 、其他 α 发射体应小于 0.4 Bq/cm^2 。

7.2.3.3 固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息。

7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理。”

1.4.8 其他标准

1.4.8.1 X 射线设备防护性能的技术要求

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020），本项目 X 射线设备防护性能的技术要求具体如下：

“5.4 CT 设备防护性能的专用要求

5.4.1 在扫描程序开始之前，应指明某一扫描程序期间所使用的 CT 运行条件。

5.4.2 对于任意一种 CT 扫描程序，都应在操作者控制台上显示剂量信息。

5.4.3 应设置急停按钮，以便在 CT 扫描过程中发生意外时可以及时停止出束。”

“5.8 介入放射学、近台同室操作(非普通荧光屏透视)用 X 射线设备防护性能的专用要求

5.8.1 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类型的防护性能专用要求。

5.8.2 在机房内应具备工作人员在不变换操作位置情况下能成功切换透视和摄影功能的控制键。

5.8.3 X 射线设备应配备能阻止使用焦皮距小于 20cm 的装置。

5.8.4 介入操作中，设备控制台和机房内显示器上应能显示当前受检者的辐射剂量测定指示和多次曝光剂量记录。”

1.4.8.2 X 射线设备机房防护设施的技术要求

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020），本项目 X 射线设备机房防护设施的技术要求具体如下。

1.4.8.2.1 X 射线设备机房布局

“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。”

1.4.8.2.2 X 射线设备机房使用面积、单边长度

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020），本项目 X 射线设备机房最小有效使用面积、最小单边长度执行标准列于表 1-14。

表 1-14 X 射线设备机房（照射室）使用面积、单边长度执行标准

设备类型	机房内最小有效使用面积， m ²	机房内最小单边长度， m
CT 机	30	4.5
双管头或多管头 X 射线设备 （含 C 形臂）	30	4.5
单管头 X 射线设备（含 C 形 臂，乳腺 CBCT）	20	3.5
备注：本项目 DSA、ERCP 均按双管头 X 射线设备考虑。		

1.4.8.2.3 X 射线设备机房屏蔽

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020），本项目不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度执行标准列于表 1-15。

表 1-15 X 射线设备机房屏蔽防护铅当量厚度要求

设备类型	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 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、乳腺摄影机房、 乳腺 CBCT 机房	1.0	1.0
CT 机房、CT 模拟定位机房	2.5	

1.4.8.2.4 X 射线设备工作场所防护

“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。”

1.4.8.2.5 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 0.25 mmPb；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 1-16 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
放射诊断学 用 X 射线设 备同室透 视、摄影 ^a	铅橡胶围裙 选配：铅橡胶帽子、 铅橡胶颈套、铅橡胶 手套、铅防护眼镜	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	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	—
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	—
备注： ^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。				

1.4.8.3 X 射线设备操作的防护安全要求

对于 DSA、ERCP 设备操作的防护安全要求，按《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）执行，具体如下：

“ 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。

7.8.5 移动式 C 形臂 X 射线设备垂直方向透视时，球管应位于病人身体下方；水平方向透视时，工作人员可位于影像增强器一侧，同时注意避免有用线束直接照射。”

1.4.8.4 O₃和 NO_x排放标准

本项目 NO_x 排放限值参照执行《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）表 2 中硝酸使用及其他有组织氮氧化物排放限值，室内 O₃ 和 NO_x 浓度限值参照执行《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ2.1-2019）中工作场所空气中化学物质容许浓度限值，具体标准值见表 1-17。

表 1-17 O₃和 NO_x排放标准

污染物	排放标准		室内浓度限值	
	最高允许排放浓度，mg/m ³	最高允许排放速率（排气筒高度 15m），kg/h	最高容许浓度，mg/m ³	时间加权平均容许浓度，mg/m ³
O ₃	——	——	0.3	——
NO _x	240	0.77	——	5

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）“1.5 节评价范围和保护目标”中的相关规定“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边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围），对于 I 类放射源或 I 类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”。本项目使用的质子治疗装置为 I 类射线装置，其主要的辐射环境影响途径为瞬发辐射外照射以及

运行期间排入环境感生放射性气体对人员造成的照射。质子治疗装置辐射工作场所严格按照我国相关法规标准的要求进行辐射屏蔽设计,采用混凝土作为主屏蔽材料,确保工作场所屏蔽体外剂量率满足要求。在考虑距离衰减后,机房屏蔽边界外 100m 处的剂量率可降低近 4 个量级。且质子治疗装置感生放射性气体排放量较低,根据环境影响评价结论,感生放射性气体的排放对场所周围公众所致剂量均低于其剂量约束值。

综上所述,本项目质子治疗装置电离辐射环境影响评价范围取质子治疗装置辐射工作场所四周实体屏蔽体向外 100m 的范围,电子直线加速器、DSA、ERCp、模拟 CT 机、核医学科和 PET 药物制备区的电离辐射影响评价范围取辐射工作场所四周实体屏蔽体向外 50m 的范围,本项目电离辐射环境影响评价范围如表 1-18 和图 1-4 所示。

表 1-18 本项目电离辐射环境影响评价范围

类型	电离辐射环境影响评价范围	依据
质子治疗装置	机房四周实体屏蔽体 向外 100m 的范围	I 类射线装置
直线加速器、DSA、 ERCp、回旋加速器、模 拟 CT 机	机房四周实体屏蔽体 向外 50m 的范围	II、III类射线装置
核医学科、PET 药物制备 区	控制区用房四周屏蔽体 向外 50m 的范围	乙级非密封放射性物质工作 场所

1.5.2 环境保护目标

本项目电离辐射评价范围内无自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象,无居民小区、学校等环境敏感点。评价范围内的保护目标为评价范围内的辐射工作人员和公众,公众主要包括医院其他医护人员、陪同家属、院内和周边道路的流动人员,具体情况列于表 1-19~表 1-25。

表 1-19 质子治疗中心周围环境保护目标情况

辐射工作 场所	空间	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护 目标	人数
质子治疗 装置	地下二 层	东北	0~20	电梯、走廊、接待大厅等	公众	20
		西北	0~20	主控室、质子候诊区、质子治疗配套	公众、职	50

				用房、强电间、弱电间等	业	
			20~38	下沉式广场	公众	流动人群
			38~100	直加二区、放疗科、模具存储、维修库房、新风机房、回旋制药区、核医学科等	公众、职业	流动人群
	地下一层	西南	0~10	楼梯、合用前室、弱电间、排烟机房等	公众	10
		东北	0~20	咖啡吧、强弱电间、电梯厅、卡座区、质子重离子主入口大厅等	公众	30
		西北	0~28	质子配套用房、空调机房、质子备件库房、卫生间、餐厅等	职业、公众	50
			28~46	下沉式广场上空	/	/
			46~100	烹饪厨房、夹层机房、空调水泵房、冷冻机房等	公众	流动人群
		西南	0~21	不上人屋面	/	/
		东南	22~64	机动车停车	公众	流动人群
		楼上	相邻	不上人屋面	/	/

表 1-20 直线加速器机房周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标	人数
直线加速器 1	东南	0~4	控制室	职业	2
		4~36	走廊、楼梯、下沉式广场、前室等	公众	10
		36~50	土层	/	/
	西南	0~42	直线加速器 2~5	职业	8
		42~50	弱电、强电、维修库房、模具存储、走廊	公众	10
	东北	0~18	新风/排烟机房、电话机房、走廊	公众	10
		18~50	土层	/	/
	西北	0~26	新风/排烟机房、走廊、卫生间、更衣间、楼梯等	公众	20
		26~50	土层	/	/
	顶板	/	夹层机房	公众	5
	底板	/	结构空腔	/	/
直线加速器 2	东南	0~4	控制室	职业	2
		4~36	走廊、楼梯、电梯、下沉式广场、前室等	公众	10
		36~50	土层	/	/
	西南	0~31	直线加速器 3~5	职业	6
		31~50	弱电、强电、维修库房、模具存储、走廊、新风机房、卫生间、办公室、咨询室、茶水间、更衣室等	公众	30
	东北	0~11	直线加速器 1	职业	2
		11~29	新风/排烟机房、电话机房、走廊	公众	10

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标	人数
		29~50	土层	/	/
	西北	0~42	走廊、补风机房、库房、电梯、楼梯、核医学淋浴、洗衣/整衣、消毒、质检、无菌检测、阳性对照、热室、办公室、会议室等	公众	50
		42~50	土层	/	/
	顶板	/	夹层机房、水冷机房、补风机房	公众	5
	底板	/	结构空腔	/	/
直线加速器 3	东南	0~4	控制室	职业	2
		4~50	走廊、前室、下沉式广场、检查室、VIP 休息兼抢救室、卫生间、弱电、强电、休息区等	公众	50
	西南	0~21	直线加速器 4、5	职业	4
		21~50	弱电、强电、维修库房、模具存储、走廊、新风机房、卫生间、办公室、咨询室、茶水间、更衣室、护士站、放疗大厅等	公众	100
	东北	0~21	直线加速器 2、1	职业	4
		21~39	新风/排烟机房、电话机房、走廊	公众	10
		39~50	土层	/	/
	西北	0~50	走廊、核医学回旋加速器机房、控制室、水冷机房、热室、质检室、SPECT/CT 机房、控制廊、读片室、楼梯、地下停车场等	公众	30
	顶板	/	夹层机房、水冷机房、补风机房	公众	5
	底板	/	结构空腔	/	/
直线加速器 4	东南	0~4	控制室	职业	2
		4~50	走廊、下沉式广场、前室、货梯、楼梯等	公众	10
	西南	0~11	直线加速器 5	职业	2
		11~50	弱电、强电、维修库房、模具存储、走廊、新风机房、卫生间、办公室、咨询室、茶水间、更衣室、护士站、放疗大厅等	公众	100
	东北	0~32	直线加速器 3~1	职业	6
		32~50	新风/排烟机房、电话机房、走廊	公众	10
	西北	0~50	走廊、耗材储藏、配电、水冷机房、钢瓶、回旋加速器机房、医废间、PET/CT 机房、控制廊、留观、新风机房、电梯、地下停车场等	公众	40
	顶板	/	夹层机房、水冷机房、新风机房、补风机房	公众	5
	底板	/	结构空腔	/	/
直线加速器 5	东南	0~4	控制室	职业	2
		4~50	走廊、下沉式广场、质子候诊、更衣、强电、弱电、治疗头存储房间等	公众	20
	西南	0~50	弱电、强电、维修库房、模具存储、走廊、新风机房、卫生间、办公室、咨询室、茶水间、更衣室、护士站、放疗大厅、电梯、呼吸训练等	公众	100

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标	人数
	东北	37~50	直线加速器 8、控制室	职业	2
		0~41	直线加速器 4~1	职业	8
		41~50	新风/排烟机房、电话机房、走廊	公众	10
	西北	0~50	走廊、库房、污洗、淋浴、放射性废物间、分装/注射、分装/标记、注射后候诊、留观、地下停车场等	公众	50
	顶板	/	夹层机房、排烟机房、水冷机房、补风机房、冷库等	公众	10
	底板	/	结构空腔	/	/
直线加速器 6	东北	0~6	控制室	职业	2
		6~50	走廊、下沉式广场等	公众	10
	东南	0~19	卫生间、咨询室、电梯、茶水间、前室、新风机房等	公众	10
		19~50	土层	/	/
	西北	0~21	直线加速器 7、8	职业	4
		21~50	电梯、前室、3D 打印补偿物制作、熔铅室、合金模具制作、CT 模拟、VIP 等候等	公众	30
	西南	0~50	土层	/	/
	顶板	/	夹层空调机房、水冷机房	公众	5
	底板	/	结构空腔	/	/
直线加速器 7	东北	0~6	控制室	职业	2
		6~50	走廊、放疗大厅等	公众	50
	东南	0~11	直线加速器 6	职业	8
		11~30	卫生间、咨询室、电梯、茶水间、前室、新风机房等	公众	10
		30~50	土层	/	/
	西北	0~11	直线加速器 8	职业	2
		11~50	电梯、前室、3D 打印补偿物制作、熔铅室、合金模具制作、CT 模拟、VIP 等候、模具存储、卫生间等	公众	40
	西南	0~50	土层	/	/
	顶板	/	夹层空调机房、正压送风机房、水冷机房	公众	5
	底板	/	结构空腔	/	/
直线加速器 8	东北	0~6	控制室	职业	2
		6~50	走廊、放疗大厅、护士站、更衣、茶水间、卫生间、办公室、模具存储等	公众	100
	东南	0~21	直线加速器 7、6	职业	4
		21~40	卫生间、咨询室、电梯、茶水间、前室、新风机房等	公众	10
		40~50	土层	/	/
	西北	0~50	电梯、前室、3D 打印补偿物制作、熔铅室、合	公众	50

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标	人数
			金模具制作、CT 模拟、VIP 等候、模具存储、卫生间、地下停车场等		
	西南	0~5	结构空腔	/	/
		5~50	土层	/	/
	顶板	/	新风机房、正压送风机房、水冷机房	公众	5
	底板	/	结构空腔	/	/

表 1-21 核医学科周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标	人数
核医学科	南	0-11	核医学科患者注射前等候区、诊室	工作人员、患者及陪同亲友	数人
		11-50	电梯厅、放疗科区域	工作人员、患者及陪同亲友	数人
	东	0-13	过道、库房等	流动人员	数人
		13-45	PET 药物制备区、直线加速器机房区域	工作人员、患者及陪同亲友	数人
		45-50	下沉广场	流动人员	数人
	北	0-10	过道	流动人员	数人
	西	0-50	车位、机房、垃圾房等	流动人员	数人
	楼上	相邻	机房	流动人员	数人
	楼下	相邻	车位	流动人员	数人

表 1-22 PET 药物制备区周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标	人数
PET 药物制备区	南	0-10	PET 制药区回旋回旋加速器机房区域及其他区域	工作人员	数十人
		10-50	直线加速器机房及放疗科办公区域等	工作人员、患者及陪同亲友	数人
	东	0-6	PET 制药区过道、新风机房等	工作人员	数十人
		6-50	直线加速器机房区域、质子办公室等	工作人员、患者及陪同亲友	数人
	北	0-10	核医学医生办公区域	工作人员	数十人
	西	0-22	核医学科区域	工作人员、患者及陪同亲友	数人
		22-50	车位、机房、垃圾房等	流动人员	数人
	楼上	相邻	机房	流动人员	数人
	楼下	相邻	车位、机房	流动人员	数人

表 1-23 回旋加速器机房周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标人群	人数, 人
回旋加速器	南	0-14	PET 药物制备其他区域、核医学科区域	工作人员	数十人
		14-50	直线加速器机房、放疗科办公室	工作人员、患者及陪同亲友	数人
	东	0-9	控制室、PET 药物制备其他区域	工作人员	数十人
		9-45	直线加速器机房区域	工作人员、患者及陪同亲友	数人
		45-50	下沉广场	流动人员	数人
	北	0-26	PET 药物制备其他区域、核医学医生办公区域	工作人员	数十人
	西	0-25	PET 药物制备其他区域、核医学科区域	工作人员、患者及陪同亲友	数人
		25-50	车位、机房	流动人员	数人
	楼上	相邻	机房	流动人员	数人
	楼下	相邻	车位、机房	流动人员	数人

表 1-24 DSA 机房周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标人群	人数, 人
地上四层手术中心 2 号 DSA 机房	东北	0~44	走廊、医更厕、排烟机房、缓冲间、休息室等	公众	流动人群
	西北	0~24	1 号手术室、设备间、库房、值班室、缓冲间、冷冻切片、专家示教等房间	公众	30
	西南	0~3	控制间	职业	5
		3~30	走廊、手术室、无菌库等	公众	30
	东南	0~50	手术室、手术药房、手术器械、设备库、手术控制室、库房、护士站等	公众	流动人群
	楼上	相邻	上人屋面	公众	10
	楼下	相邻	试剂准备间、样本制作间	公众	10
地上四层手术中心 7 号 DSA 机房	东北	0~2.5	控制室、设备间	职业	5
		2.5~50	洁净走廊、手术器械、手术药房、移动 CT、缓冲间、处置室、保洁室等	公众	流动人群
	西北	0~40	手术室、走廊、更衣间、卫生间、电梯厅等	公众	流动人群
	西南	0~19	手术室、走廊、准备室、污物间	公众	50
	东南	0~16	合用前室、消防梯、洁品库等	公众	20
	楼上	相邻	净化机房大厅	公众	10
	楼下	相邻	手术供应中转库	公众	10
地上四层手术	东北	0~2.5	设备间、控制室	职业	5

中心 11 号 DSA 机房		2.5~50	走廊、卫生间、手术室、库房、值班室、会议室、电梯厅等	公众	流动人群
	西北	0~2.5	走廊	公众	10
	西南	0~9	12 号手术室、设备库、走廊	公众	30
	东南	0~40	走廊、手术室、强电间、弱电间、楼梯等	公众	50
	楼上	相邻	净化机房大厅	公众	5
	楼下	相邻	预留用房	公众	5

表 1-25 ERCP 机房周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护 目标人群	人数， 人
地上三层内镜 中心 ERCP 机 房	北	0~8	走廊、净化机房、排烟机房、正压机房	公众	10
	南	0~50	走廊、C-13 呼气实验、自助区、等候区、电梯厅、空调机房（大厅+会议新风）等	公众	流动人群
	西	0~3	控制室、储藏室	职业	5
		3~50	走廊、缓冲间、气管镜、麻醉恢复间、护士站、等候区、病理科区域等	公众	流动人群
	东	0~27	肠胃机房、走廊、储镜、办公区域	公众	50
	楼上	相邻	走廊、ICU 治疗 2 房间	公众	10
	楼下	相邻	标本库、UPS 机房、常温库	公众	10

表 1-26 模拟 CT 机房周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护 目标人群	人数， 人
地下二层放疗 科模拟 CT 机 房	北	0~50	走廊、体位固定、注射室、抢救室、库房、车库等	公众	流动人群
	南	0~3	控制廊	职业	5
		3~17	合金模具制作、3D 打印补偿物制作、结构空腔	公众	10
	西	0~50	VIP 等候区、MRI 模拟机房、走廊、排风机房等	公众	流动人群
	东	0~50	走廊、前室、质控库房、放疗大厅、下沉式广场等	公众	流动人群
	楼上	相邻	车道、设备物资库房	公众	10
	楼下	相邻	停车位	公众	10

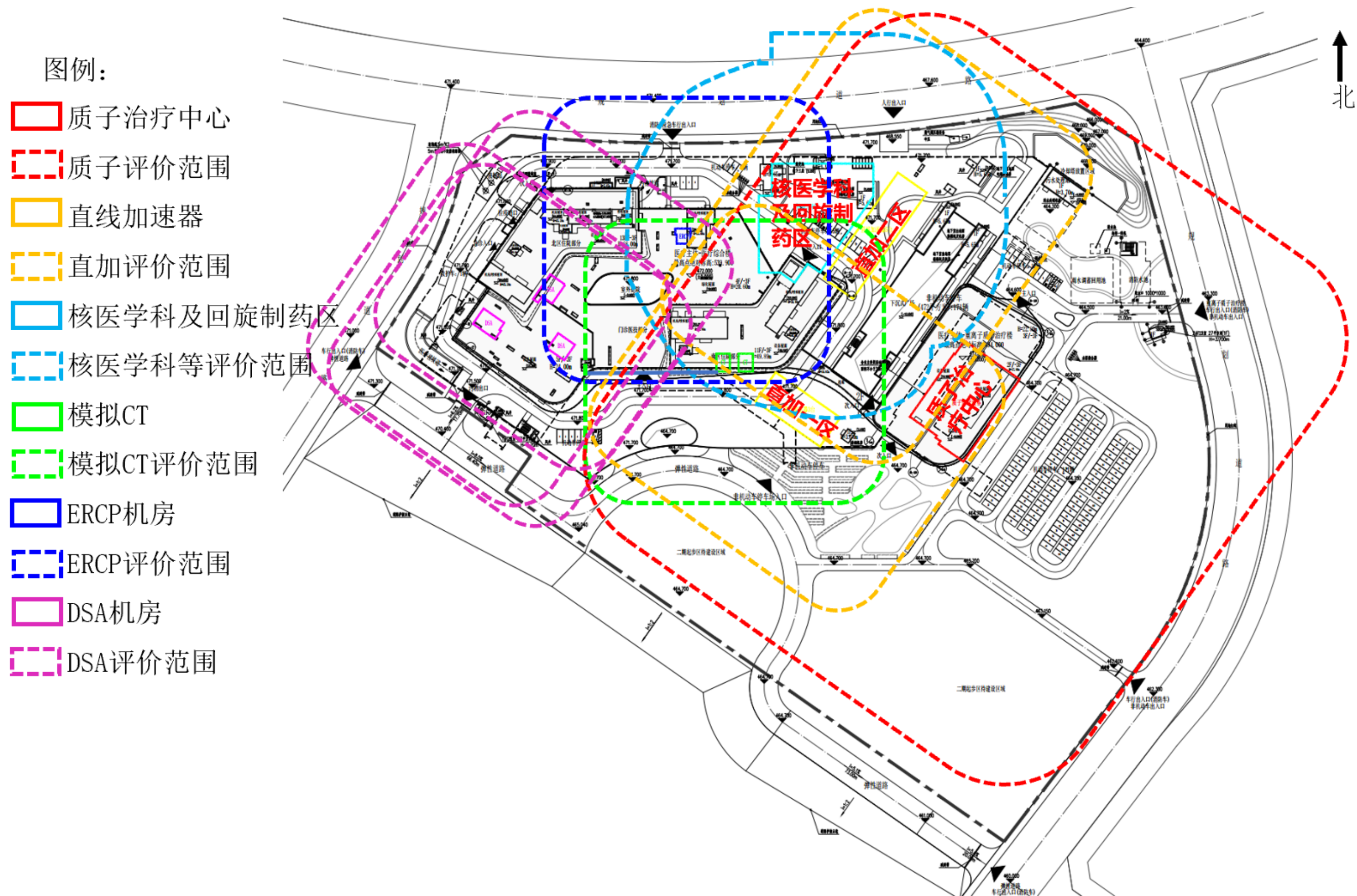


图 1-4 本项目电离辐射评价范围示意图

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

成都市双流区位于成都市西南郊，地理位置介于东经 $103^{\circ} 47'$ — $104^{\circ} 15'$ 、北纬 $30^{\circ} 13'$ — $30^{\circ} 40'$ 。东连龙泉驿区和简阳市，南接眉山市仁寿县和彭山区，西邻新津区和崇州市，北靠温江区、青羊区、武侯区及锦江区。

本项目地理位置图和周边关系图见图 1-1 和图 1-2。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

地处成都平原东南边缘，位于龙泉山脉中段西侧。地貌有低山、丘陵、平原、台地。最高点为三星镇云崖村，海拔 988.1 米，最低点为黄龙溪镇皇坟村四组（原陈新村大河滩），海拔 423 米，地形最大相对高差 565.1 米。双流境内主要有两大山脉，龙泉山和牧马山。其中龙泉山源起罗江县瓦店乡青龙羌峡，是东北向西南走向的狭长褶皱构造低山，长 210 千米，宽 10—18 千米。龙泉山从龙泉驿区柏合镇入县境，经太平、合江、三星、大林 4 个镇，到双青桷出境入仁寿县。山脉经东升、西航港、黄甲、胜利、公兴、永安、黄龙溪等镇（街道），绵延入新津区至彭山区双河口止，共长 35 千米，宽约 11 千米。山脉走向由西北至东南，山势平缓微倾，县境段海拔 423~592 米。

2.2.2 气候气象

建设地点属四川盆地中亚热带季风湿润气候区。由于东亚大陆冬夏季风交替明显和受青藏高原东麓特殊地形的影响，以及四川盆地北面秦岭山脉的屏障作用，形成全年皆温和，无酷暑严寒，常年降水丰富，光热水集中，春夏日照足，秋冬云雾多，四季分明，无霜期长的气候特点。

2.2.3 水文

境河流属岷江水系，多集中分布于平原地区，流向近于由北东向南西。主要河流有金马河、锦江、江安河、杨柳河、清水河、白河和鹿溪河，河流总长为 117.65 千米。

2.3 社会环境概况

2.3.1 人口分布

2018 年，双流区（含托管区）户籍人口 131.7 万人，常住人口 146.5 万人。

2018 年，双流区（不含托管区）常住人口达 79.38 万人。

2019 年末，双流区户籍人口 65.21 万人，其中城镇人口 41.65 万人，乡村人口 23.56 万人；全区常住人口 81.46 万人，城镇化率 83.17%；全年出生人口 10918 人，死亡人口 4668 人，人口自然增长率为 13.15%，全区符合政策生育率为 99.88%。

根据第七次人口普查数据，截至 2020 年 11 月 1 日零时，双流区常住人口为 1465785 人。

2.3.2 社会发展

2019 年，双流区认定通过高新技术企业 89 家，总数达 209 家。截止 2019 年底，高新技术产业实现产值 923.3 亿元；实现技术合同交易额 43.98 亿元；全区建有各级创新平台 156 个，其中国家级 24 个、省级 57 个、市级 73 个。

2019 年末，双流区城市道路长 596.82 公里，建成区面积 116 平方公里，道路面积 1139.64 万平方米，其中人行道面积 238.73 万平方米。绿化覆盖面积 5768.34 公顷，公园绿地服务半径覆盖的居住用地面积 916.76 公顷，公园 9 个。

2.3.3 经济发展

2019 年，双流区实现地区生产总值 962.05 亿元，增长 8.8%，其中一产业增加值 18.39 亿元，增长 2.6%，二产业增加值 311.04 亿元，增长 8.4%，三产业增加值 632.62 亿元，增长 9.2%，三次产业比为 1.9:32.3:65.8，三次产业对经济增长的贡献率分别为 0.6%、38.6%、60.8%。固定资产投资增长 16.9%；规模以上工业增加值增长 9.4%；全口径财政收入 224.01 亿元，增长 4.1%，其中一般公共预算收入 67.73 亿元，增长 12.1%，地方税收收入 57.02 亿元，增长 11.1%；社会消费品零售总额 223.37 亿元，增长 10.5%；城镇居民人均可支配收入 48588 元，增长 8.9%；农村居民人均可支配收入 29458 元，增长 9.6%；按常住人口计算，人均地区生产总值 119628 元，增长 6.6%。

2020 年，双流实现地区生产总值 1612.23 亿元，增长 3.8%；其中一产业增加值 41.88 亿元，下降 0.2%；二产业增加值 433.53 亿元，增长 8.0%，三产业增加值 1136.82 亿元，增长 1.9%，三次产业比为 2.6:26.9:70.5；固定资产投资增长 12.2%；规模以上工业增加值增长 8.3%；社会消费品零售总额 645.02 亿元，下降 3.2%；一般公共预算收入 159.42 亿元，增长 13.6%，地方税收收入 143.92 亿元，增长 15.0%；进出口总额 837.67 亿元，增长 14.0%。

2.4 环境质量和辐射现状

2.4.1 辐射环境质量现状监测与评价

为了解本项目拟建场址（以下简称“拟建场址”）及周围环境的辐射环境现状，评价单位委托中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室对项目拟建场址及周围环境进行了辐射环境现状调查。监测报告见附件 5。

2.4.1.1 监测内容

根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征，本次辐射环境现状调查选取的监测对象为外照射、土壤和地表水。辐射环境现状监测对象和监测项目列于表 2-1。

质子治疗装置运行期间的辐射场为中子和 γ 辐射混合场，因此外照射监测内容包括环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率。

表 2-1 监测对象和项目

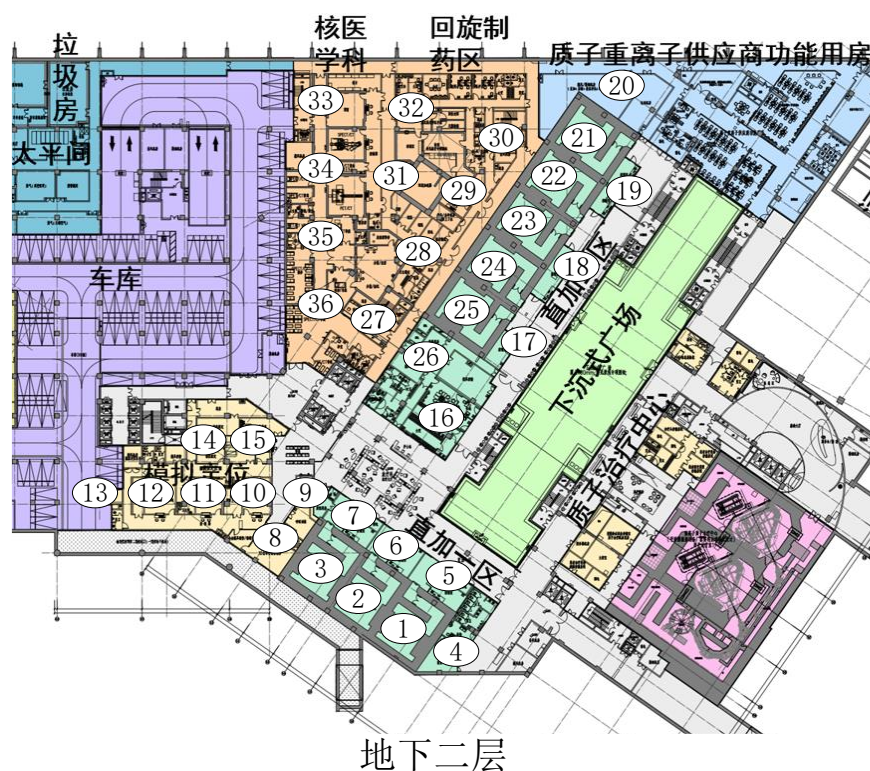
序号	监测对象	监测项目
1	外照射	环境地表 γ 辐射剂量率
		中子周围剂量当量率
2	土壤	^7Be 、 ^{22}Na 、 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、总 α 、总 β 活度浓度
3	地表水	^3H 、 ^7Be 、 ^{22}Na 、 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、总 α 、总 β 活度浓度

2.4.1.2 监测/取样点位

环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围当量剂量率的监测点位见图 2-1~图 2-4。由监测点位可知，在项目拟建场址、场址周围环境以及场址周边均设置了监测点位，能够反映拟建场址及邻近环境的辐射环境本底水平。因此，监测点位布设是符合相关标准规定的。

土壤样品取样点位为医院出入口和质子治疗场所。在取样点位采集土壤表层样品，使用土壤采集器，在 $10 \times 10\text{m}^2$ 范围内，采用梅花五点法采集，条件不具备时用蛇型布样采集，每点采 $10 \times 10\text{cm}^2$ 的表层土样（1~5cm），在现场充分混合，去除石头、草根等杂物后取 3kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。土样送实验室开展放射性分析。

地表水取样点位位于永安湖，样品容器选用聚乙烯塑料桶（取 ^3H 样时应采用硬质玻璃容器）。采集工具先用洗涤剂除去油污、用自来水冲洗干净，再用 10% 硝酸或者盐酸洗刷，用自来水冲洗干净后使用。往盛水容器中按 10mL 酸/L 水样加入浓 HNO_3 使水样 pH 为 1.5 左右，避免器壁对放射性的吸附。（监测 ^3H 的水样品不能加酸）。样品送实验室开展放射性分析。



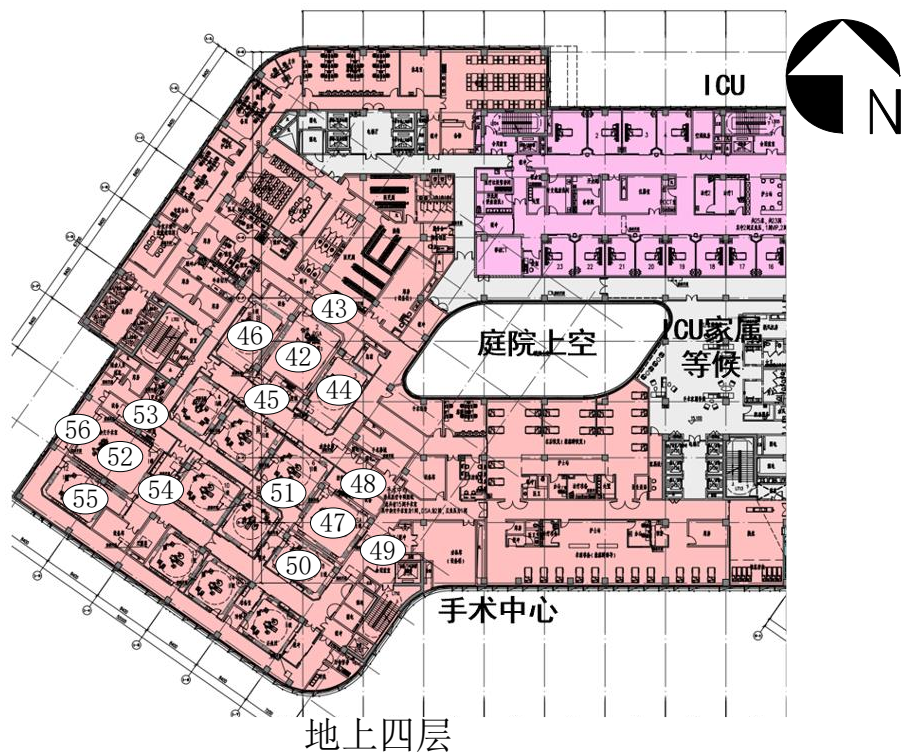
图例 ① 外照射剂量率监测点位

图 2-1 地下二层环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位图



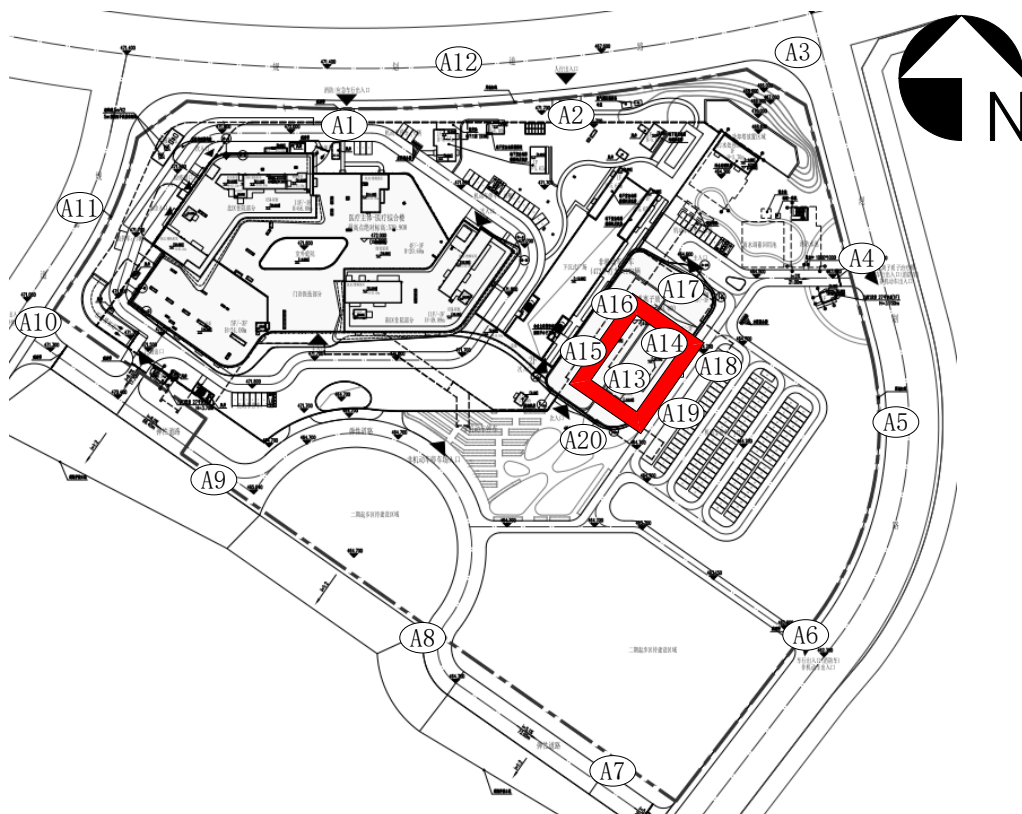
图例 ① 外照射剂量率监测点位

图 2-2 地上三层环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位图



图例 ① 外照射剂量率监测点位

图 2-3 地上四层环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位图



图例 ① 外照射剂量率监测点位

图 2-4 质子治疗场所及周围环境监测点位图

2.4.1.3 监测设备和监测方法

2.4.1.3.1 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-2。现场监测时间为 2023 年 3 月 13 日，监测、分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

表 2-2 仪器设备及性能指标

仪器名称及型号	仪器型号	监测时检定有效日期	主要技术性能指标
辐射测量仪	FH40G+FBZ672 E-10	2023.8.23	测量范围：10nGy/h~100μGy/h； 能量范围：48keV~6MeV； 相对响应之差：<±15%。 校准因子 1.14
中子周围剂量当量率仪	LB123+LB6411	2024.1.2	测量范围：热中子~20MeV； 校准因子 1.1
高纯锗 γ 能谱仪	BE3830P	2023.3.23	分辨力 3keV 相对误差≤10.0%
低本底 α、β 测量仪	LB-4	2023.5.29	本底计数率： $\alpha \leq 0.0040 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^2$ ； $\beta \leq 0.16 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^2$ 。 效率： $\alpha \geq 67.7\%$ ； $\beta \geq 56.8\%$ 。 重复性： $\alpha \leq 2.1\%$ ； $\beta \leq 1.9\%$ 。 串道比： $\alpha \leq 2.0\%$ ； $\beta \leq 0.03\%$ 。
低本底 α、β 测量仪	BH1227	2024.3.18	本底计数率： $\alpha \leq 0.0037 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^2$ ； $\beta \leq 0.09 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^2$ 。 效率： $\alpha \geq 77\%$ ； $\beta \geq 59.9\%$ 。 重复性： $\alpha \leq 1.1\%$ ； $\beta \leq 0.9\%$ 。 串道比： $\alpha \leq 1.3\%$ ； $\beta \leq 0.02\%$ 。
液闪谱仪	Quantulus 1220	2024.10.23	相对误差≤4.0% 短期稳定性 0.1% 重复性 0.4%

2.4.1.3.2 监测方法

监测方法列于表 2-3。

表 2-3 监测方法

序号	监测对象	监测方法	标准依据
----	------	------	------

1	环境地表 γ 辐射剂 量率	采用网格均匀布点的方式布设环境地表 γ 辐射剂量率监测点位，共计 76 个监测点位。采用便携式监测仪表，以定点测量方式进行。每个监测点位测量 10 次，监测结果取平均值。	《辐射环境监测技术规范》（HJ/T 61-2021）； 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）。
2	中子周围 剂量当量 率	采用网格均匀布点的方式布设，共计 76 个监测点位。采用中子剂量当量率仪，以定点测量的方式进行。	
3	土壤	分别在指定的点位取表层土壤，使用土壤采集器，在 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 范围内，采用梅花五点法采集，条件不具备时采用蛇形布样采集，每点采 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 的表层土样（1~5cm），在现场充分混合，除去石块、草根的杂物后取约 3kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。土壤样品送实验室预处理后采用低本底 α 、 β 测量仪进行总 α 、总 β 活度浓度测量，采用高纯锗 γ 谱仪测量 γ 核素活度浓度。	《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》（GB/T11713-2015）； 《土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法》（GB/T 11743-2013）。
4	地表水	在河流中间取 100L 样品，在实验室处理后，采用低本底 α 、 β 测量仪进行总 α 、总 β 活度浓度测量， ^7Be 、 ^{22}Na 、 ^{51}Cr 和 ^{54}Mn 采用高纯锗 γ 能谱仪进行活度浓度测量。 ^3H 采用 8ml 样品+12ml 闪烁液直接测量。	《水中氚的分析方法》（HJ 1126-2020）； 《水质 总 α 放射性的测定 厚源法》（HJ 898-2017）； 《水质 总 β 放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）； 《水中放射性核素的 γ 能谱分析方法》（GB/T 16140-2018）。

2.4.1.4 质量保证措施

- （1）监测单位具备所监测项目的资质；
- （2）合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性；
- （3）针对各类样品的采集，监测单位制定了操作规程，要求参加采样人员在实施采样前充分了解，并在采样过程中严格执行；
- （4）采样器符合国家技术标准的规定，使用前须检验并确认其性能良好后方可采样，保证采样器和样品容器的清洁，防止交叉污染；
- （5）采样后按规定方法进行暂存或预处理，并尽快送往实验室，做好样品交接工作；
- （6）监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格

证书上岗；

(7) 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用；

(8) 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；

(9) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；

(10) 监测报告严格实行三级审核制度，经过校验、审核，最后由技术总负责审定。

2.4.1.5 监测结果

2.4.1.5.1 外照射

本项目拟建场址及周围环境的环境地表 γ 辐射剂量率和中子剂量当量率监测结果见表 2-4。

表 2-4 本项目拟建场址内环境地表 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

监测点位	楼层	场所	γ^* nGy/h	n $\mu\text{Sv/h}$
A1	建筑外	周边	64.1±6.4	<LLDn
A2			62.3±6.2	<LLDn
A3			56.1±5.6	<LLDn
A4			52.5±5.2	<LLDn
A5			58.0±5.8	<LLDn
A6			62.5±6.3	<LLDn
A7			41.6±4.2	<LLDn
A8			38.2±3.8	<LLDn
A9			54.4±5.4	<LLDn
A10			52.4±5.2	<LLDn
A11			44.5±4.5	<LLDn
A12			54.2±5.4	<LLDn
A13		质子中心拟建场址	63.5±6.4	<LLDn
A14			59.5±6.0	<LLDn
A15			52.5±5.3	<LLDn
A16			56.8±5.7	<LLDn
A17			62.8±6.3	<LLDn
A18			53.7±5.4	<LLDn
A19			51.6±5.2	<LLDn

监测点位	楼层	场所	γ^* nGy/h	n $\mu\text{Sv/h}$
A20			58.9±5.9	<LLDn
1	地下二层	直加一区拟建场址	64.3±6.4	<LLDn
2			67.0±6.7	<LLDn
3			63.7±6.4	<LLDn
4			66.8±6.7	<LLDn
5			61.7±6.2	<LLDn
6			64.5±6.5	<LLDn
7			67.3±6.7	<LLDn
8		模拟定位拟建场址	65.2±6.5	<LLDn
9			65.5±6.6	<LLDn
10			68.4±6.8	<LLDn
11			68.9±6.9	<LLDn
12			69.5±6.9	<LLDn
13			72.4±7.2	<LLDn
14			67.5±6.8	<LLDn
15			73.5±7.4	<LLDn
16		直加二区拟建场址	74.2±7.4	<LLDn
17			70.6±7.1	<LLDn
18			69.7±7.0	<LLDn
19			68.8±6.9	<LLDn
20			69.4±6.9	<LLDn
21			74.1±7.4	<LLDn
22			77.1±7.7	<LLDn
23			79.0±7.9	<LLDn
24			71.8±7.2	<LLDn
25			70.0±7.0	<LLDn
26			70.4±7.0	<LLDn
27		核医学科回旋制药区拟建场址	72.6±7.3	<LLDn
28			74.4±7.4	<LLDn
29			73.1±7.3	<LLDn
30			78.5±7.9	<LLDn
31			80.5±8.1	<LLDn
32			69.9±7.0	<LLDn
33			72.4±7.2	<LLDn
34			74.5±7.5	<LLDn
35			73.2±7.3	<LLDn
36			75.2±7.5	<LLDn
37	地上三层	内镜中心拟建场址	68.4±6.8	<LLDn
38			72.7±7.3	<LLDn
39			70.2±7.0	<LLDn
40			71.9±7.2	<LLDn

监测点位	楼层	场所	γ^* nGy/h	n $\mu\text{Sv/h}$
41			70.7±7.1	<LLDn
42	地上四层	手术中心拟建场址	79.6±8.0	<LLDn
43			78.3±7.8	<LLDn
44			80.9±8.1	<LLDn
45			88.3±8.8	<LLDn
46			82.6±8.3	<LLDn
47			86.7±8.7	<LLDn
48			83.4±8.3	<LLDn
49			87.0±8.7	<LLDn
50			81.7±8.2	<LLDn
51			79.9±8.0	<LLDn
52			83.8±8.4	<LLDn
53			79.8±8.0	<LLDn
54			85.2±8.5	<LLDn
55			82.3±8.2	<LLDn
56			78.4±7.8	<LLDn

注：*监测结果扣除宇宙射线响应值 11.0nGy/h；

LLD_n是中子周围剂量当量率的 Lower Limit of Detection；

LLD_n=0.05μSv/h。

由上表可知，本项目拟建场址内监测点的地表 γ 辐射剂量率水平在（38.2~87.0）nGy/h 范围（扣除宇宙射线响应值 11.0nGy/h）内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限。根据《2021 年全国辐射环境质量报告》（中华人民共和国生态环境部，2022 年），四川省环境地表 γ 辐射空气吸收剂量率年均值范围为 67.0~120.2nGy/h。本项目拟建场址及周围环境地表 γ 辐射剂量率水平监测结果处于四川省环境地表 γ 辐射空气吸收剂量率范围内，项目周围环境的辐射环境质量现状无异常。

2.4.1.5.2 土壤

拟建场址土壤样品中放射性分析测量结果见下表 2-5。

表 2-5 土壤样品中放射性监测结果，Bq/kg

取样点	监测项目	监测结果
医院出入口土壤	总 α	(5.31±0.33)E+02 Bq/kg
	总 β	(8.27±0.15)E+02 Bq/kg
	^7Be	≤LD=1.5 Bq/kg

	^{22}Na	$\leq \text{LD}=3.2\text{E}-01 \text{ Bq/kg}$
	^{51}Cr	$\leq \text{LD}=1.5 \text{ Bq/kg}$
	^{54}Mn	$\leq \text{LD}=1.7\text{E}-01 \text{ Bq/kg}$
质子治疗场所土壤	总 α	$(5.11\pm 0.30)\text{E}+02 \text{ Bq/kg}$
	总 β	$(7.65\pm 0.16)\text{E}+02 \text{ Bq/kg}$
	^7Be	$\leq \text{LD}=2.4 \text{ Bq/kg}$
	^{22}Na	$\leq \text{LD}=3.7\text{E}-01 \text{ Bq/kg}$
	^{51}Cr	$\leq \text{LD}=3.3 \text{ Bq/kg}$
	^{54}Mn	$\leq \text{LD}=2.6\text{E}-01 \text{ Bq/kg}$

注：LD 为仪器探测限。

监测结果表明，项目拟建场址土壤样品中总 α 、总 β 及相关核素的活度浓度水平未见异常。

2.4.1.5.3 地表水

拟建场址地表水样品中放射性分析测量结果见表 2-6。

表 2-6 地表水中总 α 、总 β 及相关核素的活度浓度分析结果

取样点	监测项目	监测结果
永安湖地表水	^3H	$\leq \text{LD}=2.0 \text{ Bq/L}$
	总 α	$\leq \text{LD}=3.9\text{E}-02 \text{ Bq/L}$
	总 β	$(2.72\pm 0.09)\text{E}-01 \text{ Bq/L}$
	^7Be	$\leq \text{LD}=1.7\text{E}-02 \text{ Bq/L}$
	^{22}Na	$\leq \text{LD}=1.6\text{E}-03 \text{ Bq/L}$
	^{51}Cr	$\leq \text{LD}=1.4\text{E}-02 \text{ Bq/L}$
	^{54}Mn	$\leq \text{LD}=1.3\text{E}-03 \text{ Bq/L}$

注：LD 为仪器探测限。

监测结果表明，项目拟建场址地表水中总 α 、总 β 及相关核素的活度浓度水平未见异常。

2.4.2 场址适宜性评价

本项目选址位于成都市双流区永安镇付家坝社区 1 组，项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响射线装置稳定运行和安全使用的颠覆性因素。

