编号：BG-ZFFS25210005

核技术利用建设项目

复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）核技术利用项目

环境影响报告书

（公示稿）

福建省肿瘤医院

2025年11月

核技术利用建设项目

复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）核技术利用项目

环境影响报告书

建设单位名称：福建省肿瘤医院

建设单位法人代表（签名或签章）：孙阳

通讯地址：福建省福州市福马路 420 号

邮政编码：310014　　联系人：[redacted]

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 2
1.2.1 建设单位概况 2
1.2.2 项目背景、意义 3
1.2.3 本次环评内容 5
1.2.4 产业政策和规划符合性 6
1.2.5 周围环境概况 12
1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状 27
1.2.7 本项目与原有核技术利用项目的依托关系 34
1.3 编制依据 36
1.3.1 法律、法规和规章 36
1.3.2 技术导则、标准 37
1.3.3 产业政策 38
1.3.4 其它文件、资料 38
1.4 评价标准 38
1.4.1 剂量限值和剂量约束值 38
1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 39
1.4.3 放射性废物排放限值 45
1.4.4 其他标准 47
1.5 评价范围和保护目标 48
1.5.1 评价范围 48
1.5.2 环境保护目标 49
1.6 安全责任划分 49

2 自然环境与社会环境状况 54

2.1 地理位置 54
2.2 自然环境状况 54
2.2.1 地形地貌 54
2.2.2 地质条件 54
2.2.3 气候 55
2.2.4 水文 56
2.3 社会经济状况 56
2.4 区域环境质量现状 56
2.4.1 环境空气质量现状 56
2.4.2 地表水环境质量现状 57
2.4.3 声环境质量现状 57
2.5 辐射环境质量现状 57
2.5.1 监测内容 57
2.5.2 监测/取样点位 61
2.5.3 监测设备和监测方法 63
2.5.4 质量保证措施 64

2.5.5 监测结果.....64
2.6 场址适宜性分析.....72
3 工程分析与源项.....74
3.1 项目规模与基本参数.....74
3.2 工程设备与工艺分析.....76
3.2.1 质子重离子放射治疗系统概况.....76
3.2.2 电子直线加速器工程设备和工艺分析.....94
3.2.3 模拟定位 CT 机.....99
3.3 辐射污染源项分析.....101
3.3.1 质子重离子放射治疗系统.....101
3.3.2 电子直线加速器污染源项描述.....122
3.3.3 模拟定位 CT、滑轨 CT 机和 X 射线管.....124
3.4 工作负荷预估.....124
3.5 主要辐射污染因子小结.....127
4 辐射安全与防护设施.....130
4.1 质子重离子放射治疗系统.....130
4.1.1 场所布局与屏蔽.....130
4.1.2 辐射安全与防护措施.....146
4.1.3 放射性三废处理.....172
4.1.4 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析.....176
4.2 直线加速器.....183
4.2.1 工作场所布局及屏蔽防护设计.....183
4.2.2 安全防护措施.....185
4.2.3 机房通风、电缆管线设置.....188
4.2.4 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析.....190
4.3 模拟定位 CT.....191
4.3.1 辐射工作场所分区.....191
4.3.2 机房布局和辐射屏蔽.....192
4.3.3 拟采取的其他安全与防护措施.....193
4.3.4 放射性三废.....193
4.4 臭氧、氮氧化物等有害气体.....194
4.5 服务期满后的环境保护措施.....194
5 环境影响分析.....196
5.1 建设阶段对环境的影响.....196
5.2 质子重离子放射治疗系统的辐射环境影响.....196
5.2.1 系统年使用规划.....196
5.2.2 机房屏蔽体外剂量率计算.....196
5.2.3 工作人员受照剂量估算.....219
5.2.4 公众的受照剂量估算.....226
5.2.5 叠加影响分析.....232
5.3 直线加速器运行时环境影响分析.....233
5.3.1 直线加速器运行时环境影响分析.....233

5.3.2 关注点选取.....234
5.3.3 屏蔽体外剂量的计算.....235
5.3.4 年有效剂量预测分析.....241
5.3.5 天空散射和侧向散射.....242
5.3.6 电子线和感生放射性的影响分析.....242
5.3.7 废靶对环境的影响分析.....243
5.3.8 臭氧和氮氧化物对环境的影响分析.....243
5.4 模拟定位 CT 运行阶段环境影响分析.....243
5.4.1 机房周围辐射剂量率估算.....243
5.4.2 人员受照剂量估算.....244
5.4.3 臭氧及氮氧化物影响分析.....244
5.5 事故工况下的环境影响.....244
5.5.1 质子重离子系统.....244
5.5.2 直线加速器.....246
5.5.3 模拟定位 CT.....247
6 辐射安全管理.....249
6.1 机构与人员.....249
6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构.....249
6.1.2 辐射工作人员配备计划.....249
6.2 辐射安全管理规章制度.....250
6.3 辐射监测.....251
6.3.1 工作场所监测.....251
6.3.2 环境监测.....251
6.3.3 个人剂量监测.....252
6.3.4 监测设备.....253
6.3.5 竣工环保验收监测.....253
6.4 辐射事故应急.....255
6.4.1 辐射事故应急预案.....255
6.4.2 辐射事故应急响应机构.....256
6.4.3 应急人员的培训演习.....257
6.5 年度评估报告.....258
6.6 从事辐射工作能力评价.....258
7 利益-代价分析.....261
7.1 利益分析.....261
7.2 代价分析.....261
7.3 实践的正当性分析.....262
8 公众参与.....263
9 结论和建议.....264
9.1 结论.....264
9.1.1 项目工程概况.....264
9.1.2 实践的正当性.....264
9.1.3 选址、布局合理性分析.....265

9.1.4 辐射安全与防护措施.....266
9.1.5 辐射环境影响分析.....266
9.1.6 放射性三废排放和处理.....266
9.1.7 辐射安全管理.....267
9.1.8 公众参与.....267
9.1.9 总结.....268
9.2 建议和承诺.....268
附件 1 委托书.....269
附件 2 辐射安全许可证.....270
附件 3 近年环保手续.....277
附件 4 福建省发展和改革委员会关于同意复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）项目建议书暨可行性研究报告的函.....293
附件 5 用地预审与选址意见书（福建省肿瘤医院滨海院区）.....295
附件 6 福建省肿瘤医院辐射安全与环境保护管理委员会文件.....297
附件 7 医院现有辐射安全管理规章制度.....300
附件 8 关于印发福建省肿瘤医院辐射事故/事件应急预案的通知.....311
附件 9 个人剂量监测报告.....323
附件 10 职业健康体检报告（节选）.....357
附件 11 医院辐射工作人员培训情况（节选）.....363
附件 12 环境现状监测报告.....372
附件 13 关于 2023 年甲类大型医用设备配置许可结果的通告.....395
附件 14 应急演练记录（放疗科）.....397
附件 15 《兰州泰基离子技术有限公司销售(含建造)和使用小型化重离子治疗装置项目环境影响报告书》批复.....401
附表 建设项目环评审批基础信息.....405

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）核技术利用项目

建设地点：福建省福州市长乐区万新路以南、怀海路以北、南洋路东侧、纪盛路西侧地块福建省肿瘤医院滨海院区重离子质子中心，地理坐标为：东经 119°34'02.3277"，北纬 25°54'09.2632"。

建设性质：新建

建设单位：福建省肿瘤医院，复旦大学附属肿瘤医院福建医院和福建省肿瘤医院是同一家医院

建设规模：拟于滨海院区重离子质子中心建设质子重离子机房（地上三层，地下一层）及其附属用房，配备 HiTS 400S 型质子重离子一体化治疗系统（包括离子源、低能束运线、直线注入器、中能线、同步加速器、高能束运线和 5 个终端）1 套，5 个终端包括 1 间科研室和 4 间治疗室，科研室为水平治疗终端，治疗室 1 为水平+垂直治疗终端、治疗室 2 为水平+45°治疗终端、治疗室 3 为 360°旋转治疗室、治疗室 4 为 180°旋转治疗室。科研室及各治疗室均集成配备图像引导系统（X 射线管和平板探测器）进行图像引导和复定位，3 号治疗室和 4 号治疗室内拟分别配置 1 台滑轨 CT 用于精准定位。治疗用的粒子是碳离子（$^{12}C^{6+}$）和质子（$^{1}H^{+}$），通过主动式束流配送方式至终端进行治疗，碳离子最高能量 430MeV/u，质子最高能量 230MeV；此外科研室还可供氦离子（$^{4}He^{2+}$）和氧离子（$^{16}O^{8+}$），氦离子（$^{4}He^{2+}$）最高能量 230MeV/u，氧离子（$^{16}O^{8+}$）最高能量 430MeV/u。

拟在滨海院区重离子质子中心一层新增 2 间直线加速器机房及其附属用房，并新增 2 台医用电子直线加速器（以下简称“电子直线加速器”），最大 X 射线能量均为 10MV，开展放射治疗，每台电子直线加速器集成一台 CBCT，用于精确定位；新增 2 间 CT 模拟定位机房及其附属用房，并新增 2 台 CT 模拟定位机。

项目投资：项目总投资约为 80000 万元，其中环保投资约 7000 万元，占总投资的 8.75%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

福建省肿瘤医院（以下简称“医院”）现有院区位于福州市晋安区福马路 420 号。医院作为承担福建肿瘤防治与研究的重要平台，形成肿瘤领域的学科高地、技术高地、人才高地、创新高地、运行高地和服务高地，在肿瘤防控和综合诊疗方面形成特色优势，在全省及周边地区的肿瘤防治工作中发挥着龙头作用。肿瘤放射治疗科、中西医结合科、普外科（肿瘤）、妇科（肿瘤）、病理科、消化内科（肿瘤）、胸外科（肿瘤）、呼吸内科（肿瘤）、临床护理（肿瘤）为国家和省级临床重点专科建设项目。目前已形成集国家临床重点专科、国家药物临床试验机构，福建省肿瘤转化医学重点实验室、福建省肿瘤生物治疗重点实验室、福建省肿瘤早筛早诊前沿技术重点实验室、福建省肿瘤精准医疗产业技术创新研究院、福建省肿瘤精准诊断与免疫治疗工程研究中心、福建省肿瘤放射与免疫治疗临床医学研究中心、福建省肝胆胰肿瘤临床医学研究中心、福建省妇科恶性肿瘤精准治疗临床医学研究中心和福建省消化、呼吸与泌尿生殖系统恶性肿瘤放射与治疗临床医学研究中心、肿瘤大数据中心等为一体的肿瘤防治与研究的重要平台。

为全面提升福建省肿瘤诊疗能力，有力支撑创建辐射东南沿海的国家区域医疗中心，推动福州新区国际医疗健康产业片区发展，服务“一带一路”倡议，医院拟于福建省福州市长乐区万新路以南、怀海路以北、南洋路东侧、纪盛路西侧地块建设福建省肿瘤医院滨海院区项目。滨海院区建设考虑整体规划，分期推进实施完成基础设施建设。整体院区拟建床位数为 1400 床（医疗服务病床 1100 张，临床研究床位 300 张）。主要建设医疗及配套用房（含门诊医技、住院、科研、教学）、重离子质子中心、临床医学研究中心、肿瘤前沿技术研发中心及相关配套用房及地下室。总建筑面积 252000m^2（其中滨海院区一期总建筑面积 85000m^2，二期总建筑面积 167000m^2），滨海院区一期工程启动 500 张床位，建设住院综合楼、门诊医技楼、重离子质子中心、配套用房及地下室。滨海院区一期总建筑面积 85000m^2，其中住院综合楼建筑面积 40100m^2，门诊医技建筑面积 14800m^2，重离子质子中心建筑面积 20000m^2，配套附属用房（门卫、污水处理、垃圾间等）300m^2，地下建筑面积 9800m^2。滨海院区一期计容建筑面积 77200m^2。本次核技术利用项目包含于福建省肿瘤医院滨海院区一期工程

内，建设地点位于重离子质子中心。

复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）已于2025年9月25日取得福州市生态环境局批复，批复文号为：榕环评〔2025〕50号，目前项目正在建设中。

图 1.2.1-1 福建省肿瘤医院滨海院区一期效果图

1.2.2 项目背景、意义

恶性肿瘤已成为严重威胁我国人群健康的主要疾病之一。2019 年全国死因监测报告显示，恶性肿瘤位居死亡原因首位，占全部居民死因的 24.09%。近十几年来，我国恶性肿瘤的发病和死亡均呈持续上升态势，防控形势严峻。根据国家癌症中心最新数据显示，2016年我国新发恶性肿瘤病例约406.40万，粗发病率为293.91/10万，死亡病例约241.35万，粗死亡率为174.55/10万。

医用电子直线加速器是医疗器械中的高、精、尖技术相结合的产品，利用微波电场对电子进行加速，产生高能射线。放射治疗领域中，医用电子直线加速器在妇科肿瘤病症中具有适应症广泛，早期晚期均适用；治疗效果好，可灵活应用，术前放疗可抑制癌细胞活力，减少移植，术后放疗可作为肿瘤切除不彻底的补救措施等。因此，对于应对各类肿瘤疾病，加速器的应用是不可或缺的。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子和重离子治疗肿瘤技术由于

具有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。质子、重离子拥有倒转深度剂量分布、拓展布拉格峰后剂量急剧下降、高传能线密度（LET）、高相对生物效应（RBE）、较小的氧增比、可实时剂量验证、准确投射肿瘤靶区等特点。这些特点使得质子、重离子放射治疗相对于传统放疗有很大的优势，它能够更加准确地攻击肿瘤细胞，且对 DNA 致死性更加复杂，对肿瘤的杀伤作用更大。粒子束辐射敏感性不依赖细胞周期时相，对 DNA 损伤的可修复性很小，放疗后癌症的再复发更低，根据目前已有的临床表现看，肿瘤患者术后三年存活率、五年存活率均高于常规放疗。质子、重离子治疗项目是一个技术比较成熟、市场前景广阔的高科技医疗产业项目，也是一项造福百姓、造福社会的德政惠民工程。

为此，建设单位拟于滨海院区重离子质子中心设置一系列质子重离子一体化治疗用房，主要包括同步环大厅、高能线爬升大厅、科研治疗室 1 间、治疗室 4 间，配备 HiTS 400S 型质子重离子一体化治疗系统；拟在滨海院区重离子质子中心一层新增 2 间直线加速器机房及其附属用房，并新增 2 台医用电子直线加速器，最大 X 射线能量均为 10MV，开展放射治疗，每台电子直线加速器集成一台 CBCT，用于精确定位；拟在滨海院区重离子质子中心一层新增 2 间 CT 模拟定位机房及其附属用房，并新增 2 台 CT 模拟定位机。

本项目重离子质子中心建筑物地上共三层，地下一层，重离子质子中心各层情况如下：

表 1.2.1-1 重离子质子中心各层功能布置情况

建筑物	楼层	功能布置
重离子质子中心	负一层	**质子重离子治疗室 3 和 4 安装基坑、事故收集池**
	一层	**质子重离子治疗机房及配套用房（控制台、治疗大厅、模具储藏室、同步环大厅、高能线水平区、高能线爬升区、检修区、低温设备室、加速器备品间、冷却水泵房、水处理电控间、中央控制室、模具储藏等）**、质子重离子门诊办公区（更衣室、麻醉间、护士站、强弱电间、水井、风井、医护通道、示教室、内院、儿童活动等候区、抢救室、污物间、洁具室等）、模拟定位区（MR 机房、MR 设备间、**CT 机房**、CT 设备间、控制室、咨询室、资料室、库房、等候间、护士站、注射台、售卖机、值班室、卫生间）、服务中心、电子直线加速器门诊及治疗区（诊室、会议室、办公室、休息室、库房、**电子直线加速器机房**、控制室、辅助设备间、质控室、更衣室、模具室等）等。
	二层	**质子重离子治疗机房及配套用房（高能爬升区、质子重离子治疗机房上空、同步环电源间、2#变电所、高能线电源间、数据中心、治疗机柜室、Gantry 电源间、电源库房）**、电缆夹层、工程师室、强弱电间、电梯厅、楼梯间、空调机房、医护办公区（气灭间、3#变电所、细水雾房及其控制室、运维办公室、办公室、物理师办公室、计划设计室、接待室、值班室、中会议室、多功能室、洁具间、开水间、休息室、卫生间、新风机房

		等）等
	三层	**质子重离子治疗机房及配套用房（高能爬升区、质子重离子治疗机房上空、同步环电源间空调机房、高能线电源间空调机房、治疗室空调机房、高能线空调机房）**、辅助设备区（热水机房及其控制室、新风机房、排水机房、排烟机房、风井、空调水泵房、电梯机房）
	四层	**屋顶层**

1.2.3 本次环评内容

本次辐射环境影响评价主要针对复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）配套核技术利用活动的建设内容开展评价，具体如下：

本项目拟于滨海院区重离子质子中心配备 HiTS 400S 型质子重离子一体化治疗系统用于肿瘤放射治疗和科研，该系统拟设置 1 间科研室和 4 间治疗室，科研室及各治疗室均集成配备图像引导系统（X 射线管和平板探测器）进行图像引导和复定位，3 号治疗室和 4 号治疗室内拟分别配置 1 台滑轨 CT 用于精准定位，提供最大能量为 430MeV/u 的碳离子束和氧离子束、230MeV/u 氦离子和 230MeV 质子束，其中氧离子束和氦离子仅在科研室使用。

拟在滨海院区重离子质子中心一层新增 2 间直线加速器机房及其附属用房，并新增 2 台电子直线加速器，最大 X 射线能量均为 10MV，每台电子直线加速器集成一台 CBCT，开展放射治疗；新增 2 间 CT 模拟定位机房及其附属用房，并新增 2 台 CT 模拟定位机。

本项目使用射线装置具体如下：

表 1.2.3-1 本项目使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量	类别	主要参数	所在位置
1	质子重离子放射治疗系统	1 台	Ⅰ类	型号：HiTS 400S 生产厂家：兰州泰基离子技术有限公司 粒子类型：$^{12}C^{6+}$、H^{+}、$^{16}O^{8+}$、$^{4}He^{2+}$ 治疗能量：70~430MeV/u（$^{12}C^{6+}$） 70~230MeV（H^{+}） 70~430MeV/u（$^{16}O^{8+}$） 70~230MeV/u（$^{4}He^{2}$） 剂量率：2Gy/min 配备图像引导系统（X 射线管和平板探测器）5 套，每套系统的 2 个 X 射线管的最大管电压均为 150kV，最大管电流均为	质子重离子机房

				640mA。	
2	滑轨 CT 机	2 台	III类	最大管电压 150kV，最大管电流 660mA，治疗室 3 和 4 各一台	
3	直线加速器	2	II 类	6MV 等中心处：X 射线剂量率为：8.40E+08μGy/h 10MV 等中心处：X 射线剂量率为：1.44E+09μGy/h； 每台直线加速器均集成一台 CBCT，最大管电压 150kV，最大管电流 1250mA	重离子质子中心一层直线加速器机房 1~2
4	模拟定位 CT	2	III类	最大管电压 150kV，最大管电流 1250mA	重离子质子中心一层模拟定位 CT 机房 1~2

根据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国环境影响评价法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关法律法规要求，本项目应进行环境影响评价。根据《射线装置分类》的规定，质子重离子放射治疗系统的管理类别属于I类射线装置，直线加速器属于II类射线装置，滑轨 CT 机、模拟定位 CT 机属于III类射线装置。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（中华人民共和国生态环境部令第 16 号），本项目属于“五十五、核与辐射”中“172、核技术利用建设项目—使用 I 类射线装置的；使用II类射线装置的；使用III类射线装置的”，环境影响评价文件类别分别对应编制环境影响报告书、环境影响报告表、环境影响登记表，由于本项目建设内容涉及两个及以上项目类别的建设项目，其环境影响评价类别按照其中单项等级最高的确定，故环境影响评价类别为编制环境影响报告书。为此，福建省肿瘤医院委托中辐环境科技有限公司对本项目进行环境影响评价。评价单位组织专业技术人员到现场进行调查、踏勘、资料收集和委托环境辐射现状监测，结合项目特点，并按照《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）的要求，编制完成了本项目环境影响报告书。

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《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 7 号）中第一类“鼓励类”中第十三项“医药”中第四条“高端医疗

器械创新发展：新型基因、蛋白和细胞诊断设备，新型医用诊断设备和试剂，高性能医学影像设备，**高端放射治疗设备**，急危重症生命支持设备，人工智能辅助医疗设备，移动与远程诊疗设备，高端康复辅助器具，高端植入介入产品，手术机器人等高端外科设备及耗材，生物医用材料、增材制造技术开发与应用”以及第三十七项“卫生健康”中第一条“**医疗服务设施建设**”。因此，本项目建设为国家鼓励类产业，符合国家现行产业政策。

本项目位于重离子质子中心内部，建设内容归属于复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）项目（项目代码为 2309-350000-04-01-431769），该项目于 2024 年 3 月 19 日得到福建省发展和改革委员会同意批复（文号为闽发改网审社会函〔2024〕32 号，具体见附件 6）。

综上所述，本项目建设符合国家和地方产业政策要求。

1.2.4.2 与医疗卫生相关规划的符合性

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》指出要发展高端医疗设备。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。《健康中国“2030”规划纲要》提出到 2030 年，健康服务能力大幅提升。优质高效的整合型医疗卫生服务体系和完善的全民健身公共服务体系全面建立，健康保障体系进一步完善，健康科技创新整体实力位居世界前列，健康服务质量和水平明显提高。优化健康服务--强化慢性病筛查和早期发现，针对高发地区重点癌症开展早诊早治工作，推动癌症、脑卒中、冠心病等慢性病的机会性筛查。逐步将符合条件的癌症、脑卒中等重大慢性病早诊早治适宜技术纳入诊疗常规。《有序扩大国家区域医疗中心建设工作方案》提出鼓励各地选择具备一定基础的现有医疗机构与引入的高水平医院开展合作，充分利用现有设施设备和人才队伍，定向放大国家顶级优质医疗资源。到 2022 年底，基本完成全国范围内的规划布局，力争国家区域医疗中心建设覆盖全国所有省份。到“十四五”末，国家区域医疗中心建设任务基本完成，在优质医疗资源短缺地区建成一批高水平的临床诊疗中心、高层次的人才培养基地和高水准的科研创新与转化平台，培育一批品牌优势明显、跨区域提供高水平服务的医疗集团，打造一批以高水平医院为依托的“互联网+医疗健康”协作平台，形成一批以国家区域医疗中心为核心的专科联盟。《福建省“十四五”卫生健康

发展专项规划》提出要加强区域医疗中心建设，各级各类医疗机构功能定位得到有效落实，医疗服务整体效率和质量持续提升，公立医院高质量发展，人民群众获得感进一步增强。推进区域医疗“高地”建设。落实国家有关区域医疗中心建设部署和委省共建协议，推进复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）项目建议书暨可行性研究报告实施，推动省肿瘤医院等与国家高水平医院合作，并争取纳入国家区域医疗中心建设。通过区域医疗中心建设，推动全省优质资源提质扩容和区域布局，群众危急重症、疑难病症基本在省域内得到解决。

因此，本项目的建设与国家、福建省医疗卫生事业相关规划是相符的。该项目于2024 年 2 月 8 日取得国家卫生健康委员会的甲类大型医用设备配置许可（文号为国卫通〔2024〕1 号，具体见附件 13）。

1.2.4.3 与土地利用规划的符合性

本项目拟建于福建省肿瘤医院滨海院区重离子质子中心内，该地块用地性质为医疗卫生用地，建设项目“福建省肿瘤医院滨海院区”已于 2023 年 9 月 11 日取得福州市长乐区自然资源和规划局批准的建设项目用地预审与选址意见书（见附件 5）。因此，本项目符合土地利用规划要求。

1.2.4.4“三线一单”符合性分析

根据《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》，要求强化“三线一单”的约束作用，建立“三挂钩”机制，“三管齐下”切实维护群众的环境权益。“三线一单”即“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单”，项目建设应强化“三线一单”约束作用。

（1）生态保护红线

本项目位于福建省福州市长乐区万新路以南、怀海路以北、南洋路东侧、纪盛路西侧地块福建省肿瘤医院，位于重点管控单元（福州市环境管控单元分布图见图 1.2.4-1），周边无生活饮用水源地和地下水补给区、风景名胜区、温泉疗养区、水产养殖区、基本农田保护区、自然保护区等需要特殊保护区域，项目不在生态保护红线范围内，符合生态保护红线要求。

（2）环境质量底线

根据辐射环境现状检测结果可知，本项目拟建场址及周围 γ 辐射剂量率处于福建省福州市辐射环境本底范围值内，中子剂量当量率未见异常。根据本次环评结论，本

项目建成投运后辐射工作场所周围的辐射剂量率均低于标准限值要求，运行过程中产生的“三废”等污染物均得到合理处置，本项目在落实本报告提出的各项污染防治措施后，不会对周围环境产生不良影响。因此本项目建成投运后不会对区域环境质量造成明显影响，满足区域环境质量改善目标管理要求，符合环境质量底线要求。

（3）资源利用上线

本项目主要水源为自来水，由市政自来水管网供给，占比量较小，市政自来水管网有能力为本项目提供水资源保障；本项目主要能源为电能，本项目非高耗能、耗水项目，项目使用的电能主要依托市政电力管网。总体而言，本项目符合能源资源利用上线和水资源利用上线要求。