结合本项目特征辐射污染因子和电离辐射环境影响评价范围，区域周边环境相对简单，评价范围内无居民区、学校等敏感目标，条件较好。

环境现状调查结果表明，项目拟建场址及周围环境的辐射环境质量良好，环境电离辐射水平均处于当地天然本底波动范围内。

综上所述，本项目选址适宜开展所申请的核技术利用活动。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

3.1.1 项目规模

本项目拟建住院楼、医疗综合楼、重离子质子治疗楼连体建筑，建设总用地面积 68562.52 平方米，总建筑面积约 146761.75 平方米，其中：

（1）医疗综合楼为地下三层、地上五层建筑，包括：

①地下三层：车库、排烟机房、补风机房、电梯厅、直线加速器结构空腔等房间；

②地下二层：库房及设备机房、垃圾房、太平间、车库、核医学科、直线加速器区、模拟定位区、质子重离子供应商功能用房等房间；

③地下一层：车库、变电所、设备机房、信息科、物料管理、病案科、药库、员工餐厅、烹饪厨房、物业库等房间；

④地上一层：消防控制室/安防室、急诊、放射科、综合服务、室外庭院、功能检查、大厅、门诊及住院药房、商业配套等房间；

⑤地上二层：门诊单元、办公区、日间化疗、配液中心、检验科等房间；

⑥地上三层：预留用房、病理科、设备物资库房、手术供应中转库、内镜中心、行政办公区等房间；

⑦地上四层：手术中心、ICU、输血科；

⑧地上五层：医院办公区、净化机房、排烟机房、AGV 自走车用房、上人屋面、设备转换层等房间。

（2）住院楼位于医疗综合楼上，分为南北两区，北区住院楼为地上六至十三层建筑，南区住院楼为地上六至十一层建筑，包括：

①北区住院楼

地上六至九层：办公区、抢救间、治疗间、处置间、标准护理单元、备餐区、病人活动区等房间；

地上十至十三层：办公区、抢救间、治疗间、处置间、特需护理单元、备餐区、病人活动区等房间；

②南区住院楼

地上六至八层：标准护理单元、办公区、备餐区、仪器间、库房、被服库、抢救间、治疗间、处置间等房间；

地上九至十层：特需护理单元、办公区、备餐区、仪器间、库房、被服库、抢救间、治疗间、处置间等房间；

地上十一层：VIP 护理单元、办公区、备餐区、仪器间、库房、被服库、抢救间、治疗间、处置间等房间。

(3) 重离子质子治疗楼为地下三层，局部地上三层建筑，包括：

①地下三层：回旋加速器基坑、机架室 1 和机架室 2；

②地下二层：质子治疗层，布置回旋加速器大厅、能量选择隧道、束流传输隧道、2 间治疗室，以及相应的控制室和配套机房等；

③地下一层：对外餐厅、质子配套用房、2 间治疗室上空、CT 机房设备间、质子重离子主入口大厅；

④地上一层：东南侧为不上人屋面，西北侧为物管用房、扩大前室、走道、楼梯、电梯等房间；

⑤地上二层：西侧为与医疗综合楼相连的连廊、门厅、楼梯、排烟机房等房间，北侧和东侧布置院方功能用房；

⑥地上三层：院方功能用房、休息就餐区、开放办公区、露台等房间。

本项目各层平面布局图见下图。



图 3-1 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地下三层平面布局图

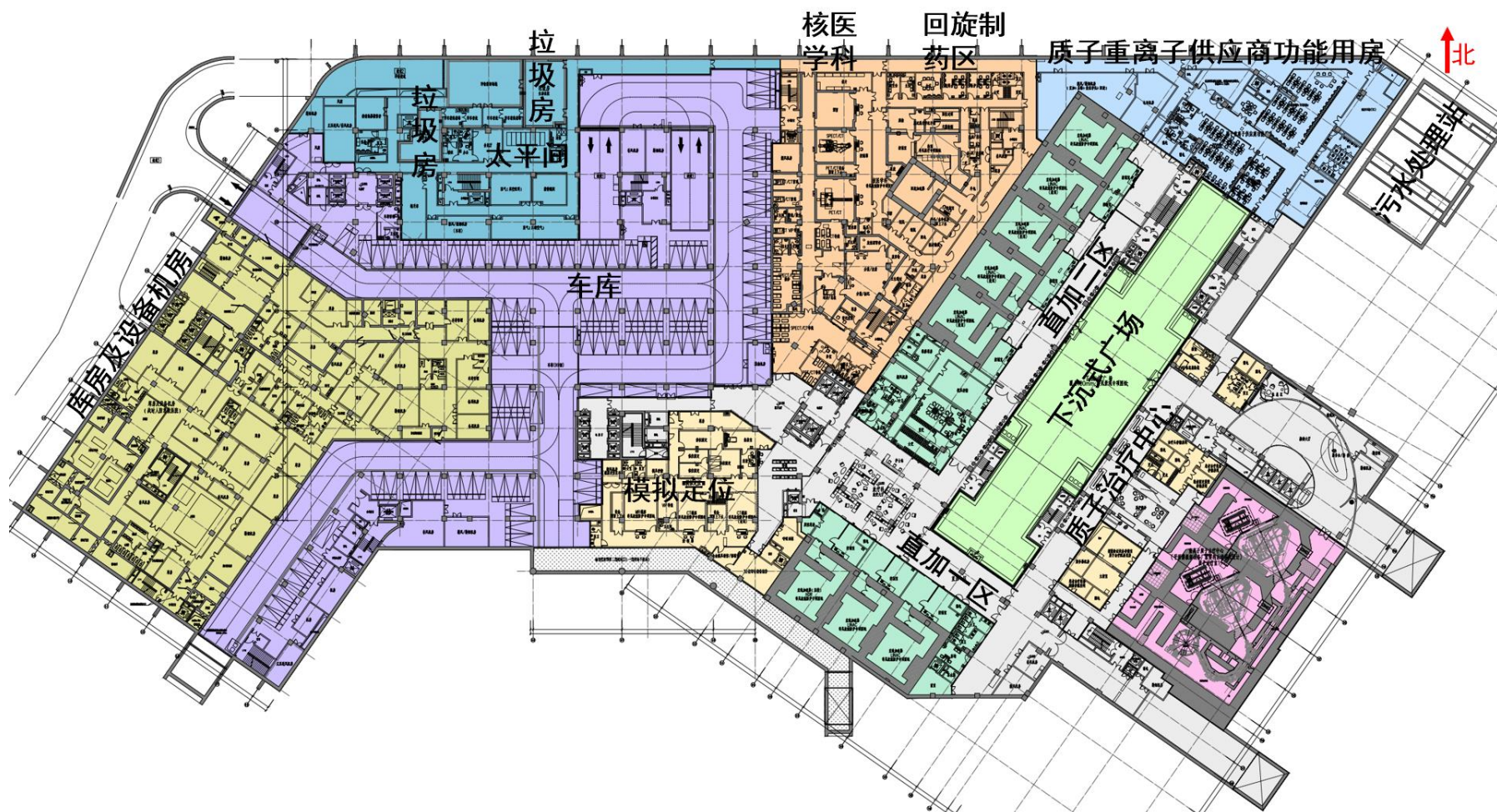


图 3-2 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地下二层平面布局图

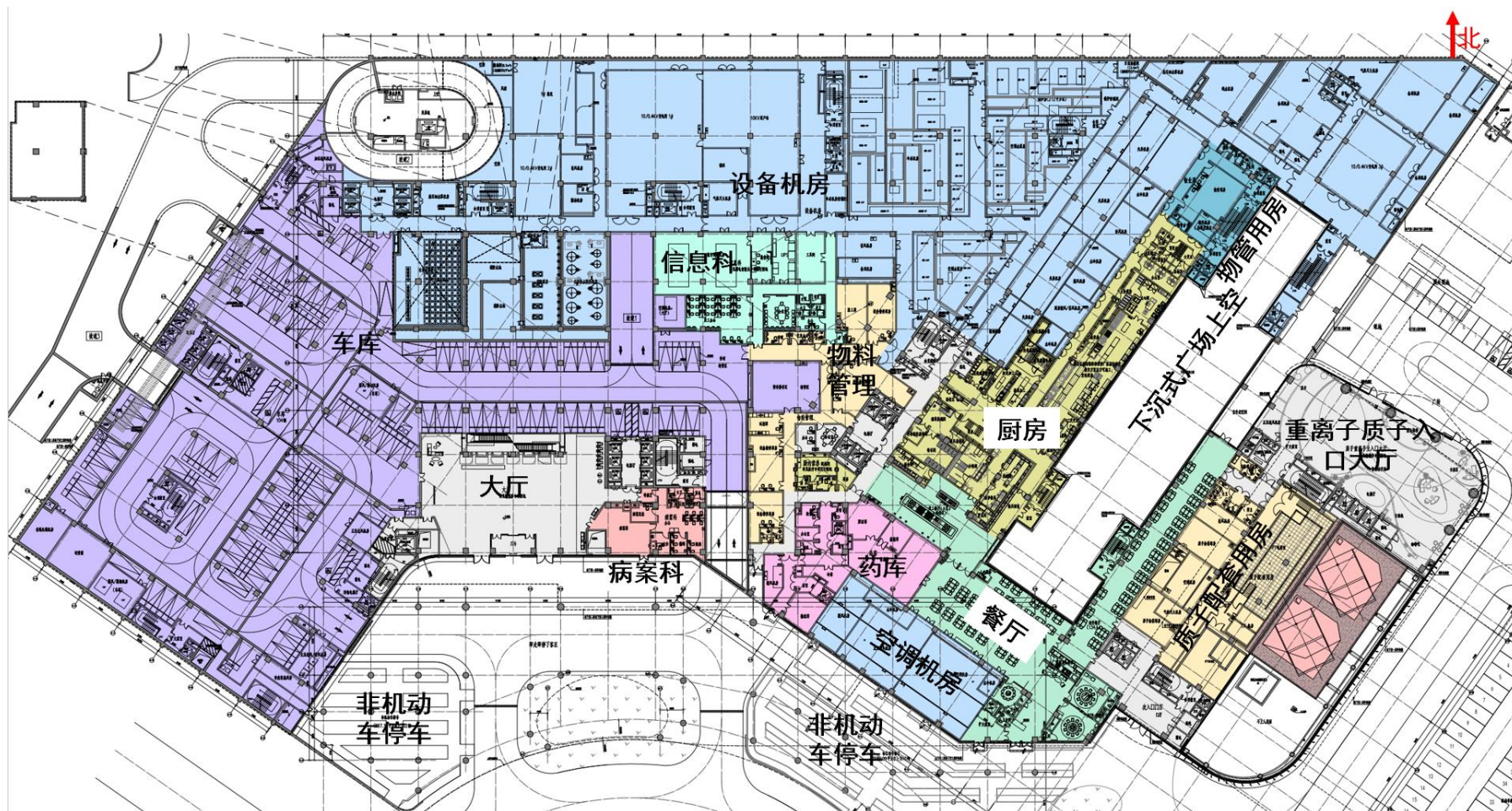


图 3-3 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地下一层平面布局图

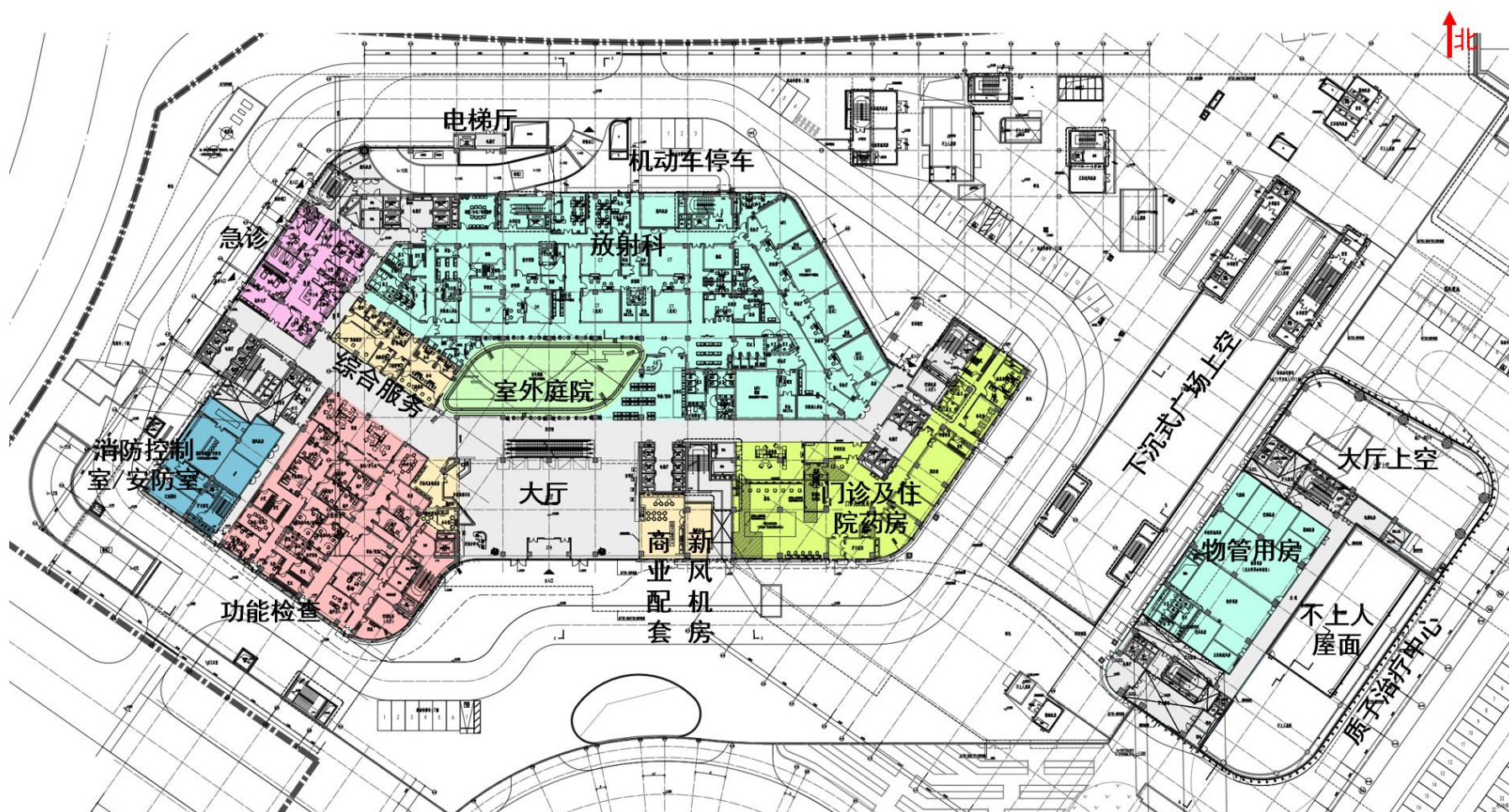


图 3-4 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地上一层平面布局图

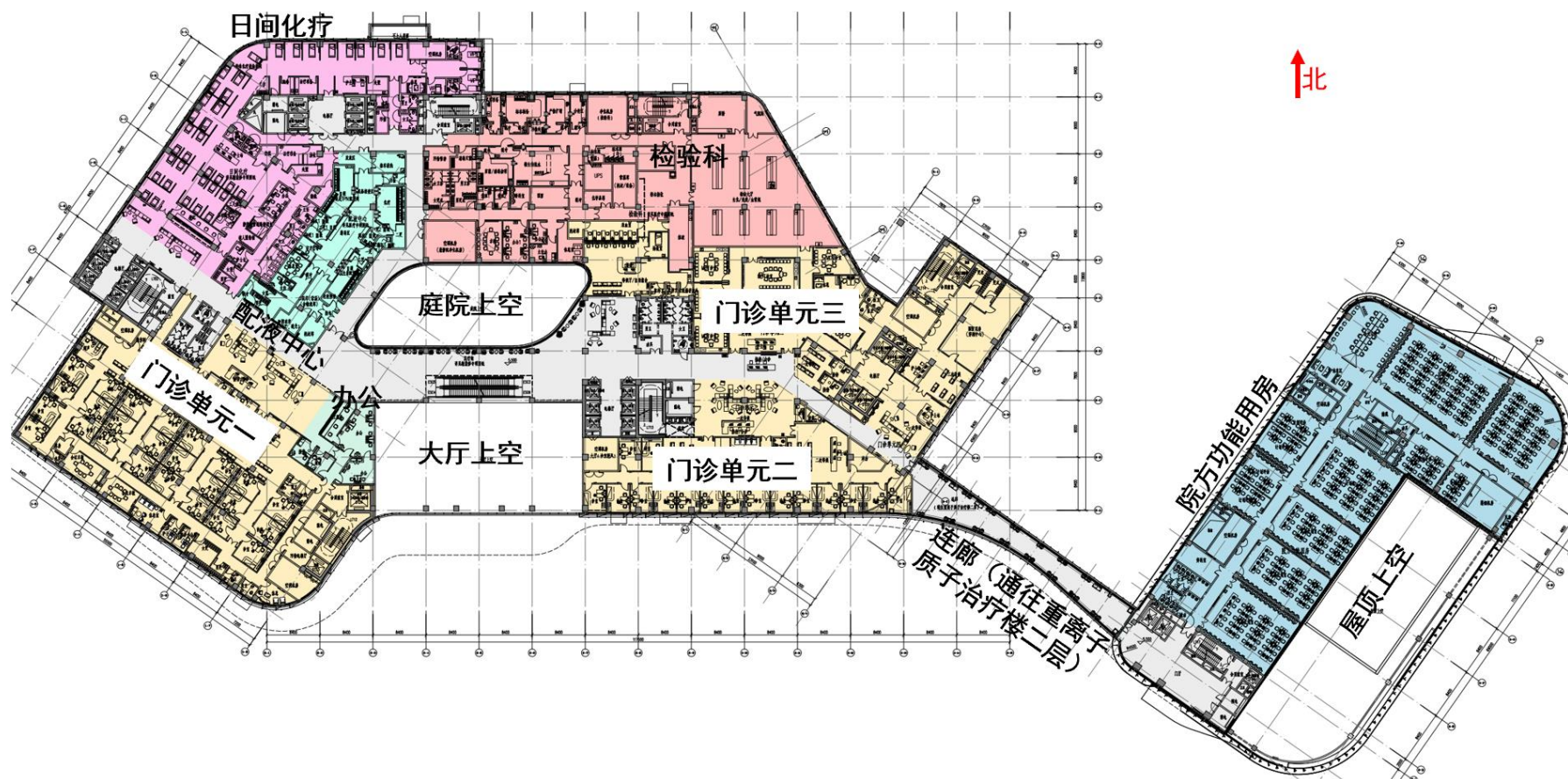


图 3-5 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地上二层平面布局图

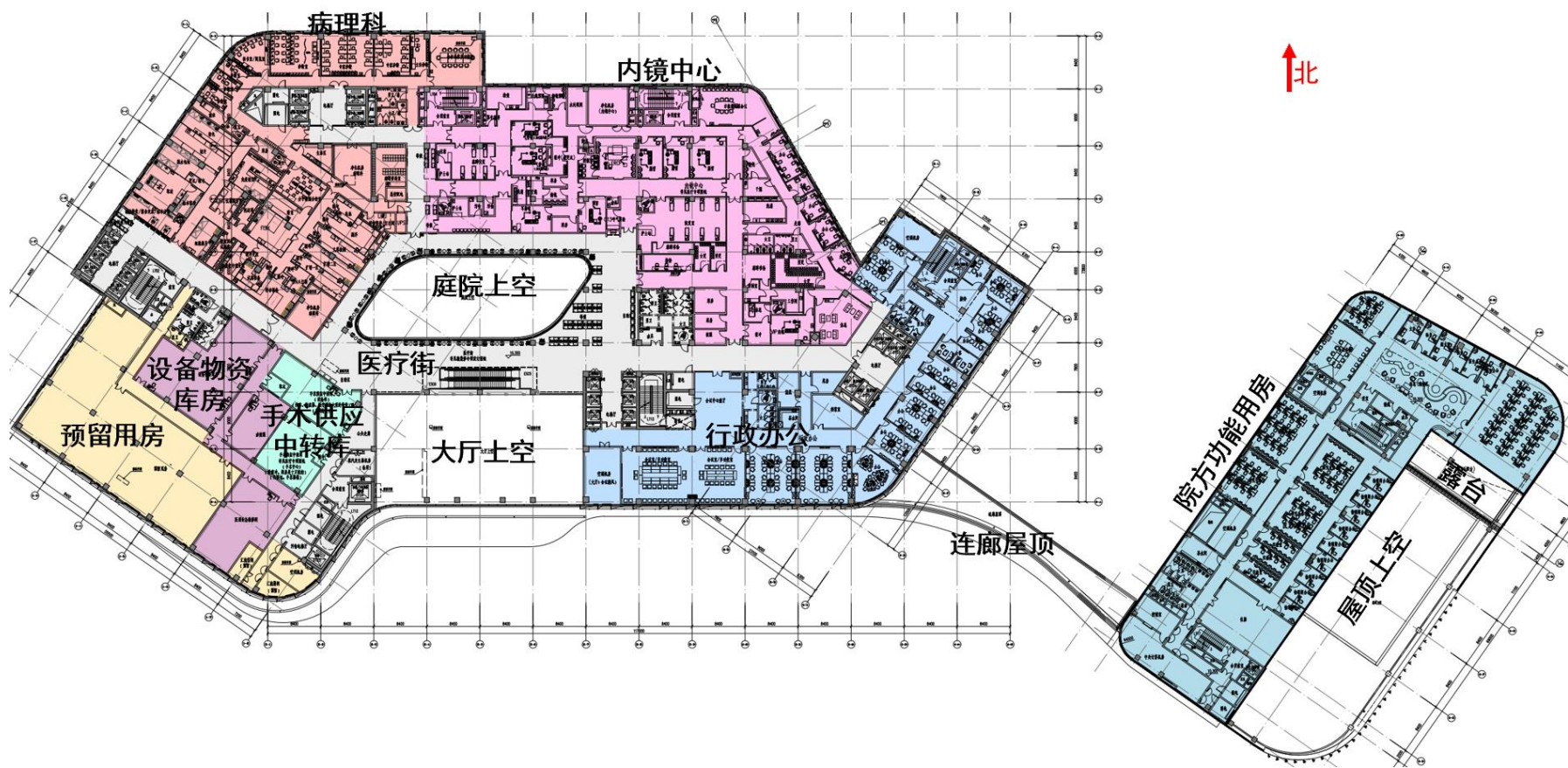


图 3-6 医疗综合楼和重离子质子治疗楼地上三层平面布局图

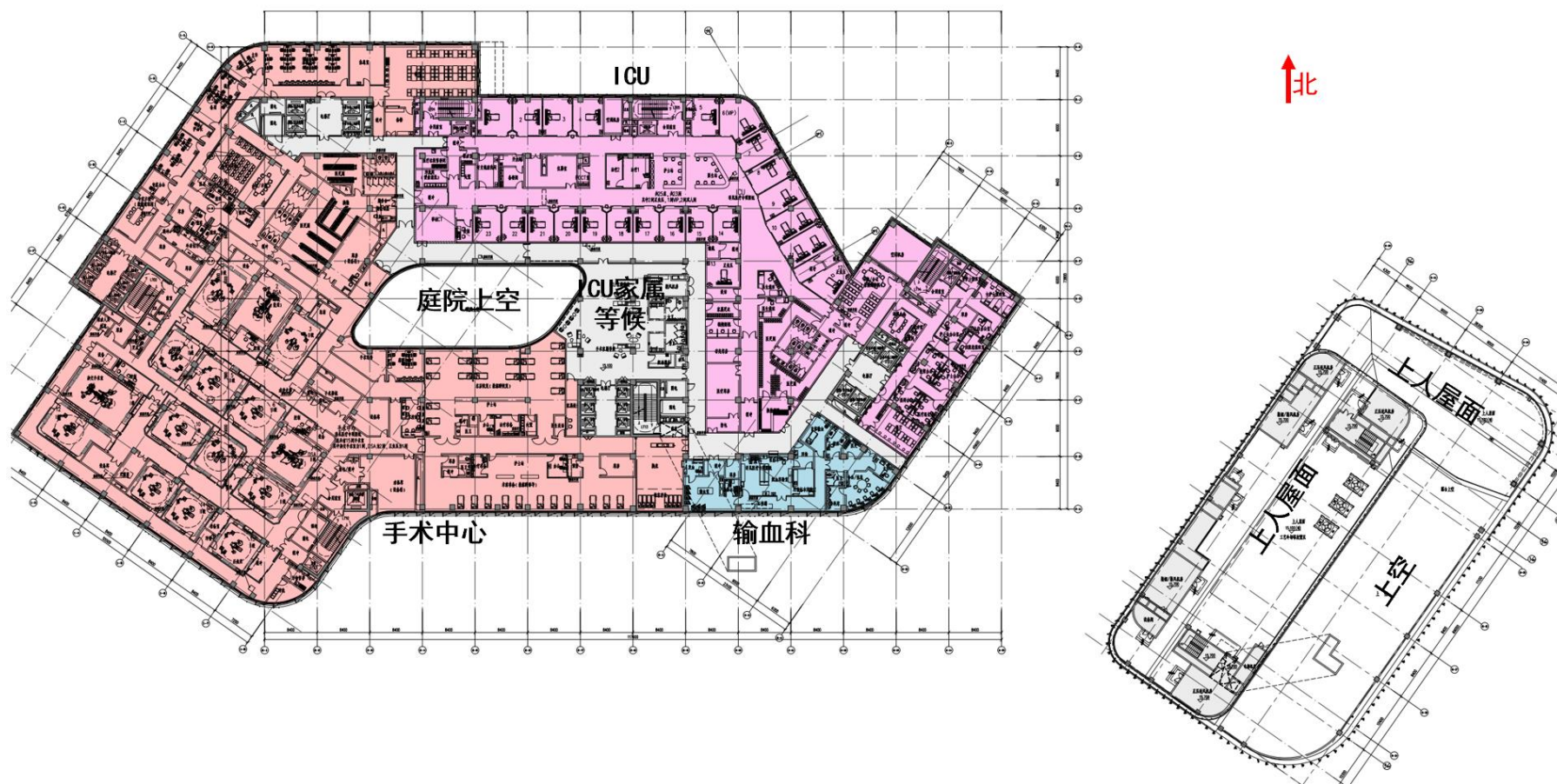


图 3-7 医疗综合楼地上四层和重离子质子治疗楼屋顶层平面布局图

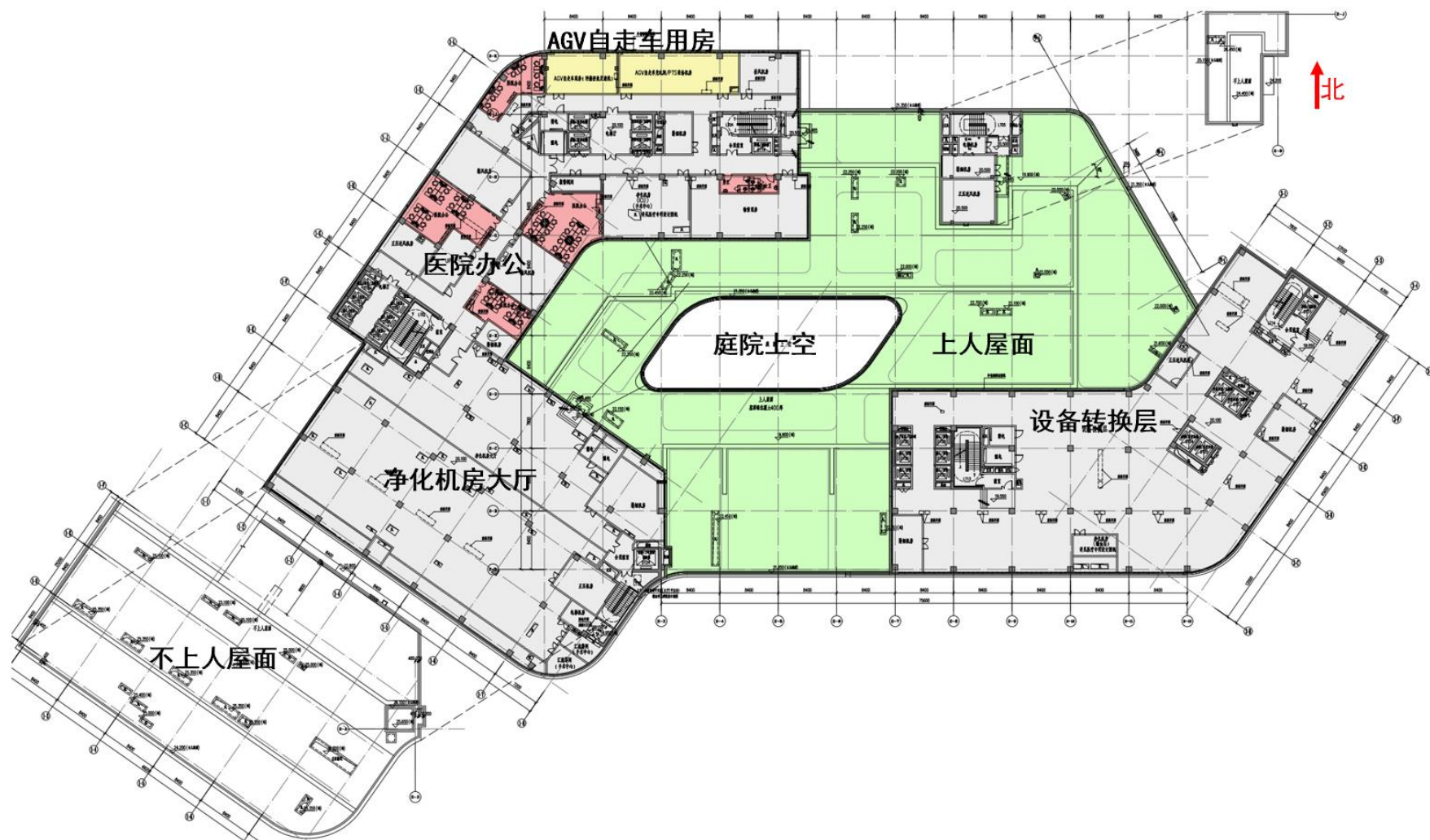


图 3-8 医疗综合楼地上五层平面布局图



图 3-9 北区住院楼六至九层平面布局图



图 3-10 北区住院楼十层至十三层平面布局图

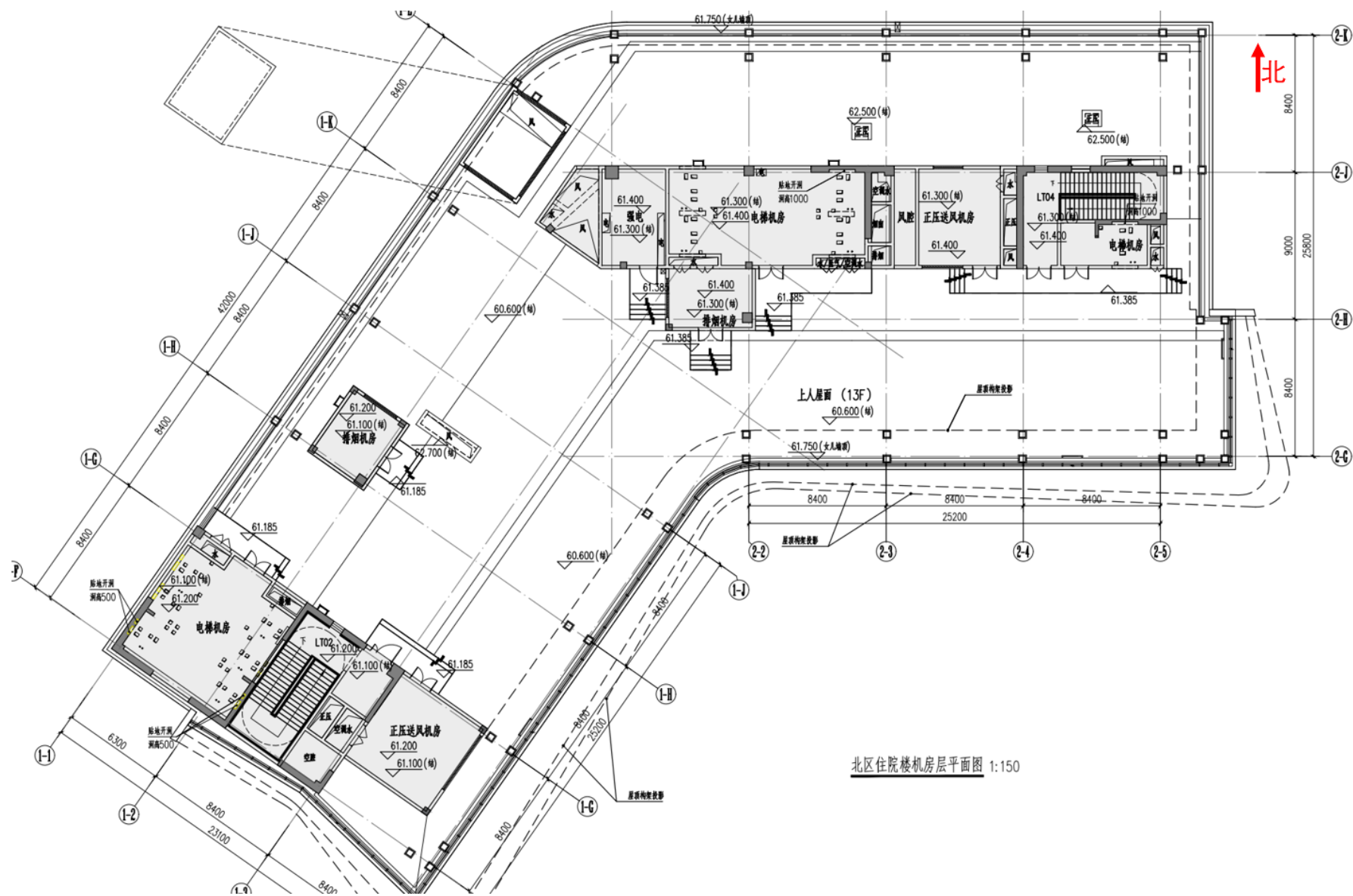


图 3-11 北区住院楼机房层平面图

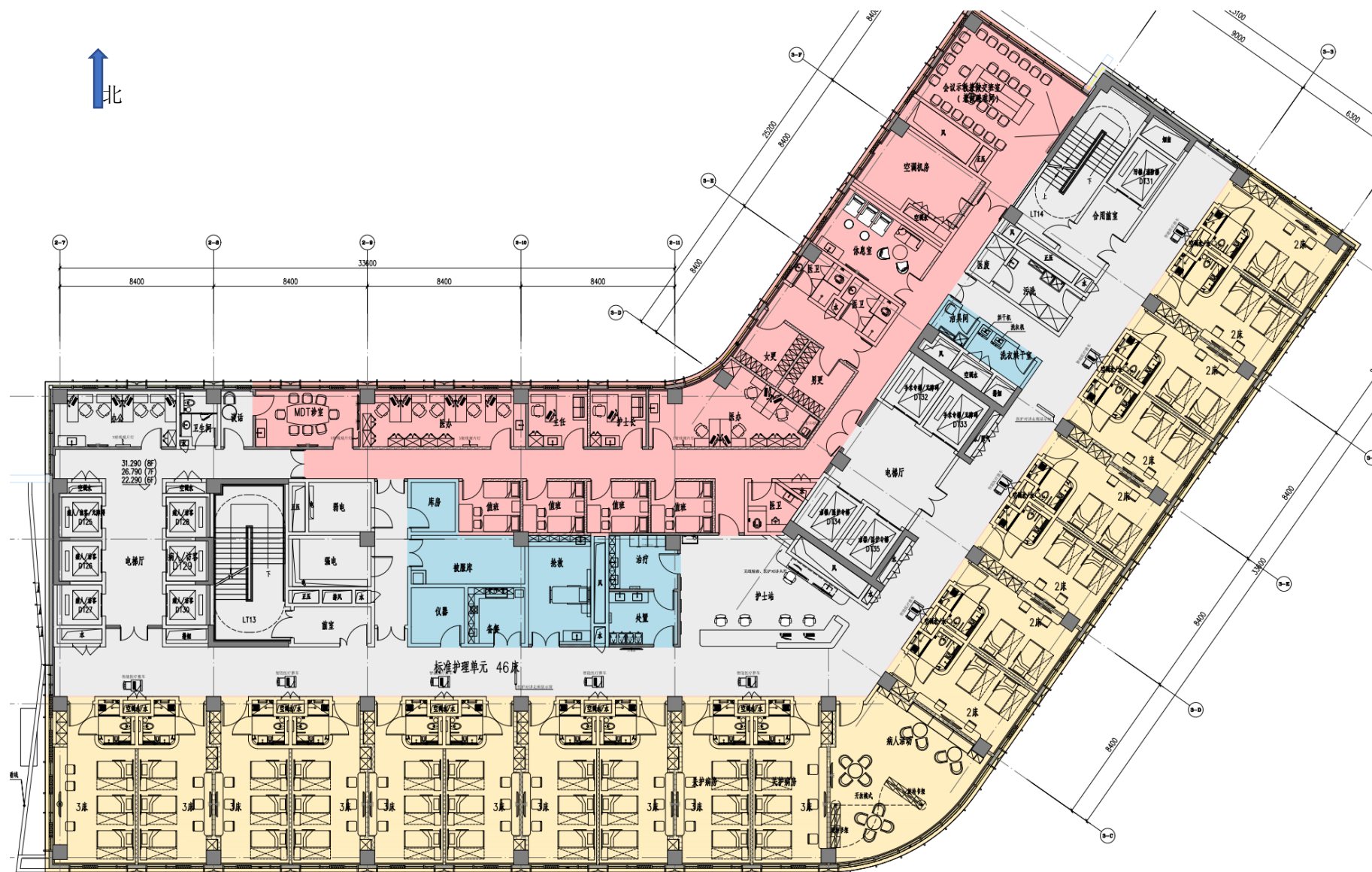


图 3-12 南区住院楼六层至八层平面布局图

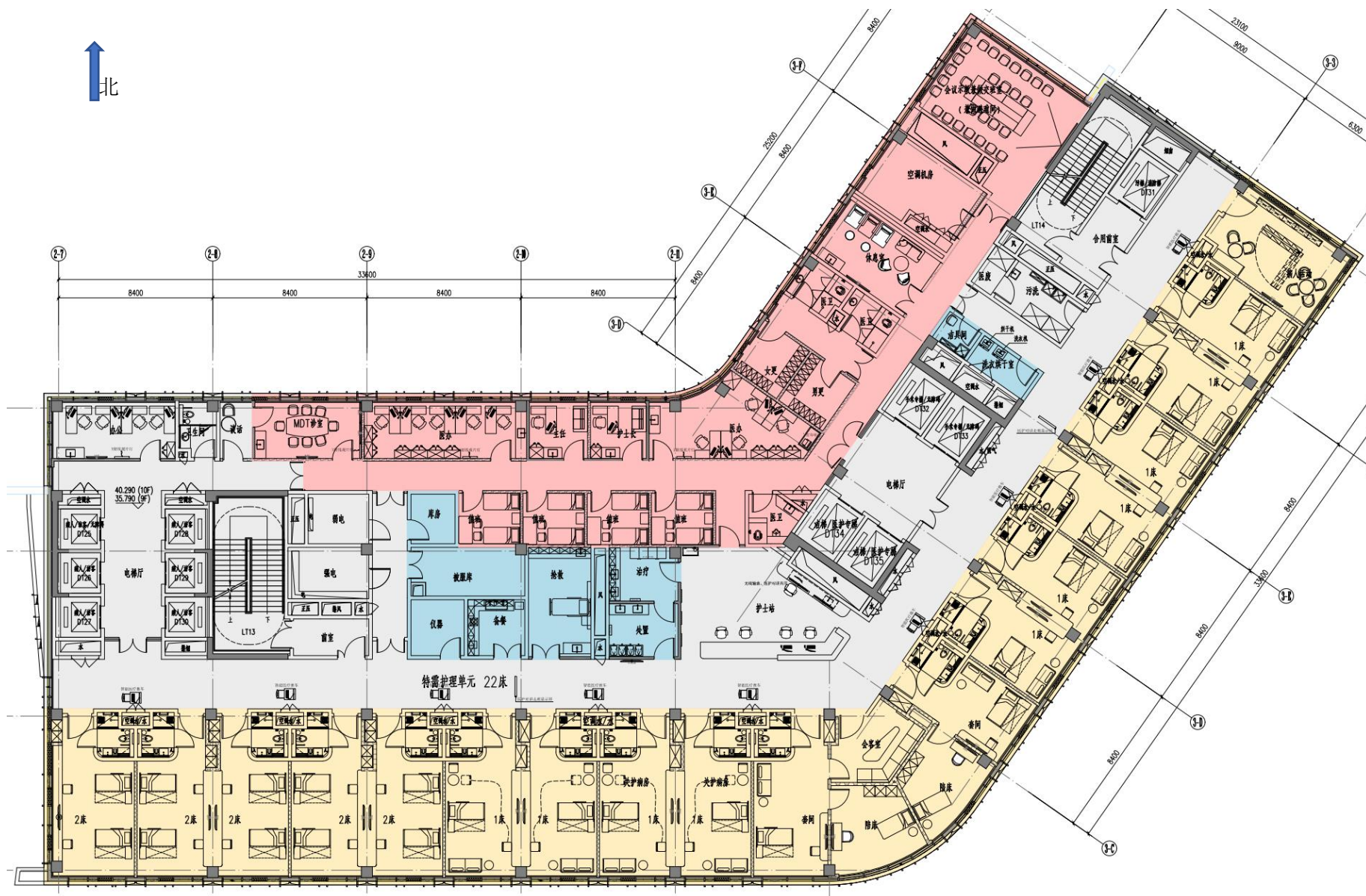
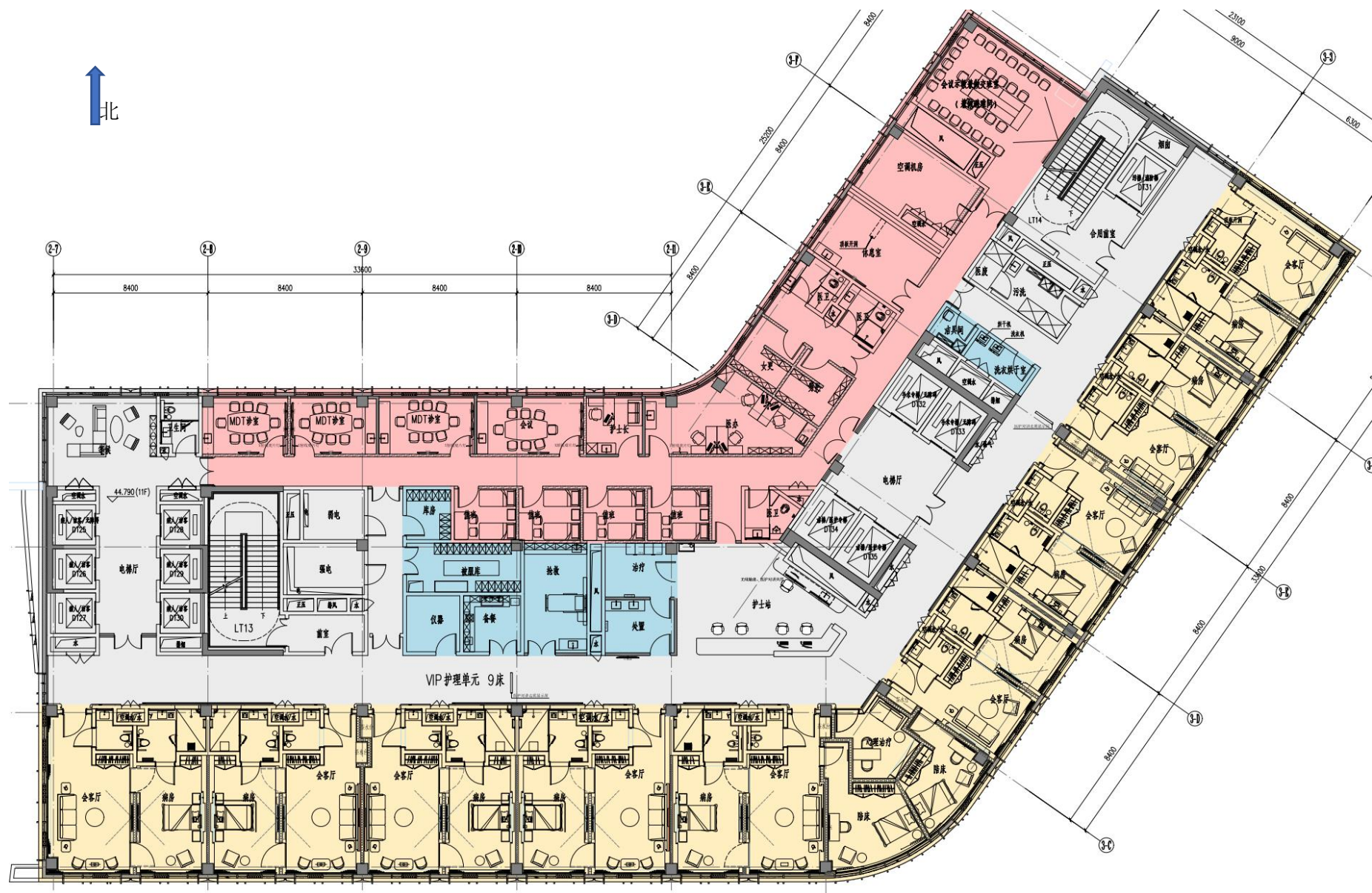
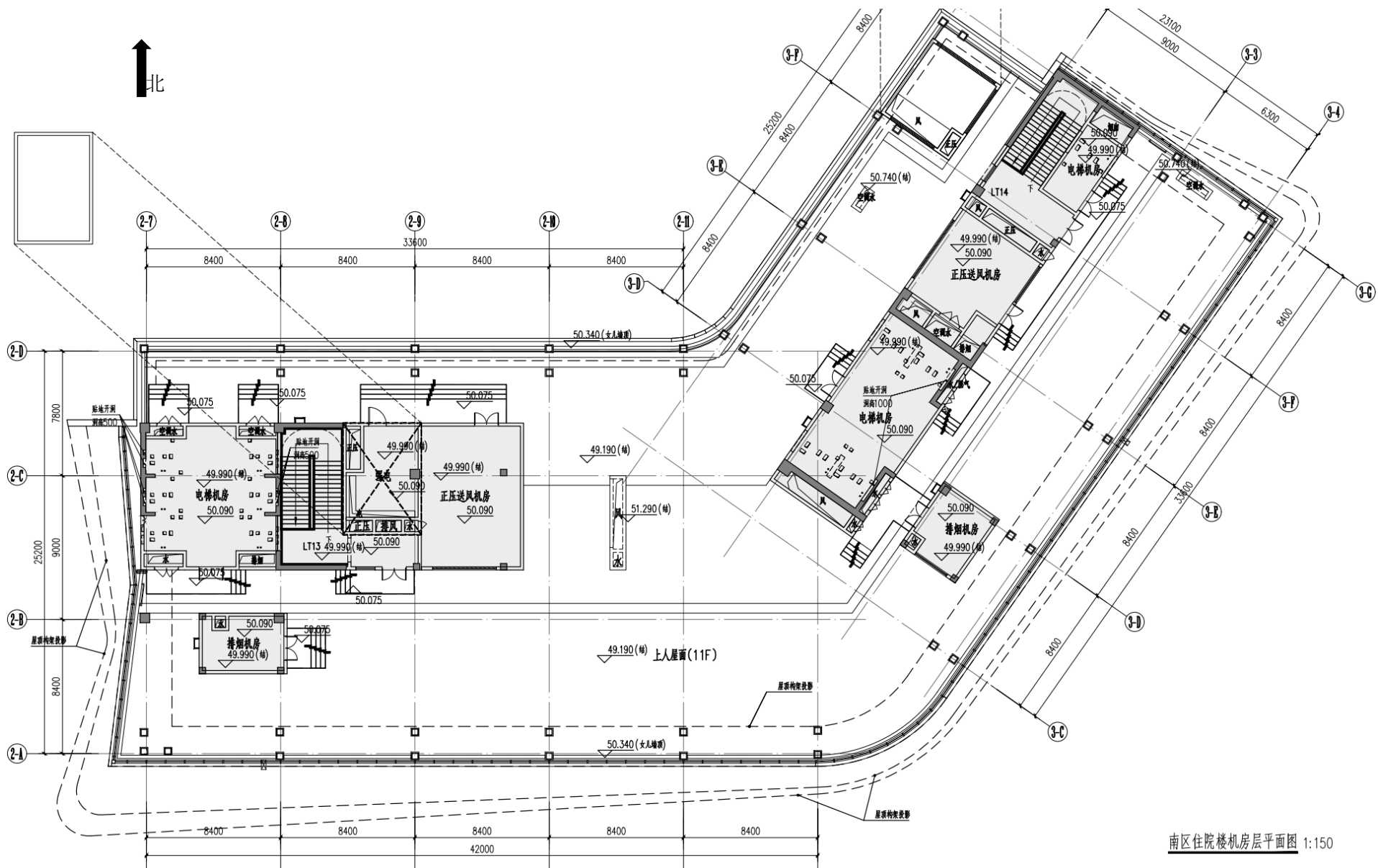


图 3-13 南区住院楼九层至十层平面布局图





南区住院楼机房层平面图 1:150

图 3-15 南区住院楼机房层平面图

3.1.2 基本参数

本项目拟配备的医用射线装置主要参数列于表 3-1。本项目拟使用放射源的基本情况列于表 1-2，拟使用放射性同位素的情况见表 1-3 和表 1-4，本节不再进行列举。

表 3-1 本项目拟配备的医用射线装置一览表

序号	射线装置名称	规格型号	主要参数 (能量/管电压, 管电流)	生产厂家	数量	类别	所在位置
1	质子治疗装置	/	最高能量 230MeV	中广核核技术发展股份有限公司	1	I	质子治疗中心
2	电子直线加速器	待定	X 射线能量和等中心点输出剂量率: 10MV/24Gy/min; 电子线能量和等中心点输出剂量率: 18MV/10Gy/min	待定	8	II	医疗综合楼地下二层直加一区 and 直加二区
3	经内镜逆行胰胆管造影装置 (ERCP)	待定	管电压: 125kV; 管电流: 1250mA	待定	1	II	医疗综合楼地上三层内镜中心
4	血管造影用 X 射线装置 (DSA)	待定	管电压: 150kV; 管电流: 1250mA	待定	1	II	医疗综合楼地上四层介入中心
5	回旋加速器	HM-10HC+ (自屏蔽)	最高能量: 10MeV, 最大束流强度: 100μA	住友	1	II	医疗综合楼地下二层 PET 药物制备区
6	模拟定位 CT 机	待定	管电压 140kV, 管电流 900mA	待定	2	III	医疗综合楼地下二层模拟定位区
			管电压 140kV, 管电流 677mA	上海联影医疗科技股份有限公司	2		重离子质子治疗楼地下二层治疗室 1 和治疗室 2
7	X 射线摄影装置 (DR)	待定	管电压 150kV, 管电流 800mA	待定	2	III	医疗综合楼地上一层放射科
8	乳腺 X 射	待定	管电压 50kV, 管电流 200mA	待定	1	III	

	线装置（钼靶）						
9	胃肠 X 射线机	待定	管电压 150kV，管电流 500mA	待定	1	III	
10	骨密度仪	待定	管电压 100kV，管电流 1.3mA	待定	1	III	
11	CT 机	待定	管电压 140kV，管电流 900mA	待定	4	III	
12	移动 CT 机	待定	管电压 140kV，管电流 900mA	待定	1	III	医疗综合楼地上四层
13	PET-CT	待定	最高能量:150kV，最大管电流： 1250mA	待定	1	III	医疗综合楼地下二层核医学科
14	SPECT-CT	待定	最高能量:150kV，最大管电流： 1250mA	待定	1	III	
备注：其中序号 7-12 中医疗综合楼使用的 10 台III类射线装置将另外通过四川省建设项目环境影响登记表备案系统备案。							

3.2 工艺设备

3.2.1 质子治疗装置

3.2.1.1 主要技术参数及结构布局

质子治疗系统主要由回旋加速器、能量选择系统、束流输运系统 and 治疗系统组成。质子在回旋加速器中加速到 230MeV 后引出，引出流强约为 300nA，引入能量选择系统。通过调节能量选择系统中降能器的厚度，可根据实际治疗肿瘤的深度和厚度，在输出端得到 70~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。束流输运系统用于将能量选择器引出的质子输运到各治疗室内。质子治疗系统共配置 2 个机架治疗室，从西到东分别为治疗室 1 和治疗室 2。主要技术参数见表 3-2，装置结构组成示意图见图 3-16，平面布局示意图见图 3-17。

表 3-2 质子治疗系统主要技术参数

指标	数值/方案
加速器主体	质子回旋加速器
加速器最大引出能量	230 MeV
加速器最大引出流强	300 nA
加速器引出电荷量	≤300 nC/s (加速器出口)

治疗能量范围	70 ~ 230 MeV
治疗流强	0.27 nA @ 70 MeV, 0.47 nA @ 230 MeV
加速器射频频率	106 MHz
照射野	30 cm × 40 cm
源皮距	100 cm
治疗头输出剂量率	2 Gy/min/L
束斑直径	4~9mm
束斑定位精度	1mm
治疗模式	笔形束模式（Pencil Beam Scanning, PBS）
治疗终端	2 间机架治疗室（治疗室 1 和 2）
治疗定位系统	每间治疗室配备两个定位 X 射线球管，2 间治疗室共配备 4 个 X 射线管：管电压单位 40-150kV，管电流范围 1-500mA。

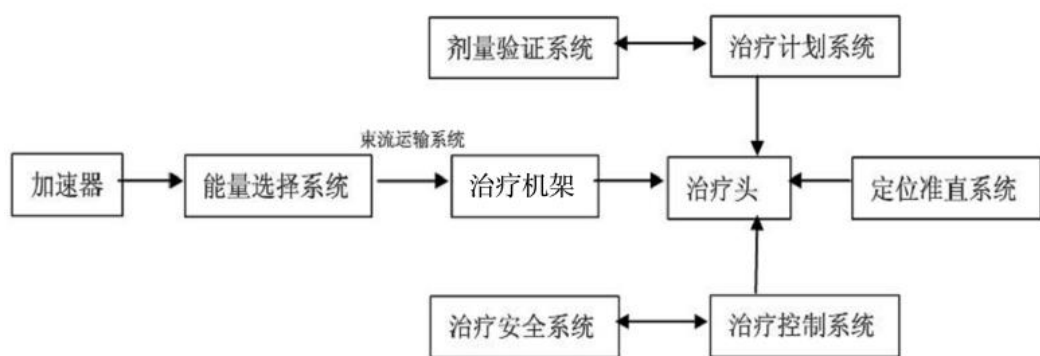


图 3-16 质子治疗系统装置结构组成示意图



图 3-17 质子治疗系统平面布局示意图

3.2.1.2 装置组成及工作原理

质子治疗系统中质子由回旋加速器→能量选择系统→束流输运线→治疗终端，经历质子加速、注入、能量选择、引出和治疗。各部分详细工作原理如下。

3.2.1.2.1 回旋加速器

回旋加速器是质子治疗系统的核心，其结构示意图见图 3-18，实物参考图见图 3-19。在回旋加速器内将氢气进行游离，成为氢离子，即一个带正电的质子。

氢离子通过一个由高频电场供电的间隙，每次通过间隙得到高频能量进而实现加速。为把质子限制在一个有限的空间进行加速，在质子运动的垂直平面上加一个固定磁场，使质子在该磁场中做螺旋圆周运动。质子初始流强约为 750nA，初始能量约为 50keV。多次通过高频间隙后，能量逐渐变高，直至加速到最高 230MeV 时，再利用磁和电偏转将质子束从加速器引出。质子治疗系统正常运行期间，回旋加速器每天 24 小时始终处于开机运行状态，仅在检修保养期间才会停机，且仅在治疗期间才会产生质子束流。

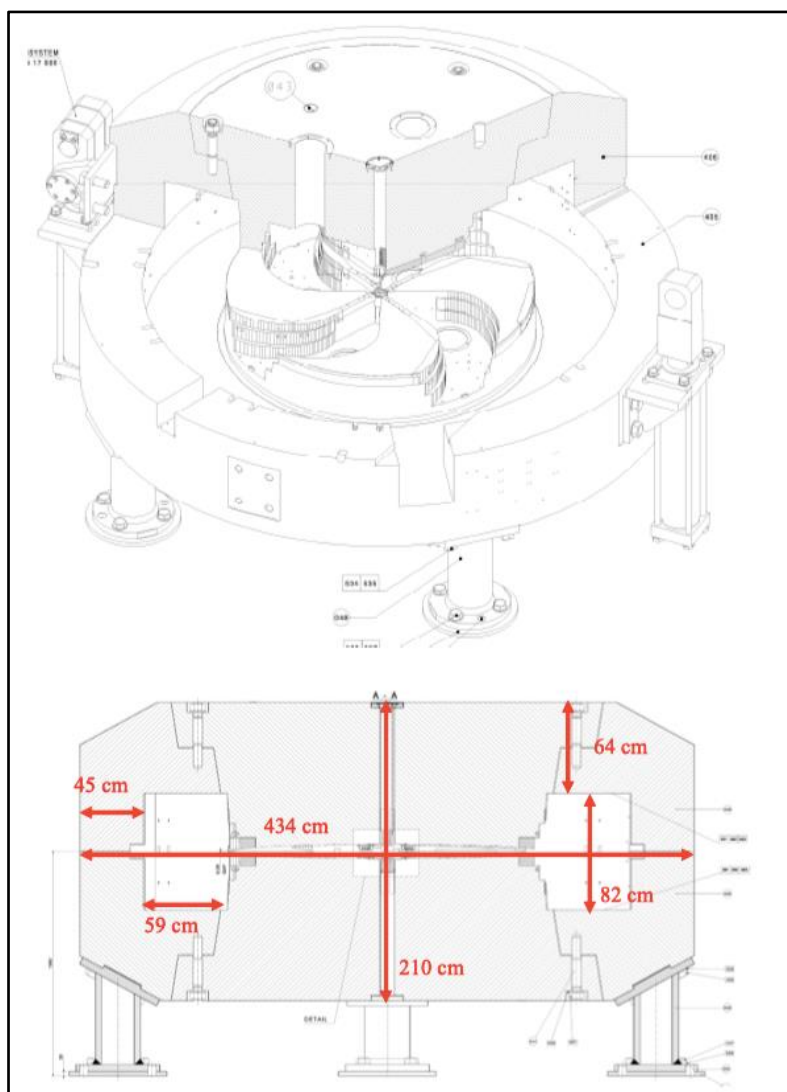


图 3-18 质子治疗系统回旋加速器结构示意图



图 3-19 质子治疗系统回旋加速器实物参考图

3.2.1.2.2 能量选择系统

质子治疗时要根据肿瘤深度和厚度选用不同能量的质子，由于回旋加速器引出的质子能量是固定的，因此需在回旋加速器和治疗室之间设置一个能量选择系统，该系统由降能器、准直器与离子光学用的各种磁铁和测量元件组成，其结构示意图见图 3-20，实物参考图见图 3-21。

(1) 降能器

降能器材质一般为石墨、Be 和 Al，当质子通过降能器时，降能器厚度越大质子能量降低越多，因此使用不同厚度的降能器即可得到不同程度能量的降低。当回旋加速器引出的能量为 230MeV 的质子进入能量选择系统，通过调节降能器的不同厚度，就可以在输出端得到能量为 70~230MeV 之间连续可调的不同能量的质子束流。

降能器是由不同厚度和材质的挡块拼接而成的环状物体，当其在质子束流前旋转时，依据厚度和材质的不同以降低通过的束流的能量大小。挡块从大到小依次排列，挡块 1 和 2 是铍，密度 1.85 g/cm^3 ；挡块 3 到 8 是碳，密度 1.7 g/cm^3 ；挡块 9 是铝，密度 2.7 g/cm^3 。

(2) 准直器

准直器位于降能器后面，目的是阻挡发散的束流。准直器是一个圆柱体，材质是钽，中间有一个 10mm 的圆孔。

（3）发散狭缝

发散狭缝作用在于进一步阻挡发散的束流，由两组相互垂直的部件组成。发散狭缝包括两组 6cm 厚的镍材质挡块，质子束穿过狭缝时，发散的质子束流将被挡块吸收。

（4）动量狭缝

动量狭缝仅允许选定能量范围的束流通过，并吸收能量范围外的束流。其形状和材质与发散狭缝接近，但其结构只包含一组狭缝。动量狭缝位于两对偶极子之间，使束流偏向治疗室。

3.2.1.2.3 束流输运系统

束流输运系统用于将加速器产生的质子束流输送到患者治疗部位附近。沿束流输运线管道放置四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备，四级磁铁用于对质子束流进行聚焦，偏转磁铁用于改变束流的方向，导向磁铁用于纠正质子束流在系统安装时产生的偏离。质子治疗系统束流输运系统实物参考图见图 3-22。

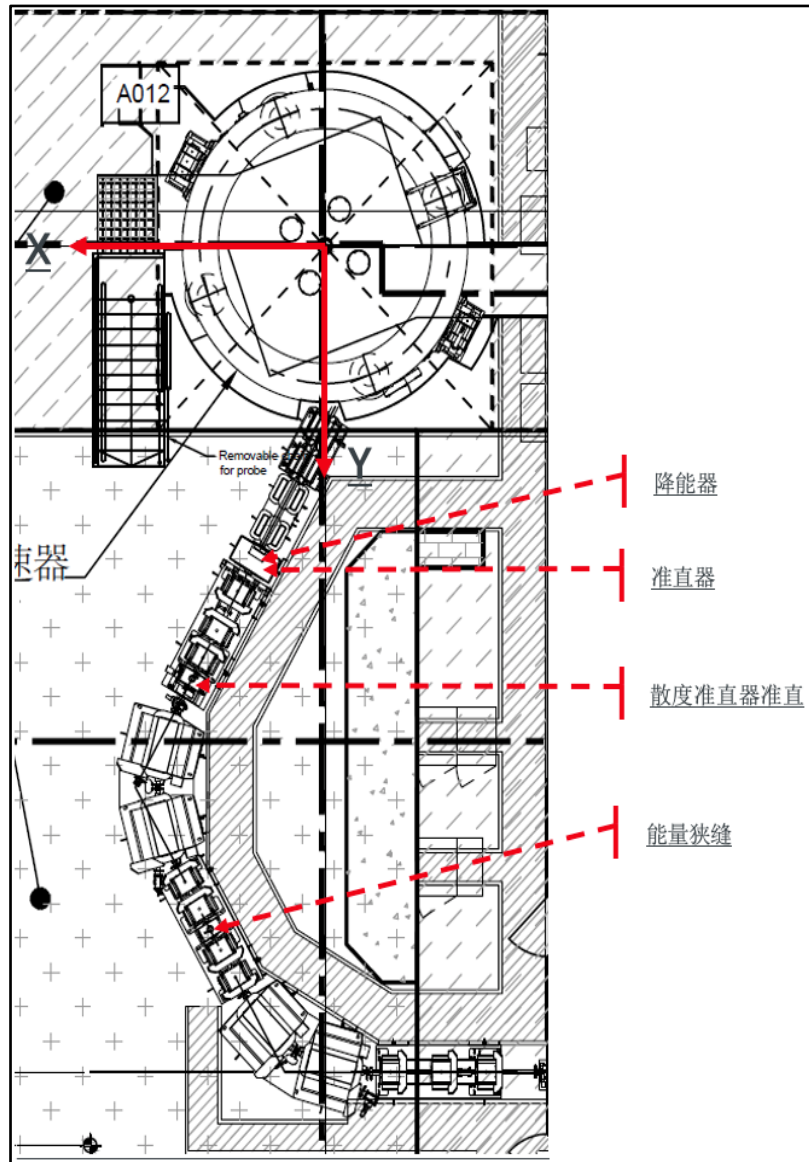


图 3-20 质子治疗系统能量选择系统结构示意图



图 3-21 质子治疗系统能量选择系统实物参考图

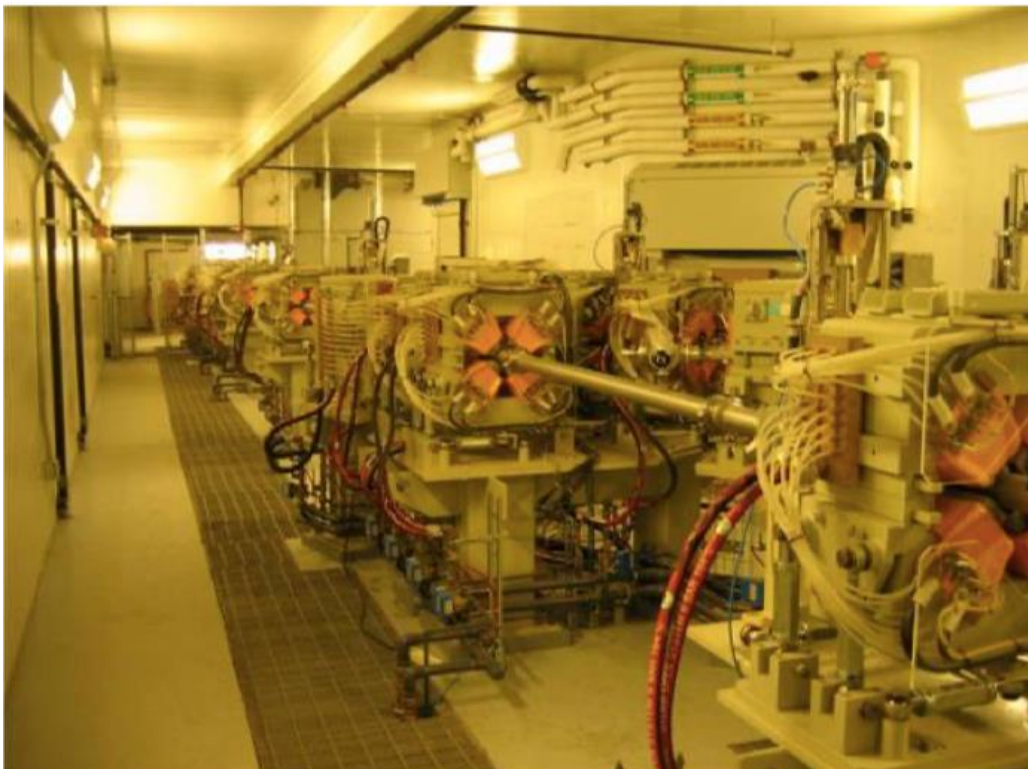


图 3-22 质子治疗系统束流输运系统实物参考图

3.2.1.2.4 治疗室终端

质子治疗系统的治疗室终端为 2 间机架治疗室（治疗室 1 和治疗室 2），是治疗患者的场所。旋转机架治疗室内含有旋转机架及旋转治疗头。旋转机架能够环绕卧姿患者进行转动，可实现 360° 旋转。每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一个治疗室提供束流。

（1）机架治疗室

机架治疗室通过机架使质子束流依照同中心旋转，以进行多野不同入射角的照射。在旋转中心的治疗床能进行上下、前后、左右的调节，还能作前后水平和左右水平方向的倾斜，以方便精确地重复患者治疗的体位。旋转机架和机架治疗室实物参考图见图 3-23。

旋转机架是一个巨大的、能够同中心旋转的钢结构，该机架上装有质子束偏转磁铁和聚焦磁铁、真空系统和射线监测器，旋转机架直径约 11 米，重量达 100 吨，

可进行 $\pm 185^\circ$ 旋转，转速可由 0.5 rpm 至 1rpm。机架半径的精度小于 1 毫米。



图 3-23 质子治疗系统旋转机架和机架治疗室实物参考图

(2) 治疗头

治疗头位于束流输运系统的最末端，根据不同需求和治疗计划，使用不同的治疗模式，准确地将质子束照射到目标肿瘤中。鉴于肿瘤的多样性，需要不同的治疗模式去治疗每个患者，治疗头的设计也会根据不同的治疗模式有所差别。厂家针对散射和扫描治疗模式生产了通用治疗头和专用于笔形束扫描的治疗头，模拟图见图 3-24。本项目质子治疗系统使用的均为笔形束扫描治疗头。

在笔形束模式（PBS）下，质子束可逐层逐点对靶区进行扫描，以精确匹配肿瘤形状。对形状复杂的肿瘤，笔形束扫描也可以精确配置剂量并达到高度适形。相比其他质子治疗方式（双散射与均匀扫描），笔形束扫描减少了治疗过程中患者受到的中子剂量。笔形束扫描模式还可以实现调强质子治疗，即质子束依次扫描肿瘤的一小部分，并调整每一部分质子束的剂量和深度适应肿瘤宽窄不一的轮廓。调强质子治疗与适当的影像设备及治疗方式结合，还可以治疗移动肿瘤。



左图：通用治疗头

右图：笔形束扫描专用治疗头

图 3-24 质子治疗系统治疗头模拟图

(3) 治疗定位系统

每间治疗室内均设有一套治疗定位系统，用于患者治疗前的定位。治疗定位系统由 X 光球管、接收器和高压发生器组成。由高压发生器提供高压电源到球管上，球管发出 X 射线到接收器上形成图像，最后在治疗控制系统内进行图像处理，使其满足放疗中图像使用的要求。

质子治疗系统每间机架治疗室设有 2 个定位 X 射线管，用于从不同角度对患者进行定位。X 射线管在治疗室内的安装位置如图 3-25 所示。X 射线管控制台位于治疗室内，具体位置见图 3-26，该处操作台墙体和观察窗铅当量均不小于 4.6mmPb。

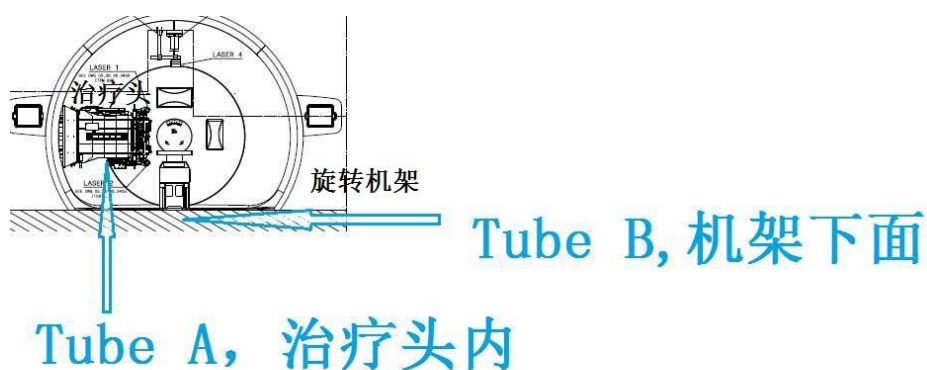


图 3-25 质子治疗系统机架治疗室内 X 射线管安装位置示意图

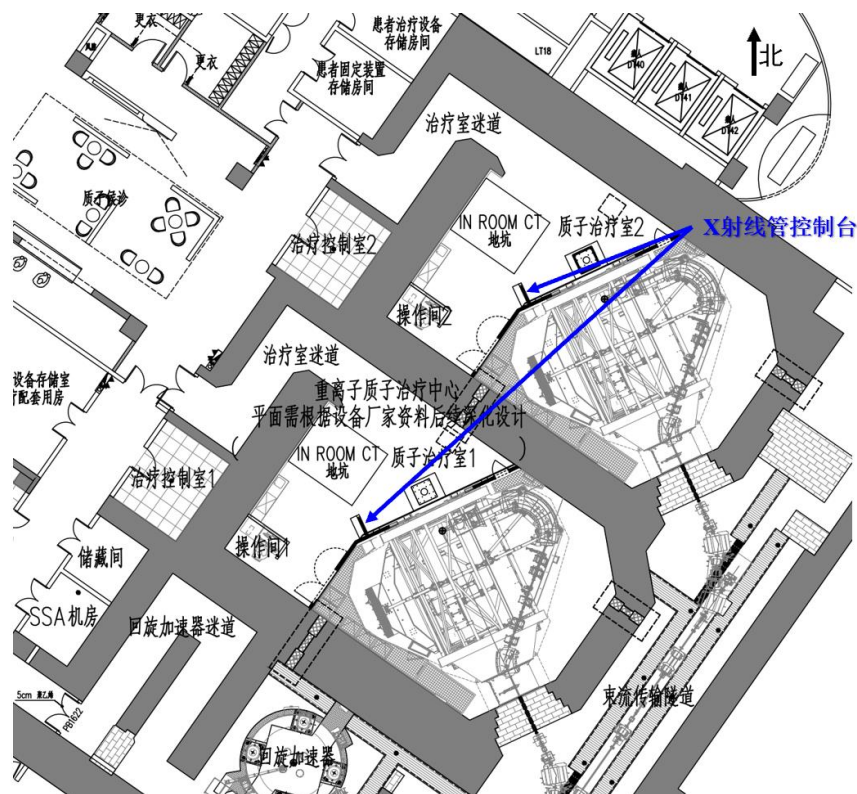


图 3-26 质子治疗系统 X 射线管控制台位置示意图

3.2.1.3 工作流程及产污环节分析

质子治疗系统的治疗流程和产污环节如下。

(1) 制定治疗预案

患者预约、就诊，经专家医师会诊，判断患者符合质子治疗适应症后（诊断、治疗正当性判断），由质子治疗科室医生、物理师、治疗技师联合讨论，制定治疗预案，并预约登记模拟定位时间和治疗时间。

(2) 治疗前模拟定位

对于首次预约质子治疗的患者，需要利用滑轨 CT 对其进行治疗前的模拟定位，采集患者数据并确定初始等中心，主要的辐射源项为滑轨 CT 机出束产生的 X 射线。该环节在地下二层的治疗室内进行，主要由治疗技师和护士进行操作。治疗技师主要负责在治疗室内进行照射前的摆位和在操作间内操作开机照射，照射前摆位约 5min/人次，照射时间约 1min/人次。护士主要负责在有需要的情况下为

患者留针并注射造影剂，在操作间内完成留针，留针时间约 1min/人次；在操作间内远程注射造影剂，注射时间约 1min/人次。具体的人员配备、操作方式和工作时间列于表 3-3。

表 3-3 治疗前模拟定位的工作人员工作内容和操作时间

工作岗位	工作内容	操作时间
治疗技师	治疗室内摆位	5min/人次
	操作间内操作开机照射	1min/人次
护士	注射室内留针	1min/人次
	操作间内远程注射造影剂	1min/人次

（3）治疗计划制定

物理师利用治疗计划系统制定治疗计划，确定治疗参数，如照射次数、照射方向、照射剂量，通过剂量计算制定剂量分布图；确定治疗等中心点的精确位置、照射野大小和方向等参数，并利用治疗计划系统提供的图像编辑和后处理工具对所制定的治疗计划进一步优化，最终确定完整的治疗计划方案。该环节利用治疗计划系统完成，不需开机出束。

（4）治疗计划验证

每名患者的治疗计划在正式使用前，为确保治疗安全，都需进行一次治疗前的计划验证，即利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行水箱模拟治疗，实测其治疗参数，再和治疗计划中规定的治疗参数进行比较，若差值在允许容差内，则允许正式用于患者治疗。一次治疗计划验证的过程与一次正式的治疗过程基本一致，总时间约为 20min。由物理师完成所有操作，包括在治疗室内的摆位等操作和在治疗控制室内操作出束照射。该环节主要的辐射源项为治疗室内定位 X 射线管出束产生的 X 射线以及质子治疗系统出束产生的中子、 γ 瞬发辐射和感生放射性。

（5）治疗前精确摆位

计划验证通过并获得批准执行后，患者可进入治疗室内准备治疗，根据治疗计划由治疗技师在治疗室内对其进行摆位，摆位完成后使用治疗室内的 X 射线定位系统进行精确的位置验证。该环节主要由治疗技师和护士进行操作。治疗技师

负责摆位和摆位后的精确位置验证。当利用治疗室内 X 射线管进行精确位置验证时，治疗技师在治疗室 X 射线管的操作间处工作。其中，治疗前摆位约需 5min，精确位置验证约需 5min。护士主要负责在有需要的情况下注射造影剂，包括进入机房内留针和在 X 射线操作台处远程操作注射造影剂。留针时间为 1min/人次，注射造影剂时间为 1min/人次。该环节的人员配备与“治疗前模拟定位”相同，主要的辐射源项是定位 X 射线管出束产生的 X 射线。

（6）质子治疗系统出束照射治疗

摆位验证完成后，治疗技师离开治疗室进入治疗控制室内，确定所有的安全联锁建立后，启动质子束流进行出束治疗。该环节主要的辐射源项为质子治疗系统出束期间产生的中子、 γ 瞬发辐射和感生放射性。

（7）治疗结束后解除摆位

患者治疗结束后，治疗技师进入治疗室内，对患者解除摆位并协助其离开机房，为下一个患者治疗做准备。该环节在治疗室内进行，由治疗技师全程操作，时间约为 1min。根据“3.3.1.3.5 节”分析计算，患者在接受治疗期间，其自身组织受到质子束流照射会产生感生放射性。因此，该环节主要的辐射源项为治疗室内的患者感生放射性及活化空气。

质子治疗系统工作流程污染物产生环节及主要污染因子见图 3-27、表 3-4。

表 3-4 质子治疗系统工作过程中污染物产生环节及主要污染因子

污染物产生环节	主要污染因子
治疗室内模拟定位	X 射线
治疗室内 X 射线定位	
回旋加速器运行	质子、中子、 γ 射线、 活化空气、活化冷却水、活化结构部件
能量选择系统运行	
束流输运系统运行	
治疗室终端出束	质子、中子、 γ 射线、活化空气、活化结构部件、患者活化
治疗室内解除摆位	活化空气、活化结构部件、患者活化

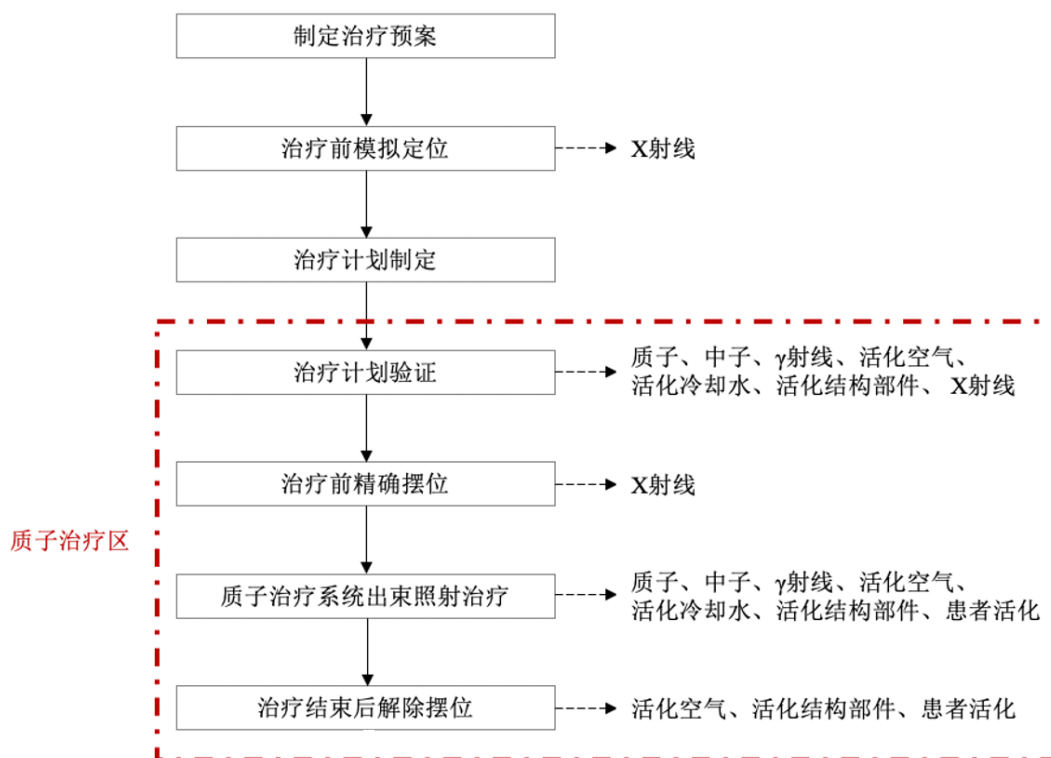


图 3-27 质子治疗系统工作流程及主要产污环节图

3.2.1.4 工作负荷及人员配置

3.2.1.4.1 工作负荷

质子治疗系统的年使用规划及出束时间见下表。

表 3-5 质子治疗系统的年使用规划

序号	内容	单位	质子治疗室 1	质子治疗室 2
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3	3
2	每室每天治疗时间	h/d/室	16	16
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	48	48
4	每室每年治疗天数	d/a/室	240	240
5	每室每年治疗人数	人/a/室	384	384
6	每人平均治疗次数	次/人	30	30
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	11520	11520
8	每人次治疗平均出束时间	min/人次	5	5
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	4	4
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	960	960

11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	104	104
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	20.5	20.5
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	1064	1064
14	年总出束时间	h/a	2128	

3.2.1.4.2 人员配置

质子治疗辐射工作人员配置情况见下表。

表 3-6 质子治疗辐射工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医生办公室、抢救室	4 人	每天两班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、治疗室、治疗控制室	8 人	每天两班，每班 8h
治疗技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	CT 模拟定位机房及其控制室、质子治疗室及其控制室、技师办公室	8 人	每天两班，每班 8h
护士	治疗准备、注射、护理等	注射室、质子治疗室及其控制室、护士站	4 人	每天两班，每班 8h
维修工程师	设备日常运维	设备间、工程师办公室	2 人	每天两班，每班 8h

3.2.2 直线加速器

3.2.2.1 装置组成和参数

本项目拟使用的电子直线加速器主要技术参数列于表 3-7，外观示例图见图 3-28。

表 3-7 本项目拟使用电子直线加速器的主要技术参数

射线装置名称	厂家及型号	主要技术参数	数量	工作场所
电子直线加速器	医科达 Synergy	X 射线最大能量：10MV， 等中心最大输出剂量率：24Gy/min； 电子线最大能量：18MeV， 等中心最大输出剂量率：10Gy/min； 最大照射野：40cm×40cm；	8	直加机房 1~8

		有用束最大张角：28° ； 源皮距：100cm； 治疗头旋转角度：360° 。		
--	--	---	--	--

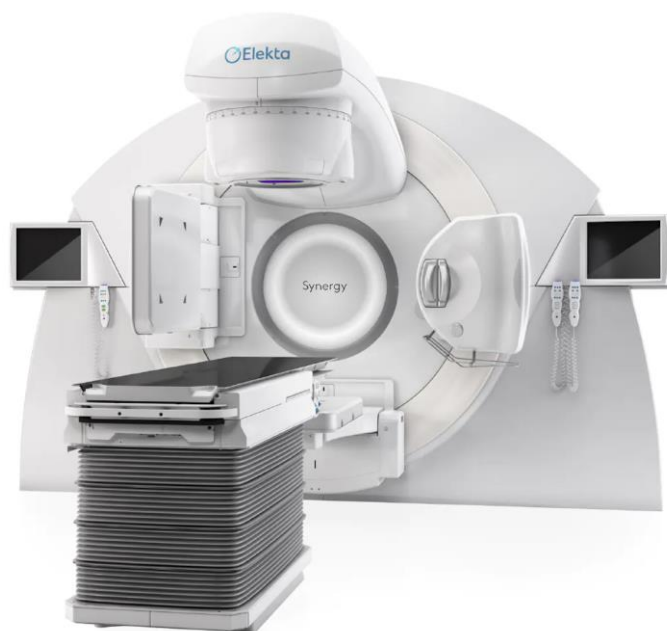


图 3-28 医用电子直线加速器外观示例图

3.2.2.2 工作原理

电子直线加速器是产生高能电子束的装置。电子枪发射电子，在由磁控管速调管为功率源的加速管中加速，当达到所需能量时，经散射箔和准直器得治疗电子束。电子束射到金属靶上产生韧致辐射，经准直得到治疗 X 射线。加速器放射治疗的工作方式为：以一个或几个疗野定向照射，获得计划所需的治疗剂量。常见医用电子直线加速器外观结构示意图如图 3-16 所示。

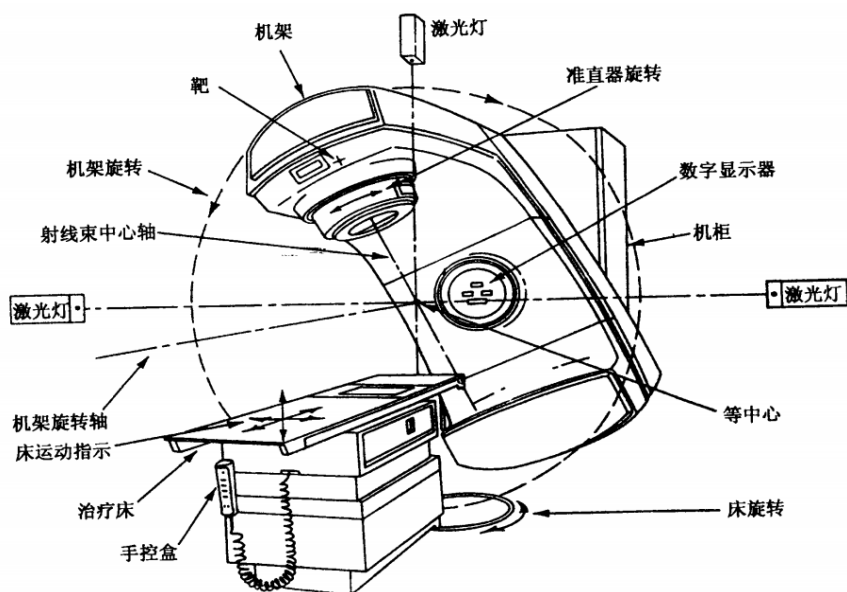


图 3-29 常见医用电子直线加速器外观结构示意图

3.2.2.3 治疗流程

直线加速器治疗流程如图 3-30 所示，具体治疗流程如下：

(1) 接收病人：对病人进行登记，进行临床检查，经医生诊断和治疗正当性判定后，根据肿瘤分期、分型确定治疗方案，与放疗科预约登记，确定模拟定位治疗的时间；

(2) 制模：为方便患者治疗定位，用热塑体模在相应治疗部位按照病人身体轮廓进行塑形；

(3) 模拟定位：在模拟定位 CT 机房内对患者的肿瘤进行定位检查，确定肿瘤的具体位置和形状；

(4) 勾画靶区 TPS 制定治疗计划：勾画病变靶区和正常器官，根据患者瘤体的类型、部位和大小等初步确定照射剂量和照射时间，并进一步制定相应的常规放疗、适形放疗及调强放疗的治疗计划；

(5) 治疗计划确认：再次确认靶区剂量，核实正常器官、热点和冷点是否在允许的范围之内，加速器是否有相应的转床、碰床等机械限值，移床等坐标设置

是否正确；

(6) 病人摆位：摆位前认真查对病人信息、照射条件及摆位要求，调整治疗床高度，严格按照摆位要求实施摆位；

(7) 实施治疗：根据放疗计划，运用有关技术实施精确照射；

(8) 结束治疗：病人离开治疗室，摆位人员进行下一个患者摆位准备。

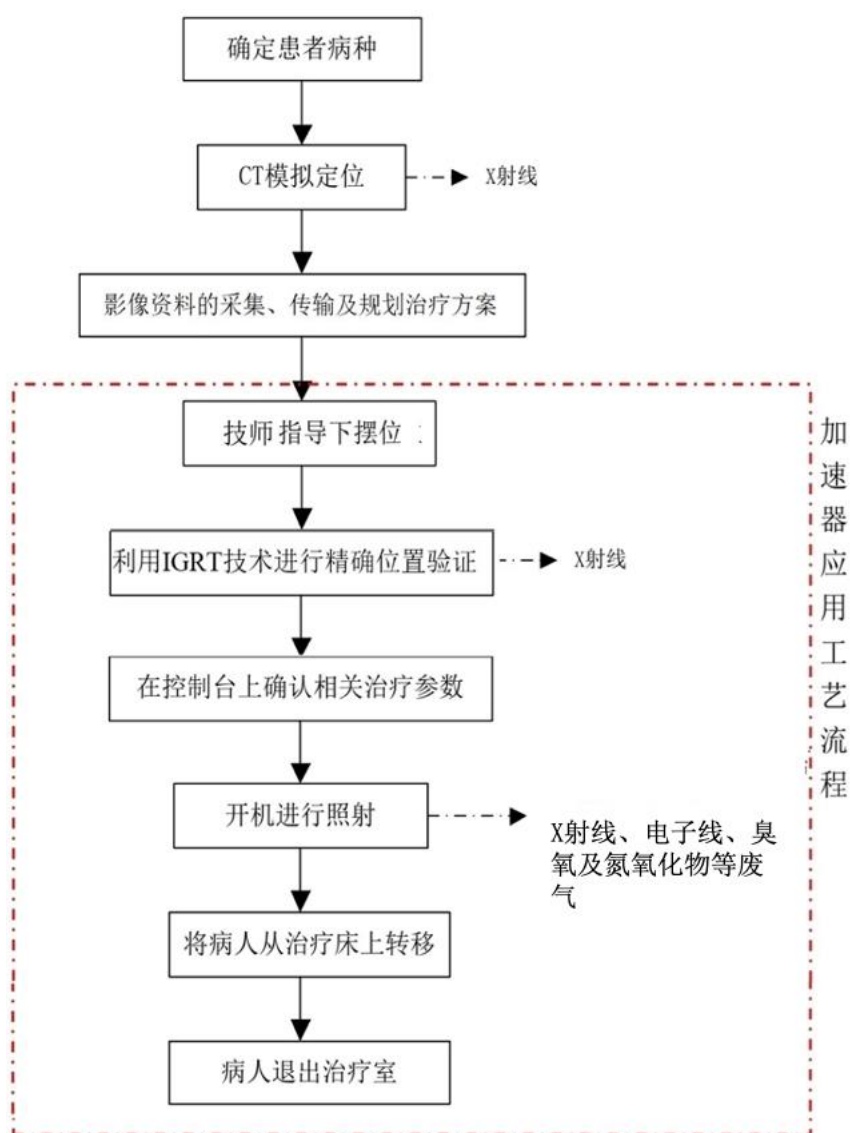


图 3-30 直线加速器的典型治疗流程及产污环节图

3.2.2.4 工作负荷

每台直线加速器每年最多工作 50 周，每周工作 5 天。每台设备计划最多治疗 60 人次/天，其中常规治疗约 30 人次/天，每人每次照射 3min；调强治疗约 30 人次/天，每人每次照射 15min（调强因子 N=5）。则每台设备的年治疗出束时间最多为 2250h。加上每台设备的年 QA 出束时间最多为 250h，则每台设备的年总出束时间最多为 2500h。

3.2.2.5 工作人员配备

放疗科直线加速器拟配备的工作人员如下表所示。

表 3-8 直线加速器辐射工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医生办公室、抢救室	4 人	每天两班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、直加机房内、直加控制室	4 人	每天两班，每班 8h
技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	CT 模拟定位机房及其控制室、直加机房及其控制室、技师办公室	8 人	每天两班，每班 8h
护士	治疗准备、注射、护理等	注射室、直加机房及其控制室、护士站	4 人	每天两班，每班 8h
工程师	设备日常运维	设备间、工程师办公室	2 人	每天两班，每班 8h

3.2.3 DSA、ERCP

3.2.3.1 主要技术参数及工作负荷

本项目拟使用的 DSA、ERCP 主要技术参数及工作负荷见表 3-9，拟配备辐射工作人员情况见表 3-10。

表 3-9 DSA、ERCP 主要技术参数及工作负荷

装置名称	主要技术参数	单次手术最大曝光时间		每年最多手术次数，次	全年最多曝光时间	
DSA	最大管电压：150kV 最大管电流：1250mA	摄影	10s	3000（每台装置）	摄影	8.4h

	隔室摄影常用参数： 管电压 90 kV、管电流 500mA 床旁透视常用参数： 管电压 90kV、管电流 10mA	透视	20min	1000 次)	透视	1000h
ERCP	最大管电压：125kV 最大管电流：1250mA 隔室摄影常用参数： 管电压 90 kV、管电流 500mA 床旁透视常用参数： 管电压 90kV、管电流 10mA	摄影	10s	500	摄影	1.4h
		透视	20min		透视	166.7h

表 3-10 DSA、ERCP 拟配辐射工作人员情况

装置名称	工作岗位	工作内容	拟配人数	备注
DSA	医生	手术操作	18	每台手术 2 人同时操作
	技师	设备操作	6	每台手术 1 人操作
ERCP	医生	手术操作	4	每台手术 2 人同时操作
	技师	设备操作	2	每台手术 1 人操作

3.2.3.2 设备组成

(1) DSA

DSA 是数字减影血管造影 (Digital Subtraction Angiography) 的简称，在临床上主要用于血管网络的功能检查。DSA 成像系统按功能和结构划分，主要由 X 射线发生系统、接收器、C 型支架、导管床、图像显示器等部分组成。通常 X 射线球管位于手术床下方，出束方向从下往上；C 型支架可带动 X 射线发生系统及接收器以手术床为轴进行 $\pm 90^\circ$ 的旋转，出束方向则相应地进行变化。DSA 典型设备如图 3-31 所示。

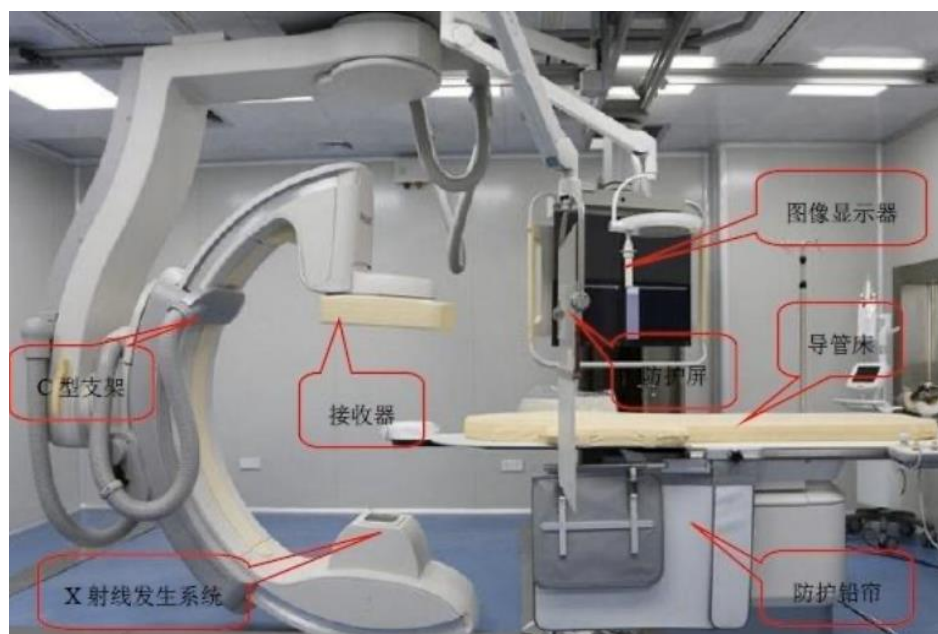


图 3-31 典型 DSA 示例图

(2) ERCP

ERCP 是经内镜逆行胰胆管造影的英文首字母 (Endoscopic Retrograde Cholangio-Pancreatography)缩写, 是指将十二指肠镜插至十二指肠降部, 找到十二指肠乳头, 由活检管道内插入造影导管至乳头开口部, 注入造影剂后进行 X 射线作业, 以显示胰胆管的技术, 在 ERCP 基础上, 可以进行十二指肠乳头括约肌切开术、内镜下鼻胆汁引流术、内镜下胆汁内引流术等介入手术。

ERCP 装置由高压电源和 X 射线管组成, 其中 X 射线管位于治疗床下方, 由阴极、阳极和聚焦器组成, 出束方向朝上。利用高压电源加热阴极灯丝使之发射电子, 电子被加速后打在阳极金属靶上, 因韧致辐射效应而产生 X 射线。ERCP 典型设备外观如图 3-32 所示。



图 3-32 ERCP 设备外观示例图

3.2.3.3 工作原理

DSA 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，其成像基本原理为：将 X 射线机对准人体的某一部位，并将 X 射线造影剂注入人体的血管内。如果在注入造影剂的前后分别摄取这同一部位的 X 射线图像，然后再将这两幅图像相减，那么就可以消除图像中相同结构的部分，而突出注入造影剂的血管部分。ERCP 原理与 DSA 相似，主要用于经内镜逆行胰胆管造影手术。

DSA 和 ERCP 在进行曝光时分为两种工况（工作人员在不变换操作位置情况下，可通过控制键切换透视和摄影功能）：

（1）床旁透视：此工况下患者和医生均位于机房内，技师位于控制室内。医生采用近台同室操作方式，通过控制 DSA 的 X 射线系统曝光，对患者的部位进行间歇或连续式透视。此时受检者位于机房手术床上，介入手术医生位于手术床旁，距 DSA 的 X 线管 0.3~1.0m 处，在非主射束方向，配备个人防护用品（如铅衣、铅围脖、铅眼镜、铅手套等），同时手术床旁设有屏蔽挂帘，介入治疗中，医师根据操作需求，踩动手术床下的脚踏开关启动 DSA 的 X 线系统进行透视（DSA 的 X 线系统连续发射 X 射线），通过显示屏上显示的连续画面，完成介入操作，医生、护士佩戴防护用品。

（2）隔室摄影：此工况下仅有患者位于机房内，辐射工作人员（医生、技师）

均位于控制室内。在所有防护门关闭的情况下，技师通过控制 DSA 的 X 射线系统曝光，采集造影部位图像。医生可通过铅玻璃观察窗和操作台显示屏观察机房内的病人情况，并通过对讲系统与病人交流。

3.2.3.4 操作流程及产污环节分析

(1) DSA

诊断时，患者仰卧并进行无菌消毒，局部麻醉后，经皮穿刺静脉，送入引导钢丝及扩张管与外鞘，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上腔静脉，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。

工作流程具体如下：

- a. 医生根据患者预约安排手术；
- b. 病人由专职人员通过受检者防护门接入检查室，由护理人员进行摆位，并做局部消毒处理；
- c. 医生根据手术性质在透视条件下进行手术，按照手术性质和医生手术水平不同，每台手术累计曝光时间多为十几至几十分钟；
- d. 手术完成后门诊病人通过受检者防护门自行离开，其余病人由专职人员负责送回病房。

DSA 工作流程及产污环节见图 3-33。

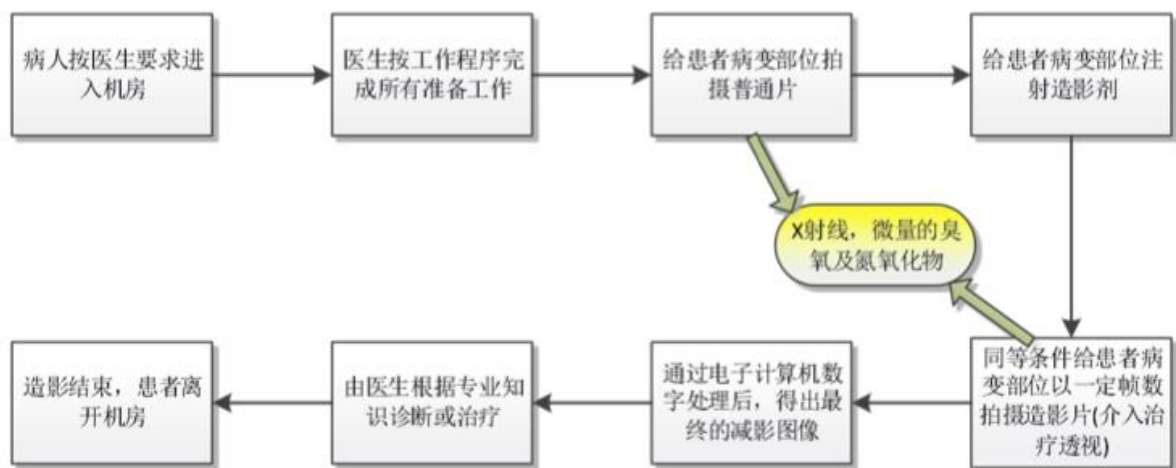


图 3-33 DSA 工作流程及产污环节示意图

(2) ERCP

经内镜逆行性胰胆管造影术（ERCP）手术流程为：用内镜插入患者口中，通过食管、胃进入十二指肠；注气扩张十二指肠；找到十二指肠乳头，由活检管道内插入造影导管至乳头开口部；注入造影剂后，利用 X 射线拍片，显示胰胆管，进行胆管支架引流术、胆总管结石取石术等介入手术。

具体的工作流程如下：

a .患者进入射线装置机房，在医务人员的安排协助下进行摆位，等待诊断治疗；

b.医务人员对患者进行消毒处理，插入内镜；

c .设备曝光分为两种情况：第一种情况，操作人员采取隔室操作的方式操作设备获取影像，通过观察窗观察；第二种情况，医生需进行介入手术治疗时，为更清楚地了解病人情况时会有连续曝光，此时操作医生在手术室内身着铅服位于铅悬挂防护屏/铅防护吊帘后，注射造影剂对病人进行胰胆管造影成像。

设备曝光过程会产生 X 射线，对环境造成影响。

d .利用胰胆管造影图像，医生进行胆管支架引流术、胆总管结石取石术等介入治疗；

e.治疗结束后，患者离开射线装置机房。

ERCP 工作流程及产污环节见图 3-34。

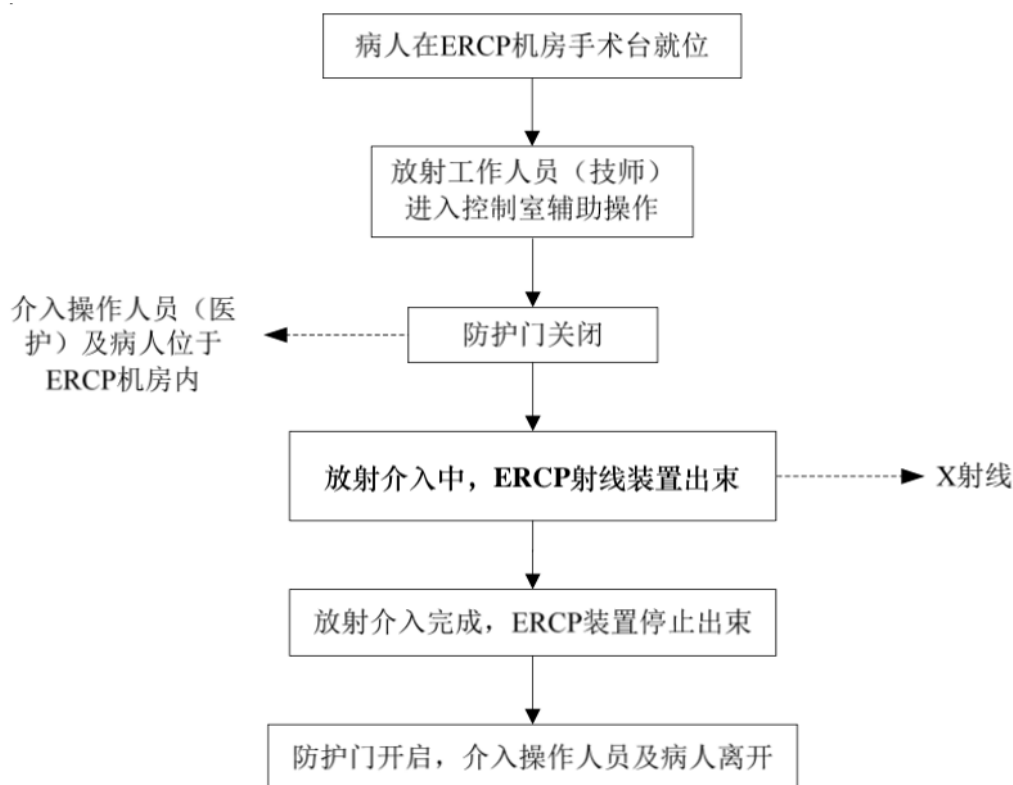


图 3-34 ERCP 工作流程及产污环节示意图

3.2.4 III 类射线装置

放射科拟使用 9 台 III 类射线装置，包括 4 台 CT、1 台钼靶、1 台胃肠机、1 台骨密度仪和 2 台 DR。放疗科拟使用 2 台模拟 CT，质子治疗中心拟使用 2 台滑轨 CT，地上四层拟使用 1 台移动 CT。本报告仅对与本项目放射治疗相关的模拟 CT 进行评价。放射科和地上四层使用的共计 10 台 III 类射线装置将另外通过四川省建设项目环境影响登记表备案系统备案。

模拟定位 CT 机主要由 X 射线发生装置、金属影像增强器、数据图像处理器、床体系统等组成。X 射线发生装置由 X 射线球管 and 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，装在聚焦杯中。当灯通

电加热时，电子即“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚焦成束，直接向嵌在金属阳极中的靶体射击。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。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成，高速电子轰击靶体产生 X 射线。

模拟定位 CT 机是诊断性 CT 机与传统模拟定位机的结合。现代的模拟定位 CT 机常选用大孔径、高速扫描的螺旋 CT 机，由于扫描速度快，扫描层厚薄，重建的 CT 图像质量较高。临床医师在 CT 横断面上逐层勾画出肿瘤和周围重要器官的轮廓，从而确定肿瘤靶体积及其与周围重要器官的关系。并根据肿瘤侵袭的微观特点设计了包含肿瘤细胞可能侵袭的亚临床病灶的临床靶区，进一步考虑到器官运动及摆位误差的影响，设计适当的计划靶区。通过优化照射野对计划靶区的覆盖情况及避开重要器官，保证靶区接受了均与的处方剂量并避免重要器官受到过量的照射。

3.2.5 PET 药物制备区

3.2.5.1 回旋加速器工作原理

回旋加速器生产放射性同位素是利用加速器将带电粒子加速到一定的能量，轰击特定的靶材料，引起特定的核反应而实现的。生产出来的放射性核素一般为缺中子核素，以发射 β^+ 或电子俘获形式进行衰变，能量适度，半衰期短，辐射危害小，适合 PET 显像。

以 ^{18}F 为例，回旋加速器生产 ^{18}F 工作原理见图 3-35，位于在回旋加速器中心部位的离子源，释放电子电离高纯度的 H_2 ，生产 H^- 粒子束流。电离产生的 H^- 在磁场系统的作用下，在回旋加速器的一个 D 型盒做圆周运动，在经过两个 D 型盒之间的间隙被电场(射频系统)加速，加速器后的 H^- 进入另一个 D 型盒做圆周运动，如此往复运动（见图 3-36）。在 H^- 粒子达到最大能量处，通过束流提取系统从真空腔引出。主要是通过剥离膜(很薄的碳膜)剥去 H^- 的两个电子，使其变成为带正电的 H^+ ，此时粒子束运行轨道发生逆向偏转，通过磁场将束流引入靶内。引入靶内的 H^+ 与靶内的物质发生(P,N)反应，生产供标记所需要的核素。回旋加

速器靶内产生的核素采用气动方式通过专用的管道输运至 ^{18}F 放射性药物制备区域，完成后学的药物制备及其他操作。

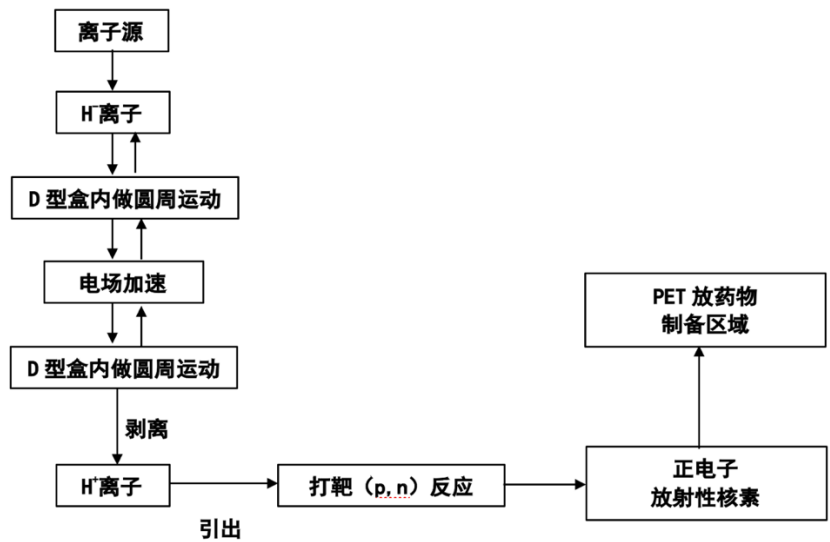


图 3-35 回旋加速器工作原理图

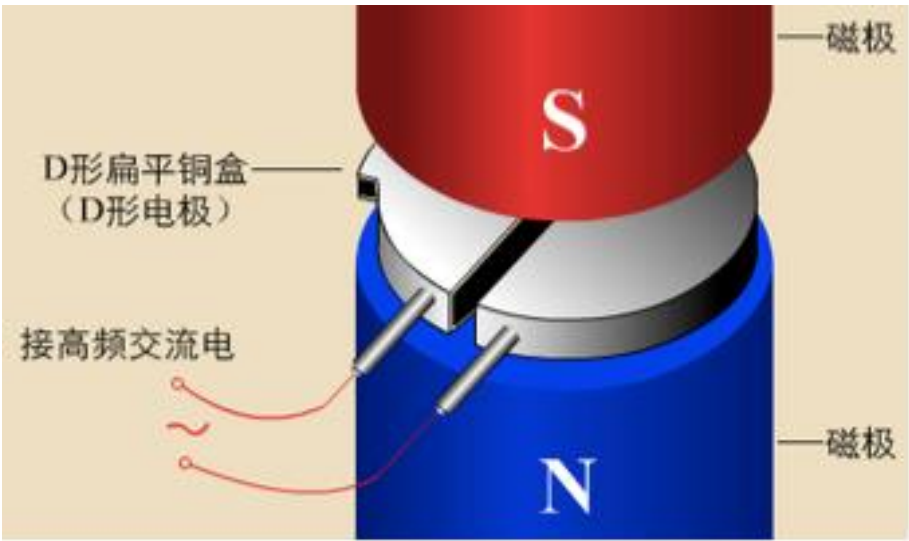


图 3-36 回旋加速器粒子加速示意图

3.2.5.2 回旋加速器设备组成

本项目拟使用的回旋加速器加速主要由磁场系统、高频系统、离子源系统、真空系统、束流引出系统、靶系统、控制系统和冷却系统等主系统组成，各系统具体情况见表 3-11。

表 3-11 回旋加速器系统组成及作用

系统名称	组成及作用
离子源系统	产生需要加速的带电粒子，由离子源、离子源电源配给器和气体控制系统组成。
真空系统	建立离子加速所需要的真空压力水平，降低束流的丢失，减少加速器内部的活化，同事为高电压射频场提供绝缘保护，包括真空腔、真空泵、真空计和控制部分。
磁场系统	提供被加速的带电粒子在所控制的轨道中做圆周运动所需要的磁场强度，由磁铁、线圈、磁场电源配给系统等组成。
射频系统	提供加速带电粒子所需的高频振荡加速电压，其频率与粒子多级轨道的旋转频率相等，由射频谐振腔、射频发生器和馈通电缆组成。
束流引出系统	直接将加速的带电负离子从真空箱中引出，该系统的基础是剥离膜。被加速的负离子在通过剥离膜时被脱去 2 个电子而转变为阳离子，并能够调整引出的束流进入所选定的核素生产靶。
靶系统	完成特定核反应而产生正电子核素，各种类型的靶系统主要由自动充靶系统、靶室、真空绝缘箔、冷却系统组成；自动充靶系统采用气动装置将靶物质注入靶室。
冷却系统	包括水冷却系统和氦冷却系统。水冷却系统分为一级水冷却系统和二级水冷却系统。一级水冷却系统为普通冷却机组，常年制冷；二级冷却水系统中的去离子水带走回旋加速器产生的热量，通过热交换传递给一级水冷却系统，达到为机器降温的目的。氦冷却系统主要在轰击期间对靶室和靶窗的箔膜和钛箔膜之间进行冷却，两个箔膜之间的氦气流提供了所必须的冷却。
控制系统	在控制系统计算机的界面上，可以独立地操作和控制每个子系统。而且更重要的运行参数，系统都有反馈值，便于了解系统的工作状态以及进一步的调整。系统能够根据条件和环境的改变，自动优化系统参数，使系统工作在最优的条件下，生产的效率得以提高，并延长了机器和相关部件的使用寿命。

本项目回旋加速器为住友公司生产的 HM-10HC+型回旋加速器（自屏蔽），用于制备 ^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 、 ^{68}Ga ，质子最大能量为 10MeV，使用最大束流度为 100 μA ，设备参数见表 3-12，回旋加速器外观示意图见图 3-37。

表 3-12 回旋加速器主要参数

项目	主要参数
生产厂家	住友
型号	HM-10HC+（自屏蔽）
加速粒子	质子
加速质子能量	10MeV
最大束流强度	100μA（单靶）
生产核素	液体靶： ¹⁸ F、 ¹³ N； 气体靶： ¹¹ C； 固体靶： ⁶⁴ Cu、 ⁸⁹ Zr、 ⁶⁸ Ga；



图 3-37 回旋加速器外观示意图

3.2.5.3 工作流程和产污环节

该项目制备生产的放射性核素及相关技术参数见表 3-13，具体操作流程见图 3-38。

表 3-13 制备不同放射性核素的靶物质参数

产物	半衰期	靶材料	核反应	产额
¹⁸ F	109.8min	富集 H ₂ ¹⁸ O	¹⁸ O（p，n） ¹⁸ F	9.25E+10Bq/2h
¹³ N	9.96min	¹⁶ O-水	¹⁶ O（p,α） ¹³ N	4.10E+09 Bq /0.5h
¹¹ C	20min	¹⁴ N ₂ +0.5%O ₂	¹⁴ N（p,α） ¹¹ C	4.88E+10 Bq /0.5h
⁶⁸ Ga	67.71min	⁶⁸ Zn	⁶⁸ Zn(p,n) ⁶⁸ Ga	1.11E+10 Bq /0.5h

^{64}Cu	12.7h	^{64}Ni	$^{64}\text{Ni}(\text{p}, \text{n})^{64}\text{Cu}$	$3.33\text{E}+09 \text{ Bq} / 1.5\text{h}$
^{89}Zr	78.4h	^{89}Y	$^{89}\text{Y}(\text{p}, \text{n})^{89}\text{Zr}$	$9.62 \text{ E}+08 \text{ Bq} / 3\text{h}$