（4）生态环境准入清单

本项目为核技术利用项目，不属于工业项目。对照福州市生态环境总体准入清单（2024 年更新），本项目满足生态环境总体准入清单的要求，详见表 1.2.4-1。

综上所述，本项目能够符合“三线一单”的管控要求。

1.2.4.5 与福州市生态环境总体准入清单（2024 年更新）符合性分析

本项目拟建地点位于福州市长乐区，根据《福州市人民政府办公厅关于印发〈福州市生态环境分区管控方案（2024 年更新）〉的通知》（榕政办规〔2024〕20 号），项目选址位于长乐区重点管控单元 4（ZH35011220010），福州市环境管控单元分布图见图 1.2.4-1。对照福州市生态环境总体准入清单（2024 年更新），符合性分析见下表。

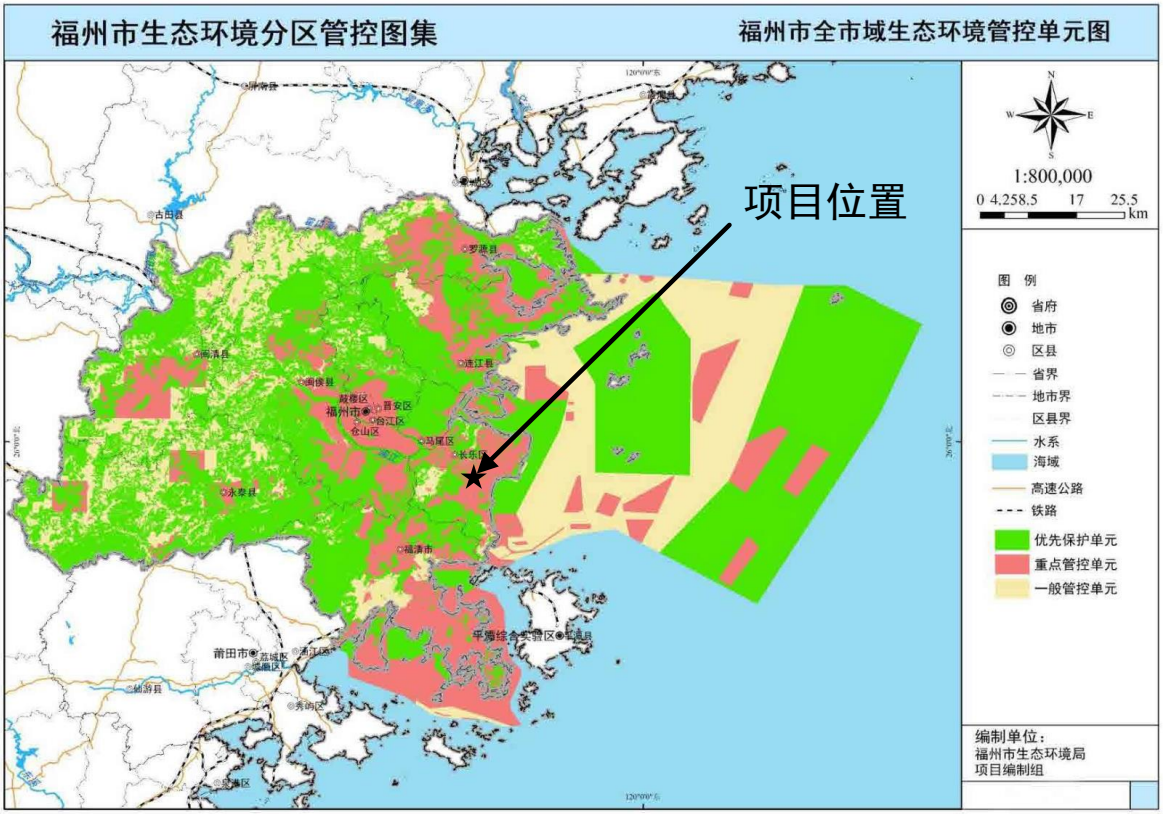


图 1.2.4-1 福州市环境管控单元分布图

表 1.2.4-1 与福州市生态环境总体准入清单符合性分析

环境管控单元名称	生态环境准入要求		本项目情况	符合性分析
长乐区重点管控单元 4（ZH35011220010）	空间布局约束	1.严禁在城镇人口密集区新建危险化学品生产企业；现有不符合安全和卫生防护距离要求的危险化学品生产企业 2025 年底前完成就地改造达标、搬迁进入规范化工园区或关闭退出。城市建成区内现有印染、有色金属、化工等污染较重的企业应有序搬迁改造或依法关闭。	本项目为核技术利用项目，不属于工业项目，不涉及园区。本项目用地性质为医疗卫生用地，已取得福州市长乐区自然资源和规划局批准的建设项目用地预审与选址意见书。	符合
		2.严格控制包装印刷、工业涂装、制鞋等高 VOCs 排放的项目建设，相关新建项目必须进入工业园区		
		3.禁止开发利用未经评估和无害化处理的列入建设用地污染地块名录及开发利用负面清单的土地		
	污染物排放管控	1.新建（含搬迁）钢铁项目应达到超低排放水平，现有钢铁企业应按照“闽环保大气〔2019〕7 号”进度要求分步推进超低排放改造。	本项目为医院内核技术利用项目，不涉及单独进行相关的污染物排放总量控制。	符合
		2.落实区域新增二氧化硫、氮氧化物和 VOCs 排放总量控制要求。		
	环境风险防控	单元内现有化学原料和化学制品制造业等具有潜在土壤污染环境风险的企业退役后，应开展土壤环境状况评估，经评估认为污染地块可能损害人体健康和环境，应当进行修复的，由造成污染的单位和个人负责被污染土壤的修复。	本项目为新建，不属于现有化学原料和化学制品制造业等具有潜在土壤污染环境风险的企业退役后地块，且已取得土壤污染状况调查报告，不属于污染地块。	符合
	资源利用效率要求	高污染燃料禁燃区内禁止燃用高污染燃料，禁止新建、扩建燃用高污染燃料的设施。已建的燃用高污染燃料设施，限期改用电、天然气、液化石油气等清洁能源	本项目不涉及禁燃区和高污染燃料。	符合

1.2.5 周围环境概况

本项目建设地点位于福建省福州市长乐区万新路以南、怀海路以北、南洋路东侧、纪盛路西侧地块福建省肿瘤医院滨海院区重离子质子中心内，地理坐标为：东经119°34'02.3277"，北纬 25°54'09.2632"，医院地理位置见图 1.2.5-1。

医院东侧为纪盛路，隔路为空地；南侧为怀海路，隔路为阳光学院（滨海校区）；西侧为空地（规划南洋路），隔路为河道；北侧为万新路，隔路为农田。医院周边关系图见图 1.2.5-2。

医院拟在滨海院区内西侧新建 1 栋重离子质子中心。本项目质子重离子治疗机房为四层结构，拟建于重离子质子中心的负一层、一层、二层和三层；直线加速器和 CT 模拟定位机房位于重离子质子中心一层。重离子质子中心东侧为停车场和院内道路，隔路为景观花园、住院综合楼和医技楼；南侧为停车场和二期预留用地；西侧为院内道路；北侧为院内道路和绿化；项目现场现状照片见图 1.2.5-3，医院总平面布置图见图 1.2.5-4，重离子质子中心负一层、一层、二层和三层平面布置图分别见图 1.2.5-5~图 1.2.5-9，重离子质子中心剖面图见图 1.2.5-10。

审图号：闽S〔2024〕222号　　福建省制图院 编制　福建省自然资源厅 监制

图 1.2.5-1 本项目地理位置图

图 1.2.5-2 医院周边关系图

医院拟建场地现状

医院拟建场地北侧万新路及农田

医院拟建场地东侧纪胜路及空地

医院拟建场地南侧怀海路及阳光学院（滨海院区）

医院拟建场地西侧河道及空地（规划南洋路）

图 1.2.5-3 本项目拟建场地及周边环境现状照片

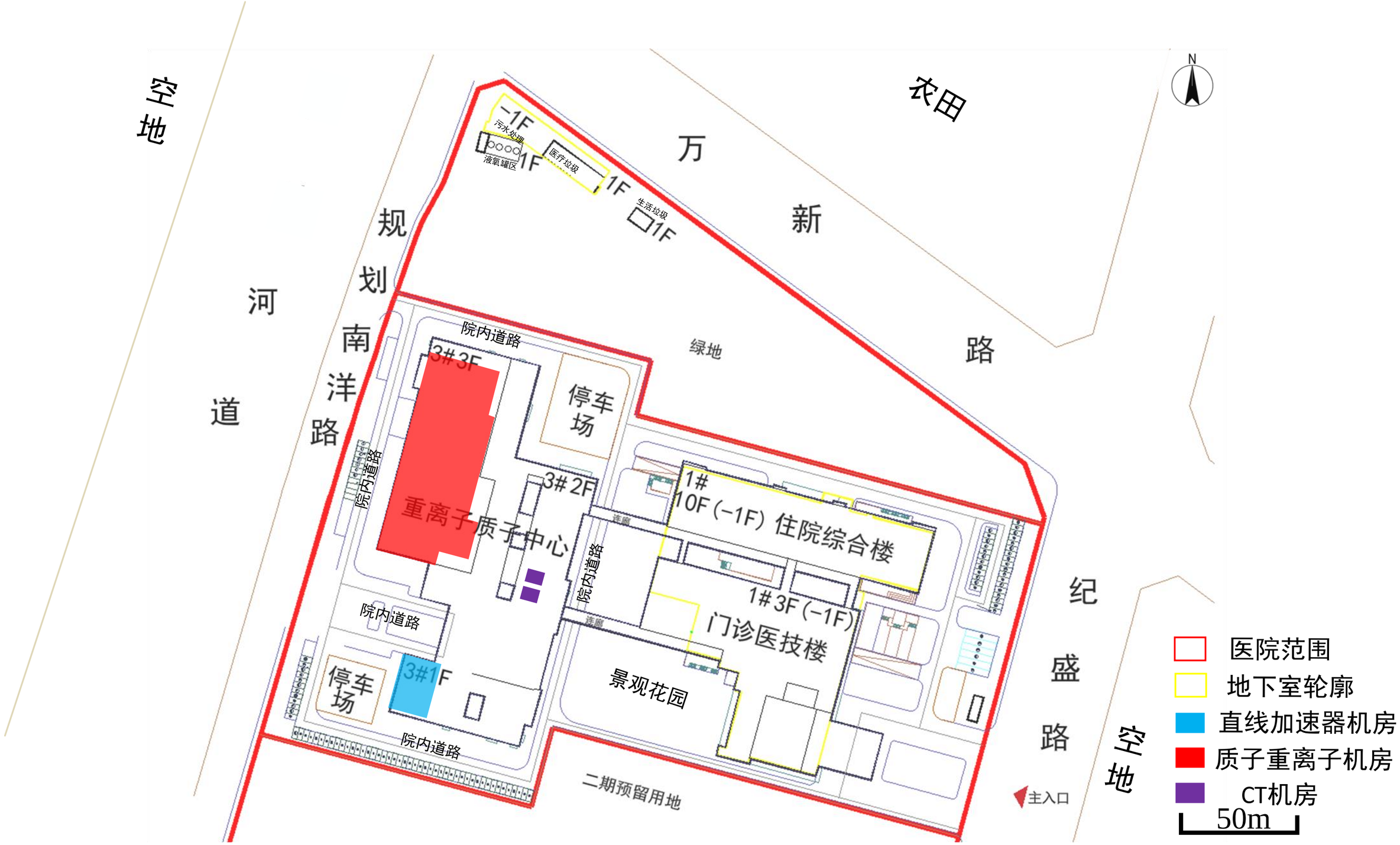


图 1.2.5-4 医院滨海院区一期总平面布置图

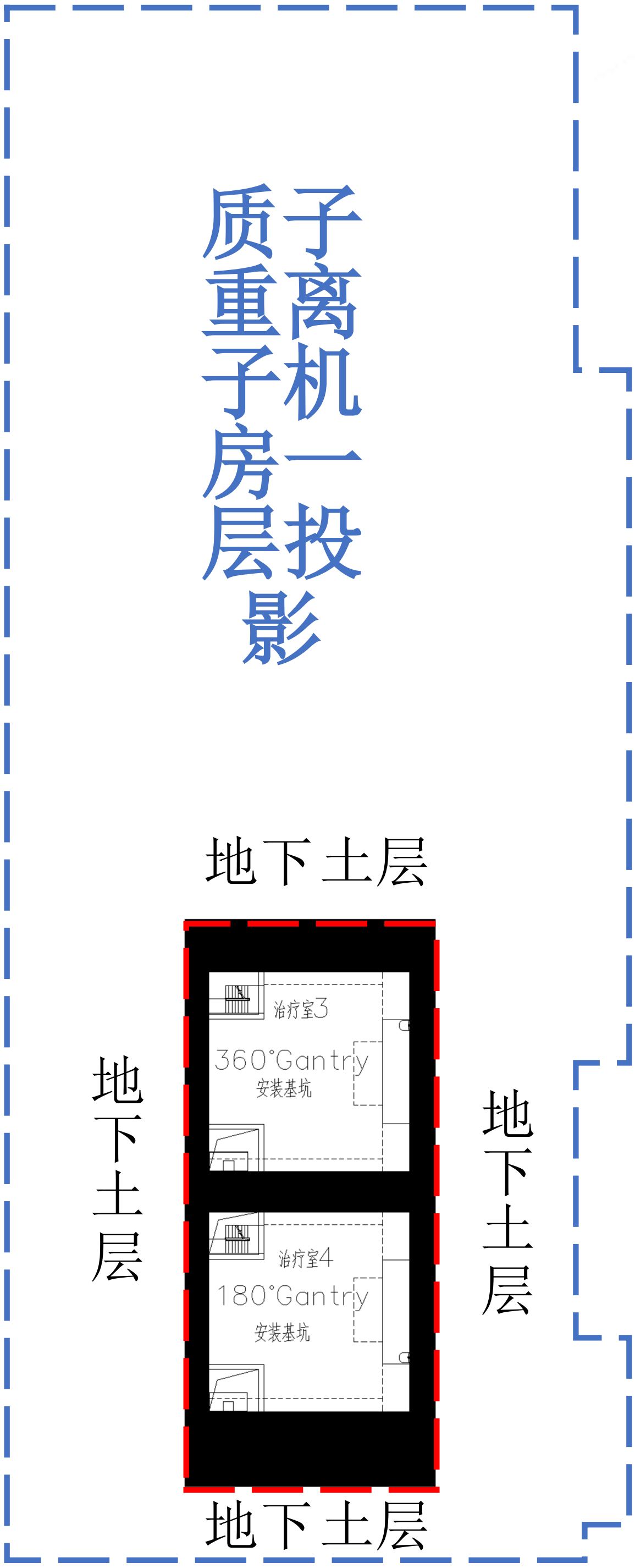


图 1.2.5-5 重离子质子中心负一层平面布置图

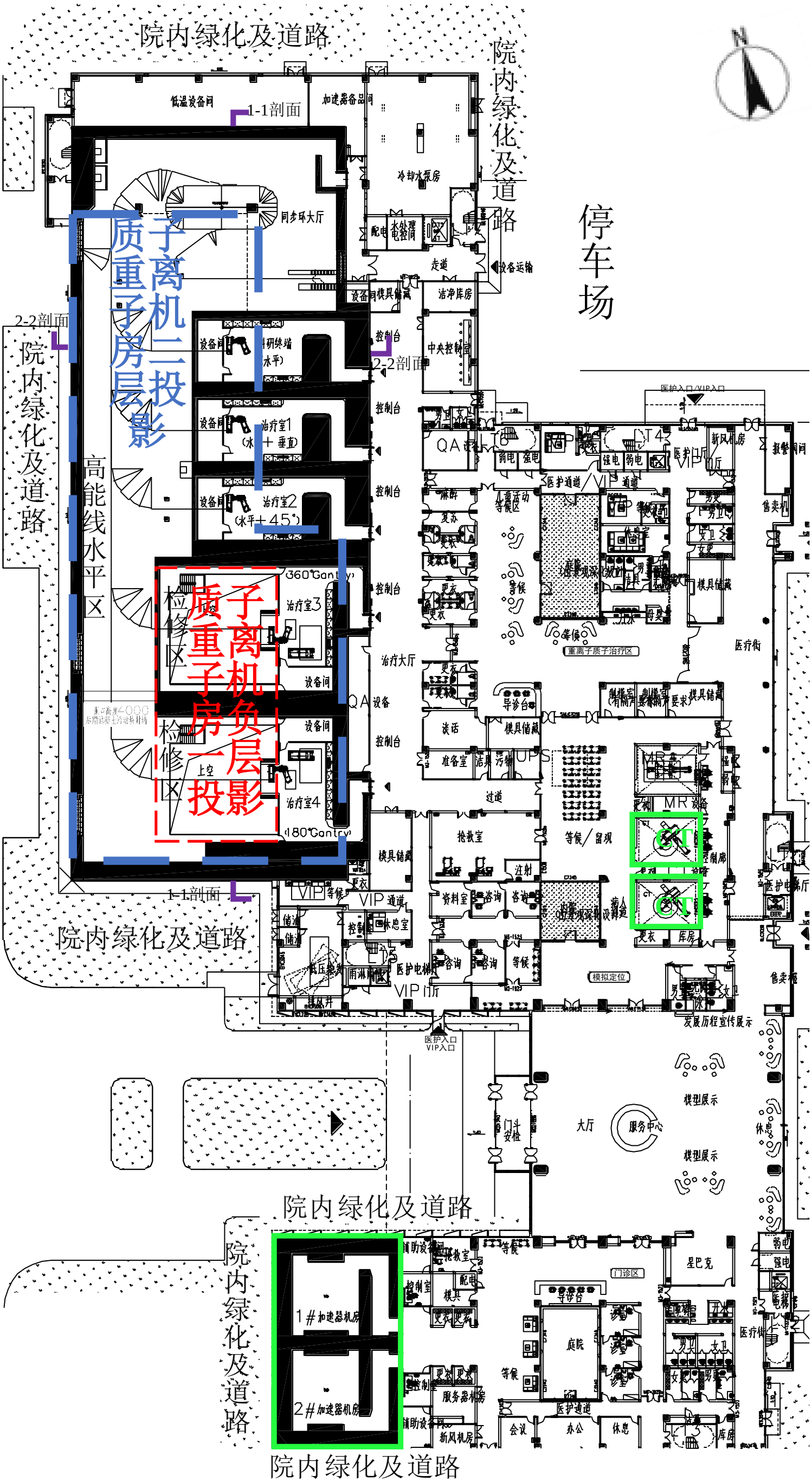


图 1.2.5-6 重离子质子中心一层平面布置图

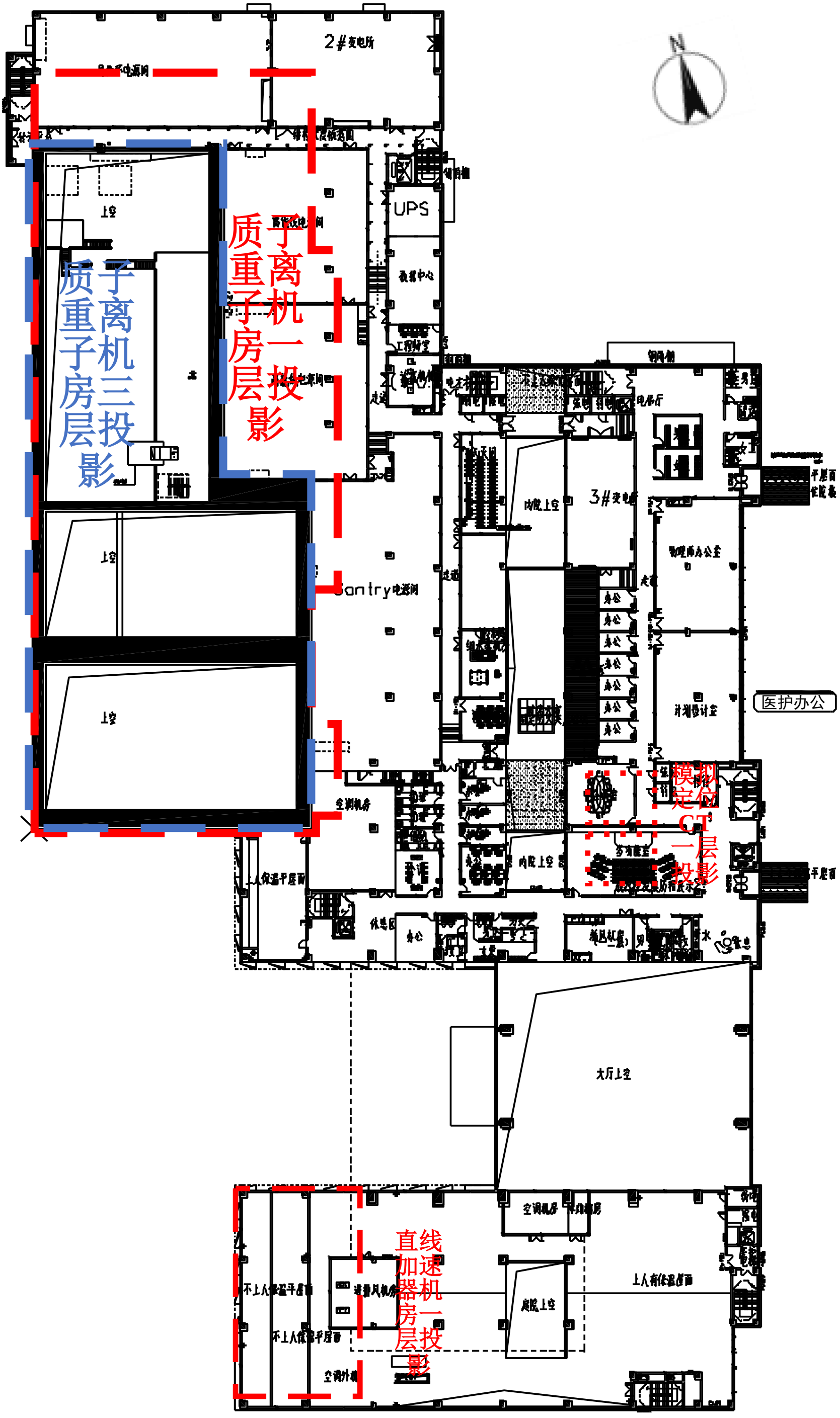


图 1.2.5-7 重离子质子中心二层平面布置图

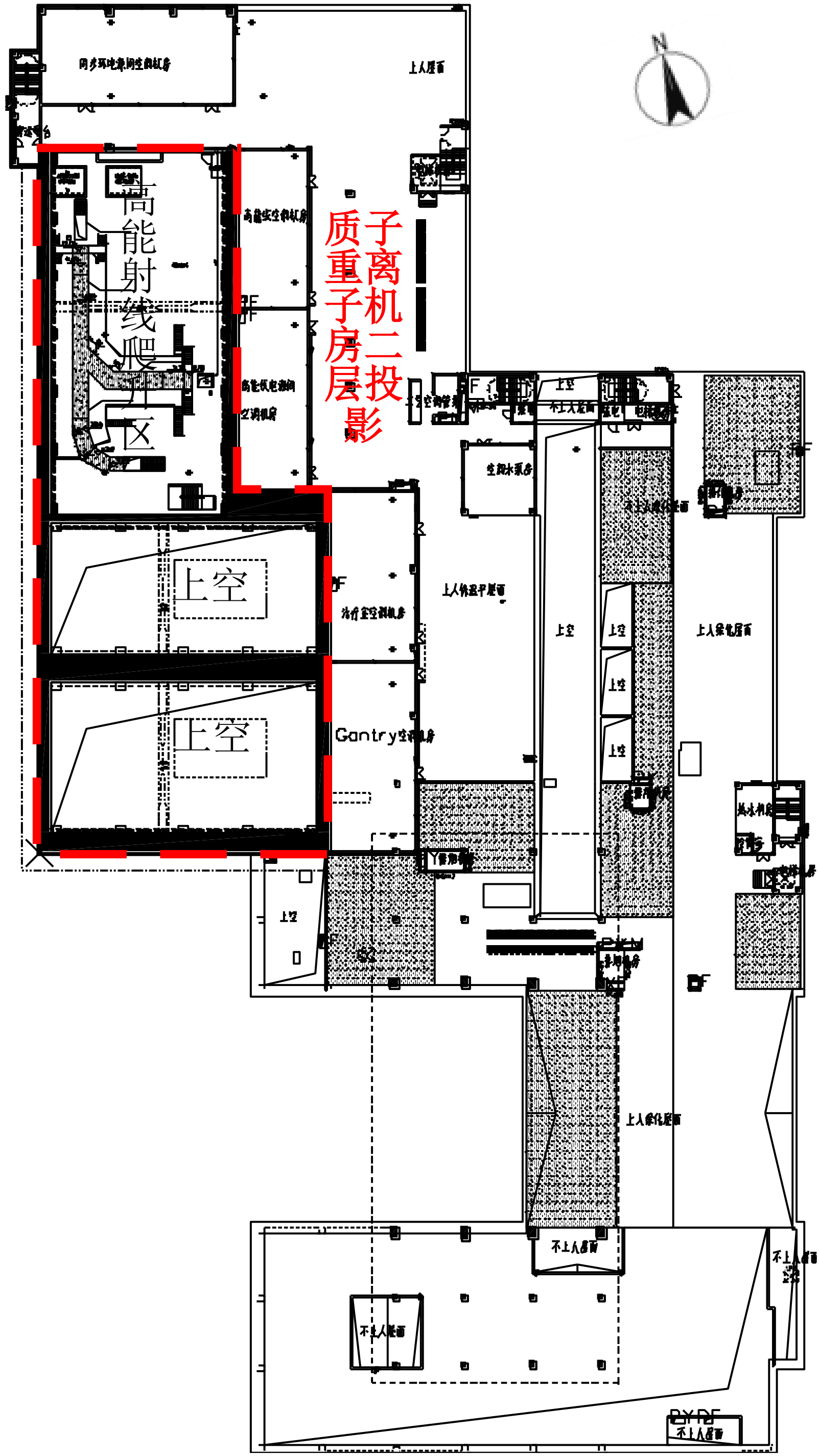


图 1.2.5-8 重离子质子中心三层平面布置图

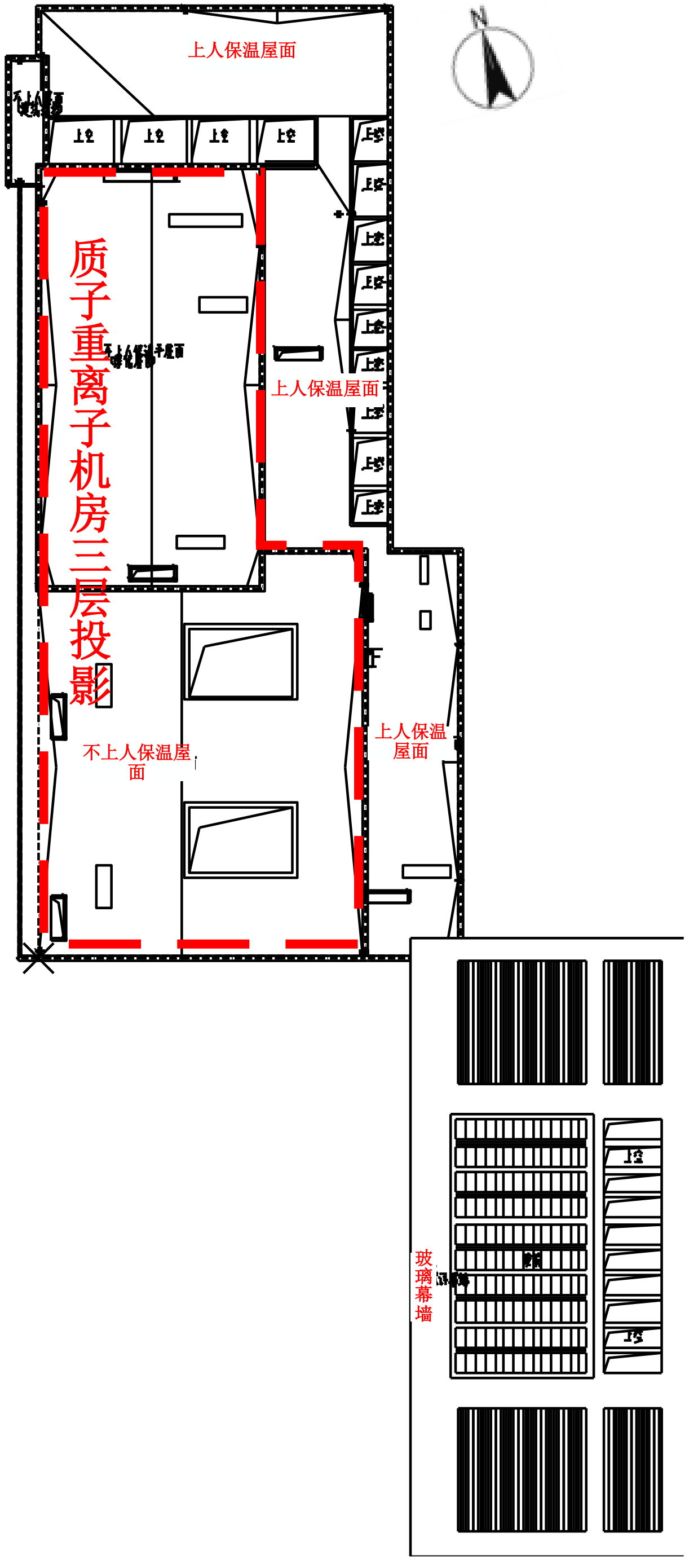
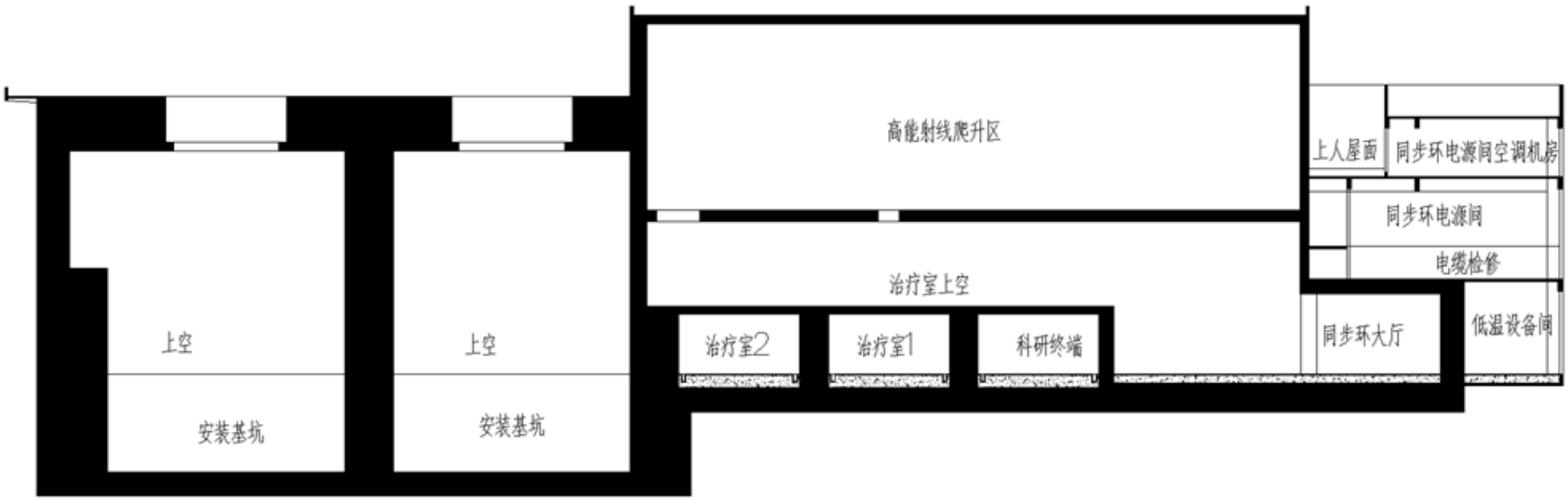


图 1.2.5-9 重离子质子中心屋顶层平面布置图

1-1剖面



2-2剖面

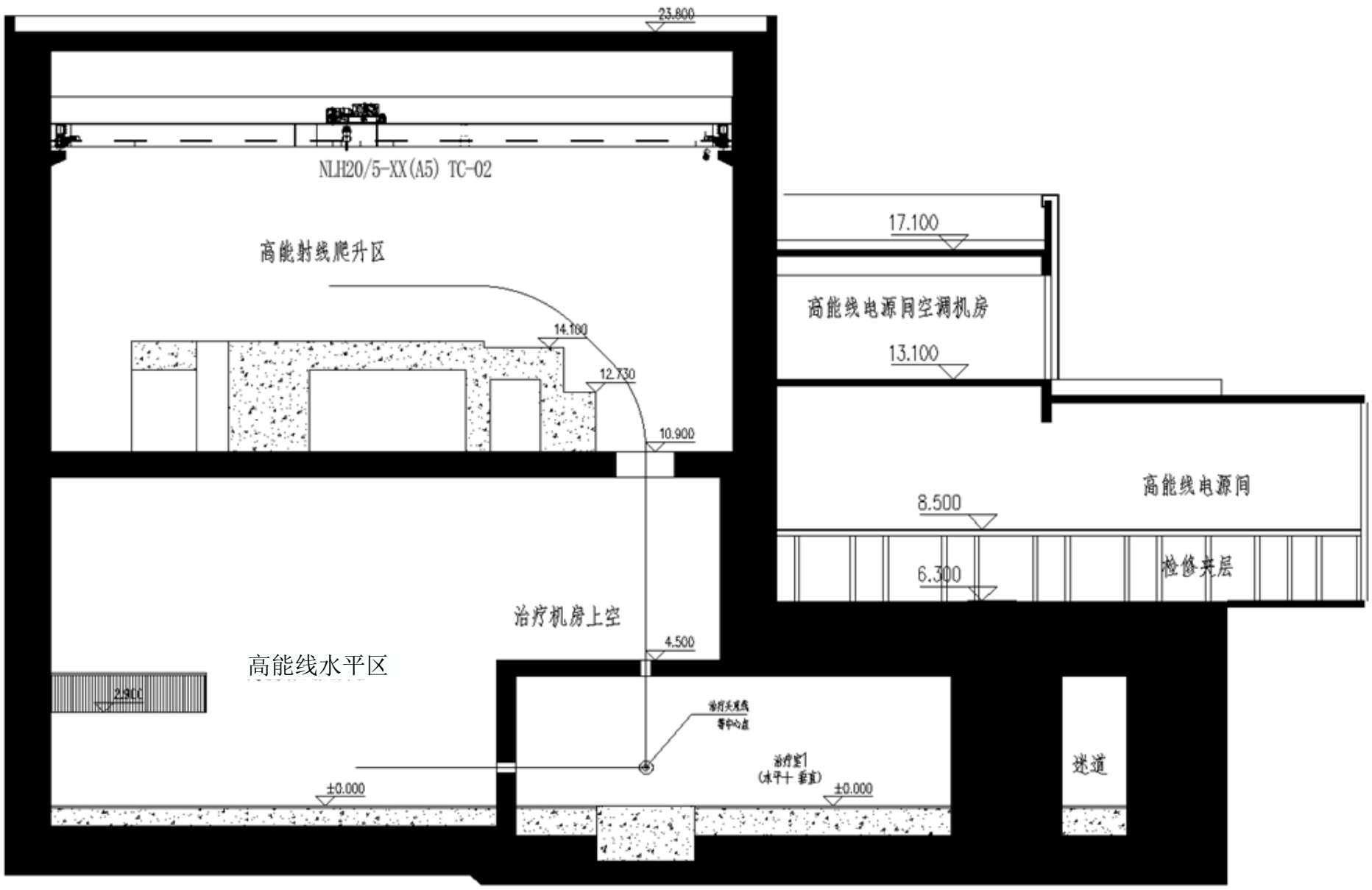


图 1.2.5-10 重离子质子中心剖面布置图

1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状

1.2.6.1 原有核技术利用项目许可情况

医院目前持有的辐射安全许可证书编号为：闽环辐证[00185]，许可种类和范围：使用III类、V 类放射源；使用II类、III类射线装置；生产、使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所，发证日期为 2025 年 4 月 30 日，有效期至 2029 年 10 月 21 日。医院辐射安全许可证见附件 3。

现有核技术利用项目均位于现有院区（福州市晋安区福马路 420 号），环保手续履行情况具体见下表。

表 1.2.6-1 医院已许可密封源一览表

序号	核素	活度(Bq)×枚数	活动种类和范围	工作场所名称	环评情况	验收情况	备注
1	Ir-192	3.7E+11×1 枚	使用III类放射源	1 号妇科后装机机房	2006.03.27[a]	闽环辐验〔2014〕18 号	暂停使用
2	Ir-192	3.7E+11×1 枚		2 号妇科后装机机房			暂停使用
3	Ir-192	3.7E+11×1 枚		放疗中心三楼 1 号后装机机房	闽环辐评〔2022〕17 号	自主验收 2025.04.27	正常使用
4	Ir-192	3.7E+11×1 枚		放疗中心三楼 2 号后装机机房			正常使用
5	Na-22	3.7E+06×1 枚	使用V类放射源	核医学科	闽环辐评〔2012〕52 号[b]	闽环辐验〔2014〕18 号	正常使用

注：a—原福建省环保局审批项目批文无文号，下同；
b—Na-22 为 PET-CT 自带校准源。

表 1.2.6-2 医院已许可非密封放射性物质一览表

序号	工作场所名称	场所等级	核素	日有效最大操作量(Bq)	年最大用量(Bq)	环评情况	验收情况	备注
1	核医学科	乙级	F-18	3.7E+08	9.25E+12	闽环辐评〔2012〕52 号	闽环辐验〔2014〕18 号	正常使用
2	核医学科	乙级	Tc-99m	3.7E+08	9.25E+12			
3	核医学科	乙级	I-131	1.1E+09	1.15E+12	闽环辐评〔2014〕34 号	自主验收 2019.06.14	正常使用
4	I-125 病房	乙级	I-125 粒籽源	3.7E+07	4.44E+11			
5	核医学科	乙级	Y-90	3.0E+08	3.0E+11	辐射影响分析报告	/	正常使用
6	介入科	乙级	Y-90	2.5E+08	2.5E+11	闽环辐评〔2022〕34 号	自主验收 2023.10.21	正常使用
7	介入科	乙级	Tc-99m	1.85E+05	1.85E+10			正常使用
8	核医学科	乙级	Tc-99m	2.775E+07	6.938E+12	闽环辐评〔2024〕29 号	在建，未验收	未投运

表 1.2.6-3 医院已许可射线装置一览表

序号	设备名称	规格型号	位置	类别	环评情况	验收情况	备注
1	直线加速器	ELEKTA Compact	放疗中心 1 楼 3 号机房	II	闽环辐评〔2012〕52 号	闽环辐验〔2014〕18 号	已淘汰
2	直线加速器	ELEKTA Axesse	放疗中心 1 楼 4 号机房	II			正常使用
3	直线加速器	ELEKTA VMAT	放疗中心 1 楼 6 号机房	II			正常使用
4	回旋加速器	SUMITOMO(HM-10)	影像楼 1 楼	II			正常使用
5	直线加速器	ELEKTA Synergy	放疗中心 1 楼 5 号机房	II	2007.02.02		正常使用
6	直线加速器	TrueBeam	放疗中心 1 楼 1 号机房	II	闽环辐评〔2021〕4 号	自主验收 2021.11.02	正常使用
7	TOMO	安科锐 HD	放疗中心 1 楼 2 号 TOMO 机房	II	由原 ELEKTA Compact 变更	自主验收 2019.06.14	正常使用
8	DSA	飞利浦 UNIQ FD20	外科大楼 3 楼①	II	闽环辐评〔2018〕18 号	自主验收 2019.04.03	正常使用
9	数字胃肠机	飞利浦 EssentaRC	影像楼 2 楼	III	闽环辐评〔2021〕52 号	闽环辐验〔2014〕18 号	正常使用
10	CT	东芝 Aquilion	影像楼 3 楼	III			正常使用
11	CT	飞利浦 Brilliance ICT	门诊大楼 1 楼	III	已备案	/	正常使用
12	乳腺钼靶机	GE Senographe DS	影像楼 4 楼	III	闽环辐评[2012]52 号	闽环辐验〔2014〕18 号	正常使用
13	模拟定位机	核通 Simulix-HQ	放疗中心 1 楼	III			正常使用
14	CT 模拟定位机	飞利浦 Bigbore	放疗中心 1 楼	III			正常使用
15	CT 模拟定位机	飞利浦 Brilliance CT	放疗中心 1 楼	III	已备案	/	正常使用
16	体检 X 线机	X1600	门诊大楼 4 楼	III	闽环辐评〔2012〕52 号	闽环辐验〔2014〕18 号	正常使用
17	牙科 X 光机	Expert DC	门诊大楼 3 楼	III			正常使用
18	PET/CT	飞利浦 GEMI	影像楼 1 楼	III			正常使用
19	SPET/CT	GE Lifinia VC Hawkey	影像楼 1 楼	III			正常使用
20	高频移动 X 光机	Mobile Dart Evolution	全院使用	III			正常使用
21	高频移动 X 光机	锐柯 DRX-Revolution	全院使用	III	已备案	/	正常使用
22	移动 C 臂机	西门子 Cios Selec S5	诊疗大楼 5 楼	III	已备案	/	正常使用
23	DR	Digital Diagnose	放疗中心 2 楼	III	已备案	/	正常使用
24	DR	GE Definium 6000 型	影像楼 4 楼	III	已备案	/	正常使用
25	CT	Revolution 型 CT	外科大楼 1 楼①	III	已备案	/	正常使用
26	CT	Revolution	影像楼 1 楼	III	已备案	/	正常使用

27	GE 乳腺机	GE Senographe Essential	影像楼 4 楼	III	已备案	/	正常使用
28	数字肠胃机	CombiDiagnost R90	影像楼 3 楼	III	已备案	/	正常使用
29	医用直线加速器	Unity	放疗中心 1 楼 7 号机房	II	闽环辐评〔2022〕17 号	自主验收 2025.04.27	正常使用
30	医用直线加速器	Elekta Harmony Pro	放疗中心 1 楼 8 号机房	II			正常使用
31	射波刀	CyberKnife M6 FM System	放疗中心 2 楼射波刀机房	II			正常使用
32	TOMO	待定	放疗中心 2 楼 TOMO 机房	II		在建，未验收	未投运
33	TOMO	Accuray Radixact Treatment De	放疗中心 1 楼 3 号 TOMO 机房（原 3 号加速器机房）	II	闽环辐评〔2022〕26 号	自主验收 2022.11.29	正常使用
34	SPECT/CT	待定	核医学科	III	闽环辐评〔2024〕29 号	在建，未验收	未投运
注：①.外科大楼即如今的内科大楼（9 号楼）。							

综上所述，目前医院使用的射线装置、放射源和非密封放射性物质工作场所均按规定办理了环评手续，在辐射安全许可证上获得许可登记，并根据《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》中的相关规定对已投入使用的射线装置、放射源和非密封放射性物质工作场所进行了竣工环境保护验收。

另外，本项目涉及使用I类射线装置，医院目前持有的辐射安全许可证上射线装置的许可种类和范围为：许可使用II类、III类射线装置，并未许可使用 I 类射线装置。因此，在本项目取得批复后，医院应向生态环境部申请领取辐射安全许可证。

1.2.6.2 辐射安全管理现状

1.2.6.2.1 辐射安全管理机构和辐射安全管理规章制度

医院目前已成立专门的辐射安全与环境保护管理委员会，基本组成涵盖放射性同位素的管理与使用等相关部门，明确了组成人员及相关职责，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，具体见后文“6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构”。

医院在不断总结完善近年来核技术利用工作经验的基础上，制定了包括《辐射防护和安全保卫制度》、《放射工作人员岗位职责》、《放射性同位素及射线装置使用登记制度》、《放射性同位素及射线装置台账管理制度》、《射线装置检修和维护制度》、《放射工作定期自查和监测制度》、《放射性同位素与射线装置质量保证方案》、《放射工作人员资格和培训管理制度》、《放射工作人员职业健康检查及保健制度》、《放射工作人员档案管理制度》、《辐射事故/事件应急预案》等规章制度，并严格按照规章制度执行，核技术利用项目运行以来未曾发生过辐射事故。

1.2.6.2.2 辐射工作人员培训情况

医院现有辐射工作人员 430 名，其中仅从事III类射线装置的辐射工作人员均已通过医院自行组织的考核，且自行考核结果均在有效期内；其余辐射工作人员均已参加了国家核技术利用辐射防护与安全培训平台（http://fushe.mee.gov.cn）的辐射防护与安全培训并考核合格，且成绩报告单均在有效期内。

1.2.6.2.3 个人剂量监测及职业健康管理

医院为辐射工作人员配备了个人剂量计，并委托浙江建安检测研究院有限公司进

行个人剂量监测，监测周期不超过三个月。安排专人负责个人剂量监测，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。根据医院2024年1月至2025年1月的个人剂量监测报告（见附件9），医院辐射工作人员共分为五种类别，分别是诊断放射学（2A）、牙科放射学（2B）、核医学（2C）、放射治疗（2D）、介入放射学（2E）、其他（2F），对应最大个人剂量检测值分别为 1.08mSv、0.06mSv、0.14mSv、1.48mSv、0.68 mSv、0.17mSv，均低于其年剂量约束值 5mSv。

此外，医院定期组织对辐射工作人员进行职业健康体检，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。2024 年 2 月，医院组织所有辐射工作人员在福建省福能集团总医院参加了职业健康体检，根据体检报告及复查结果可知（见附件 10），所有辐射工作人员均可继续从事放射工作。

综上所述，医院辐射工作人员个人剂量监测及职业健康监护管理工作状况较好。

1.2.6.2.4 工作场所及环境监测

医院每年委托有资质单位开展辐射工作场所监测和环境监测，监测频次为 1 次/年。医院于 2024 年委托浙江建安检测研究院有限公司对医院辐射工作场所进行监测。医院现有的射线装置、放射源以及非密封放射性物质使用期间，其机房周围 γ 辐射剂量率、场所 β 表面污染水平和中子剂量当量率（部分加速器机房）均能满足相应标准规范的要求。

1.2.6.2.5 辐射监测仪器及防护用品配备情况

福建省肿瘤医院为医护人员和受检者配备了必要的个人防护用品，具体放射防护用品清单详见表 1.2.6-4 所示。

表 1.2.6-4 医院辐射监测仪器及防护用品配备情况一览表

序号	放射防护用品名称	规格型号	数量
1	Matrix 调强剂量验证仪	/	1
2	UNIDOS 绝对剂量测量仪	/	1
3	X-γ 射线报警仪	SB-1	7
4	X 射线防护帘	/	2
5	标准侧防型防护眼镜	EW60 型	20
6	表面污染仪	inspector exp	4
7	单面防护围裙	0.35mmPb	4
8	防辐射护围领（铅围脖）	T150	20
9	防辐射屏风	/	2
10	防辐射铅帽（系带型）	HB51	20

11	防护短围裙	0.35mmPb	8
12	防护短袖围裙	/	4
13	防护面罩	M210	4
14	防护裙	PCO6	4
15	防护围脖	直领	4
16	个人防护报警仪	SB-1	5
17	个人剂量报警仪	/	24
18	铅帽	HB51	14
19	铅手套	0.35mmPb	6
20	铅毯	0.35mmPb	6
21	铅围脖	T150	14
22	铅围裙	/	6
23	铅眼镜	/	10
24	铅衣	/	33
25	射线防护眼镜	C 型	2
26	射线防护衣	/	4
27	儿童用个人防护用品	/	1
28	个人剂量计	/	每人配备

1.2.6.2.6 放射性废物管理情况

医院目前产生的放射性废物主要来自核医学科的运行，按照《核医学科辐射防护与安全管理》（HJ1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）的要求对放射性废物进行管理。

医院核医学科设置了患者专用卫生间和患者专用病房（含卫生间），产生的放射性废液排入衰变池中，经衰变后的废液满足暂存时间后排放至医院污水处理站；核医学科设置贮废间，核医学科产生的放射性废物分类别包装、标注日期后储存在贮废间的铅衰变箱内，满足 HJ1188-2021 暂存时间和监测要求的可对废物清洁解控并作为医疗废物处理；核医学科含放射性废气收集后经独立排风管道引至所在建筑所在屋顶经活性炭过滤净化后高空排放。

除此之外，医院后装机在运行过程中会产生报废的 ^{192}Ir 放射源，新源交接当天，由医科达（上海）医疗器械有限公司协助退役旧源返回原出口国。

1.2.6.3 小结

综上所述，医院原有核技术利用项目环保手续齐全，医院已成立辐射安全与环境保护管理委员会、制定一系列辐射安全管理规章制度和辐射事故/事件应急预案，辐射工作人员培训、个人剂量监测和职业健康管理完善，有符合国家环境保护标准和安全防护要求的场所、设施和设备，具备良好的辐射安全管理综合能力。

1.2.7 本项目与原有核技术利用项目的依托关系

本项目与医院原有核技术利用项目的依托关系如下：

（1）放射性三废处理设施：本项目的放射性三废处理设施均为新建，与医院现有核技术利用项目的放射性废物处理系统相互独立。

（2）辐射工作人员：本项目质子重离子拟配备辐射工作人员 52 名（治疗医生 20 人，治疗技师 20 人，物理师 10 人，护士 2 人），其中依托医院现有放疗科 25 名辐射工作人员，新增辐射工作人员 27 名。物理师、治疗技师只从事本项目质子重离子放疗工作；治疗医生除从事本项目质子重离子放疗工作外，还会继续从事放疗科现有的放疗工作，主要包括：采集专科病史和专科体格检查，为肿瘤患者制定治疗方案，参与患者放疗体位制作，负责勾画放疗靶区及正常组织勾画，提交放疗计划要求，审核放疗计划，患者放疗体位验证以及治疗期间的患者管理及随访等工作，并及时记录各种病历文书。

本项目每间直线加速器机房配备 2 名技师，2 间加速器机房共配备 2 名医生和 2 名物理师，共 8 名辐射工作人员，均为新增。本项目每间模拟定位 CT 机房配备 2 名技师，2 间模拟定位 CT 机房共 4 名辐射工作人员，均为新增。