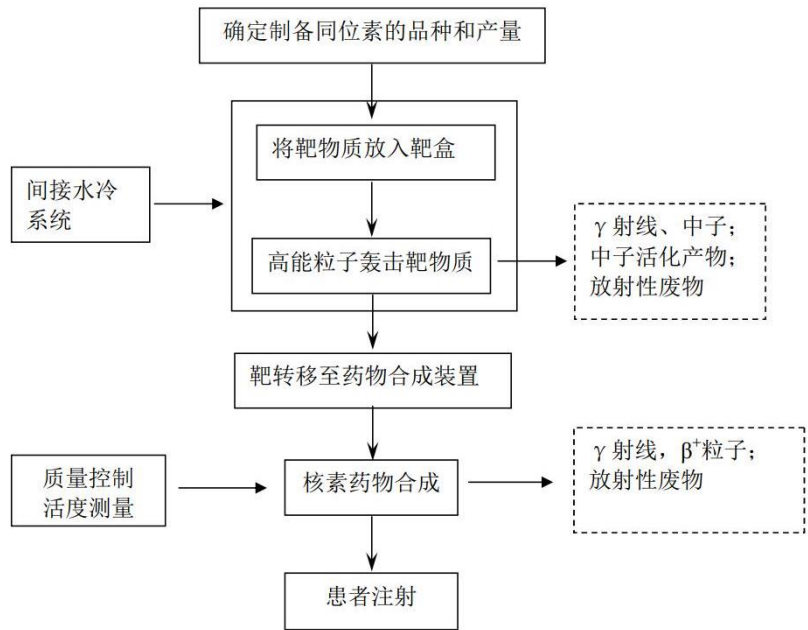


图 3-38 回旋加速器制备 PET 药物工艺流程图

（1）准备工作

根据预约患者数量选择靶材及综合制剂单元，进行放射性同位素生产前的物料准备。

（2）加速器运行

靶材料准备完毕后，加速器工作人员完成开机前的安全巡检，确定符合加速器开机逻辑后，按照操作加速器操作规程进行开机操作。该过程主要污染源为加速器允许过程中的瞬发辐射以及感生放射性。

（3）同位素产物输送

回旋加速器按照制备量和轰击时间完成制备后，将同位素产物通过专用的防护管道系统自动传到合成热室中。放射性药物输送管道铺设在地下管沟内，地下管沟从回旋加速器基座底部延伸到热室底部。

（4）放射性核素合成、分装、质检

回旋加速器制备的放射性核素，通过管道输送至合成热室内完成放射性药物的分离、纯化、标记等操作，任何一个环节不符合要求，计算机自动停止合成工作。整个合成过程约 1h。

合成后的放射性药物，经由屏蔽的专用管路自动传输到分装热室的收集瓶中，收集瓶被预先放置在药品分装防护装置内，工作人员进行药物分装。分装人员在分装热室根据当日患者数量分装 PET 药物，假设每人分装时间为 1min。

回旋加速器每制备一批次核素，均会取少量（0.1mCi）合成的放射性药物到质检室检验其放化指标。正电子放射性药物使用 40mm 厚的铅罐防护，从热室手提转移至质检室，在通风橱中进行质检。

上述过程中的主要辐射污染源为放射性同位素自身衰变产生的 γ 射线、 α 粒子、 β 粒子、表面污染以及放射性三废。

（5）药物的转运

分装后的药物盛放专用防护罐（40mmPb）中，工作人员利用专用药物运输推车送至核医学科，单次转运时间不超过 10min。

3.2.5.4 工作负荷及人员配备

本项目回旋加速器运行负荷如表 3-14 所示。

表 3-14 回旋加速器运行负荷一览表

核素	PET 药物制备量, Bq	产额	药物日最大合成量,Bq	打靶时间, h/天	年生产天数, 天
^{18}F	$4.63\text{E}+10^1$	$9.25\text{E}+10\text{Bq}/2\text{h}$	$4.63\text{E}+10$	2	250
^{13}N	$3.70\text{E}+10^2$	$4.10\text{E}+09\text{ Bq}/0.5\text{h}$	$2.05\text{E}+09$	0.5	50
^{11}C	$1.48\text{E}+10^3$	$4.88\text{E}+10\text{ Bq}/0.5\text{h}$	$2.44\text{E}+10$	0.5	50
^{68}Ga	$9.25\text{E}+09^4$	$1.11\text{E}+10\text{ Bq}/0.5\text{h}$	$5.55\text{E}+09$	0.5	100
^{64}Cu	$1.85\text{E}+09^5$	$3.33\text{E}+09\text{ Bq}/1.5\text{h}$	$1.67\text{E}+09$	1.5	50
^{89}Zr	$1.85\text{E}+09^6$	$9.62\text{ E}+08\text{ Bq}/3\text{h}$	$9.62\text{E}+08$	6	50

各工作人员工作负荷见表 3-15。

表 3-15 PET 药物制备区工作人员负荷一览表

项目	流程阶段	核素	单次工作时间 /min	年最大工作 负荷/次	年受照时 间/h	工作人员数 量, 人
回旋加速器 生产	运行回旋加速 器	^{18}F	120	350	700	2
		^{13}N	30	50	25	
		^{11}C	30	50	25	
		^{68}Ga	30	100	50	
		^{64}Cu	90	50	75	
		^{89}Zr	360	50	300	
药物制备	药物合成	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	60	450	225	2
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	60	100	50	
	药物分装	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	30	450	75	
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	30	100	17	
	药物质检	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	10	450	75	
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	10	100	17	
药物输送	药物输送	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	10	450	225	
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	10	100	50	

3.2.6 核医学科

3.2.6.1 设备组成

本项目拟配备 1 台 SPECT-CT 和 1 台 PET-CT，用于患者的显像诊断，各设备组成具体如下：

(1)PET-CT

PET 是正电子发射断层扫描（Positron Emission Tomography）的英文缩写，其工作原理为：将发射正电子的核素引入体内，正电子经湮灭辐射转换成的成对光子照射至体外，由 PET 的探测器采集，经过计算机重建而成断层图像，显示正电子核素在体内的分布情况，常用放射性同位素为 ^{18}F 。PET 通常由探测器、电子学系统、扫描机架、计算机数据处理系统、显示记录装置和同步检查床等组成。

PET/CT 将 PET 和 CT 两种影像技术相融合，一次成像同时完成 CT 扫描及 PET 扫描，通过识别图像的位置标志进行对位、融合，获得相应部位的融合图像，实现对病灶的准确定位和诊断。PET/CT 也可单独进行 PET 或 CT 显像。PET/CT

示例图见图 3-39。



图 3-39 PET/CT 示例图

PET/CT 拟配备 1 枚 Ge-68 放射源，由技师每周一次质控使用，质控时技师把密封源从储源室按要求取出放到 PET 检查床指定位置后回到控制室按规定程序进行扫描，扫描结果都通过后结束质控，把密封源取下运回源室。平常不使用时都储存在储源室内，并配有 20mmPb 屏蔽。

(2)SPECT/CT

SPECT 是单光子发射型计算机断层扫描（Single Photon Emission Computed Tomography）的英文缩写，其工作原理为：利用放射性核素从断层处发出的 γ 光子，通过探测装置进行探测和记录，并通过计算机处理系统，获取病灶部位的形态、位置等图像数据，用于病体的显像和诊断，常用放射性同位素为 ^{99m}Tc 。SPECT 通常由探测器、旋转运动机架、计算机及其辅助设备组成。

SPECT/CT 将 SPECT 和 CT 两种影像技术相融合，一次成像同时完成 CT 扫描及 SPECT 扫描，经图像处理系统完成图像融合，实现病灶的病理检查，提高诊断的准确性。SPECT/CT 示例图见图 3-40。



图 3-40 SPECT/CT 示例图

(3) 钼锝 (^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$) 发生器

本项目拟从供货商处购置钼锝 (^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$) 发生器，后续在进行分装/注射室淋洗得到 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，通过分装等操作得到 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物用于 SPECT 进行功能代谢显像。钼锝 (^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$) 发生器是一种内含母体核素 ^{99}Mo ，能产生子体核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的装置。其具体工作原理为： ^{99}Mo 以钼酸铵的形式溶解于氨水中，再转化到 0.01mol/L 盐酸体系，pH=3-3.5 条件下， ^{99}Mo 以 $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ 吸附在 Al_2O_3 色层柱上， $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ 衰变时产生 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 以 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 的形式存在，由于两者电荷不同，可利用 Al_2O_3 对其吸附能力差异，通过生理盐水将 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 淋洗下来，而母体仍留在发生器内。钼锝发生器的结构示意及外观见图 3-41。

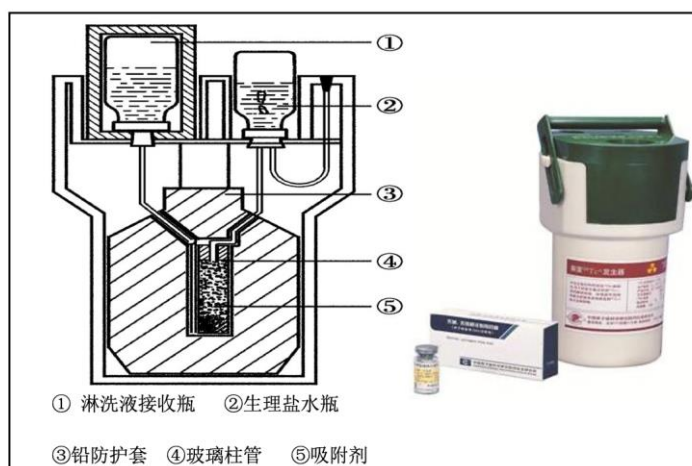


图 3-41 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器结构示意图及常用外观图

3.2.6.2 工作流程和产污环节

3.2.6.2.1 显像诊断

放射性药物经由静脉注射等方式进入患者体内，药物分布到特定器官并释放 γ 射线，利用 PET 和 SPECT-CT 等探测成像仪器进行扫描和显像。放射性同位素显像诊断的工作流程及产污环节分析如图 3-42 所示。

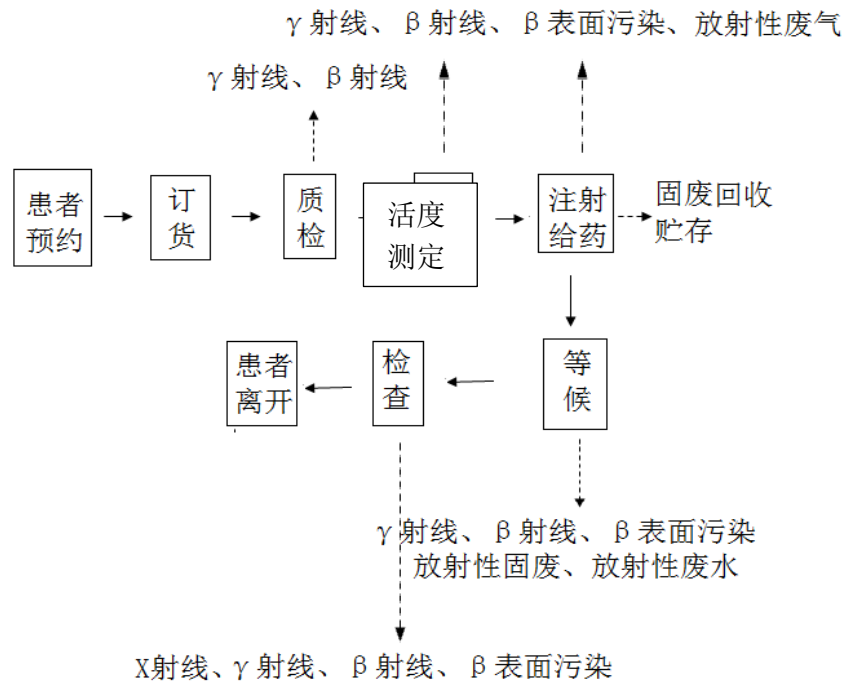


图 3-42 核素显像诊断工作流程及产污环节图

检查工作流程具体描述如下：

- ①患者预约：制定显像工作计划，并提前通知患者；
- ②订药：根据预约检查人数及检查项目，PET 显像药物通过 PET 药物制备区自制，SPECT 显像用药外购或自行通过钼锝（ ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ）发生器淋洗得到；
- ③药物操作：核医学科护士核对放射性药物名称、规格和数量，检查包装和外观质量，在摄像头监控下，“点对点”办理交接手续，暂存于储源间铅箱内，核医学护士对当天所用药物在分装柜内开展淋洗、活度测定、分装等操作；

④给药：在注射室内，护士手持带屏蔽套的注射器，在注射台的防护下给受检病人注射放射性药物；

⑤患者检查：患者在给药后病人候诊室等候，待药物在身体内有一定程度的代谢后，进入相应机房，在技师的语音指导下进行 SPECT-CT 或 PET-CT 扫描检查。必要时技师进入机房指导摆位；

⑥留观、离院：患者在扫描检查后，经观察无不良反应即可离开，如有不适则在留观室观察。

上述过程中的主要辐射污染源为放射性同位素自身衰变产生的 γ 射线、 β 粒子、表面污染以及放射性三废。

3.2.6.2.2 治疗

本项目开展 ^{223}Ra 和 ^{89}Sr 放射性药物的门诊治疗，目前主要用于对骨转移癌患者的治疗，患者在核医学科区域在 SPECT 注射窗口注射药物后，确认用药正常后离开核医学科并出院，其工作流程及产污环节见图 3-43。上述过程中的主要辐射污染源为放射性同位素自身衰变产生的 γ 射线、 α 粒子、 β 粒子、表面污染以及放射性固体废物。

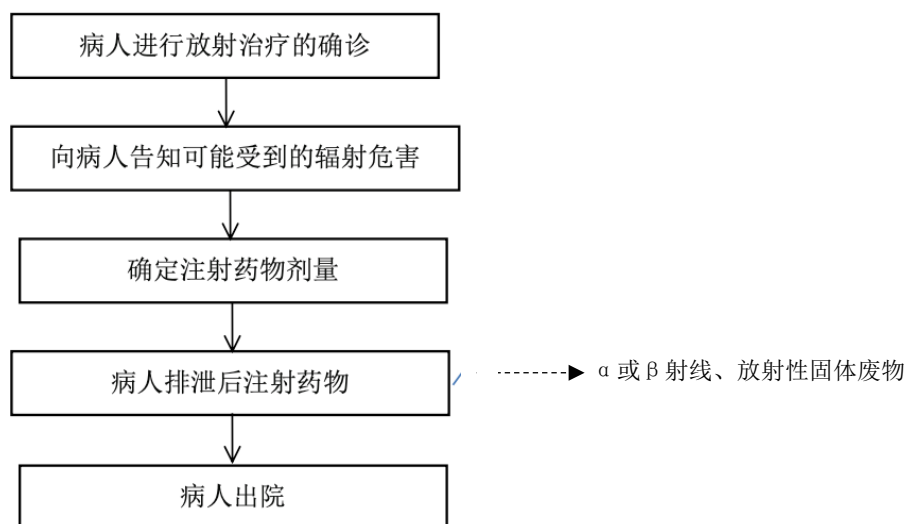


图 3-43 ^{223}Ra 、 ^{89}Sr 核素治疗工作流程及产物环节示意图

3.2.6.3 工作负荷及人员配备

核素显像诊断以及核素治疗预期工作负荷见表 3-16。

表 3-16 核医学科患者预期工作负荷

核素	最大给药量, MBq/人	日最大接诊量, 人/d	年使用天数, d/a	年最大接诊量, 人/a	用途
^{18}F	370 (10mCi)	25	250	6250	PET/CT 显像
^{11}C	370 (10mCi)	5	50	250	
^{13}N	370 (10mCi)	5	50	250	
^{68}Ga	185 (5mCi)	10	100	1000	
^{64}Cu	185 (5mCi)	5	50	250	
^{89}Zr	185 (5mCi)	5	50	250	
^{124}I	185 (5mCi)	5	50	250	
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	740 (20mCi)	30	250	7500	SPECT/CT 显像
^{223}Ra	7.4 (0.2mCi)	5	250	1250	^{223}Ra 治疗
^{89}Sr	148(4mCi)	2	250	500	^{89}Sr 治疗

核医学科工作人员预期工作负荷见下表。

表 3-17 核医学科工作人员预期工作负荷

工作人员		单次时间/min	年最大工作负荷/次	年受照时间/h
护士 (4 人)	PET 分装	1	8500	142
	PET 注射	0.5	8500	71
	淋洗	30	250	125
	分装	1	7500	125
	SPECT 注射	0.5	7500	63
	^{89}Sr 药物注射	1	500	8
	^{223}Ra 药物注射	1	1250	21
技师 (4 人)	PET 摆位 ¹	1	4250	71
	PET 扫描	10	8500	1417
	SPECT 摆位 ¹	1	3750	63
	SPECT 扫描	10	7500	1250
医师 (3 人)	急救 ²	20	50	34
备注: 1.摆位概率按 50%考虑; 2.急救患者按每周出现 1 次考虑。				

3.3 辐射源项分析

3.3.1 质子治疗装置

质子治疗装置运行过程中产生的辐射场，主要为装置运行时产生的“瞬发辐射场”和装置停机后依然存在的“残余辐射场”。瞬发辐射是装置运行时损失的粒子束流与结构部件和治疗室内患者等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但会随着装置的停机而完全消失；残余放射性主要来自与装置结构部件、冷却水、场所内空气等被束流或次级粒子轰击产生的活化产物，在装置停机后依然存在。

3.3.1.1 瞬发辐射源

3.3.1.1.1 瞬发辐射场分析

对于质子治疗装置，在质子束流形成、加速、传输和引出等过程中，都会发生束流的损失。损失的质子撞击在装置的结构部件，如磁铁、射程调节器、准直器等物质上，会与部件材料中的原子核发生核反应。

质子治疗系统从回旋加速器引出的质子最高能量为 230MeV，治疗终端输出的能量在 70MeV~230MeV 范围内。该能区的质子与物质的相互作用，以原子的电离和激发过程为主，同时穿过原子核的库仑势垒，进入原子核内部，发生核内级联，通过 (p, n) 、 (p, pn) 、 $(p, 2n)$ 、 (p, γ) 等核反应产生瞬发中子、 γ 等次级粒子。

在产生的次级粒子中，带电粒子因电离作用迅速停止，因此打靶产生的辐射场组成主要为次级中子和 γ 。其次级中子能量由低到高可分为热中子、蒸发中子和级联中子三部分。在屏蔽墙体的作用下，初始的热中子、蒸发中子和 γ 的数量迅速减少，不能穿透深屏蔽，级联中子成为穿透屏蔽墙的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽体的过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数量，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过 (n, γ) 反应等转变成了 γ 光子，使得达到一定屏蔽深度后，中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变，

形成“平衡谱”，最终在屏蔽墙体内、外的瞬发辐射场都为中子、 γ 的混合辐射场。

此外，患者定位系统的 X 射线管出束期间，会产生 X 射线，也是质子治疗期间瞬发辐射场的组成部分。

3.3.1.1.2 各环节束流损失分析

根据建设单位提供的资料，本项目质子治疗系统各束流损失点的束流损失情况如下。

(1) 对于回旋加速器室，最恶劣的情况是降能器降能到 70MeV 的情况，计算时各个束损点位的最大损失情况按下表考虑。

表 3-18 质子治疗系统束损参数表 1

束流损失点	质子能量/MeV	流强/nA	靶材料	损失率/%	损失流强/nA	损失方式
回旋加速器 D 型盒	230	49.0	Cu	20	9.8	集中损失
回旋加速器引出口	230	39.2	Cu/Fe/Al	50	19.6	集中损失
降能器	230	19.6	C+Be+Al	29.8	5.8	集中损失
准直器	70	13.8	Ta	87.85	12.0	集中损失
散度准直器+能量狭缝	70	1.67	Ni	83.8	1.4	集中损失
治疗头	70	0.27	Cu+Zn	0	0	——
患者	70	0.27	人体组织	100.0	0.27	集中损失

(2) 对于治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况，计算时各个束损点位的最大损失情况按下表考虑。

表 3-19 质子治疗系统束损参数表 2

束流损失点	质子能量/MeV	流强/nA	靶材料	损失率/%	损失流强/nA	损失方式
回旋加速器 D 型盒	230	11.75	Cu	20	2.35	集中损失
回旋加速器引出口	230	9.40	Cu/Fe/Al	50	4.70	集中损失
降能器	230	4.70	C+Be+Al	0	0	集中损失
准直器	230	4.70	Ta	24.3	1.14	集中损失
散度准直器+能量狭缝	230	3.56	Ni	86.8	3.09	集中损失
治疗头	230	0.47	Cu+Zn	0	0	——
患者	230	0.47	人体组织	100.0	0.47	集中损失

本次评价在辐射屏蔽复核计算时，将综合考虑以上（1）、（2）两种情况。

3.3.1.1.3 辐射场源项估算

3.3.1.1.3.1 FLUKA 程序

本次评价利用 FLUKA 程序模拟了质子分别与铁靶和水靶作用的中子和光子能谱分布。FLUKA 程序是 20 世纪 60 年代由欧洲核子研究中心（CERN）主导开发的，是用于计算粒子输运和与物质相互作用的通用工具。主要应用于质子和电子加速器及靶站的设计、辐射活化、辐射剂量学、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理、高能物理模拟、放射治疗等领域。可模拟包括中子、电子、质子在内的 60 余种不同的粒子及重离子，其中子能量范围从 10-5eV 到 20TeV，光子能量范围从 100eV 到 10000TeV，电子从 1keV 到 1000TeV，带电粒子及其反粒子为 1keV 到 20TeV，重离子为 <1000TeV/n。该程序还可以传输偏振光子（如同步辐射）和光学光子，在线进行不稳定剩余核辐射的时间演化和跟踪。FLUKA 还可以处理非常复杂的几何图形，能正确跟踪带电粒子，还提供各种可视化和调试工具。

FLUKA 的数据库主要采用了美国核数据中心 NNDC 的数据，在 CERN、SLAC 等国际大型质子、电子加速器中有多年的使用经验，采用卡片式输入与用户程序相结合的输入结构，使用较为方便。

3.3.1.1.3.2 中子能谱

根据对质子治疗系统瞬时辐射场的分析结果，其瞬发辐射场起决定性作用的是中子。中子产额、能谱和角分布与质子的能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。FLUKA 程序模拟的 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的辐射场如图 3-44 和图 3-45 所示。由结果可以看出高能质子核反应产生的瞬发中子有几个主要特点：

（1）从角分布看，前向的中子产额较高。随着出射角增加，谱峰向低能端移动；

(2) 从能谱看，几乎各个方向都有一部分高能中子，尤其是前方，其能量最高可与质子束的能量相当；

(3) 打铁靶与打水靶能谱的显著区别为：打水靶没有明显的蒸发中子峰，这是因为水中只有 H、O 两种元素，产生的中子主要来源于质子及次级中子与 O-16 的直接散裂反应和级联过程，不像铁靶那样容易形成复合核。

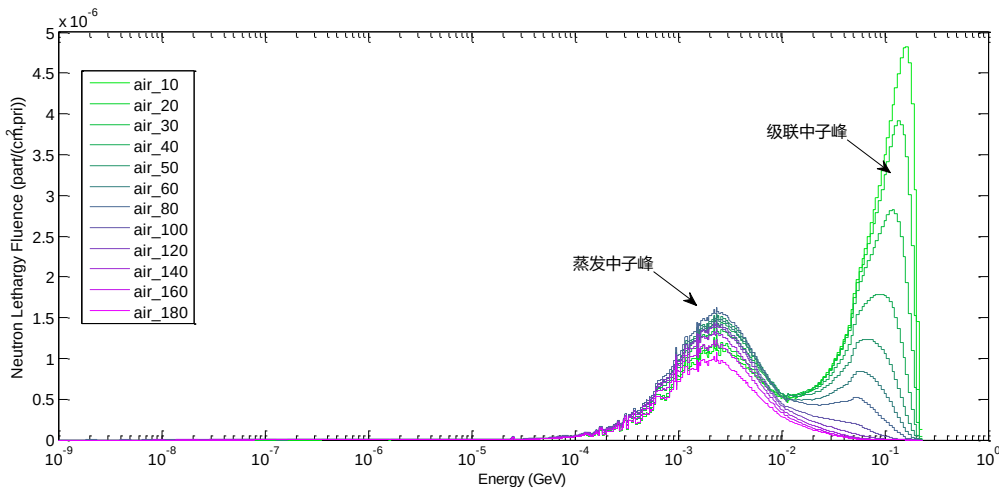


图 3-44 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布

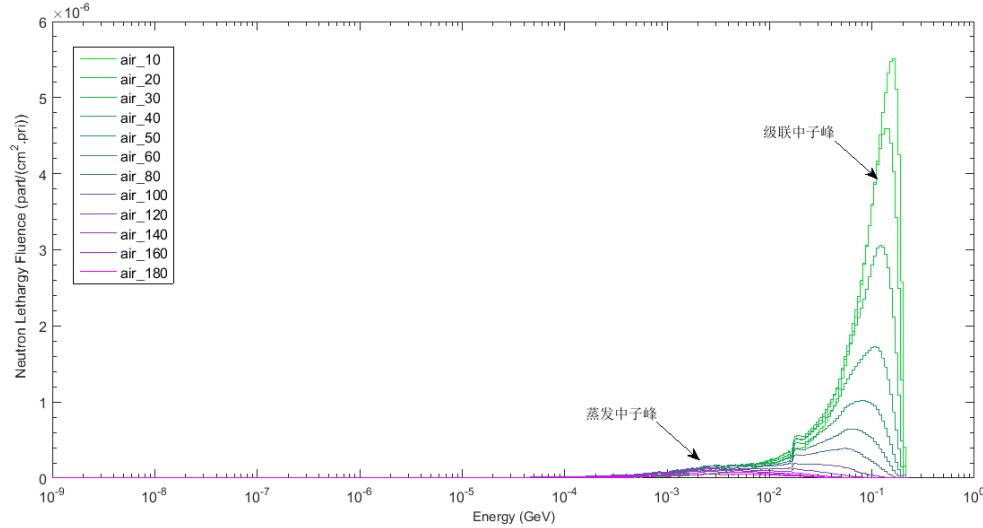


图 3-45 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布

3.3.1.1.3.3 光子能谱

FLUKA 程序模拟的 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的光子能谱如图 3-46 和图 3-47 所示。从角分布来看，光子几乎是各向同性的。无论是打铁靶或水靶，

谱峰均出现在 1MeV~10MeV 之间。

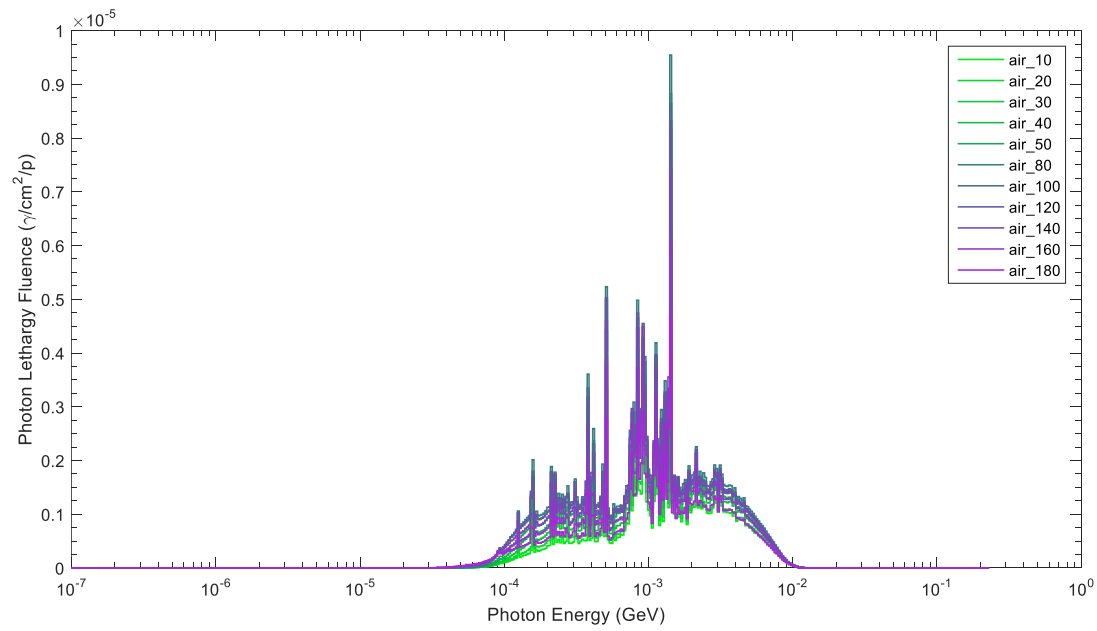


图 3-46 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

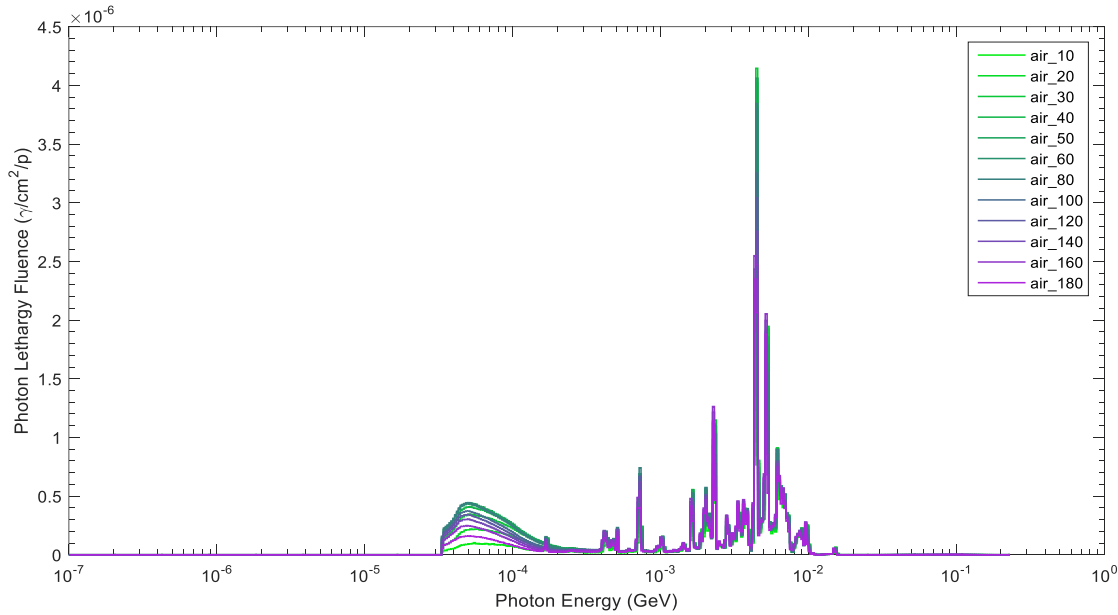


图 3-47 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

3.3.1.2 天空反散射

天空反散射来自于大气对辐射的反散射，当加速器所在机房屋顶未加屏蔽或

屏蔽体很薄时，穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射，由于空气的散射作用，将有部分又回到地面。根据文献《天空反照》（郑华智），对质子加速器、重离子加速器、甚至是一些能量较高的电子加速器，天空反散射剂量的主要成分都是中子，其能谱分布在热中子和加速器粒子能量之间。因此，本次评价主要考虑中子天空反散射。

透过屏蔽墙的快中子以及少量残存的高能中子在空气中不能被有效地阻止，在空气中发生一次次散射，低能中子被散射回地面。这些中子就是天空散射辐射的来源。天空散射随加速器开机产生，加速器停机便立刻消失。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。本项目质子治疗装置各区域顶板屏蔽体外剂量率列于表 3-20。

表 3-20 质子治疗装置各区域顶板外表面 30cm 剂量率

关注点	区域描述	剂量率计算结果，μSv/h
A14	回旋加速器顶板，不上人屋面	2.07
A16	束流输运线顶板，不上人屋面	4.94
B8	治疗室 1 顶板，不上人屋面	0.62
C11	治疗室 2 顶板，不上人屋面	0.65

由计算结果可知，束流输运线顶板剂量率高于 2.5μSv/h，需要考虑中子反散射的影响。本次评价利用 NCRP NO.144 报告 P331 页 Stapleton 公式对上述区域的中子天空反散射进行计算，具体见公式 3-1 和公式 3-2。各计算参数的取值列于表 3-21，计算结果列于表 3-22。

$$H(r) = Q \frac{\kappa'}{(h+r)^2} e^{-r/\lambda} \quad (\text{公式 3-1})$$

$$Q = \frac{d^2}{g} H(d,t)\Omega \quad (\text{公式 3-2})$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta) \quad (\text{公式 3-3})$$

式中，

κ' 为常数，取值 $2 \times 10^{-15} \text{Sv} \cdot \text{m}^2$ ；
 h 为常数，取值 40m；
 r 为源到关注点的距离，m；
 λ 为与中子能量上限对应的空气的中子有效吸收长度，m；
 Q 为穿透屋顶屏蔽达到顶板外表面的中子个数，n/h；
 d 为源到顶板外表面的距离，m；
 g 为单位中子通量的剂量当量， $\text{Sv} \cdot \text{m}^2$ ；
 $H(d,t)$ 为顶板屏蔽体外表面的剂量率， Sv/h ；
 Ω 为源从顶屏蔽辐射出的立体角。

表 3-21 中子天空反散射计算参数

参数	取值	来源
λ , m	450	NCRP NO.144 报告表 6.5，能量保守按 230MeV 考虑
d , m	5.16	CAD 图纸测量
g , $\text{Sv} \cdot \text{m}^2$	1.24E-14	文献《ACCELERATOR SKYSHINE:TYGER,TYGER,BURNING BRIGHT》(Particle Accelerator,1994,vol.44(1),pp1-15,GEOFFREY B.STAPLETON)表 4，保守取质子能量 226MeV，利用内插法计算得出
Ω , sr	6.28	θ 保守取值 90°
$H(d,t)$, Sv/h	表 3-20	FLUKA 程序计算

表 3-22 不同距离 r 处天空反散射造成的剂量率

距离 r, m	H(r), $\mu\text{Sv/h}$
5	6.51E-02
10	5.21E-02
20	3.54E-02
50	1.47E-02
100	5.44E-03
200	1.48E-03

由计算结果可知，质子治疗系统周围地面处由于天空反散射造成的剂量率最大值为 $6.51\text{E-}02\mu\text{Sv/h}$ ，该处由于天空反散射造成的公众年照射剂量为 $3.46\text{E-}03\text{mSv}$ （户外区域居留因子 $T=1/40$ ，年受照时间取为 2128h）。

3.3.1.3 感生放射性

质子治疗装置的感生放射性主要是束流与设备部件相互作用产生的感生放射性和束流损失产生的次级中子引起的感生放射性。感生放射性强度取决于被加速粒子的能量、流强、运行时间、被照材料性质等因素。

质子治疗装置产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响对象是对停机后，需要进入加速器大厅和治疗室内工作的物理师、技师以及维修维护工程师等工作人员。本次评价主要对质子治疗装置空气、冷却水、结构部件、土壤和地下水的感生放射性进行分析评价。

此外，根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期）和文献《质子加速器治疗系统感生放射性辐射剂量研究》（宋钢，2013 年，山东大学硕士学位论文）对治疗室内患者的感生放射性的计算和测量结果，当质子能量较高（230MeV）时，单次短时治疗结束后治疗室内感生放射性水平较高，停机 1min 后距离治疗中心 30cm 处剂量率水平可达 200μSv/h，停机 5min 后剩余剂量率可衰减为停机 1min 的 1/4。考虑到每次治疗任务结束后，短时间可能进入治疗室的摆位技师人员对治疗结束后的患者进行解除摆位操作时可能受到照射，本次评价对治疗室内患者的感生放射性进行了分析计算。

3.3.1.3.1 空气的感生放射性

质子治疗装置运行期间初级粒子或次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、 (γ, n) 反应和高能中子散裂反应等产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素如 ^3H 和 ^7Be ，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素，具体见表 3-23。

表 3-23 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量 份额	产生机制	活化反应截面 σ^2 , mb
-------	-----	----	----------------	------	---------------------------

¹¹ C	20.39min	N	7.55×10 ⁻¹	(γ , T)	0.7
		N	7.55×10 ⁻¹	散裂反应	10
		O	2.3×10 ⁻¹	(γ , an)	0.7
		O	2.3×10 ⁻¹	散裂反应	5
¹³ N	9.96min	N	7.55×10 ⁻¹	散裂反应	10
		N	7.55×10 ⁻¹	(γ , n) 反应	9
		O	2.3×10 ⁻¹	散裂反应	9
¹⁵ O	2.04min	O	2.3×10 ⁻¹	散裂反应	40
		O	2.3×10 ⁻¹	(γ , n) 反应	17
⁴¹ Ar	1.83h	Ar	1.3×10 ⁻²	热中子俘获	610

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告。

3.3.1.3.1.1 空气感生放射性静态饱和浓度

本次评价利用 FLUKA 程序计算了不考虑通风的情况下，质子治疗各区域空气感生放射性静态饱和活度，计算时考虑了所有束流损失点，并以各束流损失点处最高能量（230MeV）和最高损失流强为依据进行保守估算，计算结果列于表 3-24。

表 3-24 各区域空气感生放射性静态饱和浓度计算结果，Bq/m³

核素	回旋加速器大厅及束流输运线隧道	治疗室
¹¹ C	1.45E+04	2.02E+01
¹³ N	4.82E+04	3.48E+01
¹⁵ O	1.13E+05	2.35E+01
⁴¹ Ar	1.31E+04	2.92E+01
总计	1.88E+05	1.08E+02

3.3.1.3.1.2 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度

质子治疗装置运行期间，加速器大厅及束流输运线隧道以及执行治疗任务的治疗室均保持通风系统开启状态。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻各场所内空气感生放射性动态饱和浓度可由下式计算。计算结果列表 3-26。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} C_{sat} \quad (\text{公式 3-4})$$

式中，

C_t 为考虑通风的情况下，装置运行 t 时间后，停机时刻房间内空气中感生放射性动态浓度， Bq/m^3 ；

C_{sat} 为不考虑通风的情况下，装置运行 t 时间，停机时刻房间内空气中感生放射性的饱和浓度， Bq/m^3 ；

λ 为放射性核素的衰变常数， s^{-1} ； $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ ；

r_l 为正常运行时房间内的换气次数， s^{-1} ，见下表；

表 3-25 质子治疗装置各区域通风系统设计情况

区域名称	体积， m^3	送风量， m^3/h	排风量， m^3/h	换气次数，次/小时
回旋加速器大厅及束流输运线隧道	1000	4000	4400	4（平时）
		—	10000	>8（停机后）
治疗室机架区	1398	—	2800	2
治疗室治疗区	250	2500	2800	10

表 3-26 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度计算结果

核素	动态饱和浓度， Bq/m^3	
	回旋加速器大厅及束流输运线隧道	治疗室
^{11}C	4.90E+03	3.42E+00
^{13}N	2.46E+04	1.03E+01
^{15}O	9.41E+04	1.58E+01
^{41}Ar	1.14E+03	1.07E+00
总计	1.25E+05	3.05E+01

3.3.1.3.1.3 排入环境的空气感生放射性核素量

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”，质子治疗装置运行期间和停机通风期间向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由下式计算。

$$Q_t = \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) R_t dt = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \int_0^t (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) dt$$

$$= \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \left(t - \frac{1}{\lambda + r_1} + \frac{e^{-(\lambda + r_1)t}}{\lambda + r_1} \right)$$

(公式 3-5)

式中,

Q_t 为质子治疗装置运行 t 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度, Bq;

t 为质子治疗装置年运行时间, s, 质子治疗装置年出束时间为 2128h。

R_t 为质子治疗装置正常运行状态下的通风速率, m^3/s ;

由此可计算得出质子治疗装置运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量和年均排放速率, 列于表 3-27。

表 3-27 质子治疗装置运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率

核素	年排放量, Bq	年平均排放速率, Bq/s
^{11}C	4.69E+10	1.49E+03
^{13}N	2.36E+11	7.48E+03
^{15}O	9.01E+11	2.86E+04
^{41}Ar	1.09E+10	3.45E+02
总计	1.19E+12	3.79E+04

3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

质子治疗系统中, 用于冷却偏转磁铁等结构部件的冷却水, 在由束流损失产生的中子辐射场照射下会被活化。根据《加速器保健物理》(H.W.帕特森, R.H.托马斯), 高能中子与冷却水中的氧发生散裂反应, 产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 等放射性核素, 各放射性核素的参数见表 3-28。其中, ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 的半衰期很短, 装置停机后, 这些核素将迅速衰变, 浓度也会很快降低。因此, 冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 。

表 3-28 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

核素	半衰期 $T_{1/2}$	衰变常数, s^{-1}
^3H	12.3a	1.78E-09
^7Be	53.1d	1.51E-07
^{11}C	20.4min	5.67E-04
^{13}N	9.97min	1.16E-03
^{15}O	2.04min	5.67E-03

本次评价利用 FLUKA 程序对冷却水回路中的感生放射性进行了模拟计算，计算时使用的参数如下：

(1) 质子束损能量为 230MeV，连续运行时间为 4800h；

(2) 计算模型如图 3-48 所示，其中束流管道厚 0.4cm，长 10cm；磁铁厚 15cm，长 10cm；冷却水厚 3cm，长 10cm。

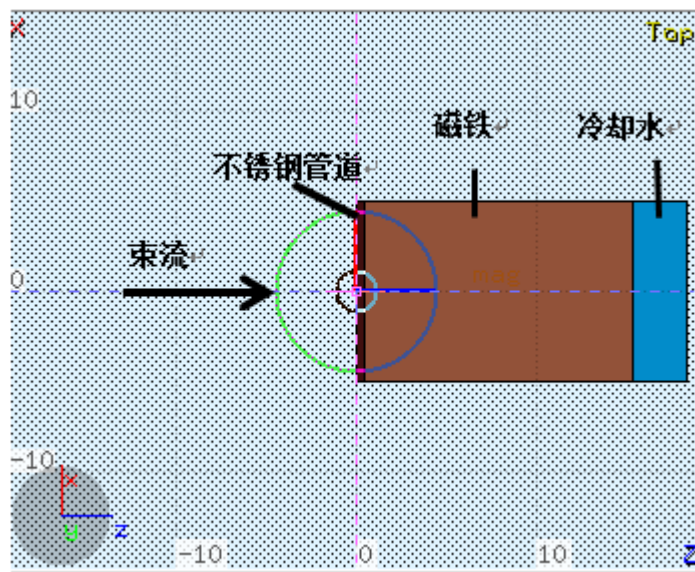


图 3-48 冷却水活化计算模型示意图

计算结果列于表 3-29。由此可知冷却水回路中冷却水感生放射性饱和活度为 $2.36\text{E}+09\text{Bq}$ ，单次检修排放的冷却水总量约为 5.68m^3 ，由此可计算得出冷却水的感生放射性饱和浓度为 $4.15\text{E}+08\text{Bq/m}^3$ 。

表 3-29 冷却水感生放射性计算结果

冷却水容量, m ³	活度浓度, Bq/m ³					
	³ H	⁷ Be	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	小计
5.68	1.20E+08	3.38E+07	8.84E+07	1.04E+07	1.62E+08	4.15E+08
总活度, Bq	6.83E+08	1.92E+08	5.02E+08	5.92E+07	9.22E+08	2.36E+09

本项目质子治疗系统活化冷却水中 ³H、⁷Be 的饱和活度分别为 6.83×10⁸Bq、1.92×10⁸Bq, ³H 的活度小于 GB18871 规定的豁免浓度值 1.00×10⁹Bq, ⁷Be 的饱和活度大于豁免浓度值 1.00×10⁷Bq, 需要暂存, 排放前必须委托有资质单位取样分析, 满足“1.4.8.2 节”所列中放射性废水排放标准后方可按一般废水排放。

3.3.1.3.3 结构部件的感生放射性

结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。质子治疗装置产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位, 如加速器偏转磁铁、引出口、降能器、准直器等, 其主要材料有铁、铜、不锈钢、碳、钽、镍等。相关实验研究表明, 加速器停机后活化部件中的放射性核素主要是 ⁵⁴Mn、⁵¹Cr、⁵²Mn 和 ⁶⁰Co 等半衰期较长的核素。

根据质子治疗装置的主要的束流损失点位分布, 利用 FLUKA 程序, 计算了质子治疗装置连续运行 100 天, 停机 4 小时后, 主要束流损失部位的感生放射性饱和活度。

各主要束流损失结构部件感生放射性饱和活度的计算结果列于表 3-30~表 3-32。由计算结果可知, 停机后感生放射性主要来自 ⁴⁸V、⁵⁵Fe、⁵⁹Fe、⁵⁴Mn、⁵⁶Mn、⁵⁶Co、⁵⁷Co、⁵⁸Co、⁶⁰Co 等半衰期在月级别的中长寿命放射性核素。

表 3-30 回旋加速器(铁)的感生放射性计算结果

元素	活度/Bq	元素	活度/Bq
³ H	1.74E+07	⁴⁸ V	2.00E+09
⁷ Be	8.43E+06	⁴⁹ V	1.01E+09
³³ P	4.80E+05	⁴⁷ V	1.35E+06
³² P	3.65E+05	⁵¹ Cr	1.31E+10
³⁵ S	5.99E+05	⁴⁸ Cr	4.39E+07
³⁷ Ar	4.26E+06	⁴⁹ Cr	1.92E+07

⁴² K	1.31E+07	⁵⁴ Mn	1.02E+10
⁴³ K	5.60E+06	⁵⁶ Mn	6.67E+09
⁴⁵ Ca	1.30E+07	⁵² Mn	2.86E+09
⁴⁷ Ca	5.02E+05	⁵¹ Mn	3.09E+07
⁴⁶ Sc	1.86E+08	⁵⁵ Fe	1.24E+10
⁴⁷ Sc	1.65E+08	⁵⁹ Fe	3.43E+09
⁴⁴ Sc	1.14E+08	⁵² Fe	1.91E+08
⁴⁸ Sc	5.43E+07	⁵⁶ Co	4.68E+08
⁴³ Sc	1.76E+07	⁵⁵ Co	2.58E+07
⁴⁹ Sc	3.06E+05	⁵⁷ Co	4.80E+06
⁴⁵ Ti	7.53E+07	⁵⁸ Co	2.00E+06

表 3-31 束流闸（Ni）的感生放射性计算结果

元素	活度/Bq	元素	活度/Bq
³ H	2.17E+07	⁵² Mn	3.19E+09
⁷ Be	6.33E+07	⁵⁴ Mn	1.23E+09
³⁷ Ar	1.72E+07	⁵¹ Mn	7.31E+07
⁴² K	8.58E+06	⁵⁶ Mn	5.96E+07
⁴³ K	2.00E+06	⁵⁵ Fe	1.95E+09
⁴⁵ Ca	4.64E+06	⁵² Fe	6.40E+08
⁴⁴ Sc	1.97E+08	⁵⁹ Fe	4.26E+07
⁴⁶ Sc	8.85E+07	⁵⁸ Co	1.58E+10
⁴³ Sc	5.21E+07	⁵⁶ Co	1.50E+10
⁴⁷ Sc	4.25E+07	⁵⁷ Co	1.12E+10
⁴⁸ Sc	9.67E+06	⁵⁵ Co	4.91E+09
⁴⁵ Ti	1.82E+08	⁶¹ Co	8.73E+07
⁴⁸ V	2.77E+09	⁶⁰ Co	4.83E+07
⁴⁹ V	8.51E+08	⁵⁷ Ni	1.41E+10
⁴⁷ V	3.70E+06	⁵⁶ Ni	2.18E+09
⁵¹ Cr	7.82E+09	⁶⁵ Ni	1.91E+06
⁴⁸ Cr	1.68E+08	⁶¹ Cu	9.54E+07
⁴⁹ Cr	3.46E+07	⁶⁴ Cu	2.60E+07

表 3-32 束流管（不锈钢）的感生放射性核素

元素	活度/Bq	元素	活度/Bq
³ H	2.95E+04	⁴⁸ V	6.84E+06
⁷ Be	4.98E+04	⁴⁹ V	2.17E+06
²⁸ Mg	9.28E+01	⁴⁷ V	8.26E+03
²⁸ Al	9.29E+01	⁵¹ Cr	1.57E+07
³¹ Si	7.61E+02	⁴⁸ Cr	2.53E+05
³² P	1.43E+04	⁴⁹ Cr	6.24E+04

³³ P	7.33E+03	⁵² Mn	3.39E+06
³⁵ S	1.20E+04	⁵⁴ Mn	2.09E+06
³⁸ Cl	1.33E+02	⁵⁶ Mn	1.52E+05
³⁹ Cl	1.15E+02	⁵¹ Mn	6.90E+04
³⁷ Ar	8.99E+04	⁵⁵ Fe	1.58E+06
⁴¹ Ar	1.63E+03	⁵² Fe	3.90E+05
³⁹ Ar	1.03E+02	⁵⁹ Fe	3.50E+03
⁴² K	8.42E+04	⁵⁶ Co	1.97E+06
⁴³ K	2.89E+04	⁵⁵ Co	8.14E+05
⁴⁵ Ca	4.50E+04	⁵⁷ Co	6.33E+05
⁴⁷ Ca	1.55E+03	⁵⁸ Co	4.14E+05
⁴⁴ Sc	8.83E+05	⁶¹ Co	4.90E+03
⁴⁶ Sc	5.72E+05	⁶⁰ Co	1.53E+03
⁴⁷ Sc	3.56E+05	⁵⁷ Ni	9.54E+05
⁴³ Sc	1.94E+05	⁵⁶ Ni	1.55E+05
⁴⁸ Sc	7.55E+04	⁶⁵ Ni	1.97E+02
⁴⁹ Sc	3.50E+02	⁶³ Ni	8.75E+01
⁴⁵ Ti	5.68E+05	⁶¹ Cu	5.62E+03
⁴⁴ Ti	1.18E+03	⁶⁴ Cu	1.56E+03

3.3.1.3.4 土壤和地下水的感生放射性

由 FLUKA 模拟计算结果可知底板与土壤交接处的剂量率均小于 5mSv/h，本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

3.3.1.3.5 治疗室内患者的感生放射性

患者感生放射性是由于患者自身组织与质子束流相互作用产生，以半衰期在半小时内的短寿命核素 ¹¹C、¹³N 和 ¹⁵O 为主。根据质子治疗装置的使用规划，每间治疗室满负荷运行的情况下，每小时规划治疗 3 人次。因此，平均每 20min 需要对病人进行摆位/解除摆位一次。由于解除摆位时，工作人员处于治疗室内且近距离接触刚受到照射的患者，因此需计算分析此时治疗室内患者感生放射性强度，以此确定摆位前有无必要等待合适时间再进入治疗室对患者解除摆位，并评估治疗后患者带有的感生放射性对治疗技师的辐射影响。

3.3.1.3.5.1 计算条件

治疗室内患者感生放射性的计算条件如下：

（1）能量：230MeV，束流：0.47nA，连续照射 5min。

（2）人体组织等效靶的组成成分采用文献《Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling》（Pacific Northwest National Laboratory, 2011）中推荐的 ICRP 标准软组织成分，列于表 3-33。

表 3-33 人体组织等效靶的组成成分

元素	质量分数，%
H	10.4
C	23.2
N	2.5
O	63.0
Na	0.1
Mg	0.01
P	0.1
S	0.2
Cl	0.1
K	0.2
Ca	0.02
Fe	0.005
Zn	0.003
总计	100

3.3.1.3.5.2 计算结果

采用 FLUKA 程序计算了停机 1min-5min、5min-10min、10min-30min 时间段，患者体表 50cm 处的剂量率分布，计算结果见表 3-34。

表 3-34 质子束单次治疗患者表面 50cm 处感生放射性剂量率随停机时间的变化， $\mu\text{Sv/h}$

停机时间段	距靶 50cm 处
1min-5min	2.74E+01
5min-10min	8.00E+00
10min-30min	2.30E+00

由计算结果可知，停机 5min 后患者体表 50cm 处剂量率最高为 $8\mu\text{Sv/h}$ ，停机

10min 后患者体表 50cm 处的剂量率低于 2.5μSv/h。

3.3.1.4 臭氧等有害气体

3.3.1.4.1 计算公式

在光子作用下，空气中的氧气可吸收辐射能量，发生辐射分解，生成氧原子，氧原子与空气中的 O₂ 结合生成 O₃，O₃ 再与空气中的 NO 结合生成 NO₂。根据 NCRP NO.144 报告，场所内的 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度可利用下式计算。

$$N_{sat} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + R} \quad (\text{公式 3-6})$$

$$C = N \frac{M}{N_A} \quad (\text{公式 3-7})$$

式中，

C 为场所内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度，g/m³；

N 为房间内单位体积的气体分子个数，个/m³；

g 为空气中单位光子能量沉积形成的气体分子数，eV⁻¹；

α 为气体分子的化学分解速率，s⁻¹；

κ 为单位光子能量沉积形成的分子数目，eV⁻¹·m³；

R 为房间换气次数，s⁻¹；

M 为气体的摩尔质量，g/mol；

N_A 为阿伏伽德罗常数，6.022×10²³mol⁻¹；

I 为空气中单位体积单位时间的光子能量沉积，eV/m³·s，根据《辐射防护基础》（李星洪等，原子能出版社）P39 页公式（2.19），I 可由下式计算：

$$I = 6.25 \times 10^{18} K \rho = 6.25 \times 10^{18} \phi \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right) E \rho \quad (\text{公式 3-8})$$

式中,

K 为光子在空气中的比释动能率, $\text{J/kg} \cdot \text{s}$;

ϕ 为光子注量率, $\text{p/m}^2 \cdot \text{s}$;

ρ 为空气的密度, kg/m^3 ;

μ_{en}/ρ 为光子在空气中的质能吸收系数, m^2/kg ;

E 为光子能量, J ($1\text{MeV}=1.6 \times 10^{-13}\text{J}$)。

3.3.1.4.1 各参数取值

各参数取值和来源列于表 3-35。

表 3-35 质子治疗机房臭氧饱和浓度计算参数取值

参数	取值	来源
g	O_3 : 0.103 eV^{-1} ; NO_2 : 0.048 eV^{-1}	NCRP NO.144 报告 P358
α	$2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P359
κ	$5.0 \times 10^{-24} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^3$	《Advanced Photon Source: Radiological Design Considerations》(APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July 1991)
R	$2.78 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	表 3-25
M	$M(\text{O}_3)=48 \text{ g/mol}$ $M(\text{NO}_2)=46 \text{ g/mol}$	——
N_A	$6.022 \times 10^{23} \text{ l/mol}$	——
ϕ	$7.96\text{E}+07 \text{ p/m}^2 \cdot \text{s}$	采用距靶点 1m 处的光子注量率作为机房内平均光子注量率进行保守计算
ρ	1.29 kg/m^3	——
μ_{en}/ρ	$2.966\text{E}-03 \text{ m}^2/\text{kg}$	《辐射防护基础》P45 页表 2-2, 保守取 0.05MeV 光子在空气中的质能吸收系数
E	$10\text{MeV}=1.6 \times 10^{-12} \text{ J}$	FLUKA 程序模拟

3.3.1.4.2 计算结果

质子治疗机房内 O₃、NO₂ 的饱和浓度计算结果列于表 3-36。由计算结果可知，质子治疗机房内 O₃、NO₂ 饱和浓度远低于表 1-17 中所列工作场所 O₃ 和 NO₂ 的相关限值。

表 3-36 质子治疗机房内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度计算结果

场所名称	饱和浓度, mg/m ³	
	O ₃	NO ₂
质子治疗机房	8.31E-09	3.71E-09

3.3.2 直线加速器

根据《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）及《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），电子直线加速器的辐射污染源主要包括：初级辐射（有用束）、次级辐射（包括泄漏辐射和散射辐射）、天空散射和侧散射辐射。

本项目使用 X 射线最大能量为 10MV，使用电子线的最高能量为 18MeV。电子线与机头、床、人体组织等作用产生的韧致辐射的能量和强度均低于电子束撞击金属靶时产生的 X 射线的能量和强度，且电子线在混凝土中的最大射程约为 5.1cm。因此，直线加速器机房及其防护门若能满足 X 射线的屏蔽防护，则也能够满足电子束治疗中产生的韧致辐射的屏蔽防护。

本项目使用 X 射线最高能量为 10MV，不需考虑中子的影响。

3.3.3 DSA、ERCP

本项目所使用的 DSA 和 ERCP 在曝光时，主要污染因子为 X 射线。注入的造影剂不含放射性，同时射线装置均采用先进的数字显影技术，不会产生废显影液、废定影液和废胶片。

由 DSA 及 ERCP 的工作原理可知，装置的 X 射线是随机器的开、关而产生

和消失。因此，本项目使用的 DSA 及 ERCP 装置在非出束状态下不产生射线，只有在开机并处于出束状态时才会发射 X 射线。因此，在开机期间，X 射线成为污染环境的主要因子。射线装置在运行时，X 射线与空气作用会产生极少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，此外无其它废水和固体废弃物产生。

3.3.4 III 类射线装置

使用模拟定位 CT 机期间，主要的放射性污染是 X 射线，仅在开机并处于出束状态时才会发出 X 射线。X 射线贯穿机房的屏蔽体进入外环境中，将对工作人员和机房周围人员造成辐射影响。

此外，X 射线与空气作用会产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。

3.3.5 PET 药物制备

3.3.5.1 回旋加速器

3.3.5.1.1 瞬发辐射源

本项目中的回旋加速器在使用过程中产生的电离辐射主要有初级辐射（被加速的带电粒子）、被加速后的带电粒子与物质相互作用产生的次级辐射（中子、 γ 射线等），中子辐射是回旋加速器生产过程中主要瞬发辐射源。

3.3.5.1.2 感生放射性

加速器打靶过程产生的次生中子与周围物质相互作用产生感生放射性。感生放射性主要产生在加速器的结构材料、冷却水、加速器机房空气中。

（1）空气感生放射性

回旋加速器运行时，中子与辐照系统周围空气以及加速器机房内的空气相互作用产生感生放射性。活化气体的主要感生放射性核素是 ^{41}Ar ，半衰期仅为 1.8h。事实上，由于空气中氩气含量仅为 1.3%（体积比为空气的 0.934%），所以中子与

空气中氩气发生 $^{40}\text{Ar}(n,r)^{41}\text{Ar}$ 核反应产生 ^{41}Ar 的机会较低，故 ^{41}Ar 的产额较小。

回旋加速器机房设置独立的排风系统。回旋加速器运行所致的活化气体，经活性炭过滤器和高效过滤器过滤后，由风管组织经排烟井至排气口排放。

（2）放射性废液

回旋加速器正常运行过程中，不产生放射废水。回旋加速器的冷却水为去离子水，可能存在一些中子活化产物，受中子活化而生成的短半衰期核素主要是： $^{13}\text{N}(T_{1/2}=9.96\text{min})$ 和 $^{11}\text{C}(T_{1/2}=20.4\text{min})$ 。由于靶冷却水（二级水冷却系统）采用闭合回路循环，正常情况下不外排。仅在事故情况下可能需要外排。

回旋加速器运行过程中会产生冲靶废水，冲靶废水由传送至合成热室内收集于废液瓶中，在合成热室暂存衰变，待其清洁解控。

（3）结构部件感生放射性

回旋加速器的质子束在加速器系统的内壁和引出窗存在束流损失，回旋加速器结构部件受到中子和次级 γ 辐射作用产生活化产物，回旋加速器运行期间产生的放射性固废主要为靶膜、碳膜等，其维护和更换委托回旋加速器厂家技术人员完成，暂存于回旋加速器机房的地下废物坑中。

3.3.5.2 放射性药物制备

3.3.5.2.1 放射性同位素

药物制备过程的辐射源主要来自放射性核素自发衰变发射的 γ 射线、 β 粒子对人体所致的直接外照射。

3.3.5.2.2 表面污染

放射性药物在分装、注射等环节，可能存在洒落的情况，对工作台、设备、墙壁、地面等产生放射性沾污，造成局部放射性表面污染。

3.3.5.2.3 放射性三废

药物制备过程中废液主要源于包括药物合成、分装和质检过程中产生的极少量的放射性废液以及辐射工作人员应急去污废水，其中放射性药物操作过程中的放射性废液暂存在热室/通风橱中，待其清洁解控。应急去污废水通过专业管道输送至专用衰变池。

药物制备过程中产生少量的沾污放射性核素硅胶、滤膜、试管、一次性手套等放射性固废，暂存于各操作间废物桶内，待其衰变满足清洁解控。

本项目制备的放射性药物最终的处理形态均为液态药物，热室采用专用的密封材料，散逸的放射性核素极少，同时本项目热室设置及独立的排风系统，逸散的放射性放气体经专用的排风系统过滤后排放。

3.3.6 核医学科

3.3.6.1 放射性同位素

药物分装、注射等过程的辐射源主要来自放射性核素自发衰变发射的 γ 射线、 α 粒子、 β 粒子，放射性同位素主要性能参数见表 3-37。

表 3-37 核医学拟使用放射性同位素主要性能参数

序号	核素名称	半衰期	衰变模式	光子能量, MeV	α/β 最大能量, MeV
1	^{18}F	109.8min	β^+ 、EC	0.511	0.63(β^+)
2	^{11}C	20.39min	β^+ 、EC	0.511	0.96(β^+)
3	^{13}N	10min	β^+ 、EC	0.511	1.19(β^+)
4	^{68}Ga	68.3min	β^+ 、EC	0.511	1.9(β^+)
5	^{89}Zr	78.43h	β^+ 、EC	0.917	0.91(β^+)
6	^{64}Cu	12.71h	β^+ 、 β^- 、EC	1.34(0.4%)、0.511(35%)	0.65(β^+)
7	^{124}I	4.17d	β^+ 、EC	0.603(62%)、1.6 (17%)、0.722(16%)	0.97(β^+)
8	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.02h	IT	0.140	-
9	^{99}Mo	66.02h	β^-	0.74	1.21(β^-)
10	^{89}Sr	50.53d	β^-	/	0.58
11	^{223}Ra	11.44d	α	0.269	5.87(α)、0.427 (β)
备注：数据主要参考《辐射防护手册（第一分册）》以及 GBZ120-2020					

3.3.6.2 表面污染

放射性药物在分装、注射等环节，可能存在洒落的情况，对工作台、设备、墙壁、地面等产生放射性沾污，造成局部放射性表面污染。

3.3.6.3 放射性三废

使用放射性药物过程中会产生一定量的放射性废液和放射性固体废物。放射性废液主要来自卫生间如冲厕废水，上述放射性废液经过专用管道输送至专用衰变池。

放射性固体废物主要来源于患者使用的注射器、棉棒、一次性防护用品等，上述放射性固废暂存于核医学科放射性废物间。

本项目使用的放射性药物均为液态，挥发性较低，且分装时间短，故使用过程中产生极少的放射废气，核医学科设置独立的排风系统，放射性废气经过滤后排放。

3.3.6.4 SPECT/CT 和 PET/CT

核医学科使用 SPECT/CT 和 PET/CT 过程中的主要污染因子为 CT 模式扫描产生的 X 射线，包括有用线束、漏射线和散射线。

3.3.6.5 放射源（校准用）

PET/CT 装置拟校准源的配置情况见表 1-2，根据《关于发布放射源分类办法的公告》（国家环境保护总局公告 2005 年第 62 号），项目拟配置的校准源（密封源）属于 V 类放射源。放射源的污染因子主要为 γ 射线。

3.4 小结

综上所述，本项目主要的辐射污染因子列于表 3-38。

表 3-38 本项目主要的辐射污染因子

装置名称	主要辐射污染因子	产生情况	处理方式及去向
质子治疗装置	质子	最高能量 230MeV	机房屏蔽体防护
	中子	最高能量 230MeV	机房屏蔽体防护
	光子	能量 1~10MeV	机房屏蔽体防护
	X 射线	定位 X 射线管最大管电压 150kV	机房屏蔽体防护
	活化气体	主要为 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等短半衰期核素。	机房通风系统排入环境
	活化冷却水	主要核素为 ^3H 、 ^7Be 。	暂存于活化冷水暂存池内，排放前取样监测，满足排放标准后排入医院污水管网。
	活化结构部件、废树脂	主要核素为 ^{48}V 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co ，多数核素的饱和活度均低于其豁免活度。	暂存于回旋加速器大厅，使其自然衰变。待衰变一段时间后，可回收利用部分，回收后复用；不可回收利用部分，满足解控标准的解控后按一般废物处理；不满足解控标准的委托有资质单位收贮。
	患者感生放射性	质子束照射人体产生，随停机时间的增加快速下降，停机 10min 后，患者体表 50cm 处剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。	自然衰变，患者照射结束后，停机等待一定时间后工作人员再进入机房内工作。
直线加速器	电子线	最大能量 18MeV	机房屏蔽体防护
	X 射线	最大能量 10MeV	机房屏蔽体防护
模拟定位 CT 机、DSA、ERCPC	X 射线	——	机房屏蔽体防护
PET 药物制备区域	γ 射线、 β 粒子	药物的合成、分装、质控、转运等过程中，产生 γ 射线、 β 粒子外照射。	合成及分装热室屏蔽防护
	放射性废气	药物合成和分装过程中挥发的量，产生量极少。	设置独立排风系统，废气经过滤后排放。
	放射性废液	应急情况下工作人员的去污废液及少量工艺废液	排入专用衰变池，满足解控标准后排入医院污水管网。
	放射性固体废物	药物合成过程中的废弃的一次性用品。	暂存于操作区专用废物桶内，满足解控标准，按一般医疗废物处理。
回旋加速器	质子、 γ 射线、中子	质子最高能量 10MeV，中子最高能量不超过 8 MeV， γ 射线最高能量不超过 5 MeV	回旋加速器自屏蔽+机房屏蔽体防护

	活化冷却水	正常运行情况冷却水不外排	暂存于地下三层集水井。排放前取样监测，满足排放标准后排入医院污水管网。
	活化气体	主要核素为 ^{41}Ar 。	经机房内排风系统过滤后排入环境。
	活化部件	放射性固废主要是靶膜、碳膜等，年产量不超过 1kg。	暂存机房内地下废物坑，满足解控标准，按一般废物处理，不满足解控标准的委托有资质单位处理。
核医学科	X 射线、 γ 射线、 β 粒子、 α 粒子等	X 射线能量不超过 150kV， β 粒子能量不超过 2MeV， α 粒子能量不超过 5.87MeV， γ 射线能量不超过 1.69MeV。	机房屏蔽体或专用防护设备进行屏蔽
	放射性废液	来源为给药后患者排泄物，主要核素为 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。	排入专用衰变池，满足解控标准后排入医院污水管网。
	放射性固体废物	来源给药期间注射器、针头、手套等，主要核素为 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。	分类暂存在放射性废物间，满足解控水平后按医疗废物处理。
	放射性废气	药物分装、注射过程中产生的含 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等放射性核素的废气。	经专用排风管道过滤后排入环境。

4 辐射安全与防护设施

4.1 质子治疗装置

4.1.1 场所布局与屏蔽

4.1.1.1 场所布局

4.1.1.1.1 辐射工作场所分区

根据 GB 18871-2002: “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”。根据 HJ 1198-2021: “5.2.1 放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下, 控制区包括加速器大厅、治疗室(含迷路)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)。”

本项目质子治疗系统辐射工作场所分区见图 4-1~图 4-3, 具体描述如下:

(1) 控制区: 加速器大厅和束流输运线、2 间治疗室;

(2) 监督区: 上述控制区屏蔽墙体外四周紧邻的场所。

控制区管理要求: 控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志, 门禁列入安全联锁系统, 装置运行期间禁止进入, 仅经授权并解除联锁后才能进入控制区内, 进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

监督区管理要求: 监督区入口处设标牌表明监督区, 需经授权方可进入, 进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

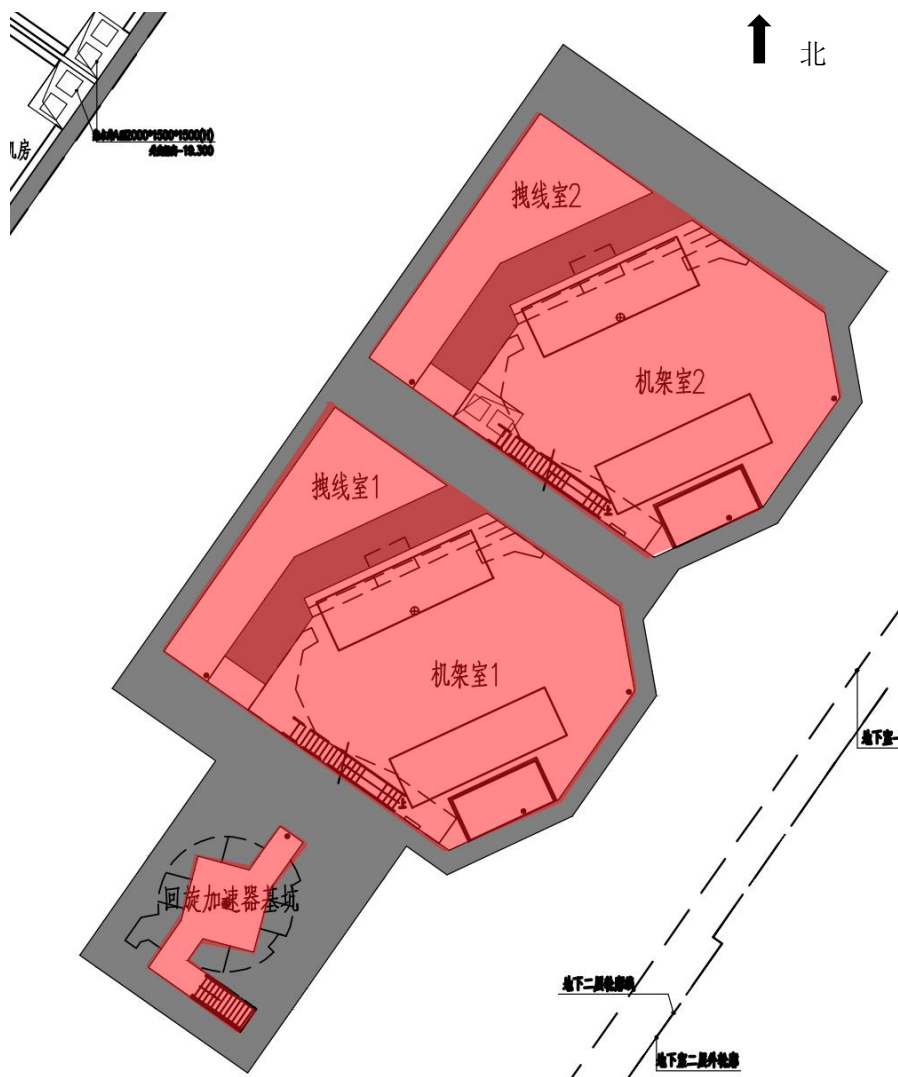
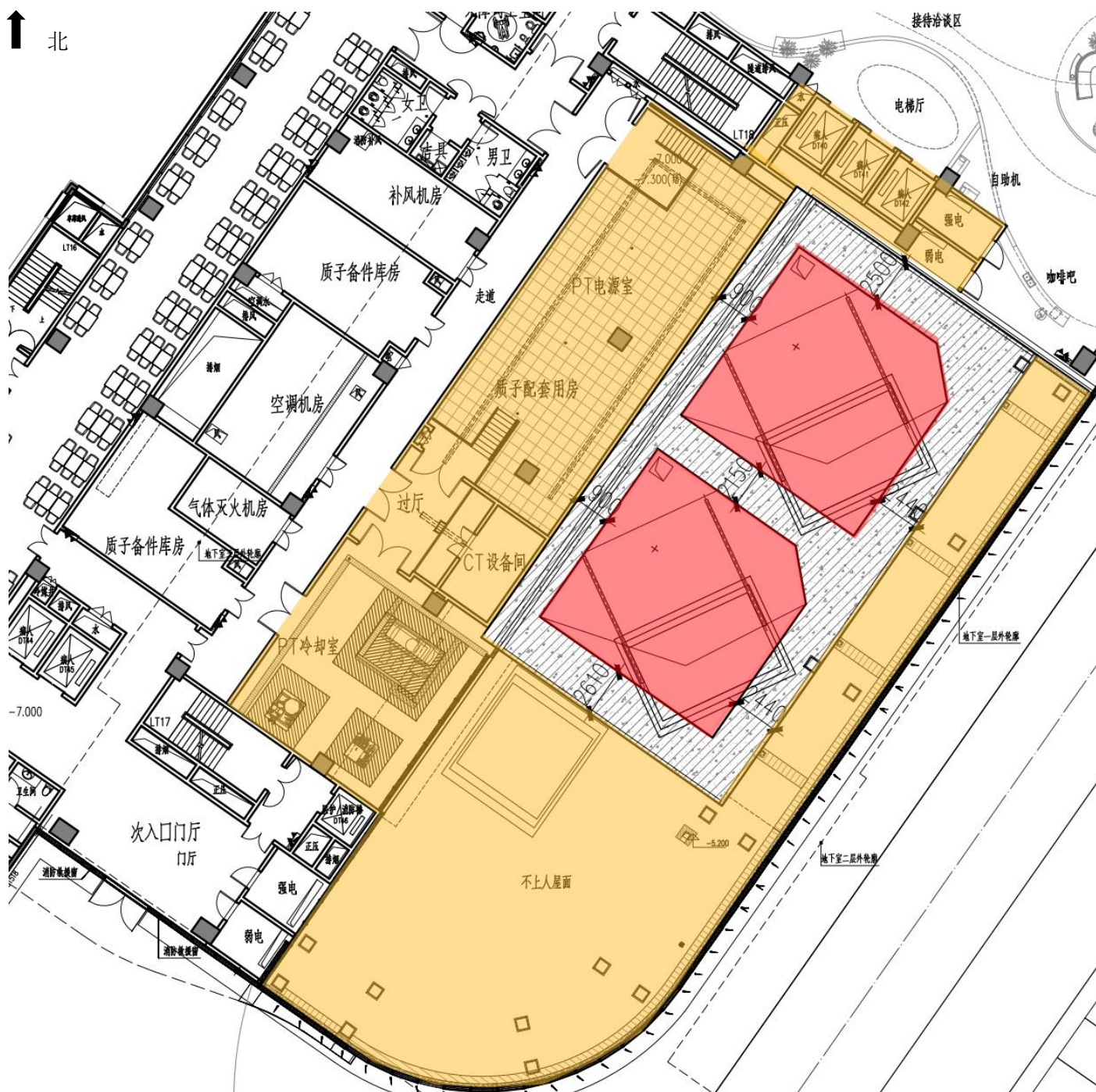


图 4-1 质子治疗系统地下三层辐射工作场所分区图



图 4-2 质子治疗系统地下二层辐射工作场所分区图



在质子治疗系统控制区的进出口设置如图 4-4 中所示警示标志，并给出辐射水平指示；在监督区的入口处的适当位置设置表明监督区的标牌。

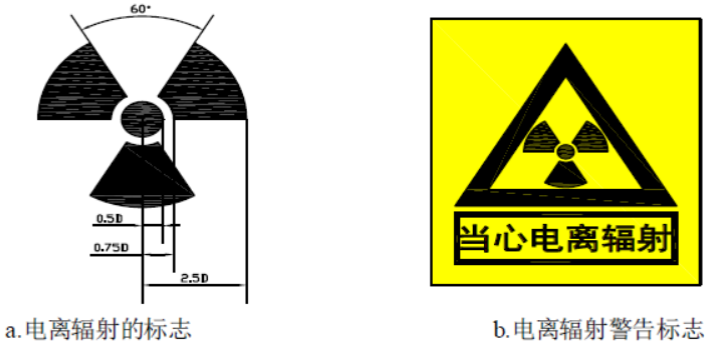


图 4-4 电离辐射警告标志

4.1.1.1.2 布局合理性分析

本项目质子治疗系统设置在医院内西南角的重离子质子治疗楼内。其中质子治疗系统主要功能区位于地下二层。质子治疗机房设置了物理隔离和相对独立的人流路线，与其他各医疗单元之间分隔明确，不会相互穿插和干扰，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。

质子加速器大厅入口和各个治疗室均设有迷道，紧邻场所的四侧屏蔽墙体、防护门和屋顶除控制室外无办公室等人员长居留场所。质子治疗机房顶板上方不需要人员到达并只有借助工具才能进入。辐射工作场所的进出口均设置了门禁管理，便于场所的防护管理与安全控制。整个质子治疗区房间功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关标准要求。从辐射安全防护和满足安全诊疗的角度来看，该区域的布局合理。

4.1.1.2 辐射屏蔽

4.1.1.2.1 设计标准

质子治疗装置工作场所辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

- (1) 年剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中对照射剂量约束和潜在照射危险约束的防护要求,以职业照射剂量限值的 1/4 即 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值,以公众照射剂量限值的 1/10 即 0.1mSv/a 作为公众的年剂量约束值。

(2) 屏蔽体外剂量率控制水平

质子治疗装置机房屏蔽体外各关注点处的剂量率应不高于表 1-5 中给出的剂量率控制水平。

4.1.1.2.2 屏蔽设计

质子治疗装置机房辐射屏蔽设计如图 4-5~图 4-7 所示,辐射屏蔽主材料均为普通混凝土(密度不低于 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$)。质子治疗机房辐射屏蔽设计及周围环境分布情况见表 4-1。

表 4-1 质子治疗装置辐射工作场所屏蔽设计及周围环境情况

场所名称	位置	墙体屏蔽厚度和材料	周围环境
回旋加速器大厅	东北墙	2.75m 厚混凝土	治疗室 1
	东南墙	1.9m 厚混凝土;局部有 0.535m~1.07m 厚, 6.24m 长混凝土	土壤
	西南墙	2.0m~4.5m 厚混凝土	排烟机房、弱电间、电梯间等
	西北墙	迷道从内到外: 1.5m+1.0m+1.5m 混凝土	SSA 机房、储藏间
	顶板	2.06m 混凝土	不上人屋面
	底板	1.5m 混凝土	土壤
	门	5cm 聚乙烯	迷道
		普通门	走廊
束流传输隧道	东北墙	迷道从内到外: 1.22m+2.44m+1.22m 混凝土	走廊

	东南墙	1.5m~1.9m 混凝土	土壤
	西南墙	3.0m~4.5m 混凝土	走廊
	西北墙	1.68m 混凝土	治疗室 1、治疗室 2
	顶板	3.6m 混凝土	不上人屋面
	底板	1.5m 混凝土	土壤
	门	普通门	走道
治疗室 1	东北墙	2.15m 混凝土	治疗室 2
	东南墙	1.68m 混凝土	束流传输隧道
	西南墙	2.26m~2.75m 混凝土	回旋加速器大厅
	西北墙	迷道从内到外：2.0m+1.145m 混凝土	治疗控制室 1、走道
	顶板	2.44m 混凝土	不上人屋面
	底板	1.5m 混凝土	土壤
	门	普通门	走道
治疗室 2	东北墙	2.5m~2.8m 混凝土	电梯、走廊
	东南墙	1.68m~3.855m 混凝土	束流传输隧道及其迷道
	西南墙	2.15m 混凝土	治疗室 1
	西北墙	迷道从内到外：2.0m+1.145m 混凝土	治疗控制室 2、患者固定装置存储 房间、患者治疗设备存储房间
	顶板	2.44m 混凝土	不上人屋面
	底板	1.5m 混凝土	土壤
	门	普通门	走道