表 1.2.7-1 本项目依托现有辐射工作人员相关信息

序号	姓名	职业类别	考核成绩报告单	证书有效期	职业健康检查	2024 年 1 月至 2025 年 1 月个人剂量
1	[redacted]	物理师	FS23FJ0200230	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
2		物理师	FS23FJ0200216	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
3		技师	FS23FJ0200304	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.09mSv
4		技师	FS23FJ0200223	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
5		技师	FS23FJ0200302	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.22mSv
6		技师	FS23FJ0200228	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
7		医师	FS23FJ0200310	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
8		物理师	FS23FJ0200259	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
9		医师	FS23FJ0200342	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
10		医师	FS23FJ0200325	2023-5-22 至	2024 年 2 月，可继续	0.04mSv

				2028-5-22	原放射工作	
11	[redacted]	医师	FS23FJ0200295	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
12		医师	FS23FJ0200321	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.06mSv
13		医师	FS23FJ0200335	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
14		医师	FS23FJ0200344	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
15		技师	FS23FJ0200024	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
16		技师	FS23FJ0200243	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.07mSv
17		技师	FS23FJ0200244	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.06mSv
18		技师	FS23FJ0200237	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
19		技师	FS23FJ0200339	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
20		护士	FS23FJ0200338	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
21		护士	FS23FJ0200301	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
22		技师	FS23FJ0200235	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
23		技师	FS23FJ0200280	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.06mSv
24		医师	FS23FJ0200273	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv
25		医师	FS23FJ0200278	2023-5-22 至 2028-5-22	2024 年 2 月，可继续原放射工作	0.04mSv

另外，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，本项目拟新增配备 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；除上述医院人员外，设备生产商兰州泰基离子技术有限公司（以下简称兰州泰基）常驻 15 名维修工程师负责质子重离子放射治疗系统运行期间日常的维护保养、故障维修，不作为医院人员进行管理，其辐射安全与防护培训、个人剂量监测和职业健康管理均由兰州泰基负责，但考虑到维修工程师为本项目射线装置专职驻场维修人员，故保留其受照剂量估算等内容。

（3）辐射安全管理机构和相关规章制度：本项目的辐射安全管理工作统一由医院原有辐射安全与环境保护管理委员会负责；针对本项目核技术利用活动的内容和特点，现有规章制度需要进行补充完善。

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》（1989 年 12 月 26 日第七届全国人民代表大会常务委员会第十一次会议通过；2014 年 4 月 24 日第十二届全国人民代表大会常务委员会第八次会议修订），自 2015 年 1 月 1 日施行修订版；

（2）《中华人民共和国环境影响评价法》（2002 年 10 月 28 日第九届全国人民代表大会常务委员会第三十次会议通过；2018 年 12 月 29 日第二次修正），自 2018 年 12 月 29 日起施行修正版；

（3）《中华人民共和国放射性污染防治法》（2003 年 6 月 28 日中华人民共和国第十届全国人民代表大会常务委员会第三次会议通过），自 2003 年 10 月 1 日起施行；

（4）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2005 年 9 月 14 日经中华人民共和国国务院令第 449 号公布，2019 年 3 月 2 日经中华人民共和国国务院令第 709 号修订），自 2019 年 3 月 2 日起施行修订版；

（5）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2006 年 1 月 18 日国家环境保护总局令第 31 号公布，2021 年 1 月 4 日经生态环境部令第 20 号修正），自 2021 年 1 月 4 日起施行修正版；

（6）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（2011 年 4 月 18 日环境保护部令第 18 号），自 2011 年 5 月 1 日起施行；

（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），自 2017 年 12 月 5 日起施行；

（8）《建设项目环境保护管理条例》（1998 年 11 月 29 日中华人民共和国国务院令第 253 号发布施行；2017 年 7 月 16 日中华人民共和国国务院第 682 号令修订），自 2017 年 10 月 1 日起施行修订版；

（9）《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（中华人民共和国生态环境部令第 16 号），自 2021 年 1 月 1 日起施行；

（10）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》（2019 年 9 月 20 日生态环境部令第 9 号发布），自 2019 年 11 月 1 日起施行；

（11）《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），2020 年 1 月 1 日起施行；

（12）《关于进一步优化辐射安全考核的公告》（生态环境部公告 2021 年第 9 号），2021 年 3 月 15 日施行；

（13）《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评[2017]4 号），自 2017 年 11 月 20 日起施行；

（14）《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），自 2015 年 2 月 27 日起施行。

1.3.2 技术导则、标准

（1）《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）；

（2）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

（3）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；

（4）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；

（5）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）；

（6）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）；

（7）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.2-2011）；

（8）《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）；

（9）《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）；

（10）《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）；

（11）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

（12）《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；

（13）《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）；

（14）《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》（GBZ2.1-2019）及第 1 号修改单；

（15）《环境中放射性核素测量-土壤-第六部分：总α和总β活度测量》（ISO18589-6：2019）；

（16）《环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T 16145-2022）；

（17）《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ1326-2023）；

（18）《电离辐射监测质量保证通用要求》（GB8999-2021）；

（19）《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-1985）。

1.3.3 产业政策

《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（2024 年 12 月 27 日中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 7 号公布），自 2024 年 2 月 1 日起施行。

1.3.4 其它文件、资料

（1） （美）帕特森（H.W.Patterson），（美）托马斯（R.H.Thomas）著；刁会昌等译. 加速器保健物理[M].北京，原子能出版社.1983；

（2） 《恒健质子重离子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；

（3） NCRP. Report NO.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP,2005；

（4） IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001；

（5） IAEA Technical Reports Series NO.283. Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators.IAEC,1988；

（6） 医院提供的与本项目相关的其他技术资料。

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

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）4.9 从事放射治疗的工作人员职业照射和公众照射的剂量约束值应符合以下要求：a）一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a。b）公众照射的剂量约束值不超过0.1mSv/a。因此，本项目以 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值，以 0.1mSv/a 作为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

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），并参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）、《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）中的相关规定，本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平应按照下述规定确定：

（1）关注区域的周剂量参考控制水平 H_c：

机房外工作人员：H_c≤100μSv/周；

机房外非工作人员：H_c≤5μSv/周。

通过周剂量参考控制水平导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$：

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

式中：t 为总周出束时间，T 为人员居留因子，U 为有用线束向关注方向照射的使用因子，本报告对各方向使用因子保守取 1。

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

1）人员居留因子 T＞1/2 的场所：H_c≤2.5μSv/h；

2）人员居留因子 T≤1/2 的场所：H_c≤10μSv/h。

（3）由上述（1）中的导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$ 和（2）中的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,\max}$，选择其中较小者作为关注点的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$，具体数值见表 1.4.2-2。

另外，参考文献《恒健质子重离子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，本报告以“5mSv/h 即 5000μSv/h”作为各辐射工作场所屏蔽体外表面与土壤交界处的剂量率控制水平，后文不再赘述。本项目的居留因子根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）选取，具体数值见下表。

表 1.4.2-1 居留因子的选取

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

根据表 3.4.1-2，本项目质子重离子机房科研室、治疗室 1 和治疗室 2 周出束时间为 9.08h，治疗室 3 和治疗室 4 周出束时间为 11.6h，同步环大厅和高能射线爬升区周出束时间为 50.4h。本项目质子重离子机房屏蔽体外剂量率控制水平计算结果见下表，关注点剂量率控制水平根据标准核算结果大于 2.5μSv/h 时保守取 2.5μSv/h，核算结果小于 2.5μSv/h 时取核算值。

表 1.4.2-2 质子重离子机房周围各关注点处剂量率控制水平计算结果

区域	编号	关注点情况			居留因子	周出束时间，h	H_c，μSv/周	$\dot{H}_{c,d}$，μSv/h	$\dot{H}_{c,max}$，μSv/h	$\dot{H}_c$，μSv/h
同步环大厅	5-1	底部	/	土壤	/	/	/	/	/	5000
	1-3	一层	东侧	加速器备品间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	1-4			迷宫门外	1/8	50.4	5	0.79	10	0.79
	1-5			走道	1/5	50.4	5	0.50	10	0.50
	1-6			设备间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	1-31		西侧	转运平台	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	1-32			楼梯间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	1-31			室外道路及绿化	1/5	50.4	5	0.50	10	0.50
	1-1		北侧	低温设备间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	1-2			加速器备品间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	2-17	二层	西侧	转运平台及楼梯间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	2-20、2-21		同步环大厅上方	电缆夹层	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	2-18			同步环电源间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	2-19			2#变电所	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	2-1			过道	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	2-2			高能线电源间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
高能射线爬升区	5-7	底部	/	土壤	/	/	/	/	/	5000
	3-2	三层	东侧	高能线空调机房	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	3-3、3-4			高能线电源间空调机房	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	3-7		西侧	转运平台及楼梯间	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	3-1		北侧	上人屋面	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
	4-8~4-14、4-19、4-20	屋顶层	顶部	转运平台及楼梯间、上人屋面	1/16	50.4	5	1.59	10	1.59
科研	5-2	底部	/	土壤	/	/	/	/	/	5000
	1-8	一层	东侧	控制台	1	9.08	100	11.01	2.5	2.50

室	1-9			治疗室门外	1/8	9.08	*5*	4.41	10	2.50
	1-7			模具储藏	1/16	9.08	*5*	8.81	10	2.50
	1-27		南侧	治疗室 1	1/2	9.08	5	1.10	10	1.10
	2-3	二层	科研室上方	高能线电源间	1/16	9.08	5	8.81	10	2.50
	2-11~2-16			电缆夹层	1/16	9.08	5	8.81	10	2.50
治疗室 1	5-3	底部	/	土壤	/	/	/	/	/	5000
	1-10	一层	东侧	控制台	1	9.08	100	11.01	2.5	2.50
	1-11			治疗室门外	1/8	9.08	5	4.41	10	2.50
	1-28		南侧	治疗室 2	1/2	9.08	5	1.10	10	1.10
	1-26		北侧	科研室	1/2	9.08	5	1.10	10	1.10
	2-4	二层	治疗室上方	高能线电源间	1/16	9.08	5	8.81	10	2.50
	2-11~2-16			电缆夹层	1/16	9.08	5	8.81	10	2.50
治疗室 2	5-4	底部	/	土壤	/	/	/	/	/	5000
	1-12	一层	东侧	控制台	1	9.08	100	11.01	2.5	2.50
	1-13			治疗室门外	1/8	9.08	5	4.41	10	2.50
	1-29		南侧	治疗室 3	1/2	9.08	5	1.10	10	1.10
	1-27		北侧	治疗室 1	1/2	9.08	5	1.10	10	1.10
	2-5	二层	治疗室上方	高能线电源间	1/16	9.08	5	8.81	10	2.50
	2-11~2-16			电缆夹层	1/16	9.08	5	8.81	10	2.50
治疗室 3	5-5	底部	/	土壤	/	11.6	5	/	10	5000
	B1-8	负一层	南侧	治疗室 4 安装基坑	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	B1-1、B1-5、B1-6		其余三侧	土壤	/	/	/	/	/	5000
	1-14	一层	东侧	控制台	1	11.6	100	8.62	2.5	2.50
	1-15			治疗室门外	1/8	11.6	5	3.45	10	2.50
	1-16			模具储藏	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	1-30		南侧	治疗室 4	1/2	11.6	5	0.86	10	0.86
	1-28		北侧	治疗室 2	1/2	11.6	5	0.86	10	0.86
	2-7	二层	东侧	Gantry 电源间	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	2-22			电缆夹层	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50

	2-6		北侧	高能线电源间	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	3-5	三层	东侧	治疗室空调机房	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	4-15、4-18	屋顶层	顶部	不上人屋面	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
治疗室4	5-6	底部	/	土壤	/	/	/	/	/	5000
	B1-9	负一层	北侧	治疗室3安装基坑	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	B1-2、B1-3、B1-4		其余三侧	土壤	/	/	/	/	/	5000
	1-17	一层	东侧	模具储藏	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	1-18			控制台	1	11.6	100	8.62	2.5	2.50
	1-19			治疗室门外	1/2	11.6	5	0.86	10	0.86
	1-20			模具储藏	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	1-21			卫生间、更衣间	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	1-22、1-23		南侧	VIP等候	1/5	11.6	5	2.16	10	2.50
	1-33			室外道路及绿化	1/5	11.6	5	2.16	10	2.50
	1-26		西侧	室外道路及绿化	1/5	11.6	5	2.16	10	2.50
	1-29		北侧	治疗室3	1/2	11.6	5	0.86	10	0.86
	2-11~2-16	二层	东侧	电缆夹层	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	2-8			Gantry电源间	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	2-9			空调机房	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	2-10		南侧	可上人屋面	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	3-6	三层	东侧	Gantry空调机房	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
	4-16、4-17	屋顶层	顶部	不上人屋面	1/16	11.6	5	6.90	10	2.50
注：①使用因子保守取1； ②关注点剂量率控制水平根据标准核算结果大于 2.5μSv/h 时保守取 2.5μSv/h，核算结果小于2.5μSv/h时取核算值。										

根据医院提供资料，本项目拟新建 2 间直线加速器机房，分别安装 1 台电子直线加速器，投入使用后，预计每台加速器每天放射治疗患者最多为 60 人次，平均每名患者治疗照射最大时间为 1.5min，每周工作 5 天，则直线加速器日照射时间为 1.5h，周照射时间为 7.5h，年照射时间为 375h。本项目直线加速器机房屏蔽体外剂量率控制水

平计算结果见下表。

表 1.4.2-3 直线加速器机房周围各关注点处剂量率控制水平计算结果

关注点		使用因子 U	居留因子 T	t h/周	$\dot{H}_c$ μSv/周	$\dot{H}_{c,d}$ μSv/h	$\dot{H}_{c,max}$ μSv/h	$\dot{H}_c$ μSv/h
直线加速器机房	a 点	1	1/2	7.5	5	1.33	10	1.33
	b 点	1	1/5	7.5	5	3.33	10	3.33
	l 点	1	1/16	7.5	5	10.67	10	10
	e 点	1	1/5	7.5	5	3.33	10	3.33
	f 点	1	1	7.5	100	13.33	2.5	2.5
	k 点	1	1/16	7.5	5	10.67	10	10
	c1/c2 点	1	1/2	7.5	5	1.33	10	1.33
	d1/d2 点	1	1/5	7.5	5	3.33	10	10
	m1/m2 点	1	1/16	7.5	5	10.67	10	10
	g	1	1/8	7.5	5	5.33	10	5.33

本项目模拟 CT 定位机屏蔽体剂量率控制水平参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）相关规定：机房外周围剂量当量率水平不大于 2.5μSv/h。

1.4.3 放射性废物排放限值

1.4.3.1 放射性废液

本项目产生的放射性废液主要是用于冷却同步加速器部件的回路更换下来的冷却水。本项目质子重离子机房同步环大厅西北角拟设置 2 个事故收集池，尺寸（长×宽×深）为 3m×1.5m×2.6m，单个事故收集池有效贮存容积约为 11.7m^3，在一层治疗室 3 西侧拟设置 1 个事故收集池，尺寸（长×宽×深）为 2m×1.5m×2.9m，事故收集池有效贮存容积约为 8.7m^3；治疗室 4 地下一层安装基坑西南角拟设置 1 个事故收集池，尺寸（长×宽×深）为 3m×1.5m×2m，事故收集池有效贮存容积约为 9m^3，具体位置见图 4.1.3-1。放射性废液排放前必须进行取样测量，监测结果同时满足以下标准，方可作为一般废水排放：

（1）根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的相关规定，放射性废液中主要核素 ^3H 和 ^7Be 的豁免水平、单次排放限值 $1ALI_{min}$ 和单月排放限值 $10ALI_{min}$ 列于下表。

表 1.4.3-1 质子重离子放射治疗系统产生的放射性废水中相关核素排放限值

核素	豁免活度浓度，Bq/g	豁免活度，Bq	单次排放限值 $1ALI_{min}$，Bq	单月排放限值 $10ALI_{min}$，Bq
^3H	1.0E+06	1.0E+09	1.11E+09	1.11E+10
^7Be	1.0E+03	1.0E+07	3.85E+08	3.85E+09

（2）放射性废液的排放执行《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）“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 α、总 β 的排放标准要求，具体列于下表。

表 1.4.3-2 《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）中综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值中总 α、总 β 的排放限值

项目	排放标准，Bq/L
总 α	1
总 β	10

1.4.3.2 放射性固体废物

本项目质子重离子一体化治疗系统运行过程中将产生感生放射性固体废物，主要包括加速器维护维修时产生的废弃的加速器结构部件等，加速器停机后对活化结构部

件剂量率贡献较大的核素与质子治疗系统类似，主要是 ^{54}Mn、^{51}Cr、^{52}Mn、^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。此外，冷却水循环系统使用的聚酯纤维滤芯和放射性废气活性炭吸附装置中定期更换的废弃滤芯和活性炭也作为放射性固体废物管理。

建设单位拟在质子重离子机房内 3F 高能射线爬升区东北侧设置 2.2m 高不锈钢围栏作为放射性废物暂存间，具体位置见图 4.1.3-1，感生放射性固废分类收集后暂存于放射性废物暂存间内，放射性废物暂存间防护门外拟设置电离辐射警告标志。拆除后需对其进行表面辐射水平监测，对剂量率水平较高的部件，需暂存在带锁的屏蔽容器内。对于表面剂量率水平较低的废物，直接袋装后集中暂存。屏蔽容器或废物袋上贴有警示标志和标签，标明废物名称、剂量率水平和存放日期等信息。

建设单位拟根据放射性固体废物的贮存情况进行集中处理，处理前需对其活度或活度浓度进行分析：

（1）对于满足解控要求的固体废物，可回收利用的部件，由设备生产厂商统一回收；不能回收利用的部件，经审管部门认可后，方可解控后按一般废物处理；

（2）对于不满足解控要求的由医院申请送往城市放射性废物库或有资质的单位贮存。

建设单位拟建立放射性固体废物台账，对每次放射性固体废物的贮存和处置情况进行记录并存档，具体记录内容包括固体废物名称、废物量、剂量率监测结果、活度分析结果以及最终去向等。

本项目放射性固体废物管理按照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）执行，具体如下：

“8.2.2.1 质子重离子加速器调试和运行期间，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理。拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。

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，集中放置在固态废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平送交有资质的单位收贮。

8.2.2.3 建立放射性固态废物台账，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态废物处置，并做好存档记录。”

放射性固体废物的豁免主要参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中 A2.1 的规定“任何时间段内在进行实践的场所存在的给定核素的总活度或在实践中使用的给定核素的活度浓度不超过表 A1 所给出的或审管部门所规定的豁免水平”。附录 A 表 A1 中给出的与质子重离子放射治疗系统产生的放射性固体废物相关的放射性核素的豁免活度浓度和活度列于下表。对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各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，方可给予豁免。

表 1.4.3-3 质子重离子放射治疗系统活化靶件中放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

核素	活度浓度，Bq/g	活度，Bq	核素	活度浓度，Bq/g	活度，Bq
^{3}H	1E+06	1E+09	^{53}Mn	1E+04	1E+09
^{7}Be	1E+03	1E+07	^{54}Mn	1E+01	1E+06
^{14}C	1E+04	1E+07	^{56}Mn	1E+01	1E+05
^{24}N	1E+01	1E+05	^{52}Fe	1E+01	1E+06
^{32}P	1E+03	1E+05	^{55}Fe	1E+04	1E+06
^{33}P	1E+05	1E+08	^{59}Fe	1E+01	1E+06
^{35}S	1E+05	1E+08	^{55}Co	1E+01	1E+06
^{37}Ar	1E+06	1E+08	^{56}Co	1E+01	1E+05
^{42}K	1E+02	1E+06	^{57}Co	1E+02	1E+06
^{43}K	1E+01	1E+06	^{58}Co	1E+01	1E+06
^{46}Sc	1E+01	1E+06	^{60}Co	1E+01	1E+05
^{47}Sc	1E+02	1E+06	^{61}Co	1E+02	1E+06
^{48}Sc	1E+01	1E+05	^{59}Ni	1E+04	1E+08
^{45}Ca	1E+04	1E+07	^{63}Ni	1E+05	1E+08
^{47}Ca	1E+01	1E+06	^{65}Ni	1E+01	1E+06
^{48}V	1E+01	1E+05	^{64}Cu	1E+02	1E+06
^{51}Cr	1E+03	1E+07	^{65}Zn	1E+01	1E+06
^{52}Mn	1E+01	1E+05			

1.4.4 其他标准

1.4.4.1《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）

本项目拟建 2 台模拟定位 CT 机房、质子重离子机房治疗室 3 和治疗室 4 内分别配套使用 1 台滑轨 CT 机，CT 机房有效使用面积及最小单边长度应满足《放射诊断射防

护要求》（GBZ130-2020）表 2 中“CT 机（不含头颅移动 CT）”对应要求。CT 机房的屏蔽防护铅当量厚度需满足《放射诊断射防护要求》（GBZ130-2020）表 3 中“CT 机（不含头颅移动 CT）”对应要求。

表 1.4.4-1 X 射线设备机房（照射室）使用面积、单边长度的要求

设备类型	机房内最小有效使用面积 [d]m^2	机房内最小单边长度 [e]m
CT 机（不含头颅移动 CT）	30m^2	4.5m
d 机房内有效使用面积指机房内可划出的最大矩形面积； e 机房内单边长度指机房内有效使用面积的最小边长。		

表 1.4.4-2 不同类型 X 射线装置设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向 铅当量 mmPb	非有用线束方向 铅当量 mmPb
CT 机（不含头颅移动 CT）	2.5	

根据 GBZ 130-2020 的 6.3.1 小节，CT 机房的辐射屏蔽防护，应满足机房外的周围剂量当量率不大于 2.5μSv/h。对于本项目，由于本项目滑轨 CT 机位于质子重离子机房治疗层内，且滑轨 CT 机和质子重离子放射治疗系统共用控制室，因此需确保在滑轨 CT 机出束期间，质子重离子机房外的周围剂量当量率不大于 2.5μSv/h。

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”。

根据 HJ10.1-2016 的要求，并考虑到设备自身特点及其辐射污染源种类和大小以及同类型设备的环境影响评价，本项目质子重离子放射治疗系统的电离辐射环境影响评价范围取质子重离子机房四周实体屏蔽边界向外 100m 的范围、电子直线加速器和模拟定位 CT 机房实体屏蔽边界外 50m 的范围，根据质子重离子放射治疗系统、电子直线加速器和模拟定位 CT 机房位置情况，分别划出评价范围，项目评价范围取最大轮廓范围，如图 1.5.1-1 所示。

1.5.2 环境保护目标

本项目质子重离子机房为四层结构，拟建于院区新建重离子质子中心的负一层、一层、二层和三层。质子重离子机房东、南侧100m范围内均为医院内部建筑物；西侧100m内范围主要为空地（规划南洋路）和河道；北侧100m内范围主要为万新路；下方为土层，上方为不上人屋面。

直线加速器机房、模拟定位CT机房位于离子质子中心一层。评价范围内主要为医院内部建筑，直线加速器机房西侧50m涉及院外空地（规划南洋路）。

重离子质子中心负一层至四层的功能布置情况见表1.2.1-1，主要布置了质子重离子机房、直线加速器机房、模拟定位CT机房的配套用房、医务人员的办公场所等。本项目评价范围内的医院内部建筑物主要是北侧的辅助用房（污水处理间、液氧罐区、医疗废物间、生活垃圾间等），东侧的住院综合楼、门诊医技楼。重离子质子中心不涉及儿科病房、产房等特殊人群长停留的区域。

综上所述，本项目评价范围内的环境保护目标以本项目辐射工作人员、医院内部工作人员、公众成员以及西侧空地（规划南洋路）和河道、北侧万新路公众成员为主，具体列于表1.5.2-1。

1.6 安全责任划分

本项目涉及质子重离子放射治疗系统安装调试、使用和维修维护，医院应全面负责各阶段的安全责任，对应的安全责任划分如下：

（1）安装调试阶段：医院负责提供能够满足质子重离子系统安装、调试要求及我国法规标准要求的辐射工作场所和安全保卫工作，确保负责安装调试的兰州泰基离子技术有限公司工作人员的安全。

（2）使用和维修维护阶段：医院负责运行、维修、维护以及保养过程中的辐射防护和安全保卫；负责管理本项目辐射工作人员，确保其辐射安全与防护培训、个人剂量监测和职业健康管理均已完善；负责质子重离子系统服务期满后的退役活动，按照相关法规规定完成退役环保手续。

表 1.5.2-1 本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

辐射工作场所	方位		周围环境情况		与项目边界水平距离，m	与项目边界垂直距离，m	照射类型	规模	照射途径	评价标准
质子重离子机房	重离子质子中心内部	内部	负一层	质子重离子治疗室 3 和 4 安装基坑、事故收集池	/	/	职业照射	67 人	外照射（瞬发辐射外照射和空气浸没外照射）和吸入内照射	5mSv/a
			一层	同步环大厅、事故收集池、质子重离子治疗机房治疗层						
			二层	质子重离子机房上空、高能爬升区						
			三层	质子重离子机房上空、高能爬升区						
		北侧	一层	加速器备品间	紧邻	/	公众照射	一般无人停留	瞬发辐射外照射	0.1mSv/a
				低温设备室	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
			二层	电缆夹层	/	紧邻	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
				同步环电源间、2#变电所	2	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
				走廊	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			三层	同步环电源间空调机房	4	/	公众照射	一般无人停留		0.1 mSv/a
				走廊	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		东侧	一层	走廊、设备间、模具储藏室、控制台、治疗大厅、QA 设备室	紧邻	/	职业照射、公众照射	职业：67 人 公众：流动人群		职业：5mSv/a； 公众：0.1mSv/a
				质子重离子治疗配套用房及门诊办公区、模拟定位区及其他功能用房	2	/	职业照射、公众照射	职业：约 50 人 公众：流动人群		职业：5mSv/a； 公众：0.1mSv/a
			二层	电缆夹层	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
				高能线电源间、Gantry 电源间、空调机房	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
				工程师室、数据中心、治疗机柜室、走廊、楼梯间、电梯间	7	/	职业照射	15 人		职业：5mSv/a；
				医护办公区	5	/	职业照射	52 人		
			三层	同步环电源间空调机房、高能线电源间空调机房、治疗室空调机房、高能线空调机房、辅助设备区	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
		南侧	一层	VIP 等候、更衣、卫生间	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
				低压柴发及其控制室、休息室等	3	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
				服务大厅	18	/	公众照射	约 10 人		0.1mSv/a
				电子直线加速器门诊及其治疗区	44	/	职业照射、公众照射	约 50 人		职业：5mSv/a； 公众：0.1mSv/a
			二层	可上人屋面	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
			三层	Gantry 电源间	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a

辐射工作场所	方位		周围环境情况		与项目边界水平距离，m	与项目边界垂直距离，m	照射类型	规模	照射途径	评价标准
		西侧	一层	楼梯间、转运平台	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			二层	楼梯间、转运平台	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			三层	楼梯间、转运平台	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		上方	不上人屋面		紧邻	/	——	——		——
		下方	土层		紧邻	/	——	——		——
质子重离子机房（相对地面为位置）	重离子质子中心外部	北侧	院内道路及绿地		6	/	公众照射	流动人群	外照射（瞬发辐射外照射和空气浸没外照射）和吸入内照射	0.1mSv/a
			辅助用房		88	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			万新路		100	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		东侧	停车场		22	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			住院综合楼		90	/	公众照射	约 500 人		0.1mSv/a
			门诊医技楼		82		公众照射	约 500 人		0.1mSv/a
			院内道路和景观花园		52	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		南侧	院内道路		20	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			停车场		53	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			二期预留用地（目前为空地）		96	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		西侧	院内道路		9	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			空地（规划南洋路）和河道		24	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
直线加速器机房	重离子质子中心内部	内部	内部		/	/	职业照射	8	外照射	5mSv/a
		东侧	控制室		紧邻	/	职业照射	8		5mSv/a
			辅助设备间		紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
			过道		紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		上方	进排风机房、空调外机、可上人屋面		紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
		下方	土层		紧邻	/	——	——		——
	重离子质子中心外部	东侧	院内道路		46	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		南侧	院内道路		10	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			二期预留用地（目前为空地）		22	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		西侧	停车场及院内道路		5	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			空地（规划南洋路）		50	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		北侧	院内道路		2	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
模拟定位 CT 机房	重离子质子中心内部	内部	内部		/	/	职业照射	8		5mSv/a
		东侧	控制廊		紧邻	/	职业照射	8		5mSv/a

辐射工作场所	方位		周围环境情况	与项目边界水平距离，m	与项目边界垂直距离，m	照射类型	规模	照射途径	评价标准
		南侧	CT 设备间、更衣室、注射室、过道	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		西侧	病人通道	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		北侧	MR 设备间	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			排烟井	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
		上方	强弱电间、中会议室、走廊、多功能室	紧邻	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
		下方	土层	紧邻	/	——	——		——
	重离子质子中心外部	东侧	院内道路	13	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
			门诊医技楼	44	/	公众照射	约 500 人		0.1mSv/a
		西侧	院内道路	31	/	公众照射	流动人群		0.1mSv/a
本项目周边	四周及上下		评价范围内其他场地	0-100	0-100	公众照射	流动人群	外照射和内照射	0.1mSv/a

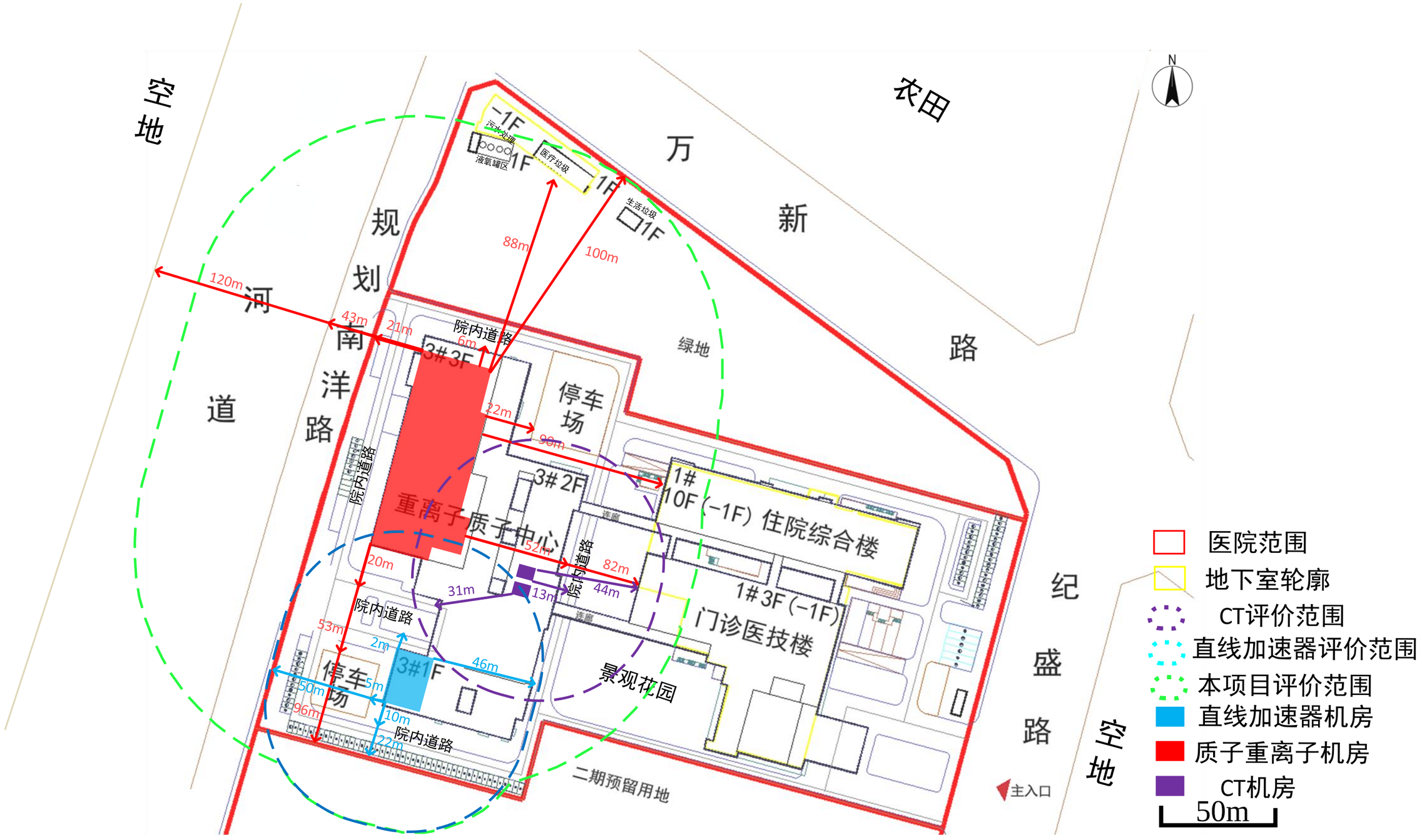


图 1.5.1-1 本项目电离辐射评价范围及四至关系图

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

本项目建设地点是福建省福州市长乐区万新路以南、怀海路以北、南洋路东侧、纪盛路西侧地块福建省肿瘤医院重离子质子中心负一层、一层、二层和三层质子重离子机房，地理位置见图 1.2.5-1。

福州市位于中国东南沿海，地处福建省中部偏北地区，属于闽江下游冲积平原。纬度大约在北纬 29.87°至 31.13°之间，经度在东经 117.41°至 121.56°之间。福州市以“榕城”著称，是福建省的政治、经济和文化中心，周围环绕着厦门、泉州等城市，地理位置优越，是连接东南沿海和闽中地区的交通枢纽。

长乐区是福州市下辖的一个区，位于闽中地区的东南部，与晋江市接壤。长乐区的纬度大约在北纬 29.45°至 30.01°之间，经度在东经 118.23°至 119.16°之间。该地区以丘陵和平原地形为主，是福建省东南部重要的经济和交通枢纽区域。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

福州市地貌属典型的河口盆地，东有鼓山，西有旗山，南有五虎山，北有莲花峰，其海拔多在 600～1000 米之间。南部为盆地的大部分；北部为山地，从西南向东倾斜；西部为中低山地；东部丘陵平原相间。山地、丘陵占全区土地总面积的 72.68%，其中山地占 32.41%，丘陵占 40.27%。鹫峰、戴云两山脉斜切南北，闽江横贯市区东流入海。

长乐区是一个准半岛，地貌属低山丘陵小区。低山丘陵略成“工”字型，分布于中部和南部。东部为开阔的滨海平原，梗以花岗岩残丘，最低处海拔 2～5 米。西部为营前-玉田平原，贯以溪川，属福州平原一部分。境内山丘属戴云山脉东翼的延伸支脉。西部有大象山、灵隐墓、龙卷墓、黄晶岭，走向北东。蟛蜞山、天台岭、大寨山等为天然屏障雄峙北部。天险、大埔尾、六平、董奉诸山直贯中部，大埔尾为全境之最，天险山次之，崩山、旗山、风洞、御国诸山横踞南部。

2.2.2 地质条件

福州地区古老地层极少出露，元古界及上三叠统文宾山组仅有小面积出露于永泰

县西北部的长庆乡。上侏罗统、白垩系的陆相火山岩地层则分布广泛，第四系晚更新统和全新统沿海一带也较发育。由于地质构造和古地理环境的区域差异，各地地层出露的状况也有不同。中、新生界按岩石的特征，从老到新可划分为 8 个地层单位，即上侏罗统长林组、南组、坂头组、白垩系石帽山群(1990 年有人把该群上部紫红色沉积一水山岩系划出，定名为石牛山组)、中更新统同安组、上更新统龙海组、全新统东山组和长乐组。

长乐组为第四纪全新世中晚期疏松沉积物。创名剖面见于长乐市潭头镇厚东村，全省沿海地区沿用。主要成因类型为海积一冲积层，分布于福州、长乐、连江等市县沿海、闽江、整江河口段,海坛岛芦洋埔平原及一些半岛和岛屿。地层剖面分为下、中、上三段。下段由海相灰黑色淤泥组成，局部地方(如闽江古河道)由中细砂、粘土组成，厚 1.5~34 米，埋藏于地下。中段分布最广由海相及少量冲积相灰黑色富含腐植质淤泥组成,厚 2~30 米,掩埋于地下。上段由冲积相灰黄灰色砂质粘土、粘土、砂砾石组成，厚 0.5~15 米，露出地表，含丰富化石，有人类活动遗迹。此外，在滨海平原、岛屿和半岛迎风岸带尚有风积层，主要岩性为黄、黄白色细砂、粉砂。石英砂含量高，分选性好，结构松散，厚 2~20 米，覆盖在海积平原或低丘上，构成滨海沙丘、沙垅、沙纹等风成地貌类型。在迎风坡上分布高程可达海拔 60~70 米。为较好的铸造型砂、水泥标准砂和化纤砂，闽江河床中则形成优良的建筑砂。

2.2.3 气候

福州市属典型的亚热带季风气候，气温适宜，温暖湿润，四季常青，阳光充足，雨量充沛，霜少无雪，夏长冬短，无霜期达 326 天。年平均日照数为 1700~1980 小时；年平均降水量为 900~2100 毫米；年平均气温为 20~25℃，最冷月 1~2 月，平均气温达 6~10℃；最热月 7~8 月，平均气温为 33~37℃。极端气温最高 42.3℃，最低-2.5℃，2013 年福州成为四大火炉之首。年相对湿度约 77%。常出现热岛效应，又福州为盆地地形，夏季中午气温高达 36℃以上。主导风向为东北风，夏季以偏南风为主。7~9 月天气炎热，是台风活动集中期，每年平均台风直接登陆市境有 2 次。

长乐区属中亚热带海洋性季风气候区，暖和湿润，夏长少酷暑，冬短少霜雪。年平均气温 19.3℃。1 月平均气温 10.3℃，极端低温-1.3℃；7 月平均气温 28.3℃，极端高温 37.4℃。无霜期 333 天。降水量 1382.3 毫米。年平均风速每秒 4.1 米，大多东北风。

2.2.4 水文

福州市水资源十分丰富。闽江是全省最大的水系，发源于武夷山脉，在水口镇流入福州境内；自西北向东南流经闽清县、闽侯县、福州市区、长乐区，分别从长门水道和梅花港水道注入东海。闽江全长 530 千米，在福州境内 150 千米；流域面积 60992 平方千米，在福州市境内 8011.27 平方千米。境内主要支流有安仁溪、梅溪、大樟溪、大目溪、新店溪、营前溪等。福州市区水道密布，主要有晋安河、白马河、光明港、安泰河等 30 多条内河，都与闽江沟通，水质良好。

长乐区有闽江横贯北境，是境内最主要的河流，自黄石至梅花入海，全程约 35 公里。西部较大的河流有上洞江、下洞江，其余河流均较短小，长度仅在 11～16 公里之间，多源自南部诸山，注入江海。河网密度平均每平方公里 0.5～1 公里，平原地区每平方公里 2 公里。另有西湖、东湖、福湖、天塘湖等小湖泊，面积仅 1～2 平方公里。

2.3 社会经济状况

2024 年，福州市固定资产投资比上年增长 3.2%。第一产业投资增长 9.2%；第二产业投资增长 31.4%，其中，工业投资增长 30.2%；第三产业投资下降 5.2%。基础设施投资增长 18.3%。全年到位资金比上年下降 3.0%。

2024 年，福州市居民人均可支配收入 48861 元，比上年增长 5.3%。按常住地分，农村居民人均可支配收入 28636 元，增长 6.7%；城镇居民人均可支配收入 58009 元，增长 4.3%。全年居民人均生活消费支出 34216 元，比上年增长 5.9%。按常住地分，农村居民人均生活消费支出 23256 元，增长 6.1%；城镇居民人均生活消费支出 39174 元，增长 5.4%。

2024 年，长乐区实现地区生产总值 1246.35 亿元，增长 3.1%。分产业看，第一产业增加值 80.98 亿元，增长 4.6%；第二产业增加值 699.5 亿元，增长 1.1%，其中建筑业增加值 55.37 亿元，增长 3.6%；第三产业增加值 465.88 亿元，增长 6.2%

2.4 区域环境质量现状

2.4.1 环境空气质量现状

根据福建省生态环境厅发布的《2024 年福建省城市环境空气质量状况》统计，2024 年 1-12 月县级城市空气质量状况：长乐区达标天数比例为 99.2%，综合指数 2.46，

首要污染物为臭氧；根据福州市长乐生态环境局公布的环境质量月通报，项目所在区域 2024 年 1-12 月区域大气环境空气质量指数(AQI 的日均值)为 44-64，环境质量可以达到《环境空气质量标准》（GB3095-2012）及 2018 修改单中二级标准限值要求。项目所在地福州市长乐区为环境空气达标区域。

2.4.2 地表水环境质量现状

根据《复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期(福建省肿瘤医院滨海院区一期)环境影响报告书》地表水环境现状监测结果，项目周边水体监测断面 pH 值、石油类、粪大肠菌群符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类标准，COD、BOD_5 及氨氮出现超标，根据现场调查，项目用地区域内现状存在农户畜禽养殖(鸭子、牛)，水质超标可能畜禽养殖造成。

2.4.3 声环境质量现状

根据《复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期(福建省肿瘤医院滨海院区一期)环境影响报告书》声环境现状监测结果，医院场界靠近纪盛路、万新路、怀海路的噪声现状值昼、夜间均符合《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 4a 类标准。本项目(一期工程)场界噪声现状值昼、夜间符合《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 2 类标准。

2.5 辐射环境质量现状

为了解本项目拟建场址及周围环境的辐射环境现状，医院委托浙江建安检测研究院有限公司、浙江国辐环保科技有限公司以及中国原子能科学研究院对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 12。

现场监测和取样时间为 2025 年 7 月 7 日~2025 年 7 月 15 日，拟建场址现状为空地，本项目尚未建设，现场现状照片见图 1.2.5-1。

2.5.1 监测内容

本项目涉及使用直线加速器（Ⅱ类射线装置）、模拟定位 CT（Ⅲ类射线装置）和质子重离子放射治疗系统（Ⅰ类射线装置），质子重离子放射治疗系统运行期间的辐射场为中子和 γ 辐射混合场，因此贯穿辐射监测内容包括 γ 辐射剂量率和中子剂量当量率。本次为环评阶段本底调查，尚未有冷却水产生，无法监测，并且结合 HJ61-2021

表 12 中“不对外排放且无泄漏的，则运行期间不需监测”的要求，故本次不开展循环冷却水取样监测。

本项目引起的空气感生放射性产物主要考虑 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素，考虑到上述核素的半衰期较短（具体见表 3.3.1-5，并且本项目感生放射性气体经排风管道通过排风机最终引至屋顶排出，对周围环境和公众影响很小，结合 HJ61-2021 表 12 中“根据感生放射性物质气态排放的情况决定是否开展监测”的要求，故本次不开展拟建场址空气和气溶胶中 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 的监测。

综上所述，根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征，结合 HJ61-2021 中对中高能和低能加速器的监测要求，本次辐射环境现状调查选取的监测对象为贯穿辐射、地表水、地下水、生物和土壤，辐射环境现状监测对象和监测项目列于下表。

表 2.5.1-1 监测对象和项目

环境要素	监测因子	
贯穿辐射	γ 辐射剂量率、中子剂量当量率	
环境空气	^{14}C、^{3}H	
气溶胶	γ 能谱	γ 能谱关注：^{7}Be、^{22}Na、^{54}Mn、^{41}Ar、^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K
地表水	总 β、γ 能谱	γ 能谱关注：^{7}Be、^{22}Na、^{54}Mn、^{41}Ar、^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K
地下水	总 β、γ 能谱	γ 能谱关注：^{7}Be、^{22}Na、^{54}Mn、^{41}Ar、^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K
土壤	总 β、γ 能谱	γ 能谱关注：^{7}Be、^{22}Na、^{54}Mn、^{41}Ar、^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K
生物	总 β、γ 能谱	γ 能谱关注：^{7}Be、^{22}Na、^{54}Mn、^{41}Ar、^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K

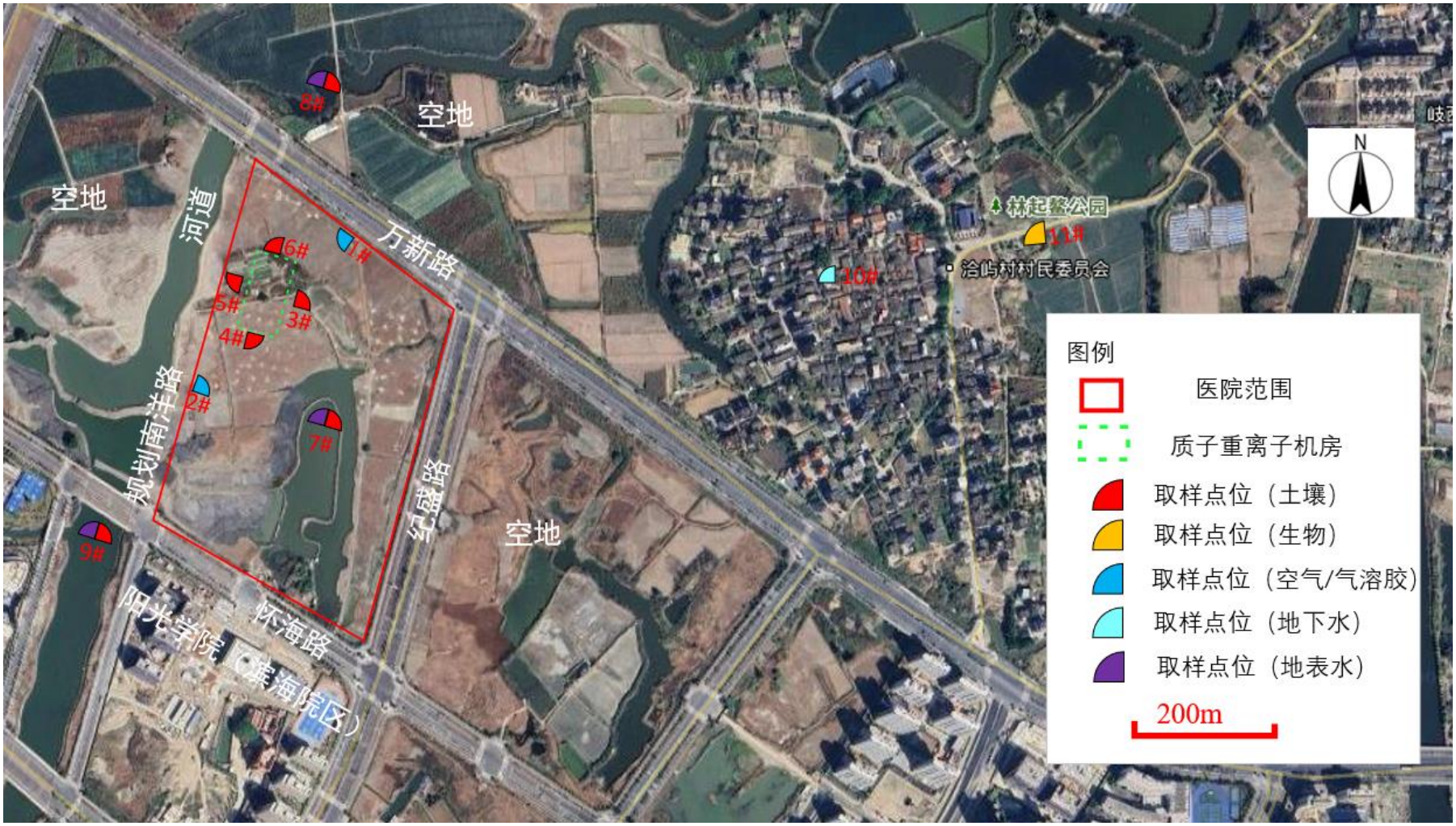


图 2.5.1-1 本项目拟建场址及其周围环境监测点位图 1

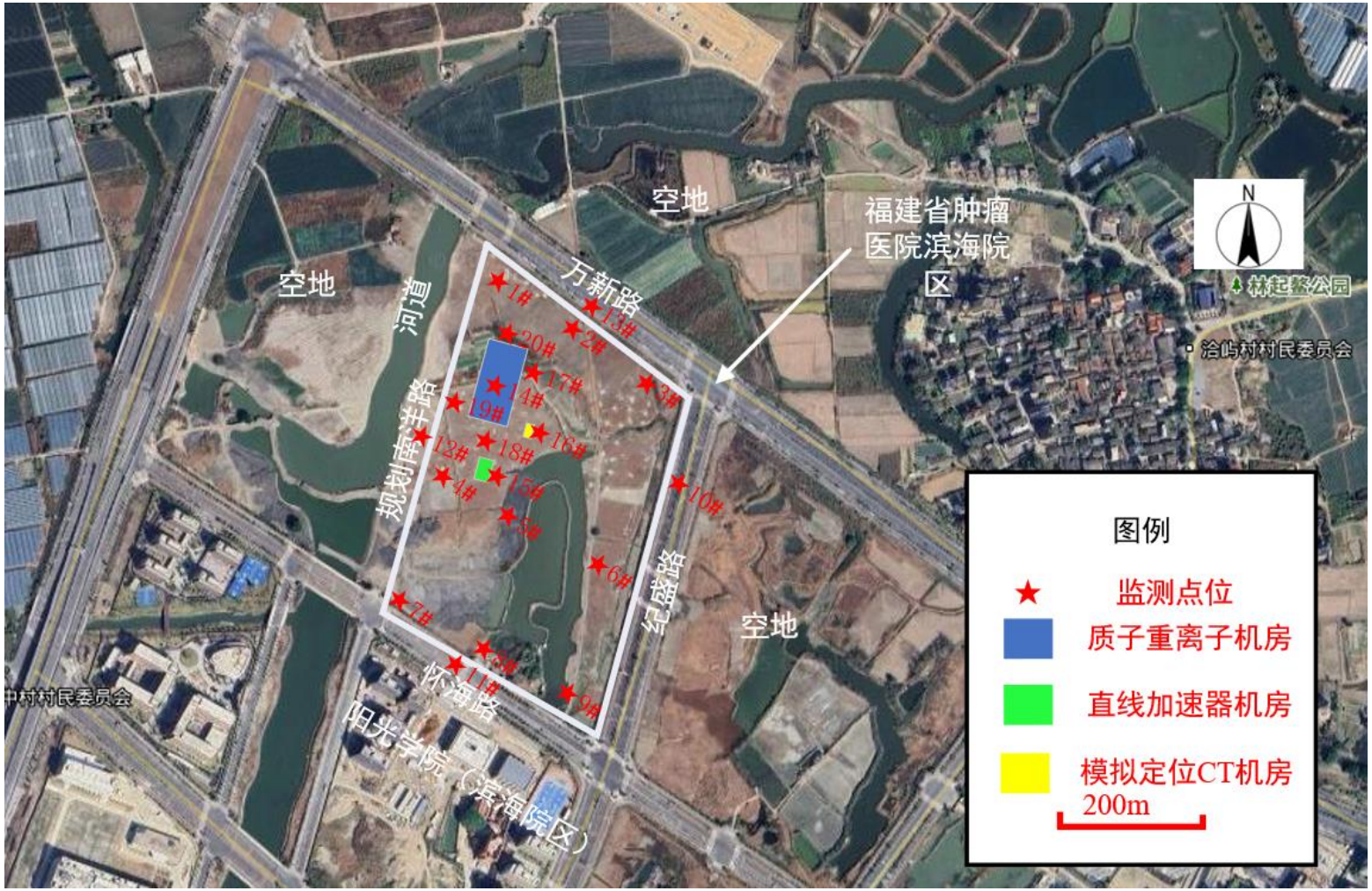


图 2.5.1-2 本项目拟建场址及其周围环境监测点位图 2

2.5.2 监测/取样点位

本项目位于福建省福州市长乐区万新路以南、怀海路以北、南洋路东侧、纪盛路西侧地块，监测时项目尚未开工建设，监测时现状主要为绿地，因此，项目 γ 辐射剂量率和中子当量剂量率采取均匀布点原则，并在拟建机房处增设点位，监测点位见图 2.5.1-2。由监测点位可知，本次监测在项目拟建场址、场址周围环境、医院内外均设置了监测点位，能够反映拟建场址及周围邻近环境的辐射环境背景水平。因此，监测点位布设是合理的。