图 4-5 质子治疗装置地下二层屏蔽墙体设计平面示意图

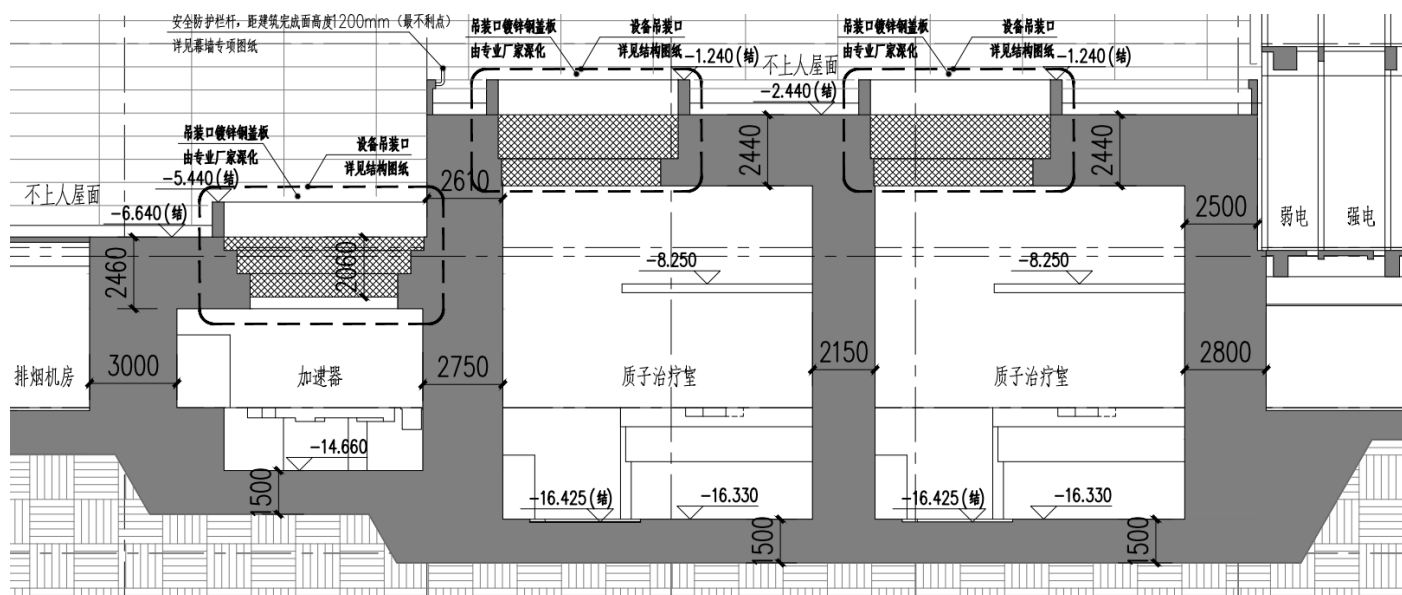


图 4-6 质子治疗装置屏蔽墙体设计剖面示意图

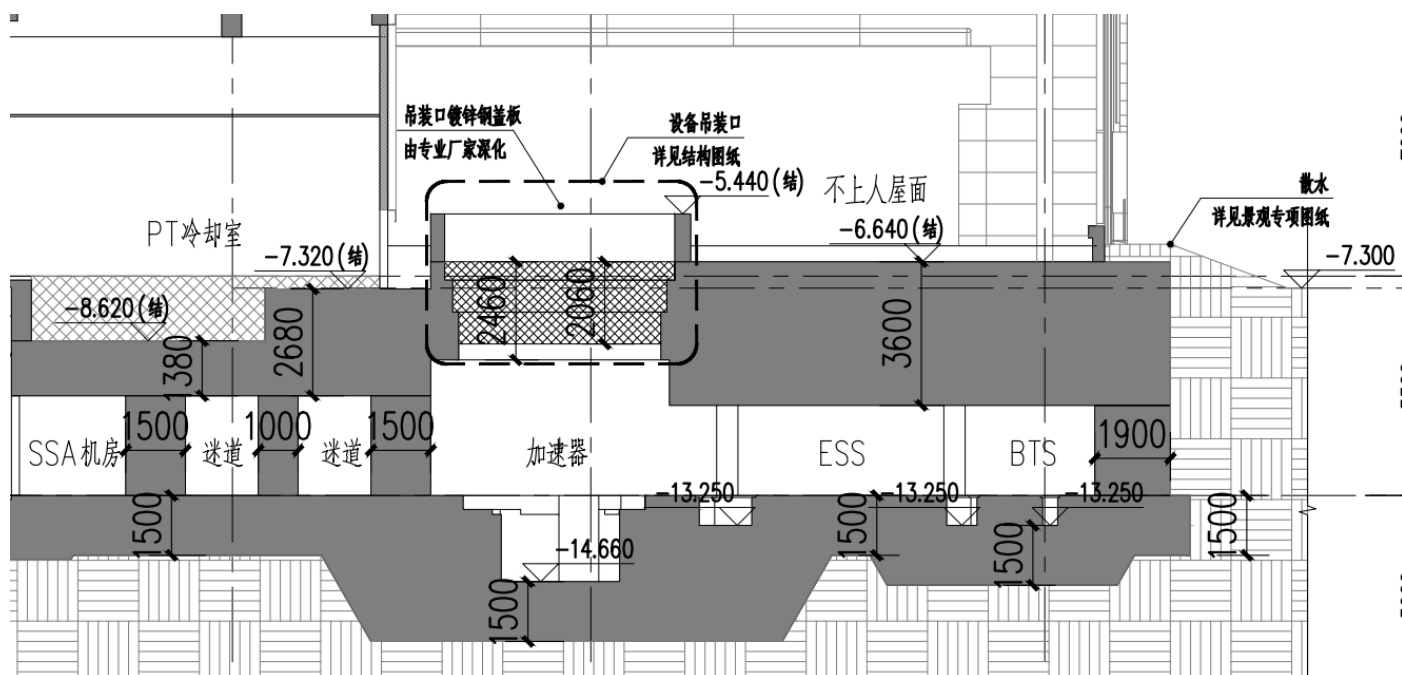


图 4-7 质子治疗装置屏蔽墙体设计剖面示意图

4.1.2 辐射安全与防护措施

4.1.2.1 人身安全联锁系统

4.1.2.1.1 设计准则

从人员安全和系统安全角度考虑，系统全局的进行人身安全联锁系统设计，选择故障安全型元件设备和控制器，进行冗余和联锁设计，软件上进行系统状态、设备心跳信号实时监测，在保证设备正常工作前提下，系统所有的状态均安全可控，所有状态均反馈给操作人员和最终用户，防止患者、工作人员和公众遭受射线照射、运动部件的碰撞、挤压、电源触电等伤害。具体如下：

（1）纵深防御：充分考虑并合理设置联锁设施实现对人身辐射安全的多重冗余保护且各重保护措施之间具有相互独立性，不但重要场所进行多重“冗余”设计，整个系统也为“冗余”，一般采用四重冗余安全措施；

（2）硬件最可靠：重要的位置把最大的信赖寄托在“硬件”上；

（3）最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是设备最初始的运行功能（如离子源的高压等），更好的保证区域内的辐射安全；

（4）失效保护设计：关键联锁部件及联锁系统失效时，相应联锁控制区域仍处于安全状态；

（5）自锁：联锁系统主要环节有自锁功能，即一旦联锁从该处实施切断，现场辐射安全人员必须到现场检查，确保不安全因素已排出后再手动进行“复位”。

4.1.2.1.2 系统结构和功能

（1）安装直接控制离子源的“离子源电子单元”，凡是由测量剂量的“游离子单元”传来超剂量信号或由量程调制器电子单元传来的错误调制量程信号等都能在几十微秒时间内切断离子源，确保安全。

(2) 安全联锁系统是一个专用的全部用硬件连接的系统，将质子治疗建筑、设备和单元部件中一切关键的与辐射安全有关的联锁信号（如离子源供电电源、束流线上的束流闸、旋转机架和患者定位系统的马达、治疗室和加速器大厅门开关等）彼此串联成一个“安全锁链”。当其中任何一个安全联锁条件不成立时，对应联锁接点就会打开，断开此安全链，切断质子束流。安全锁链控制的功能主要如下：

- a. 切断离子源供电电源，阻止在加速器中产生质子；
- b. 切断加速器高频调制器，停止质子加速，是阻止切断质子产生的冗余措施；
- c. 关闭能量选择系统入口处的束流闸，阻止束流通过；
- d. 关闭能量选择系统出口处的束流闸，阻止束流通过；
- e. 关闭治疗室入口处的束流闸，若安全条件不满足，即阻止束流进入治疗室；
- f. 关闭治疗室的马达、旋转机架的转动，若安全条件不能满足，即阻止一切机械动作。

(3) TSS 控制系统使用不间断电源供电，控制器系统一直处于运行状态，负责整个 PTS 系统的电源供电控制。任何试图对 TSS 的断电意味着整个系统所有设备的断电。

治疗安全系统（TSS）由一系列叫做安全冗余控制单元（SRCU）的独立控制单元组成，每个 SRCU 保证一个指定区域的人员安全：其中，控制加速器区的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCU0（由主控室操控），治疗室的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCUX（X 为治疗室号，以 2 个治疗室为例，X 从 1 到 2）。各区域的硬安全联锁信号都接入各自的 SRCU，形成一个软安全联锁系统。SRCU 既是硬安全联锁系统的一个冗余安全系统，以备硬安全联锁失效时起到安全联锁作用，又能对所有硬安全联锁信号状态进行监测和显示。

(4) 除硬安全联锁和软 SRCU 安全联锁系统外，系统本身还设有一个安全应用程序，一旦上述多重安全联锁都失效时，该程序能立即切断质子束流。

4.1.2.1.3 系统组成

质子治疗装置的人身安全联锁系统主要由钥匙控制、门磁系统、清场搜索按钮、急停按钮、声光报警器等组成，安全联锁设施具体点位如图 4-8 和图 4-9 所示，具体数量见表 4-2。

4.1.2.1.3.1 钥匙控制

回旋加速器主控室和每间治疗室控制室内均设有一个控制面板，控制面板上设有四个按钮，包括一个“beam pause”按钮、一个急停按钮、一个带主控钥匙的转换开关，一个用于切换“ACU service mode”的控制元件（该元件用于将加速器状态切换至维修状态，在该状态下，加速器无法出束）。

主控钥匙转换开关有“ON”和“OFF”两种转换状态，用于控制束流的开启和停止。在加速器停机期间进入加速器大厅或治疗室内的工作人员，应先登记然后从相应区域的控制室，将主控钥匙旋转至“OFF”状态，使得加速器停机，切断束流，并拔下钥匙随身携带，防止他人误操作；从该区域出来后，在所有清场搜索按钮以及门磁系统等都建好联锁后，只有当主控制钥匙插入并转到“ON”的状态，才能最终给出允许开机信号。主控制钥匙未归位时，各辐射区均无法出束。

此外，加速器大厅迷道入口的门设有 3 把钥匙，两名加速器运行维护人员各持有一把。另一把为备用钥匙，平时不使用，放入保险柜中，由加速器负责人保管。钥匙由专人负责管理，实行领用登记制度。

4.1.2.1.3.2 门磁系统

门磁系统设置在加速器大厅和各治疗室出入口处，用于控制加速器的束流输出，其中加速器大厅的门磁系统包括：

（1）门禁卡：人员进入加速器大厅内需刷门禁卡。

（2）门限位开关：门限位开关的作用是保证防护门一旦离开固有位置则会启动联锁系统，切断装置出束。主要是迷宫门与各质子加速器离子源高压联锁，

保证在门打开的瞬间加速器瞬间退高压关机以保证进入人员的安全。其安装点位如图 4-8 和图 4-9 所示。

4.1.2.1.3.3 清场搜索按钮

清场搜索是在开机前执行一套特定的安全搜索程序完成清场和建立联锁，联锁完成信号作为开机的必要前提条件之一，从而确保在开机前无人员滞留在里面。清场搜索按钮分布于加速器大厅、束流输运隧道和各治疗室内部四周沿途一定距离、一定高度的墙壁上，具体点位如图 4-8 和图 4-9 所示。

每个搜索子区设搜索时间窗限制和搜索顺序，超出搜索时间或违反搜索顺序需重新进行清场。清场搜索共分为加速器大厅区域（含加速器区及束流输运隧道区）以及 2 间治疗室共计 3 个区域，每个区域的清场搜索系统是相互独立的。其中加速器大厅区域又分为束流输运隧道区（子区 1）和加速器区（子区 2）共 2 个子区；每间治疗室分为机架基坑区（子区 1）和治疗区（子区 2）和共 2 个子区。每个子区也是相互独立的。

加速器区域和治疗区域的清场搜索逻辑如图 4-10 所示，清场搜索路线见图 4-8 和图 4-9，具体流程如下：

每天首次治疗开始前，由当天现场负责的工作人员在规定的时间内按照规定的路线，对质子治疗区清场搜索。通常的清场搜索顺序为：加速器大厅区域（子区 1 → 子区 2），治疗室 1 和治疗室 2（子区 1 → 子区 2）。工作人员确定该被搜索区域无除治疗室内患者以外的人员停留后按下“清场搜索按钮”，当清场搜索按钮被按下后时，该区的声光报警装置发出声、光报警信号，提醒人员离开该区域。通常加速器大厅区域在每次开机前进行一次清场搜索；各治疗室则在每次治疗前进行一次清场搜索。任一子区的清场状态被破坏（如门打开或清场搜索按钮未按下），都需要对该子区重新进行清场。

只有当清场搜索完成、质子治疗区所有区域的联锁门都已处于关闭状态、医生工作台束流控制设备处于允许状态，质子治疗系统才满足供束条件。



图 4-8 质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（地下二层）

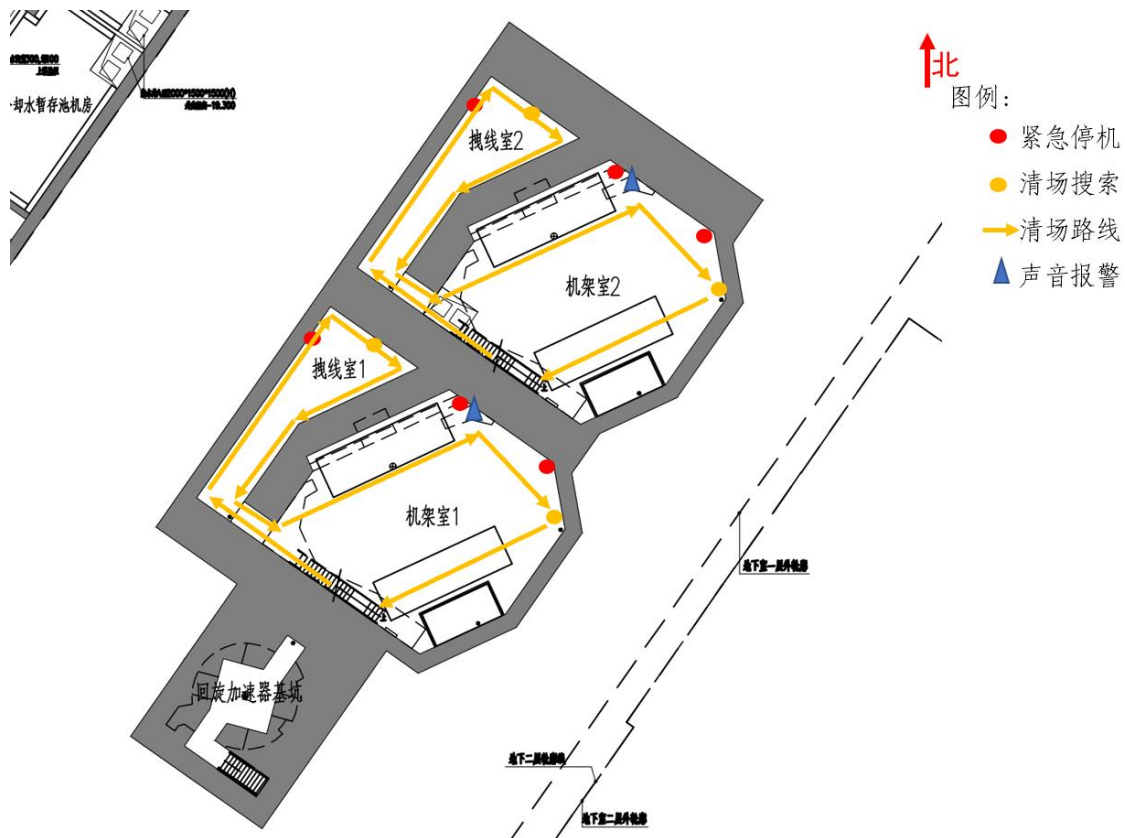


图 4-9 质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（地下三层）

表 4-2 质子治疗系统安全联锁设备数量表

区域		设备名称	设备数量，个
地下二层	加速器大厅（含能选系统及束流输运线）	联锁门	5
		紧急开门按钮	3
		紧急停机按钮	12
		清场搜索按钮	3
		声音报警	2
		警示灯	3
		束流状态指示灯	6
		γ 探测器及中子探测器	各 3 台
	主控室	紧急停机按钮	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗室 1	联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	6
		清场搜索按钮	1
		声音报警	1
		束流状态指示灯	2

	治疗控制室 1	γ 探测器及中子探测器	各 2 台
		紧急停机按钮	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗室 2	联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	6
		清场搜索按钮	1
		声音报警	1
		束流状态指示灯	2
		γ 探测器及中子探测器	各 2 台
	治疗控制室 2	紧急停机按钮	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
地下三层	治疗室 1	紧急停机按钮	3
		清场搜索按钮	2
		声音报警	1
	治疗室 2	紧急停机按钮	3
		清场搜索按钮	2
		声音报警	1

清场人员确认所有清场搜索按钮全部按下后，并将主控钥匙插回主控室的控制台上，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。

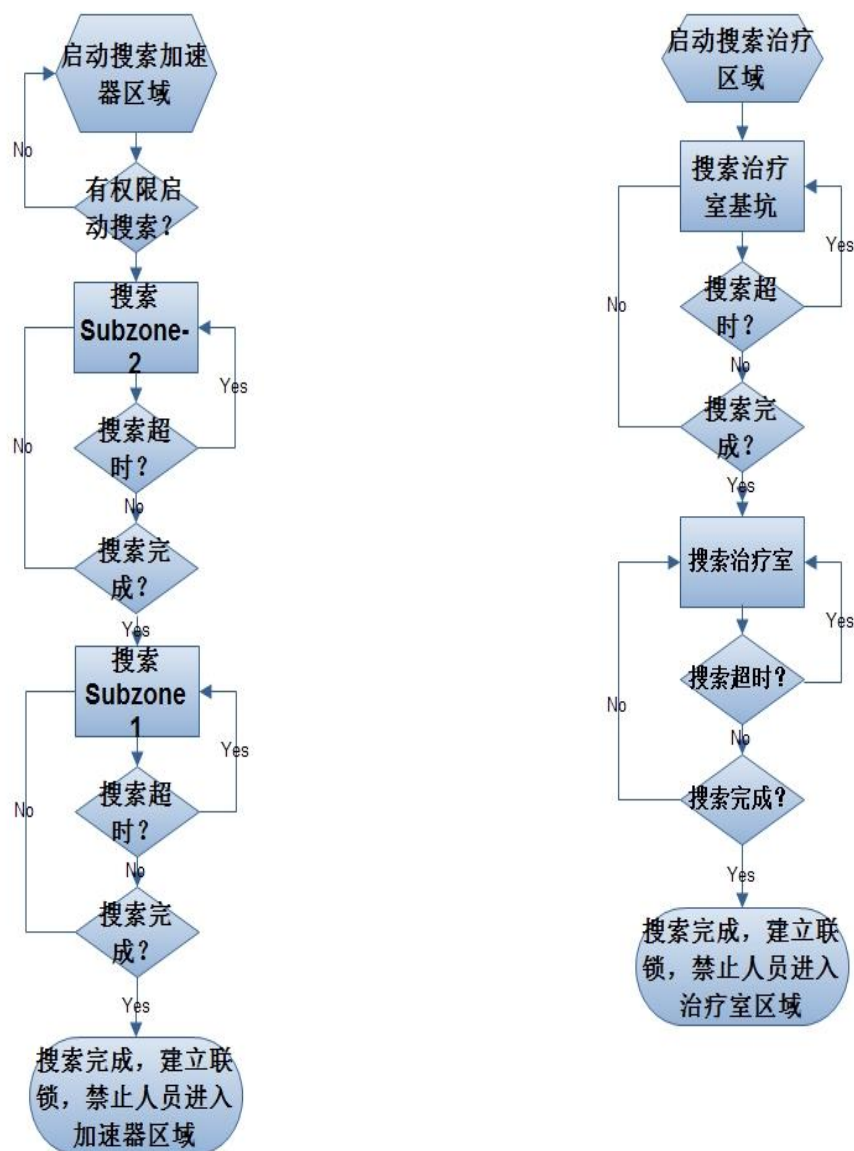


图 4-10 质子治疗系统清场搜索逻辑图

4.1.2.1.3.4 紧急停机

加速器大厅、各治疗室以及这些区域的控制室内均安装若干各紧急停机按钮，如图 4-8 和图 4-9 所示。若装置开机后仍有人员滞留在这些区域内，可就近按下该区域出口处的紧急停机按钮切断加速器运行。待确认控制区内无工作人员并将急停按钮复位后可重新开机操作。

4.1.2.1.3.5 束流监控装置

(1) 束流闸

质子治疗系统在由能量选择系统引出至各治疗室的分支束线上设有束流闸，束流闸按照“失效保护”的原则设计，其材质为铝或铜。只有当安全联锁逻辑中所有条件都成立时，束流闸方可打开，束流方可进入下游区域。安全联锁逻辑中任意条件被破坏，束流闸均不能打开。束流闸安装点位如图 4-11 所示。

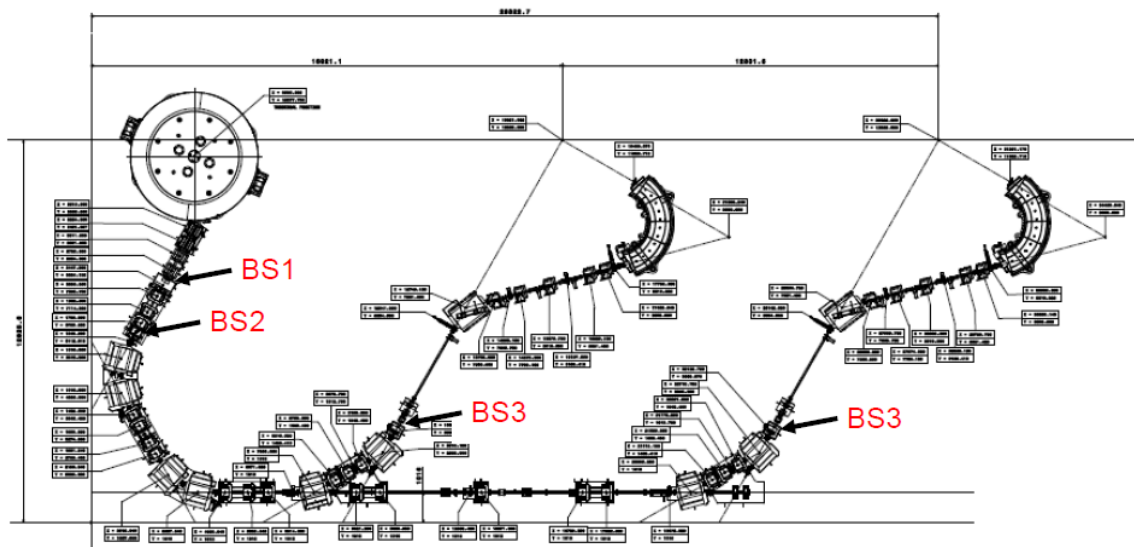


图 4-11 质子治疗系统束流闸安装点位示意图

(2) 束流监测

质子治疗系统在其输运线和治疗室的治疗头内均设置了束流监测系统，监测设备都由人身安全联锁系统监控，一旦监测到不应该出现束流之处有束流，会立刻中断束流。

(3) 束流安全设备

束流安全设备包括离子源、束流注入引出控制磁铁、束流降速降能控制器、主环上的磁铁、高能束流线束流切断系统快二极铁、高能束流线法拉第杯、分支线弯转磁铁、分支线束流闸，分布于整个装置的束流沿线。定位安全设备包括定位机械转臂、旋转支架、射线终端可移动喷嘴。

束流安全设备处于启动状态时，束流将通过这些安全设备。当束流安全设备处于停止状态时，束流将无法通过该安全设备。定位安全设备处于启动状态时，治疗师通过患者资料，操作定位系统，定位患者肿瘤位置。当定位安全设备处于

停止状态时，定位系统处于停止状态，治疗师无法操作。

因此，通过控制这些安全设备的启停状态可以控制束流的分布区域以及定位系统的开关状态。辐射安全联锁系统对是否允许安全设备工作进行控制。如果联锁系统不允许安全设备工作，则安全设备处于停止状态。如果联锁系统允许安全设备工作，则由束流和定位安全控制系统对安全设备的启停进行控制。

4.1.2.1.3.6 状态指示和声光报警

(1) 状态指示

回旋加速器大厅、束流输运隧道入口和内部四周沿途一定距离处以及各治疗室入口处，安装有束流状态指示灯，具体点位如图 4-8 和图 4-9 所示。

(2) 声光报警

回旋加速器大厅及其控制室、束流输运隧道、2 间治疗室均设置了声光报警装置，具体点位如图 4-8 和图 4-9 所示。

4.1.2.1.3.7 摄像头和对讲装置

在加速器厅和各个治疗室内布置必要的摄像监视装置，根据场地面积和结构要求尽可能覆盖所有区域，尽量无死角。

每间治疗室内设置双向患者监测对讲系统，即在治疗室内设语音激活或连续接通的对讲机，控制室的控制台上设有对讲按钮，确保治疗期间，控制室内的医护人员可通过该对讲按钮与治疗室内的患者进行实时交流。

4.1.2.1.4 安全联锁逻辑

质子治疗系统安全联锁系统逻辑图见图 4-12，系统允许开机的逻辑图见图 4-13。

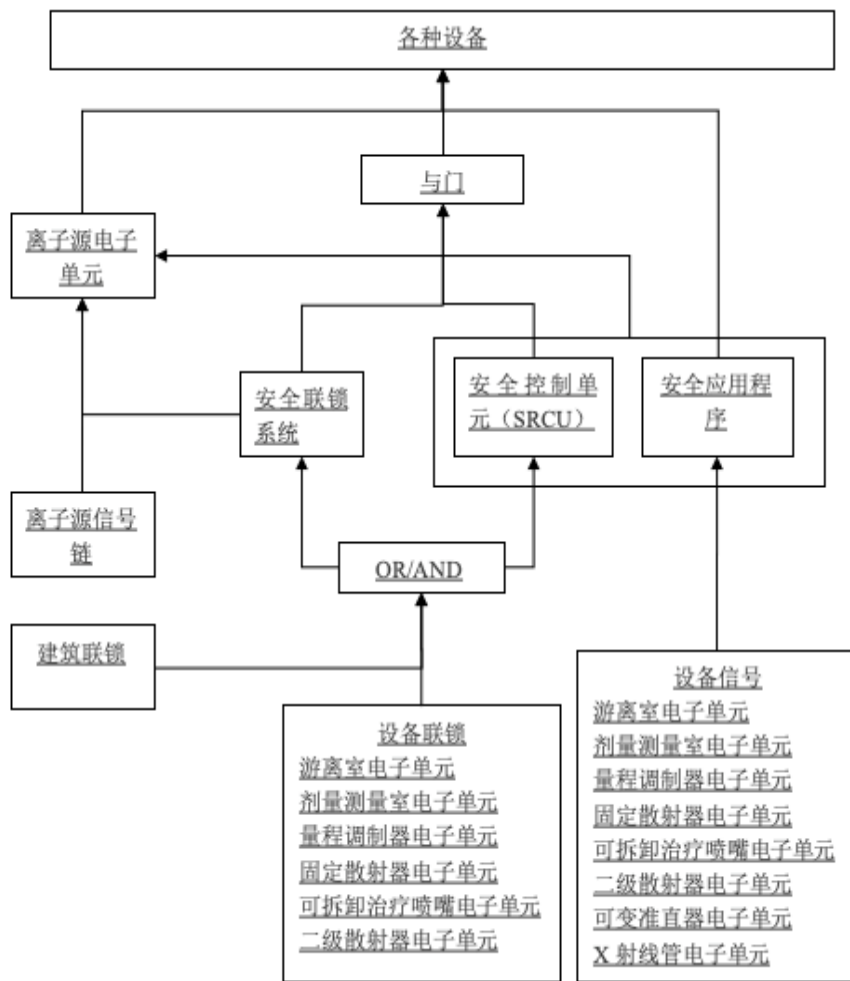


图 4-12 质子治疗系统安全联锁逻辑图

允许开机出束的逻辑如下：

- (1) 加速器大厅和需要使用的治疗室内清场搜索按钮按一定顺序全部按下；
- (2) 加速器大厅和需要使用的治疗室内的急停按钮全部复位；
- (3) 加速器大厅控制室内钥匙面板上的主控钥匙全部归位并旋转至“ON”。
- (4) 控制区出入口的门全部处于关闭状态；
- (5) 获得治疗室内医生发出的允许开机的指令。

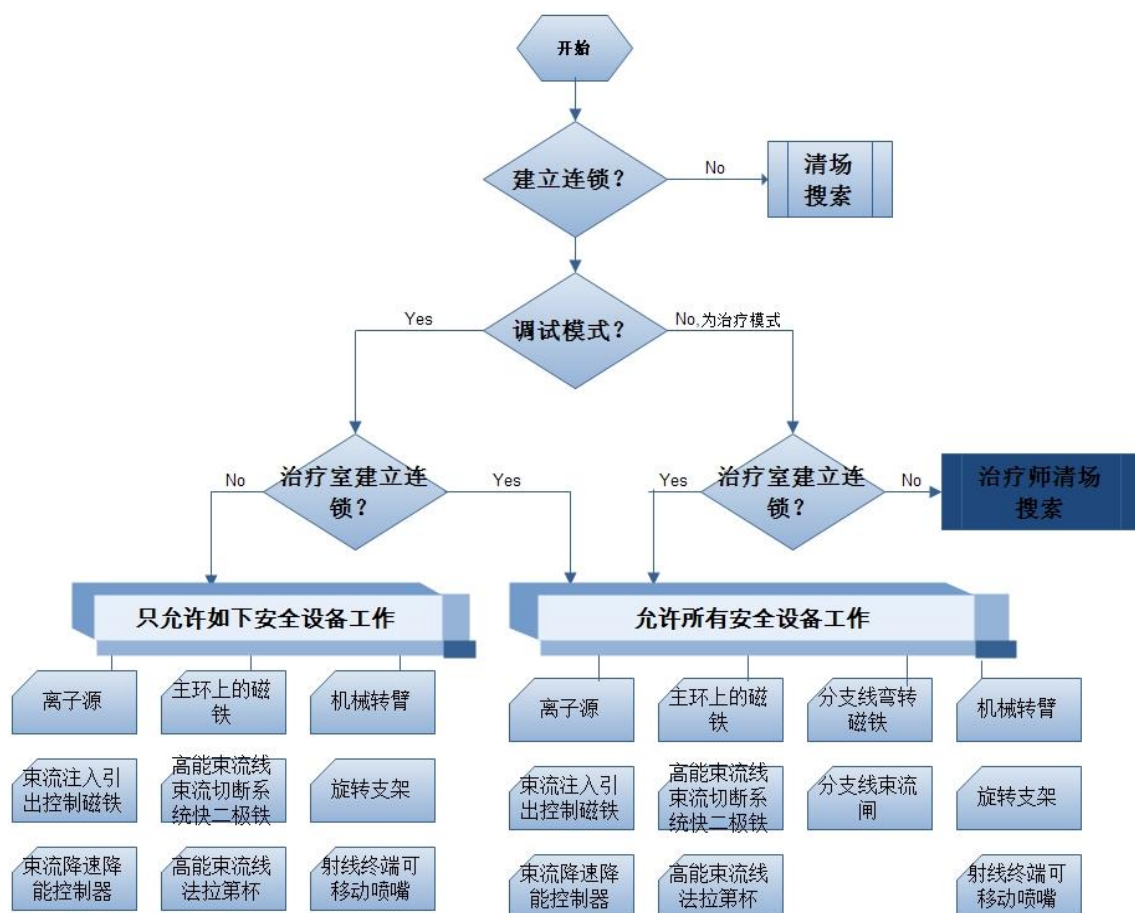


图 4-13 质子治疗系统允许开机的逻辑图

4.1.2.1.5 工作流程

4.1.2.1.5.1 进入加速器大厅和治疗室的流程

一、进入加速器大厅的流程

本项目辐射工作人员不会进入加速器大厅，只有加速器系统的工程师方可进入。工程师进入回旋加速器区的流程如下：

(1) 当工程师需要进入加速器大厅工作时，由加速器大厅负责人按照加速器正常操作程序停止该区域的束流。

(2) 由专门的辐射防护人员在回旋加速器主控室内将主控钥匙旋转至“OFF”状态，并拔下该钥匙，交给该名工程师。

(3) 欲进入人员将主控钥匙随身携带，通过刷门禁卡进行人员身份识别后，

通过随身携带的剂量率报警仪，在区域入口处进行剂量率水平确认后，进入加速器大厅内。

（4）工程师在工作结束后，进行“清场搜索”并确认加速器大厅内无人停留后，在规定的时间内通过关门按钮关闭门离开，完成清场搜索程序。

（5）工程师离开加速器大厅并确认出入口的门关闭后，回到加速器大厅控制室内将主控钥匙插回并旋转至“ON”状态，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。

二、进入治疗室流程

（1）每次治疗有两名技师在场，当有患者需要进入治疗室内治疗时，由一名技师通过刷门禁卡进行人员身份识别后，通过随身携带的剂量率报警仪，在治疗室入口处进行剂量率水平确认后，将患者带入治疗室，进行准备工作、摆位等操作；另一名技师留在治疗室的控制室内；

（2）准备工作完成后，治疗室内的技师进行“清场搜索”确认治疗室内无人停留后，进入其在治疗室内的工作区，确认其工作完成后通过其治疗系统给控制室内的技师发出信号，控制室内的技师收到该确认信号，并确认治疗室内的技师离开治疗室后，向加速器控制系统发送允许开机的信号，方可开始治疗。

（3）根据之前设定的治疗计划，治疗结束后，治疗头内的束流闸自动落下，切断束流。

（4）根据质子治疗装置自身系统设置，各治疗室之间相互独立，即当某一个治疗室正在治疗期间，其他治疗室人员的进出不会对该治疗室的束流造成影响。

4.1.2.1.5.2 维修修护流程

质子治疗系统的维护维修工作由厂家工程师负责，医院不参与维护维修工作。相关内容在厂家销售（含建造）和使用质子治疗系统的环评文件中描述并评价，本章节仅做简要介绍。

维修维护阶段的安全联锁设计与质子设备开机启动前的安全联锁检查流程相

同。在维修维护阶段，设备切换到维修模式，工程师拔走加速器主控室钥匙，设备无法出束。若出现故障，可由系统自动或工作人员手动触发安全联锁。根据离子源信号与安全联锁系统所有的建筑联锁、设备联锁、设备信号、安全控制单元、安全应用程序相连，任何联锁均可直接触发离子源控制单元，离子源被切断，设备无法出束。维修完毕后按照启动流程，重新进行清场搜索，搜索完所有区域，再将系统切换到正常模式，方可重新治疗。

质子治疗系统维修的主要内容如下：

（1）设备维修时，工程师应严格遵守操作系统屏幕提示，按照设备维修调试规程中的步骤进行操作；

（2）工程师到现场进行维修服务时，首先与操作人员进行现场沟通，了解故障现场，初步判断故障类型和原因；

（3）初步判断故障原因后，工程师在控制室的监控计算机上进入操作系统内，调出操作日志文件，参照日志文件中的报错信息，确定故障位置和故障原因。常见的故障包括软件故障和硬件故障，如通讯故障、软件冲突、水冷过温、水压不足、机器无法出束、束流状态监视器无数据等。

（4）工程师针对故障种类和出现故障的区域，制定维修方案：

① 初步判断能够通过远程解决的问题。设备操作系统包括自动模式和“Service 模式”，自动模式即正常的治疗模式，Service 模式是仅允许被授权的人员进入维修的模式。工程师通过 Service 模式进入操作系统后台，进行软件的调试或对系统局部进行操作，确认设备恢复正常后返回自动模式。

② 对于不可远程解决的问题，工程师需进行现场检修。工程师在现场维修时，当需要进入加速器大厅或治疗室内部时，工程师应告知现场负责人，由现场负责人安排相关人员切断该区域的束流或停机后，且满足下述“准入条件后”，工程师方可按照人员出入流程进入加速器大厅或治疗室内部。

a. 对于加速器大厅，当不需要打开加速器上、下盖进行检修时，加速器停机通风至少 1h 后，且根据实时剂量率监测数据判断大厅内辐射剂量率水平低于

100 μ Sv/h，方可进入加速器大厅内部进行工作；当需要打开加速器上、下盖进行检修时，或其他涉及辐射水平较高区域的工作，如准直器维修，动量、能量限制器的维修，电离室更换，降能器维修和更换等，应确保加速器停机冷却 24 小时，停机后至少通风 1h 后，利用便携式 X/ γ 剂量率仪对加速器内部设备表面的剂量率水平进行监测，确保其低于 1mSv/h 后方可进入工作。若监测结果高于 1mSv/h，则对热点区域采用加盖铅块等措施，直至热点区域周围剂量率低于 1mSv/h 后，方可进入工作。

b. 对于治疗室，一般在束流切断 5min 后，治疗室内剂量率水平低于 5 μ Sv/h 后方可进入工作。

③ 维修过程中需要更换备件时，工程师直接与厂家技术专家联系，并由公司售后服务部通过公司内部通讯系统发送备件申请至总部，最终确认所需要的备件。备件送到后，由医院按照装置的报关和运输程序直接送至使用现场。维修过程中更换下的旧备件由医院统一进行处理。

(5) 维修完成后的临床调试验证

a. 对于软件、电路板、水冷系统、空气管路等的故障维修，维修完成后，工程师在控制室内开机，切断高压出束，检查机器无报错信息后，交付医院使用；

b. 对于降能器、束流聚焦、束流调节等方面的故障维修，维修完成后，经“清场搜索”程序确认相应控制区内无人停留后，工程师在控制室内开机并出束，检查机器无报错信息后，交付医院使用。

4.1.2.2 场所辐射监测系统

质子治疗系统的场所辐射监测系统主要负责工作场所的监测，由固定安装探测器、安全冗余控制单元、内部局域网、监控计算机、中心管理计算机组成，如图 4-14 所示。探测器用于测量辐射水平；安全冗余控制单元用于采集探测器的输出信号和完成信号的加权处理、剂量率显示、本地报警及通讯；内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；监控计算机用于完成监测数据的日常分析

与管理；中心管理计算机即为中央控制室，用于实在对整个辐射监测系统进行实时数据观测、控制。

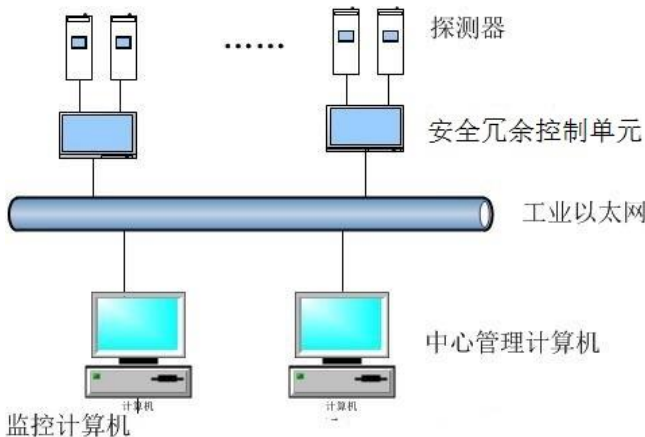


图 4-14 质子治疗系统辐射监测系统结构

固定安装的探测器的安装位置一般在质子治疗系统安装完成后，根据实际的剂量水平确定。一般分布在加速器厅的入口、治疗室迷道等人员常驻区域，同时在设备周围设置若干监测点位，以监测周围环境辐射水平变化。场所辐射监测点位如图 4-8 所示，每个监测点由一台中子探测器和 γ 探测器组成，控制室内设置监测剂量数值显示装置。根据各监测点剂量水平和中子能量选择不同灵敏度的辐射探测器。主要功能是确定参考点的辐射水平，测定加速器的工作场所和周围环境中的辐射水平，保证工作人员和公众的安全，验证屏蔽措施的可靠性，防止辐射泄漏造成环境污染。

4.1.2.3 通风系统

质子治疗区的回旋加速器及束流输运区、各治疗室均设计了通风系统。各区域通风管道的布局如图 4-16~图 4-19 所示，通风系统的设计参数见表 4-3。各治疗室换气次数均大于 4 次/h，符合 GBZ 121-2020 的相关要求。质子治疗各区域的感生放射性气体通过排风系统统一通过屋顶总排风口排放到室外，正常运行情况下不会对室内人员造成明显的辐射影响。

回旋加速器区和束流输运隧道连通，为一个区域，每个治疗室均分为治疗区和机架区，以上区域的送风机房均位于地下一层的空调机房，由地下一层的空调机房

下立管至地下二层的送风管道。回旋加速器大厅的送风管采用多折弯穿屏蔽墙引至回旋加速器大厅内，治疗室内的送风管采用从迷道引入穿迷道内墙的方式引入治疗室治疗区内，治疗室治疗区均采用上送下排的方式，治疗室治疗区的排风经管道排至机架区，机架区内的排风口位于东侧，通过管道排至束流输运线，通过束流输运线的排风口引至屋顶排放，排风口距地面约 15m。

通风管道穿墙部分均采用不锈钢套管包裹，穿墙示意图见图 4-15。

表 4-3 质子治疗系统通风系统设计参数

区域名称	体积, m ³	送风量, m ³ /h	排风量, m ³ /h	换气次数, 次/小时
回旋加速器大厅及束流输运线隧道	1000	4000	4400	4（平时）
		—	10000	>8（停机后）
治疗室机架区	1398	—	2800	2
治疗室治疗区	250	2500	2800	10

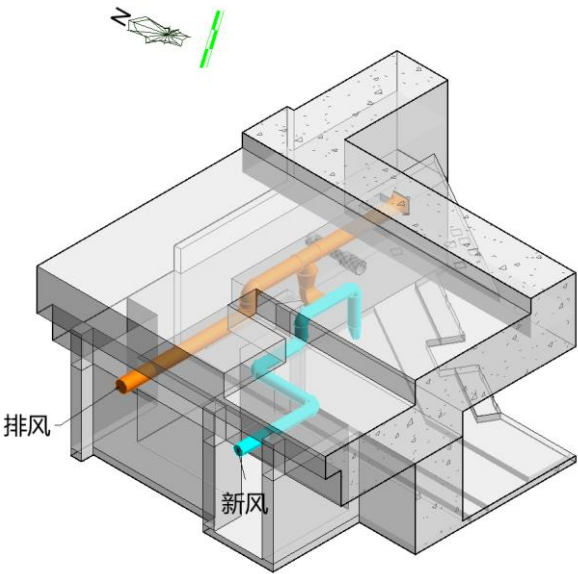


图 4-15 通风管道穿墙示意图

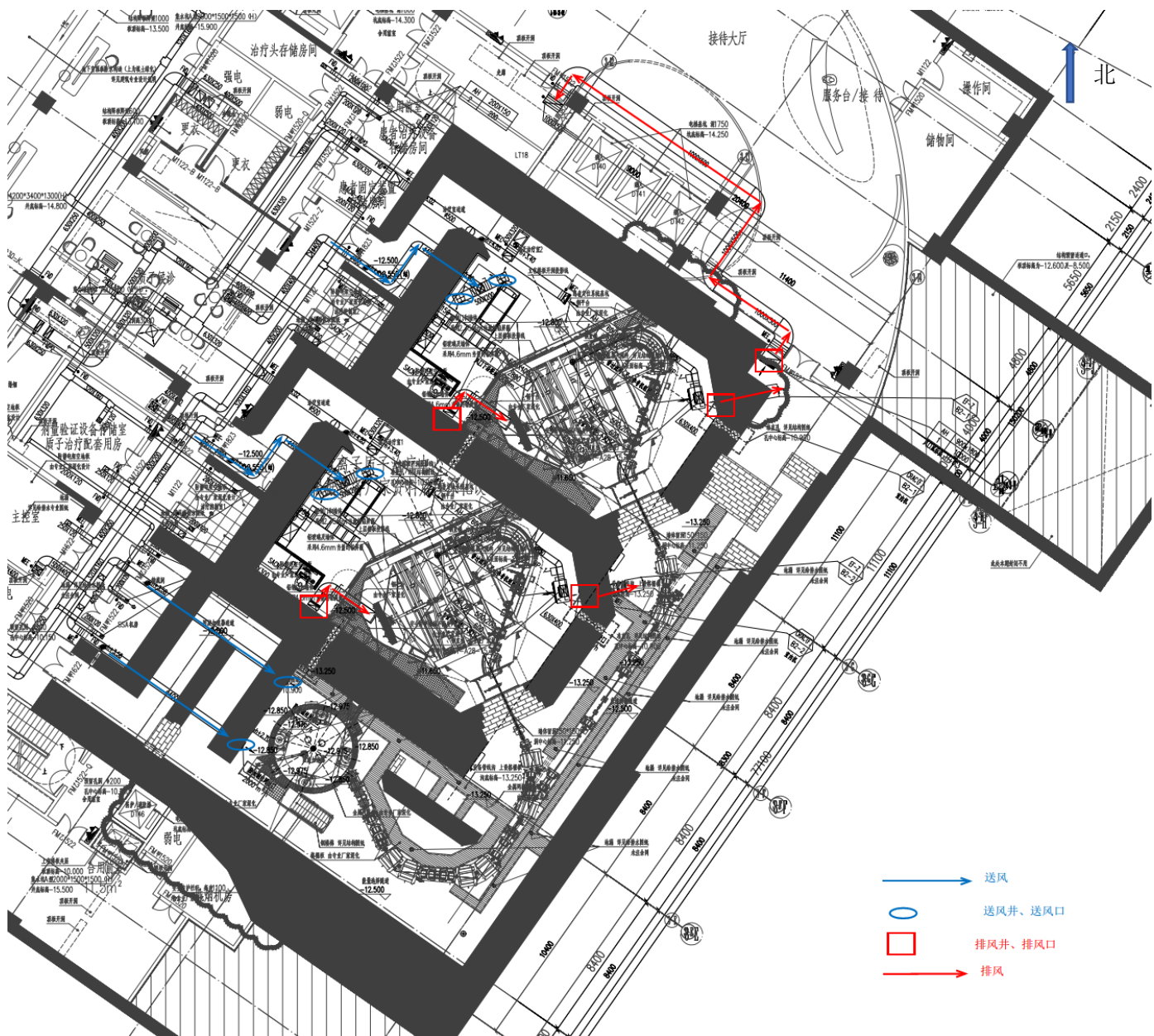


图 4-16 质子治疗系统送、排风管道走向示意图（地下二层）

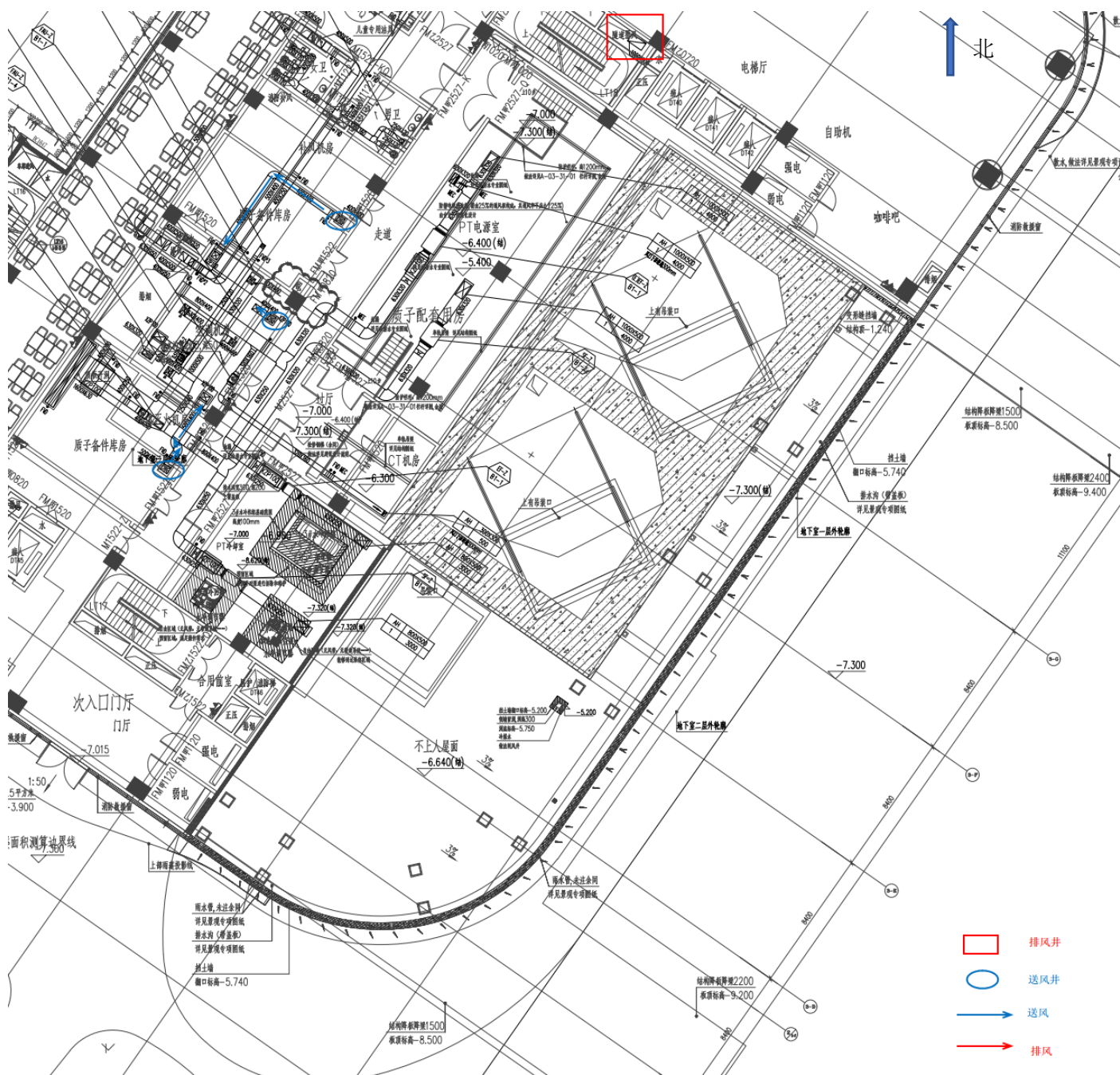


图 4-17 质子治疗系统送、排风管道走向示意图（地下一层）

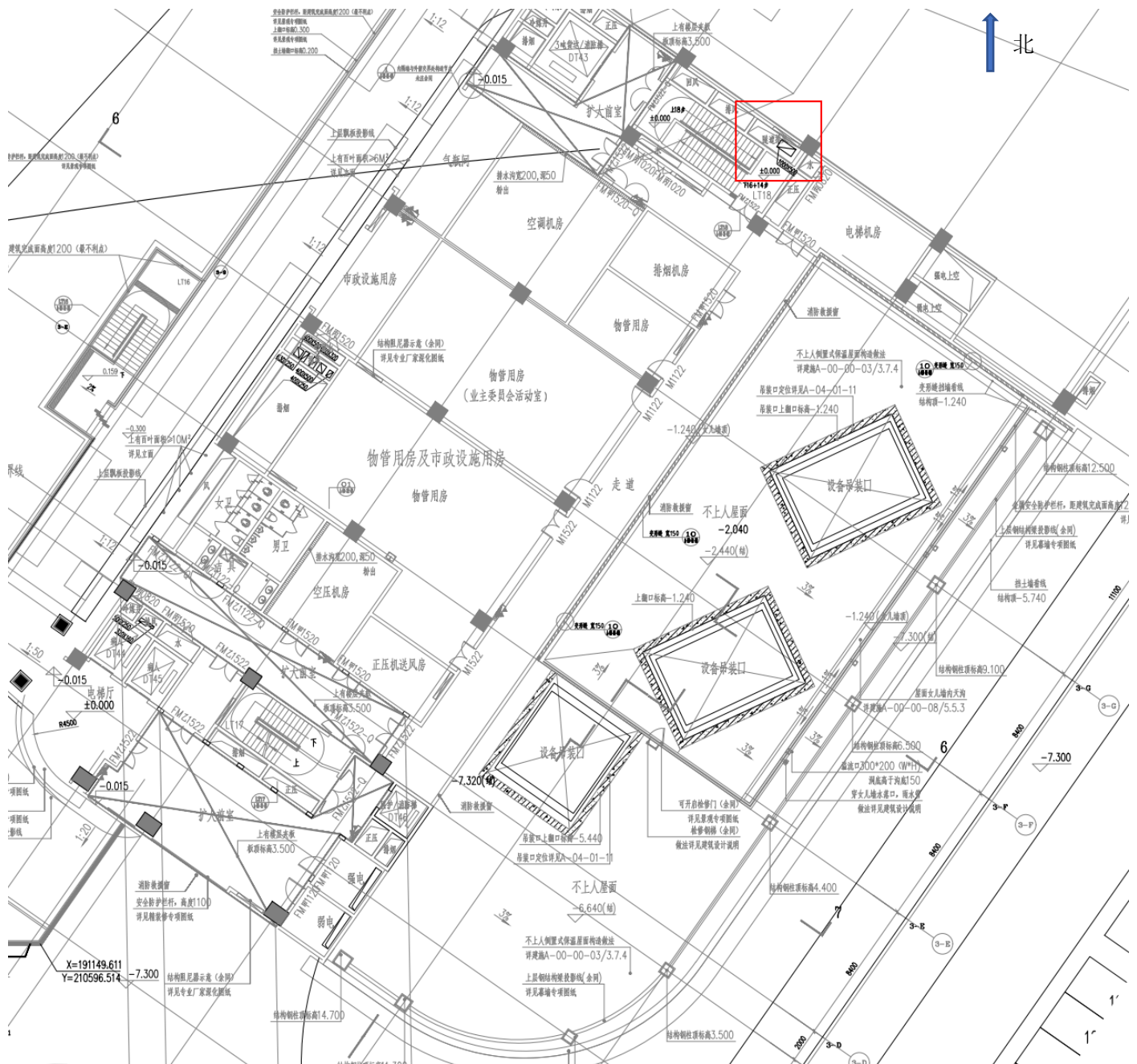


图 4-18 质子治疗系统排风管道走向示意图（地上一层）

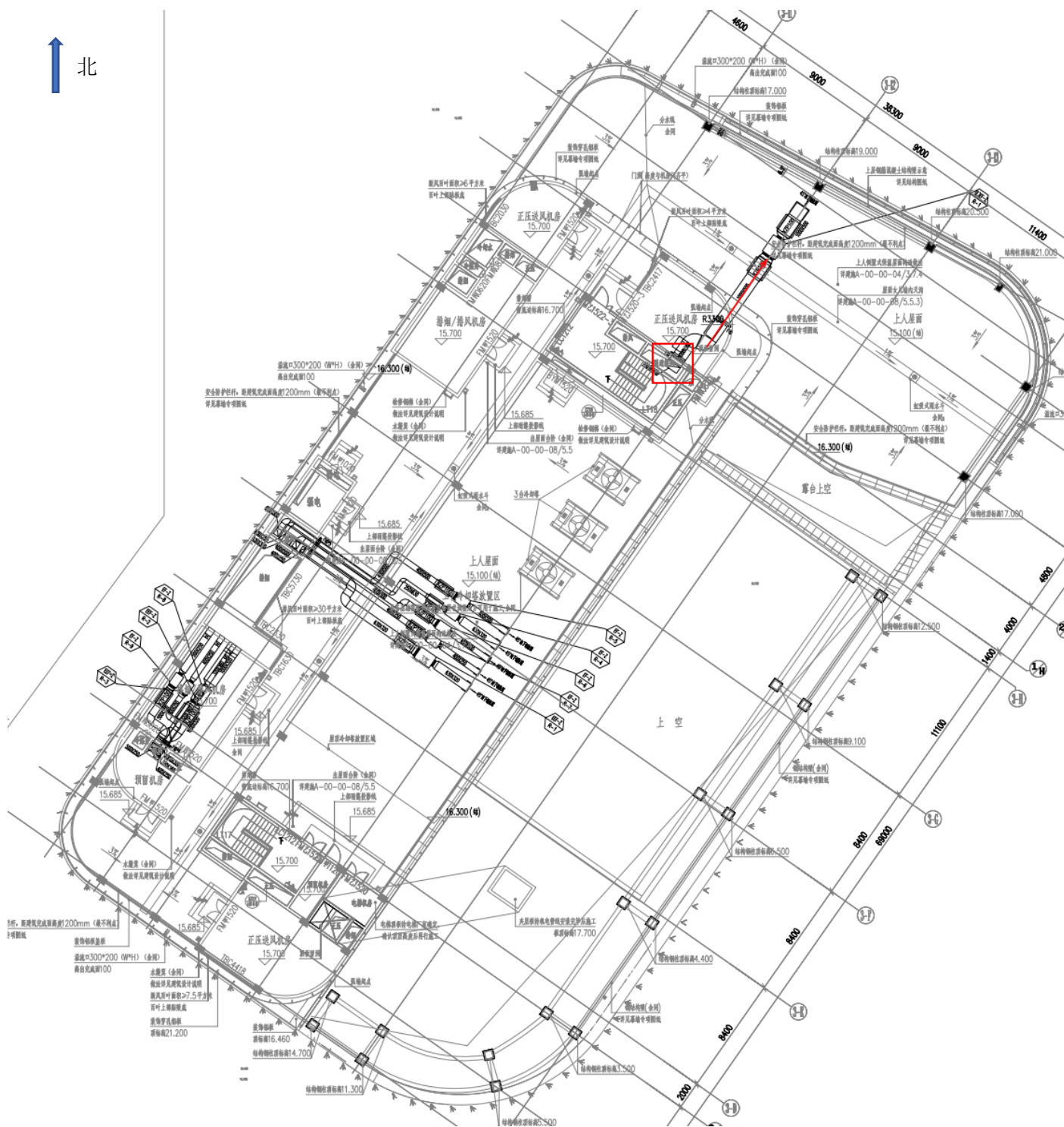


图 4-19 质子治疗系统排风口所在平面

4.1.3 放射性三废处理

4.1.3.1 放射性废气来源及处理措施

(1) 来源

根据第三章的分析，质子治疗系统运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为 ^{13}N ($T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$)、 ^{15}O ($T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$)、 ^{11}C ($T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$) 和 ^{41}Ar ($T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$)，产生量见表 3-24。

(2) 处理措施

质子治疗系统运行产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。质子治疗机房的治疗室和设备区均设有排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体由屋面排入环境，年排放速率见表 3-27。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，结合第五章的计算结果，其对环境的影响很小。

4.1.3.2 放射性废液来源及处理措施

(1) 来源

本项目产生的放射性废液主要是活化的冷却水。质子治疗系统所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素见表 3-28。除 ^7Be 、 ^3H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。根据表 3-29 的计算结果， ^3H 的活度小于 GB18871 规定的豁免浓度值 $1.00\times 10^9\text{Bq}$ ， ^7Be 的饱和活度大于豁免浓度值 $1.00\times 10^7\text{Bq}$ ，需要暂存，排放前必须委托有资质单位取样分析，满足“1.4.8.2 节”所列中放射性废水排放标准后方可按一般废水排放。

(2) 处理措施

质子治疗装备运行期间，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检

修时才会排放。加速器大厅、束流输运线隧道及治疗室内均设有地漏，通过地漏自流进入集水坑，由提升泵提升至地下 3 层设置的冷却水暂存池，具体布置情况见图 4-20、图 4-21。活化冷却水暂存池有效容积为 12m^3 ，用于暂存活化冷却水。根据质子治疗装置厂商提供的信息，质子治疗系统中可能产生活化冷却水的总量为 5.68m^3 ，每年因检修将回路中的冷却水排放的次数最多为一次，排放的冷却水体积小于暂存池的容积，因此质子治疗区暂存池的设置能够满足活化冷却水的暂存要求。

暂存池上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.4.2 节”所列中放射性废水排放标准，方可排放。暂存池设有管道与医院污水管网相连，且配备手动启动的排水泵，需要排放时手动开启排水泵，通过管道将冷却水排入医院污水管网。每次排放需记录存档，记录废水来源、排放量、活度浓度监测结果、排放去向等信息。

综上所述，质子治疗系统正常运行时不会产生放射性废液，检修或发生泄漏的情况下可能排放的冷却水活度远低于排放限值。因此，放射性废液对环境的影响很小。

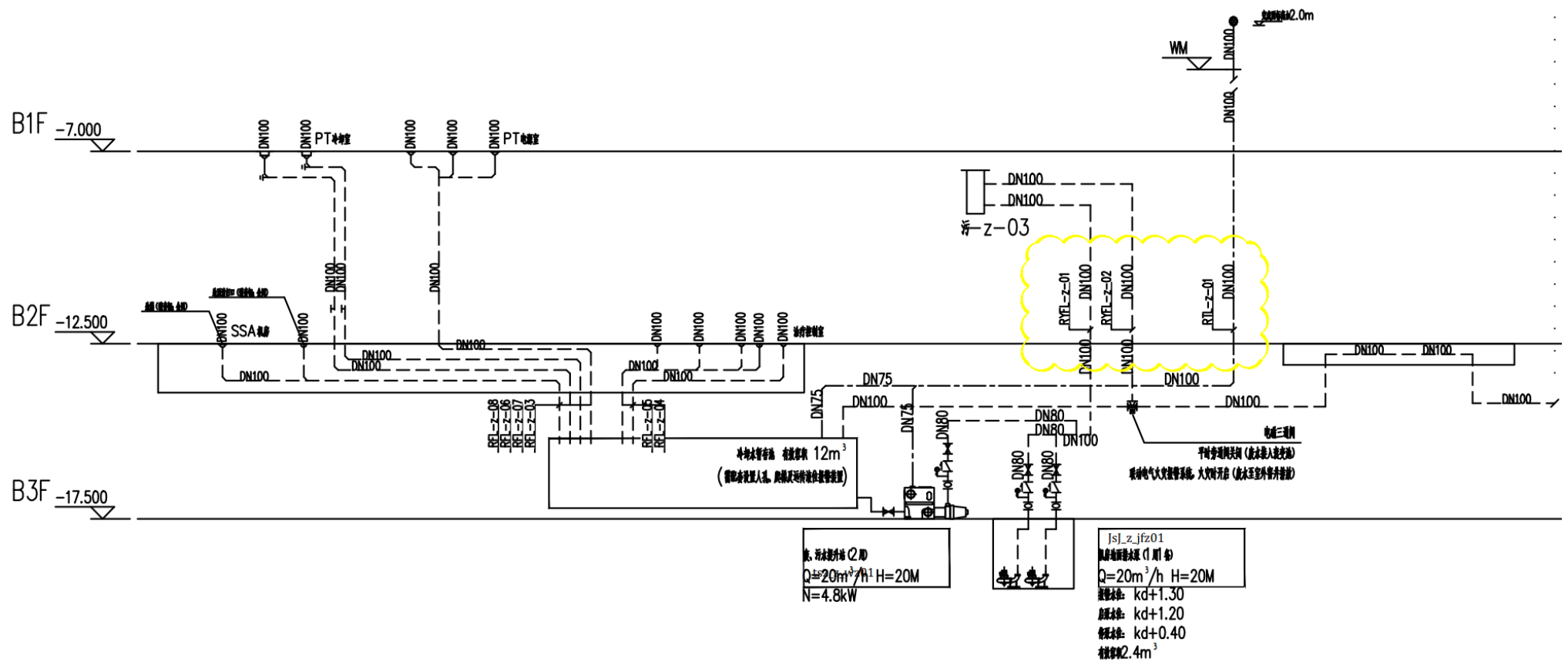


图 4-21 质子治疗系统冷却水暂存池和排水管道示意图

4.1.3.3 放射性固体废物来源及处理措施

(1) 来源

参照国外同类型质子治疗系统的运行经验，质子治疗系统产生的放射性固体废物主要为维护维修环节更换下来的一些易损易活化的结构部件。质子治疗系统产生的放射性固废为含感生放射性的结构部件、冷却水废离子树脂、加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等，为低放射性固废。按预计，含感生放射性的结构部件每年产生量小于 1m^3 ；冷却水废离子树脂每年产生量小于 3m^3 ；加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等每年产生量小于 2m^3 。

产生的放射性固体废物的主要材料是钢、碳和镍，其主要的感生放射性核素及其半衰期列于表 4-4。停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 、 ^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。

表 4-4 活化结构部件主要感生放射性核素及其半衰期

靶材料	放射性核素	半衰期	靶材料	放射性核素	半衰期
碳	^3H	12.3a	钢	^{51}Cr	27.8d
	^7Be	53.6d		^{52}Mn	5.55d
	^{11}C	20.4min		$^{52\text{m}}\text{Mn}$	21.3min
钢	同上述核素加 以下核素	——		^{54}Mn	300d
	^{22}Na	2.60a		^{56}Co	77d
	^{24}Na	15.0h		^{57}Co	270d
	^{42}K	12.47h		^{58}Co	72d
	^{43}K	22.4h		^{55}Fe	2.94a
	^{44}Sc	3.92h	镍	^{58}Fe	5.1d
	$^{44\text{m}}\text{Sc}$	2.44d		同上加以下	
	^{46}Sc	83.8d		^{65}Ni	2.56h
	^{47}Sc	3.43d		^{61}Cu	3.33h
	^{49}Sc	1.83d		^{62}Cu	9.80min
	^{48}V	16.0d		^{64}Cu	12.82h

(2) 处理措施

医院对质子治疗系统产生的放射性固体废物分类收集和包装，结构部件的放射性活度浓度一般高于豁免水平，需要对拆卸下来的部件加强管理，进行辐射水

平监测、登记，暂存在固体废物暂存桶中，放置在加速器大厅内避开活化位置暂存。

当暂存区域内废物暂存量接近容积的 2/3 时，由医院委托有资质单位进行检测分析：

1) 对于满足“1.4.4.3 节”所列解控标准的：

①可回收利用的部件，回收后复用；

②不能回收利用的部件，经审管部门认可后，解控后按一般废物处理。

2) 对于不满足“1.4.4.3 节”所列解控标准的，由医院委托有资质单位处理。

医院应建立放射性固体废物台账，存放及处置前进行监测，记录部件名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息。

4.2 直线加速器

4.2.1 辐射工作场所分区

本项目直线加速器机房辐射工作场所按控制区、监督区进行管理。其中加速器机房（含迷道）为控制区，机房控制室及四周相邻场所为监督区，如表 4-5、图 4-22、图 4-23 所示。

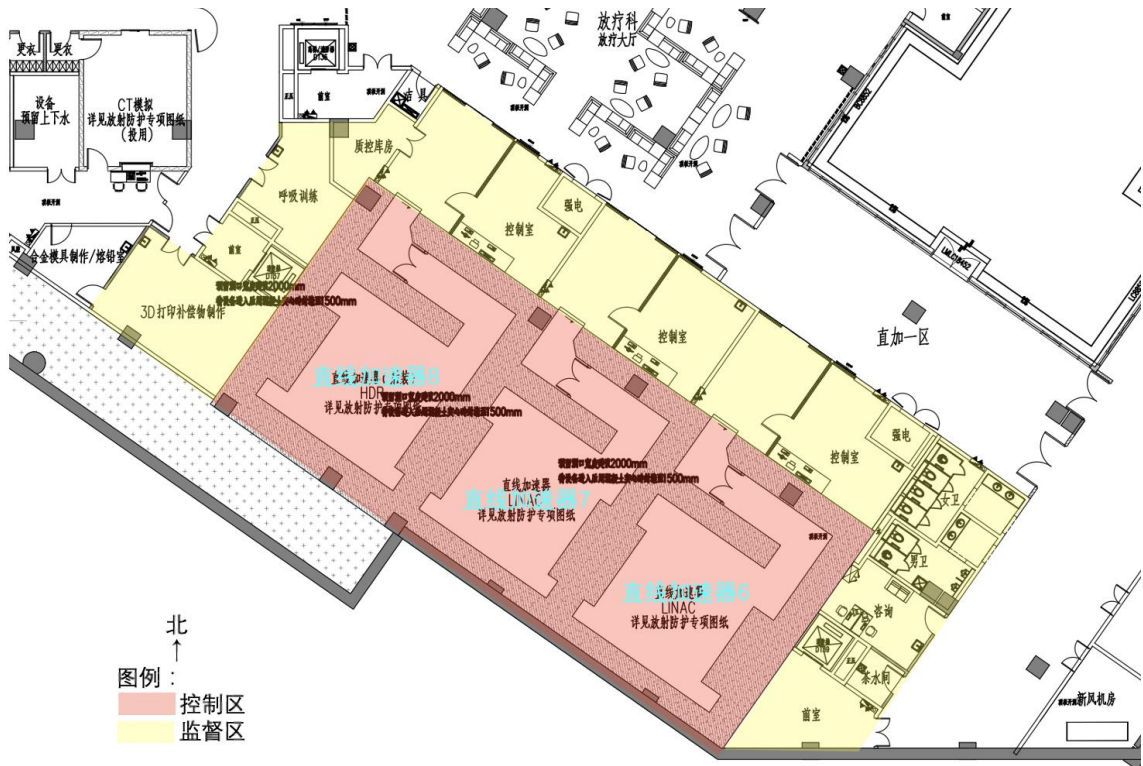
表 4-5 直线加速器辐射工作场所分区表

区域		具体房间
直加一区	控制区	直线加速器机房 6~8
	监督区	控制室、咨询室、前室、卫生间、质控库房、呼吸训练室、3D 打印补偿物制作室等
直加二区	控制区	直线加速器机房 1~5
	监督区	控制室、维修库房、走廊、新风/排烟机房、电话机房等

控制区管理要求：控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志，入口门和

装置出束状态联锁，装置运行期间禁止进入。停机后进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，边界处设置电离辐射警告标志，防止无关人员进入受到不必要的照射。进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。



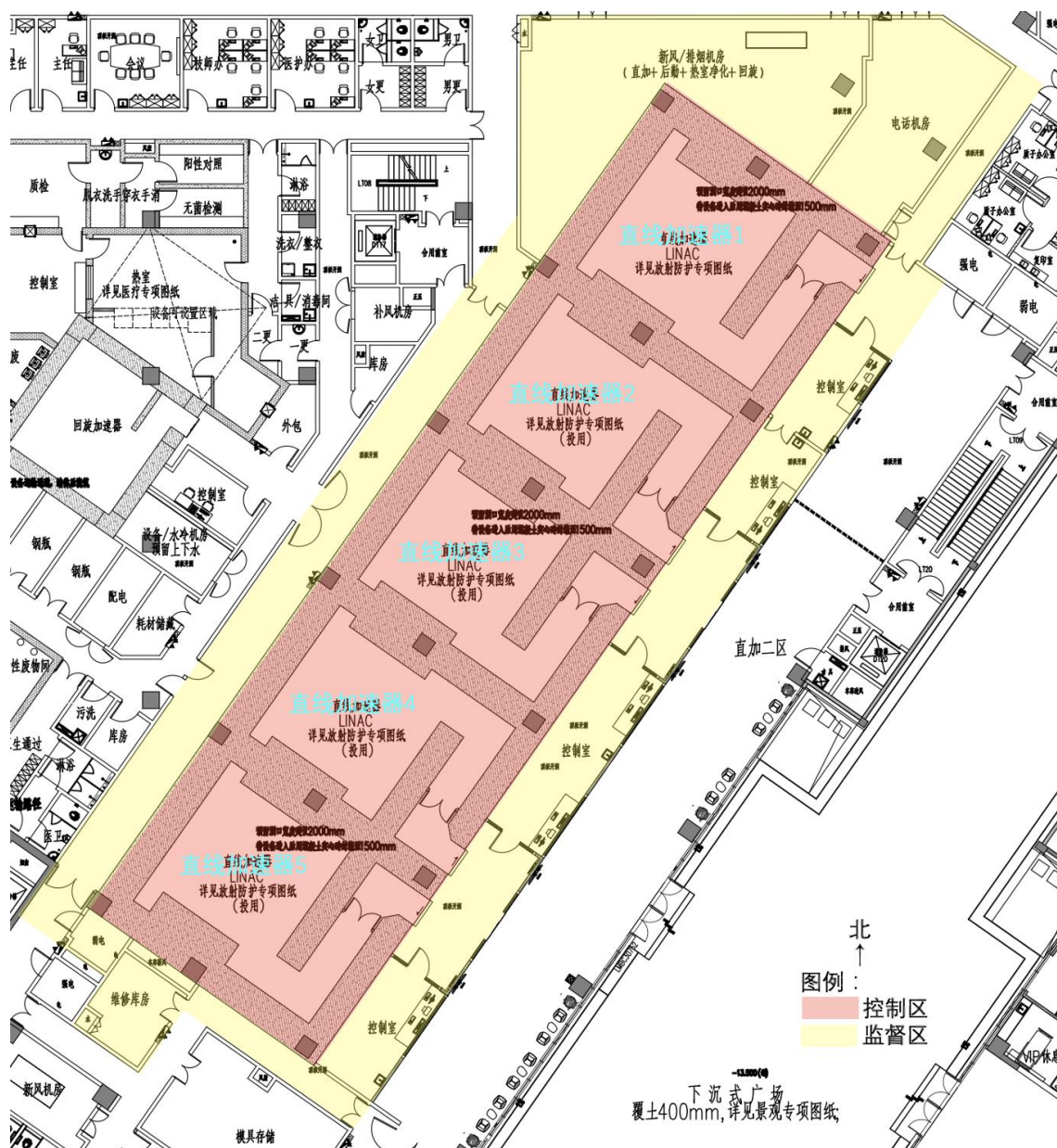


图 4-23 直加二区辐射工作场所分区图

4.2.2 机房布局与辐射屏蔽

4.2.2.1 布局合理性分析

直线加速器机房集中设置于医疗综合楼地下二层放疗科，机房顶板之上主要为暖通机房、水冷机房等，底板之下为结构空腔，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。放疗机房均设置有迷道，控制室与机房分开，机房四侧屏蔽墙体及防护门外、屋顶上方无人员常居留场所。

放疗科除了直线加速器机房外还设置有模具存储室、质控室等功能用房，满足放射治疗的需求。该区域整体设置了物理隔离及相对独立的人员通道，防止无关人员进入，有利于辐射安全防护。该区域功能布局紧凑、动线合理、辐射屏蔽防护满足相关要求，总体布局是合理的。

4.2.2.2 机房辐射屏蔽设计

本项目直线加速器机房的辐射屏蔽设计方案见表 4-6、图 4-24~图 4-26。

表 4-6 直线加速器机房的屏蔽设计及周围环境

机房名称	位置	屏蔽设计	周围环境
直线加速器 1	东北	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	新风/排烟机房、电话机房
	西南	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 2
	东南	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道
	西北	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	新风/排烟机房
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	夹层机房
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道
直线加速器 2	东北	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 1
	西南	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 3
	东南	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道
	西北	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	走道
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	夹层机房、水冷机房、补风机房
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道
直线加速器 3	东北	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 2
	西南	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 4
	东南	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道

机房名称	位置	屏蔽设计	周围环境
	西北	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	走道
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	夹层机房、水冷机房、补风机房
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道
直线加速器 4	东北	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 3
	西南	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 5
	东南	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道
	西北	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	走道
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	夹层机房、水冷机房、新风机房、补风机房
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道
直线加速器 5	东北	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 4
	西南	主屏蔽墙：3m 厚、4.95m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	走道、弱电间、维修库房
	东南	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道
	西北	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	走道
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	夹层机房、排烟机房、水冷机房、补风机房、冷库
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道
直线加速器 6	东南	主屏蔽墙：3m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	前室、电梯、咨询室、卫生间
	西北	主屏蔽墙：3m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 7
	东北	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道
	西南	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	土层
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	夹层空调机房、水冷机房
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道
直线加速器 7	东南	主屏蔽墙：3m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器 6
	西北	主屏蔽墙：3m 厚、4.9m 宽混凝土	直线加速器 8

机房名称	位置	屏蔽设计	周围环境
		次屏蔽墙：1.7m 混凝土	
	东北	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道
	西南	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	土层
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	夹层空调机房、正压送风机房、水冷机房
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道
直线加速器 8	东南	主屏蔽墙：3m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器
	西北	主屏蔽墙：3m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	3D 打印补偿物制作室、电梯、呼吸训练室
	东北	迷道内墙：1.5m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	控制室、走道
	西南	侧屏蔽墙：1.8m 混凝土	结构空腔
	顶板	主屏蔽墙：3.1m 厚、4.9m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.5m 混凝土	新风机房、正压送风机房、水冷机房
	底板	0.8m 混凝土	结构空腔
	防护门	15mm 铅	走道

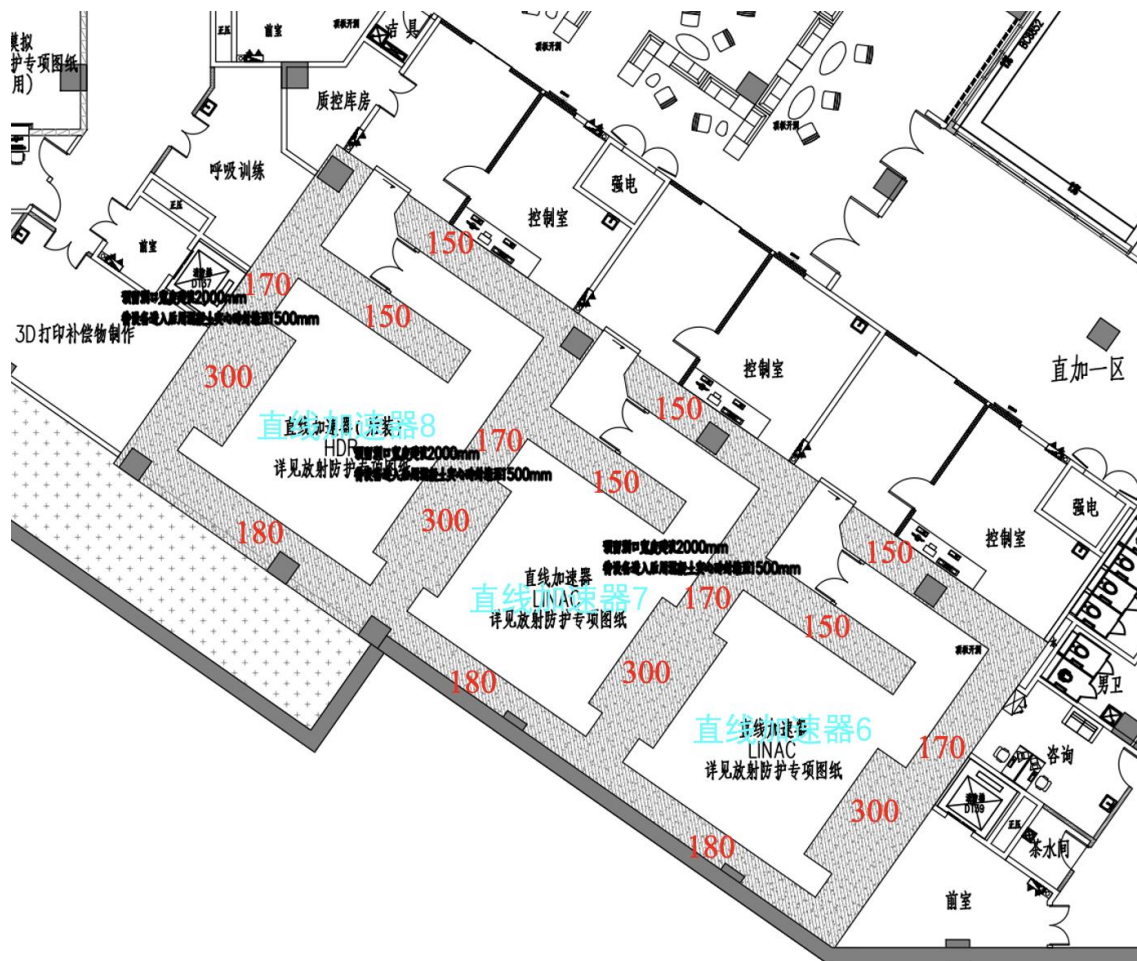


图 4-24 直加一区辐射屏蔽尺寸平面图（单位：cm）



图 4-25 直加二区辐射屏蔽尺寸平面图（单位：cm）

改；用于监视联锁或作为测量线路、控制线路一部分的计算机一旦发生故障，即停止照射。

4.2.3.2 钥匙控制

控制台设专用钥匙控制。只有通过专用钥匙才能使加速器出束。钥匙由专人保管，工作人员离开控制室进入机房时，拔下专用钥匙随身携带，以防止他人误操作。

4.2.3.3 联锁系统

机房设置多重联锁装置，以保证人员和设备安全，防止意外事故。门机联锁：采用电动推拉防护门，与设备启动电路实行门机联锁方式，即防护门未关闭前，加速器无法启动。系统联锁：当出现控制台计算机故障、加速管真空故障等情况时，设备会自动出现系统联锁，无法出束。

4.2.3.4 紧急开门按钮

在防护门内侧墙上安装 1 个紧急开门按钮，并有明显标志。当遇到意外情况，可随时按动紧急开门按钮，打开防护门，切断设备高压，停止出束。

4.2.3.5 急停按钮

急停按钮安装在每间加速器机房的控制室内（1 个）、机房四周墙壁上（5 个）和迷道内（1 个），并有明显标志。当遇到意外情况，可随时按动急停开关，切断设备高压，停止出束。紧急停止开关必须采用手动方式才能复位。

4.2.3.6 视频监控对讲系统

机房内和迷道安装视频监控，安装点位确保能看到整个治疗机房（含迷道）的全景，以便在治疗过程中能够随时观察患者状况。此外，也可以观察治疗机房是否有人滞留。治疗室与控制室之间设对讲设备，便于工作人员与患者之间进行交流。

4.2.3.7 警告标志及工作状态指示

机房防护门外设立电离辐射警告标志和中文警示说明，安装工作状态指示灯，不同颜色显示和加速器运行状态关联。

4.2.3.8 固定式辐射剂量监测仪

机房迷道内安装带有报警功能的固定式辐射监测仪，每间机房设 1 台，用于监测机房内的辐射水平并在控制室内显示，安装点位具体见图 4-28。

4.2.3.9 其他

- 1) 每个机房分别配置 2 台个人剂量报警仪，工作人员进入机房时佩戴个人剂量报警仪，一旦超出设定的剂量率阈值，会发出警告。
- 2) 电动防护门具有防夹人功能，停电时能够手动开启，使患者安全转移。
- 3) 治疗室安装应急照明装置，设火灾自动报警装置等。