土壤取样点位见图 2.5.1-1。由监测点位可知，土壤取样点位共 7 个，对医院拟建质子重离子机房四周（避开后期拟建建筑物和地面）及周边水体底泥进行了监测。取土壤样品时，根据现场条件，每个点位取土样约 1kg，取样时去除石头、树枝等杂质。

福州市常年主导风向为东北风。空气/气溶胶在机房上下风向各布设一个点位（避开后期拟建建筑物）。取样点位见图 2.5.1-1。

地下水、生物监测点位位于医院东北侧洽屿村，地下水为洽屿村生活水井，生物样品为当季可食用农作物（南瓜）。取样点位见图 2.5.1-1。

监测点位描述见下表。

表 2.5.2-1 空气/气溶胶点位描述（见图 2.5.1-1）

序号	取样点
1#	拟建质子重离子机房东北侧 100m 处 （位于拟建质子重离子机房主体建筑上风向）
2#	拟建质子重离子机房西南侧 100m 处 （位于拟建质子重离子机房主体建筑下风向）

表 2.5.2-2 土壤监测点位描述（见图 2.5.1-1）

序号	取样点
3#	拟建质子重离子机房东侧
4#	拟建质子重离子机房南侧
5#	拟建质子重离子机房西侧
6#	拟建质子重离子机房北侧
7#	院内水体底泥
8#	医院西侧水体上游底泥
9#	医院西侧水体下游底泥

表 2.5.2-3 地表水监测点位描述（见图 2.5.1-1）

序号	取样点
7#	院内水体
8#	医院西侧水体上游
9#	医院西侧水体下游

表 2.5.2-4 地下水监测点位描述（见图 2.5.1-1）

序号	取样点
10#	医院东北侧洽屿村水井

表 2.5.2-5 生物中监测点位描述（见图 2.5.1-1）

序号	取样点
11#	医院东北侧洽屿村农作物 （当季可食用农作物南瓜）

表 2.5.2-6 X-γ 辐射监测布点（见图 2.5.1-2）

监测点编号	监测点位名称	监测项目	监测频次	备注
1#	项目所在地块点位 1	γ 辐射剂量率	1 次	原野
2#	项目所在地块点位 2		1 次	原野
3#	项目所在地块点位 3		1 次	原野
4#	项目所在地块点位 4		1 次	原野
5#	项目所在地块点位 5		1 次	原野
6#	项目所在地块点位 6		1 次	原野
7#	项目所在地块点位 7		1 次	原野
8#	项目所在地块点位 8		1 次	原野
9#	项目所在地块点位 9		1 次	原野
10#	项目所在地块东侧纪盛路		1 次	道路
11#	项目所在地块南侧怀海路		1 次	道路
12#	项目所在地块西侧空地		1 次	原野
13#	项目所在地块北侧万新路		1 次	道路
14#	拟建质子重离子机房处		1 次	原野
15#	拟建直线加速器机房处		1 次	原野
16#	拟建模拟定位 CT 机房处		1 次	原野
17#	拟建质子重离子机房东侧		1 次	原野
18#	拟建质子重离子机房南侧		1 次	原野
19#	拟建质子重离子机房西侧		1 次	原野
20#	拟建质子重离子机房北侧		1 次	原野

表 2.5.2-7 中子辐射监测布点（见图 2.5.1-2）

监测点编号	监测点位名称	监测项目	监测频次
1#	项目所在地块点位 1	中子剂量当量率	1 次
2#	项目所在地块点位 2		1 次
3#	项目所在地块点位 3		1 次

4#	项目所在地块点位 4		1 次
5#	项目所在地块点位 5		1 次
6#	项目所在地块点位 6		1 次
7#	项目所在地块点位 7		1 次
8#	项目所在地块点位 8		1 次
9#	项目所在地块点位 9		1 次
10#	项目所在地块东侧纪盛路		1 次
11#	项目所在地块南侧怀海路		1 次
12#	项目所在地块西侧空地		1 次
13#	项目所在地块北侧万新路		1 次
14#	拟建质子重离子机房处		1 次
15#	拟建直线加速器机房处		1 次
16#	拟建模拟定位 CT 机房处		1 次
17#	拟建质子重离子机房东侧		1 次
18#	拟建质子重离子机房南侧		1 次
19#	拟建质子重离子机房西侧		1 次
20#	拟建质子重离子机房北侧		1 次

2.5.3 监测设备和监测方法

2.5.3.1 监测设备

监测仪器设备及性能指标详见表 2.5.3-1。现场监测和取样时间为 2025 年 7 月 7 日~2025 年 7 月 15 日，样品实验室分析时间为 2024 年 7 月 9 日~8 月 16 日，监测、分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

表 2.5.3-1 仪器设备及性能指标

仪器名称	仪器型号	检定/校准有效期	主要技术性能指标
便携式 X、γ 辐射周围剂量当量率仪	6150AD6/H+6150AD-b/H	2024 年 07 月 30 日～2025 年 07 月 29 日	能量范围：38keV-7MeV； 模拟量程：10nSv/h-100μSv/h； 数字量程：1nSv/h-99.9μSv/h
中子剂量当量仪	FH40G L-10+FHZ672	2025 年 03 月 12 日～2026 年 03 月 11 日	能量范围：热中子~20MeV； 量程：1nSv/h～100mSv/h
低本底 α/β 计数器	BH1216III	2025 年 03 月 14 日～2027 年 03 月 13 日	相对效率：β 源（$^{90}Sr/^{90}Y$）≥35%； 本底计数率：β≤0.5$min^{-1}\cdot cm^{-2}$
高纯锗 γ 谱仪	GEM30-76	2025 年 03 月 14 日～2027 年 03 月 13 日	能量分辨为：1.73keV； (^{60}Co 点源置于探测器正上方 25cm 处，1332.49keV)
低本底 α/β 测量仪	MPC9604	检定有效期至 2027 年 2 月 26 日	β 源（$^{90}Sr/^{90}Y$）≥65% 本底计数率：β<0.46cpm
			β 源（$^{90}Sr/^{90}Y$）≥65% 本底计数率：β<0.43cpm

低本底液闪谱仪	Quantulus 1220		^{3}H 探测效率：21.8%； ^{3}H 本底计数率：0.775min^{-1}； ^{14}C 探测效率：58.5%； ^{14}C 本底计数率：2.289 min^{-1}
高纯锗谱仪	GEM-S8530		相对效率：55%； 能量分辨率：1.62keV（^{60}Co 点源 1.33MeV 峰）； 本底计数率：1.904cps

2.5.3.2 监测方法及依据

1、《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

2、《空气中 ^{14}C 的取样与测定方法》（EJ/T1008-1996）；

3、《水中氚的分析方法》（HJ1126-2020）；

4、《环境空气 气溶胶中γ放射性核素的测定 滤膜压片/γ能谱法》（HJ1149-2020）；

5、《高纯锗γ能谱分析通用方法》（GB/T11713-2015）；

6、《水质 总β放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）；

7、《土壤中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T 11743-2013）；

8、环境中放射性核素测量土壤-第六部分：总α和总β活度测量 ISO 18589-6:2019；

9、《环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T16145-2022）；

10、《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）。

2.5.4 质量保证措施

（1）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。

（2）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。

（3）监测仪器每年定期经计量部门检定或校准，检定或校准合格后方可使用。

（4）每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常。

（5）由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录，严格执行质量保证程序。

（6）监测报告严格实行三级审核制度，经过校核、审核，最后由授权签字人审定。

2.5.5 监测结果

2.5.5.1 贯穿辐射

本项目拟建场址及周围环境 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果列于下

表。

表 2.5.5-1 本项目拟建场地及周围环境γ辐射剂量率监测结果

监测点编号	监测位置	监测结果（nGy/h）	备注
1#	项目所在地块点位 1	71.9±1	原野
2#	项目所在地块点位 2	71.8±2	原野
3#	项目所在地块点位 3	70.7±1	原野
4#	项目所在地块点位 4	72.5±1	原野
5#	项目所在地块点位 5	72.8±1	原野
6#	项目所在地块点位 6	71.8±2	原野
7#	项目所在地块点位 7	70.0±2	原野
8#	项目所在地块点位 8	72.1±2	原野
9#	项目所在地块点位 9	72.9±1	原野
10#	项目所在地块东侧纪盛路	73.3±1	道路
11#	项目所在地块南侧怀海路	72.9±1	道路
12#	项目所在地块西侧空地	71.0±1	原野
13#	项目所在地块北侧万新路	72.8±1	道路
14#	拟建质子重离子机房处	76.2±2	原野
15#	拟建直线加速器机房处	77.3±1	原野
16#	拟建模拟定位 CT 机房处	74.4±1	原野
17#	拟建质子重离子机房东侧	72.4±1	原野
18#	拟建质子重离子机房南侧	77.4±1	原野
19#	拟建质子重离子机房西侧	77.5±1	原野
20#	拟建质子重离子机房北侧	77.5±1	原野

注：1、测量时探头距离地面约 1m；

2、每个监测点测量 10 个数据取平均值，以上监测结果均已扣除仪器对宇宙射线的响应值；

3、环境γ辐射空气吸收剂量率=仪器读数平均值×仪器校准因子 k_1×仪器检验源效率因子 k_2÷空气比释动能和周围剂量当量的换算系数-建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子 k_3×测量点宇宙射线响应值 Dc，校准因子 k_1 为 0.99，仪器使用 ^{137}Cs 进行校准，效率因子 k_2 取 1，换算系数为 1.20Sv/Gy，k_3 楼房取 0.8、平房取 0.9、原野和道路取 1，测量点宇宙射线的响应值为 23nGy/h（监测地址：宁波东钱湖湖心水面，监测时间：2024 年 9 月 12 日）。

表 2.5.5-2 本项目拟建场地及周围中子周围剂量当量率监测结果

监测点编号	监测位置	监测结果（μSv/h）	备注
1#	项目所在地块点位 1	＜0.02	
2#	项目所在地块点位 2	＜0.02	
3#	项目所在地块点位 3	＜0.02	
4#	项目所在地块点位 4	＜0.02	
5#	项目所在地块点位 5	＜0.02	
6#	项目所在地块点位 6	＜0.02	
7#	项目所在地块点位 7	＜0.02	
8#	项目所在地块点位 8	＜0.02	
9#	项目所在地块点位 9	＜0.02	
10#	项目所在地块东侧纪盛路	＜0.02	
11#	项目所在地块南侧怀海路	＜0.02	
12#	项目所在地块西侧空地	＜0.02	
13#	项目所在地块北侧万新路	＜0.02	
14#	拟建质子重离子机房处	＜0.02	
15#	拟建直线加速器机房处	＜0.02	
16#	拟建模拟定位 CT 机房处	＜0.02	
17#	拟建质子重离子机房东侧	＜0.02	
18#	拟建质子重离子机房南侧	＜0.02	
19#	拟建质子重离子机房西侧	＜0.02	
20#	拟建质子重离子机房北侧	＜0.02	

注：1、每个监测点测量 10 个数据取平均值；

2、FH40G L-10+FHZ672 型中子剂量当量仪/05035876 的检出限为 0.02μSv/h。

由监测结果可知，本项目拟建场址及周围室内部分 γ 辐射剂量率水平在 70.0~77.5nGy/h 范围内，室外道路部分 γ 辐射剂量率水平在 72.8~73.3nGy/h 范围内，以上 γ 辐射剂量率均已扣除宇宙射线响应值。根据《中国环境天然放射性水平》(中国原子能出版社，2015 年 7 月第 1 版)，福州原野 γ 辐射剂量率在 30.4nGy/h~145.4nGy/h 之间，道路 γ 辐射剂量率在 45.3nGy/h~161.7nGy/h 之间，均已扣除宇宙射线的贡献。因此，本项目室内和室外道路监测点位 γ 辐射剂量率均处于福建省福州市天然放射性范

围值内，本项目拟建场址及周围γ辐射剂量率未见异常。

由监测结果可知，本项目拟建场址及周围中子剂量当量率均低于仪器探测下限，未见异常。

2.5.5.2 土壤

本项目土壤样品中总β的活度浓度以及核素分析测量结果见下表。

表 2.5.5-3 本项目土壤样品中总β活度浓度及核素分析结果

取样点	监测项目	监测结果（Bq/kg）
拟建质子重离子机房东侧	总β	1139
	^{238}U	65.3±7.2，（k=2）
	^{232}Th	93.8±9.2，（k=2）
	^{226}Ra	50.6±5.0，（k=2）
	^{40}K	963±89，（k=2）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.18×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=9.6×10^{-2}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=1.45×10^{-1}）
拟建质子重离子机房南侧	总β	1001
	^{238}U	50.5±5.6，（k=2）
	^{232}Th	59.0±5.8，（k=2）
	^{226}Ra	31.5±3.1，（k=2）
	^{40}K	911±84，（k=2）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.07×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=8.8×10^{-2}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=1.32×10^{-1}）
拟建质子重离子机房西侧	总β	980
	^{238}U	56.8±6.2，（k=2）
	^{232}Th	76.0±7.4，（k=2）
	^{226}Ra	45.4±4.4，（k=2）
	^{40}K	991±91，（k=2）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.15×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=9.4×10^{-2}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=1.42×10^{-1}）
拟建质子重离子机房北侧	总β	1230

	^{238}U	51.4±5.7，（k=2）
	^{232}Th	65.8±6.4，（k=2）
	^{226}Ra	35.6±3.5，（k=2）
	^{40}K	908±84，（k=2）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.08×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=8.9×10^{-2}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=1.33×10^{-1}）
院内水体 底泥	总 β	935
	^{238}U	73.7±8.1，（k=2）
	^{232}Th	94.9±9.3，（k=2）
	^{226}Ra	52.0±5.1，（k=2）
	^{40}K	964±89，（k=2）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.26×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=1.04×10^{-1}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=1.56×10^{-1}）
医院西侧水体上游底泥	总 β	1246
	^{238}U	65.3±7.2，（k=2）
	^{232}Th	86.4±8.5，（k=2）
	^{226}Ra	47.1±4.6，（k=2）
	^{40}K	901±83，（k=2）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.19×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=9.8×10^{-2}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=1.47×10^{-1}）
医院西侧水体下游底泥	总 β	1183
	^{238}U	52.8±5.8，（k=2）
	^{232}Th	92.6±9.1，（k=2）
	^{226}Ra	54.4±5.3，（k=2）
	^{40}K	870±80，（k=2）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.12×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=9.2×10^{-2}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=1.38×10^{-1}）

注：DL为样品的活度浓度探测限，衰变时间校正到2025年7月8日。

根据监测结果，各监测点位土壤中总 β 活度浓度在 935Bq/kg~1246Bq/kg 范围内，放射性核素 ^{7}Be 活度浓度均小于 1.12×10^{-1}Bq/kg，放射性核素 ^{54}Mn 活度浓度均小于

1.38×10^{-1}Bq/kg，放射性核素 ^{22}Na 活度浓度均小于 9.2×10^{-2}Bq/kg，放射性核素 ^{238}U 活度浓度在 50.5~73.7 Bq/kg 之间，放射性核素 ^{232}Th 活度浓度在 59.0~94.9 Bq/kg 之间，放射性核素 ^{226}Ra 活度浓度在 31.5~52.0 Bq/kg 之间，放射性核素 ^{40}K 活度浓度在 911~964 Bq/kg 之间。

2.5.5.3 地表水和地下水

本项目地表水和地下水样品中总 β 的活度浓度以及核素分析测量结果见下表。

表 2.5.5-4 本项目地表水和地下水中总 β 活度浓度及核素分析结果

取样点	监测项目	监测结果（Bq/L）
院内水体	总 β	0.392
	^{40}K	1.46±0.14，（k=2）
	^{226}Ra	＜DL（DL=1.16×10^{-1}）
	^{232}Th	＜DL（DL=1.23×10^{-1}）
	^{238}U	＜DL（DL=1.05）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.36×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=6.0×10^{-3}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=3.1×10^{-2}）
医院西侧水体上游	总 β	0.114
	^{40}K	1.17±0.17，（k=2）
	^{226}Ra	＜DL（DL=1.16×10^{-1}）
	^{232}Th	＜DL（DL=1.23×10^{-1}）
	^{238}U	＜DL（DL=1.05）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.36×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=6.0×10^{-3}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=3.1×10^{-2}）
医院西侧水体下游	总 β	0.126
	^{40}K	＜DL（DL=9.3×10^{-1}）
	^{226}Ra	（2.46±0.24）$\times10^{-1}$，（k=2）
	^{232}Th	＜DL（DL=1.23×10^{-1}）
	^{238}U	＜DL（DL=1.05）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.36×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=6.0×10^{-3}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=3.1×10^{-2}）

拟建医院东北侧洽屿村水井	总 β	0.389
	^{40}K	＜DL（DL=9.3×10^{-1}）
	^{226}Ra	（1.19±0.12）$\times10^{-1}$，（k=2）
	^{232}Th	＜DL（DL=1.23×10^{-1}）
	^{238}U	＜DL（DL=1.05）
	^{7}Be	＜DL（DL=1.36×10^{-1}）
	^{22}Na	＜DL（DL=6.0×10^{-3}）
	^{54}Mn	＜DL（DL=3.1×10^{-2}）
注： DL 为样品的活度浓度探测限，衰变时间校正到 2025 年 7 月 8 日。		

根据监测结果，各监测点位地表水中总 β 活度浓度在 0.114Bq/L~0.392Bq/L 范围内，放射性核素 ^{7}Be 活度浓度均小于 1.36×10^{-1}Bq/L，放射性核素 ^{54}Mn 活度浓度均小于 3.1×10^{-2}Bq/L，放射性核素 ^{22}Na 活度浓度均小于 6.0×10^{-3}Bq/L，放射性核素 ^{238}U 活度浓度均小于 1.05 Bq/L，放射性核素 ^{232}Th 活度浓度均小于 1.23×10^{-1} Bq/L，放射性核素 ^{226}Ra 活度浓度在＜1.16×10^{-1}~2.46×10^{-1} Bq/L 之间，放射性核素 ^{40}K 活度浓度在＜9.3×10^{-1}~1.46Bq/L 之间。

根据监测结果，监测点位地下水中总 β 活度浓度为 0.389Bq/L，放射性核素 ^{7}Be 活度浓度小于 1.36×10^{-1}Bq/L，放射性核素 ^{54}Mn 活度浓度小于 3.1×10^{-2}Bq/L，放射性核素 ^{22}Na 活度浓度小于 6.0×10^{-3}Bq/L，放射性核素 ^{238}U 活度浓度小于 1.05 Bq/L，放射性核素 ^{232}Th 活度浓度小于 1.23×10^{-1} Bq/L，放射性核素 ^{226}Ra 活度浓度 1.19×10^{-1}Bq/L，放射性核素 ^{40}K 活度浓度小于 9.3×10^{-1}Bq/L。

2.5.5.4 环境空气/气溶胶

本项目环境空气/气溶胶样品中核素分析测量结果见下表。

表 2.5.5-5 本项目环境空气/气溶胶样品中核素分析测量结果

取样点	监测项目		监测结果
拟建质子重离子机房东北侧 100m 处	气溶胶中 γ 核素	^{7}Be	1.44 mBq/m^3
		^{22}Na	<0.19μBq/m^3
		^{54}Mn	<9.25μBq/m^3
		^{238}U	<53.7μBq/m^3
		^{232}Th	<13.4μBq/m^3
		^{226}Ra	<5.62μBq/m^3
		^{40}K	<67.2μBq/m^3

	空气冷凝水中 ^{3}H	水中氚	<0.990 Bq/L
		气氚	<21.7 mBq/m^3
	CO_2吸收液中 ^{14}C	^{14}C	0.221 Bq/g·碳
拟建质子重离子机房西南侧 100m 处	气溶胶中γ核素	^{7}Be	1.24 mBq/m^3
		^{22}Na	<0.18μBq/m^3
		^{54}Mn	<8.81μBq/m^3
		^{238}U	<51.1μBq/m^3
		^{232}Th	<12.8μBq/m^3
		^{226}Ra	<5.34μBq/m^3
		^{40}K	<64.0μBq/m^3
	空气冷凝水中 ^{3}H	水中氚	<0.990 Bq/L
		气氚	<20.6 mBq/m^3
	CO_2吸收液中 ^{14}C	^{14}C	0.228 Bq/g·碳
注：γ核素（^{7}Be）测量结果已修正至参考日期 2025.7.8。			

根据监测结果，各监测点位环境空气/气溶胶中 ^{7}Be 活度浓度在 1.24mBq/m^3~1.44 mBq/m^3 范围内，放射性核素 ^{22}Na 活度浓度均小于 0.19μBq/m^3，放射性核素 ^{54}Mn 活度浓度均小于 9.25μBq/m^3，放射性核素 ^{238}U 活度浓度均小于 53.7μBq/m^3，放射性核素 ^{232}Th 活度浓度均小于 13.4μBq/m^3，放射性核素 ^{226}Ra 活度浓度均小于 5..62μBq/m^3，放射性核素 ^{40}K 活度浓度均小于 67.2μBq/m^3，空气冷凝水中 ^{3}H 活度浓度均小于 0.990 Bq/L（水中氚），空气冷凝水中 ^{3}H 活度浓度均小于 21.7 mBq/m^3（气氚），CO_2 吸收液中 ^{14}C 活度浓度均小于 0.228 Bq/g·碳。

2.5.5.5 生物样品

本项目生物样品中核素分析测量结果见下表。

表 2.5.5-6 本项目生物样品中核素分析测量结果

取样点	监测项目	监测结果（Bq/kg）
医院东北侧洽屿村农作物（当季可食用农作物南瓜）	^{7}Be	<0.11
	^{22}Na	<0.01
	^{54}Mn	<0.01
	^{238}U	<0.06
	^{232}Th	<0.04
	^{226}Ra	<0.03

	^{40}K	483
	总 β	(5.94±0.04)E+01 Bq/kg 鲜
注：γ 核素（^{7}Be）测量结果已修正至参考日期 2025.7.9。		

根据监测结果，监测点位生物样品南瓜中 ^{7}Be 活度浓度小于 0.11 Bq/kg，^{22}Na 活度浓度均小于 0.01 Bq/kg，^{54}Mn 活度浓度小于 0.01 Bq/kg，^{238}U 活度浓度小于 0.06 Bq/kg，^{232}Th 活度浓度小于 0.04Bq/kg，^{226}Ra 活度浓度小于 0.03 Bq/kg，^{40}K 活度浓度为 483 Bq/kg，总 β 活度浓度为(5.94±0.04)E+01 Bq/kg 鲜。

2.6 场址适宜性分析

本项目拟建于福建省肿瘤医院重离子质子中心内，建设项目“福建省肿瘤医院滨海院区”已于 2023 年 9 月 11 日取得福州市长乐区自然资源和规划局批准的建设项目用地预审与选址意见书（见附件 5），该地块规划用地性质为医疗卫生用地，重离子质子中心属于医院医疗用房。本项目质子重离子机房为四层结构，集中建设在重离子质子中心的负一层、一层、二层和三层，直线加速器和模拟定位 CT 位于离子质子中心一层，重离子质子中心无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集处，无人员流动性大的商业活动区域，各层功能布置情况见表 1.2.1-1。项目选址满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）5.1.1 和 5.1.2 中有关选址的要求。