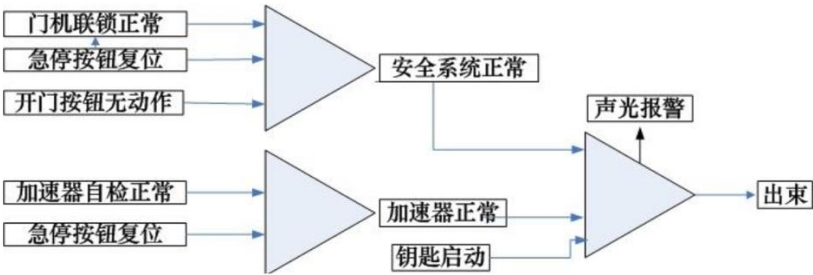


图 4-27 加速器安全联锁逻辑图

加速器机房拟采取的安全与防护设施设计方案见表 4-7，辐射安全与防护设施点位示例图如图 4-28 所示（8 间直线加速器机房均按示例图布置）。

表 4-7 每间直线加速器机房的安全与防护设施情况表

序号	项目	内容	本项目	备注
1	A 控制台及 安全联锁	防止非工作人员误操作的锁定开关	√	控制台钥匙控制
2		控制台有紧急停机按钮	√	控制室墙上 1 个
3		电视监控与对讲系统	√	1 套
4		治疗室门与束流联锁	√	门机联锁

序号	项目	内容	本项目	备注
5		治疗室内准备出束声音提示	√	蜂鸣音
6	B 警告标志	入口电离辐射警告标志	√	设置在防护门外
7		入口有加速器工作状态显示灯	√	设置在防护门外
8	C 照射室紧急设施	紧急开门按钮	√	防护门内侧墙上 1 个
9		紧急照明或独立通道照明系统	√	1 套
10		治疗室内有紧急停机按钮	√	墙壁 5 个，迷道 1 个
11		治疗床有紧急停机按钮	√	至少 1 个
12	D 监测设备	治疗室内有固定式剂量率仪	√	1 台固定式 γ 剂量率仪
13		便携式辐射监测仪器仪表	√	共用 1 台便携式 γ 剂量率仪
14		个人剂量报警仪	√	2 台
15		个人剂量计	√	1 支/人
16	E 其他	治疗室门防夹人装置	√	具有防夹功能和停电手动开启功能
17		通风系统	√	设有通风系统，换气次数 5 次/h
18		火灾报警仪	√	治疗室内房顶设火灾报警器
19		灭火器材	√	——

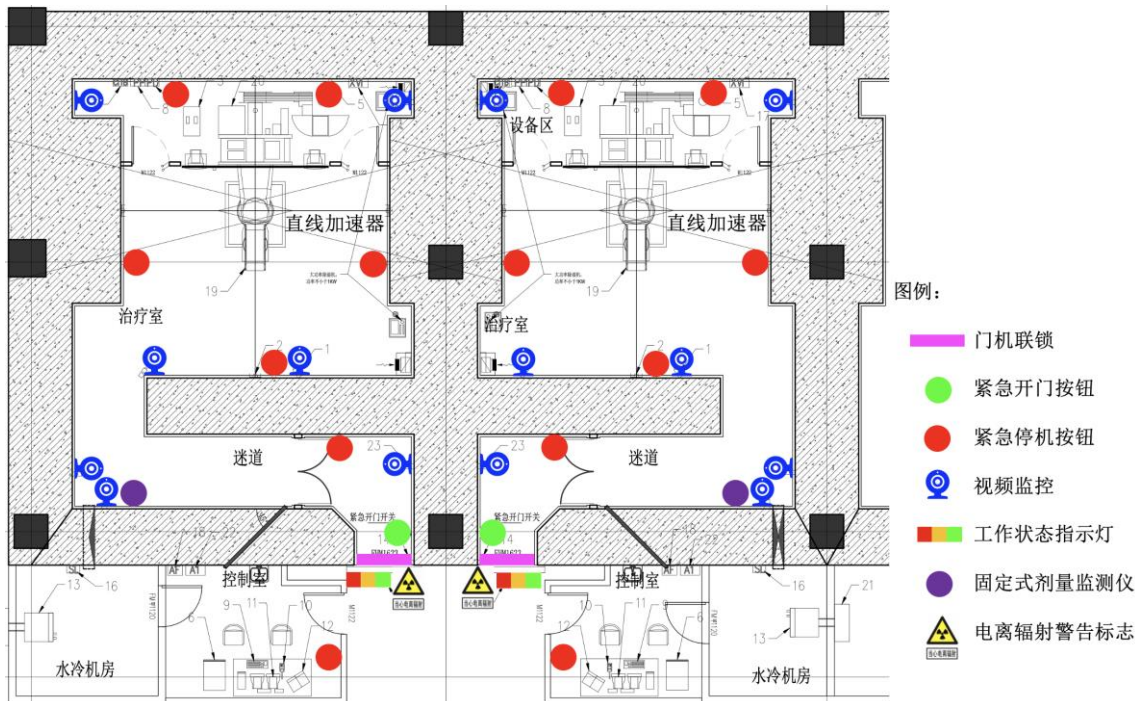


图 4-28 直线加速器辐射安全与防护设施点位示例图

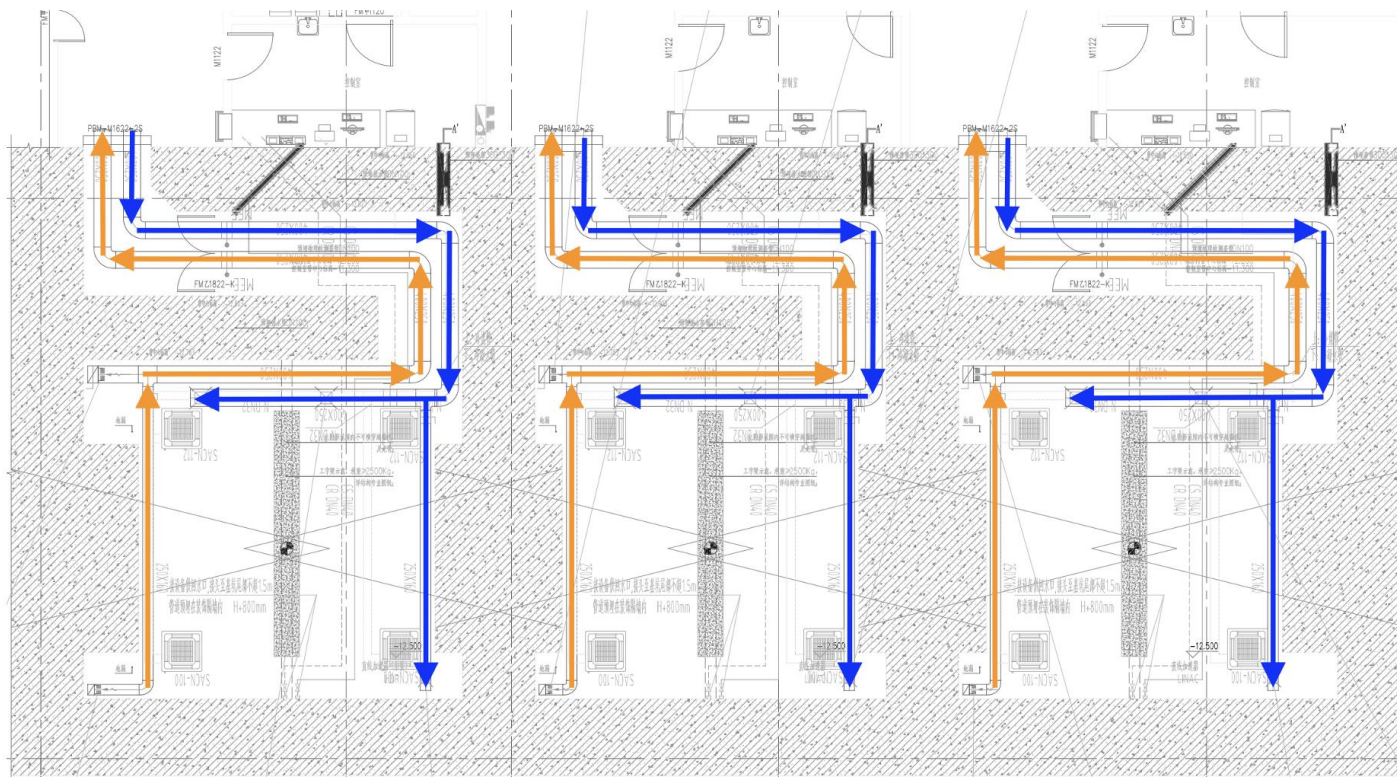
4.2.4 通风系统

每间直线加速器机房的送排风均采用“上进下出、对角布置”的方式：送风口设置在机房顶部，距离地面高度不低于 2.8m；排风口设置在机房底部，底部距离机房地面高度 30cm。室内通风系统送风口设有除尘过滤装置。通风管道穿墙方式示意图见图 4-29，进风管道与排风管道穿墙方式均采用“U”型曲路，避免了直穿，能有效控制通风管道孔的辐射泄漏。排风管道汇总到的排风井后引至高于屋顶处排放。

本项目直线加速器机房的通风系统设计满足 HJ1198-2021 相关要求，同时也满足 GBZ 121-2020 中“6.2.2 放射治疗机房应设置强排风系统，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”的要求。

表 4-8 直线加速器机房通风系统参数表

机房名称	气流走向	新风量, m³/h	排风量, m³/h	换气次数, 次/h
直线加速器 1	上送下排	1500	1500	5
直线加速器 2	上送下排	1500	1500	5
直线加速器 3	上送下排	1500	1500	5



图例：→ 新风走向 → 排风走向

图 4-30 直加一区直线加速器机房 6~8 新风、排风管道走向示意图

4.2.5 放射性三废

本项目电子直线加速器 X 射线的最高能量均为 10MV, 不需考虑感生放射性, 其运行期间不产生放射性三废。

4.3 DSA、ERCP

4.3.1 辐射工作场所布局及分区

(1) 工作场所布局

本项目涉及到 3 台 DSA 机房, 均位于地上四层手术中心的西南侧。2 号 DSA 机房东北侧为走廊, 西北侧为 1 号手术室, 西南侧为控制间, 东南侧为 3 号手术室, 楼上为上人屋面, 楼下为病理科的试剂准备间、样本制作间; 7 号 DSA 机房东北侧为控制间和设备间, 西北侧为 6 号手术室和走廊, 西南侧为 8 号手术室, 东南侧为走廊, 楼上为净化机房大厅, 楼下为手术供应中转库; 11 号 DSA 机房东北侧为设备间和控制室, 西北侧和东南侧均为走廊, 西南侧为 12 号手术室, 楼上为净化机房大厅, 楼下为预留用房; ERCP 机房位于北侧的内镜中心, 北侧和南侧均为走廊, 西侧为储藏间、控制室, 西侧为肠胃机房, 楼上为 ICU 的走廊和治疗 2 房间, 楼下为标本库、UPS 机房、常温库。

DSA 及 ERCP 均设有单独的机房, 并设有医护人员进出防护门、患者进出防护门, 医护人员流线及患者流线相互独立, 机房周围相邻区域均无敏感人群功能用房, 布局合理。DSA 工作时主要的出束方向为由下往上, X 射线球管可东西向转动, 转动角度为 $\pm 90^\circ$; ERCP 工作时的出束方向为由下往上。DSA 及 ERCP 的主束方向均避免了有用线束直接照射门、窗和工作人员操作位, 射线装置放置方式合理。

DSA 机房的最小有效使用面积、最小单边长度见下表, 均符合《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 中的相关要求。

表 4-9 DSA、ERCP 机房使用面积及单边长度的对标评价

辐射工作场所		GBZ 130-2020 的相关要求		本项目机房情况		是否达标
		机房内最小有效使用面积， m ²	机房内最小单边长度，m	机房内最小有效使用面积， m ²	机房内最小单边长度，m	
DSA 机房	2 号	30	4.5	70.6	6.86	是
	7 号	30	4.5	66.9	7.85	是
	11 号	30	4.5	82.2	7.81	是
ERCP 机房		30	4.5	34.8	5.7	是

(2) 工作场所分区

DSA 和 ERCP 机房的辐射工作场所均实行分区管理，其中机房内部为控制区，机房四周相邻场所为监督区，如图 4-32、图 4-33、表 4-10 所示。

表 4-10 DSA、ERCP 机房辐射工作场所分区

辐射工作场所	控制区	监督区
DSA 机房	DSA 机房内部	DSA 控制室、走道、相邻的手术室、设备间、设备库
ERCP 机房	ERCP 机房内部	控制室、储藏室、走廊、肠胃机房

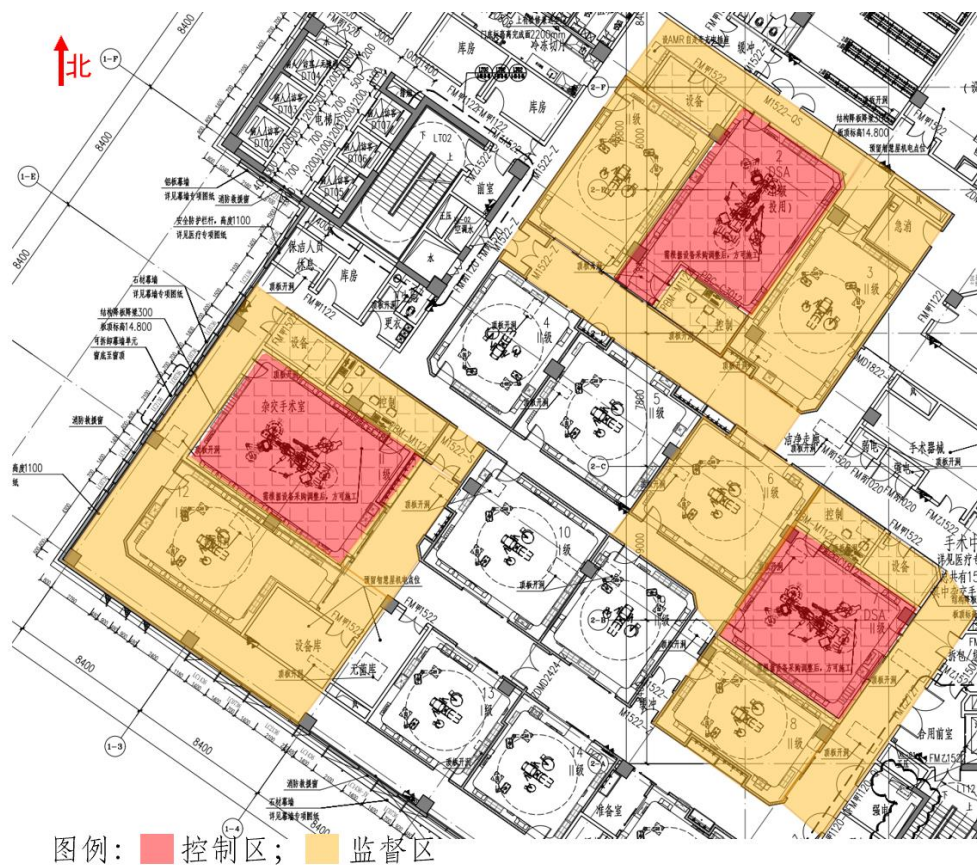


图 4-32 DSA 机房辐射工作场所分区图

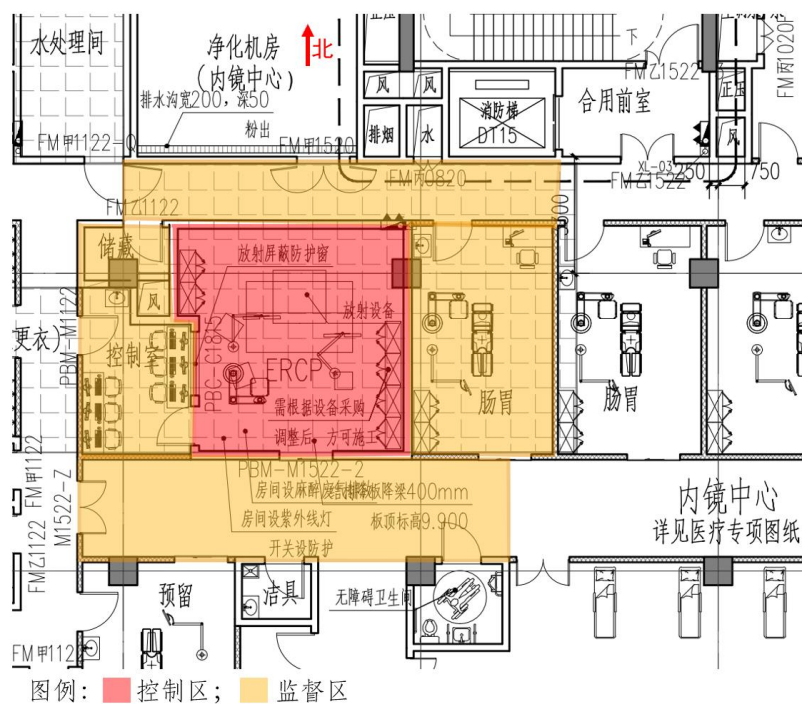


图 4-33 ERCP 机房辐射工作场所分区图

4.3.2 辐射防护屏蔽设计方案

DSA 机房和 ERCP 机房的辐射防护屏蔽设计方案见表 4-11。由表 4-11 可知，本项目 DSA 机房和 ERCP 机房有用线束和非有用线束方向的铅当量均符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关要求。

表 4-11 DSA、ERCP 机房辐射防护屏蔽设计方案

机房名称	屏蔽体	屏蔽防护方案	等效铅当量 /mmPb	标准要求铅当量 /mmPb	是否达标
四层介入中心 DSA 机房	东北墙	240mm 实心砖+3.5mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5.5	有用线束：3 非有用线束：2	是
	东南墙	240mm 实心砖+3.5mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5.5		是
	西北墙	240mm 实心砖+3.5mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5.5		是
	西南墙	240mm 实心砖+3.5mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5.5		是
	防护门	5.5mmPb 板	5.5		是
	观察窗	5.5mmPb 铅玻璃	5.5		是
	顶棚	250mm 混凝土+2.5mmPb 硫酸钡水泥	5.5		是
	地面	250mm 混凝土+2.5mmPb 硫酸钡水泥	5.5		是
三层内镜中心 ERCP 机房	北墙	240mm 实心砖+3mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5	有用线束：3 非有用线束：2	是
	南墙	240mm 实心砖+3mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5		是
	东墙	240mm 实心砖+3mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5		是
	西墙	240mm 实心砖+3mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层	5		是
	防护门	5mmPb 板	5		是
	观察窗	5mmPb 玻璃	5		是
	顶棚	250mm 混凝土+2mmPb 硫酸钡水泥	5		是
	地面	250mm 混凝土+2mmPb 硫酸钡水泥	5		是

4.3.3 其他辐射安全防护措施

（1）透视曝光控制

DSA、ERCPC 设备的透视曝光开关为常断式开关，并配有透视计时和限时报警装置。

（2）紧急停机按钮

DSA、ERCPC 的手术室操作位处拟设置紧急停机按钮。

（3）防护门

①2 号 DSA 机房的北侧防护门、控制室防护门、7 号 DSA 机房西侧防护门、控制室防护门、11 号 DSA 机房西北侧防护门、控制室防护门、ERCPC 控制室东侧防护门均为平开门，设有自动闭门装置；

②2 号 DSA 机房的南侧防护门、7 号 DSA 机房东侧防护门、11 号 DSA 机房东侧防护门以及 ERCPC 机房的南侧防护门均为电动推拉门，设置防夹装置；

③2 号 DSA 机房的南侧防护门、7 号 DSA 机房东侧防护门、11 号 DSA 机房东侧防护门以及 ERCPC 机房的南侧防护门，门外醒目位置均设有电离辐射警告标志，并设置工作状态指示灯，灯箱上设有“射线有害、灯亮勿入”的警示语句，设置门-灯联锁。

（4）监控和对讲

DSA、ERCPC 机房设有观察窗和摄像监控装置，设置的位置便于观察到受检者状态及防护门开闭情况；并在机房和控制室之间设有对讲装置，工作人员可通过对讲机与患者沟通。

（5）通风

DSA、ERCPC 机房均设置了机械排风口，通过管道同层排风，接外墙百叶排向室外，保证了机房内的良好通风。DSA、ERCPC 机房排风管平面图分别见图 4-34~图 4-37。

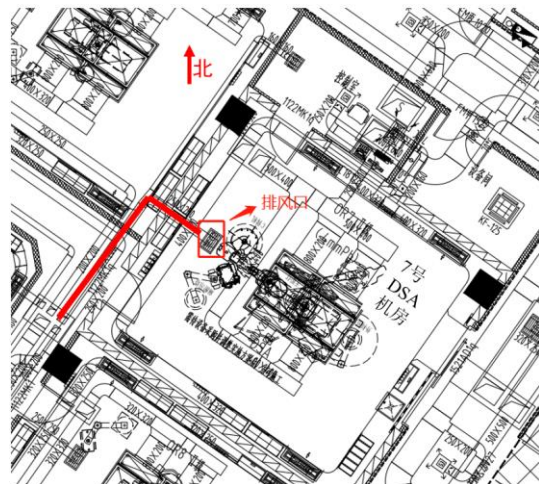
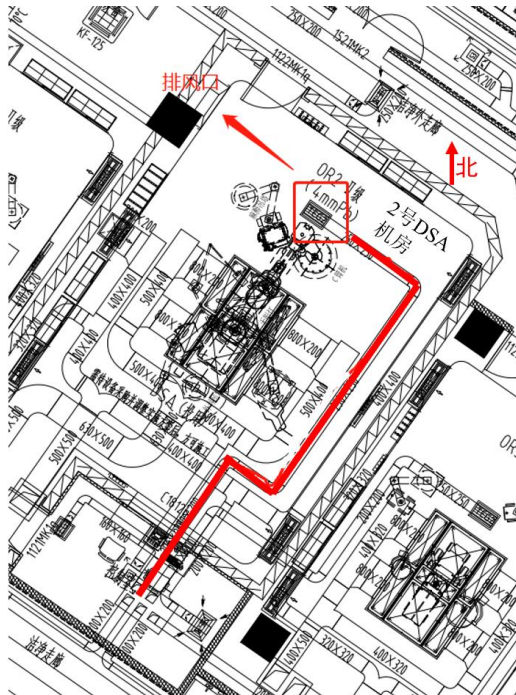


图 4-34 2 号和 11 号 DSA 机房排风管道示意图

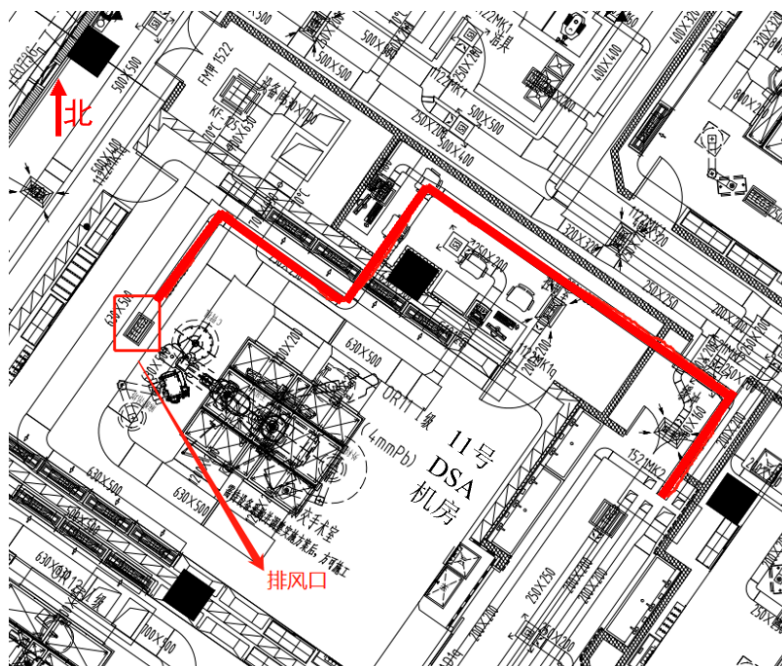


图 4-35 11 号 DSA 机房排风管道示意图

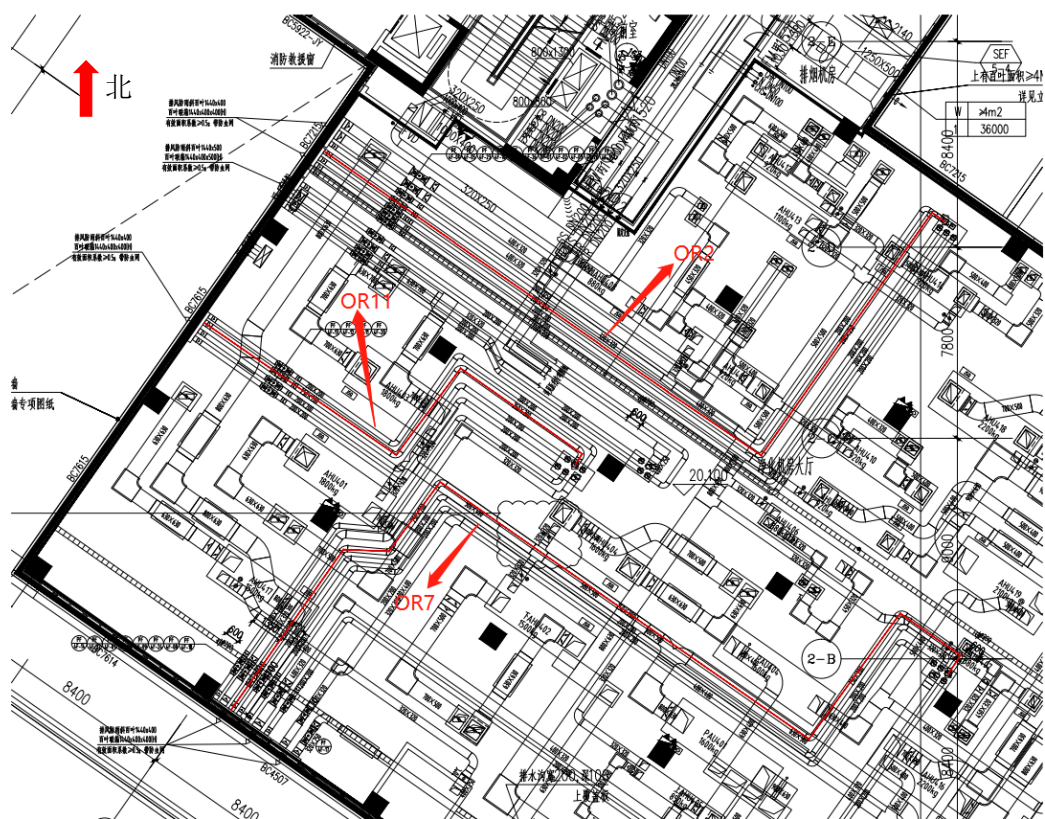


图 4-36 三间 DSA 机房排风管道示意图

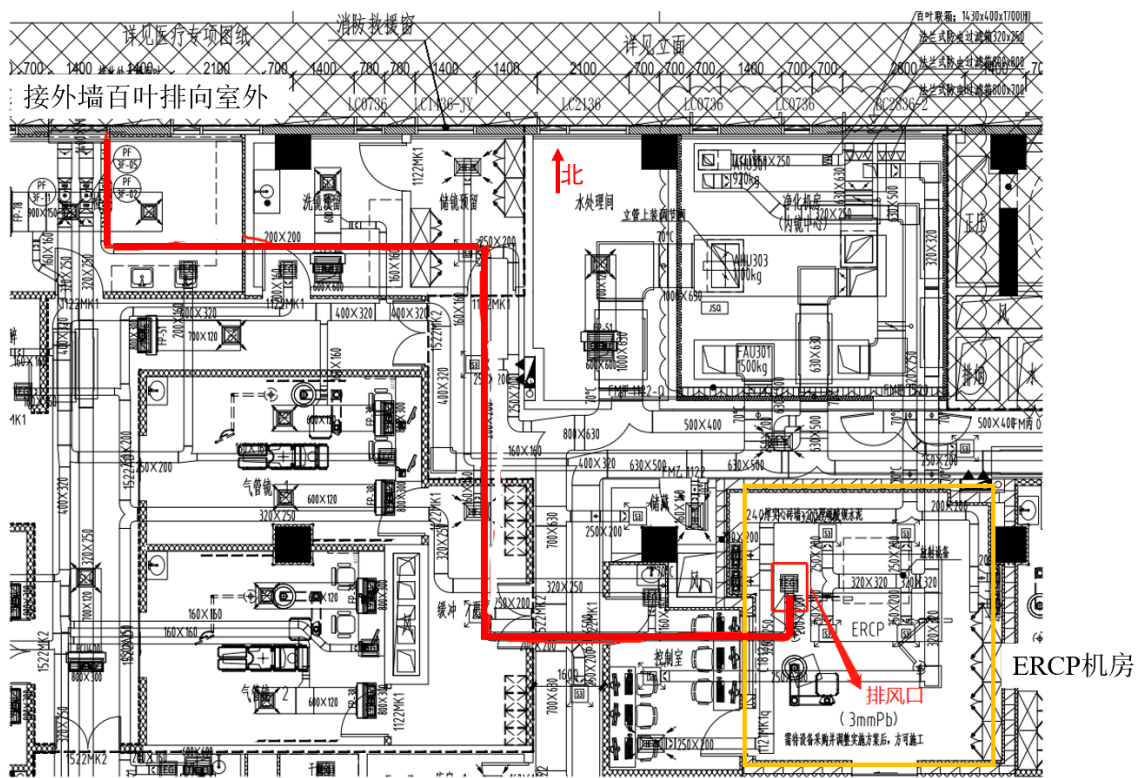


图 4-37 ERCP 机房排风管道示意图

（6）个人防护用品

辐射工作人员：每间 DSA 及 ERCP 机房均为辐射工作人员配备铅橡胶围裙、铅防护眼镜、铅橡胶帽子各 2 套（铅当量不低于 0.25mmPb），铅橡胶颈套各 2 套（铅当量不低于 0.5mmPb），介入防护手套各 2 套（铅当量不低于 0.025mmPb）；

受检者：考虑到手术患者可能为儿童，因此每间 DSA 及 ERCP 机房均为受检者配备铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套各 1 套（铅当量不低于 0.5mmPb），铅橡胶帽子各 1 套（铅当量不低于 0.5mmPb）。

（7）辅助防护设施

每间 DSA 及 ERCP 机房均配备铅悬挂防护屏、床侧防护帘各 1 套（铅当量不低于 0.25mmPb）。

（8）个人剂量监测

操作 DSA、ERCP 手术的医生每人配备 2 支个人剂量计，1 支佩戴在铅围裙外锁骨对应的领口位置，另 1 支佩戴在铅围裙内的躯干上；技师每人配备 1 支个人剂量计，工作时必须按要求正确佩戴，进行个人剂量监测。

4.3.4 机房辐射安全与防护设施小结

本项目 DSA 及 ERCP 机房辐射安全与防护设施情况小结见表 4-12。

表 4-12 DSA 机房、ERCP 机房辐射安全与防护设施情况小结

序号	项目	机房辐射安全与防护设施	是否具备	具体情况
1	A 场所设施	单独机房	√	DSA 及 ERCP 每台设备均设置单独机房。
2		操作部位局部屏蔽防护设施	√	每间 DSA 及 ERCP 机房均配备铅悬挂防护屏、床侧防护帘各 1 套（铅当量不低于 0.25mmPb）。
3		医护人员的个人防护	√	每间 DSA 及 ERCP 机房均为辐射工作人员配备铅橡胶围裙、铅防护眼镜、铅橡胶帽子各 2 套（铅当量不低于 0.25mmPb），铅橡胶颈套各 2 套（铅当量不低于 0.5mmPb），介入防护手套各 2 套（铅当量不低于 0.025mmPb）

4		患者防护	√	每间 DSA 及 ERCP 机房均为受检者配备铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套各 1 套(铅当量不低于 0.5mmPb)，铅橡胶帽子各 1 套(铅当量不低于 0.5mmPb)。
5		机房门窗防护	√	根据表 4-11，机房门窗防护均不低于标准要求铅当量。
6		闭门装置	√	2 号 DSA 机房的北侧防护门、控制室防护门、7 号 DSA 机房西侧防护门、控制室防护门、11 号 DSA 机房西北侧防护门、控制室防护门、ERCP 控制室东侧防护门均为平开门，设有自动闭门装置；2 号 DSA 机房的南侧防护门、7 号 DSA 机房东侧防护门、11 号 DSA 机房东侧防护门以及 ERCP 机房的南侧防护门均为电动推拉门，设置防夹装置；
7		入口处电离辐射警告标志	√	2 号 DSA 机房的南侧防护门、7 号 DSA 机房东侧防护门、11 号 DSA 机房东侧防护门以及 ERCP 机房的南侧防护门，门外醒目位置均设有电离辐射警告标志。
8		入口处机器工作状态显示	√	2 号 DSA 机房的南侧防护门、7 号 DSA 机房东侧防护门、11 号 DSA 机房东侧防护门以及 ERCP 机房的南侧防护门，门外醒目位置均设有电离辐射警告标志，并设置工作状态指示灯，灯箱上设有“射线有害、灯亮勿入”的警示语句。
9	B 监 测 设 备	监测仪器	√	DSA 及 ERCP 机房工作场所使用本项目拟配的便携式 X/γ 辐射巡测仪进行辐射监测。
10		个人剂量计	√	操作 DSA、ERCP 手术的医生每人配备 2 支个人剂量计，1 支佩戴在铅围裙外锁骨对应的领口位置，另 1 支佩戴在铅围裙内的躯干上；技师每人配备 1 支个人剂量计，工作时必须按要求正确佩戴，进行个人剂量监测。

4.3.5 三废的治理

DSA、ERCP 不产生放射性三废。在开机出束时，X 射线电离空气会产生极少量的臭氧和氮氧化物。DSA、ERCP 机房内均设有机械通风系统，以排出机房内的臭氧和氮氧化物。臭氧常温下可自行分解为氧气，另外考虑到会被环境空气的对流、扩散作用稀释，对环境影响很小。

4.4 III类射线装置

4.4.1 辐射工作场所分区

模拟定位区拟使用 2 台模拟 CT，辐射工作场所分区如图 4-38 所示。控制区为模拟 CT 机房内部，监督区为机房四周屏蔽墙体外区域。

质子治疗室 1 和治疗室 2 拟各使用 1 台滑轨 CT，辐射工作场所分区图如图 4-39 所示。CT 出束期间治疗室内操作间为监督区，除此之外其他区域为控制区。

核医学拟使用 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT，其辐射工作场所分区情况将统一在后文核医学的“4.5.1 小节 辐射工作场所分区”进行分析评价。

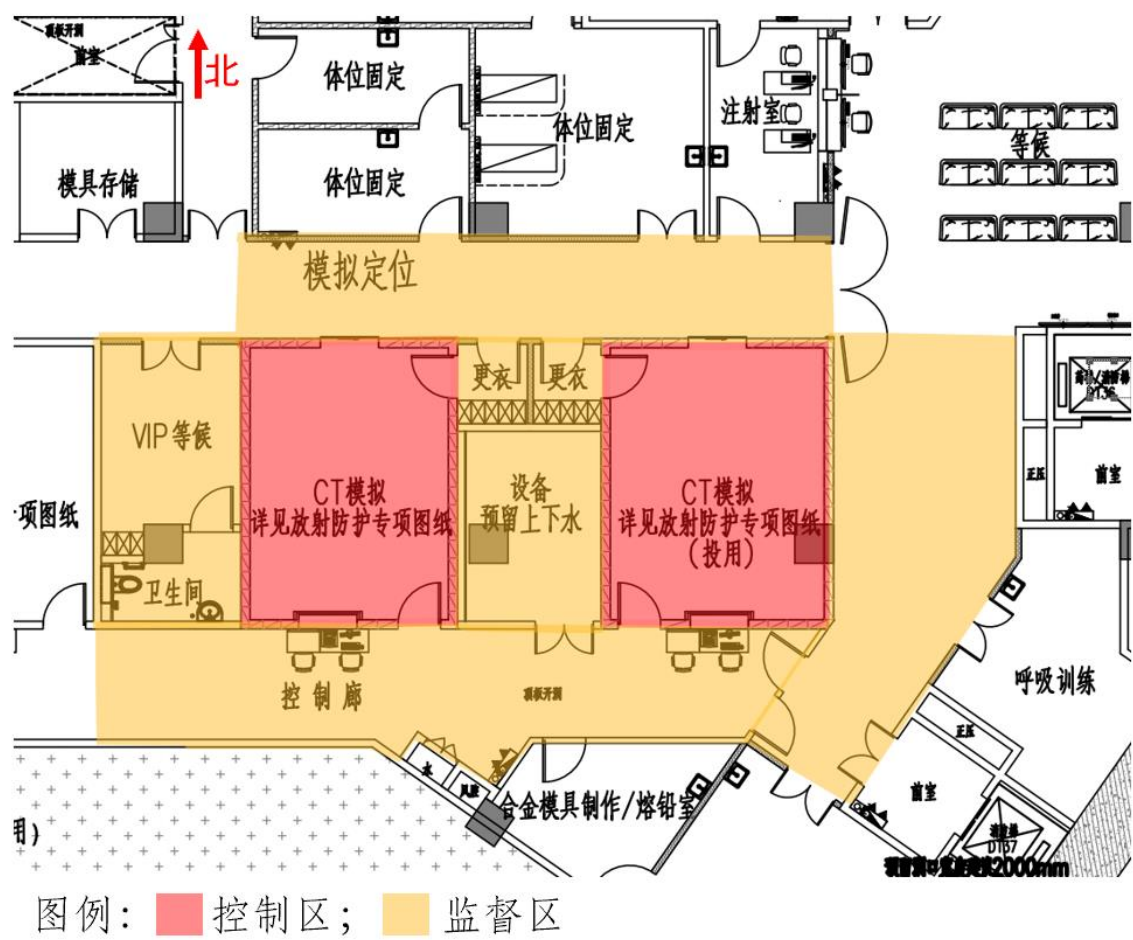
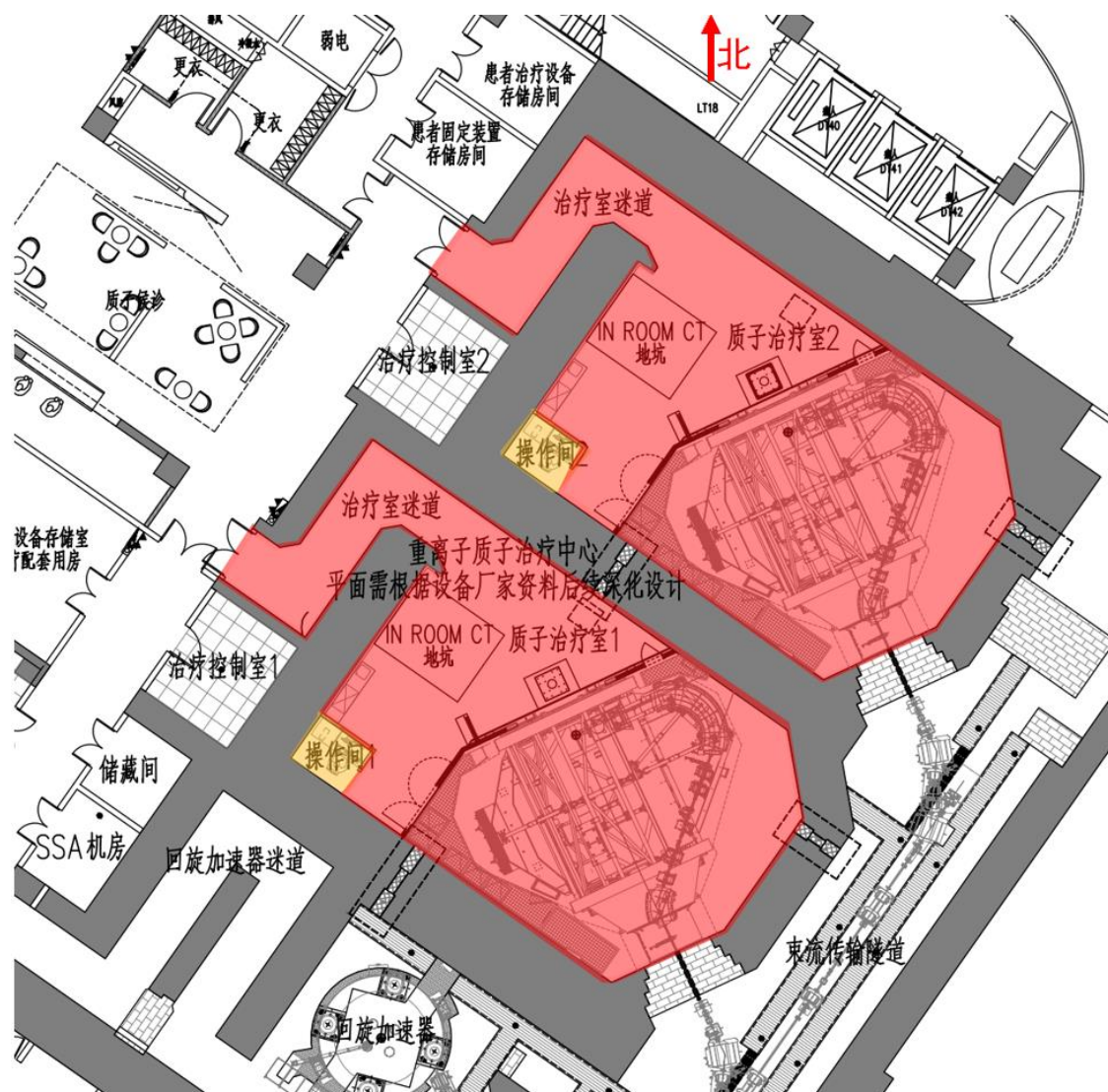


图 4-38 模拟 CT 辐射工作场所分区图



图例：■ 控制区；■ 监督区

图 4-39 轨道 CT 机在治疗室内辐射工作场所分区图

4.4.2 机房布局和辐射屏蔽

治疗室内使用的轨道 CT 机的辐射屏蔽利用治疗室的屏蔽墙体，技师在治疗室内的操作间内完成操作，治疗室内操作间西北侧和西南侧均利用治疗室的屏蔽墙体，操作间的其余两侧利用 240mm 实心砖（密度不小于 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ ）+0.5mmPb 当量的硫酸钡涂料，观察窗采用 2.5mmPb 玻璃进行防护。模拟定位 CT 机房具体屏蔽设计和机房周围环境分布情况列于表 4-13，其中，实心砖密度不小于 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，机房尺寸和面积与标准要求对照情况列于表 4-14。

表 4-13 模拟定位 CT 机等机房屏蔽设计和周围环境分布情况

机房名称	机房尺寸和面积	位置	屏蔽设计	铅当量, mm	周围环境
地下二层 放疗科模拟定位 CT 机房 (西侧机房)	7.02m×5.12m (长×宽), 面积 35.94m ²	北墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	走廊
		南墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	控制廊
		东墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	更衣间、设备 预留上下水
		西墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	VIP 等候区、 卫生间
		防护门	4mmPb 板	4	走廊
		观察窗	4mmPb 铅玻璃	4	控制廊
		顶棚	250mm 混凝土 +2mmPb 硫酸钡水泥	5	车道
		底板	250mm 混凝土 +2mmPb 硫酸钡水泥	5	停车位
地下二层 放疗科模拟定位 CT 机房 (东侧机房)	7.02m×5.52m (长×宽), 面积 38.75m ²	北墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	走廊
		南墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	控制廊
		东墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	走道
		西墙	240mm 实心砖 +3mmPb 当量的硫酸 钡水泥防护层	5	更衣间、设备 预留上下水
		防护门	4mmPb 板	4	走廊
		观察窗	4mmPb 铅玻璃	4	控制廊
		顶棚	250mm 混凝土 +2mmPb 硫酸钡水泥	5	设备物资库房
		底板	250mm 混凝土 +2mmPb 硫酸钡水泥	5	停车位

表 4-14 机房尺寸和面积建设要求对标

机房名称	机房设计		标准要求		是否满足要求
	最小单边长度, m	有效使用面积, m ²	最小单边长度, m	有效使用面积, m ²	
地下二层放疗科模拟定位 CT 机房（西侧机房）	5.35	37.557	4.5	≥30	是
地下二层放疗科模拟定位 CT 机房（东侧机房）	5.52	38.75	4.5	≥30	是

由上表可知，模拟定位 CT 机房的屏蔽设计满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“CT 机房和 CT 模拟定位机房屏蔽采用 2.5mm 铅当量”的要求，机房最小单边长度和有效使用面积均能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求。

4.4.3 拟采取的其他安全与防护措施

参照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求，模拟定位 CT 机房拟采取的安全防护措施如下：

- （1）机房设有观察窗，位置便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。
- （2）机房设有机械通风系统，保持良好的通风。
- （3）机房门外设有电离辐射警告标志，机房门上方设有醒目的工作状态指示灯，灯箱上设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，候诊区设放射防护注意事项告知栏。
- （4）平开式机房门设自动闭门装置，推拉式机房门设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。电动推拉门设防夹装置。

4.4.4 放射性三废

模拟定位 CT 机正常运行期间主要的放射性污染物为开机出束时产生的 X 射线，不会产生放射性废水、废气和固体废物。

4.5 PET 药物制备区

4.5.1 辐射工作场所分区

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的规定，应将辐射工作场所分为控制区和监督区。控制区是指需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域；监督区是指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的区域。PET 药物制备区辐射工作场所分区具体如下，具体分区布局见图 4-47。

（1）回旋加速器区域辐射工作场所

①控制区：回旋加速器机房；

②监督区：加速器控制室、设备/水冷机房以及预留房间等。

控制区管理要求：控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志，门禁列入安全联锁系统。装置运行期间禁止进入，仅经授权并解除联锁后才能进入控制区内，进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，需经授权方可进入，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

（2）PET 药物制备区辐射工作场所

①控制区：热室区域、控制室、质控间、无菌检测间、阳性对照间、洗衣整衣间、洁具/消毒间等。

②监督区：一更、二更间、外包间以及靠近控制区的走道。

控制区管理要求：控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志，进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，需经授权方可进入，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

4.5.1.1 非密封放射性物质工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求,按最大工作负荷,计算出放射性同位素日等效最大操作量见表 4-15,辐射工作场所的日等效最大操作量为 $1.79\text{E}+09\text{Bq}$,根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002),场所属于乙级非密封放射性物质工作场所。

表 4-15 本项目 PET 药物制备区非密封放射性物质工作场所分级

核素	日实际最大产额, Bq	合成效率	药物日最大合成量,Bq	理化性质	毒性因子	操作因子	日等效最大操作量, Bq
^{18}F	$9.25\text{E}+10$	50%	$4.63\text{E}+10$	液体	0.01	1	$9.25\text{E}+08$
^{13}N	$4.10\text{E}+09$	50%	$2.05\text{E}+09$	液体	0.01	1	$4.10\text{E}+07$
^{11}C	$4.88\text{E}+10$	50%	$2.44\text{E}+10$	液体	0.01	1	$4.88\text{E}+08$
^{68}Ga	$1.11\text{E}+10$	50%	$5.55\text{E}+09$	液体	0.01	1	$1.11\text{E}+08$
^{64}Cu	$3.33\text{E}+09$	50%	$1.67\text{E}+09$	液体	0.01	1	$3.33\text{E}+07$
^{89}Zr	$1.92\text{E}+09$	50%	$9.62\text{E}+08$	液体	0.1	1	$1.92\text{E}+08$
合计							$1.79\text{E}+09$

4.5.1.2 人流、物流

PET 药物制备区辐射工作场所人流、物流图见图 4-48。

(1) 人流:

加速器区域:工作人员由加速器室前室进入加速器机房进行操作,并在控制室进行相关操作,结束工作后原路返回;

药物制备区:热室操作工作人员经由换鞋、更衣后,通过缓冲间进入热室操作区完成药物制备,完成药物质检等工作后进行表面污染监测,符合要求后经卫生通过间离开。

(2) 物流:

核素由回旋加速器机房通过药物传输管道直传输至合成热室的模块箱自动进行合成,工作人员将分装完成的放射性药物试剂瓶装载到专用的铅罐中。

(3) 成品药物转移路径: 药物经质检合格后, 药物经外包间途经 PET 药物

制备区走道向南进入核医学科区域。

4.5.1.3 布局设计及合理性分析

本项目 PET 药物制备区辐射工作场所位于医疗综合楼地下二层中部北侧，北侧外为核医学科医护办公区域，西侧为核医学以及车位等区域，南侧为放疗科区域，东侧为直线加速器机房区域。

该辐射工作场所处于相对独立的区域，回旋加速器机房屏蔽墙体、防护门及顶层外无人员长居留场所。控制区布局相对紧凑，辐射工作场所进出口均设置门禁管理，便于场所的防护管理与安全控制。辐射工作场所的人流、物流通道相对独立设置，能够有效防止交叉污染，避免公众、工作人员受到不必要的外照射。

从辐射防护及环境保护方面考虑，该场所布局合理可行。

4.5.2 辐射屏蔽

4.5.2.1 设计标准

回旋加速器制备 PET 药物辐射工作场所辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

（1）年剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中对照射剂量约束和潜在照射危险约束的防护要求，以职业照射剂量限值的 1/4 即 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值，以公众照射剂量限值的 1/10 即 0.1mSv/a 作为公众的年剂量约束值。

（2）屏蔽体外剂量率控制水平

回旋加速器机房屏蔽体外各关注点处的剂量率应不高于 2.5 μ Sv/h；药物制备区控制区屏蔽体外剂量率参照核医学科。

4.5.2.2 屏蔽设计

本项目回旋加速器为自屏蔽型，自屏蔽组成材料见表 4-16。

表 4-16 PET 药物制备区回旋加速器自屏蔽设计

层数	材料	厚度, cm				
		前面	侧面	后面	上部	底部
1	聚乙烯	20.6	11.5	23.8	23.9	0.0
2	铁	0.45	0.45	0.45	0.4	0.0
3	铅	10.0	10.0	10.0	10.0	0.0
4	铁	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0
5	重混凝土	62.2	56.4	59.3	59.4	0.0
6	铁	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0

该区域屏蔽设计详见表 4-17，其中混凝土密度不小于 2.35g/cm^3 ，实心砖密度不小于 2.1g/cm^3 ，铅板密度不小于 11.3g/cm^3 。回旋加速器机房平面、剖面图见图 4-40 和图 4-41。

表 4-17 PET 药物制备区工作场所辐射屏蔽设计

场所名称	屏蔽防护设计方案		
	墙体设计方案	楼板（顶棚/地坪）设计方案	防护门、窗等设计方案
回旋加速器机房	四周墙体：900mm 混凝土； 迷道内墙：300mm 混凝土	顶棚：600mm 混凝土 地坪：800mm 混凝土 （下方为结构空腔）	防护门：/
热室房间及控制室	除与回旋加速器机房隔墙的其余墙体：370mm 混凝土实心砖	底板 130mm 混凝土 顶板 180mm 混凝土	防护门（3 扇）：8mmPb 传递窗（2 扇）：8mmPb 观察窗：8mmPb 铅玻璃
质检、脱衣洗手、穿衣手消、阳性对照、无菌检测	南墙与热室、控制室隔墙：370mm 混凝土实心砖； 其余墙体：240mm 混凝土实心砖	顶棚：180mm 混凝土 地坪：130mm 混凝土	防护门（2 扇）：3mmPb

回旋加速器药物传输地沟两侧采用混凝土，底板 70mm 厚混凝土浇筑，地沟盖板为 30mm 铅砖。全部电缆沟均采用通过地下电缆沟走线，从安装加速器的地坑出线后达到屏蔽墙体，采取直穿墙体方式。

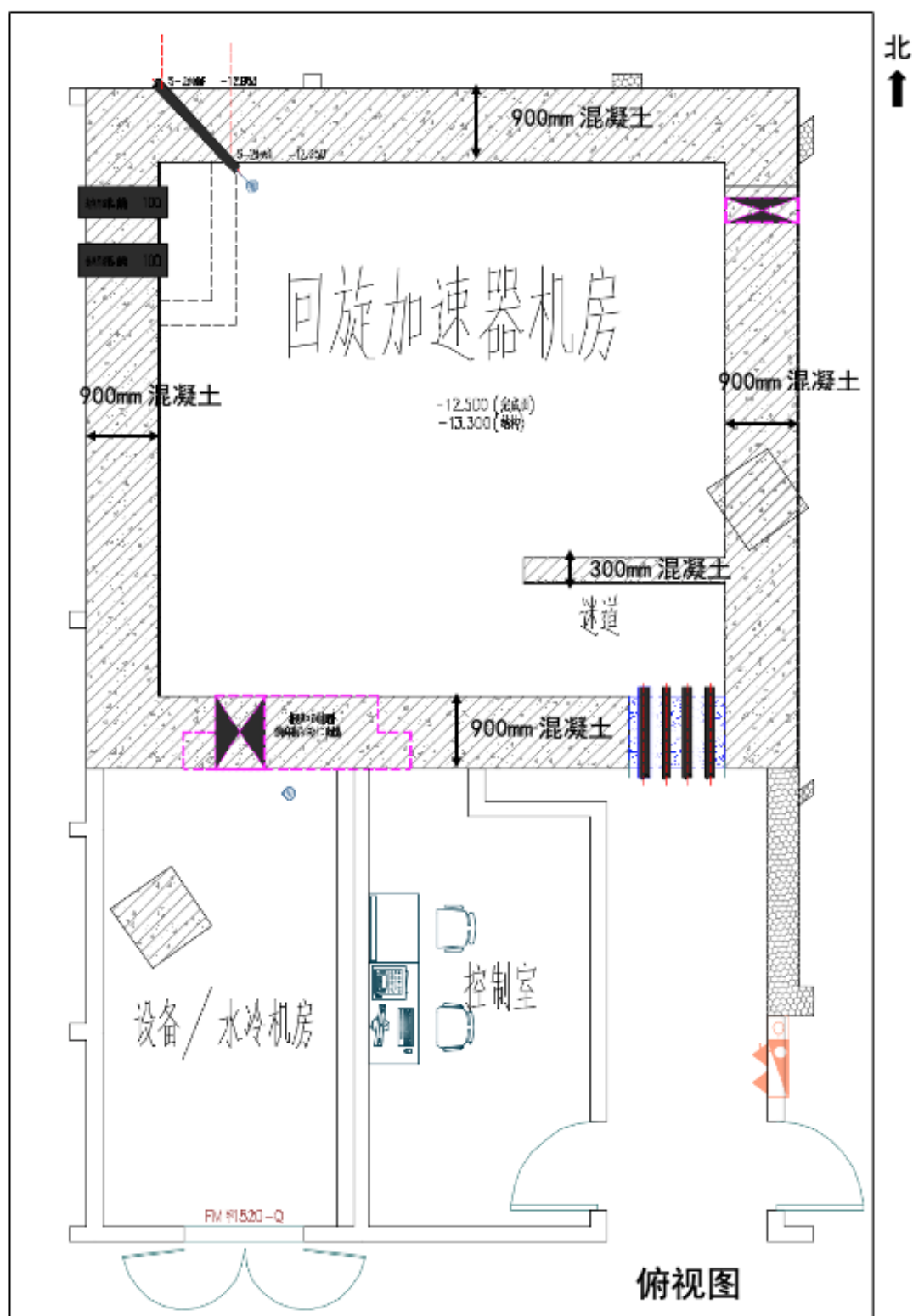


图 4-40 本项目回旋加速器机房平面图

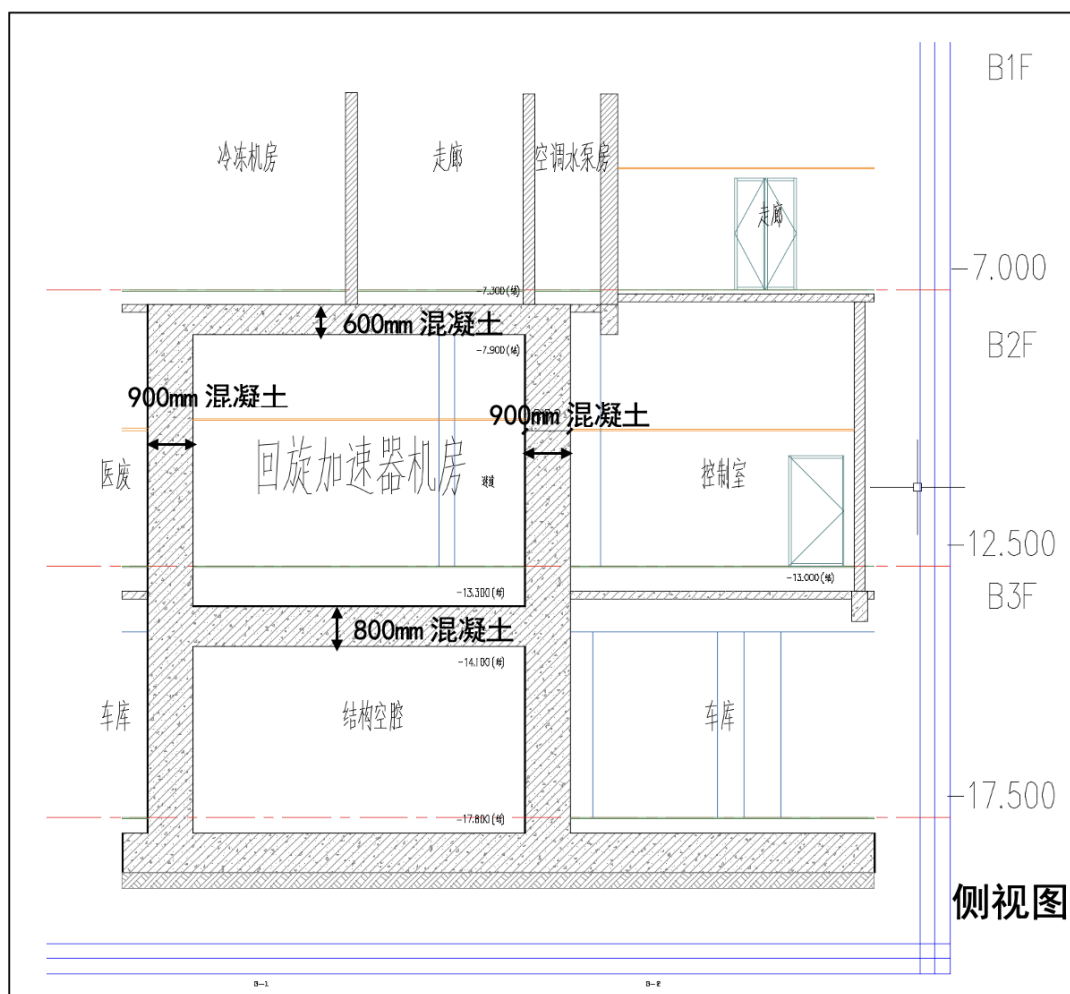


图 4-41 本项目回旋加速器机房剖面图

4.5.3 防护设备和个人防护用品

(1) 防护设备

本项目各辐射工作场所拟配备的防护设备具体见表 4-18。

表 4-18 拟配备的防护设备情况一览表

场所		防护设备	屏蔽材料及厚度	数量
加速器机房		废物坑	位于地下，四周为混凝土，顶部为不锈钢盖板	1 个，长×宽×高=1m×1m×0.8m。
PET 药物制备区域	热室操作区	合成热室（上下腔）	70mmPb	2 个
		合成热室	100mmPb	1 个

		(上腔)		
		分装热室	100mmPb	1 个
	质检室	通风橱	50mmPb	1 个
	热室操作区	废物桶	20mmPb	2 个
	质检室	废物桶	10mmPb	2 个
防护铅罐		40mmPb	2 个	防护铅罐
不锈钢转运车		/	/	不锈钢转运车

(2) 个人防护用品以及检测设备

该区域拟配备的个人防护用品以及检测设备情况详见表 4-19。

表 4-19 拟配备的防护设备情况一览表

场所名称	个人防护用品及数量	检测设备以及数量	备注
回旋加速器	配备防护铅衣 (0.5mmPb)、防护眼镜 (0.5mmPb)、防护手套和口罩各 1 套。	机房内设置区域 γ 辐射剂量率检测探头 1 个, 控制室设置区域 γ 辐射剂量率检测探头 1 个; 配备个人剂量报警仪 2 个, 中子巡检仪 1 台, 个人剂量计 1 人/台。	专用
PET 药物制备区域	配备防护铅衣 (0.5mmPb)、防护眼镜 (0.5mmPb)、防护手套和口罩各 2 套	检测间设置 α 、 β 手脚表面污染检测仪和表面污染仪各 1 台; 热室操作室设置区域 γ 辐射剂量率检测探头各 1 个, 个人剂量计 1 人/台。	专用
配备便携式 γ 剂量率监测仪 1 台			共用

4.5.4 辐射防护和安全管理措施

4.5.4.1 回旋加速器区域

4.5.4.1.1 安全联锁系统

回旋加速器安全联锁系统主要由 PLC、钥匙开关、门机联锁、急停开关、清场按钮、警告警示装置等组成, 安全联锁设施布点设施见图 4-42。

(1) PLC

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑

辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将控制钥匙、急停按钮、清场搜索按钮等安全设施或信号进行联锁，并在联锁动作发生时执行这些联锁关系，以此来保障加速器的安全运行及工作人员的人身安全。

(2) 钥匙开关：在加速器机房操作位处设置 1 个钥匙开关，同加速器进行联锁。只有将钥匙开关拨至闭合位置后，加速器才能出束；钥匙开关不在闭合位置，加速器不能出束。加速器钥匙与加速器机房防护门钥匙捆绑在一起。

(3) 门机联锁：机房防护门与加速器联锁，当加速器机房防护门未关闭到位时，加速器无法开启高压进行出束；当加速器工作时误操作打开加速器机房防护门时，加速器立即停止出束。

(4) 开门开关：拟在加速器机房门外安装开门开关，在门内附近墙上安装紧急开门按键。

(5) 急停开关：在加速器设备上、控制台上设置醒目的急停开关；急停开关一经按下，系统将无条件关闭加速器束流，停止出束。

(6) 清场按钮：在加速器机房内部和控制台上均设置 1 个设置清场按钮。在开机之前必须按照巡行路线在规定时间内进行清场，逐个按下清场按钮，关闭防护门，设备才能启动。

(7) 声光报警：清场以后关闭防护门时，门口的声光报警响起。加速器准备出束前，控制室内联锁装置显示屏会提示“准备供束”。出束时，提示语变成“正在供束”，同时加速器门口的运行状态指示灯由绿色变成红色。

在机房内、门外各设 1 个红黄绿三色工作指示灯，红灯亮表示加速器正在出束工作，黄灯亮表示加速器已停机但机房内剂量较高，人员不能进入；绿灯亮表示机房内剂量率处于较低水平，人员可安全进入加速器机房。

在加速器机房防护门外设置 1 个声音提示装置，加速器正在出束工作时，声音提示装置发出急促而尖锐的声音；加速器已停机但加速器机房内剂量较高时，声音提示装置会发出警报声；加速器机房内剂量率处于较低水平时，声音

提示装置不会发出声音。

安全联锁逻辑图详见图 4-43。本项目回旋加速器的辐射安全措施设计合理，基本满足相关标准要求。在实际运行期间，建设单位需保证上述辐射防护措施的严格有效执行。

4.5.4.1.2 固定式剂量监测

回旋加速器机房及控制室配备 1 台多探头固定式 γ 剂量率仪，迷道、控制室以及热室操作区各设置 1 个固定式剂量监测探头，固定式剂量监测系统显示器位于加速器控制室操作位，当探测到剂量率超过设置阈值时，加速器防护门在外部操作不能开启。同时可进行回旋加速器机房内残余 γ 剂量率的监测，当固定式剂量监测系统读出值超过设定值时，蜂鸣器则发出频率较高的鸣叫，加速器机房门不能开启，只有当剂量率降低到设置的阈值后，蜂鸣器则发出频率较低的鸣叫时，方可进入机房。

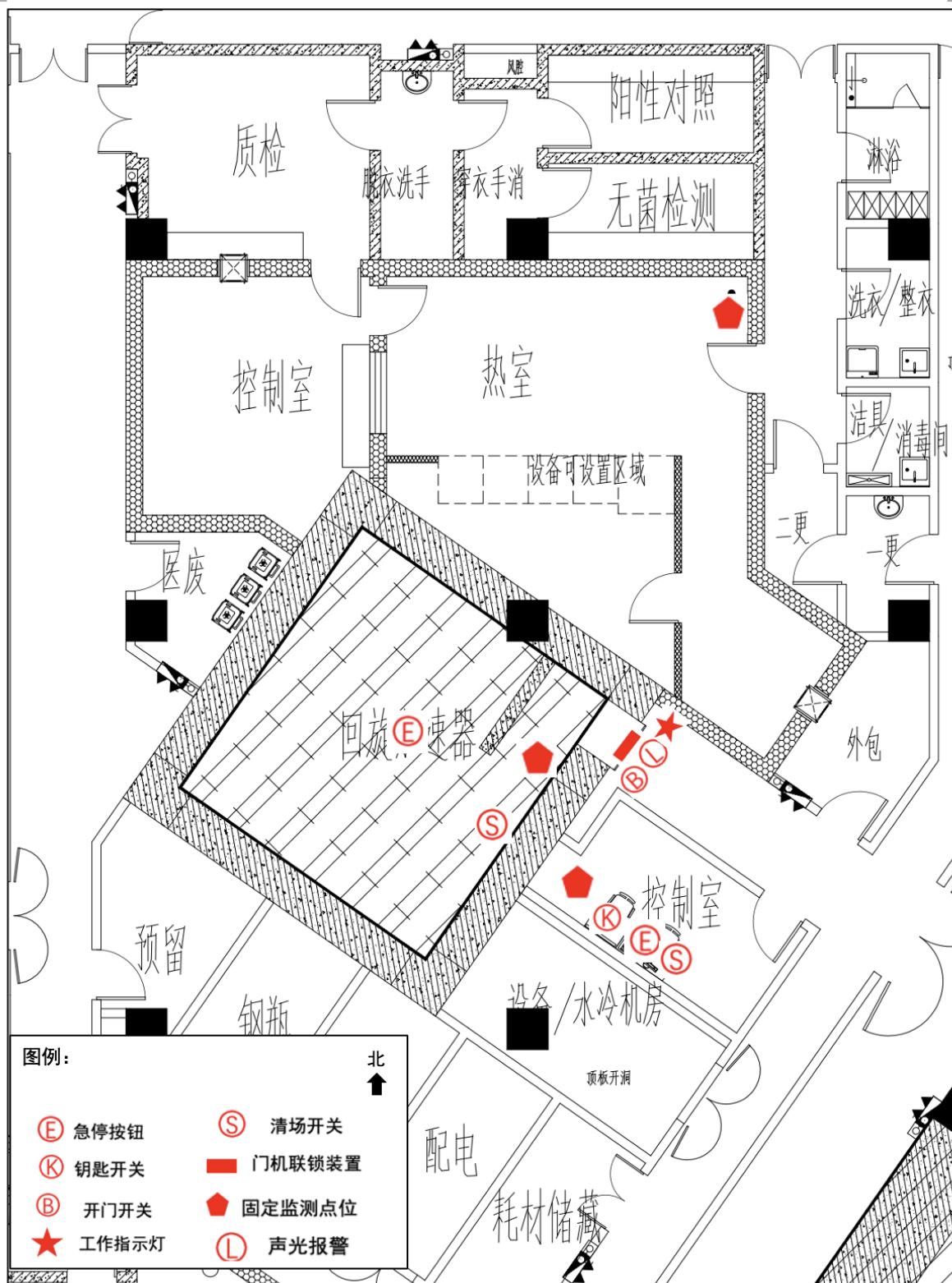


图 4-42 本项目回旋加速器工作场所辐射防护措施示意图

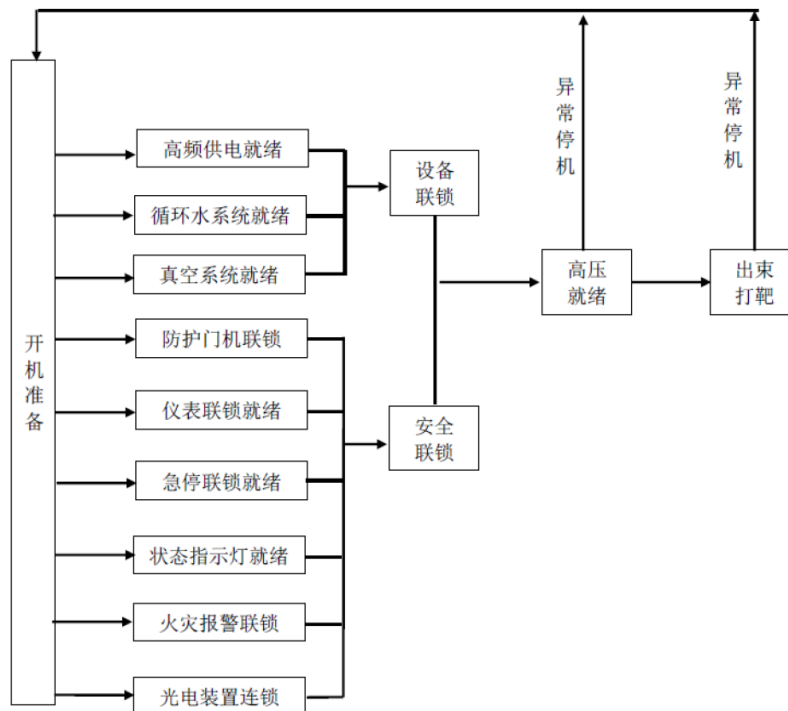


图 4-43 本项目回旋加速器机房拟设计的安全联锁逻辑示意图

4.5.4.1.3 其他辐射安全措施

(1) 视频监控装置：拟在加速器机房设置 1 套监控装置，监控探头分别位于加速器机房内部（1 个）、迷道（1 个），监控装置的显示器位于操作位；开机前通过观察装置确认机房内没有人员再出束。

(2) 加速器机房出入口处设置电离辐射警告标志和中文警示说明。

4.5.4.2 药物制备区域

(1) 电离辐射警告标志：工作场所入口醒目位置设置电离辐射警告标志。

(2) 程序设定：当回旋加速器生产出核素之后，放射性核素传输之前，药物合成、分装热室设备将根据程序设定，自动检测合成分装热室的门是否已经关闭，合成分装热室里面的压力是否满足负压要求；只有这两项条件均满足的情况下，放射性核素才能通过管道进行传送，同时在控制室内操作台上有相应的核素传输工作状态指示灯。

(3) 剂量监测：在合成分装热室所在房间安装固定式剂量率监测探头，当探测到剂量率超过设置阈值时（如设置为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ），则有声光报警，人员马上撤离。

(4) 视频监控：在热室操作室安装视频监控，总控室可及时掌握药物合成分装热室情况。

4.5.5 通风系统

回旋加速器制备 PET 药物辐射工作场所排风管道示意图见图 4-44。

4.5.5.1 回旋加速器机房

回旋加速器机房设置独立的通风系统，机房内气流方向为上进下出，排风量约 $1200\text{m}^3/\text{h}$ ，有效通风换气次数超过 4 次/h，经由核医学南侧排风井，升至南区住院楼屋面排气口，经活性炭过滤后排放。

4.5.5.2 药物制备场所

本项目 PET 药物制备区设置独立的通风系统，总计 5 套排风系统，详见图 4-45。

第一套排风系统服务区域为：阳性对照室及其通风柜、无菌检测间及其通风柜、脱衣洗手间，上述房间放射性废气汇集后经由核医学北侧排风井，升至医疗综合楼屋顶排气口，经活性炭过滤后排放；

第二套排风系统服务区域为质检室及其通风柜，风速不小于 0.5m/s ，放射性废气核医学北侧排风井，升至医疗综合楼屋顶排气口，经活性炭过滤后排放；

第三套排风系统服务区域为：控制室、热室操作间、后区，放射性废气核医学北侧排风井，升至医疗综合楼屋顶排气口，经活性炭过滤后排放；

第四套排风系统服务区域包括：热室+热室操作间，风速不小于 0.5m/s ，放

射性废气核医学北侧排风井，升至医疗综合楼屋顶排气口，经活性炭过滤后排放；

第五套排风系统服务区域包括:外包间、洗衣整衣间、卫生通过间、洁具/消毒间、淋浴间，放射性废气 PET 药物制备区东北侧排风井，升至医疗综合楼屋顶排气口排放；

PET 药物制备区控制区内各工作场所之前保持各区之间的压差，防止放射性废气以及气溶胶工作场所造成交叉污染，用于药物合成和分装的热室通过管控措施后实现独立的排风且安装活性炭过滤装置，排风系统各排气口高于所在建筑屋顶。

[illegible]

4.5.6 放射性三废

4.5.6.1 放射性废气

本项目回旋加速器运行时，产生次级辐射与机房内空气相互作用产生活化气体，主要为 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{11}C 、 ^{41}Ar 。加速器机房设置独立的排风系统，含有少量活化气体的空气经过滤后排放。根据第五章中回旋加速器活化气体所致公众浸没外照射估算结果可知，对周围公众影响较小。

药物在合成、分装过程中可能有极少量放射性气溶胶逸出。热室设置独立排风系统，废气经高效过滤器和活性炭过滤后，放射性废气对公众造成的影响很小。

4.5.6.2 放射性废水

回旋加速器正常运行过程中，不产生放射废水。回旋加速器的冷却水循环使用不排放。在事故情况下需排放冷却水，排放量约 30L。活化冷却水收集于地下三层集水井（2 个， $2\text{m}\times 1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ），暂存一段时间后，经检测满足排放标准后排入医院污水管网。

PET 药物制备区放射性废水主要包括工艺废液及工作人员应急废水，其中工艺废液包括靶体冲洗废水和质检废液，其中靶体冲洗废水产生量约 10L/次，质检废液产生量约 1L/次，经专用管道排入核医学科衰变池，废液统计分析见表 4-26，管道布置图见图 4-46。汇入衰变池放射性废水满足衰变时长后，经检测满足排放要求后排入医院污水管网。

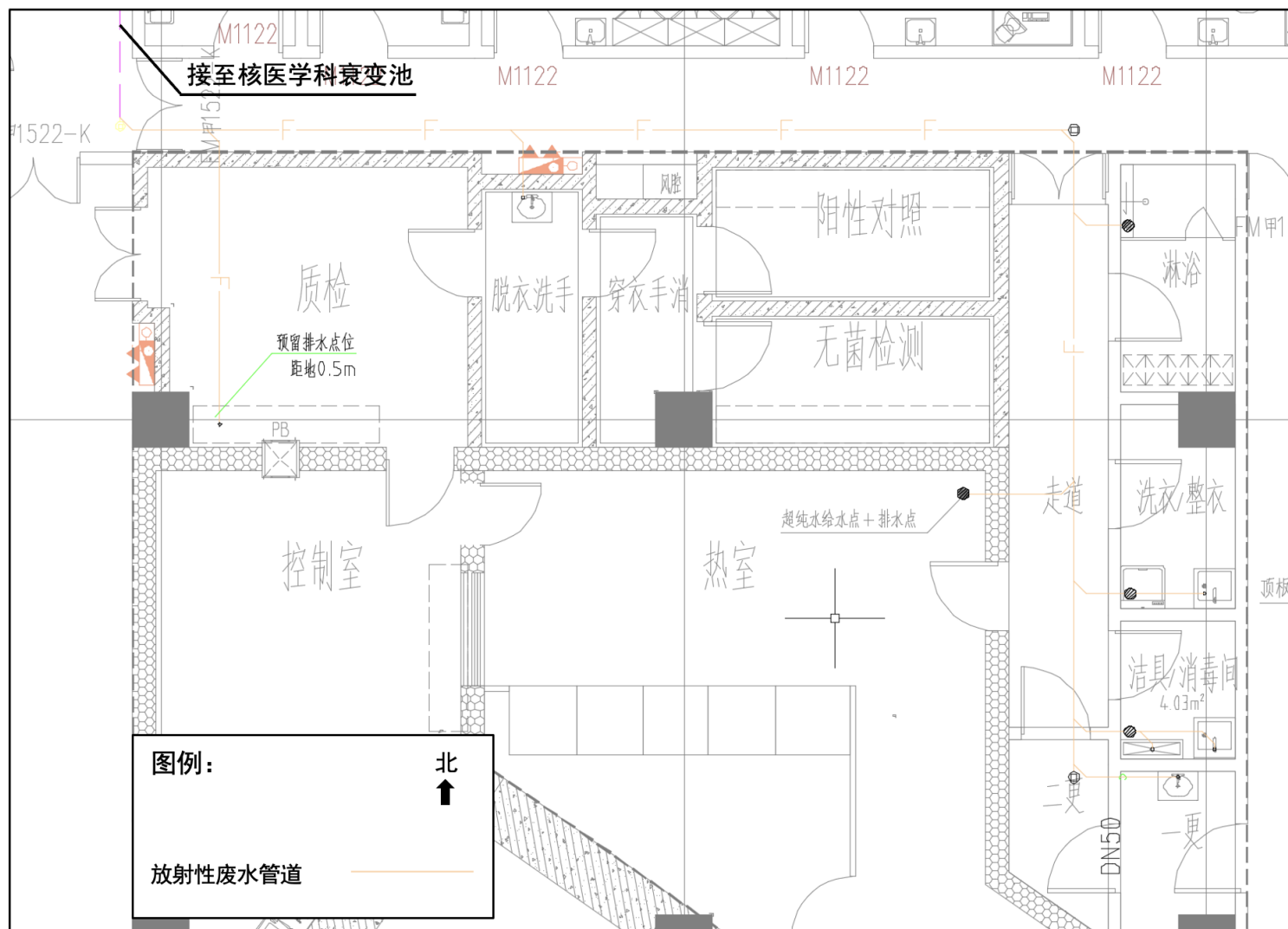


图 4-46 PET 药物制备区放射性废液管道示意图

4.5.6.3 放射性固体废物

回旋加速器运行期间产生的放射性固体废物，主要是加速器维修期间更换的废弃件，如靶膜、碳膜等，年产量不超过 1kg。上述放射性固体废物分类暂存于加速器机房下沉式废物坑，四周为混凝土，顶部为不锈钢盖板，长×宽×高=1m×1m×0.8m。经检测满足解控标准后按一般废物处理，不满足解控标准的委托有资质单位处理。

PET 药物制备区产生的放射性固体废物主要包括药物分装和分装过程中产生的：极少量的沾污放射性核素的硅胶、滤膜及过滤柱等；少量操作手套、口罩、棉签等，单批次产量约 0.1kg，年产量约 25kg。热室操作区及质控室均配备 2 个放射性废物桶，暂存时长满足最长核素十个半衰期，经检测满足清洁解控水平后，按一般固体废物处理。另，放射性废气处理系统定期更换的废活性炭过滤滤芯，暂存于核医学放射性废物间。

4.6 核医学科

4.6.1 辐射工作场所分区

核医学辐射工作场所分区具体如下，具体分区布局见图 4-47。

(1) 控制区，包括储源间、放射性废物间、分装/注射室、患者注射间、运动/急救室、SEPCT/CT 注射后候诊室、PCT/CT 注射后候诊室、VIP 候诊室、PET-CT 机房、SPECT-CT 机房、预留机房、SEPCT/CT 留观、PCT/CT 留观等，核医学控制区出入口安装单向门禁系统，张贴电离辐射警告标志，警示无关人员不要进入控制区或在出入口长期停留。

(2) 监督区，包括机房控制室以及控制区相邻区域。监督区设置标识。

4.6.2 人流、物流

核医学科的人流包括患者路线、医护路线，物流包括放射性药物路线、放射

性固体废物路线，人流、物流见图 4-48，具体描述如下：

（1）门诊显像患者路线

候诊大厅的患者经患者入口单向门进入控制区，经语音提示及地面导识线至专用注射窗，注射放射性药物，随后进入 SPECT/PET 注射后候诊室候诊，根据语音提示进入 SPECT/CT 或 PET/CT 机房进行扫描检查，如需留观则至留观室，之后通过门诊患者出口单向门离开。

（2）门诊治疗（ ^{89}Sr 、 ^{223}Ra ）患者路线

候诊大厅的患者经患者入口单向门进入控制区，经语音提示及地面导识线至 SPECT 注射窗口，注射含 $^{89}\text{Sr}/^{223}\text{Ra}$ 的放射性药物，注射药物后，确认用药正常后从门诊患者出口单向门离开。

（3）医护人员路线

①护士路线：护士经卫生通过间进入分装/注射室进行药物分装和注射，工作完成后进行表面污染监测，符合要求后经卫生通过间离开。

②技师路线：技师进入控制廊进行设备操作，如需摆位则通过各机房东侧防护门进入机房为患者摆位，工作结束后原路返回。

（4）放射性药物路线

外购放射性药物由送药公司人员经核医学东侧通道进入控制区，PET 药物制备区药物经其东侧过道往南送至核医学科储源间，在储源间与核医学科工作人员进行交接。考虑到放射性药物路线与医护人员有部分交叉，医院拟采取时间管理的方式，运送药物时间避开核医学接诊时间，尽量减少所运送药物对人员和环境的影响。

（5）放射性固体废物路线

暂存在放射性废物间的放射性固体废物，满足解控要求后，从放射性废物间经患者通道往北，送至同楼层西侧的医疗废物间暂存库统一处理。考虑到固体废物运输通道与患者、医护通道有部分交叉，医院拟采取时间管理的方式，避免人

员的交叉，即接诊结束，待医护人员及患者都离开后由专人负责固体废物的清运和转移。

由上可知，本项目核医学工作场所设置了患者路线、医护路线、放射性药物路线、放射性固废路线，在空间/时间上相对独立，避免了交叉，并在通道的出、入口设计了单向门禁，无关人员不得入内，患者也不能随意离开控制区，可保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射。综合考虑，本项目核医学工作场所布局及人流、物流路线基本合理。

4.6.3 布局合理性分析

本项目核医学科集中设置于医疗综合楼地下二层中部北侧，控制区北侧为医护走廊以及核医学医护办公室，南侧为电梯厅和放疗科区域，西侧为车位、机房和垃圾房等人员偶然居留场所，东侧为直线加速器机房区域，地下主要为停车场，楼上为机房，根据第五章核医学周围公众年最大受照剂量分析可知，核医学周围公众最大受照剂量可满足本项目的剂量约束值（0.1mSv/a）。

地下一层核医学控制区集中布置，控制区出入口均设置单向门禁，储源间及分装/注射室集中在一端，设置放射性废物暂存间。工作场所设有相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径，不同类型的患者开展诊断和治疗的时间错开，工作人员通道和患者通道分开，减小了给药后患者对其他人员的照射。控制区的出入口设有卫生通过间，控制区内设有给药后患者的专用卫生间。

综上，本项目核医学科布局合理。

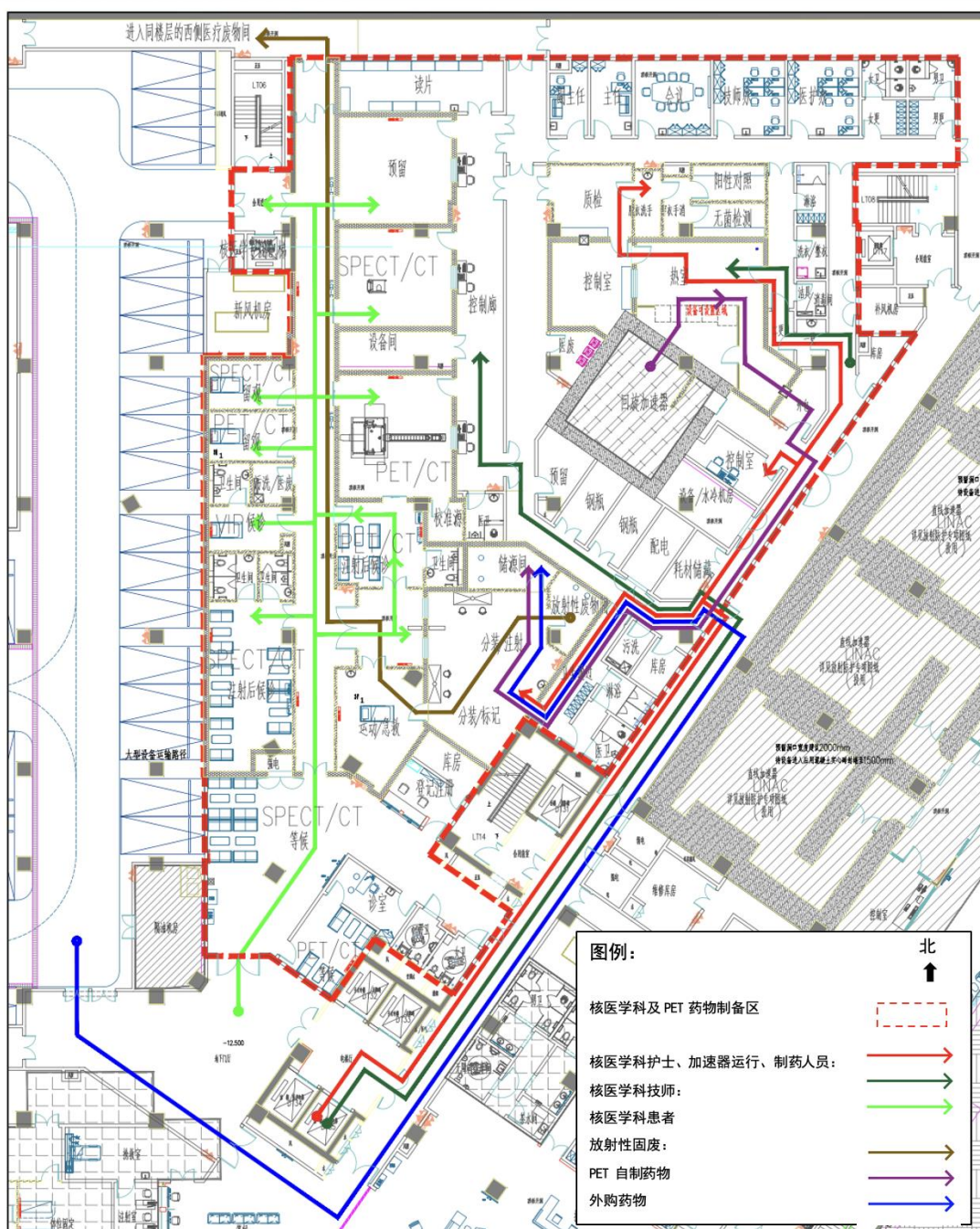


图 4-48 核医学科及 PET 药物制备区人流、物流图

4.6.4 非密封放射性物质工作场所分级、分类

4.6.4.1 非密封放射性物质工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求,按最

大工作负荷，计算出放射性同位素日等效最大操作量见表 4-20，本项目核医学科为乙级非密封放射性物质工作场所。

表 4-20 本项目核医学科非密封放射性物质工作场所分级

放射性同位素			理化性质	日最大使用量，Bq	毒性组别操作因子	状态与操作方式修正因子	日等效最大操作量，Bq	来源	存放地点
显像诊断	PET/CT	¹⁸ F	液体	9.25E+09	0.01	1（简单操作）	9.25E+07	PET 药物制备区自制	储源间
		¹¹ C	液体	1.85E+09	0.01	1（简单操作）	1.85E+07		
		¹³ N	液体	1.85E+09	0.01	1（简单操作）	1.85E+07		
		⁶⁸ Ga	液体	1.85E+09	0.01	1（简单操作）	1.85E+07		
		⁶⁴ Cu	液体	9.25E+08	0.01	1（简单操作）	9.25E+06		
		⁸⁹ Zr	液体	9.25E+08	0.1	1（简单操作）	9.25E+07		
		¹²⁴ I	液体	9.25E+08	0.1	1（简单操作）	9.25E+07	外购	
	SPECT/CT	^{99m} Tc	液体	2.22E+10	0.01	1（简单操作）	2.22E+08	发生器淋洗/外购	
		⁹⁹ Mo	悬浮液	3.70E+10	0.1	100（贮存）	3.70E+07	外购	
治疗		²²³ Ra	液体	3.70E+07	10	1（简单操作）	3.70E+08	外购	
		⁸⁹ Sr	液体	2.96E+08	0.1	1（简单操作）	2.96E+07	外购	
合计							1.00E+09	乙级	

4.6.4.2 非密封放射性物质工作场所分类

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 G 的计算方法，本项目核医学工作场所分类计算结果见表 4-21 所示。

表 4-21 核医学工作场所分类计算结果

序号	工作场所	核素	日最大操作量，MBq	毒性权重因子	操作性质修正因子	日操作量加权活度，MBq	总加权活度，MBq	分类
1	储源室	¹⁸ F	1.85E+04	1	100	1.85E+02	40349	II
		¹¹ C	1.85E+03	1	100	1.85E+01		
		¹³ N	1.85E+03	1	100	1.85E+01		
		⁶⁸ Ga	1.85E+03	1	100	1.85E+01		
		⁶⁴ Cu	9.25E+02	100	100	9.25E+02		
		⁸⁹ Zr	9.25E+02	100	100	9.25E+02		
		¹²⁴ I	9.25E+02	100	100	9.25E+02		
		⁹⁹ Mo	3.70E+04	100	100	3.70E+04		

		²²³ Ra	3.70E+01	100	100	3.70E+01		
		⁸⁹ Sr	2.96E+02	100	100	2.96E+02		
2	分装/注射室	¹⁸ F	9.25E+03	1	1	9.25E+03	4047800	I
		¹¹ C	1.85E+03	1	1	1.85E+03		
		¹³ N	1.85E+03	1	1	1.85E+03		
		⁶⁸ Ga	1.85E+03	1	1	1.85E+03		
		⁶⁴ Cu	9.25E+02	100	1	9.25E+04		
		⁸⁹ Zr	9.25E+02	100	1	9.25E+04		
		¹²⁴ I	9.25E+02	100	1	9.25E+04		
		⁹⁹ Mo	3.70E+04	100	1	3.70E+06		
		^{99m} Tc	2.22E+04	1	1	2.22E+04		
		²²³ Ra	3.70E+01	100	1	3.70E+03		
		⁸⁹ Sr	2.96E+02	100	1	2.96E+04		
3	运动急救室	¹⁸ F	3.70E+02	1	1	3.70E+02	22570	II
		^{99m} Tc	2.22E+04	1	1	2.22E+04		
4	SPECT/CT 注射后候诊室	^{99m} Tc	2.22E+04	1	10	2.22E+03	2220	II
5	PCT/CT 注射后候诊室	¹⁸ F	9.25E+03	1	10	9.25E+02	29230	II
		¹¹ C	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		¹³ N	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		⁶⁸ Ga	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		⁶⁴ Cu	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		⁸⁹ Zr	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		¹²⁴ I	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
6	Vip 候诊	¹⁸ F	9.25E+03	1	10	9.25E+02	29230	II
		¹¹ C	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		¹³ N	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		⁶⁸ Ga	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		⁶⁴ Cu	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		⁸⁹ Zr	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		¹²⁴ I	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
7	PET-CT 机房	¹⁸ F	9.25E+03	1	10	9.25E+02	29230	II
		¹¹ C	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		¹³ N	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		⁶⁸ Ga	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		⁶⁴ Cu	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		⁸⁹ Zr	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		¹²⁴ I	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
8	PCT/CT 留观	¹⁸ F	9.25E+03	1	10	9.25E+02	29230	II
		¹¹ C	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		¹³ N	1.85E+03	1	10	1.85E+02		

		⁶⁸ Ga	1.85E+03	1	10	1.85E+02		
		⁶⁴ Cu	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		⁸⁹ Zr	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
		¹²⁴ I	9.25E+02	100	10	9.25E+03		
9	SPECT-CT 机房	^{99m} Tc	2.22E+04	1	10	2.22E+03	2220	II
10	SEPCT/CT 留观	^{99m} Tc	2.22E+04	1	10	2.22E+03	2220	II

本项目核医学工作场所含有 **I、II 类** 工作场所。场所需满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中对不同类别核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求，见表 4-22 所示。

表 4-22 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求

种类	分类	
	I	II
结构屏蔽	需要	需要
地面	与墙壁接缝无缝隙	与墙壁接缝无缝隙
表面	易清洗	易清洗
分装柜	需要	需要
通风	特殊的强制通风	良好通风
管道	特殊的管道	普通管道
盥洗与去污	洗手盆和去污设备	洗手盆和去污设备

4.6.5 辐射屏蔽设计方案

核医学科控制区内各房间墙体、辐射防护设备的辐射屏蔽设计具体见表 4-23，其中混凝土密度不小于 2.35g/cm³，实心砖密度不小于 2.1g/cm³，铅板密度不小于 11.3g/cm³。

表 4-23 核医学科区域辐射屏蔽设计

场所名称	屏蔽防护设计方案		
	墙体设计方案	楼板（顶棚/地坪）设计方案	防护门、窗等设计方案
分装/注射室	与储源间、放射性废物间隔墙：240mm 混凝土实心砖； 与 LT14 隔墙：400mm 混凝土； 其余墙体：370mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	与卫生通过间隔墙防护门：8mmPb 铅板 与运动/急救隔墙防护门：15mmPb 与放射性废物间/储源间隔

场所名称	屏蔽防护设计方案		
	墙体设计方案	楼板（顶棚/地坪）设计方案	防护门、窗等设计方案
			墙防护门：8mmPb PET 注射窗：50mmPb SPECT 注射窗：6mmPb
患者接种窗口	与分装/标记/注射室隔墙：370mm 混凝土实心砖 其余墙体：240mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土(左下角局部 130)	/
储源间	与分装/标记/注射室、放射性废物间隔墙：240mm 混凝土实心砖； 其余墙体：370mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	防护门：4mmPb
放射性废物间	与分装/标记/注射室、储源间隔墙：240mm 混凝土实心砖； 其余墙体：370mm 混凝土实心砖	底板 130mm 混凝土 顶板 180mm 混凝土	防护门：4mmPb
运动/急救	与分装/标记/注射、库房、登记注册、SPECT 注射前等候隔墙：370mm 混凝土实心砖； 其余墙体：240mm 混凝土实心砖	底板 130mm 混凝土 顶板 300mm 混凝土	北侧防护门：15mmPb 东侧防护门：15mmPb
SPECT /CT 注射后候诊	东、北墙：240mm 混凝土实心砖； 西、南墙：370mm 混凝土实心砖； 与卫生间隔墙：240mm 混凝土实心砖	底板 130mm 混凝土 顶板 300mm 混凝土	防护门：3mmPb
PET/CT 注射后候诊	东、北墙：370mm 混凝土实心砖； 西、南墙（与患者注射隔墙）：240mm 混凝土实心砖； 南墙（与分装/标记、注射隔墙）：370mm 混凝土实心砖； 与卫生间隔墙：240mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	防护门（3 扇）：15mmPb
VIP 候诊	西墙：370mm 混凝土实心砖； 其余墙体：240mm 混凝土实心砖； 与卫生间隔墙：240mm 混凝土实心砖	底板 300mm 混凝土 顶板 300mm 混凝土	防护门：8mmPb
PET/CT 机房	四周墙体：370mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	工作人员防护门：10mmPb； 西墙受检者防护门：8mmPb； 南墙受检者防护门：15mmPb； 观察窗：10mmPb 铅玻璃
校准源室	东墙：240mm 混凝土实心砖； 其余墙体：370mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	防护门：8mmPb
PET/CT 留观室	西墙：370mm 混凝土实心砖； 其余墙体：240mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	防护门：8mmPb

场所名称	屏蔽防护设计方案		
	墙体设计方案	楼板（顶棚/地坪）设计方案	防护门、窗等设计方案
SPECT/CT 留观室	东、南墙：240mm 混凝土实心砖； 西、北墙：370mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	防护门：3mmPb
SPECT/CT 机房	四周墙体：370mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	工作人员防护门： 3mmPb； 受检者防护门：3mmPb； 观察窗：3mmPb 铅玻璃
预留机房	四周墙体：370mm 混凝土实心砖	顶板 300mm 混凝土 底板 300mm 混凝土	防护门/窗：/
受检者走廊	受检者出/入口门所在墙体、与读片室/设备间/LT06/DT16 隔墙、北侧常闭门、新风机房所在墙体：370mm 混凝土实心砖	底板 130mm 混凝土 顶板 300mm 混凝土	出入口门、北侧常闭门： 8mmPb

4.6.6 SPECT-CT、PET-CT 机房设计方案

SPECT-CT、PET-CT 机房尺寸和标准要求见表 4-24。

表 4-24 SPECT-CT、PET-CT 机房尺寸对标

设备名称	机房设计尺寸		标准要求		是否达标
	有效使用面积，m ²	最小单边长度，m	有效使用面积，m ²	最小单边长度，m	
PET-CT	56	7	≥30	≥4.5	是
SPECT-CT	42	6	≥30	≥4.5	是

本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 机房四周墙体、顶板、底板、防护门和观察窗采取的辐射屏蔽措施均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）给出的 2.5mm 铅当量防护要求，最小单边长度及最小有效使用面积均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）要求。

4.6.7 辐射安全防护措施

①PET/CT、SPECT/CT 机房门外设置电离辐射警告标志，机房门上方设置工作状态指示灯，灯箱上设置警示标语，设置联锁装置；候诊区设置放射防护注意事项告知栏。

②PET/CT 机房及 SPECT/CT 机房与控制室之间、控制室和候诊区之间设置视频监控和对讲系统，患者通道、候诊室、留观室等处设置视频监控系统，便于观察和管理患者活动。

③PET/CT 机房及 SPECT/CT 机房的电动推拉门设置防夹装置，平开机房门设有自动闭门装置。

④PET/CT 机房及 SPECT/CT 机房为受检者提供铅橡胶性腺防护围裙或方巾、铅橡胶颈套等个人防护用品。

⑤放射性表面污染控制措施：核医学科控制区各房间及患者走廊地面等处铺装硬质无缝 PVC 地板革，墙面装防水易清洁装饰层，便于去污。放射性药物操作台面采用易去污材料（如不锈钢板），配置托盘、吸水纸等物品。分装柜/通风橱工作台面选用表面光洁、耐腐蚀、防渗漏、易去污的材料。

⑥储源间安装视频监控和报警系统，实行“双人双锁”管理，严防放射性药物丢失。

⑦核医学科配备辐射监测仪、表面污染检测仪以及个人剂量报警仪，用于表面污染和剂量率水平的检测。

⑧医院拟配个人防护用品和应急及去污用品，医院拟配置的个人防护用品和应急及去污用品见表 4-25。

表 4-25 个人防护用品和应急及去污用品配置一览表

序号	防护用品名称	使用场所	数量	铅当量/mmPb
1	储源箱	储源室	1 个	10
2	手套箱	分装质控	1 个	50
3	手套箱	分装质控	1 个	20
4	PET 注射防护台	PET 注射室	1 个	50
5	PET 注射防护套	PET 注射室	若干	10
6	SPECT 注射防护台	SPECT 注射室	1 个	6
7	SPECT 注射防护套	SPECT 注射室	若干	6
8	废物桶（1L）	分装/注射室	2 个	10
9	废物桶（60L）	放射性废物间	6 个	10
10	口罩、手套、帽子、吸水滤纸、纱	分装质控、注射室	若干	/

	布等一次性用品			
11	应急及去污用品（一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂、电离辐射标志及其他工具等）	卫生通过间	若干	/

4.6.8 放射性三废产生及管理

4.6.8.1 放射性废气

4.6.8.1.1 来源

核医学的放射性废气主要来自放射性药物分装、注射过程中挥发出的少量含放射性物质的气溶胶。

4.6.8.1.2 处理措施

本项目核医学科设置独立的通风系统，总计 3 套排风系统，详见图 4-49。

第一套排风系统服务区域包括：分装/注射、放射性废物间、储源间、运动/急救、校准源、SPECT/CT 注射后候诊、PET/CT 注射后候诊及配套卫生间、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、预留机房、SPECT/CT 留观、PET/CT 留观及配套卫生间、污洗、VIP 候诊及配套卫生间、患者走廊。上述房间放射性废气汇集后经由核医学西南侧排风井，升至医疗综合楼屋顶排气口，经活性炭过滤后排放；

第二、三套排风系统为分装/注射室内手套箱，风速不小于 0.5m/s，放射性废气经由核医学南侧排风井，升至南区住院楼屋面排气口，经活性炭过滤后排放；

本项目核医学科各套排风系统设置止回阀，控制区内各工作场所之前保持各区之间的压差，防止放射性废气以及气溶胶工作场所造成交叉污染，用于分装放射药物的工作箱设置独立的排风管道且安装活性炭过滤装置，放射性废物间设置排气口，排风系统各排气口高于所在建筑屋顶，放射性废气均经活性炭过滤后排放。综上，核医学的通风设计基本满足相关标准要求。

4.6.8.2 放射性废液

4.6.8.2.1 来源

核医学的放射性废液主要来自门诊显像患者的排泄物，控制区场所清洁用水和医护人员的清洁用水等，另，PET 药物制备区放射性废液也排入核医学科衰变池，放射性废液的排放量具体见表 4-26。

表 4-26 核医学科及 PET 药物制备区放射性废水排放量

用水类别	用水定额	用水规模	日用水量 (L/d)	日排放量 (L/d)	年排放量 (m ³ /a)	去向
门诊患者	6L/人	65 人次/d	390	390	97.5	核医学科 衰变池
门诊区域清洁用水	100L/次	2 次/d	200	200	50	
护士清洁用水	100L/人班	2 人班/d	200	200	50	
PET 药物制备区工作人员清洁用水	100L/人班	2 人班/d	200	200	50	
PET 药物制备区其他放射性废水	100L/次	1 次/d	100	100	25	
合计			1090	1090	273	
注：（1）用水定额参照《建筑给排水设计规范》（GB50015-2019），并类比同类型医院考虑； （2）年有效工作时间按 250 天计。						

4.6.8.2.2 处理措施

本项目核医学科设置 1 套地下衰变池，位于医疗综合楼地下三层北侧。核医学放射性废液管道走向见图 4-50。

门诊区域患者排泄废水、清洁用水、护士清洁用水、PET 药物制备区工作人员清洁用水及其他放射性废水经专用管道接至污水提升设备，放射性废液提升至衰变池，放射性废液排水管道外包 3mmPb。衰变池前端设有化粪池，按四格并联槽式衰变罐设计，分为 1#、2#、3#和 4#，每个衰变罐为不锈钢材质，有效容积为 18 立方米。衰变池机房四周整体采用混凝土浇筑，人员可达处墙体（东、南、西）均为 200mm 混凝土+10mmPb，北侧墙体为 200mm 混凝土，顶部为 300mm 混凝土+10mmPb，防护门为 15mmPb。每格衰变罐设置检修口，出口设置取样点。正常工

作时，废液先排至化粪池，化粪池设有切割式潜水泵，待废液累积到设定水位时，由潜水泵将废水泵入 1#衰变罐。当 1#衰变罐的液位达到报警液位后，1#衰变罐的进水阀门关闭，废水排入 2#衰变罐，总计 4 个衰变罐，依次类推，当最后一格衰变罐续满废液前，对 1#衰变罐的放射性废液进行监测，达到排放标准后排入医院污水管网。

根据 HJ 1188-2021 的规定，对于槽式衰变池贮存方式，所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放，所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期，监测结果经审管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。本项目核医学科门诊显像使用的放射性核素主要包括 ^{99m}Tc 、 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 和 ^{124}I ，其中 ^{99m}Tc 、 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 和 ^{64}Cu 半衰期均小于 24 小时， ^{89}Zr 和 ^{124}I 半衰期分别为 3.25 天和 4.17 天，最长十个半衰期约 42 天。根据表 4-26 放射性废液每日排放量为 1.09m^3 ，衰变罐 1#单格有效容积为 18m^3 ，待第二格衰变池蓄满时，第一格衰变池放射性废液已暂存 17 个工作日，待第四格衰变罐蓄满时，第一格衰变池放射性废液已暂存约 50 个工作日，满足放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（ ^{124}I ，42 天），医院规定放射性废液排放前进行监测，放射性废液总 α 不大于 1Bq/L ，总 β 不大于 10Bq/L ，监测结果经审管部门认可后方可排放至医院污水管网。

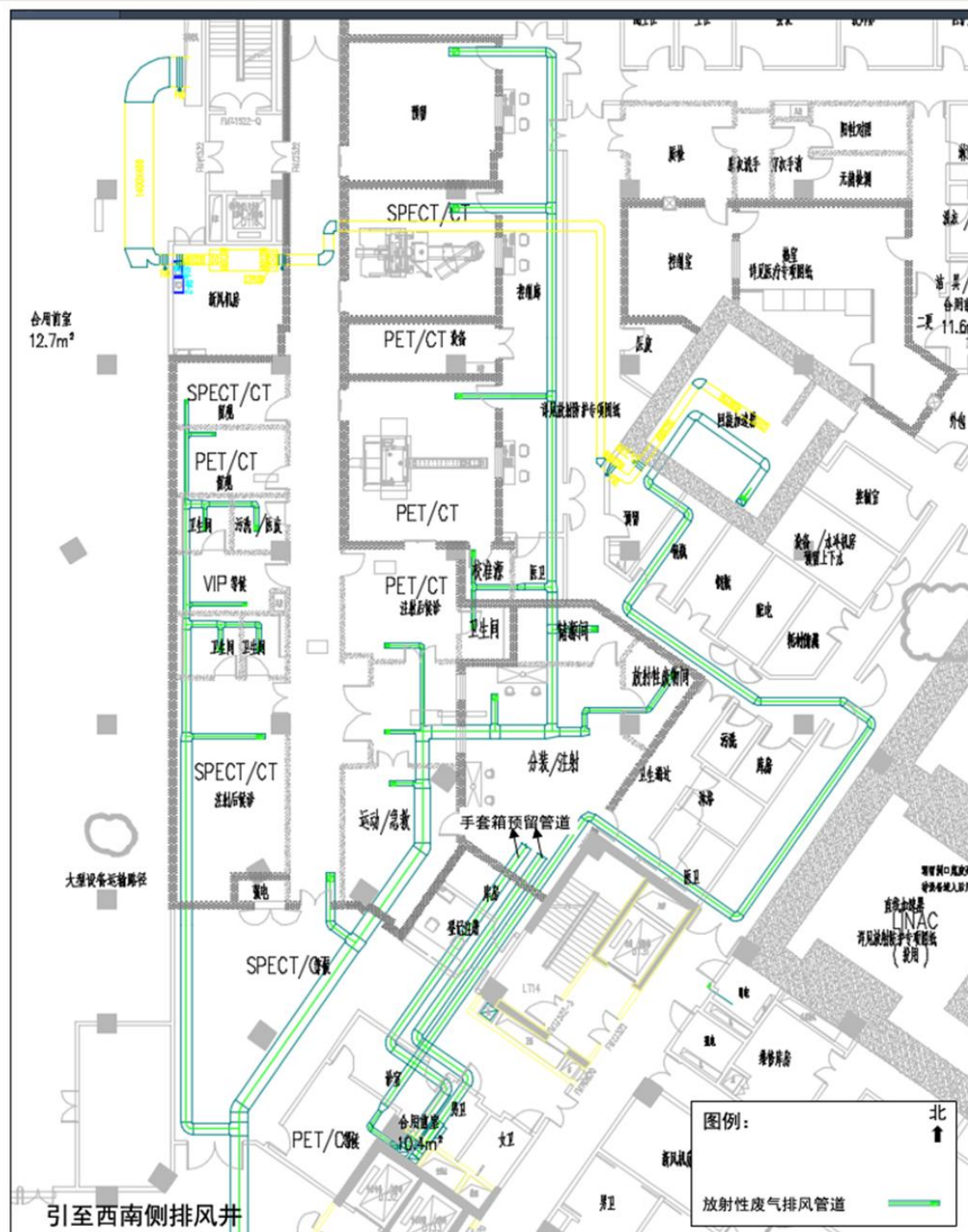


图 4-49 核医学科排风管道示意图

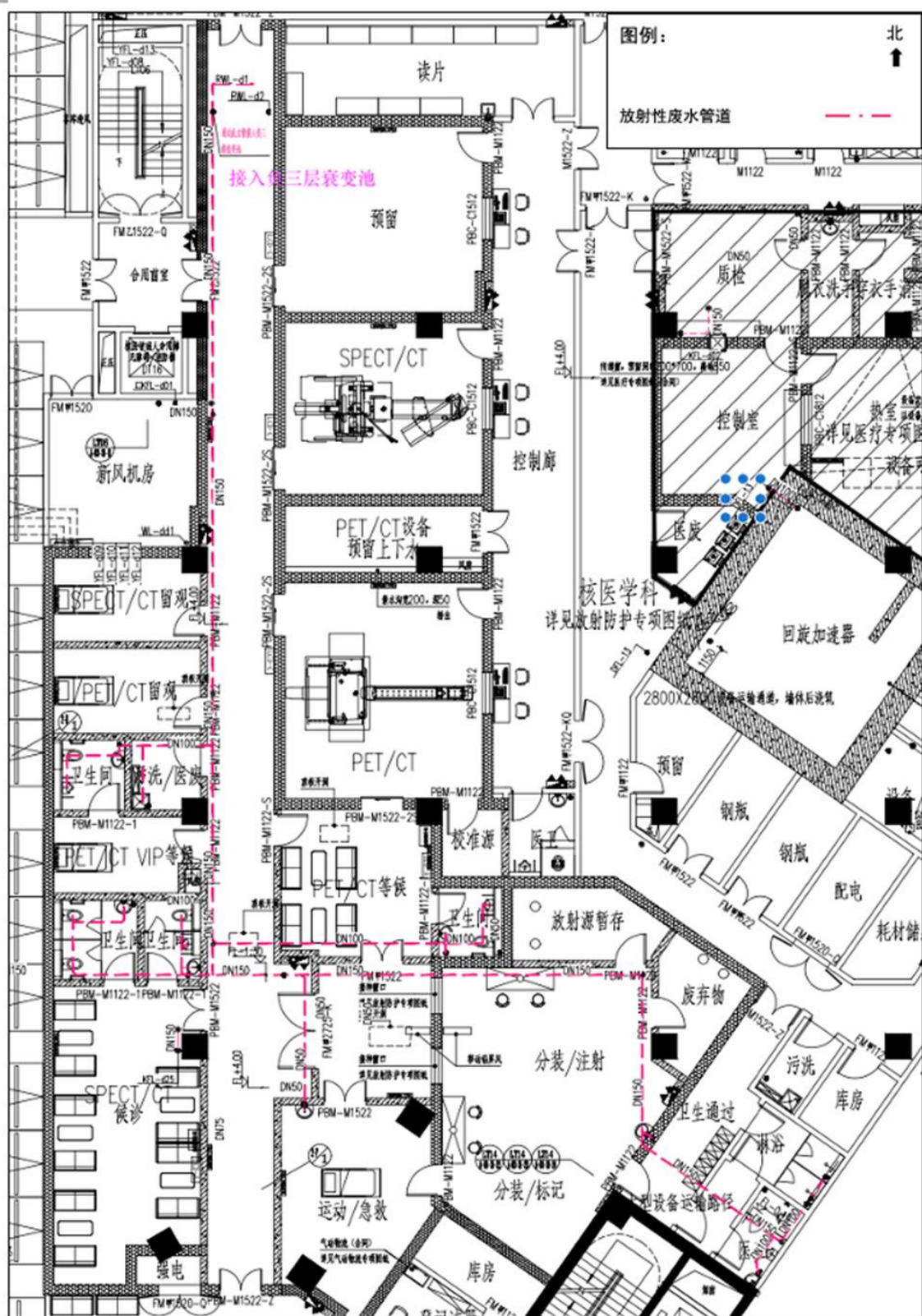


图 4-50 核医学放射性废水管道示意图

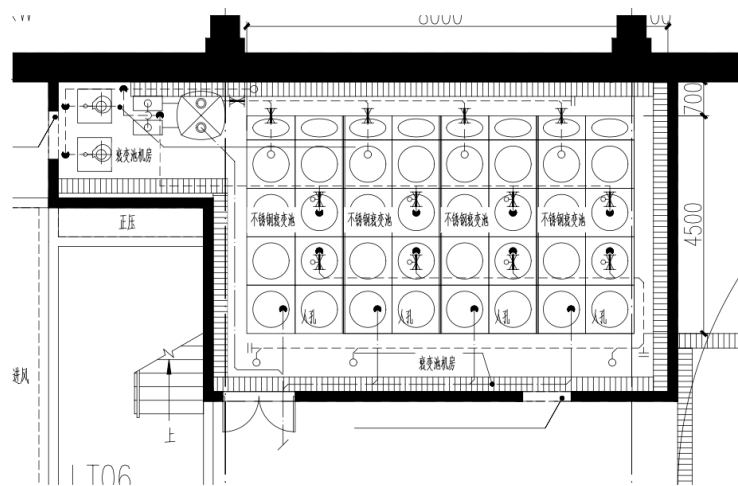
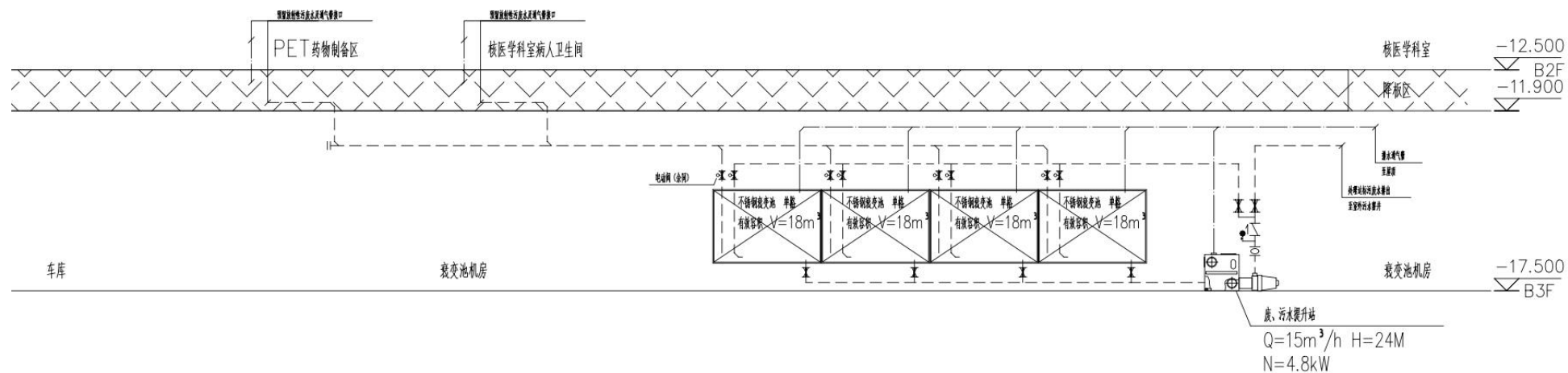


图 4-51 核医学科衰变池设计图纸

4.6.8.3 放射性固体废物

4.6.8.3.1 来源

放射性固体废物主要来自：①门诊区域产生的、注射器、针管、针头、手套、擦拭巾、药瓶等；②废活性炭滤芯，上述放射性固体废物预计产生量具体见表 4-27。

表 4-27 核医学放射性固体废物产生量

来源	废物类型	产污系数	数量	年产生量	处理方式
门诊患者	针头、手套、药瓶、擦拭巾等	50 g/人次	17750 人次/年	888kg/a	先按核素、收储日期分类暂存在放射性废物间，满足解控水平经解控后按一般医疗废物处理。
通风系统	废活性炭滤芯	1kg/套	5 套	5kg/a	暂存于放射性废物间，满足解控水平经解控后按一般废物处理。

4.6.8.3.2 处理措施

放射性固体废物收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶中。废物桶内放置专用塑料袋直接收纳废物。若含尖刺及棱角的放射性废物，将预先进行包装处理，再装入废物桶，防止刺破废物袋。放射性废物每袋重量不超过 20kg。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至对应放射性废物间暂存。放射性废物间均设置排气口，门口设置电离辐射警告标志。放射性废物间均设置若干废物桶盛放固体放射性废物，不同类别废物分类存放。容器表面需注明废物所含核素的名称、废物的类别、入库日期等信息，并做好登记记录。

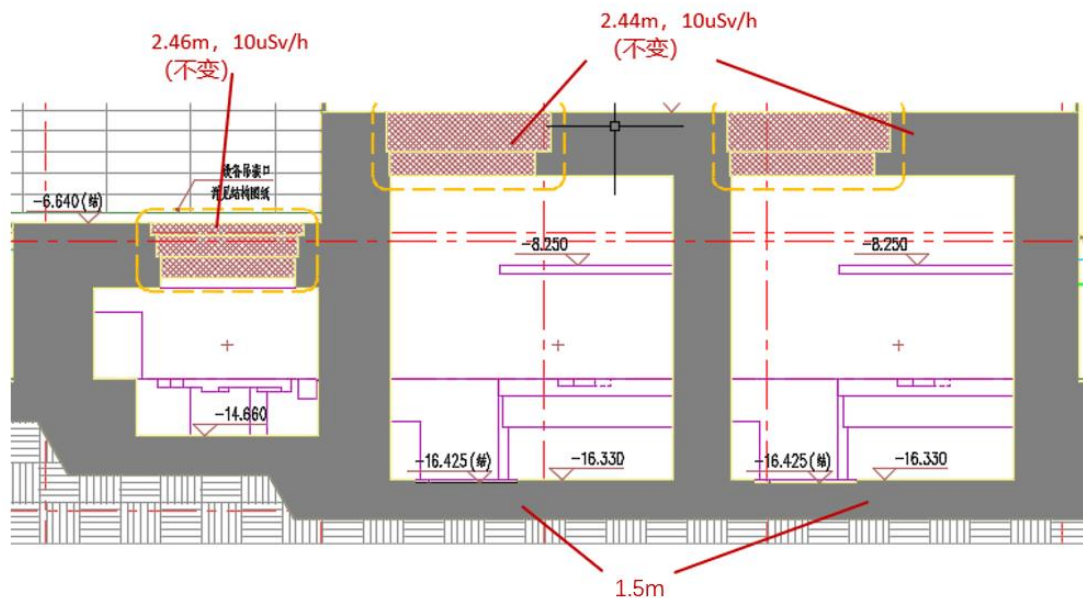


图 5-2 质子治疗中心模拟计算剖面模型图

5.1.1.1.2 关注点设置

根据质子治疗机房的平面布局及周围环境情况设置了关注点，关注点周围环境及剂量率控制水平见表 5-1，各关注点的位置示意图见图 5-3~图 5-5。

表 5-1 质子治疗系统屏蔽体外关注点及其剂量率控制水平

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	H _c , μSv/h
回旋加速器大厅及束流输运线	A1	回旋加速器大厅迷道口外走道	10.00
	A2	SSA 机房	2.44
	A3	储藏间	2.44
	A4	治疗室 1 机架区北侧	4.88
	A5	治疗室 1 机架区南侧	4.88
	A6	楼梯	4.88
	A7	电梯	4.88
	A8	弱电间	2.44
	A9	排烟机房	2.44
	A10	结构预留连通口	10.00
	A11	束流输运线东北屏蔽墙外土壤	5000
	A12	束流输运线迷道口外走道	1.22
	A13	主控室	2.44
	A14	不上人屋面	100
	A15	土壤	5000
	A16	不上人屋面	100

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	H _c , μSv/h
	A17	土壤	5000
治疗室 1	B1	治疗控制室 1	2.50
	B2	治疗室 1 迷道口外走道	10.00
	B3	走道	1.22
	B4	治疗室 2 治疗区	9.76
	B5	治疗室 2 机架区	9.76
	B6	质子候诊区	0.24
	B7	剂量验证设备存储室	4.88
	B8	不上人屋面	100
	B9	土壤	5000
治疗室 2	C1	治疗控制室 2	2.50
	C2	治疗室 2 迷道口外走道	10.00
	C3	患者固定装置存储房间	10.00
	C4	患者治疗设备存储房间	10.00
	C5	楼梯	9.76
	C6	电梯	9.76
	C7	走道	1.22
	C8	服务台/接待	0.24
	C9	治疗室 1 机架区	9.76
	C10	治疗室 1 治疗区	9.76
	C11	不上人屋面	100
	C12	土壤	5000

备注：

1. 根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5mSv/h”作为各辐射工作场所地下区域屏蔽体外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。
2. 根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），对于不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房外表面 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）。

图 5-3 地下二层质子治疗装置关注点分布示意图

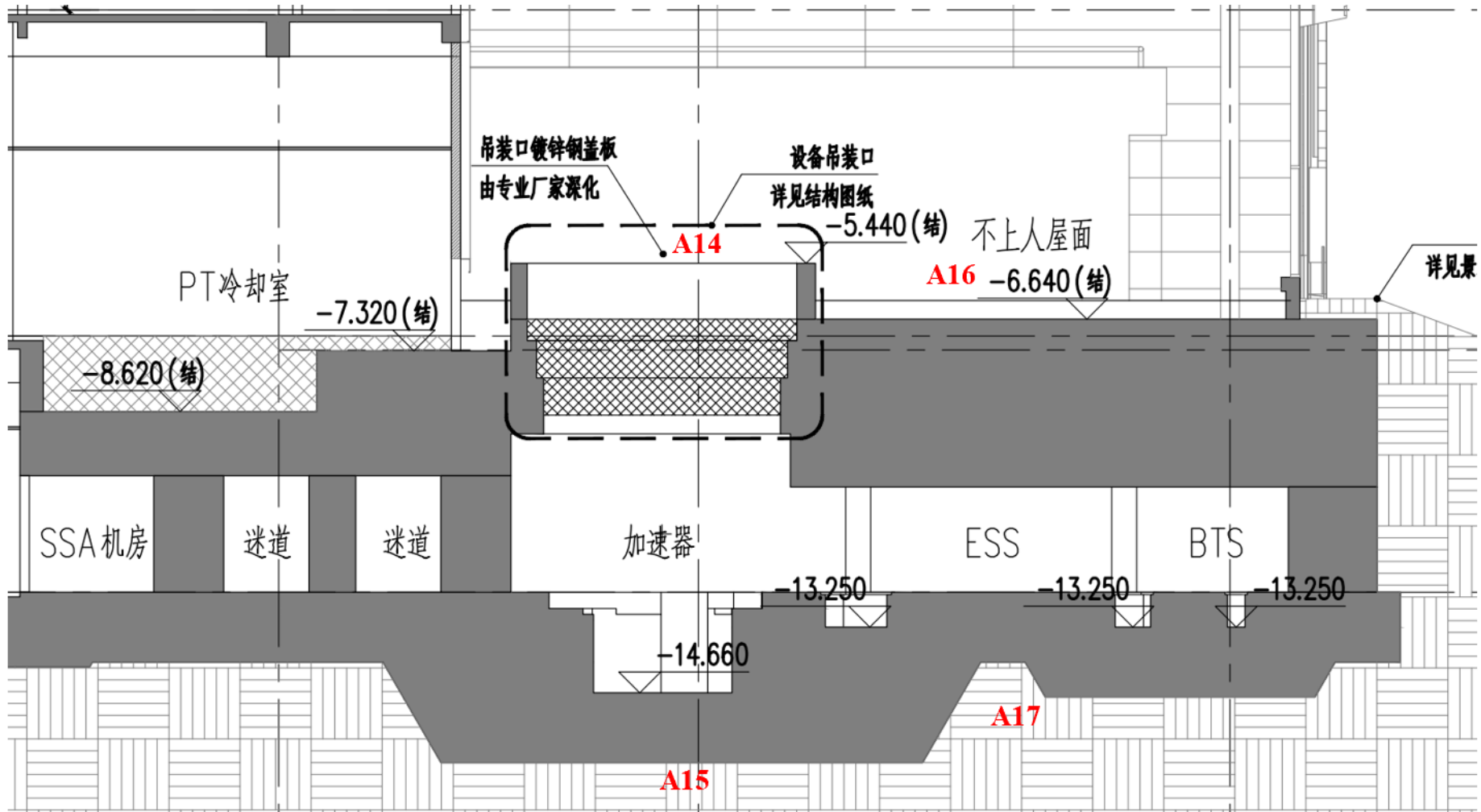


图 5-4 质子治疗装置剖面关注点分布示意图

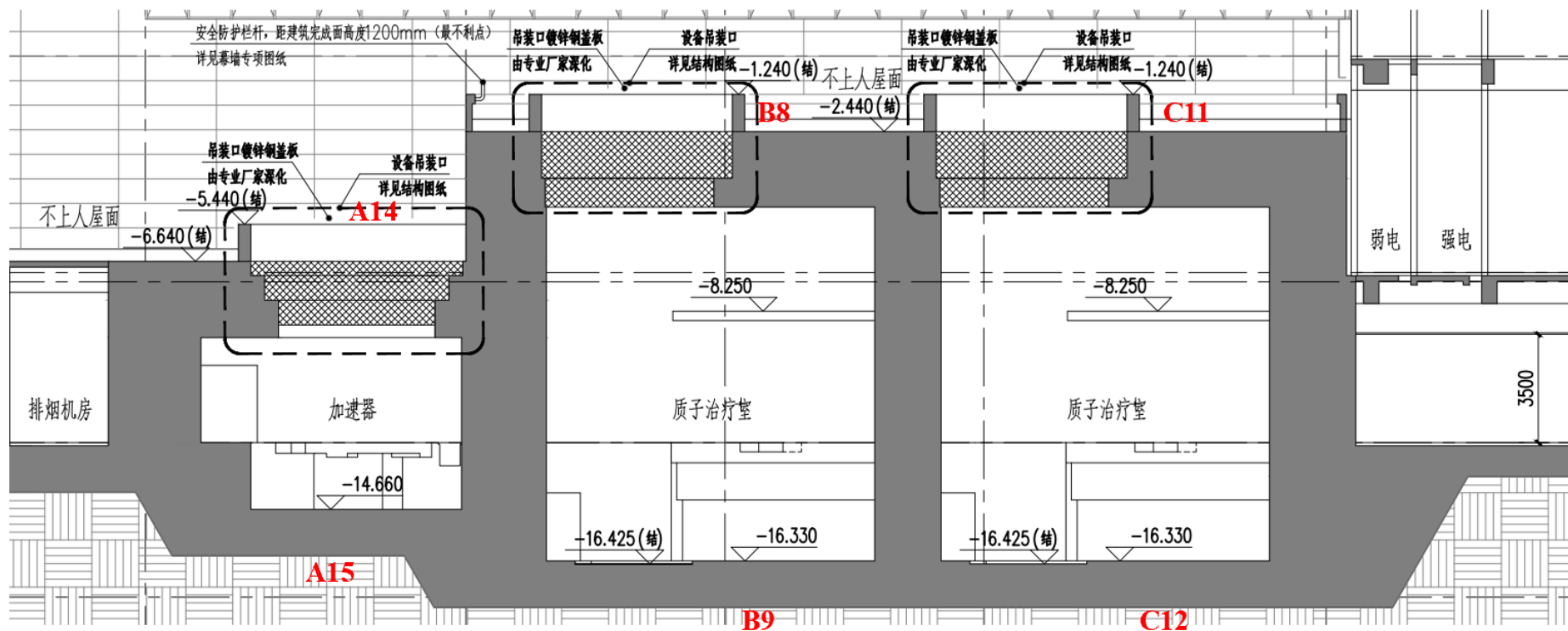


图 5-5 质子治疗装置剖面关注点分布示意图

5.1.1.1.3 计算结果

根据 FLUKA 程序的计算结果，将质子治疗系统屏蔽体外各关注点处的剂量率计算结果汇总如表 5-2，模拟得到的剂量率分布图见图 5-6~图 5-13。

表 5-2 质子治疗装置屏蔽体外关注点剂量率模拟计算结果汇总

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	H _c , μSv/h	计算结果, μSv/h
回旋加速器大厅及束流输运线	A1	回旋加速器大厅迷道口外走道	10.00	0.79
	A2	SSA 机房	2.44	1.45
	A3	储藏间	2.44	2.07
	A4	治疗室 1 机架区北侧	4.88	4.83
	A5	治疗室 1 机架区南侧	4.88	1.77
	A6	楼梯	4.88	1.24
	A7	电梯	4.88	2.04
	A8	弱电间	2.44	1.56
	A9	排烟机房	2.44	1.49
	A10	结构预留连通口	10.00	2.31
	A11	束流输运线东北屏蔽墙外土壤	5000	15.84
	A12	束流输运线迷道口外走道	1.22	1.20
	A13	主控室	2.44	0.16
	A14	不上人屋面	100	2.07
	A15	土壤	5000	17.5
	A16	不上人屋面	100	4.94
	A17	土壤	5000	970
治疗室 1	B1	治疗控制室 1	2.50	1.26
	B2	治疗室 1 迷道口外走道	10.00	1.03
	B3	走道	1.22	1.12
	B4	治疗室 2 治疗区	9.76	0.64
	B5	治疗室 2 机架区	9.76	9.6
	B6	质子候诊区	0.24	0.04
	B7	剂量验证设备存储室	4.88	0.23
	B8	不上人屋面	100	0.62
	B9	土壤	5000	30
治疗室 2	C1	治疗控制室 2	2.50	1.23
	C2	治疗室 2 迷道口外走道	10.00	0.97
	C3	患者固定装置存储房间	10.00	1.92
	C4	患者治疗设备存储房间	10.00	0.24
	C5	楼梯	9.76	0.13

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	H_c , $\mu\text{Sv/h}$	计算结果, $\mu\text{Sv/h}$
	C6	电梯	9.76	0.41
	C7	走道	1.22	1.16
	C8	服务台/接待	0.24	0.02
	C9	治疗室 1 机架区	9.76	1.42
	C10	治疗室 1 治疗区	9.76	5.97
	C11	不上人屋面	100	0.65
	C12	土壤	5000	27

由上表可知，质子治疗装置屏蔽体外各关注点剂量率模拟计算结果均低于其剂量率控制水平。

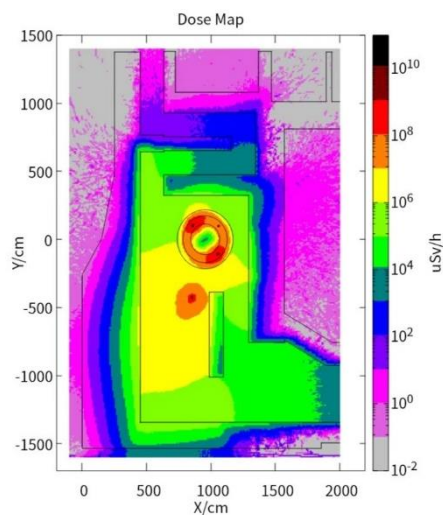


图 5-6 回旋加速器大厅剂量率分布图（平面）

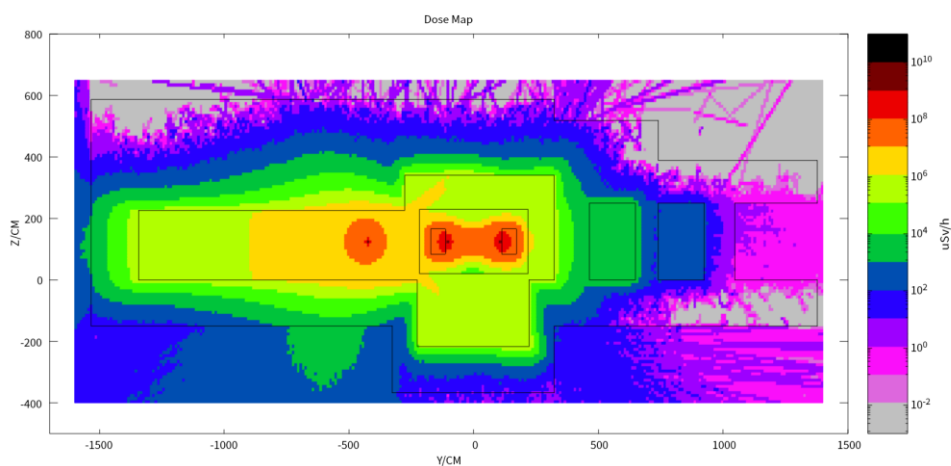


图 5-7 回旋加速器最大剂量率分布图（剖面）

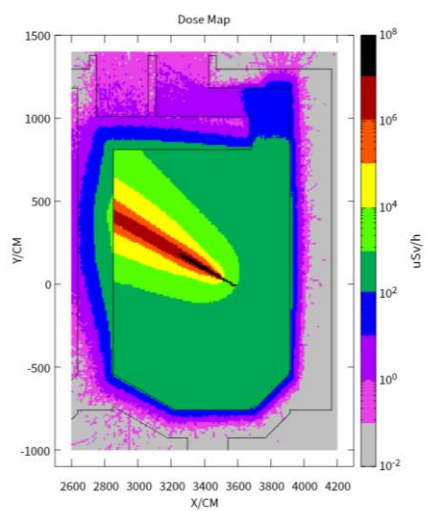


图 5-8 向左照射时治疗室 2 剂量率分布图（平面）

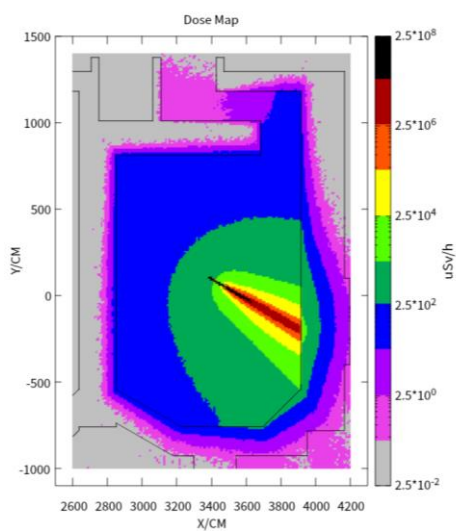


图 5-9 向右照射时治疗室 2 剂量率分布图（平面）

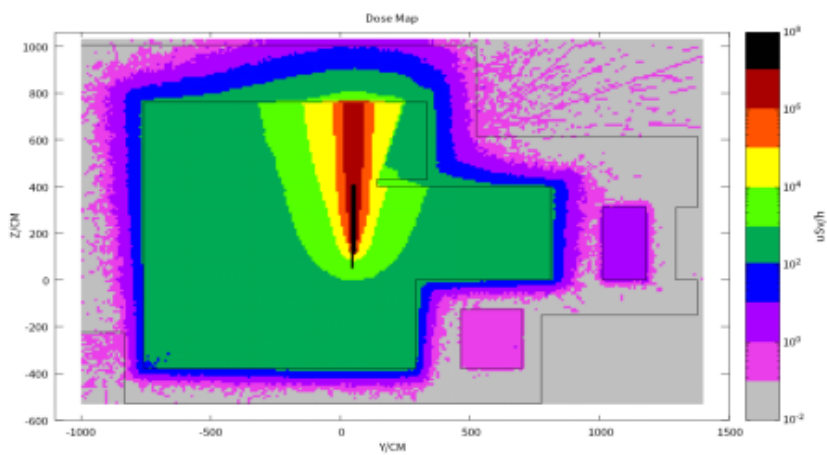


图 5-10 向上照射时治疗室剂量率分布图（剖面）

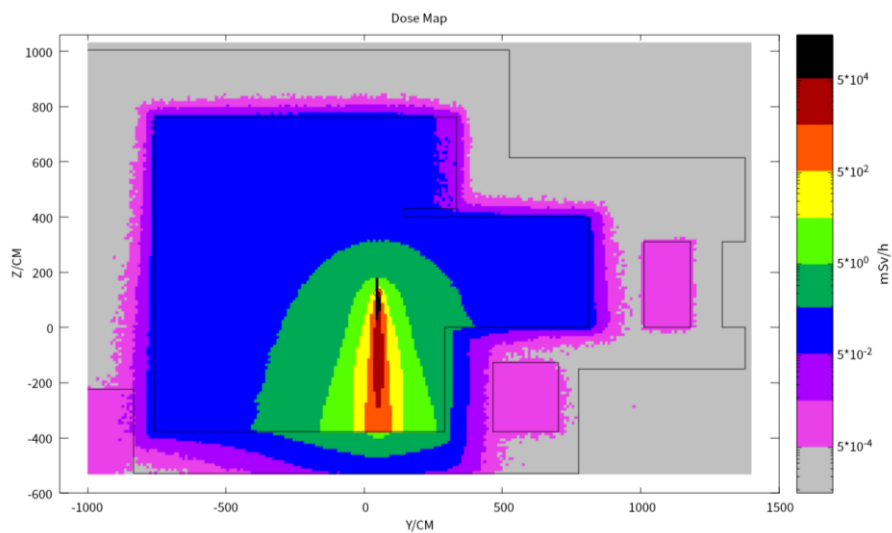


图 5-11 向下照射时治疗室剂量率分布图（剖面）

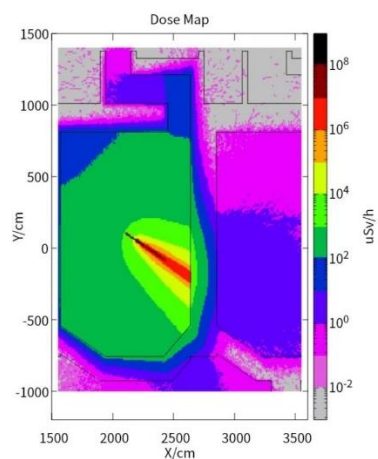


图 5-12 向右照射时治疗室 1 剂量率分布图（平面）

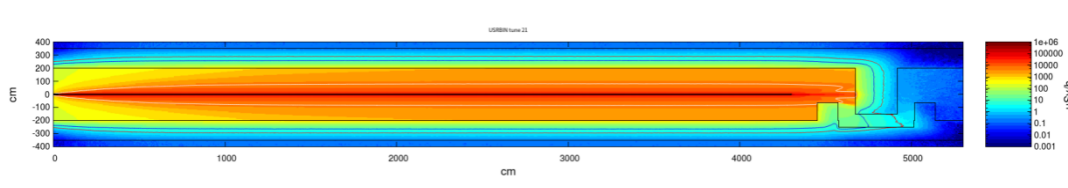


图 5-13 束流输运线走廊剂量率分布图（平面）

5.1.1.2 工作人员受照剂量估算

本项目质子治疗系统的工作人员主要包括质子治疗科室医生、物理师、治疗技师、维修工程师，如表 3-6 所示。质子治疗系统正常运行期间，对辐射工作人

员的辐射影响主要来自装置开机出束以及治疗室出束治疗时产生的瞬发辐射照射。
X- γ 射线产生的外照射剂量可按下式计算。

$$H = \dot{H} \times T \times t \quad (\text{公式 5-1})$$

式中，
 H 为外照射所致人员年有效剂量，mSv/a；
 $\dot{H}$ 为关注点剂量率，mSv/h；
 T 为居留因子；
 t 为年受照时间，h/a。

5.1.1.2.1 医生

质子治疗科室医生的工作地点主要在医生办公室内，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内部，平均每名医生在治疗室内部的工作时间不会超过 30h/年，则质子科室医生年受照剂量估算结果列于表 5-3。

表 5-3 质子科室医生年受照剂量估算结果

工作区域	辐射来源	剂量率水平 ¹ ， mSv/h	年受照时间，h	受照剂量， mSv/a
医生办公室	瞬发辐射	4.00E-05	2098	8.39E-02
治疗室	相邻治疗室瞬发辐射	5.97E-03	30	1.79E-01
	患者感生放射性	2.74E-02		8.22E-01
总计	——	——	2128	1.09E+00
注：1. 医生办公室位于重离子质子治疗楼的地上三层，与质子治疗装置距离较远，计算时保守取质子候诊区的剂量率值进行计算，即“B6”的值；瞬发辐射保守取表 5-2 中相关关注点的较高值进行计算；患者感生放射性保守取表 3-34 停机 1min 的数值。				

5.1.1.2.2 治疗技师

根据质子治疗的流程，治疗技师的工作内容主要包括在治疗前的模拟定位、

在控制室内操作质子治疗系统以及在治疗机房内给患者摆位并操作定位 X 射线管等工作。其受照途径主要考虑外照射。

5.1.1.2.2.1 在治疗室内进行治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用模拟 CT 对其进行治疗前的模拟定位，在治疗室内使用滑轨 CT 进行。根据表 3-5，本项目质子治疗每年总治疗人数为 768 人，保守取为 800 人。

每次模拟定位期间，按在机房内摆位 5min、在操作间内操作滑轨 CT 出束 1min 考虑，每年进行模拟定位次数为 800 次。每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目共配备 8 名治疗技师轮班，则每名治疗技师每年参与模拟定位的次数约为 200 次。由此可计算得出每名技师从事模拟定位工作期间的受照剂量，列于表 5-4。

表 5-4 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平 ¹ , mSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
治疗室内	5.97E-03	16.67	9.95E-02
操作间	2.50E-03	3.33	8.33E-03
总计	——	——	1.08E-01
注：1. 治疗室内剂量率保守取表 5-2 中相关关注点的较高值进行计算；根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h，则操作间的剂量率保守取 2.5μSv/h。			

5.1.1.2.2.2 在治疗治疗室内进行 X 射线精确定位

患者在治疗前需要利用质子治疗系统配备的 X 射线管进行精确的位置验证，此操作由治疗技师在治疗室内完成，单次工作时间约为 5min，其中 X 射线管的出束时间约为 30s。由此可计算得出每名治疗技师操作 X 射线定位的年工作量列于表 5-5 和表 5-6。

表 5-5 每名治疗技师操作 X 射线定位时受相邻治疗室照射时间

区域	单次操作 X 射线定位工作时间, min	年治疗总次数	操作 X 射线定位年总工作时间, h	每名治疗技师操作 X 射线定位年工作时间, h
治疗室内	5	23040	1920	240

表 5-6 每名治疗技师操作 X 射线定位时受 X 射线出束照射时间

区域	单次操作 X 射线定位出束时间, min	年治疗总次数	操作 X 射线定位年总出束时间, h	每名治疗技师操作 X 射线定位年受照时间, h
治疗室内	0.5	23040	192	24

由此可计算得出治疗技师在操作 X 射线定位期间的年受照剂量列于表 5-7。

表 5-7 每名治疗技师在治疗室内进行 X 射线定位工作的年受照剂量

工作区域	辐射来源	剂量率水平 ¹ , mSv/h	年受照时间 ² , h	年受照剂量, mSv/a
治疗室内	相邻治疗室瞬发辐射	5.97E-03	240	1.43E+00
	X 射线管瞬发辐射	2.50E-03	24	6.00E-02
	总计			1.49E+00

注：1. 相邻治疗室瞬发辐射保守取表 5-2 中相关关注点的较高值进行计算；
2. X 射线管控制台屏蔽体厚度为 4.6mm 铅当量，观察窗厚度为 4.6mm 铅当量，能确保控制台内剂量率水平低于 2.5μSv/h，X 射线管出束所致操作台的剂量率水平保守取 2.5μSv/h。

5.1.1.2.2.3 在治疗室内摆位/解除摆位

治疗技师在摆位期间的受照剂量来自患者治疗前摆位和治疗后解除摆位两个过程。质子治疗共配备 8 名技师，技师的工作机制为两班倒，每班次每间治疗室共 2 名技师，每名治疗技师在机房内摆位的年工作量列于表 5-8。

表 5-8 每名治疗技师在机房内摆位/解除摆位的年工作量

每年治疗前摆位次数	单次治疗前摆位时间, min	年治疗前摆位总时间, h	单次解除摆位时间, min	年解除摆位总时间, h
2880	5	240	1	48

(1) 治疗前摆位

患者每次治疗前，治疗技师在治疗室接触的是未受到照射的患者，该过程中治疗技师所在区域的瞬时剂量率主要来自相邻机房的照射，计算结果列于表 5-9。

表 5-9 每位治疗技师因患者治疗前摆位所致的年受照剂量

工作区域	辐射来源	瞬时剂量率, mSv/h	年摆位时间, h	年受照剂量, mSv/a
治疗室内	相邻机房	5.97E-03	240	1.43E+00

	瞬发辐射			
--	------	--	--	--

(2) 治疗后解除摆位

患者每次治疗结束后，治疗技师在治疗室接触的是受到了照射的患者。此时，患者自身由于受到质子束流的照射会产生感生放射性。通常情况下，患者单次治疗结束停机 5min 后，治疗技师进入治疗室内对其进行解除摆位的操作，解除摆位过程中，治疗技师与患者被照射部位的平均距离约为 0.5m。根据表 3-34 计算结果，保守取最大治疗条件 230MeV-0.47nA 连续治疗 5min、停机 5min 后距离患者 50cm 处的剂量率 8 μ Sv/h 作为每次治疗技师解除摆位时所在区域的剂量率水平，可计算得出每名治疗技师由于解除摆位所致的年受照剂量，结果列于下表。

表 5-10 每位治疗技师因患者治疗后解除摆位所致的年受照剂量

工作区域	辐射来源	瞬时剂量率, mSv/h	年解除摆位时间, h	年受照剂量, mSv/a
治疗室内	相邻机房 瞬发辐射	5.97E-03	48	2.87E-01
	患者感生 放射性	8.00E-03	48	3.84E-01
	总计			6.71E-01

5.1.1.2.2.4 在质子治疗控制室内操作系统出束

质子治疗系统共 8 名治疗技师，分为两班，每间治疗室每班 2 名。根据表 3-5，质子治疗装置每室每年治疗的总出束时间为 2128h，那么每名技师在控制室内的受照时间为 532h。则质子治疗系统出束期间，治疗技师在治疗室控制室内工作期间的受照剂量估算结果列于表 5-11。

表 5-11 治疗技师在控制室内工作期间的受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平 ¹ , mSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
控制室	1.26E-03	532	6.70E-01

注：1. 根据表 5-2，取剂量率较高的值进行计算。

5.1.1.2.2.5 治疗技师年受照剂量小结

每名治疗技师年总受照剂量计算结果列于表 5-12。

表 5-12 每位治疗技师年受照剂量汇总

工作区域	来源	年受照剂量, mSv/a
质子治疗系统	在治疗室内进行治疗前模拟定位	1.08E-01
	在质子治疗室内进行 X 射线精确定位	1.49E+00
	在质子治疗室内进行摆位	1.43E+00
	在质子治疗室内解除摆位	6.71E-01
	在质子治疗控制室内操作系统出束	6.70E-01
	总计	4.37E+00

5.1.1.2.3 物理师

物理师的受照剂量主要来自治疗计划制定、治疗计划验证和 QA 工作期间。

(1) 治疗计划制定

本项目治疗计划制定主要在计划室内（位于重离子质子治疗楼的地上二层）进行。计划室的剂量率保守取质子候诊区的剂量率值进行计算，即“B6”的值 $0.04\mu\text{Sv/h}$ ，受照时间按每天 2h、每年 500h 考虑，则每名物理师每年因在计划室内进行治疗计划受照剂量计算结果列于下表。

表 5-13 物理师进行治疗计划制定期间的年受照剂量

工作内容	剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
治疗计划制定	4E-05	500	2.00E-02

(2) 治疗计划验证

本项目共配备 8 名物理师，假设每次工作由 2 名物理师共同完成。每位患者需要物理师做一次治疗计划验证，则根据表 3-5，每年治疗计划验证总次数为 768 次，则每名物理师每年进行治疗计划验证的次数保守按 200 次计。按每次治疗计划验证期间物理师的受照剂量与每次治疗期间技师的受照剂量一致考虑，保守取表 5-11 治疗技师年受照剂量 4.37mSv 除以其年治疗次数 2880，可推知每名

物理师每次治疗计划验证的受照剂量约为 $1.52\text{E-}03\text{mSv/次}$ ，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的受照剂量计算结果列于下表。

表 5-14 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量

工作内容	单次工作受照剂量, mSv/次	年工作次数	受照剂量, mSv/a
治疗计划验证	$1.52\text{E-}04$	200	$3.04\text{E-}02$

(3) QA

QA 期间，物理师的工作地点包括机房内部和控制室。每名物理师在机房内部工作的时间按每年 125h 考虑。根据表 3-5，质子治疗系统的 QA 年总出束时间为 208h。共 8 名物理师，分两班，每次 QA 工作由 2 名物理师共同完成。则物理师 QA 工作期间的年受照剂量估算结果列于表 5-15。

表 5-15 物理师 QA 工作期间年受照剂量算结果

工作地点	剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
质子治疗机房内	$5.97\text{E-}03$	125	$7.46\text{E-}01$
控制室	$1.26\text{E-}03$	52	$6.55\text{E-}02$
总计			$8.12\text{E-}01$

(4) 小结

根据上述计算结果，可得出物理师的年受照剂量，列于表 5-16。

表 5-16 物理师的年受照剂量

工作内容	年受照剂量, mSv/a
治疗计划制定	$2.00\text{E-}02$
治疗计划验证	$3.04\text{E-}02$
QA	$8.12\text{E-}01$
总计	$8.62\text{E-}01$

5.1.1.2.4 护士

根据质子治疗流程，护士在治疗前模拟 CT 定位和治疗室内 X 射线精确定位期间，在技师操作模拟 CT 和 X 射线管定位时，根据工作需要为患者注射造影剂。

模拟 CT 定位和 X 射线管定位时，护士均进入治疗室内留针，然后在治疗室内的操作间内远程操作注射造影剂。每年的操作总次数按模拟 CT 定位和 X 射线精确定位次数的 1/10 考虑，分别为 100 次、2304 次。留针的时间按 1min/次考虑，注射造影剂的时间按 1min/次考虑。共 4 名护士，则每名护士的年受照剂量计算结果列于下表。

表 5-17 护士年受照剂量计算结果

工作区域		剂量率， mSv/h	年受照时间， h	受照剂量，mSv/a
治疗前模拟 CT 定位	质子治疗机房 ¹	5.97E-03	0.4	2.39E-03
	操作间 ²	2.50E-03	0.4	1.00E-03
治疗前 X 射 线精确定位	质子治疗机房 ¹	5.97E-03	9.6	5.73E-02
	操作间 ²	2.50E-03	9.6	2.40E-02
总计		——	——	8.47E-02
注：1. 根据表 5-2，取治疗室内剂量率较高的值进行计算； 2. 保守按照 X 射线管出束时操作台处剂量率为 2.5μSv/h 考虑。				

5.1.1.2.5 维修工程师

维修工程师的主要工作内容为质子治疗区的日常基础维护保养，根据建设单位提供的资料，维修工程师每年在治疗室内的工作时间不超过 200h，由此可计算出维修工程师的年受照剂量，列于表 5-18。

表 5-18 维修工程师的年受照剂量

工作区域		剂量率，mSv/h	受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
质子治疗 系统	治疗室	9.60E-03	200	1.92E+00
	质子供应商办公室	4.00E-05	1800	7.20E-02
	总计			1.99E+00

5.1.1.2.6 工作人员受照剂量汇总

本项目质子治疗系统工作人员的最大年受照剂量汇总如下表 5-19 所示。由结果可知，治疗技师年受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 4.37mSv，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-19 质子治疗系统工作人员受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量, mSv/a
医生	1.09E+00
治疗技师	4.37E+00
物理师	8.62E-01
护士	8.47E-02
维修工程师	1.99E+00

5.1.1.3 公众受照剂量估算

质子治疗系统正常运行期间,对公众的辐射影响主要来自质子治疗系统开机出束期间产生的瞬发辐射直接外照射以及感生放射性气体的排放。

5.1.1.3.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象为质子治疗机房周围近距离范围内的公众,主要为位于质子治疗区的医护人员中的非放射性工作人员、患者陪诊人员以及重离子质子治疗楼建筑外的公众。其中:

(1) 非放射性工作人员主要为不涉及放射性工作的工作人员,其工作场所主要为质子治疗区的服务台;

(2) 患者陪诊人员主要位于等候区,保守按每名患者每年接受 25 次治疗计,则患者陪诊人员每年陪诊 25 次,每次在等候区停留时间按 1h 计;

(3) 质子治疗楼建筑外的公众主要考虑近距离范围内的公众。

上述公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果列于表 5-20。

表 5-20 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

公众所在位置	关注点	瞬时剂量率, mSv/h	居留因子	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
服务台	C8	2.00E-05	1	2128	4.26E-02
质子候诊区	B6	4.00E-05	1	25	1.00E-03
建筑外园内道路	C11*	6.50E-04	1/40	2128	3.46E-02

备注: 建筑外园内道路保守取为治疗室屋顶处较大的剂量率。

5.1.1.3.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用李红等人在《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》（方栋，李红，辐射防护，2002 年第 22 卷第 6 期）中推荐的简单稀释模式估算质子治疗系统正常运行工况下放射性气态流出物的影响。放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射。计算时主要关注排风口近距离范围内公众的受照剂量。

5.1.1.3.2.1 空气浸没外照射

质子治疗系统放射性气体排放口位于重离子质子治疗楼楼顶，排风高度约 15m，排风口临近最高建筑物为住院楼，高度 H_b 为 60.6m。最靠近关注点的建筑物的最大截面积 A_b 为 3300m²。则可知质子治疗系统排风口的高度 $H < 2.5H_b$ 。对于评价范围的公众，根据 IAEA NO.19 号报告，当关注点与排风口的距离 $x \leq 2.5\sqrt{A_b} = 144\text{m}$ 时，关注点地面空气浓度可由下式计算：

$$C_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (\text{公式 5-2})$$

式中，

$C_{a,i}$ 为下风向 x （m）距离处的核素 i 的地面空气浓度，Bq/m³；

P_p 为一年中风吹向接收点所在扇形方位 p 的时间份额，保守取值 0.25；

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s；见表 3-27。

u_a 为释放高度上年平均风速，m/s，取值 2m/s；

K 为经验常数，m，取值 $K=1\text{m}$ 。

则关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-21。

表 5-21 关注点处地面空气浓度计算结果

核素	近距离范围内浓度，Bq/m ³
¹¹ C	9.77E-01

¹³ N	4.91E+00
¹⁵ O	1.88E+01
⁴¹ Ar	2.27E-01

空气浸没外照射剂量可由下式计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \tag{公式 5-3}$$

式中：

H_A 为空气浸没照射所致年受照剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；

S_f 为建筑物屏蔽因子，本次评价取值为 1；

$C_{a,i}$ 为关注点处空气浓度，Bq/m³；

G_A 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-22，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子，公众取 1/16。

表 5-22 剂量转换因子

核素	剂量转换因子	
	空气浸没，(Sv/s)/(Bq/m ³)	吸入，Sv/ Bq
¹¹ C	4.89E-14	1.80E-11
¹³ N	4.90E-14	——
¹⁵ O	4.91E-14	——
⁴¹ Ar	6.50E-14	——

建筑外道路上公众的空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-23。

表 5-23 空气浸没外照射剂量计算结果

核素	公众空气浸没外照射剂量，mSv/a
¹¹ C	6.36E-09
¹³ N	3.19E-08

¹⁵ O	1.22E-07
⁴¹ Ar	1.47E-09
总计	6.36E-09

5.1.1.3.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由下式计算：

$$H_{h,i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \quad (\text{公式 5-4})$$

式中：

$H_{h,i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a；

t 为受照时间，h/a；

$C_{a,i}$ 为关注点处空气浓度，Bq/m³；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m³/h，成人取值 1.2m³/h；

$g_{h,i}$ 为吸入放射性核素 i 产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq；

T 为居留因子，公众取 1/16。

建筑外道路上的公众吸入内照射剂量计算结果见表 5-24。

表 5-24 空气吸入内照射剂量计算结果

核素	公众空气吸入内照射剂量，mSv/a
¹¹ C	2.81E-06
¹³ N	—
¹⁵ O	—
⁴¹ Ar	—
总计	2.81E-06

5.1.1.3.2.3 公众受照剂量汇总

公众受照剂量计算结果汇总见表 5-25，质子治疗系统正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 4.26E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-25 公众受照剂量汇总

公众所在位置	关注点	瞬发辐射所致年受照剂量, mSv/a	放射性气体排放所致年受照剂量, mSv/a	年受照剂量总计, mSv/a
服务台	C8	4.26E-02	——	4.26E-02
质子候诊区	B6	1.00E-03	——	1.00E-03
建筑外园内道路	C11	3.46E-02	2.81E-06	3.46E-02

5.1.2 事故工况的环境影响分析

质子治疗系统的核心是回旋加速器，其辐射场是瞬发性的，装置一旦停机，能造成环境影响的辐射源立即消失，且不会再引起周边介质的活化。

质子治疗系统运行期间可能发生的事故主要有因安全联锁系统失效、人员误入治疗机房内部或工作人员在机房内工作期间设备出束造成的人员误照射事故和冷却水泄漏事故。

5.1.2.1 人员误照射事故

5.1.2.1.1 事故后果分析

人员误照射事故中，工作人员在机房内工作期间设备出束的情况下，工作人员受照剂量最大，本次评价对该事故期间的人员受照剂量进行估算。

质子治疗系统出束时，距离治疗头 1m 处输出剂量率为 2Gy/min，保守假设工作人员在距离治疗头 1m 处工作。保守取单次治疗时间 5min 为工作人员在该事故发生期间的受照时间，由此可计算得出事故期间工作人员的受照剂量约为 10Gy。

电离辐射引起的生物效应包括随机效应和确定性效应。随机效应的发生不存在剂量的阈值，其发生几率与受照剂量的大小有关，如遗传效应和某些躯体效应（即癌症）。确定性效应的发生存在阈值效应，其效应的严重程度随受照剂量的大小而异，剂量愈高则效应的严重程度愈大。根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ 104-2017）和《辐射防护导论》，成人全身受到不同照射剂量的损伤估计情况列于表 5-26。

表 5-26 不同照射量对人体损伤的估计

剂量, Gy	类型		初期症状和损伤程度
<0.25	——		不明显和不易察觉的病变
0.25~0.5			可恢复的机能变化, 可能有血液学的变化
0.5~1			机能变化、血液变化, 但不伴有临床迹象
1~2	骨髓型急性放射病	轻度	乏力、不适、食欲减退
2~4		中度	头昏、乏力、食欲减退、恶心、呕吐、白细胞短暂上升后下降
4~6		重度	多次呕吐、可有腹泻、白细胞明显下降
6~10		极重度	多次呕吐、腹泻、休克、白细胞急剧下降
10~50	肠型急性放射病		频繁呕吐、腹泻严重、腹痛、血红蛋白升高
>50	脑型急性放射病		频繁呕吐、腹泻、休克、共济失调、肌张力增高、震颤、抽搐、昏睡、定向和判断力减退

由此可知, 发生人员误照射事故时, 考虑最不利的情况下, 将导致受照人员受到严重放射性损伤, 甚至导致死亡。根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定, 该类事故属于较大辐射事故。

由于各辐射工作场所屏蔽结构保持完好, 因此该类事故对周围环境不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

5.1.2.1.2 事故防范措施

(1) 质子治疗系统设计有功能齐全, 具有安全冗余的高安全等级的安全联锁系统, 采用分区控制、清场搜索、声光报警器、视频监控、紧急停机、紧急开门等安全设备和措施, 确保当治疗机房内有束流时, 各区域的门无法打开, 人员无法进入; 当治疗机房某一区域有人时, 机房内无法出束, 能够有效防止误入事故的发生。为防止各项安全联锁硬件设施失效, 定期检查并确认安全联锁设施的有效性。

(2) 开机出束前, 撤离治疗机房时应清点人数, 必须按照既定的清场搜索路线和程序对机房各区域进行清场。出束期间一旦发现有人员滞留在机房内, 就近按下急停按钮。工作人员进入治疗机房内部工作时应随身佩戴有效的剂量报警仪, 以便随时了解机房内的辐射水平并在辐射水平超出阈值时发出报警信号。

(3) 放射工作人员需加强专业知识学习, 加强辐射安全与防护培训, 严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理, 落实安全责任制, 经常督促检查。

(4) 做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

5.1.2.2 冷却水泄露事故

5.1.2.2.1 事故后果分析

冷却水管路上安装有泄漏测量传感器，一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水。根据“3.3.1.3.2 节”的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员造成辐射影响。

因此，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

5.1.2.2.2 事故防范措施

定期检查冷却水系统运行情况，确认泄漏测量系统的有效性。制定检修操作程序，加强安全文化教育，严格遵守操作程序，防止误操作造成的冷却水泄漏事故。

5.2 直线加速器

5.2.1 正常运行期间环境影响分析

5.2.1.1 屏蔽体外剂量率计算

5.2.1.1.1 屏蔽效能核算

5.2.1.1.1.1 计算依据

本次评价取电子直线加速器的最高能量 10MV 和等中心最大输出剂量率 24Gy/min 进行计算，见表 5-27。

表 5-27 直线加速器用于屏蔽计算的主要参数

射线装置	X 射线最高能量，MV	等中心点输出剂量率，Gy/min
电子直线加速器	10	24

5.2.1.1.1.2不同关注点应考虑辐射种类

①主屏蔽墙：仅考虑有用束的直接照射；

②与主屏蔽墙直接相连的次屏蔽墙：考虑泄漏辐射和来自患者、机房墙体的散射辐射；

③侧屏蔽墙：仅考虑泄漏辐射；

④迷路入口门处：考虑有用束、患者散射、机头泄漏射线的散射、穿过迷路内墙的泄漏辐射（本项目直线加速器 X 射线能量不大于 10MV，因此不需考虑中子、中子俘获 γ 射线）。

5.2.1.1.1.3计算方法

本次评价主要采用《兆伏级 X、 γ 射线放疗设施屏蔽设计和评价》（周启甫，戈立新主编，中国原子能出版社）、NCRP NO.151 号报告及 GBZ 201 系列卫生标准中推荐的计算方法，对直线加速器机房辐射屏蔽进行估算。

（1）初级辐射

主屏蔽墙外 30cm 处主要受初级 X 射线的影响，参考 NCRP NO.151 报告 P22 中式 2.1~2.4，初级 X 射线屏蔽可由下式 5-5 和式 5-6 计算得出。

$$H_{pri} = \frac{B_{pri} H_0 U T}{d_{pri}^2} \quad (5-5)$$

$$B_{pri} = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{t_{barrier} - TVL_1}{TVL_e} \right] \right\}} \quad (5-6)$$