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辐射水平波动范围内。

本项目评价范围内，东、南侧 100m 范围内均为医院内部建筑物；西侧 100m 内范围现状主要为院外空地（规划南洋路）和河流；北侧 100m 内范围主要为医院内部建筑物和万新路；下方为土层，上方为重离子质子中心屋顶层。直线加速器机房、模拟定位 CT 机房位于离子质子中心一层。评价范围内主要为医院内部建筑，直线加速器机房西侧 50m 涉及院外空地（规划南洋路）。

由此可知，本项目电离辐射评价范围内无文物保护单位，文化教育、科研单位、国家公园，自然保护区，风景名胜区，世界文化和自然遗产地，海洋特别保护区，饮用水水源保护区，自然公园，重要湿地，天然林，水土流失重点预防区和重点治理区，沙化土地封禁保护区，封闭及半封闭海域，重要物种的天然集中分布区、栖息地，重要水生生物的产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道，迁徙鸟类的重要繁殖地、停歇地、越冬地以及野生动物迁徙通道等生态保护目标和环境敏感区。

因此，评价范围内的环境保护目标以本项目辐射工作人员、医院内部工作人员、公众成员以及西侧空地（规划南洋路）和河流、北侧万新路公众成员为主。根据后文计算，本项目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，能够满足相应剂量约束值的要求。

综上所述，拟建场址无不利于项目建设的环境制约性因素，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

本次辐射环境影响评价主要针对核技术利用活动的建设内容开展评价，具体如下：拟在滨海院区重离子质子中心一层新增2间直线加速器机房及其附属用房，并新增2台电子直线加速器，最大X射线能量均为10MV，每台电子直线加速器集成一台CBCT，开展放射治疗；新增2间CT模拟定位机房及其附属用房，并新增2台CT模拟定位机。

本项目拟于滨海院区重离子质子中心配备 HiTS 400S 型质子重离子一体化治疗系统用于肿瘤放射治疗（碳离子、质子）和科研（氦离子、氧离子），配备图像引导系统（X射线管和平板探测器）进行定位，提供最大能量为430MeV/u的碳离子束和氧离子束，230MeV/u氦离子，230MeV质子束。该系统拟设置1间科研室和4间治疗室，3号治疗室和4号治疗室内拟分别配置1台滑轨CT用于精准定位。

本项目质子重离子治疗机房及配套用房拟建于重离子质子中心的负一层、一层、二层和三层，质子重离子机房及配套用房各层情况如下：

（1）负一层：质子重离子治疗室3和4安装基坑、事故收集池。

（2）一层：质子重离子治疗机房治疗层及配套用房（控制台、治疗大厅、模具储藏室、同步环大厅、高能线水平区、高能线爬升区、检修区、事故收集池、低温设备室、加速器备品间、冷却水泵房、水处理电控间、中央控制室、模具储藏等）。

（3）二层：高能爬升区、质子重离子治疗机房上空、同步环电源间、2#变电所、高能线电源间、数据中心、治疗机柜室、Gantry电源间、电源库房等。

（3）三层：高能爬升区、质子重离子治疗机房上空、同步环电源间空调机房、高能线电源间空调机房、治疗室空调机房等。

重离子质子中心负一层、一层、二层和三层平面布置图见图1.2.5-5~图1.2.5-9，质子重离子机房剖面图见图1.2.5-10。具体如下：

表 3.1-1 本项目使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量	类别	主要参数	所在位置
1	质子重离子放射治疗系统	1 台	Ⅰ类	型号：HiTS 400S 生产厂家：兰州泰基离子技术有限公司 粒子类型：$^{12}C^{6+}$、H^{+}、$^{16}O^{8+}$、$^{4}He^{2+}$ 治疗能量：70~430MeV/u（$^{12}C^{6+}$） 70~230MeV（H^{+}） 70~430MeV/u（$^{16}O^{8+}$） 70~230MeV/u（$^{4}He^{2}$） 剂量率：2Gy/min 配备图像引导系统（X 射线管和平板探测器）5 套，每套系统的 2 个 X 射线管的最大管电压均为 150kV，最大管电流均为 640mA。	质子重离子机房
2	滑轨 CT 机	2 台	III类	最大管电压 150kV，最大管电流 660mA，治疗室 3 和 4 各一台	
3	直线加速器	2	Ⅱ类	6MV 等中心 1m 处：X 射线剂量率为：8.40E+08μGy/h 10MV 等中心 1m 处：X 射线剂量率为：1.44E+09μGy/h； 每台直线加速器均集成一台 CBCT，最大管电压 150kV，最大管电流 1250mA	重离子质子中心一层直线加速器机房 1~2
4	模拟定位 CT	2	III类	最大管电压 150kV，最大管电流 1250mA	重离子质子中心一层模拟定位 CT 机房 1~2

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 质子重离子放射治疗系统概况

3.2.1.1 设备组成

产品名称：质子重离子一体化治疗系统

生产厂商：兰州泰基离子技术有限公司

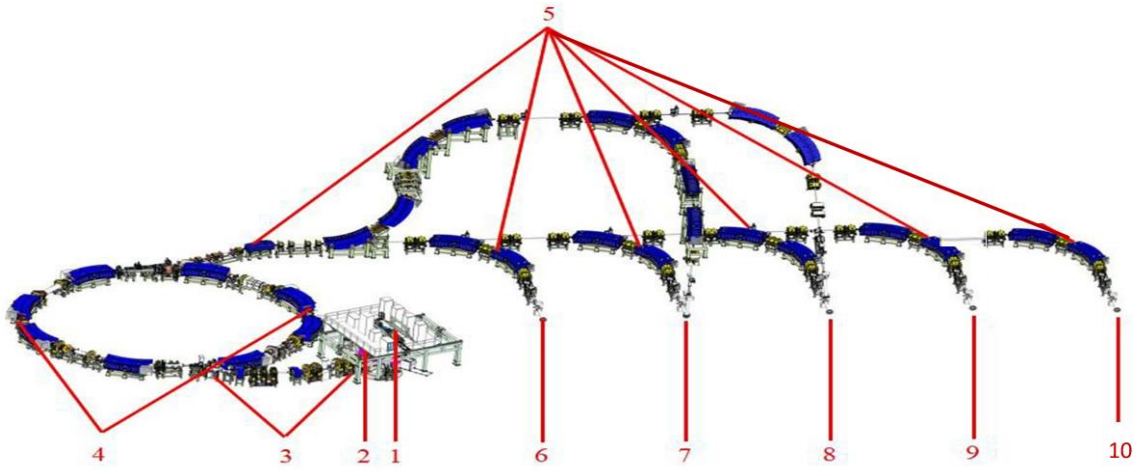
型号规格：HiTS 400S（直线加速器+同步加速器+一个科研室+四个治疗室）

基本功能：质子重离子一体化治疗系统提供高能质子或重离子束用于恶性实体肿瘤的放射治疗（放疗），是中国科学院近代物理研究所和兰州泰基离子技术有限公司共同研制生产、拥有我国自主知识产权的大型放疗设备。

系统由中央控制系统、加速器子系统、治疗子系统和辅助设施系统组成。中央控制系统是重离子治疗系统的中枢，主要包括肿瘤信息系统、治疗计划系统、治疗控制系统以及加速器控制系统；加速器子系统为治疗子系统提供束流，治疗子系统通过治疗控制单元控制加速器子系统产生治疗计划所需要的不同能量的 $^{16}O^{8+}$束流、$^{12}C^{6+}$束流、$^{4}He^{2+}$束流或 H^{+}束流对靶区肿瘤进行放射治疗，辅助设施系统为整个重离子治疗系统提供能源动力、冷却用水、气动元件所需压缩气体以及符合法规要求的辐射防护，为系统的稳定和可靠运行提供保障。

本项目质子重离子一体化治疗系统配备一个科研室和四个治疗室，治疗模式采用高速 3D 扫描（光栅扫描方法），扫描范围设计为 200×200mm^2，碳离子束（$^{12}C^{6+}$）能量范围 70MeV/u-430MeV/u，终端流强可达 9.0×10^9 ppm（0.14nA）；氧离子（$^{16}O^{8+}$）最高能量 430MeV/u，终端流强可达 9.0×10^{9}ppm（0.19nA）；氦离子（$^{4}He^{2+}$）最高能量 230MeV/u，终端流强可达 6.0×10^{10}ppm（0.32nA）；质子束（H^{+}）标称能量范围 70MeV-230MeV，终端流强可达 2.0×10^{11}ppm（0.53nA）。

质子重离子一体化治疗系统主要组成示意图如图 3.2.1-1 所示，质子重离子一体化治疗系统装置总体布局如图 3.2.1-2。



图中：1——离子源及低能传输系统

2——直线加速器

3——中能传输系统

4——同步加速器

5——高能传输系统

6——科研室，水平治疗头

7——1号治疗室，水平和垂直治疗头

8——2号治疗室，水平和 45°治疗头

9——3号治疗室，360°gantry 旋转治疗终端

10——4号治疗室，180°gantry 旋转治疗终端

图 3.2.1-1 质子重离子一体化治疗系统主要组成示意图

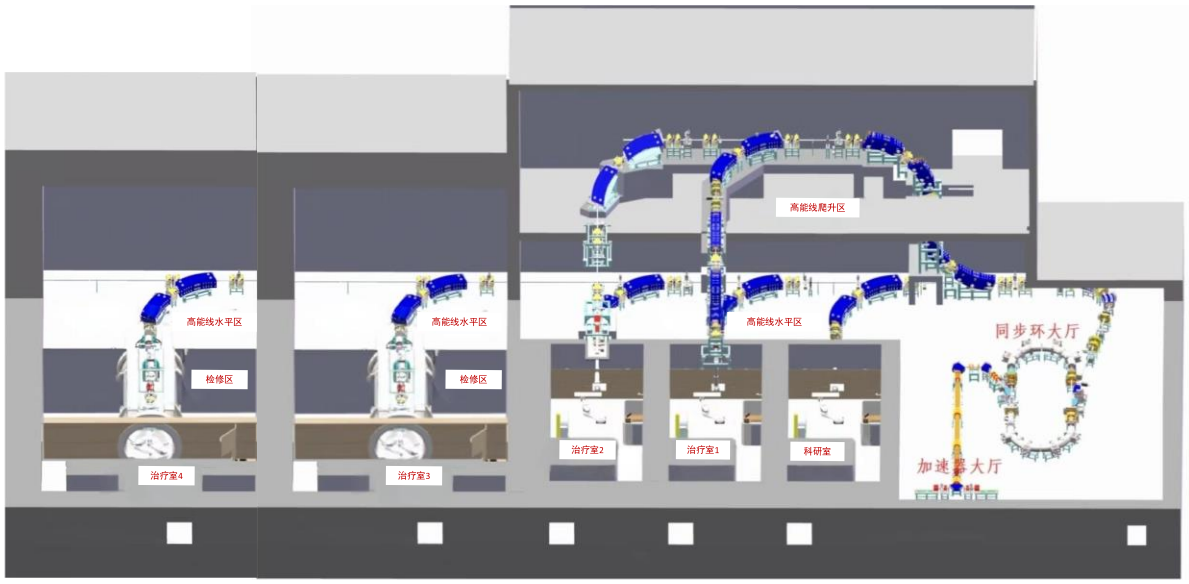


图 3.2.1-2 质子重离子一体化治疗系统总体布局示意图

3.2.1.2 工作原理

3.2.1.2.1 质子重离子肿瘤治疗原理

质子重离子系统治疗肿瘤类型广，包括中枢神经系统、眼部、头颈部、胸部、腹部、骨盆区等的实体肿瘤。非实体肿瘤不太适用，例如血癌，转移性骨癌。尤其适用于儿童肿瘤患者的放射治疗，能够有效避免因传统放疗给儿童患者可能带来的认知障碍、内分泌功能缺失、发育迟缓、生长畸形等副作用。

质子重离子放射治疗系统的放射治疗是利用质子束或重离子束杀灭肿瘤细胞。与传统放疗不同，质子重离子束经加速器加速按照设备设定的位置准确射入人体后，在抵达肿瘤前几乎不释放任何能量，而在达到肿瘤的具体部位时，瞬间释放大量能量杀死肿瘤细胞。

这是因为质子重离子射线独特的“布拉格峰”起的作用，布拉格峰是指质子重离子在穿透一定深度的组织后，会在一个很短的距离内释放出大部分的能量，形成一个剂量的峰值，然后迅速降为零。这个峰值的位置和高度取决于质子重离子的初始能量和组织的密度。通过调节质子重离子的能量，可以使布拉格峰与肿瘤的位置和大小相匹配，从而实现对肿瘤的高剂量辐射，而对肿瘤前后和周围的组织的辐射则大大降低。

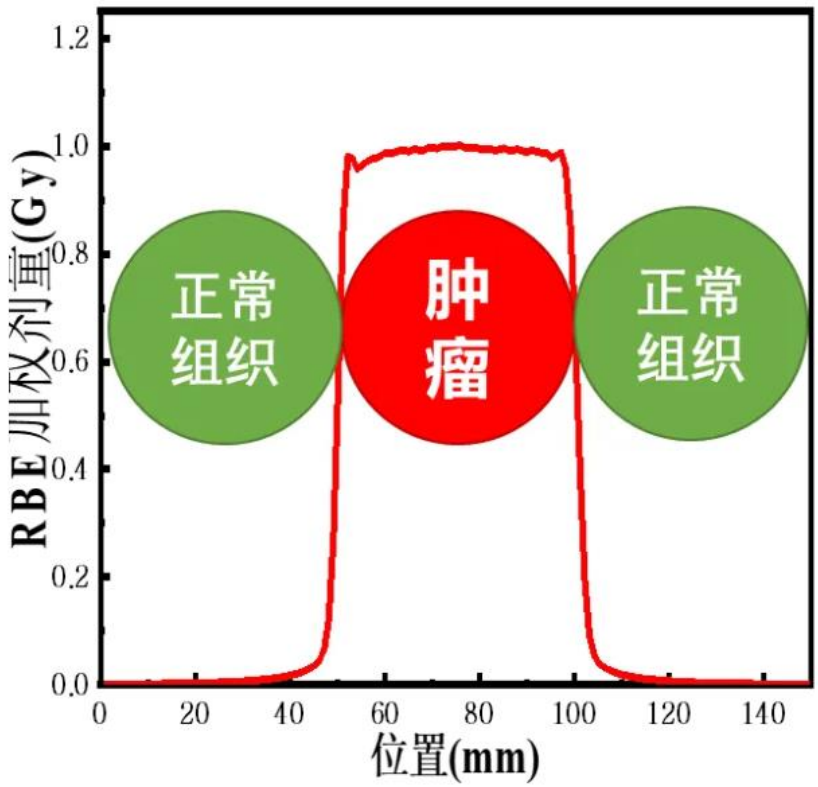


图 3.2.1-3 “布拉格峰”原理示意图

3.2.1.2.2 质子重离子一体化治疗系统工作原理

质子重离子一体化治疗系统的质子治疗和重离子治疗模式工作原理相似，治疗工作流程如下，以下以碳离子为例进行说明：

（1）碳离子源的产生：离子源系统产生包含 C^{4+}离子的混合离子束，由低能传输系统输运，并选择分析出 C^{4+}离子束，为直线加速器提供 C^{4+}离子束。

（2）碳离子源的加速：从离子源产生的 C^{4+}离子束经低能束线传输到直线加速器，通过直线加速器作用，在直线段经过两级加速，通过加速电场加速到能量 7MeV/u，由引出设备引出到中能传输系统；直线加速器引出的 $^{12}C^{4+}$束流经中能传输系统配送到同步加速器注入口，经过剥离膜后剥离为 $^{12}C^{6+}$注入到同步加速器，在同步加速器内将束流累积到高流强，然后将束流能量从 7MeV/u 的 $^{12}C^{6+}$加速到终端所需要的能量（70MeV/u-430MeV/u），由高能传输系统配送到终端。

（3）碳离子用于治疗：引出束经高能束运线传输到治疗终端，配送到治疗终端的粒子数最大为 9.0×10^{9}ppm。最后医生根据患者的相关诊断信息，制定患者的治疗方案，确定所有的治疗参数和设备运行参数，通过控制系统的操控完成肿瘤治疗。

本项目质子重离子一体化治疗系统主要由离子源及低能传输系统、直线加速器、中能传输系统、同步加速器、高能传输系统和治疗终端组成。下文将分别介绍其工作原理。

3.2.1.2.3 离子源及低能传输系统

离子源采用电子回旋共振（Electron Cyclotron Resonance，ECR）离子源，其工作原理如图 3.2.1-4 所示。

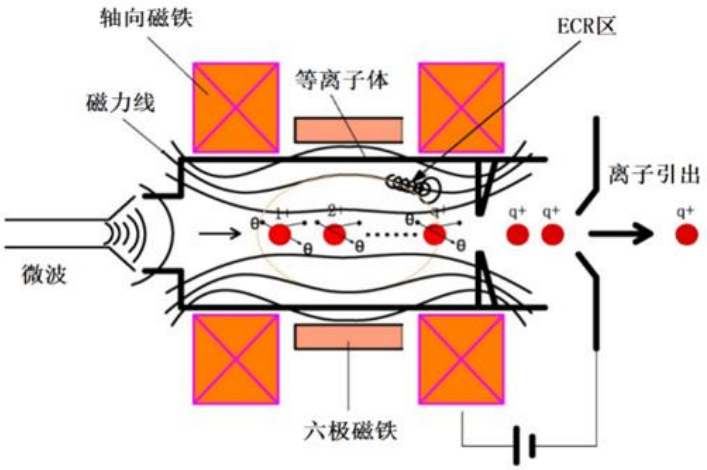


图 3.2.1-4ECR 离子源工作原理图

离子源由轴向磁铁产生一个磁镜场，在径向又叠加由六极磁铁产生的一个六极磁场，形成一个最小 B（minimum-B）磁场结构。在离子源等离子体弧腔内有一些自由电子在磁场中作回旋运动，当中性气体和微波注入等离子体弧腔时，若自由电子的回旋频率与注入微波频率相同，即满足条件时：

$$\omega_{ECR} = \omega_{RF} = \frac{eB}{m_e}$$

自由电子就可以从馈入微波电场中吸收能量，形成所谓的电子回旋共振加热，上式中ω_{ECR}为电子在磁场中的回旋频率，e 和 m_e为电子的电荷和质量，ω_{RF}为馈入微波的频率。满足上式的磁场 B 被称为共振磁场。等离子体弧腔内的中性气体原子和这些获得微波能量的自由电子碰撞，原子核外的电子就可能被电离。这些电离的电子又会被微波共振加热获得能量而继续碰撞别的原子或离子，原子就被逐步电离至较高电荷态，形成高密度 ECR 等离子体。在弧腔上加上几十千伏的正高压，等离子体当中的离子会通过电极被引出而形成很强的离子束。

离子源系统引出的离子束为含有多种质荷比的混合态离子束，首先经低能传输系统前端的离子束分析系统，利用不同能量质荷比离子束在分析系统末端横向相点位置不同的原理，筛选出直线加速器需要的各类离子束，后经横向发射度匹配系统及纵向发射度匹配系统匹配注入直线加速器。以碳离子为例，离子源系统产生的离子束为$^{12}C^{4+}$，因直线加速器的后级同步加速器装置只有在注入期间需要来自其前级系统的$^{12}C^{4+}$离子束，为了避免中高能 $^{12}C^{4+}$离子束在同步加速器入口大量损失造成设备损伤，在低能传输系统中增加了斩波器，在同步加速器需要束流时使离子束正常注入下级系统，在同步加速器不需要束流时将离子束偏转。离子源及低能传输系统示意如图 3.2.1-5 所示。

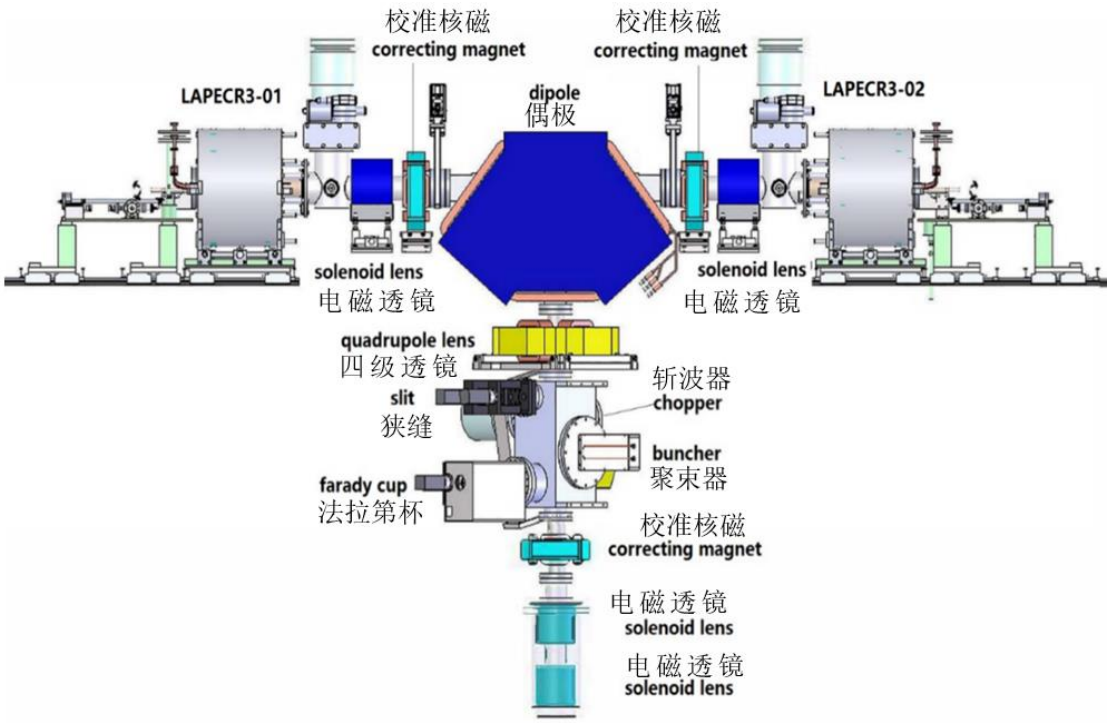


图 3.2.1-5 离子源及低能传输线布局图

3.2.1.2.4 质子重离子装置中直线加速器系统

质子重离子直线加速器作为质子重离子治疗装置主加速器的注入器，主要作用是把从离子源产生并经过低能输运线输出到直线注入器入口的低能离子束加速，为同步加速器提供确定能量、足够流强并具备一定束流品质的离子束，以与同步加速器匹配，满足同步加速器设计要求。

直线注入器采用多台离子源提供多种荷质比相等或相近的粒子，包括 $^{12}C^{4+}$、$^{16}O^{5+}$、$^{4}He^{2+}$、H^{+}。以碳离子为例说明，重离子直线加速器采用射频四极场加速器 RFQ 作为注入器前级，将低能输运线出口的 10keV/u 的低能离子束加速到 0.6MeV/u，后接交变相位漂移管加速器 APF-1 将离子束加速到 4MeV/u，之后根据实际需求再接交变相位漂移管加速器 APF-2 将离子束加速到 7MeV/u。

RFQ 采用四翼型方案便于水冷。 漂移管直线加速器 APF 通过改变粒子的同步相位实现横向聚焦，相比传统 DTL 漂移管中没有聚焦磁铁，减小了工艺难度降低了造价。相比于 IH-DTL 漂移管直线加速器无横向聚焦场，APF 漂移管直线加速器的束流品质要好，同时腔体长度可以更长，腔体的打火因子更低，有利于腔体的长久运行。直线加速器示意如图 3.2.1-6 所示。

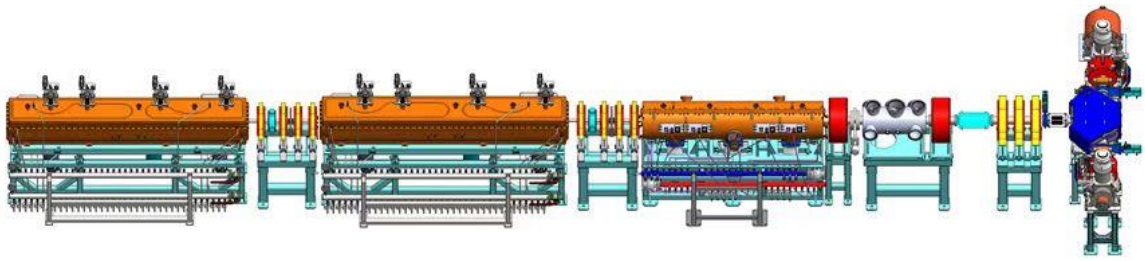


图 3.2.1-6 直线加速器布局图

3.2.1.2.4 中能传输系统

在直线注入器的出口处剥离膜装置会剥离出 $^{12}C^{4+}$、$^{16}O^{5+}$、$^{4}He^{2+}$、H^{+}，经中能传输系统传输至同步加速器注入口。中能传输系统是利用磁极性交替排列的四极磁铁在水平与垂直方向把束流限定在真空管道内，用分布于四极磁铁之间的二极磁铁把束流导向同步加速器的注入口的束流配送装置。中能传输系统示意如图 3.2.1-7 所示。