式中，

H_{pri} 为距离加速器靶 d_{pri} 米处的剂量率，Sv/h；

B_{pri} 为主屏蔽墙的厚度对应的透射因子；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U 为使用因子，计算瞬时剂量率时取 1；

T 为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

t_{barrier} 为主屏蔽墙的厚度，m；

TVL_1 为第一个十分之一值层厚度，m；见表 5-28；

TVL_e 为平衡时的十分之一值层厚度，m；见表 5-28；

d_{pri} 为靶点至关注点的距离，m。

表 5-28 X 射线对应不同材料的 TVL 值

射线类型 \ TVL 值		混凝土，cm		铅，cm	
		TVL_1	TVL_e	TVL_1	TVL_e
有用束	10MV	41	37	5.7	5.7
泄漏辐射	10MV	35	31	5.7	5.7

注：表中数据取自 NCRP NO.151 中附录 B.2、B.7 和 B.5a。

(2) 泄漏辐射

根据 NCRP NP.151 报告中 P33 页式 2.8，泄漏辐射屏蔽可由下式 5-7 和式 5-8 计算得出。

$$H_L = \frac{B_L H_0 T}{1000 d_L^2} \quad (5-7)$$

$$B_L = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{t_{\text{barrier}} - TVL_1}{TVL_e}\right]\right\}} \quad (5-8)$$

式中，

H_L 为距离加速器等中心点 d_L 米处的剂量率，Sv/h；

1/1000 为泄漏辐射率，取 0.1%；

B_L 为次蔽墙的厚度对应泄漏辐射的透射因子；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

T 为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

TVL_1 为泄漏辐射十分之一值层厚度，m；

TVL_e 为泄漏辐射平衡时的十分之一值层厚度，m；

d_L 为靶点距关注点的距离，m。

(3) 散射辐射

根据 NCRP NP.151 报告中 P32 页式 2.7，散射辐射可由下式 5-9 和式 5-10 计算。

$$H_{PS} = \frac{B_{PS} \alpha H_0 T \frac{F}{400}}{d_{sca}^2 d_{sec}^2} \quad (5-9)$$

$$B_{PS} = 10^{-\frac{t_{barrier}}{TVL_{sca}}} \quad (5-10)$$

式中，

H_{PS} 为距离患者 d_{sec} 米处的剂量率，Sv/h；

B_{PS} 为次蔽墙的厚度对应散射辐射的透射因子；

d_{sca} 为靶点至患者的距离，m；

d_{sec} 为患者至关注点的距离，m；

α 为患者体表对初级辐射束的散射比，由入射的 X 射线能量及散射的角度决定；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

T 为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

TVL_{sca} 为患者散射辐射十分之一值层厚度，m；

F —患者等中心 1m 处照射野面积，取 $40 \times 40 \text{cm}^2$ ，保守安全最大面积。

5.2.1.1.1.4 计算结果

计算时在各机房外设置了若干关注点，见图 5-14、图 5-15。8 间直线加速器机房屏蔽体外各关注点剂量率计算参数和结果见表 5-29~表 5-36。

表 5-29 直线加速器机房 1 关注点剂量率计算结果 (10MV、24Gy/min)

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
a1	新风/排烟机房	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	1.6
b1	直线加速器 2	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
l1	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c1	电话机房	漏射	1.4E+09	8.3	206	2.86E-08	5.97E-04	1.45E-03	1.6
		散射	1.4E+09	8.3	206	3.20E-09	8.50E-04		
c1'	新风/排烟机房	漏射	1.4E+09	8.3	206	2.86E-08	5.97E-04	1.45E-03	1.6
		散射	1.4E+09	8.3	206	3.20E-09	8.50E-04		
d1	直线加速器 2	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
d1'	直线加速器 2	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.7	255	3.05E-11	1.23E-05		
m1	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m1'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e1	新风/排烟机房	漏射	1.4E+09	5.6	180	2.10E-06	9.55E-02	9.55E-02	1.6
f1	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k1	控制室	漏射	1.4E+09	10.1	156	1.25E-05	1.75E-01	1.75E-01	2.0
g1	防护门外	漏射	1.4E+09	10.9	168	5.12E-06	6.21E-02	6.21E-02	10.0

表 5-30 直线加速器机房 2 关注点剂量率计算结果（10MV、24Gy/min）

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制 水平, $\mu\text{Sv/h}$
a2	直线加速器 3	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
b2	直线加速器 1	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
l2	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c2	直线加速器 3	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
c2'	直线加速器 3	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04		
d2	直线加速器 1	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
d2'	直线加速器 1	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.7	255	3.05E-11	1.23E-05		
m2	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m2'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e2	走道	漏射	1.4E+09	5.6	180	2.10E-06	9.55E-02	9.55E-02	0.5
f2	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k2	控制室	漏射	1.4E+09	10.1	156	1.25E-05	1.75E-01	1.75E-01	2.0
g2	防护门外	漏射	1.4E+09	10.6	163	7.43E-06	9.52E-02	9.52E-02	10.0

表 5-31 直线加速器机房 3 关注点剂量率计算结果（10MV、24Gy/min）

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制 水平, $\mu\text{Sv/h}$
a3	直线加速器 2	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
b3	直线加速器 4	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
l3	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c3	直线加速器 2	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
c3'	直线加速器 2	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.7	255	3.05E-11	1.23E-05		
d3	直线加速器 4	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
d3'	直线加速器 4	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.7	255	3.05E-11	1.23E-05		
m3	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m3'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e3	走道	漏射	1.4E+09	5.6	180	2.10E-06	9.55E-02	9.55E-02	0.5
f3	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k3	控制室	漏射	1.4E+09	10.1	156	1.25E-05	1.75E-01	1.75E-01	2.0
g3	防护门外	漏射	1.4E+09	10.6	163	7.43E-06	9.52E-02	9.52E-02	10.0

表 5-32 直线加速器机房 4 关注点剂量率计算结果 (10MV、24Gy/min)

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
a4	直线加速器 5	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
b4	直线加速器 3	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
l4	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c4	直线加速器 5	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
c4'	直线加速器 5	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.7	255	3.05E-11	1.23E-05		
d4	直线加速器 3	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
d4'	直线加速器 3	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.7	255	3.05E-11	1.23E-05		
m4	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m4'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e4	走道	漏射	1.4E+09	5.6	180	2.10E-06	9.55E-02	9.55E-02	0.5
f4	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k4	控制室	漏射	1.4E+09	10.1	156	1.25E-05	1.75E-01	1.75E-01	2.0
g4	防护门外	漏射	1.4E+09	10.6	163	7.43E-06	9.52E-02	9.52E-02	10.0

表 5-33 直线加速器机房 5 关注点剂量率计算结果 (10MV、24Gy/min)

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
a5	直线加速器 4	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
b5	维修库房	主束	1.4E+09	7.9	300	1.00E-08	2.37E-01	2.31E-01	4.0
l5	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c5	直线加速器 4	漏射	1.4E+09	7.5	206	2.86E-08	7.27E-04	1.76E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.5	206	3.20E-09	1.04E-03		
c5'	直线加速器 4	漏射	1.4E+09	6.7	255	4.27E-10	1.35E-05	2.58E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.7	255	3.05E-11	1.23E-05		
d5	弱电机房	漏射	1.4E+09	8.3	205	3.11E-08	6.59E-04	1.60E-03	1.6
		散射	1.4E+09	8.3	205	3.52E-09	9.46E-04		
d5'	走道	漏射	1.4E+09	8.3	205	3.11E-08	6.59E-04	1.60E-03	0.5
		散射	1.4E+09	8.3	205	3.52E-09	9.46E-04		
m5	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m5'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e5	走道	漏射	1.4E+09	5.6	180	2.10E-06	9.55E-02	9.55E-02	0.5
f5	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k5	控制室	漏射	1.4E+09	10.6	163	7.43E-06	9.52E-02	9.52E-02	2.0
g5	防护门外	漏射	1.4E+09	10.6	163	7.43E-06	9.52E-02	9.52E-02	10.0

表 5-34 直线加速器机房 6 关注点剂量率计算结果 (10MV、24Gy/min)

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
a6	直线加速器 7	主束	1.4E+09	7.8	300	1.00E-08	2.37E-01	2.37E-01	4.0
b6	前室	主束	1.4E+09	7.8	300	1.00E-08	2.37E-01	2.37E-01	1.6
l6	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c6	直线加速器 7	漏射	1.4E+09	7.4	208	2.41E-08	6.26E-04	1.50E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.4	208	2.64E-09	8.75E-04		
c6'	直线加速器 7	漏射	1.4E+09	6.6	255	4.27E-10	1.40E-05	2.66E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.6	255	3.05E-11	1.27E-05		
d6	咨询室	漏射	1.4E+09	8.2	207	2.62E-08	5.57E-04	1.34E-03	0.1
		散射	1.4E+09	8.2	207	2.91E-09	7.86E-04		
d6'	前室	漏射	1.4E+09	8.2	207	2.62E-08	5.57E-04	1.34E-03	1.6
		散射	1.4E+09	8.2	207	2.91E-09	7.86E-04		
m6	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m6'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e6	土层	漏射	1.4E+09	5.7	180	2.10E-06	9.48E-02	9.48E-02	/
f6	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k6	控制室	漏射	1.4E+09	10.5	162	8.00E-06	1.05E-01	1.05E-01	2.0
g6	防护门外	漏射	1.4E+09	10.8	162	8.00E-06	9.88E-02	9.88E-02	10.0

表 5-35 直线加速器机房 7 关注点剂量率计算结果 (10MV、24Gy/min)

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
a7	直线加速器 8	主束	1.4E+09	7.8	300	1.00E-08	2.37E-01	2.37E-01	4.0
b7	直线加速器 6	主束	1.4E+09	7.8	300	1.00E-08	2.37E-01	2.37E-01	4.0
l7	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c7	直线加速器 8	漏射	1.4E+09	7.4	208	2.41E-08	6.26E-04	1.50E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.4	208	2.64E-09	8.75E-04		
c7'	直线加速器 8	漏射	1.4E+09	6.6	255	4.27E-10	1.40E-05	2.66E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.6	255	3.05E-11	1.27E-05		
d7	直线加速器 6	漏射	1.4E+09	7.4	208	2.41E-08	6.26E-04	1.50E-03	4.0
		散射	1.4E+09	7.4	208	2.64E-09	8.75E-04		
d7'	直线加速器 6	漏射	1.4E+09	6.6	255	4.27E-10	1.40E-05	2.66E-05	4.0
		散射	1.4E+09	6.6	255	3.05E-11	1.27E-05		
m7	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m7'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e7	土层	漏射	1.4E+09	5.7	180	2.10E-06	9.48E-02	9.48E-02	/
f7	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k7	控制室	漏射	1.4E+09	10.1	155	1.35E-05	1.90E-01	1.90E-01	2.0
g7	防护门外	漏射	1.4E+09	10.8	162	8.00E-06	9.88E-02	9.88E-02	10.0

表 5-36 直线加速器机房 8 关注点剂量率计算结果 (10MV、24Gy/min)

关注点	周围环境	射线类型	H_0 , $\mu\text{Gy/h}$	$d_{\text{pri}}/d_{\text{L}}/d_{\text{sec}}$, m	t_{barrier} , cm	透射因子 B	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
a8	3D 打印补偿物制作	主束	1.4E+09	7.8	300	1.00E-08	2.37E-01	2.37E-01	1.6
b8	直线加速器 7	主束	1.4E+09	7.8	300	1.00E-08	2.37E-01	2.37E-01	4.0
l8	夹层机房	主束	1.4E+09	7.0	310	5.37E-09	2.18E-01	1.58E-01	1.6
c8	呼吸训练室	漏射	1.4E+09	8.2	207	2.62E-08	5.57E-04	1.34E-03	0.4
		散射	1.4E+09	8.2	207	2.91E-09	7.86E-04		
c8'	3D 打印补偿物制作	漏射	1.4E+09	8.2	207	2.62E-08	5.57E-04	1.34E-03	1.6
		散射	1.4E+09	8.2	207	2.91E-09	7.86E-04		
d8	直线加速器 7	漏射	1.4E+09	8.2	207	2.62E-08	5.57E-04	1.34E-03	4.0
		散射	1.4E+09	8.2	207	2.91E-09	7.86E-04		
d8'	直线加速器 7	漏射	1.4E+09	8.2	207	2.62E-08	5.57E-04	1.34E-03	4.0
		散射	1.4E+09	8.2	207	2.91E-09	7.86E-04		
m8	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
m8'	夹层机房	漏射	1.4E+09	6.0	167	8.10E-07	3.28E-02	9.97E-02	1.6
		散射	1.4E+09	6.0	167	1.30E-07	6.69E-02		
e8	结构空腔	漏射	1.4E+09	5.7	180	2.10E-06	9.48E-02	9.48E-02	/
f8	控制室	漏射	1.4E+09	9.8	300	2.83E-10	4.26E-06	4.26E-06	2.0
k8	控制室	漏射	1.4E+09	10.5	162	8.00E-06	1.05E-01	1.05E-01	2.0
g8	防护门外	漏射	1.4E+09	10.8	162	8.00E-06	9.88E-02	9.88E-02	10.0

根据上述计算结果，直线加速器机房屏蔽体外剂量率水平均低于其剂量率控制水平。



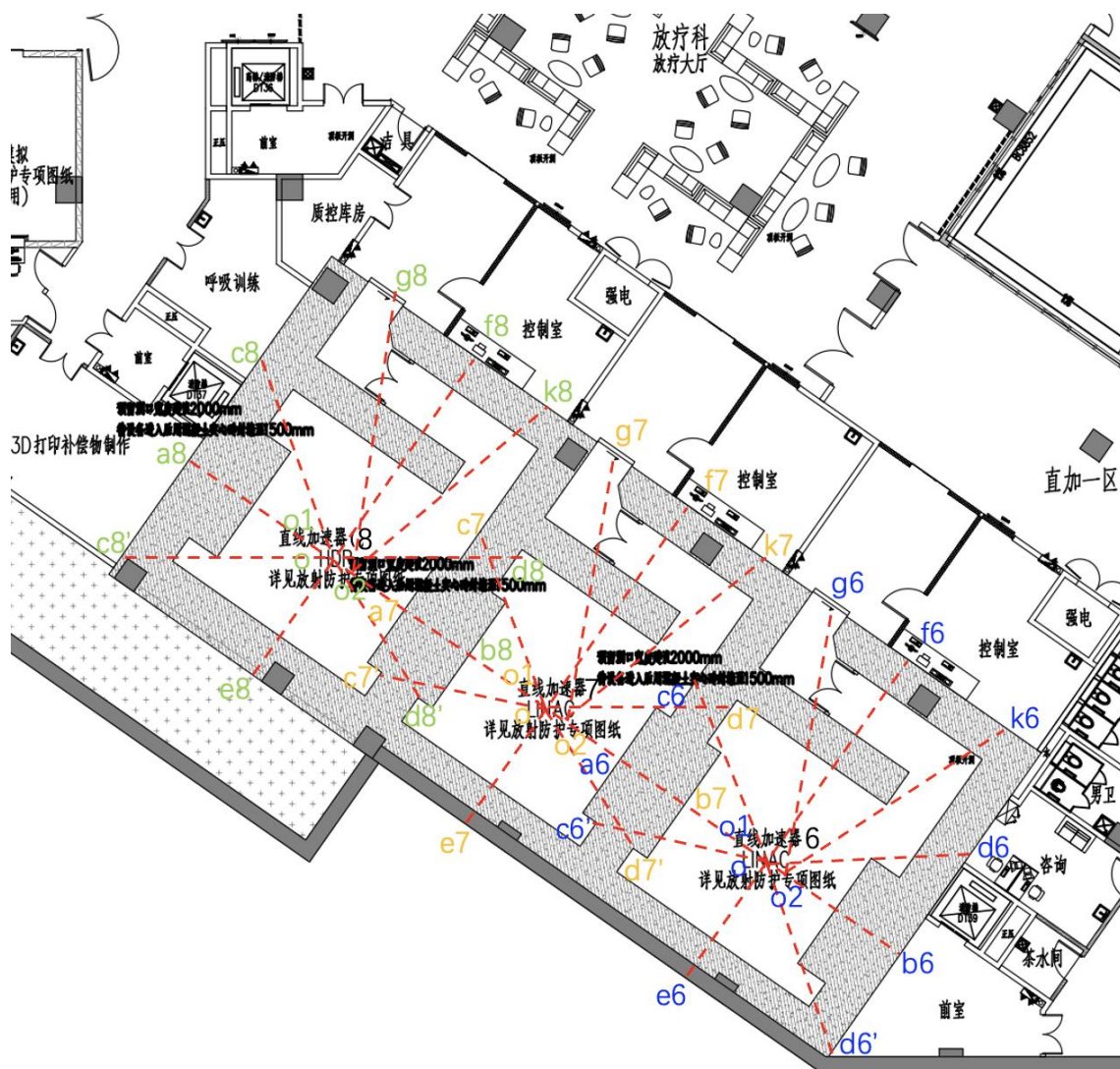


图 5-14 直加机房 1~8 屏蔽体外关注点示意图（平面）

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U 为使用因子，取 1；

F 为患者等中心 1m 处照射野面积，取 $40 \times 40 \text{cm}^2$ ，保守安全最大面积。

$a(\theta)$ 为患者散射的初级辐射以一定角度入射到 K 墙的散射比；

α_l 为墙 K 对患者散射辐射的反散射系数；

A_l 为患者散射至墙 K 的有效散射面积（ A_1 的长度×机房净高）， m^2 ；

α_2 为墙 P 对患者散射辐射的反散射系数；

A_2 为散射至墙 P 的有效散射面积（ A_1 的长度×机房净高）， m^2 ；

d_0 为靶点至患者的距离，m；

d_1 为患者至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_2 为散射体 K 墙到散射体 P 墙迷路中心线的距离，m；

d_3 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

② H_s （墙的散射辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P35 式 2.9， H_s 可由下式 5-12 计算：

$$H_s = \frac{H_0 U \alpha_0 A_0 \alpha_3 A_3 \alpha_4 A_4}{(d_4 d_5 d_6 d_7)^2} \quad (5-12)$$

式中：

H_s 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U 为使用因子，取 1；

α_0 为主束散射面 L 墙的反散射系数；

A_0 为等中心 1m 处最大照射野投影在主屏蔽墙 L 上的面积， m^2 ；

α_3 为主束经迷路外墙 M 第二次散射时的反射系数；

A_3 为主束散射面 L 墙的散射线经过迷路口内口发散到迷路外墙内表面的散射面积， m^2 ；

α_4 为主束经墙体 P 第二次散射时的反射系数；

A_4 为主束散射到墙体 P 表面的散射面积， m^2 ；

d_4 为靶点至主束散射面 L 墙的距离，m；

d_5 为主束散射面中心点经迷路内口的边缘至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_6 为散射体 K 墙到散射体 P 墙迷路中心线的距离，m；

d_7 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

③ H_{LS} （机头泄漏在墙上的散射辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P37 式 2.10， H_s 可由下式 5-13 计算：

$$H_{LS} = \frac{L_f H_0 U \alpha_5 A_5 \alpha_6 A_2}{(d_8 d_2 d_3)^2} \quad (5-13)$$

式中：

H_{LS} 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

L_f 为距靶 1m 处装置头泄漏辐射率，取 0.001；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U 为使用因子，取 1；

α_5 为 K 墙对装置头泄漏辐射的第一次反散射系数；

A_5 为装置头泄漏辐射至墙 K 的有效散射面积（ A_1 的长度×机房净高）， m^2 ；

α_6 为 P 墙对装置头泄漏辐射的第二次反散射系数；

A_2 为散射至墙 P 的有效散射面积（ A_1 的长度×机房净高）， m^2 ；

d_8 为靶至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_2 为散射体 K 墙到入口处的垂直距离，m；

d_3 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

④ H_{LT} （穿过迷道墙的机头泄漏辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P38 式 2.12， H_{LT} 可由下式 5-14 和式 5-15 计算：

$$H_{LT} = \frac{L_f H_0 U B}{d_L^2} \quad (5-14)$$

$$B_L = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{t_{\text{barrier}} - TVL_1}{TVL_e}\right]\right\}} \quad (5-15)$$

式中：

H_{LT} 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

L_f 为距靶 1m 处装置头泄漏辐射率，取 0.001；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U 为使用因子，取 1；

B 为迷路内墙对装置头泄露辐射的透射因子；

d_L 为靶经迷路内墙至迷路入口处的距离，m；

t_{barrier} 为泄漏射线由装置头斜射至迷路入口处穿过迷路内墙的有效厚度，m；

TVL_1 为十分之一值层厚度，m；

TVL_e 为平衡时的十分之一值层厚度, m。

5.2.1.1.2.2 计算结果

直线加速器机房迷路入口处的剂量率计算结果列于表 5-37~表 5-40。

表 5-37 H_{PS} 数值计算结果

参数	取值			
	直线加速器 1、5	直线加速器 2、3、4	直线加速器 6、8	直线加速器 7
H_{PS} , Sv/h	8.25E-05	1.06E-04	9.42E-05	1.06E-04
H_0 , Gy/h	1440	1440	1440	1440
U	1	1	1	1
F, cm^2	1600	1600	1600	1600
$a(\theta)$	1.35E-03	1.35E-03	1.35E-03	1.35E-03
α_1	0.022	0.022	0.022	0.022
A_1 , m^2	7.8	7.8	7.8	7.8
α_2	0.036	0.036	0.036	0.036
A_2 , m^2	40.8	38.2	40.8	38.2
d_0 , m	1	1	1	1
d_1 , m	7.7	7.3	7.3	7.3
d_2 , m	8.0	7.2	7.9	7.2
d_3 , m	2.5	2.5	2.5	2.5

注: 1. $a(\theta)$ 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.4, 保守取 X 射线能量为 10MV, 入射角为 45° 时的数值;

2. α_1 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b, 取 0.5MeV X 射线, 入射角为 45° , 反射角为 0° 的数值, 为 0.022;

3. α_2 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b, 保守取 0.25MeV X 射线, 入射角为 45° , 反射角为 0° 的数值, 为 0.036。

表 5-38 H_s 数值计算结果

参数	取值			
	直线加速器 1、5	直线加速器 2、3、4	直线加速器 6、8	直线加速器 7
H_s , Sv/h	2.19E-05	2.53E-05	1.90E-05	2.12E-05
H_0 , Gy/h	1440	1440	1440	1440
U	1	1	1	1
α_0	2.1E-03	2.1E-03	2.1E-03	2.1E-03
A_0 , m^2	19.3	19.3	19.1	19.1
α_3	1.3E-03	1.3E-03	1.3E-03	1.3E-03
A_3 , m^2	7.8	7.8	7.8	7.8

α_4	3.6E-02	3.6E-02	3.6E-02	3.6E-02
A_4, m^2	35.7	33.2	34.9	32.4
d_4, m	4.5	4.5	4.5	4.5
d_5, m	7.0	7.0	7.0	7.0
d_6, m	8.0	7.2	7.9	7.2
d_7, m	2.5	2.5	2.5	2.5

注：1. α_0 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8a, X 射线能量为 10MV, 入射角为 0° , 反射角为 75° 时的数值;

2. α_3 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8a。通常取 0.5MeV X 射线, 入射角为 0° , 反射角为 60° 的数值;

3. α_4 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8a。保守取 0.25MeV X 射线, 入射角为 45° , 反射角为 0° 的数值。

表 5-39 H_{LS} 数值计算结果

参数	取值			
	直线加速器 1、 5	直线加速器 2、 3、4	直线加速器 6、 8	直线加速器 7
$H_{LS}, Sv/h$	2.61E-06	3.35E-06	2.98E-06	3.35E-06
$H_0, Gy/h$	1440	1440	1440	1440
U	1	1	1	1
L_f	0.001	0.001	0.001	0.001
α_5	6E-03	6E-03	6E-03	6E-03
A_5, m^2	7.8	7.8	7.8	7.8
α_6	0.0225	0.0225	0.0225	0.0225
A_2, m^2	40.8	38.2	40.8	38.2
d_8, m	7.7	7.3	7.3	7.3
d_2, m	8.0	7.2	7.9	7.2
d_3, m	2.5	2.5	2.5	2.5

注 1. α_5 值参考 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b。对于直线加速器, 保守取 10MV X 射线, 入射角为 45° , 反射角为 75° 的数值, 为 6.0×10^{-3} ;

2. α_6 值保守参考 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b。取 0.5MeV X 射线, 入射角为 45° , 反射角为 30° 的数值, 为 0.0225。

表 5-40 H_{LT} 数值计算结果

参数	取值		
	直线加速器 1	直线加速器 2、3、4、5	直线加速器 6、7、8
$H_{LT}, Sv/h$	6.21E-08	9.52E-08	9.88E-08
B	5.12E-06	7.43E-06	8.00E-06
$H_0, Gy/h$	1440	1440	1440
U	1	1	1
L_f	0.001	0.001	0.001
d_L, m	10.9	10.6	10.8

5.2.1.1.2.3小结

根据上述计算结果，考虑各机房防护门屏蔽后，直线加速器机房迷路入口处的剂量率计算结果列于表 5-41。根据计算结果，直线加速器机房迷路防护门外剂量率均低于其剂量率控制水平。

表 5-41 直加机房迷路防护门外剂量率计算结果

路径	参数取值及计算结果				
	直线加速器 1	直线加速器 2、3、4	直线加速器 5	直线加速器 6、8	直线加速器 7
患者散射辐射 H_{PS} , Sv/h	8.25E-05	1.06E-04	8.25E-05	9.42E-05	1.06E-04
墙的散射辐射 H_S , Sv/h	2.19E-05	2.53E-05	2.19E-05	1.90E-05	2.12E-05
机头泄漏在墙上的散射辐射 H_{LS} , Sv/h	2.61E-06	3.35E-06	2.61E-06	2.98E-06	3.35E-06
穿过迷道墙的机头泄漏辐射 H_{LT} , Sv/h	6.21E-08	9.52E-08	9.52E-08	9.88E-08	9.88E-08
$H_{PS}+H_S+H_{LS}+H_{LT}$, Sv/h	1.07E-04	1.35E-04	1.07E-04	1.16E-04	1.31E-04
防护门铅厚度, mm	15	15	15	15	15
TVL_{Pb} , mm	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
经铅防护门屏蔽后散射辐射和泄漏辐射所致总的剂量当量 H_{lot} , $\mu\text{Sv/h}$	2.50E-01	3.15E-01	2.50E-01	2.72E-01	3.05E-01
剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$	10	10	10	10	10

5.2.1.1.3 主屏蔽墙宽度核算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），对主屏蔽墙的宽度利用下式 5-16 和 5-17 计算，计算结果列于表 5-42、表 5-43。

（1）内凸

$$Y = (100 + a + X_2)tg14^\circ + 30 \tag{5-16}$$

式中：

Y 为主屏蔽墙半宽，cm；

a 为等中心点到主屏蔽墙的距离，cm；

X_2 为主屏蔽墙内凸部分的厚度，cm。

表 5-42 直加机房主屏蔽墙内凸部分宽度核算结果

主屏蔽墙位置	a, cm	X_2 , cm	主屏蔽宽度计算结果, cm	实际宽度, cm	是否满足
直加机房 1 东北主屏蔽墙	360	130	355	495	是
直加机房 5 西南主屏蔽墙	360	130	355	495	是
直加机房 6 东南主屏蔽墙	350	130	350	490	是
直加机房 8 西北主屏蔽墙	350	130	350	490	是

(2) 外凸

$$Y = (100 + a + X_1 + X_2) \tan 14^\circ + 30 \quad (5-17)$$

式中：

Y 为主屏蔽墙半宽，cm；

a 为等中心点到屏蔽墙内表面的距离，cm；

X_1 为次屏蔽墙的厚度，cm；

X_2 为外凸部分的厚度，cm；

表 5-43 直加机房主屏蔽墙外凸部分宽度核算结果

点位	a, cm	X_1 , cm	X_2 , cm	主屏蔽宽度计算结果, cm	实际宽度, cm	是否满足
直加机房 1 西南主屏蔽墙	360	170	130	439	495	是
直加机房 2 东西主屏蔽墙	360	170	130	439	495	是
直加机房 3 东西主屏蔽墙	360	170	130	439	495	是
直加机房 4 东西主屏蔽墙	360	170	130	439	495	是
直加机房 5 东北主屏蔽墙	360	170	130	439	495	是
直加机房 6 东西主屏蔽墙	350	170	130	434	490	是
直加机房 7 东西主屏蔽墙	350	170	130	434	490	是
直加机房 8 东南主屏蔽墙	350	170	130	434	490	是
直加机房 1~8 顶主屏蔽墙	360	150	160	444	490	是

5.2.1.2 工作量规划

根据 3.2.2.4 小节，本项目每台直线加速器每年最多工作 50 周，每周工作 5

天。每台设备计划最多治疗 60 人次/天，其中常规治疗约 30 人次/天，每人每次照射 3min；调强治疗约 30 人次/天，每人每次照射 15min（调强因子 N=5）。则每台设备的年治疗出束时间最多为 2250h。加上每台设备的年 QA 出束时间最多为 250h，则每台设备的年总出束时间最多为 2500h。

5.2.1.3 工作人员受照剂量估算

由于本项目直线加速器的 X 射线最大能量不超过 10MV，因此人员受照剂量估算不需考虑感生放射性影响，主要考虑瞬发辐射外照射影响。

放疗科直线加速器的工作人员主要包括医生、物理师、技师、护士和工程师，见表 5-44。

表 5-44 直线加速器工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医生办公室、抢救室	4 人	每天两班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、直加机房内、直加控制室	4 人	每天两班，每班 8h
技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	CT 模拟定位机房及其控制室、直加机房及其控制室、技师办公室	8 人	每天两班，每班 8h
护士	治疗准备、注射、护理等	注射室、直加机房及其控制室、护士站	4 人	每天两班，每班 8h
工程师	设备日常运维	设备间、工程师办公室	2 人	每天两班，每班 8h

5.2.1.3.1 医生

直线加速器科室医生的工作地点主要在诊室和医生办公室，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内。由于诊室和医生办公室与机房距离较远，根据屏蔽体外剂量率计算结果，考虑距离衰减后，诊室和医生办公室的剂量率将维持在本底水平，因此主要考虑医生进入治疗室内时相邻机房出束对其造成的辐射影响。预计每名医生在治疗室内的工作时间最多不超过 50h/年，则直加医生年受照剂量估算结果列于表 5-45。

表 5-45 直加医生年受照剂量估算结果

岗位	工作地点	剂量率 ¹ , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
医生	机房内	2.37E-01	50	1.19E-02
注：1.保守取 8 间直加机房内部的关注点中，剂量率计算结果最大值进行计算。				

5.2.1.3.2 技师

根据治疗流程，技师的工作内容主要包括治疗前模拟定位、在机房内给患者摆位以及在控制室内操作设备出束。

5.2.1.3.2.1 在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用模拟 CT 对其进行治疗前的模拟定位，在放疗科的模拟 CT 机房 1 或模拟 CT 机房 2 内进行（两间模拟 CT 机房不相邻，机房屏蔽体外均为监督区）。本项目直加每年治疗总人次为 15000 人次，按每名患者治疗 10 次估计，则每年技师需要治疗前模拟定位总次数为 1500 次。

每次模拟定位期间，按在模拟 CT 机房内摆位 5min、在控制室内操作模拟 CT 出束 1min 考虑，每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目放疗科共配备 8 名技师轮班，则每名技师每年参与模拟定位的次数约为 375 次。由此可计算得出每名技师从事模拟定位工作期间的受照剂量，列于表 5-46。

表 5-46 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果

工作区域	剂量率 ¹ , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
模拟 CT 控制室	2.5	6.25	1.56E-02
注：1. 根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，则操作间的剂量率保守取 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。			

5.2.1.3.2.2 在机房内摆位/解除摆位

直加每年需摆位/解除摆位的总次数为 15000 人次。放疗科共配备 8 名技师，则每名技师每年最多需摆位/解除摆位 1875 人次。按摆位 5min/人次、解除摆位 1min/人次考虑，则每名技师因在机房内摆位/解除摆位所致年剂量计算结果列于表 5-47。

表 5-47 每名技师在机房内摆位/解除摆位的年工作量

工作区域	剂量率 ¹ , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
机房内	2.37E-01	187.5	4.44E-02
注: 1.保守取 8 间直加机房内部的关注点中, 剂量率计算结果最大值进行计算。			

5.2.1.3.2.3 在控制室内操作装置出束

每台直加每年治疗总出束时间为 2250h (因技师不参与 QA, 故不考虑 QA 出束时间)。放疗科共配备 8 名技师, 则每名技师在每间直加控制室内的年受照时间为 281.25h。则技师在控制室内工作期间的年受照剂量估算结果列于表 5-48。

表 5-48 技师在控制室内工作期间的受照剂量估算结果

工作区域	剂量率 ¹ , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
控制室	1.90E-01	281.25	5.34E-02
注: 1.保守取 8 间直加机房控制室内的关注点中, 剂量率计算结果最大值进行计算。			

5.2.1.3.2.4 小结

根据上述分析, 将放疗科技师年总受照剂量计算结果列于表 5-49。

表 5-49 放疗科技师年总受照剂量

工作岗位	工作内容	年受照剂量, mSv/a
放疗科技师	在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位	1.56E-02
	在机房内摆位/解除摆位	4.44E-02
	在控制室内操作装置出束	5.34E-02
	总计	1.14E-01

5.2.1.3.3 物理师

物理师治疗计划制定主要在办公室内进行, 距离机房较远, 考虑距离衰减后办公室的剂量率处在本底水平。物理师的受照剂量主要来自治疗计划验证和 QA 工作期间, 工作地点在直加机房及其控制室。

(1) 治疗计划验证

每位患者需要物理师做一次治疗计划验证, 则每年治疗计划验证总次数为 1500 次。放疗科共配备 4 名物理师, 则每名物理师每年进行治疗计划验证的次数

为 375 次。按每次治疗计划验证期间物理师的受照剂量与每次治疗期间技师的受照剂量一致考虑，保守取表 5-49 技师年受照剂量 $1.14\text{E-}01\text{mSv}$ 除以年患者人数 1500，可推知每名物理师每次治疗计划验证的受照剂量约为 $7.6\text{E-}05\text{mSv/次}$ ，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的年受照剂量计算结果列于表 5-50。

表 5-50 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量

工作内容	单次工作受照剂量, mSv/次	年工作次数	受照剂量, mSv/a
治疗计划验证	7.6E-05	375	2.85E-02

(2) QA

QA 期间，物理师的工作地点包括机房内和控制室。每名物理师在机房内工作的时间按每年最多 250h 考虑。每台直加的 QA 年总出束时间为 250h，共 4 名物理师，则每年每名物理师在控制室内的时间为 500h。则物理师 QA 工作期间的年受照剂量估算结果列于表 5-51。

表 5-51 物理师 QA 工作期间年受照剂量算结果

工作区域	工作地点	剂量率 ¹ , μSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
直线加速器	机房内	2.37E-01	250	5.93E-02
	控制室	1.90E-01	500	9.50E-02
	总计			1.54E-01
注：1.取值依据见上文医生、技师计算过程。				

(3) 小结

根据上述计算结果，可得出放疗科物理师的年受照剂量，列于表 5-52。

表 5-52 物理师的年受照剂量

工作岗位	工作内容	年受照剂量, mSv/a
放疗科物理师	治疗计划验证	2.85E-02
	QA	1.54E-01
	总计	1.83E-01

5.2.1.3.4 护士

根据治疗流程，护士在治疗前的模拟 CT 定位期间，在技师操作模拟 CT 时，

根据工作需要为患者注射造影剂。护士在模拟 CT 机房北侧的注射室留针，然后在控制廊远程操作注射造影剂。每年的操作总次数按模拟 CT 定位次数的 1/10 考虑，即 150 次。留针的时间按 1min/次考虑，注射造影剂的时间按 1min/次考虑。共 4 名护士，则每名护士的年受照剂量计算结果列于表 5-53。

表 5-53 护士年受照剂量计算结果

工作区域		剂量率 ¹ , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
治疗前模拟 CT 定位	注射室	2.5	2.5	6.25E-03
	模拟 CT 控制位	2.5	2.5	6.25E-03
总计		——	——	1.25E-02
注：1. 根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，则注射室和控制位的剂量率保守均取 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。				

5.2.1.3.5 工程师

放疗科工程师共 2 人，主要工作内容为水电、暖通、网络等的日常基础维护保养，每人每年在机房内的工作时间不超过 500h，由此可计算得出工程师的年受照剂量，列于下表。

表 5-54 工程师的年受照剂量

岗位	工作地点	剂量率 ¹ , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
工程师	机房内	2.37E-01	500	1.19E-01
注：1.保守取 8 间直加机房内部的关注点中，剂量率计算结果最大值进行计算。				

5.2.1.3.6 小结

本项目放疗科工作人员的最大年受照剂量汇总如表 5-55 所示。由结果可知，直线加速器物理师年受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 $1.83\text{E-}01\text{mSv}$ ，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a 。

表 5-55 放疗科工作人员受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量, mSv/a
医生	1.19E-02
技师	1.14E-01
物理师	1.83E-01

护士	1.25E-02
工程师	1.19E-01

5.2.1.4 公众受照剂量估算

瞬发辐射主要影响对象为放疗科直加机房周围近距离范围内的公众。公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果列于下表。由计算结果可知，放疗科直加机房正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 4.78E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-56 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

关注点	周围环境	居留因子	瞬时剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间，h	年受照剂量， mSv/a
a1	新风/排烟机房	1/16	2.31E-01	2500	3.61E-02
c1	电话机房	1/16	1.45E-03	2500	2.27E-04
l1	夹层机房	1/16	1.58E-01	2500	2.47E-02
e2	走道	1/5	9.55E-02	2500	4.78E-02
l2	夹层机房	1/16	1.58E-01	2500	2.47E-02
b5	维修库房	1/16	2.31E-01	2500	3.61E-02
d5	弱电机房	1/16	1.60E-03	2500	2.50E-04
d5'	走道	1/5	1.60E-03	2500	8.00E-04
b6	前室	1/16	2.37E-01	2500	3.70E-02
d6	咨询室	1	1.34E-03	2500	3.35E-03
l6	夹层机房	1/16	1.58E-01	2500	2.47E-02
a8	3D 打印补偿物制作	1/16	2.37E-01	2500	3.70E-02
c8	呼吸训练室	1/4	1.34E-03	2500	8.38E-04

5.2.2 事故影响分析

5.2.2.1 事故类型

直线加速器运行期间可能发生的辐射事故中，最严重的为人员误照事故。当加速器正在出束时因门机联锁失效等原因人员误入机房内，或是工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工作时加速器开机出束，会造成人员误照。

5.2.2.2 事故后果

保守假设被误照人员位于等中心处，考虑直线加速器等中心最大输出剂量率 24Gy/min 出束 3min，可计算得出直加机房发生该类事故时，人员最大受照剂量为 72Gy/次。

电离辐射引起的生物效应包括随机效应和确定性效应。随机效应的发生不存在剂量的阈值，其发生几率与受照剂量的大小有关，如遗传效应和某些躯体效应（即癌症）。确定性效应的发生存在阈值效应，其效应的严重程度随受照剂量的大小而异，剂量愈高则效应的严重程度愈大。根据不同照射剂量对人体损伤的估计，发生人员误照射事故时，考虑最不利的情况下，将导致受照人员受到严重放射性损伤，甚至导致死亡。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定，该类事故属于较大辐射事故。

5.2.2.3 事故防范措施

（1）直加机房设有声光报警、工作状态指示、门机联锁、视频监控系统、急停按钮、紧急开门按钮等一系列冗余的安全措施，可有效防止该事故发生。此外，辐射工作人员进入机房内工作时，需佩戴个人剂量报警仪。一旦出现误照情况，报警仪会发出报警信号提醒工作人员立即撤出。

（2）此外，为防止人员误留在机房内受到误照射，要求在每次出束前，工作人员在撤离前必须清点人员，按程序对机房进行全视角搜寻，确认无误后，方可出束。

（3）辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。

（4）定期做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

(5) 医院在采购设备时应充分考虑生产厂家的售后产品技术支持，提高产品可靠性。在维护和维修时，不可擅自解除联锁系统。

5.3 DSA、ERCp

5.3.1 正常运行的环境影响分析

5.3.1.1 辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平

(1) 源项

根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 5.8.3 小节“X 射线设备应配备能阻止使用焦皮距小于 20 cm 的装置”，以及表 E.4 典型成年受检者 X 射线透视的诊断参考水平：“有影像增强器并有自动亮度控制系统的 X 射线设备（介入放射学中使用）的入射体表剂量率为 $100\text{mGy}\cdot\text{min}^{-1}$ ”，得知距 X 射线源 20cm 处的空气比释动能率为 $100\text{mGy}\cdot\text{min}^{-1}$ ，即 6Gy/h。另根据“距离平方反比定律”可估得，DSA、ERCp 在透视工况下，距离 X 射线源 1 米处的空气比释动能率为 0.24Gy/h。根据表 3-9，在常用的参数工况下，摄影的管电流约为透视的 50 倍，则 DSA、ERCp 在摄影工况下，距离 X 射线源 1 米处的空气比释动能率为 12Gy/h。

(2) 计算公式及参数选取

参照《电离辐射工业应用的防护与安全》第 32 页 (2.4) 式，经屏蔽后的辐射剂量率可由下式算得到。

$$D=D_0\times B/R^2 \quad (\text{公式 5-5})$$

$$B=[(1+\frac{\beta}{\alpha})e^{\alpha\gamma x}-\frac{\beta}{\alpha}]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (\text{公式 5-6})$$

式中：

D ：估算点附加剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

D_0 ：距源 1m 处的剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

R : X 射线靶到计算点的距离, m;

B : 屏蔽透射因子, 依据 GBZ 130-2020 附录 C 计算;

α 、 β 、 γ : 铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数;

X : 铅厚度, mm。

考虑到 DSA 图像增强器对 X 射线主束有屏蔽作用, NCRP 147 号报告“Structural Shielding Design For Medical X-Ray Imaging Facilities”4.1.6 节 (P42) 指出, DSA 屏蔽估算时不需要考虑主束照射, 故本次评价中 α 、 β 、 γ 在 GBZ 130-2020 表 C.2 中的对应参数, 保守按 DSA、ERCP 均为最大管电压 (散射) 选取, 见表 5-57。

表 5-57 不同管电压 X 射线辐射衰减拟合参数

材料	管电压, kV	参数		
		α	β	γ
铅	ERCP 最大管电压: 125 (散射)	2.233	7.888	0.7295
	DSA 最大管电压: 150 (散射)	1.791	5.478	0.5678

备注: 取值来自 GBZ 130-2020 附录 C 表 C.2。

(3) 计算结果

由表 5-58、表 5-59 的计算结果可知, DSA 机房、ERCP 机房的周围剂量当量率均低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$, 满足 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的屏蔽体外剂量率控制水平要求。

表 5-58 DSA 机房周围剂量当量率估算结果

机房	方位	周围环境	距离/m	屏蔽材料	屏蔽透射因子	摄影屏蔽后, $\mu\text{Sv/h}$	透视屏蔽后, $\mu\text{Sv/h}$
四层介入中心 DSA 机房 (2 号)	东北墙	走廊	5.45	240mm 实心砖 +3.5mmPb 当量的 硫酸钡水泥防护层	4.49E-06	1.82E+00	3.63E-02
	东南墙	走廊、3 号手术室	4.72		4.49E-06	2.42E+00	4.84E-02
	西北墙	设备间、1 号手术室	4.9		4.49E-06	2.25E+00	4.49E-02
	西南墙	控制间	4.94		4.49E-06	2.21E+00	4.42E-02
		走廊	7.51		4.49E-06	9.56E-01	1.91E-02
	防护门	走廊	7.51	5.5mmPb 电动推拉门	4.49E-06	9.56E-01	1.91E-02
		走廊	5.74	5.5mmPb 手动平开门	4.49E-06	1.64E+00	3.27E-02
		控制间	4.94		4.49E-06	2.21E+00	4.42E-02
	观察窗	控制间	4.94	5.5mmPb 铅玻璃	4.49E-06	2.21E+00	4.42E-02
	顶棚	上人屋面	5	250mm 混凝土	4.49E-06	2.16E+00	4.31E-02
四层介入中心 DSA 机房 (7 号)	东北墙	控制间、设备间	4.73	240mm 实心砖 +3.5mmPb 当量的 硫酸钡水泥防护层	4.49E-06	2.41E+00	4.82E-02
	东南墙	走廊	5.22		4.49E-06	1.98E+00	3.96E-02
	西北墙	走廊、6 号手术室	4.8		4.49E-06	2.34E+00	4.68E-02
	西南墙	8 号手术室	4.85		4.49E-06	2.29E+00	4.59E-02
	防护门	走廊	5.22	5.5mmPb 电动推拉门	4.49E-06	1.98E+00	3.96E-02
		走廊	4.8	5.5mmPb 手动平开门	4.49E-06	2.34E+00	4.68E-02
		控制间	4.73		4.49E-06	2.41E+00	4.82E-02
	观察窗	控制间	4.73	5.5mmPb 铅玻璃	4.49E-06	2.41E+00	4.82E-02
	顶棚	净化机房大厅	5	250mm 混凝土	4.49E-06	2.16E+00	4.31E-02
	地面	手术供应中转库	5	+2.5mmPb 硫酸钡水泥	4.49E-06	2.16E+00	4.31E-02
四层介入中心 DSA 机房 (11 号)	东北墙	控制间、设备间	4.77	240mm 实心砖 +3.5mmPb 当量的 硫酸钡水泥防护层	4.49E-06	2.37E+00	4.74E-02
	东南墙	走廊	5.81		4.49E-06	1.60E+00	3.20E-02
	西北墙	走廊	5.59		4.49E-06	1.73E+00	3.45E-02
	西南墙	12 号手术室	4.73		4.49E-06	2.41E+00	4.82E-02
	防护门	走廊	5.81	5.5mmPb 电动推拉门	4.49E-06	1.60E+00	3.20E-02
		走廊	5.59	5.5mmPb 手动平开门	4.49E-06	1.73E+00	3.45E-02
		控制间	4.77		4.49E-06	2.37E+00	4.74E-02
	观察窗	控制间	4.77	5.5mmPb 铅玻璃	4.49E-06	2.37E+00	4.74E-02
	顶棚	净化机房大厅	5	250mm 混凝土	4.49E-06	2.16E+00	4.31E-02
	地面	预留用房	5	+2.5mmPb 硫酸钡水泥	4.49E-06	2.16E+00	4.31E-02

表 5-59 ERCP 机房周围剂量当量率估算结果

机房	方位	周围环境	距离 /m	屏蔽材料	屏蔽透 射因子	摄影屏蔽 后, $\mu\text{Sv/h}$	透视屏蔽 后, $\mu\text{Sv/h}$
三层 内镜 中心 ERCP 机房	东	肠胃机房	3.48	240mm 实心砖 +3mmPb 当量 的硫酸钡水泥 防护层	1.78E-06	1.77E+00	3.54E-02
	西	储藏间、控制室	3.48		1.78E-06	1.77E+00	3.54E-02
	南	走廊	3.68		1.78E-06	1.58E+00	3.16E-02
	北	走廊	3.68		1.78E-06	1.58E+00	3.16E-02
	防护门	走廊	3.68	5mmPb 电动推拉门	1.78E-06	1.58E+00	3.16E-02
		控制室	3.48	5mmPb 手动平开门	1.78E-06	1.77E+00	3.54E-02
	观察窗	控制室	3.48	5mmPb 铅玻璃	1.78E-06	1.77E+00	3.54E-02
	楼上	走廊、ICU 治疗 2 房 间	4.5	250mm 混凝土 +2mmPb 硫酸 钡水泥	1.78E-06	1.06E+00	2.12E-02
	楼下	标本库、UPS 机 房、常温库	5		1.78E-06	8.57E-01	1.71E-02

5.3.1.2 辐射工作人员年受照剂量

(1) DSA

① DSA 技师的年受照剂量

根据表 3-9、表 3-10, 3 间 DSA 机房的预估总手术量为每年最多 3000 台, 3 间 DSA 机房配备 6 名技师轮班, 每台手术 1 人操作, 则每名技师每年进行控制操作的数量最多为 500 台, 摄影和透视工况的最大年受照时间分别为 1.4h、166.7h。根据表 5-58 的屏蔽体外剂量率计算结果, 本项目 DSA 技师的年受照剂量计算结果见表 5-60。由表可知, 本项目 DSA 技师的年受照剂量为 $1.14\text{E-}02\text{mSv}$, 低于辐射工作人员 5mSv/a 的剂量约束值。

表 5-60 DSA 技师的年受照剂量

工况		关注点	剂量率, μSv/h	居留因子 T	年受照时间, h	年受照剂量, mSv
技 师	摄影	控制室	2.41	1	1.4	3.37E-03
	透视	控制室	4.82E-02	1	166.7	8.03E-03
总计		——	——	——	——	1.14E-02

②DSA 医生的年受照剂量

根据《医用 X 射线诊断设备质量控制检测规范》(WS 76-2020)附录 B 表 B.1 规定:透视防护区检测平面上周围剂量当量率不超过 $400\mu\text{Sv/h}$ 。根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020)规定: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;介入放射学操作应为工作人员配备个人防护用品(铅橡胶围裙等)及辅助防护设施(铅悬挂防护屏等)。

根据上述规定保守假设:1)透视工况下,医生手术位置的周围剂量当量率取标准限值 $400\mu\text{Sv/h}$,且医生全居留,居留因子取 1;2)摄影工况下,医生所在位置的周围剂量当量率增加到透视工况的 10 倍,即 4mSv/h ,居留因子取 1/16。

本项目 DSA 机房为辐射工作人员配备铅橡胶围裙、铅防护眼镜、铅橡胶帽子(铅当量不低于 0.25mmPb),另外还配备铅悬挂防护屏、床侧防护帘(铅当量不低于 0.25mmPb),总的防护铅当量不低于 0.5mmPb 。在透视和摄影时(最大管电压 150kV 情况下),铅防护用品设施的屏蔽透射因子约为 0.1,即医生在透视和摄影工况下的最大受照剂量当量率水平分别为 $40\mu\text{Sv/h}$ 和 $400\mu\text{Sv/h}$ 。

根据表 3-9、表 3-10,3 间 DSA 机房的预估总手术量为每年最多 3000 台,DSA 配备 18 名医生轮班,每台手术 2 人同时操作,则每名医生每年的手术量最多为 334 台,摄影和透视工况的最大年受照时间分别为 0.9h、111.1h。

DSA 医生的年受照剂量估算结果见表 5-61。由表可知,本项目 DSA 手术医生的年受照最大剂量约为 3.35mSv/a ,低于本项目设定的 5mSv/a 的剂量约束值。

表 5-61 DSA 医生的年受照剂量

工况		操作位剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	年工作时间, h	居留因子	年有效剂量, mSv
医 生	摄影	400	0.46	1/16	1.15E-02
	透视	40	83.5	1	3.34E+00
总计		——	——	——	3.35E+00

(2) ERCP

①ERCP 技师的年受照剂量

根据表 3-9、表 3-10，ERCP 的预估手术量为每年最多 500 台，ERCP 配备 2 名技师轮班，每台手术 1 人操作，则每名技师每年进行控制操作的数量最多为 250 台，摄影和透视工况的最大年受照时间分别为 0.7h、83.3h。根据表 5-59 的屏蔽体外剂量率计算结果，本项目 ERCP 技师的年受照剂量计算结果见表 5-62。由表可知，本项目 ERCP 技师的年受照剂量为 $4.19\text{E-}03\text{mSv}$ ，低于辐射工作人员 5mSv/a 的剂量约束值。

表 5-62 ERCP 技师的年受照剂量

工况	关注点	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	居留因子 T	年受照时间, h	年受照剂量, mSv
技师	摄影	1.77E+00	1	0.7	1.24E-03
	透视	3.54E-02	1	83.3	2.95E-03
总计	——	——	——	——	4.19E-03

②ERCP 医生的年受照剂量

根据表 3-9、表 3-10，ERCP 的预估手术量为每年最多 500 台，ERCP 配备 4 名医生轮班，每台手术 2 人操作，则每名医生每年的手术量最多为 250 台，摄影和透视工况的最大年受照时间分别为 0.7h、83.3h。ERCP 医生的年受照剂量估算结果见表 5-63。由表可知，本项目 ERCP 手术医生的年受照最大剂量约为 3.35mSv/a ，低于本项目设定的 5mSv/a 的剂量约束值。

表 5-63 ERCP 医生的年受照剂量

工况		操作位剂量率, μSv/h	年工作时间, h/a	居留因子	年有效剂量, mSv
医 生	摄影	400	0.7	1/16	1.75E-02
	透视	40	83.3	1	3.33E+00
总计		——	——	——	3.35E+00

5.3.1.3 公众受照剂量

本项目 DSA、ERCP 周围公众的年受照剂量计算结果见表 5-64，由表可知，本项目 DSA、ERCP 周围公众的年受照剂量最大为 $7.73\text{E-}03\text{mSv}$ ，低于本项目公众

的年剂量约束值 0.1mSv。

表 5-64 DSA、ERCP 周围公众的年受照剂量

机房	方位	周围环境	透视剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	摄影剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	透视时间,h	摄影时间,h	居留因子	年有效剂量,mSv
四层介入中心 DSA (2号)	东北	走廊	3.63E-02	1.82E+00	250	1.39	1/5	2.32E-03
	东南	走廊、3号手术室	4.84E-02	2.42E+00	250	1.39	1/2	7.73E-03
	西北	设备间、1号手术室	4.49E-02	2.25E+00	250	1.39	1/2	7.18E-03
	西南	走廊	1.91E-02	9.56E-01	250	1.39	1/5	1.22E-03
	楼上	上人屋面	4.31E-02	2.16E+00	250	1.39	1/20	6.89E-04
	楼下	试剂准备间、样本制作间	4.31E-02	2.16E+00	250	1.39	1/20	6.89E-04
四层介入中心 DSA (7号)	东北	设备间	4.82E-02	2.41E+00	250	1.39	1/20	7.70E-04
	东南	走廊	3.96E-02	1.98E+00	250	1.39	1/5	2.53E-03
	西北	走廊、6号手术室	4.68E-02	2.34E+00	250	1.39	1/2	7.48E-03
	西南	8号手术室	4.59E-02	2.29E+00	250	1.39	1/2	7.33E-03
	楼上	净化机房大厅	4.31E-02	2.16E+00	250	1.39	1/20	6.89E-04
	楼下	手术供应中转库	4.31E-02	2.16E+00	250	1.39	1/20	6.89E-04
四层介入中心 DSA (11号)	东北	设备间	4.74E-02	2.37E+00	250	1.39	1/20	7.57E-04
	东南	走廊	3.20E-02	1.60E+00	250	1.39	1/5	2.04E-03
	西北	走廊	3.45E-02	1.73E+00	250	1.39	1/5	2.21E-03
	西南	12号手术室	4.82E-02	2.41E+00	250	1.39	1/2	7.70E-03
	楼上	净化机房大厅	4.31E-02	2.16E+00	250	1.39	1/20	6.89E-04
	楼下	预留用房	4.31E-02	2.16E+00	250	1.39	1/20	6.89E-04
二层内镜中心 ERCP	东	肠胃机房	3.54E-02	1.77E+00	167	1.39	1/2	4.19E-03
	西	储藏间	3.54E-02	1.77E+00	167	1.39	1/20	4.19E-04
	南	走廊	3.16E-02	1.58E+00	167	1.39	1/5	1.49E-03
	北	走廊	3.16E-02	1.58E+00	167	1.39	1/5	1.49E-03
	楼上	走廊、ICU 治疗 2 房间	4.31E-02	2.16E+00	167	1.39	1/2	5.10E-03
	楼下	标本库、UPS 机房、常温库	4.31E-02	2.16E+00	167	1.39	1/20	5.10E-04

5.3.2 事故工况的环境影响分析

DSA、ERCP 可能发生的事故主要是射线装置正常工作时，非手术人员误留、误入机房，导致发生误照射。

针对上述事故风险，应从如下方面准备：严格执行门机联锁、急停开关等辐射安全措施定期检查制度，并将检查结果记录备案。一旦发现门机联锁系统或急停开关存在故障，应立即停止工作，组织技术人员对其进行检查维修，只有在确认门机联锁系统、急停开关等辐射安全措施恢复正常后，设备方能重新投入使用。

针对以上可能发生的事故风险，医院应根据发生辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围，制定辐射事故应急预案，依照相关规定，当发生或发现辐射事故后，当事人应立即向单位的辐射安全负责人和法定代表人报告，医院应立即启动本单位的辐射事故应急措施，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门和公安部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。

5.4 模拟定位 CT 机

5.4.1 正常运行的环境影响分析

5.4.1.1 辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平

本项目质子治疗室使用的 2 台轨道 CT 机使用期间的环境影响已经包含在质子治疗系统环境影响分析中。因此，本节仅对地下二层放疗科使用的 2 台模拟定位 CT 机使用期间的环境影响进行分析。

由于本项目模拟 CT 的厂家型号未定，故本次评价参考西门子的 CT 设备在 140kV 工况下周围剂量率分布曲线数据：1m 处的杂散辐射为 $0.052 \mu\text{Gy/mAs}$ （垂直）和 $0.051 \mu\text{Gy/mAs}$ （水平），CT 扫描通常不超过 300mA，故 1m 处的杂散辐射剂量率最高约 56.16mGy/h 。其它厂家的剂量率分布曲线类似，杂散辐射水平相近，故以此为例评价模拟 CT 运行时的附加辐射影响。

本项目模拟 CT 机房四周墙体为 240mm 实心砖+3mmPb 当量的硫酸钡水泥防护层，顶板和底板为 250mm 混凝土+2mmPb 硫酸钡水泥、防护门及观察窗的等效铅厚度均不低于 2.5mmPb，根据 GBZ 130-2020 附录 C 的公式(C.1)可算得 140kV

下的衰减因子约为 $3.43\text{E-}04$ 。上述 CT 出束时屏蔽体外剂量率计算结果见表 5-65，最大为 $2.00\mu\text{Gy/h}$ ，满足剂量率控制水平。

表 5-65 模拟 CT 出束时屏蔽体外剂量率计算结果

机房	关注点位置	1m 处杂散辐射剂量率, mGy/h	衰减因子 B	距离, m	屏蔽体外剂量率, $\mu\text{Gy/h}$
模拟 CT (西侧)	东西墙外	56.16	$3.43\text{E-}04$	3.10	$2.00\text{E+}00$
	南北墙外	56.16	$3.43\text{E-}04$	4.05	$1.17\text{E+}00$
	顶板上方	56.16	$3.43\text{E-}04$	5.00	$7.71\text{E-}01$
	底板下方	56.16	$3.43\text{E-}04$	5.00	$7.71\text{E-}01$
模拟 CT (东侧)	东西墙外	56.16	$3.43\text{E-}04$	3.30	$1.77\text{E+}00$
	南北墙外	56.16	$3.43\text{E-}04$	4.05	$1.17\text{E+}00$
	顶板上方	56.16	$3.43\text{E-}04$	5.00	$7.71\text{E-}01$
	底板下方	56.16	$3.43\text{E-}04$	5.00	$7.71\text{E-}01$

5.4.1.2 工作人员年受照剂量

模拟定位 CT 机的工作人员受照剂量计算已经包含在 5.2.1.3.2.1 节中，由计算结果可知，模拟定位 CT 机运行期间对工作人员年受照剂量低于剂量约束值 5mSv/a 。

5.4.1.3 公众年受照剂量

模拟 CT 机房周围公众的年受照剂量计算结果见表 5-66，由下表可知，模拟 CT 机房周围公众的年受照剂量最大为 $2.05\text{E-}02\text{mSv}$ ，低于本项目公众的年剂量约束值 0.1mSv 。

表 5-66 模拟定位 CT 机房周围公众受照剂量计算结果

机房名称	位置	周围环境	剂量率, mSv/h	居留因子	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
地下二层放疗科模拟定位 CT 机房 (西侧)	北墙	走廊	$1.17\text{E-}03$	1/5	87.5	$2.05\text{E-}02$
	东墙	更衣间	$2.00\text{E-}03$	1/20	87.5	$8.75\text{E-}03$
		设备预留上下水	$2.00\text{E-}03$	1/20	175	$1.75\text{E-}02$
	西墙	VIP 等候区、卫生间	$2.00\text{E-}03$	1/20	87.5	$8.75\text{E-}03$
	顶棚	车道	$7.71\text{E-}04$	1/40	87.5	$1.69\text{E-}03$
	底板	停车位	$7.71\text{E-}04$	1/40	87.5	$1.69\text{E-}03$
地下二	北墙	走廊	$1.17\text{E-}03$	1/5	87.5	$2.05\text{E-}02$

层放疗 科模拟 定位 CT 机 房（东 侧）	东墙	走道	1.77E-03	1/5	87.5	3.10E-02
	西墙	更衣间	1.77E-03	1/20	87.5	7.74E-03
	顶棚	设备物资库房	7.71E-04	1/20	87.5	3.37E-03
	底板	停车位	7.71E-04	1/40	87.5	1.69E-03

5.4.2 事故影响分析

（1）事故类型

模拟定位 CT 机运行期间，可能出现的辐射事故（事件）类型如下：

- 1) 工作人员或病人家属在防护门关闭前尚未撤离机房，模拟定位 CT 机运行可能产生误照射。
- 2) 安全装置发生故障状况下，人员误入正在运行的 CT 模拟定位机机房内。
- 3) 滥用 X 射线对患者进行诊断、治疗，造成病员受到不必要的照射。

（2）风险防范措施

- 1) 按操作规程定期对各个联锁装置进行检查，发现故障及时清除，严禁在警示灯失效的情况下违规操作。
- 2) 撤离机房时清点人数，必须按程序对机房进行全视角搜寻，对滞留机房内的无关人员强行劝离。有外来人员进入时，工作人员应根据情况，采取急停或相应措施，防止外来人员受到误照射。
- 3) 辐射工作人员必须加强辐射安全与防护知识培训，提高防护技能，避免犯常识性错误；严格遵守操作规程和规章制度；管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。
- 4) 医院做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

5.5 PET 药物制备区

5.5.1 回旋加速器正常运行环境影响

回旋加速器在运行时，产生的中子、 γ 射线以及因中子活化而产生的感生放射性，对人产生直接外照射。

5.5.1.1 机房周围剂量率水平（透射）

5.5.1.1.1 计算公式

本项使用的回旋加速器为住友生产的 HM-10HC+ 型自屏蔽式回旋加速器，质子最大能量为 10MeV，最大束流强度为 100 μ A。根据《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)附录 I 中“1.3 自屏蔽回旋加速器机房屏蔽估算方法”开展贯穿辐射的估算，估算公式如下：

$$\dot{H}_R = \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 \cdot \left(\dot{H}_n \times 10^{-x/TVL_n} + \dot{H}_\gamma \times 10^{-x/TVL_\gamma} \right) \quad (\text{公式 5-7})$$

式中：

$\dot{H}_R$ -回旋加速器室外关注点剂量率，单位为微希沃特每小时(μ Sv/h)；

R_0 -参考点距靶心的距离，单位为米(m)；

R -屏蔽墙外关注点距靶心的距离，单位为米(m)；

$\dot{H}_n$ -参考点 r_0 处的中子剂量率，单位为微希沃特每小时(μ Sv/h)，源自生产厂家提供的泄漏辐射剂量等高线；

x -屏蔽墙厚度，单位为厘米(cm)；

TVL_n -中子射线的十分之一减弱层厚度，单位为厘米(cm)；

$\dot{H}_\gamma$ -参考点 r_0 处的 γ 射线剂量率，单位为微希沃特每小时(μ Sv/h)，源自生产厂家提供的泄漏辐射剂量等高线；

TVL_{r-γ} 射线的十分之一减弱层厚度，单位为厘米(cm)。

5.5.1.1.2 相关参数选取

(1) H_n 、 H_r

根据生产厂家住友提供的 HM-HC+自屏蔽型回旋加速器的屏蔽设计技术文件，本项目回旋加速器正常运行状况下，自屏蔽体外 1m 处中子辐射剂量率和 γ 辐射剂量率见表 5-67，分布图见图 5-16~图 5-18。

表 5-67 HM-HC+自屏蔽型回旋加速器自屏蔽体外 1m 处中子辐射剂量率和 γ 辐射剂量率

位置	距靶距离, m	中子剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	γ 剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	总和, $\mu\text{Sv/h}$
加速器前面	2.03	6.70	34.6	41.30
加速器左侧	1.87	30.30	42.5	72.80
加速器后面	2.01	14.10	15.9	30.00
加速器右侧	3.24	112.70	55.9	168.60
加速器顶部	2.20	14.40	16.5	30.90

HM-10 @100 μ A

• Total

中子、 γ 剂量率总和

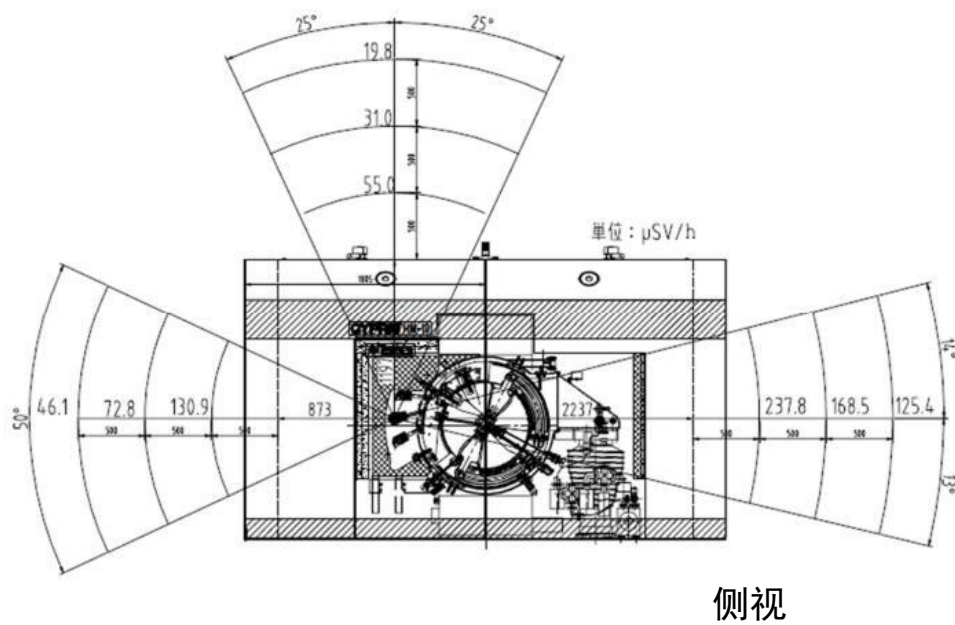
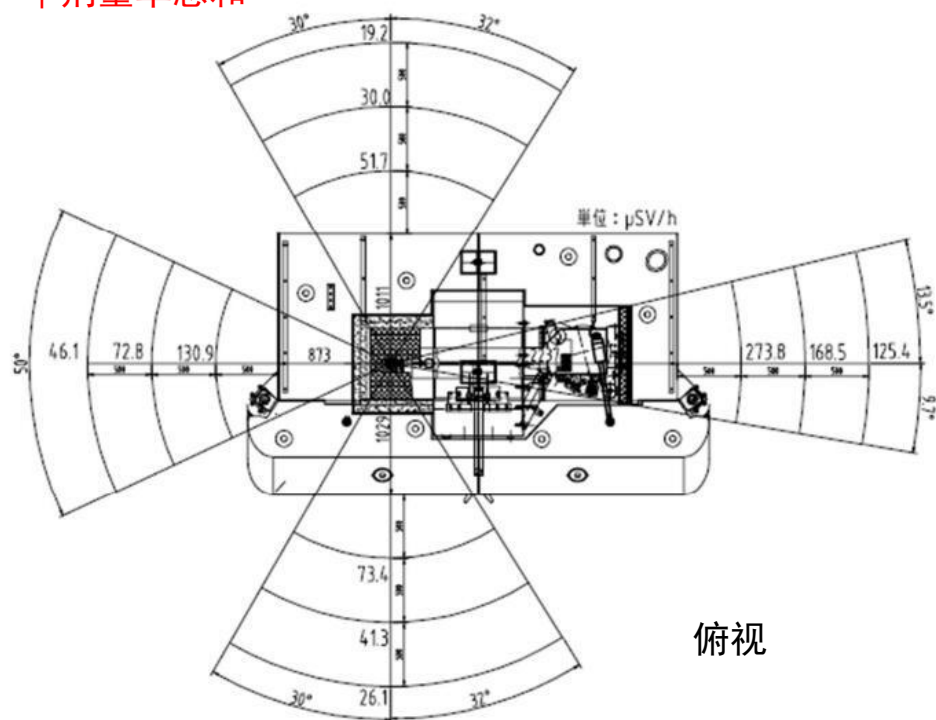


图 5-16 中子、 γ 剂量率总和分布图

• Neutron

中子

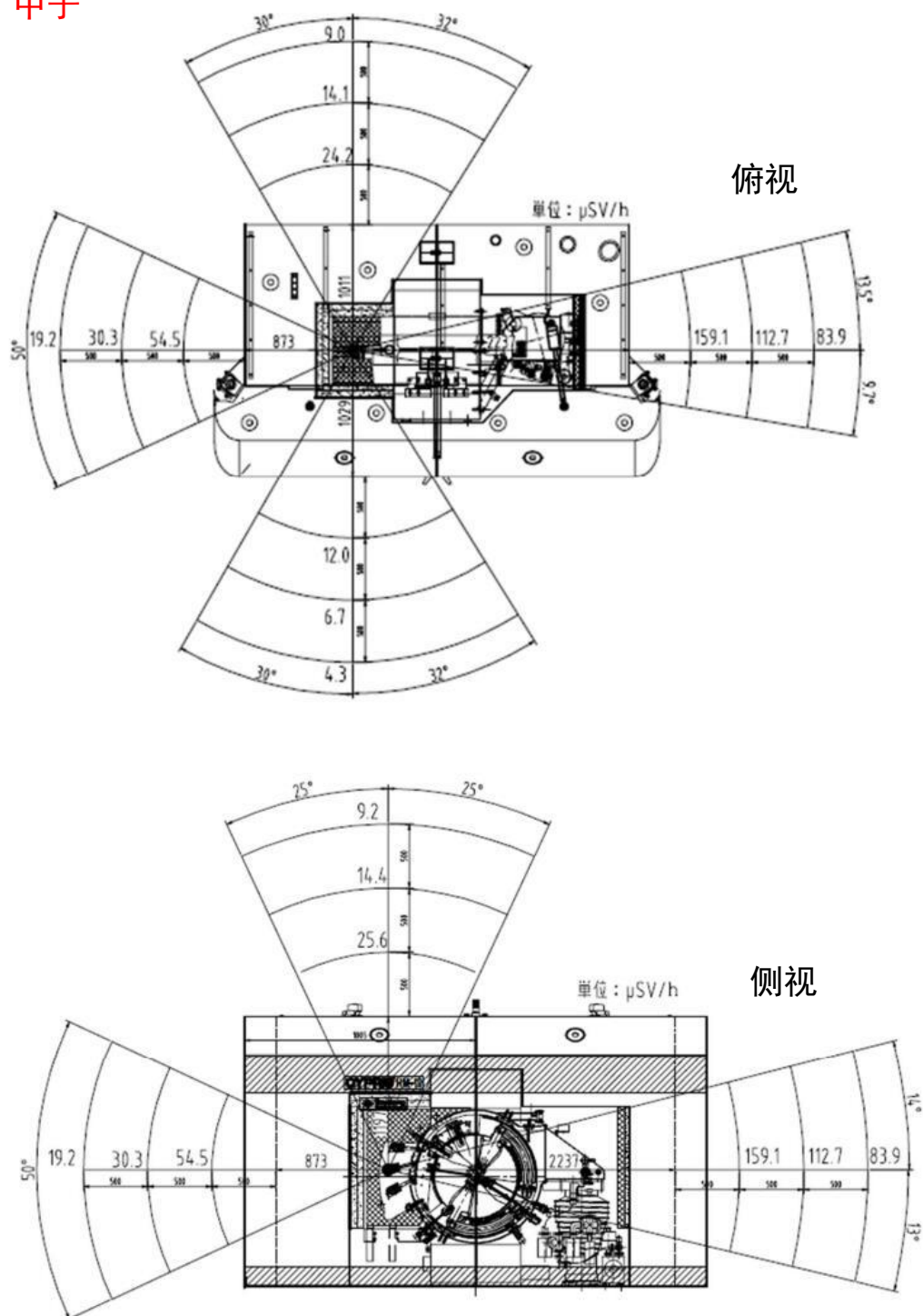


图 5-17 中子剂量率分布图

• Gamma

Y

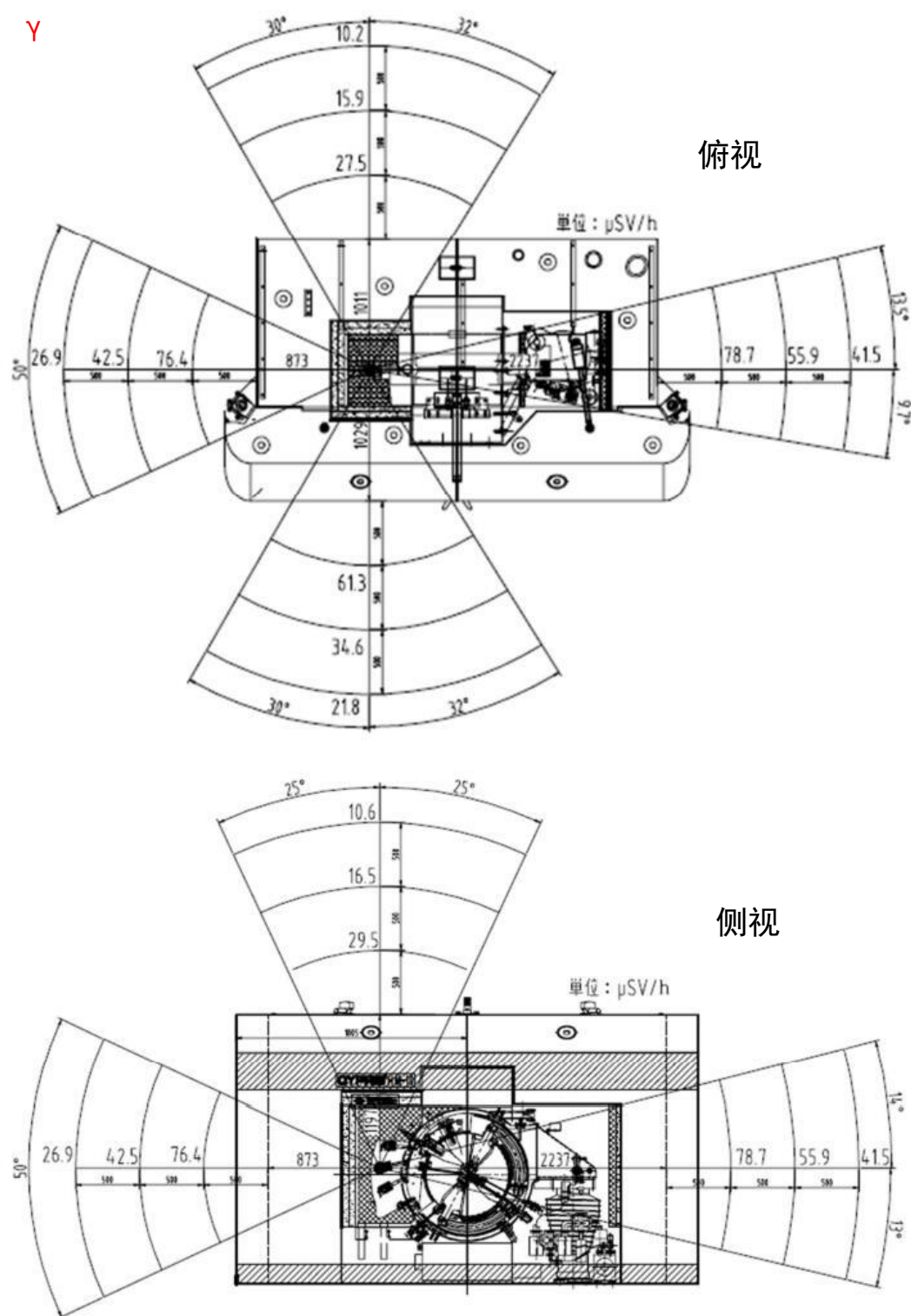


图 5-18 γ 剂量率分布图

(2) TVL_n、TVL_r

本项目回旋加速器质子最大能量为 10MeV，根据《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)附录 I 可知，对 11MeV 回旋加速器泄露辐射 γ 射线的能量约为 8MeV，中子的能量约为 5MeV。本项目回旋加速器最大能量为 10MeV，保守按 11MeV 进行估算，故本次评价的 TVL_n、TVL_r 取自《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)附录 I 中表 1.3，即混凝土(密度 2.35g/cm³)的 γ 射线的十分之一值屏蔽层厚度约为 38cm，中子的十分之一值屏蔽层厚度约为 43cm；铅(密度 11.3g/cm³)的 γ 射线的十分之一值屏蔽层厚度约为 5cm，中子的十分之一值屏蔽层厚度约为 47.8cm。

5.5.1.1.3 估算结果

本项目加速器机房屏蔽体外剂量率关注点示意图见图 5-19，估算结果见表 5-68。

表 5-68 加速器机房周围关注点剂量率估算结果

关注点		环境描述	墙体设计, cm 混凝土	R, m	R ₀ ,m	H _n , μSv/h	H _r , μSv/h	H _R , μSv/h
A1	加速器前面	控制室、水冷机房	90	4.45	2.03	6.70	34.60	4.21E-02
A2	控制区（加速器前面）	控制室，工作人员操作位	90	5.8	2.03	6.70	34.60	2.48E-02
B	加速器左侧	钢瓶间、预留间	90	4.54	1.87	30.30	42.50	7.26E-02
C	加速器后面	医疗废物间	90	4.55	2.01	14.10	15.90	3.55E-02
D1	加速器右侧	热室后区	90	4.67	3.24	112.70	55.90	5.53E-01
D2	加速器右侧（热室操作区）	热室操作区	93	6.4	3.24	112.70	55.90	2.50E-01
E	迷道门外	迷道门	36.6	5.6	2.03	6.70	34.60	6.19E-01
F	加速器顶部	大型设备运输路径、机房	60	3.71	2.20	14.40	16.50	3.57E-01

$$H(r_1) = 2H_0(r_0)(r_0/r_1)^2 \quad (\text{公式 5-8})$$

其中：

$H(r_1)$ 代表第一折迷道出口处的中子剂量当量（Sv）；

$H_0(r_0)$ 代表迷宫内入口处的中子剂量当量（Sv）；

r_0 是从靶到迷道内入口的距离（m）；

r_1 是从靶到第一折迷道出口的距离（m）。

对于第二折及以上弯折的迷道内中子剂量当量的计算公式为：

$$H(r_i) = \frac{e^{-r_i/0.45} + 0.022A_i^{1.5} e^{-r_i/2.35}}{1 + 0.022A_i^{1.5}} H_{0i} \quad (\text{公式 5-9})$$

其中 $H(r_i)$ 代表第 i 折迷道出口处的中子剂量当量（Sv）；

H_{0i} 代表第 i 折迷道入口处的中子剂量当量（Sv）；

r_i 是第 i 折迷道长度（m）；

A_i 是第 i 折迷道的截面积（m²）。

根据实际计算需求，本项目估算各点位处的剂量率，因此将公式中的源项转换成剂量率，第一折迷道出口处的剂量率结果见下表。

表 5-69 第一折迷道出口处剂量率估算结果

$H_0(r_0), \mu\text{Sv/h}$	r_0, m	r_1, m	$H_{r1}, \mu\text{Sv/h}$
6.70E+00	2.03	3.6	4.26E+00

表 5-70 各折迷道出口处剂量率估算结果

r_i, m	A_i, m^2	$H_{0i}, \text{Sv/h}$	$H(r_i), \text{Sv/h}$
i=2	1.65	7	4.26E+00
i=3	2.1	6	5.42E-01

通过上表可知，迷道门外中子散射所致剂量率为 4.50E-02μSv/h，根据《医用

加速器场所中子和感生 γ 光子剂量当量的计量分析》，其推荐在使用 Tesch 方法估算时乘以 2 倍安全系数，因此道门外中子散射所致剂量率按 $9.0\text{E-}02\mu\text{Sv/h}$ 考虑。

5.5.1.3 加速器机房周围剂量率小结

综合考虑透射和散射，加速器机房周围各关注点剂量率详见表 5-71，各关注点剂量率均低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

表 5-71 加速器机房周围各关注点剂量率

关注点		环境描述	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
A1	加速器前面	控制室、水冷机房	4.21E-02
A2	控制区（前面）	控制室，工作人员操作位	2.48E-02
B	加速器左侧	钢瓶间、预留间	7.26E-02
C	加速器后面	医疗废物间	3.55E-02
D1	加速器右侧	热室后区	5.53E-01
D2	加速器右侧（热室操作区）	热室操作区	2.50E-01
E	迷道门外	迷道门	7.09E-01
F	加速器顶部	大型设备运输路径、机房	3.57E-01

5.5.1.4 感生放射性气体

感生放射性气体是装置运行期间中子与空气的作用产生的，主要是 ^{11}C （半衰期 20min）、 ^{13}N （半衰期 10min）、 ^{15}O （半衰期 2.1min）和 ^{41}Ar （半衰期 110min），其中关键核素为 ^{41}Ar ，对环境的影响最大，故本项目以中子与空气作用产生的 ^{41}Ar 做具体分析。

（1）机房放射性气体排放量

根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻以及运行 t 时间，再停机通风 t_c 时间后，房间内空气活化产生的感生放射性核素活度可由下面的公式计算得到：

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) \quad (\text{公式 5-10})$$

$$C_{t_c} = C_t \cdot e^{-(\lambda+r_2)t_c} \quad (\text{公式 5-11})$$

$$N = \frac{\rho}{M} \times f \times N_A \quad (\text{公式 5-12})$$

由于空气中感生放射性核素的半衰期相对于装置的运行时间较短，核素的浓度很容易达到饱和，因此，可将上式简化为计算饱和浓度，用饱和浓度评价也是偏安全的。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi \quad (\text{公式 5-13})$$

式中，

C_t 为装置运行 t 时间后，停机时刻房间内空气中感生放射性核素的活度浓度， Bq/cm^3 ；

C_{t_c} 为装置运行 t 时间，停机通风 t_c 时间后，房间内空气中感生放射性核素的活度浓度， Bq/cm^3 ；

λ 为放射性核素的衰变常数， s^{-1} ； $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ ；

r_1 为正常运行时房间内的换气次数， $1.44\text{E-}03\text{s}^{-1}$ ；

r_2 为停机通风时房间内的换气次数， $1.44\text{E-}03\text{s}^{-1}$ ，假设停机通风量与开机一致；

N 为单位体积空气中靶核的数目，个/ cm^3 ，其估算结果见表 5-72；

σ 为靶核的活化截面， cm^2 ， $6.60\text{E-}25 \text{ cm}^2$ ，参考献《Dosimetry for radiological protection at high energy particle accelerators. In: Kase KR, Bjarngard BE, Attix FH, eds. The dosimetry of ionizing radiation, Volume III..New York, NY:Academic Press;1990:1-161. Swanson WP, Thomas RH.》和文献《Induced Radioactivity at Accelerators, Submitted to: Proceedings of the Health Physics Society 2008 Professional Development School- Topics in Accelerator Health Physics(Oakland CA, January 2008), FERMILAB-PUB-07-201-ESH. J.Donald Cossairt》；

ϕ 为中子注量率， $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ， $9.39\text{E+}06 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ；

ρ 为空气的密度, g/cm³;

M 为靶核的原子质量, g;

f 为母核在空气中的质量份额;

NA 为阿伏伽德罗常数, 6.023E+23。

表 5-72 单位体积空气中靶核数目的计算结果

核素	M , g	f	ρ , g/cm ³	θ , %	NA	N , 个/cm ³
⁴⁰ Ar	40	1.30E-02*	1.21E-03	99.6	6.02E+23	2.37E+17

备注: 参考 NCRP NO.144 报告 P344 Table 6.

经上式计算, 可得加速器机房运行期间放射性气体 ⁴¹Ar 的浓度见下表。

表 5-73 加速器室空气感生放射性核素的活度浓度, Bq/m³

核素	年排放量
⁴⁰ Ar	40

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”, 加速器运行期间和停机通风期间向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由下式计算。

$$\begin{aligned}
 Q_t &= \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) R_t dt = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \int_0^t (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) dt \\
 &= \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \left(t - \frac{1}{\lambda + r_1} + \frac{e^{-(\lambda + r_1)t}}{\lambda + r_1} \right)
 \end{aligned}
 \tag{公式 5-14}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{tc} &= \int_0^{t_c} C_{tc} R_{tc} dt = \int_0^{t_c} C_t e^{-(\lambda + r_2)t_c} R_{tc} dt = C_t R_{tc} \int_0^{t_c} e^{-(\lambda + r_2)t_c} dt \\
 &= C_t R_{tc} \frac{1 - e^{-(\lambda + r_2)t_c}}{\lambda + r_2}
 \end{aligned}
 \tag{公式 5-15}$$

式中,

Q_t 和 Q_{tc} 分别加速器运行 t 时间和停机排放 t_c 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度, Bq;

R_t 和 R_{tc} 分别为加速器统常运行和停机通风状态下的通风速率, cm³/s, 运行和停机时均为 3.33E+05cm³/s;

由此可计算得出本项目加速器运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量和年均排放速率，列于下表。

表 5-74 本项目加速器系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率

核素	年排放量, Bq	年平均排放速率, Bq/s
Ar-41	1.45E+12	6.73E+04

(2) 感生放射性气体排放量所致公众辐射影响预测

根据《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》（方栋和李红，2002，辐射防护，22（6）：343～348），适用于小型核设施或核技术应用项目的简单稀释模式。

若释放高度 $H \leq 2.5H_b$ ，且 $x \leq 2.5Ab^{0.5}$ （ Ab 为最靠近接收点的建筑物的最大截面积），而接收点又不在释放点所在的建筑物表面，则其他建筑物人员（3m）所处地面空气浓度为：

$$Ca_i = (P_p \cdot Q_i) / (\pi \cdot u_a \cdot H_b \cdot K) \quad (\text{公式 5-16})$$

式中，

Ca_i ：下风向 x （m）距离处的核素 i 的地面空气浓度， Bq/m^3 ，；

P_p ：一年中风吹向接受点，在扇形方位 P 的时间份额，保守取 0.25；

Q_i ：放射性核素 i 的年均排放率， $6.73E+04 Bq/s$ （表 5-74）；

u_a —释放高度上的平均风速，m/s，取值 2m/s；

H_b ：邻近最高建筑物的高度，单位 m，取 20.6m；

K ：经验常数，单位为 m，取 $K=1m$ 。

空气浸没外照射计算公式如下：

$$DA = t \cdot Sf \cdot Ci \cdot GA \quad (\text{公式 5-17})$$

式中，

DA: 年空气浸没全身剂量当量, Sv/a;

t: 年受照时间, $250 \times 8 \times 3600 \text{ s/h} \times 1/16 = 4.50 \text{ E} + 05 \text{ s/a}$;

Sf: 建筑物屏蔽产生的剂量减弱因子, 对于个体, 取 0.7;

Ci: 地面空气浓度, 130 Bq/m^3 ;

GA: 烟云浸没照射剂量当量转换因子, 对于 Ar-41 为 $6.50 \text{ E} - 14 \text{ Sv/s} \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^3$ 。

气载放射性流出物致公众的最大个人有效剂量为 $2.66 \text{ E} - 03 \text{ mSv/a}$, 关键核素为 ^{41}Ar , 关键照射途径为空气浸没外照射。

5.5.1.5 活化部件感生放射性

回旋加速器的定期维护需要更换靶膜, 由厂家专业人员负责更换。

5.5.2 药物正常制备的环境影响

5.5.2.1 源项

对 β 放射性的屏蔽要设置原子序数低的材料和原子序数高的材料, 进行 β 核素的放射性操作时, 铅柜铅玻璃可以完全屏蔽轻带电粒子。因此主要考虑 γ 射线屏蔽计算。

5.5.2.2 屏蔽体外剂量率水平

PET 药物制备区涉及 ^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga , 药物合成阶段状态均为液态, 基于放射性核素主要性能参数 (表 3-37) 以及核素使用规模 (表 3-16), 上述核素中核医学科场所主要使用 ^{18}F , 且 ^{18}F 的光子能量与 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 相近, 本小节从 ^{18}F 开展的放射性药物、分装和质检过程的辐射影响分析, ^{89}Zr 和 ^{64}Cu 中 ^{89}Zr 光子能量相对较高, 两者以 ^{89}Zr 为代表开展分析。

5.5.2.2.1 计算公式

核素制备区屏蔽体外剂量率水平可采用点源公式计算：

$$H^* = \frac{A}{R^2} \times \Gamma \times 0.1^{\frac{d}{TVL}} \quad (\text{公式 5-18})$$

式中，

H^* ——关注点处的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A——单次操作最大活度，MBq；

Γ ——照射量率常数， $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{MBq}$ ；

R——计算点与源点的距离，m；

d——屏蔽体厚度，mm。

TVL——十分之一值层厚度，mm。

5.5.2.2.2 相关参数

(1) 1 米处剂量率

核素制备预期工作负荷见表 3-15，基于此估算 1 米处剂量率计算结果见表 5-75。

表 5-75 1 米处剂量率计算结果

序号	核素名称	用途	单次最大使用量, Bq	裸源周围剂量当量率常数, $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$	裸源 1 米处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
1	^{18}F	合成	9.25E+10	0.143	1.32E+04
	^{18}F	分装	4.63E+10	0.143	6.61E+03
	^{18}F	质检	3.70E+07	0.143	5.29E+00
2	^{89}Zr	合成	1.92E+09	0.194	3.73E+02
	^{89}Zr	分装	9.62E+08	0.194	1.87E+02
	^{89}Zr	质检	3.70E+07	0.194	7.18E+00

(2) 参数选取

TVL 参数取值见表 5-76。

表 5-76 TVL 参数

核素	TVL(mm)	
	铅 (11.3g/cm ³)	混凝土 (2.35g/cm ³)
¹⁸ F	16.6	176
⁸⁹ Zr	33.97	291.41
备注：参数取自 GBZ120-2020 以及《高等电离辐射防护教程》附表 7、附表 9。		

5.5.2.3 屏蔽体外剂量率水平

PET 药物制备区的辐射屏蔽计算结果详见表 5-77 所示，根据估算可知，热室、通风橱、热室操作间、质检间屏蔽体外剂量率均低于 2.5μSv/h。

表 5-77 PET 药物制备区域屏蔽体外附加剂量率计算结果

核素	区域	屏蔽体	设计方案	距离, m	剂量率, μSv/h
F-18	合成热室	东侧柜体	70mmPb	0.8	1.25E+00
		西侧柜体	70mmPb	0.8	1.25E+00
		南侧柜体	70mmPb	0.9	9.91E-01
		北侧柜体	70mmPb	0.9	9.91E-01
		顶侧柜体	70mmPb	0.65	1.90E+00
		底侧柜体	70mmPb	0.65	1.90E+00
Zr-89	合成热室	东侧柜体	100mmPb	0.8	7.09E-01
		西侧柜体	100mmPb	0.8	7.09E-01
		南侧柜体	100mmPb	0.9	5.60E-01
		北侧柜体	100mmPb	0.9	5.60E-01
		顶侧柜体	100mmPb	0.65	1.07E+00
		底侧柜体	100mmPb	0.65	1.07E+00
F-18	分装热室	东侧柜体	100mmPb	0.8	9.78E-03
		西侧柜体	100mmPb	0.8	9.78E-03
		南侧柜体	100mmPb	0.9	7.72E-03
		北侧柜体	100mmPb	0.9	7.72E-03
		顶侧柜体	100mmPb	0.65	1.48E-02
		底侧柜体	100mmPb	0.65	1.48E-02
Zr-89	分装热室	东侧柜体	100mmPb	0.8	3.54E-01
		西侧柜体	100mmPb	0.8	3.54E-01

		南侧柜体	100mmPb	0.9	2.80E-01
		北侧柜体	100mmPb	0.9	2.80E-01
		顶侧柜体	100mmPb	0.65	5.37E-01
		底侧柜体	100mmPb	0.65	5.37E-01
F-18	热室操作间	东墙	70mmPb 柜体+370mm 混凝土	2.4	1.10E-03
		西墙	70mmPb 柜体+370mm 混凝土	1.8	1.96E-03
		南墙	70mmPb 柜体+370mm 混凝土	0.9	7.83E-03
		北墙	70mmPb 柜体+370mm 混凝土	4	3.96E-04
		顶棚	70mmPb 柜体+300mm 混凝土	5	6.34E-04
		底板	70mmPb 柜体+300mm 混凝土	4	9.91E-04
		防护门	70mmPb 柜体	1.8	2.48E-01
Zr-89	热室操作间	东墙	100mmPb 柜体+370mm 混凝土	2.4	4.26E-03
		西墙	100mmPb 柜体+370mm 混凝土	1.8	7.57E-03
		南墙	100mmPb 柜体+370mm 混凝土	0.9	3.03E-02
		北墙	100mmPb 柜体+370mm 混凝土	4	1.53E-03
		顶棚	100mmPb 柜体+300mm 混凝土	5	1.70E-03
		底板	100mmPb 柜体+300mm 混凝土	4	2.66E-03
		防护门	100mmPb 柜体	1.8	1.40E-01
F-18	质检通风橱	东侧柜体	50mmPb	0.8	8.04E-03
		西侧柜体	50mmPb	0.8	8.04E-03
		南侧柜体	50mmPb	0.9	6.35E-03
		北侧柜体	50mmPb	0.9	6.35E-03
		顶侧柜体	50mmPb	0.65	1.22E-02
		底侧柜体	50mmPb	0.65	1.22E-02
Zr-89	质检通风橱	东侧柜体	50mmPb	0.8	3.91E-01
		西侧柜体	50mmPb	0.8	3.91E-01
		南侧柜体	50mmPb	0.9	3.09E-01
		北侧柜体	50mmPb	0.9	3.09E-01
		顶侧柜体	50mmPb	0.65	5.92E-01
		底侧柜体	50mmPb	0.65	5.92E-01
Zr-89	质检间	东墙	50mmPb 柜体+240mm 混凝土	2.8	4.81E-03
		西墙	50mmPb 柜体+240mm 混凝土	2.8	4.81E-03
		南墙	50mmPb 柜体+370mm 混凝土	4.3	2.04E-03
		北墙	50mmPb 柜体+370mm 混凝土	1.14	1.04E-02
		顶棚	50mmPb 柜体+180mm 混凝土	5	2.42E-03
		底板	50mmPb 柜体+130mm 混凝土	4	5.61E-03
		防护门	100mmPb 柜体	2.8	3.19E-02
F-18	防护罐外		40mmPb	0.5	8.24E+00
Zr-89	防护罐外		40mmPb	0.5	1.02E+01

5.5.3 工作人员受照剂量

本项目 PET 药物制备区辐射工作人员受照剂量估算结果见表 5-78。

表 5-78 PET 药物制备区工作人员年受照剂量计算结果

工作人员	源项		剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	受照时间, h	年受照剂量, mSv/a	总计, mSv/a
回旋加速器运行 (2 人)	加速器运行		2.48E-02	450	0.01	0.04
药物制备 (2 人)	药物合成	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	1.25E+00	450	5.64E-01	1.44
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	7.09E-01	100	7.09E-02	
	药物分装	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	9.78E-03	225	2.20E-03	
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	3.54E-01	50	1.77E-02	
	药物质检	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	8.04E-03	75	6.03E-04	
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	4.81E-03	17	8.01E-05	
	药物转运	^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga	8.24E+00	75	6.18E-01	
		^{64}Cu 、 ^{89}Zr	1.02E+01	17	1.70E-01	

综上所述, 回旋加速器工作人员和药物制备工作人员年受照剂量满足本项目设定的 5mSv/a 的剂量约束要求。

5.5.4 公众受照剂量

热室操作间和质检间公众可达处主要是质检室北侧 (医生办公区域)、热室操作间顶部、质检间顶部、热室操作间底部、质检间底部, 上述位置公众受照剂量估算结果见表 5-79, PET 药物制备区周围公众受照剂量低于 0.1mSv/a 的剂量约束要求。

表 5-79 PET 药物制备区周围公众受照剂量计算结果

关注点	周围环境	主要涉及辐射活动	瞬时剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	受照时间, h	居留因子	年受照剂量, mSv
质检室北侧	医护通道	质检活动	1.04E-02	83	1/5	1.73E-04
热室操作间顶部	机房	药物制备	1.70E-03	750	1/20	6.39E-05
热室操作间底部	车位	药物制备	2.66E-03	750	1/40	4.99E-05
质检室顶部	机房	质检活动	2.42E-03	83	1/20	1.01E-05
质检室底部	车位	质检活动	5.61E-03	83	1/40	1.17E-05

5.5.5 非放射性气体环境影响

在光子的作用下，空气中的氧气可吸收辐射能量，发生辐射分解，生成氧原子，氧原子与空气中的 O₂ 结合生成 O₃，O₃ 再与空气中的 NO 结合生成 NO₂。根据 NCRP NO.144 报告，场所内的 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度可利用下式计算。本次评价主要计算回旋加速器在调试机房内带束调试期间的臭氧和氮氧化物的产生量。

$$N_{sat} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + R} \quad (\text{公式 5-19})$$

$$C = N \frac{M}{N_A} \quad (\text{公式 5-20})$$

式中，

C 为场所内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度，g/m³；

N 为房间内单位体积的气体分子个数，个/m³；

g 为空气中单位光子能量沉积形成的气体分子数，eV⁻¹；

α 为气体分子的化学分解速率，s⁻¹；

κ 为单位光子能量沉积形成的分子数目，eV⁻¹·m³；

R 为房间换气次数，s⁻¹；

M 为气体的摩尔质量，g/mol；

N_A 为阿伏伽德罗常数，6.022×10²³mol⁻¹；

I 为空气中单位体积单位时间的光子能量沉积，eV/m³·s，根据《辐射防护基础》（李星洪等，原子能出版社）P39 页公式（2.19），I 可由下式计算：

$$I = 6.25 \times 10^{18} K \rho = 6.25 \times 10^{18} \phi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) E \rho \quad (\text{公式 5-21})$$

式中，

K 为光子在空气中的比释动能率, $J/kg \cdot s$;

ϕ 为光子注量率, $个/m^2 \cdot s$; 根据厂家提供的资料, 其值为 $1.93E+07$ 个/ $m^2 \cdot s$;

ρ 为空气的密度, kg/m^3 ;

μ_{en}/ρ 为光子在空气中的质能吸收系数, m^2/kg ;

E 为光子能量, J , ($1MeV=1.6 \times 10^{-13}J$), 此处取 $10MeV$ 。

各参数取值及估算结果见表 5-80。

表 5-80 臭氧估算参数取值及估算结果

参数	取值	来源
g	O_3 : $0.103 eV^{-1}$; NO_2 : $0.048 eV^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P358
α	$2.3 \times 10^{-4} s^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P359
K	O_3 : $5.0 \times 10^{-24} eV^{-1} \cdot m^3$; NO_2 : $1.4 \times 10^{-22} eV^{-1} \cdot m^3$;	文献*
R	$1.44E-03 s^{-1}$	——
M	$M(O_3)=48 g/mol$ $M(NO_2)=46 g/mol$	——
N_A	$6.022 \times 10^{23} l/mol$	——
ρ	$1.29 kg/m^3$	——
μ_{en}/ρ	$2.966E-03 m^2/kg$	《辐射防护基础》P45 页表 2-2, 保守取 $0.5MeV$ 光子在空气中的 质能吸收系数
E	$10MeV=1.2 \times 10^{-12} J$	——
估算结果		
气体名称	估算结果, mg/m^3	控制限值, mg/m^3
O_3	2.78E-06	0.3
NO_2	1.24E-06	5

注: *取值来自文献《Advanced Photon Source: Radiological Design Considerations》(APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July 1991) P54。

根据估算结果可知, 加速器室空气中 O_3 和 NO_2 的浓度远低于控制限值。

5.5.6 事故影响分析

5.5.6.1 主要事故剂量估算

可能发生的事故为回旋加速器工作人员误留或非工作人员误闯加速器大厅。由于分区管理失效，安全联锁装置失效或工作人员误操作人员等原因，造成工作人员误留机房或非工作人员误闯正在运行的加速器大厅，致使误入人员受到超过年剂量照射。根据图 5-16 可知，加速器自屏蔽体外 50cm 处剂量率最大约 273 μ Sv/h，假设人员停留 10min，工作人员的单次事故受照剂量约为 4.55E-02mSv。

5.5.6.2 风险防范措施

5.5.6.2.1 误入加速器机房预防措施

(1) 为防止加速器工作状态下误入加速器机房，在加速器机房的防护门上安装门机联锁。只有当防护门完全关闭后，加速器才能运行、出束。

(2) 安全联锁装置定期检查、维护，确保始终保持在良好的工作状态，门机联锁正常方可开机。

(3) 在加速器工作之前，工作人员必须确认没有其他无关人员在机房内滞留，然后方可关闭门。

(4) 加速器机房外设工作状态指示灯及电离辐射危险标志，在加速器启动前，声光报警装置发出警告信号，以便人员在产生辐射前安全撤离。

(5) 加速器墙壁和控制台装有醒目的急停按钮，一旦发现异常情况，按下急停按钮可立即切断供束。

5.5.6.2.2 靶泄露预防及处理措施

(1) 实验前检查液体靶密封膜片和传输时管线的性能，确保性能良好。

(2) 如果靶物质泄漏会导致加速器主厅剂量增高，一旦发现打靶引起的异常升高，加速器运行人员应立即采取措施，立即停机。使用表面污染监测仪确定污染范围，控制现场，防止交叉污染。

(3) 由训练有素的专业工作人员进入加速器机房去污，配置合适的去污剂、合理选择去污方法，在去污过程中要防止交叉污染和扩大污染。或者控制现场等泄漏的放射性衰变到可接受安全水平，再进行处理。对去污产生的放射性废物进行收集，装入放射性废物桶暂存。现场去污人员做好个人防护，使用个人剂量报警仪和表面污染监测仪，并佩戴防护用品。

5.5.6.2.3 热室内同位素洒落处理措施

若操作不慎将放射性药物泼洒到热室地面或台面，按照操作规程，发生这类事故时，工作人员迅速使用镊子夹干的吸水纸或棉花收集洒落液（注意防止污染扩散），使用药棉擦洗污染工作台面，然后放入放射性废物桶内进行安全存贮（包括被污染的容器碎片）。

5.6 核医学科

5.6.1 正常运行环境影响

5.6.1.1 屏蔽体外剂量率计算

5.6.1.1.1 核医学科显像诊断项目

本次核医学科 PET-CT 项目拟使用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 放射性药物进行显像诊断，其中 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu 放射性药物由医院 PET 药物制备区自制， ^{124}I 放射性药物外购。SPECT-CT 项目拟使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射性药物进行显像诊断，PET-CT 项目拟使用核素用量情况及各放射性同位素主要性能参数见表 3-16 和表 3-37，根据表中数据可知，本次 PET-CT 项目中主要以 ^{18}F 为主，PET-CT 项目主要以 ^{18}F 进行分析评价，满足 ^{18}F 的辐射防护要求，即可同时满足其他核素（ ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{68}Ga ）的辐射防护要求，对于 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 核素来讲，以 ^{89}Zr 为代表开展分析评价。SPECT-CT 项目开展 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的分析。

上述核素的主要辐射源项包括 γ 射线和 β 粒子，对 β 放射性的屏蔽要设置原

子序数低的材料和原子序数高的材料，进行 β 核素的放射性操作时，铅柜、铅玻璃可以完全屏蔽轻带电粒子。因此主要考虑 γ 射线屏蔽计算。

5.6.1.1.1.1放射性药物使用过程

核素诊断区屏蔽体外剂量率水平可采用点源计算，按照《放射防护实用手册》（赵兰才、张丹枫等）资料计算公式如下：

$$\dot{H} = \frac{A}{R^2} \times \Gamma \times 0.1^{\frac{d}{TVL}} \quad (\text{公式 5-22})$$

式中，

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

A——单次操作最大活度，MBq；

Γ ——照射量率常数， $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{MBq}$ ，主要分析核素参数取值见表 5-81；

R——计算点与源点的距离，m；

d——屏蔽体厚度，mm。

TVL——十分之一值层厚度，mm，主要分析核素的 TVL 参数取值见表 5-81。

表 5-81 TVL 参数

核素	TVL, mm		
	铅（11.3g/cm ³ ）	砖（1.65g/cm ³ ）	混凝土（2.35g/cm ³ ）
¹⁸ F	16.6	263	176
⁸⁹ Zr	33.97	415	291.41
⁹⁹ Mo	20	295	207
^{99m} Tc	1	160	110
备注：参数取自《核医学放射防护要求》GBZ120-2020；《高等电离辐射防护教程》附表 7 和附表 9。			

综上，核医学科显像诊断区关键场所屏蔽体外剂量率估算结果见表 5-82。

表 5-82 核医学科显像诊断区关键场所屏蔽体外剂量率估算结果

房间	源项	屏蔽体	周围环境	屏蔽设计	距离, m	屏蔽体外 30cm 处剂量 率, $\mu\text{Sv/h}$
储源间 (F-18)	F-18, 每日接 诊人数 25 人, 按实际 使用量 2 倍备 药, 500mCi	东墙	放射性废物间	240mm 实心砖, 40mmPb 药物铅罐, 10mmPb 储源铅罐	2.30	5.95E-02
		西墙	患者卫生间	370mm 实心砖, 40mmPb 药物铅罐, 10mmPb 储源铅罐	2.30	1.91E-02
		南墙	分装/注射	240mm 实心砖, 40mmPb 药物铅罐, 10mmPb 储源铅罐	1.92	8.58E-02
		北墙	医护走廊	370mm 实心砖, 40mmPb 药物铅罐, 10mmPb 储源铅罐	1.92	2.75E-02
		顶棚	通道	300mm 混凝土, 40mmPb 药物铅罐, 10mmPb 储源铅罐	5.00	2.03E-03
		底板	车位	300mm 混凝土, 40mmPb 药物铅罐, 10mmPb 储源铅罐	4.20	2.88E-03
		防护门	通向分装/注射	4mmPb, 40mmPb 药物铅罐, 10mmPb 储源铅罐	1.92	4.03E-01
手套箱 (分装/注射室)	按每罐 药物 100mCi, F-18 分 装考虑	柜体(前后左右上下)+ 观察窗(分装柜正面)	护士操作位	50mmPb 柜体、50mmPb 观察窗	0.50	2.06E+00
手套箱 (分装/注射室)	钼铯发 生器 (Mo-99, 3.7E+10 Bq)	柜体(前后左右上下)+ 观察窗(分装柜正面)	护士操作位	20mmPb 柜体、20mmPb 观察窗, 50mmPb 发生器自带屏蔽	0.50	1.01E+00
分装/ 注射 (F-18)	按 100mCi 的 F-18 药物考 虑	东墙	放射性废物间	240mm 实心砖, 50mmPb 分装柜	4.90	2.62E-03
		西墙	患者注射位	370mm 实心砖, 50mmPb 分装柜	1.00	2.02E-02
		南墙	库房	370mm 实心砖, 50mmPb 分装柜	3.50	1.65E-03
		北墙	储源间	240mm 实心砖, 50mmPb 分装柜	1.00	6.29E-02
		顶棚	空调水泵房	300mm 混凝土, 50mmPb 分装柜	5.00	4.06E-04
		底板	车位	300mm 混凝土, 50mmPb 分装柜	4.20	5.76E-04
		防护门	通往放射性废物间/储源间	8mmPb, 50mmPb 分装柜	4.69	7.71E-03
			通往运动/急救室	15mmPb, 50mmPb 分装柜	1.30	3.80E-02
			通往卫生通过间	8mmPb, 50mmPb 分装柜	6.11	4.54E-03

分装/ 注射 (Tc-99m)	按单支 针剂 20mCi 的 F-18 药物注 射	注射窗 (SEPCT)	患者注射位	6mmPb 注射台, 6mmPb 注射 套,	0.50	8.97E-11
		护士注射位 (SEPCT)	护士	6mmPb 注射台, 6mmPb 注射 套, 0.5mmPb 铅衣	0.50	2.84E-11
分装/ 注射 (F-18)	按单支 针剂 10mCi 的 F-18 药物注 射	注射窗 (PET)	患者注射位	50mmPb 注射台, 10mmPb 注射 套	0.50	5.14E-02
		护士注射位 (PET)	护士	50mmPb 注射台, 10mmPb 注射 套, 0.5mmPb 铅衣	0.50	4.80E-02
分装/ 注射 (Zr-89)	按单支 针剂 5mCi 的 Zr-89 药 物注射	注射窗 (PET)	患者注射位	50mmPb 注射台, 10mmPb 注射 套	0.50	2.41E+00
		护士注射位 (PET)	护士	50mmPb 注射台, 10mmPb 注射 套, 0.5mmPb 铅衣	0.50	2.33E+00
运动/ 急救	按单个 患者注 射 10mCi 的 F-18 药物后 进行抢 救	东墙	分装/注射	370mm 实心砖	3.30	1.22E-01
		西墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.30	3.82E-01
		南墙	患者等候区	370mm 实心砖	3.80	9.24E-02
		北墙	患者注射区	240mm 实心砖	3.80	9.24E-02
		顶棚	空调水泵房	300mm 混凝土	5.00	2.69E-02
		底板	车位	130mm 混凝土	4.20	3.52E-01
		防护门	通往患者注射 区	15mmPb	3.30	3.90E-01
			通往分装/注射	15mmPb	3.50	3.47E-01
		抢救位	医师	0.5mmPb 铅衣	1.00	3.18E+01
运动/ 急救	按单个 患者注 射 5mCi 的 Zr-89 药物后 进行抢 救	东墙	分装/注射	370mm 实心砖	3.30	4.14E-01
		西墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.30	8.52E-01
		南墙	患者等候区	370mm 实心砖	3.80	3.13E-01
		北墙	患者注射区	240mm 实心砖	3.80	3.13E-01
		顶棚	空调水泵房	300mm 混凝土	5.00	1.31E-01
		底板	车位	130mm 混凝土	4.20	7.13E-01
		防护门	通往患者注射 区	15mmPb	3.30	1.17E+00
			通往分装/注射	15mmPb	3.50	1.04E+00
		抢救位	医师	0.5mmPb 铅衣	1.00	3.40E+01
PET/C T 注射 后候诊	4 位患 者均注 射 10mCi 的 F-18	东墙	分装/注射	370mm 实心砖	3.30	4.90E-01
		西墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.30	1.53E+00
		南墙	患者注射区	240mm 实心砖	2.80	6.81E-01
		北墙	PET/CT 机房	370mm 实心砖	2.80	6.81E-01
		顶棚	冷冻机房	300mm 混凝土	5.00	1.08E-01

	药物	底板	车位	300mm 混凝土	4.20	1.41E+00
		防护门	通往 PET/CT 机房	15mmPb	2.80	2.17E+00
			通往患者注射区	15mmPb	2.80	2.17E+00
			通往患者走廊	15mmPb	3.30	1.56E+00
PET/CT 注射后候诊	1 位患者注射 10mCi 的 Zr-89 药物	东墙	分装/注射	370mm 实心砖	3.30	4.14E-01
		西墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.30	8.52E-01
		南墙	患者注射区	240mm 实心砖	2.80	5.76E-01
		北墙	PET/CT 机房	370mm 实心砖	2.80	5.76E-01
		顶棚	冷冻机房	300mm 混凝土	5.00	1.31E-01
		底板	车位	300mm 混凝土	4.20	7.13E-01
		防护门	通往 PET/CT 机房	15mmPb	2.80	1.62E+00
			通往患者注射区	15mmPb	2.80	1.62E+00
			通往患者走廊	15mmPb	3.30	1.17E+00
VIP 候诊	1 位患者注射 10mCi 的 F-18 药物	东墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.20	1.30E-01
		西墙	车位	370mm 实心砖	3.20	4.07E-01
		南墙	卫生间	240mm 实心砖	1.95	3.51E-01
		北墙	卫生间/污洗	240mm 实心砖	1.95	3.51E-01
		顶棚	机房	300mm 混凝土	2.80	8.57E-02
		底板	车位	300mm 混凝土	5.00	2.49E-01
		防护门	通往患者走廊	8mmPb	3.20	1.10E+00
VIP 候诊	1 位患者注射 5mCi 的 Zr-89 药物	东墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.20	4.41E-01
		西墙	车位	370mm 实心砖	3.20	9.07E-01
		南墙	卫生间	240mm 实心砖	1.95	1.19E+00
		北墙	卫生间/污洗	240mm 实心砖	1.95	1.19E+00
		顶棚	机房	300mm 混凝土	2.80	4.19E-01
		底板	车位	300mm 混凝土	5.00	5.03E-01
		防护门	通往患者走廊	8mmPb	3.20	2.00E+00
PET/CT 机房	单个患者注射 10mCi 的 F-18 药物	东墙	控制室	370mm 实心砖	4.20	5.90E-02
		西墙	患者走廊	370mm 实心砖	4.20	5.90E-02
		南墙	PET/CT 注射后候诊	370mm 实心砖	4.50	5.14E-02
		北墙	设备间	370mm 实心砖	4.50	5.14E-02
		顶棚	机房	300mm 混凝土	5.00	2.10E-02
		底板	车位	300mm 混凝土	4.20	2.97E-02
		摆位处	技师摆位处	0.5mm 铅衣	0.50	9.91E+01
		观察窗	技师操作台处	10mmPb 铅玻璃	4.20	3.76E-01
		防护门	通向控制室	10mmPb	4.20	3.76E-01

			通往 PET/CT 注射后候诊	15mmPb	4.50	1.64E-01
			通向患者走廊	8mmPb	4.20	4.96E-01
PET/CT 机房	单个患者注射 5mCi 的 Zr-89 药物	东墙	控制室	370mm 实心砖	4.20	2.56E-01
		西墙	患者走廊	370mm 实心砖	4.20	5.26E-01
		南墙	PET/CT 注射后候诊	370mm 实心砖	4.50	2.23E-01
		北墙	设备间	370mm 实心砖	4.50	2.23E-01
		顶棚	机房	300mm 混凝土	5.00	1.31E-01
		底板	车位	300mm 混凝土	4.20	7.13E-01
		摆位处	技师摆位处	0.5mm 铅衣	0.50	1.36E+02
		观察窗	技师操作台处	10mmPb 铅玻璃	4.20	1.01E+00
		防护门	通向控制室	10mmPb	4.20	1.01E+00
			通往 PET/CT 注射后候诊	15mmPb	4.50	6.28E-01
			通向患者走廊	8mmPb	4.20	1.16E+00
PET/CT 留观室	按 1 位患者均注射 10mCi 的 F-18 药物（注射后 1h）	东墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.30	2.61E-01
		西墙	车位	370mm 实心砖	3.30	8.36E-02
		南墙	卫生/污洗	240mm 实心砖	2.10	2.07E-01
		北墙	SPECT/CT 留观	240mm 实心砖	2.10	2.07E-01
		顶棚	机房	300mm 混凝土	5.00	1.84E-02
		底板	车位	300mm 混凝土	4.20	2.41E-01
		防护门	通往患者走廊	8mmPb	3.30	3.05E-02
PET/CT 留观室	按 1 位患者均注射 5mCi 的 Zr-89 药物（注射后 1h）	东墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.30	4.14E-01
		西墙	车位	370mm 实心砖	3.30	4.14E-01
		南墙	卫生/污洗	240mm 实心砖	2.10	1.02E+00
		北墙	SPECT/CT 留观	240mm 实心砖	2.10	1.51E+00
		顶棚	机房	300mm 混凝土	5.00	5.03E-01
		底板	PET/CT 机房	300mm 混凝土	4.20	2.99E-01
		防护门	通往患者走廊	8mmPb	3.30	1.01E-01
病患走廊	F-18, 2 位患者均注射 10mCi 的 F-18 药物（注射后 1h）	墙外	机房/车位	370mm 混凝土	1.00	1.82E+00
		顶棚	机房车位	300mm 混凝土	5.00	3.67E-02
		底板	洗衣房	130mm 混凝土	4.20	4.81E-01
		防护门	患者入口	8mmPb	10.00	1.53E-01
			北侧防护门	8mmPb	5.00	6.13E-01
			患者出口	8mmPb	3.00	1.70E+00
运动/急救	单个患者注射	东墙	分装/注射	370mm 实心砖	3.30	6.85E-03
		西墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.30	4.45E-02

	20mCi 的 Tc-99m 药物后进行抢救	南墙	患者等候区	370mm 实心砖	3.80	3.35E-02
		北墙	患者注射区	240mm 实心砖	3.80	3.35E-02
		顶棚	空调水泵房	300mm 混凝土	5.00	1.15E-03
		底板	车位	130mm 混凝土	4.20	1.63E-03
		防护门	通往患者注射区	15mmPb	3.30	1.41E-15
			通往分装/注射	15mmPb	3.50	1.25E-15
		抢救位	医师	0.5mmPb 铅衣	1.00	4.84E+00
SPECT/CT 注射后候诊	10 位患者均注射 20mCi 的 Tc-99m 药物	东墙	患者走廊	240mm 实心砖	2.80	6.18E-01
		西墙	车位	370mm 实心砖	2.80	9.51E-02
		南墙	患者等候区	370mm 实心砖	5.30	2.66E-02
		北墙	卫生间	240mm 实心砖	5.30	1.72E-01
		顶棚	机房	300mm 混凝土	5.00	1.15E-02
		底板	车位	130mm 混凝土	4.20	5.71E-01
		防护门	通往患者走廊	3mmPb	2.80	1.95E-02
SPECT/CT 机房	单个患者注射 20mCi 的 Tc-99m 药物	东墙	控制室	370mm 实心砖	4.20	4.23E-03
		西墙	患者走廊	370mm 实心砖	4.20	4.23E-03
		南墙	设备间	370mm 实心砖	3.80	5.17E-03
		北墙	预留机房	370mm 实心砖	3.80	5.17E-03
		顶棚	机房	300mm 混凝土	5.00	1.15E-03
		底板	车位	300mm 混凝土	4.20	1.63E-03
		摆位处	技师摆位处	0.5mmPb 铅衣	0.50	1.94E+01
		观察窗	技师操作台处	3mmPb 铅玻璃	4.20	8.68E-04
		防护门	通向控制室	3mmPb	4.20	8.68E-04
		防护门	通向患者走廊	3mmPb	4.20	8.68E-04
SPECT/CT 留观室	按 1 位患者均注射 20mCi 的 Tc-99m 药物	东墙	患者走廊	240mm 实心砖	3.40	4.19E-02
		西墙	车位	370mm 实心砖	3.40	6.45E-03
		南墙	PET/CT 留观	240mm 实心砖	2.10	1.10E-01
		北墙	新风机房	370mm 实心砖	2.10	1.69E-02
		顶棚	机房	300mm 混凝土	5.00	1.15E-03
		底板	车位	300mm 混凝土	4.20	1.63E-03
		防护门	通向患者走廊	3mmPb	3.40	1.33E-03

5.6.1.1.1.2 PET-CT、SPECT-CT 中 CT 运行过程

本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 机房还需考虑 CT 运行时产生的 X 射线辐射屏蔽影响。根据前文分析可知，本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 机房四周墙体、顶棚、底板、防护门和观察窗采取的辐射屏蔽铅当量厚度远大于《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中 2.5mm 铅当量的防护要求，最小单边长度及最小有效使用

面积也均能满足《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020)要求。

参照普通 CT 周围的剂量率分布曲线, 1m 处的杂散辐射为 0.052μGy/mAs(垂直)和 0.051μGy/mAs(水平), CT 扫描通常不超过 300mA, 故 1m 处的杂散辐射剂量率最高约 56.16mGy/h, 故以此为例评价 CT 运行时叠加辐射影响。

根据本项目 CT 机房的屏蔽设计, 1)机房周围铅当量不小于 4.9mmPb, 透射系数小于 2.36E-06(辐射防护手册第一分册, 图 10.5g), 按照关注点的最近距离不低于 3.8m 估算, CT 运行所致周围的附加剂量率不大于 0.01μGy/h, 结合表 5-82, SPECT/CT 和 PET/CT 机房对患者进行显像期间的叠加剂量率不超过 0.72μGy/h。

综上, 核医学科显像诊断场所屏蔽体外周围剂量当量率可满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)中相关要求。

5.6.1.1.2 ⁸⁹Sr、²²³Ra 核素治疗项目

核医学科门诊治疗用核素包括 ⁸⁹Sr、²²³Ra, ⁸⁹Sr 为 β 核素, ²²³Ra 为 α 核素, 对于核素自身衰变产生的 α、β 射线, 其穿透能力弱, 易屏蔽, 对其功能房间和防护门无特殊屏蔽要求, 主要分析 β 粒子产生的韧致辐射的辐射影响, ⁸⁹Sr、²²³Ra 放射性药物治疗过程中患者在门诊注射药物后离院。

(1) β 射线最大射程计算公式

根据《辐射防护导论》(主编:方杰), β 粒子在空气中的射程 R(g/cm²)为:

$$R = 0.412E_{max}^{1.265-0.0954E_{max}} \quad (\text{公式 5-23})$$

表 5-83 ⁸⁹Sr 产生的 β 射线在物质中的最大射程

材料	密度, g/cm ³	最大射程, cm
组织/水	1.00	0.68
空气	1.29E-03	525.11
普通玻璃	2.40	0.28
有机玻璃	1.18	0.57
铅	11.30	0.06

(2) 韧致辐射屏蔽计算

根据《辐射防护导论》(主编:方杰)中相关公式, 剂量率估算公式如下:

$$D_0 = 4.58 \times 10^{-14} \cdot A \cdot Z_e \cdot \left(\frac{E_b}{r}\right)^2 \cdot \left(\frac{\mu_{em}}{\rho}\right) \quad (\text{公式 5-24})$$

式中:

D_0 : 屏蔽层中 β 粒子产生的韧致辐射在 r 米处的空气中的吸收剂量率, Gy/h;

A : 放射源活度, Bq;

Z_e : 电子屏蔽材料的有效原子序数;

E_b : 韧致辐射的平均能量;

μ_{em}/ρ : 平均能量为 E_b 的韧致辐射在空气中的质量能量吸收系数, m^2/kg ;

r : 距源的距离, m。

韧致辐射经屏蔽后的剂量率计算公式如下:

$$H_r = D_0 \times r^{-2} \times 10^{-d/TVL} \quad (\text{公式 5-25})$$

式中:

H_r : 关注点的 γ 剂量率, $\mu Sv/h$;

D_0 : 距离靶 1m 处的剂量率, $\mu Sv/h$;

r : 关注点距离源中心的距离, cm;

d : 屏蔽材料屏蔽厚度, cm;

^{89}Sr 核素为液体状态, 液体状态下 1m 处剂量率估算结果见表 5-84。

表 5-84 ^{89}Sr 核素裸源状态下吸收剂量率估算结果

核素	A, Bq	Z_e	E_b, MeV	r, m	$\mu_{em}/\rho, m^2/kg$	1m 处剂量率, $\mu Sv/h$	50cm 处剂量率, $\mu Sv/h$
^{89}Sr	1.48E+08	6.66	0.587	1	3.28E-03	5.08E-02	2.03E-01

通过上表可知， ^{89}Sr 放射性药物在不考虑其他屏蔽的情况下周围剂量率相对较低，护士在有防护的情况下进行操作，后续工作人员年受照剂量保守按其裸源状态进行工作人员受照剂量的估算，综上，上述核素进行治疗期间，屏蔽体外剂量率均可满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中相关要求。

5.6.1.2 工作人员年受照剂量

5.6.1.2.1 利用放射性药物进行显像诊断及治疗期间

工作人员年受照剂量计算公式如下：

$$H=D \times T \times t \quad (\text{公式 5-26})$$

式中，H 为人员年受照剂量，mSv/a；

D 为人员所在区域剂量率，mSv/h；

T 为人员的居留因子，辐射工作人员居留因子均取值 1；

t 为人员年受照时间，h/a，核医学科各项的年工作规划见表 3-17。

由上式估算核医学工作人员的年有效剂量，结果列于表 5-85。

表 5-85 核医学科工作人员个人最大年有效剂量计算结果

工作岗位、内容			所在位置	剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	受照时间，h	年受照剂量，mSv	项目合计，mSv		个人最大年受照剂量，mSv/a
护士 4 人	PET	分装	分装/注射	2.06E+00	141.7	2.92E-01	2.95E-01	4.27E-01	2.14E-01
		注射	分装/注射	4.80E-02	70.8	3.40E-03			
	SPECT	淋洗	分装/注射	1.01E+00	125.0	1.26E-01	1.26E-01		
		注射	分装/注射	2.84E-05	62.5	1.77E-06			
	门诊治疗	注射	分装/注射	2.03E-01	29.2	5.93E-03	5.93E-03		
技师 (4 人轮岗)	PET	摆位	PET 机房	9.91E+01	70.8	7.02E+00	8.42E+00	9.63E+00	4.81E+00
		扫描	PET 控制室	9.86E-01	1416.7	1.40E+00			
	SPECT	摆位	SPECT 机房	1.94E+01	62.5	1.21E+00	1.21E+00		
		扫描	SPECT 控制室	8.68E-04	1250.0	1.09E-03			
医生 (3 人轮)	PET	急救	抢救室	3.18E+01	16.7	5.29E-01	5.29E-01	6.10E-01	6.10E-01
	SPECT	急救	抢救室	4.84E+00	16.7	8.07E-02	8.07E-02		

岗)									
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--

5.6.1.2.2 使用密封校准源期间

技师至少每周使用 1 次密封源进行均匀度等质控检测，该环节需将带有铅屏蔽的刻度源从储源室运到机房，取出源放于 PET 扫描床上，并在控制室进行操作，完成后需将密封源送回储源室。Ge-68 质控源产生光子平均能量仅约 9.2keV，但其子体 Ga-68 将发生正电子衰变产生湮灭辐射并发射 511keV 光子，故该环节主要考虑 Ga-68 的影响，GBZ 120-2020 表 H.1 中给出其周围剂量当量率常数为 0.134μSv•m²/MBq•h，保守按初始活度 92.5MBq 考虑，操作距离取 50cm，操作位剂量率为 49.6μSv/h，每次操作时间约 2min，总操作时间为 1.67h/a，则对技师的附加剂量约为 82.6μSv/a。

5.6.1.3 公众年受照剂量

核医学科运行期间主要考虑周围公众关注点见图 5-20，公众最大受照剂量估算结果列于表 5-86。

		等候区						
5	车位	PET/CT 留观（F-18）	8.36E-02	2000	1/40	4.18E-03	6.23E-03	
		PET/CT 留观（Zr-89）	4.14E-01	167	1/40	1.73E-03		
		SPECT/CT 留观	6.45E-03	2000	1/40	3.23E-04		
6	新风机房	离院患者	1.82E+00	133	1/20	1.21E-02	1.21E-02	
7	楼上	水泵机房	分装注射	4.06E-04	67	1/20	1.35E-06	1.35E-06
	楼下	车位	分装注射	5.76E-04	67	1/40	9.60E-07	9.60E-07
8	楼上	机房	PET/CT 注射后候诊	1.08E-01	1333	1/20	7.17E-03	7.17E-03
	楼下	车位	PET/CT 注射后候诊	1.41E+00	1333	1/40	4.70E-02	4.70E-02
9	楼上	机房	PET-CT 扫描	2.10E-02	1333	1/20	1.40E-03	1.40E-03
	楼下	车位	PET-CT 扫描	2.97E-02	1333	1/40	9.91E-04	9.91E-04

5.6.1.4 小结

由以上分析计算可知，核医学科工作人员人均年受照剂量最大为 4.57mSv（技师），满足本项目工作人员剂量约束值 5mSv/a 的要求；公众年受照剂量最大为 4.70E-02 mSv（关注点 8，车位），满足本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 的要求。

5.6.1.5 环境保护目标的影响分析

由上文的计算结果可知，核医学科工作场所屏蔽体外剂量率最大为 2.41μSv/h。考虑其随距离衰减的特性，可推知屏蔽体外 10m 处的剂量率可降低近 2 个量级，将小于本底水平，且实际传播过程中有墙体等各种屏蔽体。因此可推知，核医学科控制区工作场所边界向外 50m 范围内的各环境保护目标的年受照剂量都低于其剂量约束值，对环境保护目标的影响较小。

5.6.2 事故影响分析

核医学科在正常营运情况下，对于公众和周围环境基本是安全的，但如果管理不善发生某些事故，可能对公众和环境造成危害，其潜在的事故情景主要有：

（1）工作人员的撒漏或核素药剂丢失

由于工作人员操作不熟练或其他原因造成工作时放射性药物撒漏以及药物保

管不善致使放射性药剂在给患者用药之前丢失，可能对公众和周围环境造成辐射污染。

（2）放射性废物管理不善

放射性废水未经足够时间的衰变排放，排放超出规定的限值，可能对环境或人体造成一定危害。

放射性固体废物未经足够时间的存放衰变，擅自处置，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

（3）屏蔽措施不当

如果对操作放射性核素的场所屏蔽措施不利，可能对环境造成污染和对人员造成不必要的照射。

（4）灾害

火灾、水灾、地震以及其它不可抗力的因素造成的灾害都有可能使放射性核素散落环境中，造成环境污染和危害人体。

5.6.2.1 事故后果分析

由上述分析可知，发生放射性药物洒落，辐射工作人员进行处理时受到的剂量较大，假设：1支 370MBq 的 ^{18}F 注射液在给药过程中出现跌落，药液全部散落在注射台面，工作人员事故处理时间按最长 30min 考虑，与污染源的最近距离 1m。根据以上假设条件，事故工况时，事故处理人员的受照剂量分别为 26 μSv ，不会超过辐射工作人员的年剂量限值，是可以接受的。

5.6.2.2 风险防范和处理措施

针对在核医学工作场所运行过程可能出现的事故，应采取一系列预防措施，尽可能减小或控制事故的危害和影响。其中包括：

（1）针对洒落事故，工作人员应立即用吸水纸、纱布等吸水材料对污染台面、

地面进行吸附擦拭，直至监测满足辐射工作场所地面、台面的污染水平控制值后，方可结束清理，处理过程中产生的固体废物如吸水纸、纱布、棉签、被粘污的工作服等按放射性固体废物统一收集暂存，满足解控标准后，按医疗废物处理。

（2）发生非工作人员误入 SPECT 或 PET 机房时，应立即切断电源，终止射线装置的出束，将误入人员撤离到安全区域，对可能出现的超剂量照射送到指定地点进行救治观察，同时在规定时间内向相应的生态环境部门和卫生部门进行报告。

（3）发生放射性药物被盗或丢失，应第一时间报告向医院辐射事故应急小组及生态环境部门、公安、卫生部门报告。

6 辐射安全管理

6.1 辐射安全与环境保护管理机构

6.1.1 机构和人员

医院拟设置专门的辐射安全与环境保护管理小组，组长由分管安全的医院领导担任，全面负责辐射防护和安全管理的工作；小组成员由医务处、质子治疗科室、核医学科、放疗科等涉及核技术利用工作的科室领导和工作人员组成，具体承担辐射防护和安全管理日常工作。本项目建成后，由该领导小组负责本项目相关的辐射安全和管理的工作。

表 6-1 辐射安全与环境保护管理小组人员

机构名称	辐射安全与环境保护管理领导小组		
管理人员	职务或职称	工作部门	专/兼职
组长	院级分管安全领导	—	兼职
副组长	院分管辐射安全领导	—	兼职
成员	辐射防护负责人	—	专职
成员	医务处处长/副处长	医务处	兼职
成员	质子科室主任/副主任	质子科	兼职
成员	放疗科室主任/副主任	放疗科	兼职
成员	核医学科主任/副主任	核医学科	兼职
成员	介入科主任/副主任	介入科	兼职

辐射安全与环境保护管理小组的主要职责如下：

- (1) 负责全员放射工作人员的健康查体、个人剂量监测以及各辐射工作场所的防护、设计、报批、检测、检查等工作；
- (2) 制定辐射安全防护与管理规章制度，并定期检查各项规章制度的贯彻落实情况；
- (3) 负责放射工作人员的培训和管理；
- (4) 管理、监督、协调医用射线装置使用过程中的辐射安全工作；

(5) 负责放射性三废的监督管理和环境保护。

辐射防护负责人的主要职责如下：

- (1) 负责辐射、安全及环境相关法律法规的追踪；
- (2) 提出对相关法规在医院内部实施的方案；
- (3) 就辐射、安全及环境相关报批事项的对外联络，包括许可证申请与更新；
- (4) 负责个人剂量及场所监控记录的收集与管理；
- (5) 负责射线装置台账统一管理；
- (6) 组织年度安全演练及事故应急处理；
- (7) 组织编写并提交年度评估报告；
- (8) 组织发放和回收个人剂量计。

6.1.2 辐射工作人员管理

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40 号）的规定，“销售（含建造）、使用 I 类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。”本项目拟配备 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，同时作为辐射安全专职管理人员。

本项目的辐射工作人员主要为辐射防护负责人、从事放射治疗的医生、物理师、技师、药物制备区域的加速器运行人员及药物制备人员以及核医学科的工作人员等，计划的编配情况如下表 6-2。

建设单位制定了辐射工作人员培训计划，新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，必须通过生态环境部培训平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

表 6-2 本项目辐射工作人员计划编配情况

岗位类别		人数，人
辐射防护负责人（注册核安全工程师）		1
质子治疗科	医生	4
	物理师	8
	治疗技师	8
	护士	4
	维修工程师	2
放疗科	医生	4
	物理师	4
	技师	8
	护士	4
	维修工程师	2
介入科	医生	22
	技师	8
PET 药物制备	加速器运行人员	2
	药物制备和运输人员	2
核医学	医生	3
	技师	4
	护士	4
总计	——	94

6.2 辐射安全管理规章制度

为加强辐射安全管理，按照《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》等法规的要求，医院拟建立一系列辐射安全管理制度，主要内容涵盖《辐射安全管理组织机构及岗位职责》、《辐射安全保卫制度》、《辐射监测计划》、《个人剂量监测及健康档案管理制度》、《工作人员培训制度》、《放射性废物管理规定》、《操作规程》、《设备检查与维修制度》，建成后可满足辐射安全管理要求。

6.3 辐射监测

6.3.1.1 工作场所监测

本项目工作场所监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，采用安装固定式监测仪表和便携式监测仪表相结合的方式，监测数据均记录存档。按照 HJ 1198-2021、HJ 1188-2021 的相关要求，具体辐射工作场所监测计划见表 6-3。

6.3.1.2 环境监测

参照《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021) 表 9、表 11、表 12 的相关规定，并结合本项目主要辐射源项特点及实际情况，本项目环境监测计划列于表 6-4。

其中，在院区内质子治疗机房顶板上方附近设 1 个固定式监测点位，该监测点设固定式中子、 γ 探测器各 1 个，用于对环境中的中子、 γ 辐射水平进行实时监测。监测数据通过有线或无线通讯设备实时传输至终端数据处理中心。

表 6-3 本项目辐射工作场所监测计划

辐射工作场所	监测项目	监测类别	监测方式	监测频次	监测点位
质子治疗系统	X- γ 辐射周围剂量当量率 中子辐射周围剂量当量率	自行监测	固定式仪表监测	实时	见图 4-8
			便携式仪表监测	1 次/季度	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、观察窗、门，以及其他关注处点处
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
直加机房	X- γ 辐射剂量率	自行监测	固定式仪表监测	实时	见图 4-28
			便携式仪表监测	1 次/季度	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
DSA、ERCP、 模拟 CT 机房	X- γ 辐射剂量率	自行监测	便携式仪表监测	1 次/季度	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、观察窗、防护门，以及其他关注处点处
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
PET 药物制备区域	X- γ 辐射剂量率	自行监测	固定式仪表监测	实时	见图 4-42
			便携式仪表监测	1 次/季度	操作位、四周屏蔽墙外 30cm、防护门、楼上等场所
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
	β 表面放射性污染	自行监测	便携式仪表监测	每天工作结束后	工作场所（操作位、工作台、设备机房、墙壁、地面等）、工作人员防护用品（防护服、手套、工作鞋等）、工作场所周围环境
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
核医学科	X- γ 辐射剂量率	自行监测	便携式仪表监测	1 次/月	控制区和监督区所有工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的装置/设备表面
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
	β 表面放射性污染	委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等。
		自行监测	便携式仪表监测	每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）	

表 6-4 本项目环境监测计划

辐射工作场所	监测对象	采样（监测）布点	监测项目	监测频次
质子治疗系统	外照射	院区内设置 1 个环境固定辐射监测点位，位于质子治疗机房顶板上方	γ 辐射空气吸收剂量率 中子剂量当量率	实时
		加速器主体建筑墙外 30cm 开展巡测，选择主体建筑墙外、楼顶及院区相应的关注点开展定点监测		1 次/年
	土壤	医院院区四周，院区外敏感点	^7Be 、 ^{22}Na 、总 β	1 次/年
	地表水	医院院区周边河流	^3H 、 ^7Be 、 ^{22}Na 、总 β	1 次/年
	循环冷却水	质子治疗区冷却水暂存池	^3H 、 ^7Be 、 ^{22}Na 、总 β	1 次/年（排放前）
	固体废物外表面	放射性固废暂存间	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
			感生放射性核素、 γ 能谱	收集及送贮时
直加机房	外照射	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
DAS、ERCP、回旋加速器机房、模拟 CT 机房	外照射	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
核医学科	γ 辐射	核医学辐射工作场所及衰变池周围	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
	土壤	核医学辐射工作场所半径 50m 以内	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、总 β	1 次/年
	衰变池废液	衰变池取样口	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、总 β	1 次/年
	放射性固体废物	固废暂存容器外表面	γ 辐射空气吸收剂量率、 β 表面污染	1 次/年

6.3.1.3 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。质子治疗中心辐射工作人员配备的个人剂量计和个人剂量报警仪均需具有监测 X- γ 和中子的功能。

个人剂量计用于对辐射工作人员和相关医护人员的常规个人剂量监测，医院为每名辐射工作人员配备了个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 3 个月。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

个人剂量报警仪用于工作人员在治疗机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。医院为进入控制区内工作的人员建立档案，每次在控制区内的工作结束后，由辐射安全专职管理人员负责回收个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，统一汇总在该工作人员个人剂量档案中。

医院安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。

此外，医院对辐射工作人员进行健康体检，两次体检的时间间隔不超过 2 年。建立个人健康档案，档案中详细记录历次体检报告结果及其评价处理意见，并妥善长期保存。

6.3.1.4 监测设备

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式 X- γ 探测器、固定式中子探测器、便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- γ 辐射巡测仪、便携式表面污染检测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见表 6-5。

表 6-5 本项目拟配备的辐射监测设备清单

序号	仪器名称	数量，台	总计，台
1	固定式 X- γ 探测器	质子治疗区域：10 台	22

		直线加速器区域：8 台 药物制备区域：3 台 环境固定辐射监测点位：1 台	
2	固定式中子探测器	质子治疗区域：10 台 环境固定辐射监测点位：1 台	11
3	便携式 X-γ辐射巡测仪	质子治疗区域：1 台 放疗中心：1 台 核医学科及药物制备区域：1 台	3
4	便携式中子辐射巡测仪	质子治疗区域：1 台	1
5	便携式表面污染监测仪	药物制备区域：1 台 核医学科：1 台	2
6	直读式个人剂量报警仪	质子治疗区域：6 台 直线加速器：2 台/间，共 16 台 回旋加速器：2 台	24
7	个人剂量计	1 支/人	—

6.4 辐射事故应急预案

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）要求，使用Ⅱ类以上（含Ⅱ类）射线装置的辐射工作单位应建立完善的辐射事故应急方案或具有针对性与操作性的应急措施。

医院应在本项目建成运行前，成立辐射事故应急处理小组，由项目辐射安全相关负责人担任组长。按照上述要求制定可行的《辐射事故应急预案》，具体内容应包括应急处理原则、辐射事故分级、应急响应程序、应急报告电话等。且根据辐射源项的更新不断完善应急预案，定期进行辐射事故应急演练，并做好演练记录。

重点应做好以下几个方面的工作：

（1）成立辐射事故应急小组，并由项目辐射安全相关负责人担任组长，负责辐射事故应急处置工作的组织、指挥和协调。

（2）信息上报

一旦发生辐射事故，现场工作人员应立即停止装置出束或工作同时报告医院辐射事故应急小组，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，且向双流区、成都市生态环境局报告。对于造成或可能造成人员超剂量照射的，还应向双流区、成都市公安局和卫生行政主管部门报告。报告联系电话如下：

环境保护举报热线电话：12369；

成都市生态环境局：028-61885200；

成都市卫生健康委员会电话：028-61881910；

双流区卫生健康委员会电话：028-85822918。

（3）辐射事故应急处置措施

发生辐射事故后，应采取以下应急处置措施：

1) 针对射线装置/放射源使用期间的辐射事故，事故发生时刻应立即按下急停开关或直接断电停机，撤出机房内人员；针对放射性同位素使用期间的辐射事故，事故发生时应确定现场的辐射强度和污染区域，并标出禁入控制范围，将可能受到污染的衣物留在污染区内，对被污染的人员采取一定的去污措施后离开污染区；

2) 尽快将可能受到辐射伤害的人员送到指定医院进行救治；

3) 对于需要进入机房内部进行应急操作的情况，工作人员应穿戴防护用品，并佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪；

4) 应尽可能记录现场有关情况，对工作人员可能受到的事故照射剂量，可针对事故实际情况进行评估，并对工作人员进行健康检查和跟踪，按照国家有关放射卫生防护标准和规范以及相关程序，评估事故对工作人员健康的影响；

5) 对可能受到污染的辐射事故现场实施连续监测，并保护好现场；

6) 事故处理后必须组织有关人员进行讨论，分析事故发生的原因，从中吸取经验和教训，必须采取措施防止类似事故再次发生。

（4）应急培训和演练

定期进行应急培训，熟悉各类辐射事故应急响应程序、辐射防护的基本知识、应急救援的操作技能、人员和场所去污的基本知识和操作技能、辐射监测仪表的性能和操作。

定期进行辐射事故应急演练，对每一次演练应认真进行评价和总结。应以模拟辐射事故应急响应的形式进行应急演练，并设计不同情景的假想辐射事故进行演练，还应对应急响应中各项具体操作技能进行练习。

（5）应急装备保障

应配备一定的应急设施设备，主要包括通讯设备、交通工具、辐射监测设备、辐射防护用品、救援器材和工具等。

通过采取上述措施，加强医院辐射事故应急能力建设，确保一旦发生辐射事故，能立即启动辐射事故应急预案，并采取相应的应急措施。

6.5 年度评估报告

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环保部第 18 号令）第十二条的规定，医院应对其放射性同位素和射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向生态环境主管部门提交上一年度的评估报告。评估报告主要包括以下内容：

- （1）辐射安全和防护设施的运行与维护情况；
- （2）辐射安全和防护制度及措施的制定与落实情况；
- （3）辐射工作人员变动及接受辐射安全与防护考核情况；
- （4）放射性同位素、射线装置等台账；
- （5）场所辐射环境监测和个人剂量监测情况及监测数据；
- （6）辐射事故及应急响应情况；
- （7）核技术利用项目新建、改建、扩建和退役情况；

(8) 存在的安全隐患及其整改情况;

(9) 其他有关法律、法规规定的落实情况。

6.6 申请者从事辐射工作能力评价

6.6.1 辐射安全与环境保护管理

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求, 申请者应当设置专门的辐射安全与环境保护管理机构, 或至少安排 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。

同时, 根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》(国核安发[2015]40 号)的规定, 使用 I 类射线装置的单位, 辐射安全关键岗位一个, 为辐射防护负责人, 新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。

医院拟设置辐射安全与环境保护管理小组, 组长由分管安全的医院领导担任, 全面负责辐射防护和安全管理的工作; 小组成员由医务处、质子治疗科室、核医学科、放疗科等涉及核技术利用工作的科室领导和工作人员组成, 具体承担辐射防护和安全管理日常工作。

一名注册核安全工程师尚未落实到位。目前, 医院已制定相关工作计划, 确保在取证前配备齐全具有相应资质的专业人员。

医院按此要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构, 配备齐相应资质的专业人员, 方可满足要求。

6.6.2 辐射工作人员培训

根据《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), 新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员, 应通过生态

环境部培训平台报名并参加考核。

医院制定了辐射工作人员培训计划，新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，必须通过生态环境部培训平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

在严格落实人员培训计划后，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

6.6.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者射线装置使用场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用质子治疗系统、电子直线加速器等医用射线装置以及核医学等用于放射诊疗，经预测分析评价，各区域的辐射屏蔽设计均能确保屏蔽体外剂量率水平满足相关标准的要求。各机房设计了完备的安全联锁系统，通过门-机联锁、门-灯联锁、紧急停机、声光报警、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止工作人员和公众意外照射。本项目的辐射防护设计方案满足辐射防护与安全的要求。

建设单位应按照辐射防护设计方案进行施工建设，并确保经验收合格后投入使用。在此基础上，各射线装置机房、核医学工作场所能满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

6.6.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目拟为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 3 个月。并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。并配备个人剂量报警仪，用于工作人员在治疗机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目拟在质子治疗机房、直线加速器机房、回旋加速器机房、热室等区域内设固定式监测仪表，能够对工作场所内的辐射水平进行实时在线监测。此外，拟配备便携式 X- γ 辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式表面污染检测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

医院按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

6.6.5 规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

医院根据本项目使用的射线装置、放射源和放射性同位素情况，正在建立相应的辐射安全管理规章制度，包括《辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全保卫制度》《操作规程》《设备检查与维修制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》等。

在以上制度按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

6.6.6 辐射事故应急

医院应根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）的有关规定，在本项目申请辐射安全许可证前，制定可行的、符合要求的《辐射事故应急预案》。

在制定完成后，可符合本项目辐射事故应急的相关要求。

6.6.7 辐射工作能力综合评价

对照根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》最新修订要求，对医院从事申请活动种类（使用 I 类、II 类、III 类射线装置以及放射性同位素）的能力进行综合分析评价，结果见表 6-6。

表 6-6 建设单位从事辐射活动能力的评价

序号	应具备条件	评价结果
1	使用 I 类、II 类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	医院按要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。
	依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	至少应有 1 名注册核安全工程师，方可满足要求。
2	新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。	医院拟从事辐射工作的人员上岗前需参加并通过辐射安全与防护考核，考核合格后，方可满足要求。
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	设计满足要求。
4	放射性同位素与射线装置使用场所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施	设计满足要求。
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。	设计满足要求。
6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	规章制度建立完成后，方满足要求。
7	有完善的辐射事故应急措施。	辐射事故应急预案建立完成后，方满足要求。
8	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	设计满足要求。

6.7 环保投资一览表

本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表见表 6-7。

表 6-7 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资（万元）
1	辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全防护领导小组	--
		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，辐射事故应急预案等	
2	人员考核	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核	5

3	监测仪器和防护用品	固定式区域 γ 监测仪、固定式中子区域监测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- γ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪	300
		工作服、口罩、手套等	
4	辐射防护设施工程（辐射屏蔽墙体和放射性三废处理设施）		6000
5	环境影响评价、竣工环保验收		60
	总计		6365

6.8竣工环保验收一览表

本项目建成后，医院应按规定组织自主验收，编制验收监测报告表。本项目的竣工环保验收内容及要求列于表 6-8。

表 6-8 本项目竣工环保验收一览表

序号	验收内容		验收要求
1	环保资料		本项目审批后的环境影响报告书、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。
2	辐射安全管理		建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。
3	人员要求		1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名； 2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。
4	机房面积及尺寸		1. 电子加速器机房面积不小于 45m ² ； 2. CT 机房（包括模拟定位 CT 机、SPECT-CT、PET-CT）、DSA 和 ERCP 机房不小于 30m ² ，且单边长度 4.5m。
5	电离辐射	屏蔽体外剂量率	1. 质子治疗系统辐射工作场所四周实体屏蔽墙、入口门外、机房顶：剂量率水平不高于表 1-5 中的数值； 2. 直线加速器机房四周屏蔽墙、机房顶和防护门外剂量率水平不高于表 1-6 中的数值； 3. DSA 机房、ERCP 机房、模拟 CT 机房、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房四周屏蔽墙、机房顶和防护门外剂量率水平不高于 2.5μSv/h； 4. 核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30 cm 处的剂量率水平应小于 2.5 μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其剂量率水平应小于 10 μSv /h；放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备外表面 30cm 处人员操作位的剂量率水平小于 2.5 μSv/h，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的剂量率水平小于 25 μSv/h；固体放射性废物收集桶、暴露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道外表面 30 cm 处的剂量率水平小于 2.5 μSv/h。
		表面污染水平	核医学科放射性物质表面污染水平不超过“1.4.3”所列值。
6	辐射防护与安全措施		质子治疗装置 1. 辐射工作场所分区： 控制区：加速器大厅（含束流输运线隧道）、2 间治疗室； 监督区：上述控制区四周屏蔽体外相邻场所； 2. 人身安全联锁系统：由 PLC、出入管理设备、紧急开门按钮、急停开关、清场按钮、声光报警灯、视频监控和对讲装置等组成，且所有安全设备均能正常投入使用； 3. 通风系统：加速器大厅、束流输运线、各治疗室均设有送风、排风管道，治疗室换气次数不低于 4 次/小时；

			4.场所辐射监测系统：加速器大厅及主控室、各治疗室及其控制室均设置固定式辐射监测点，每个点位设一台 γ 探测器和 1 台中子探测器。
		直线加速器	1.辐射工作场所分区： 控制区：加速器机房（含迷道）；监督区：加速器机房屏蔽体外四周场所及控制室； 2.安全设备及系统：设置钥匙控制、门机联锁、视频监控及对讲系统、急停按钮、工作状态指示灯等； 3.通风系统：机房内采用空调机送风、排风机排风，上送下排，呈对角线布置的方式，换气次数不少于 4 次/h； 4.场所辐射监测：每间加速器机房设 1 台固定式 γ 辐射监测仪。
		DSA	1.辐射工作场所分区： 控制区：DSA 机房内部；监督区：DSA 机房屏蔽体外四周场所及控制室； 2.安全设备及系统：设置透视曝光控制、门机联锁、视频监控及对讲系统、急停按钮、工作状态指示灯等； 3.通风系统：机房内设有机械通风系统，保持良好的通风。
		ERCP	1.辐射工作场所分区： 控制区：ERCP 机房内部；监督区：ERCP 机房屏蔽体外四周场所及控制室； 2.安全设备及系统：设置透视曝光控制、门机联锁、视频监控及对讲系统、急停按钮、工作状态指示灯等； 3.通风系统：机房内设有机械通风系统，保持良好的通风。
		PET 药物制备区	1.辐射工作场所分区： 控制区：回旋加速器机房、热室区域、控制室、质控间、无菌检测间、阳性对照间、洗衣整衣间、洁具/消毒间等； 监督区：加速器控制室、设备/水冷机房以及预留房间等；一更、二更间、外包间以及靠近控制区的走道； 2.安全设备及系统：回旋加速器安全联锁系统主要由 PLC、钥匙开关、门机联锁、急停开关、清场按钮、警告警示装置等组成，药物制备区域设置电离辐射警告标志、程序设定、剂量监测及视频监控；

				3.通风系统：回旋加速器机房有效换气次数超过 4 次/h，PET 药物制备区设置共 5 套独立的通风系统。
		核医学科		1.辐射工作场所分区： ①控制区：包括储源间、放射性废物间、分装/注射室、患者注射间、运动/急救室、SEPCT/CT 注射后候诊室、PCT/CT 注射后候诊室、VIP 候诊室、PET-CT 机房、SPECT-CT 机房、预留机房、SEPCT/CT 留观、PCT/CT 留观等； ②监督区：包括机房控制室以及控制区相邻区域； 2.人流物流： 核医学工作场所设置了患者路线、医护路线，物流包括放射性药物路线、放射性固体废物路线，在空间/时间上相对独立，避免了交叉，并在通道的出、入口设计了单向门禁； 3.通风系统： 本项目核医学科设置独立的通风系统，总计 3 套排风系统，各套排风系统设置止回阀，控制区内各工作场所之前保持各区之间的压差，防止放射性废气以及气溶胶工作场所造成交叉污染，用于分装放射药物的工作箱设置独立的排风管道且安装活性炭过滤装置，放射性废物间设置排气口，排风系统各排气口高于所在建筑屋顶，放射性废气均经活性炭过滤后排放； 4.放射性废水管道：设置 1 套地下衰变池，位于医疗综合楼地下三层北侧。
		CT 机		1.辐射工作场所分区：CT 机房为控制区，机房四周场所及控制室为监督区； 2.安全设备及系统：机房门外设有电离辐射警告标志，机房门上方设有醒目的工作状态指示灯，灯箱上设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，工作状态指示灯能与机房门有效关联等。 3.通风系统：设有机械通风系统，保持良好的通风。
6	放射性三废处理设施	质子装置	废气	质子治疗装置辐射工作场所设有通风系统，各区域排风管最终引至屋面，排风高度约 15m。
			废水	加速器大厅、束流输运线隧道及治疗室内均设有地漏，通过地漏自流进入集水坑，由提升泵提升至地下 3 层设置的冷却水暂存池，具体布置情况见图 4-20、图 4-21。活化冷却水暂存池有效容积为 12m ³ ，用于暂存活化冷却水。
			固体废物	暂存在固体废物暂存桶中，放置在加速器大厅内避开活化位置暂存。
		PET 药	废气	回旋加速器机房有效换气次数超过 4 次/h，PET 药物制备区设置共 5 套独立的通风系统

		物制备区	废水	回旋加速器在事故情况下需排放冷却水，排放量约 30L。活化冷却水收集于地下三层集水井（2 个，2m×1.5m×1.5m），暂存一段时间后，经检测满足排放标准后排入医院污水管网；PET 药物制备区放射性废水经专用管道排入核医学科衰变池。
			固体废物	回旋加速器运行期间产生的放射性固体废物，分类暂存于加速器机房下沉式废物坑，四周为混凝土，顶部为不锈钢盖板，长×宽×高=1m×1m×0.8m。经检测满足解控标准后按一般废物处理，不满足解控标准的委托有资质单位处理；热室操作区及质控室均配备 2 个放射性废物桶，暂存时长满足最长核素十个半衰期，经检测满足清洁解控水平后，按一般固体废物处理。另，放射性废气处理系统定期更换的废活性炭过滤滤芯，暂存于核医学放射性废物间。
		核医学科	废气	本项目核医学科设置独立的通风系统，总计 3 套排风系统，各套排风系统设置止回阀，控制区内各工作场所之前保持各区之间的压差，防止放射性废气以及气溶胶工作场所造成交叉污染，用于分装放射药物的工作箱设置独立的排风管道且安装活性炭过滤装置，放射性废物间设置排气口，排风系统各排气口高于所在建筑屋顶，放射性废气均经活性炭过滤后排放。
			废水	设置 1 套地下衰变池，位于医疗综合楼地下三层北侧。
			固体废物	放射性固体废物收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶中。废物桶内放置专用塑料袋直接收纳废物。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至对应放射性废物间暂存。放射性废物间均设置若干废物桶盛放固体放射性废物，不同类别废物分类存放。容器表面需注明废物所含核素的名称、废物的类别、入库日期等信息，并做好登记记录。
7	辐射监测	工作场所监测		制定工作场所监测计划，包括自行监测和委托监测，并按计划的频次开展监测。
		环境监测		制定环境辐射监测计划，包括自行监测和委托监测，并按计划的频次开展监测。
		个人剂量监测		每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过三个月，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。
		监测设备		1.固定式 X-γ 探测器：22 台； 2.固定式中子探测器：11 台； 3.便携式 X-γ 辐射巡测仪：3 台； 4.便携中子辐射巡检仪：1 台；

			5.便携式表面污染监测仪：2 台； 6.直读式个人剂量报警仪：24 台； 7.个人剂量计：1 支/人。
--	--	--	---

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

随着我国社会经济的迅速发展，人民生活水平有了很大提高，医疗卫生条件得到进一步改善。然而，肿瘤（特别是恶性肿瘤）依然是国民健康水平进一步提高的主要障碍。据统计数据，2010 年我国恶性肿瘤新发病例达 220 万人，因恶性肿瘤死亡人数达 160 万人。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。质子治疗装置已成为当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。

本项目的建设将具有较好的社会效益和经济效益，具体如下：

（1）本项目的建设是成都市经济社会发展的需要，是提高现代医疗服务业发展水平、不断满足多层次、多样化医疗服务需求的体现。

（2）本项目建成后，将有力的提升成都市乃至四川省的医疗水平，可满足深成都市及周边乃至全国人员的就医需求，造福于民。

（3）本项目的建设，对促进社会基础设施建设有重要而深远的意义，对四川省的医疗卫生事业的发展也将起到极大的推动作用，从而提高社会效益。

（4）本项目的经济效益主要来自项目运行后的财政收入。收入来源主要为医疗收入、药物收入、其他收入、财政差额拨款等。财务分析计算结果表明，本项目具有较好的经济效益。

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面：本项目建设总用地面积 68562.52 平方米，总建筑面积约 146761.75 平方米，主要建设质子治疗机房、直线加速器机房、DSA 机房、ERCP 机房、2 个非密封放射性工作场所以及若干Ⅲ类射线装置，开展肿瘤放射诊疗。

能源方面，项目运行期间需用水、电等能源。

（2）经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性物质和有害气体进入大气环境和水环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，给环境带来的这些影响均低于国家标准中规定的限值。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于广大人民。因此，本项目的实施是利大于弊的。

8 结论

8.1项目工程概况

成都医投质子重离子医院管理有限公司拟在成都市双流区永安镇付家坝社区 1 组建设“成都医投华西国际肿瘤治疗中心（重离子质子）项目一期”。项目建设总用地面积 68562.52 平方米，总建筑面积约 146761.75 平方米。

项目一期拟建设住院楼、医疗综合楼、重离子质子治疗楼连体建筑，开展放射诊疗和诊断工作。本项目拟使用 1 套质子治疗系统（I 类射线装置）、8 台直线加速器（II 类射线装置）、3 台 DSA（II 类射线装置）、1 台 ERCP（II 类射线装置）、1 台制备 PET 放射性药物的回旋加速器（II 类射线装置）、若干 III 类医用射线装置；拟设 2 个乙级非密封放射性物质工作场所。

本项目运行期间的辐射源项主要是使用各类医用射线装置时产生的“瞬发辐射”、装置停机后依然存在的“感生放射性”、PET 药物制备区和核医学的表面沾污，以及运行期间产生的放射性三废。

8.2实践的正当性

质子治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。质子治疗装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备，目前我国多地都在建设/筹建相关治疗中心。项目拟配制的电子直线加速器、DSA、ERCP、回旋加速器以及核医学科等也是医院放射诊断常用的主要设备及主要辐射工作场所。

本项目拟使用的射线装置均设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响很小，满足国家相关标准要求。本项目对患者和社会所带来的

利益（主要是患者的健康有利）是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术利用实施活动是正当的。

8.3 选址、布局合理性分析

本项目拟建于医院院区内，与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的质子治疗、放射治疗、模拟定位、核素制备区域以及核医学诊断区域，并拟设置物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目布局满足肿瘤放疗、核素制备以及核医学诊断场所功能需要，便于辐射工作场所的防护管理和安全控制，以及放射性污染的防治。从辐射防护与环境保护的角度，项目的选址可行，平面布局合理。

8.4 辐射安全与防护措施

（1）辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。

（2）辐射安全连锁系统：射线装置机房均设计了安全、冗余的辐射安全连锁系统，包括门禁控制、门机连锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器，以及工作状态指示灯、视频监控以及放射性警告标志和中文警示说明等，可有效防止工作人员和公众受到意外照射。

（3）辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算各辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平。

（4）通风系统：各射线装置使用场所、PET 药物制备区域、核医学科均设有通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计均能满足相关标准要求，确保工作场所内部和排放到环境中的污染物浓度能够满足相关标准要求。

（5）工作场所辐射监测系统：放射治疗机房内均设有固定式场所辐射监测仪表，对工作场所内剂量率水平进行实时监测和显示，确保工作人员和公众的安

全。

8.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，辐射工作人员和公众的年最大有效剂量为均低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

8.6 放射性三废排放和处理

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自质子治疗系统、PET 药物制备以及核医学科的运行。

质子治疗机房、PET 药物制备、核医学科等可能产生放射性废气的场所内均设置了独立的排风系统，其运行期间产生的放射性气体经场所内排风管道引至建筑屋面排放。其中核医学排风系统设置了活性炭过滤，排风口均高出本建筑屋脊。

质子治疗机房、核医学科等可能产生放射性废液的场所，均设计废液暂存容器/衰变池，放射性废液经专用管道排入废液暂存容器/衰变池内，确保其在得到处置前能够安全暂存。经暂存衰变，满足排放要求后排入医院污水管网。

质子治疗机房、核医学科等可能产生放射性固体废物的场所均设计了固体废物暂存容器/场所，确保放射性固体废物在得到处置前能够安全暂存。暂存一定时间后，满足解控标准的，解控后按一般固体废物/医疗废物/危险废物处理或由设备生产商回收，不满足解控要求的委托有资质单位收贮，或由设备生产商回收。

8.7 辐射安全管理

医院设置专门的辐射安全管理机构；目前正按照人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面内容建立一系列辐射安全管理制度及辐射事故应急预案；制定辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗；配置一名注册核安全工程师；目前制定的辐射环境及工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

8.8 公众参与

本项目按照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络公示、报纸媒体公示、现场粘贴的方式进行了公众参与，期间均未收到社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈意见，详见本项目《公众参与说明》。

8.9 总结

综上所述，建设单位拟开展的“成都医投华西国际肿瘤治疗中心(重离子质子)项目一期”在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和环境的影响符合环境保护的要求，该项目对环境的影响是可以接受的。建设单位在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，故从辐射防护和环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。