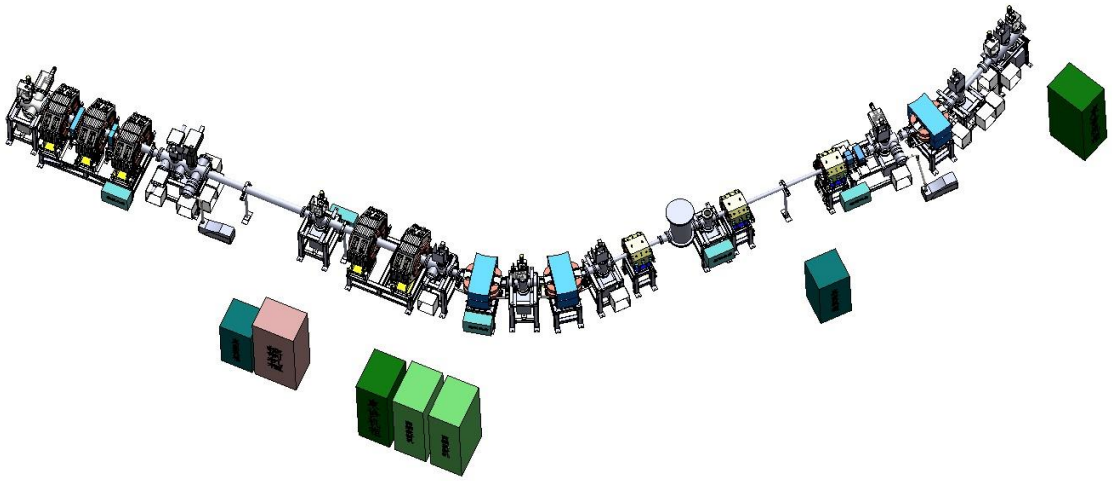


图 3.2.1-7 中能传输系统结构示意

3.2.1.2.5 同步加速器

同步加速器是利用高频电场加速带电粒子的环形加速器装置，也是质子重离子治疗装置重离子束（或质子束）的主加速装置，主要用来将从直线加速器引出并通过中能传输系统传输到同步环的 7MeV/u 的离子束加速到终端所需的能量并引出至高能传输线，示意如图 3.2.1-8 所示。同步加速器包括注入、加速、引出过程。以 $^{12}C^{6+}$离子为例，同步加速器采用多圈注入方式直接注入 $^{12}C^{6+}$，利用凸轨将同步加速器的循环轨道凸起，注入束经过静电偏转板后轨迹与循环轨道重合。随着凸轨高度的降低，束流逐渐填满

同步加速器的水平接受度。然后加速碳离子 $^{12}C^{6+}$束到治疗所需能量 120MeV/u-430MeV/u，同步加速器的磁场强度随被加速粒子能量的增加而增加，从而保持粒子的回旋轨道不变，并通过调节高频频率，来保持粒子持续加速。同步加速器利用高频电场加速带电粒子，令纵向高频相位为 0，电压逐渐上升，从而将连续束俘获成束团，然后高频频率逐渐增加，同步粒子获得纵向电场作用后，能量得到提升，实现加速。加速过程中，要保证高频频率、同步加速器的磁场上升速度一致。引出系统采用 RFKO 方式，即将同步加速器的工作点设置在 1.66 附近，然后增加六极磁铁的强度使束流横向相空间发生畸变，再利用横向激励作用于束流，使其发射度增大从而引出。

同步加速器具备单周期变能模式，即运行模式如图 3.2.1-8 所示，在一个运行周期内根据治疗计划系统的要求，多次进行加速和引出的操作，直至治疗结束或同步加速器内的粒子引出完毕。

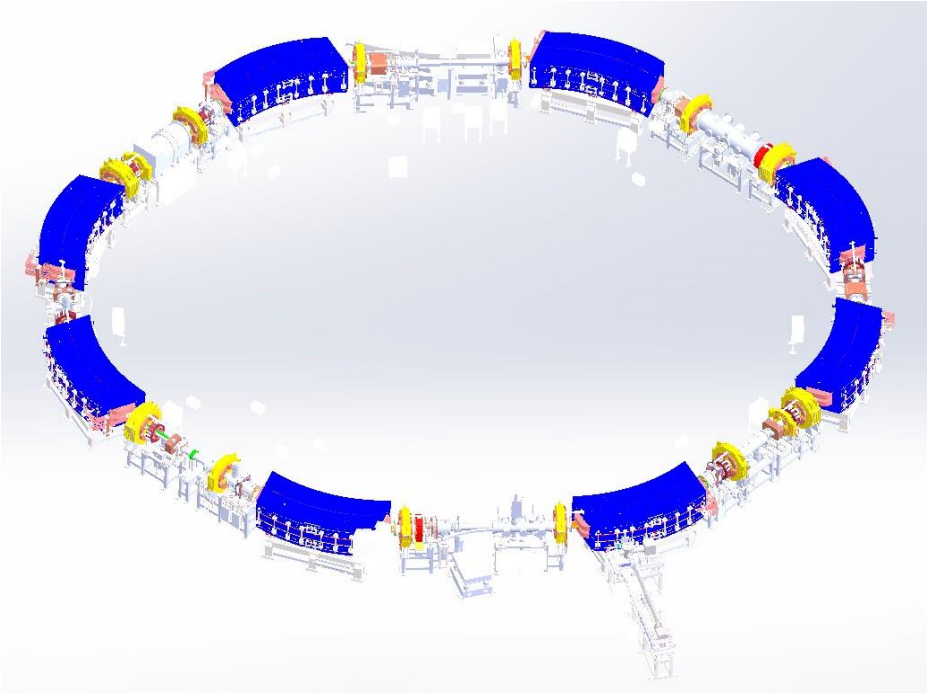


图 3.2.1-8 同步加速器结构示意图

3.2.1.2.5 高能传输系统

高能传输系统是利用磁极性交替排列的四极磁铁在水平与垂直方向把束流限定在真空管道内，用分布于四极磁铁之间的二极磁铁把束流导向科研室及各治疗室的束流配送装置。高能传输系统示意如图 3.2.1-9 所示。

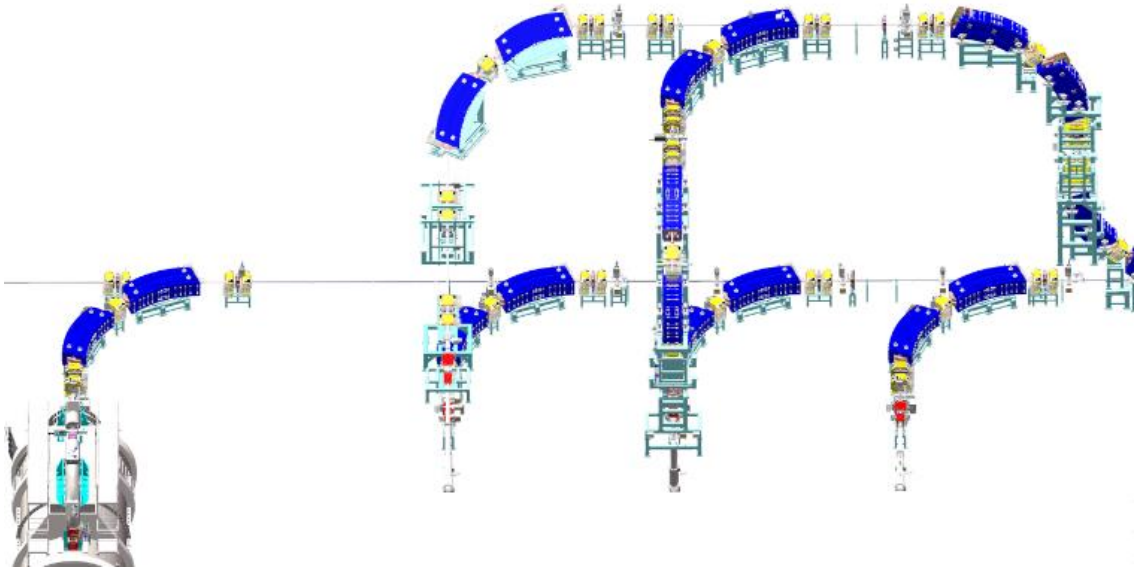


图 3.2.1-9 高能传输系统结构示意图

3.2.1.3 治疗终端

治疗室终端为治疗病人的场所，本项目拟配备3间固定束治疗室和1间旋转束治疗室，其中固定束治疗室分别为：科研室（水平束治疗室，0°治疗头）、治疗室1（水平束+垂直束治疗室，0°+90°治疗头）、治疗室2（水平束+45°束治疗室，0°+45°治疗头），治疗室3为360°旋转gantry治疗室，治疗室4为180°旋转gantry治疗室。每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一间治疗室提供束流。

科研室及各治疗室配置包括：旋转机架（旋转治疗室内）、滑轨 CT（旋转治疗室内）、照射治疗头、激光定位、机械臂治疗床等设备。

①旋转机架（治疗室 3、4 内）

旋转机架是一个包含束流传输系统末端及可支撑照射治疗头的钢结构，重达 100 吨以上。旋转机架能够环绕卧姿患者进行 360°或者 180°旋转，通过安装在旋转机架上的照射治疗头，可以从多角度进行照射。配合机械臂治疗床进行上下、前后、左右调节，可以实现对肿瘤患者的精确定位和照射。

②照射治疗头

照射治疗头位于治疗室内束流传输的最末端，主要功能是通过两组磁铁控制重离子束流方向，实现对肿瘤的精确照射。治疗头主要由主剂量监测器、副剂量监测器、迷你脊形过滤器和射程调节器组成，可通过转动治疗头位置，实现引出水平、垂直和

45°的治疗束线。

本项目5间治疗室均为主动式束流配送系统（调制扫描），其特点体现在利用笔形束实现对肿瘤靶区的分层逐点照射，横向上束斑的位置可以由扫描磁铁来控制，纵向上可以通过加速器主动变能的方式实现离子束能量的调节，扫描点在横向上和纵向上相互累加达到计划的均匀剂量分布。该束流配送模式不但提高了靶区的适形度，而且不需要专门为患者制作个体化的补偿器和准直器。调制扫描示意图如图3.2.1-10所示。

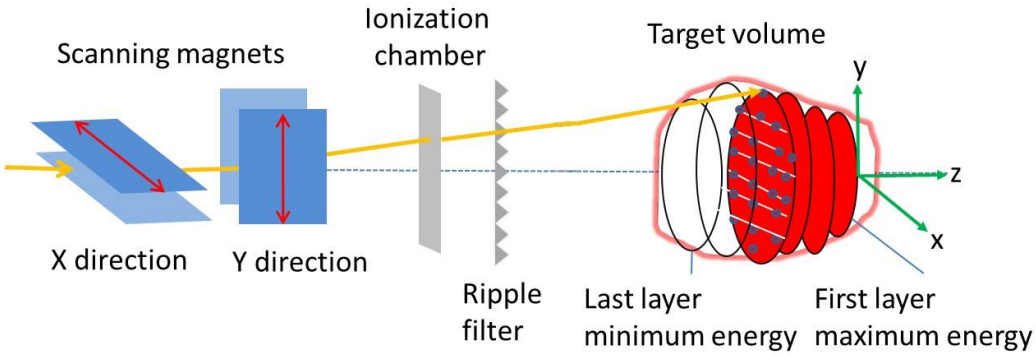


图 3.2.1-10 调制扫描示意图

③图像引导系统

科研室及各治疗室随机配置一套定位用激光器、两台正交kV级X射线影像系统以及一套用于患者定位的定位影像分析系统软件（PIAS），这些设备可以按照模拟定位决定的位置完成患者定位。每套系统的两个X射线管的最大管电压150kV，最大管电流为640mA。由高压发生器提供高压电源到X射线管上，X射线管发出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。医生可以通过自动或手动调整两个正交图像集的配准来计算精确对准患者进行治疗所需的治疗床位置的调整位移。

此外，治疗室3和4内拟配备一台滑轨CT机和光学跟踪系统，通过3D成像提供患者定位。CT机的最大管电压为150kV，最大管电流为660mA，与2D系统类似，室内3D图像被传输到治疗控制系统进行处理。

④机械臂治疗床

治疗床采用具有六个运动自由度（DOF）的摆动式机器人治疗床。患者卧榻由驱动系统，控制器和桌面扩展组成。其主要功能是根据治疗计划系统以准确而有效的方

式将患者移动到所需位置。患者治疗床的功能是使患者与PIAS计算的治疗位置对准，从而实现患者的精确定位。患者治疗床配有力传感器，以检测治疗头与患者和/或治疗床之间可能发生的碰撞。卧式推力传感器与治疗头上的触摸传感器结合使用，可消除发生碰撞时对患者造成伤害和对患者治疗床造成伤害的潜在危险。机械臂治疗床的基本结构如图3.2.1-11所示。

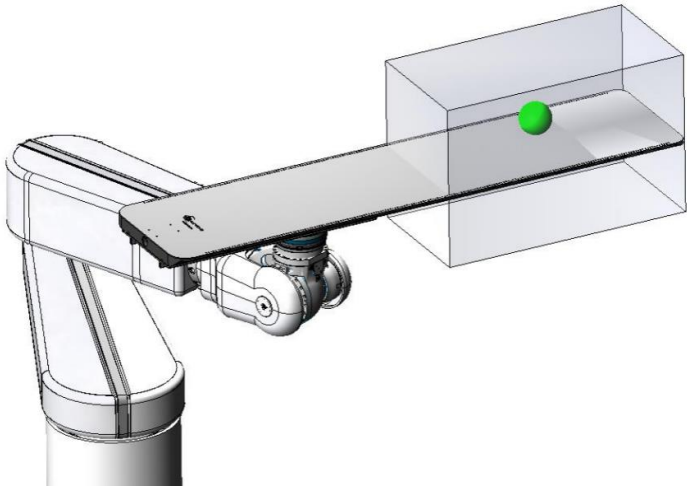


图 3.2.1-11 治疗床示意图

各治疗室终端示意效果图见图3.2.1-12至图3.2.1-14。

图 3.2.1-12 治疗室 1 中水平+垂直治疗终端效果示意图

图3.2.1-13 治疗室2中45°治疗终端效果示意图

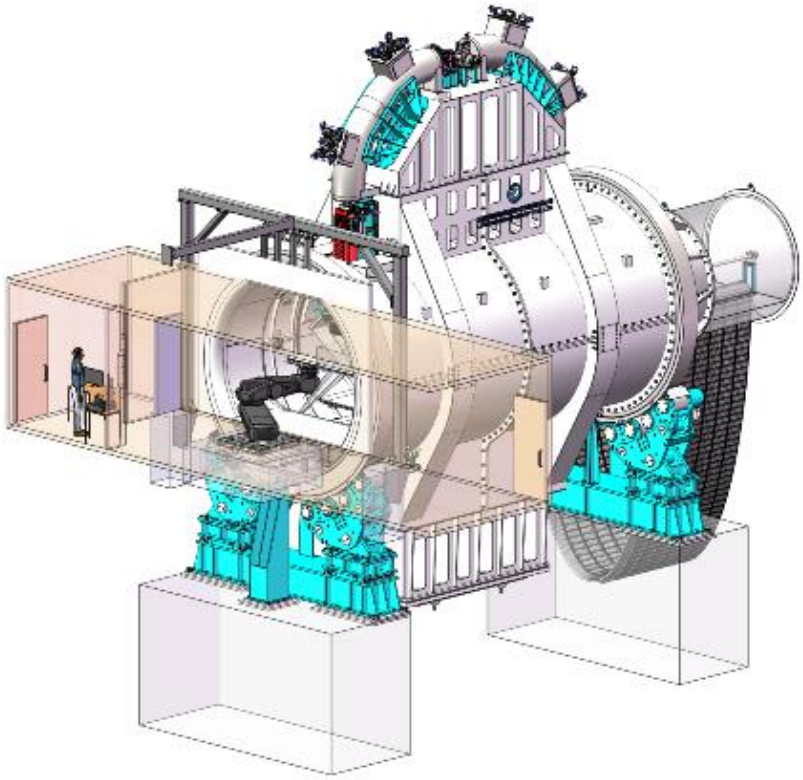


图3.2.1-14 治疗室3中360°Gantry治疗终端效果示意图

3.2.1.3 滑轨 CT

本项目质子重离子治疗室 3 和 4 内各配备了 1 台滑轨 CT，为质子重离子治疗图像引导系统的一部分，属于 3D 成像，成像原理同 X 射线管成像，球管管电压 40~150kV，管电流 1~1250mA。滑轨 CT 和质子重离子治疗系统在同一治疗室内共用一张治疗床，CT 机可沿导轨移动。在患者摆位后，治疗床平移 180°后保持静止，CT 机沿导轨移动至指定位置并做治疗部位扫描，根据 CT 断层图像和与计划 CT 图像确定摆位误差，修正后 CT 机退出，床面再转回进行治疗。滑轨 CT 的组成结构见图 3.2.1-15。

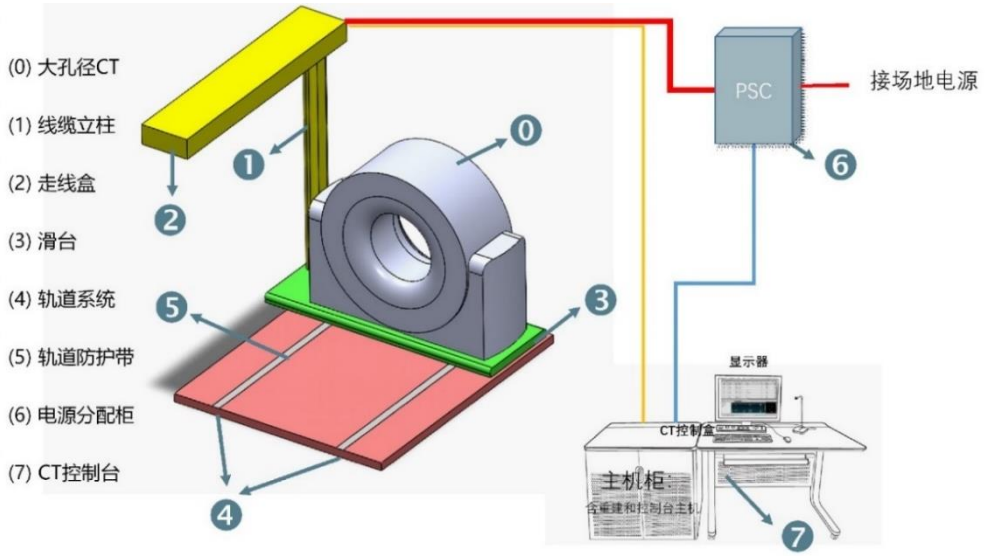


图 3.2.1-15 滑轨 CT 结构示意图

3.2.1.4 工作方式

本项目质子重离子治疗系统主要选配主动式束流配送(调制扫描)治疗模式，每间治疗室在照射时间上相互错开，同一时刻只能向一间治疗室提供束流。调试完成后，装置即处于正常可用状态,开启总束流闸，即可提供束流，关闭总束流闸则整个装置内无束流。根据患者需要，治疗束流被输送到其中的一个治疗室(同时只有一个治疗室开展治疗)，其他治疗室用于患者摆位，治疗结束后可切换束流至其他治疗室。治疗间歇期，关闭对应治疗室的束流闸。装置的调试、运行、束流切换、离子源开关操作全部在中控室及控制室。运行期间，加速器大厅无工作人员滞留；需维护、检修时，在停束进行有效通风后，厂家工程师才进入加速器大厅、高能线爬升区进行维护、检修工作。

主动式束流配送系统(调制扫描)其特点体现在利用笔形束实现对肿瘤靶区的分层逐点照射，横向上束斑的位置可以由扫描磁铁来控制，纵向上可以通过加速器主动变

能的方式实现离子束能量的调节,扫描点在横向上和纵向上相互累加达到计划的均匀剂量分布。该束流配送模式不但提高了靶区的适形度，而且不需要专门为患者制作个体化的补偿器和准直器。调制扫描示意图如图 3.2.1-10 所示。

束流进入肿瘤中，通常能量由高到低，对应入射深度由深到浅，这样有利于剂量的精确控制。因此最高能量的束流其能量沉积(布拉格峰区)在图 3.2.1-3 中红色线条封闭区域--肿瘤靶区束流纵向(z 轴)最右方，即为首层处:当完成这个深度的横向剂量沉积后，束流能量降低，入射深度变小，完成对应深度的横向剂量沉积后再依次降低能量减少入射深度完成该深度处的剂量沉积,直到能量降到最低、在最小的深度完成最后一层,图 3.2-13 中红色线条封闭区域--肿瘤靶区束流纵向(z 轴)最左方剂量沉积，即完成整个具有三维分布的实体肿瘤的照射。

对于首次预约重离子治疗系统治疗的患者，需要依托重离子质子中心一层的 CT 模拟定位机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，并利用治疗计划系统制定治疗计划，确定治疗参数。每名患者的治疗计划在正式使用前，为确保治疗安全，都需利用治疗计划方案中规定的设备运行参数进行水箱模拟治疗，实测其治疗参数，若差值在允许容差内，则允许正式用于患者治疗。技师利用治疗室内滑轨 CT 进行治疗前精确摆位、利用设备自带图像引导系统对病灶部位确认，技师在控制台操作滑轨 CT、设备自带图像引导系统出束 X 射线。待摆位验证完成后，技师离开治疗室进入控制室内，确定所有的安全联锁建立后，启动重离子束或质子束进行治疗。

3.2.1.4 工艺流程及产污环节

（1）患者经专家医师会诊，判断其符合质子重离子治疗适应症后（诊断、治疗正当性判断），由治疗医生、物理师、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：对于首次预约质子重离子治疗的患者，需要进行治疗前的模拟定位，采集患者数据并确定初始等中心。该环节依托重离子质子中心一层模拟定位区 CT 模拟定位机。

（3）制定治疗计划：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，通过剂量计算制定出各种剂量分布图；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，最终确定一个完整的治疗计划方案。该环节

由治疗医生和物理师进行操作，不涉及开机出束。

（4）QA（质量保证）：质子重离子放射治疗系统开机出束前，要开展 QA（质量保证），主要是利用质控检测设备等对质子重离子放射治疗系统性能进行检测，包括日检、月检和年检，涉及开机出束。由物理师完成所有操作，工作地点包括质子重离子治疗机房和控制室。每次 QA 由 2 名物理师共同完成，共 10 名物理师轮班。质子重离子放射治疗系统开机出束期间，产生质子、中子、γ瞬发辐射和感生放射性气体。除此之外，QA 使用三维水箱期间，在束流损失产生的中子辐射场的照射下，水箱及内部去离子水、用于冷却加速器部件的回路中的冷却水以及质子重离子放射治疗系统的结构部件，均会被活化产生感生放射性。因此该环节主要的辐射污染源为质子、中子、γ瞬发辐射、感生放射性气体、活化结构部件、活化废液（活化冷却水和水箱活化水）和水箱箱体感生放射性。

（5）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人体仿真模体（一般为等效水模体）模拟治疗，再实测其治疗参数，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。由物理师完成所有操作，包括在质子重离子治疗机房内的摆位等操作和在质子重离子治疗机房控制室内控制出束，一般一名患者需要治疗约 26 次，进行 2 次治疗计划验证。每次计划验证由 2 名物理师共同完成，本项目共 10 名物理师轮班。该环节主要的辐射污染源为质子重离子、中子、γ瞬发辐射、感生放射性气体、活化结构部件、活化冷却水、人体仿真模体感生放射性。

（6）治疗前摆位及精确位置验证：计划验证通过并获得批准执行后，患者可进入治疗机房内准备治疗。治疗技师根据治疗计划指导患者在治疗机房内进行摆位，并在控制室使用 X 射线管或滑轨 CT 机进行精确的位置验证，该环节由治疗技师进行全程操作。治疗前摆位约需 5min。每间治疗室拟配备 2 名治疗技师，5 间治疗室每个班次共 10 名治疗技师，共 20 名技师轮班。该环节主要的辐射污染源是将受到紧邻治疗室治疗出束的瞬时辐射及感生放射性的照射，X 射线管或滑轨 CT 机出束期间产生的 X 射线经过质子重离子机房的屏蔽后影响较小。

（7）照射治疗：摆位验证完成后，治疗技师在控制室内确定所有的安全联锁建立后，启动质子重离子束流进行出束治疗，每人次治疗出束时间约为 3min。该环节由治

疗技师全程操作，每间治疗室 2 名治疗技师共同工作，5 间治疗室每班次共 10 人，20 名技师轮班。该环节主要的辐射污染源为质子重离子、中子、γ瞬发辐射、感生放射性气体、活化结构部件、活化冷却水、患者感生放射性。

（8）治疗结束后解除摆位：患者治疗结束后停机 5min，治疗技师从控制室进入治疗机房内，对患者解除摆位并协助其离开机房，约需 2min（解除摆位 1min，离开机房 1min），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，每间治疗室 2 名治疗技师共同工作，5 间治疗室每班次共 10 人，20 名技师轮班。照射治疗环节产生的患者感生放射性、感生放射性气体以及活化结构部会持续对本环节辐射工作人员产生影响，影响对象为与其近距离接触的治疗技师。

质子重离子放射治疗系统治疗流程及产污环节示意图如下图所示。

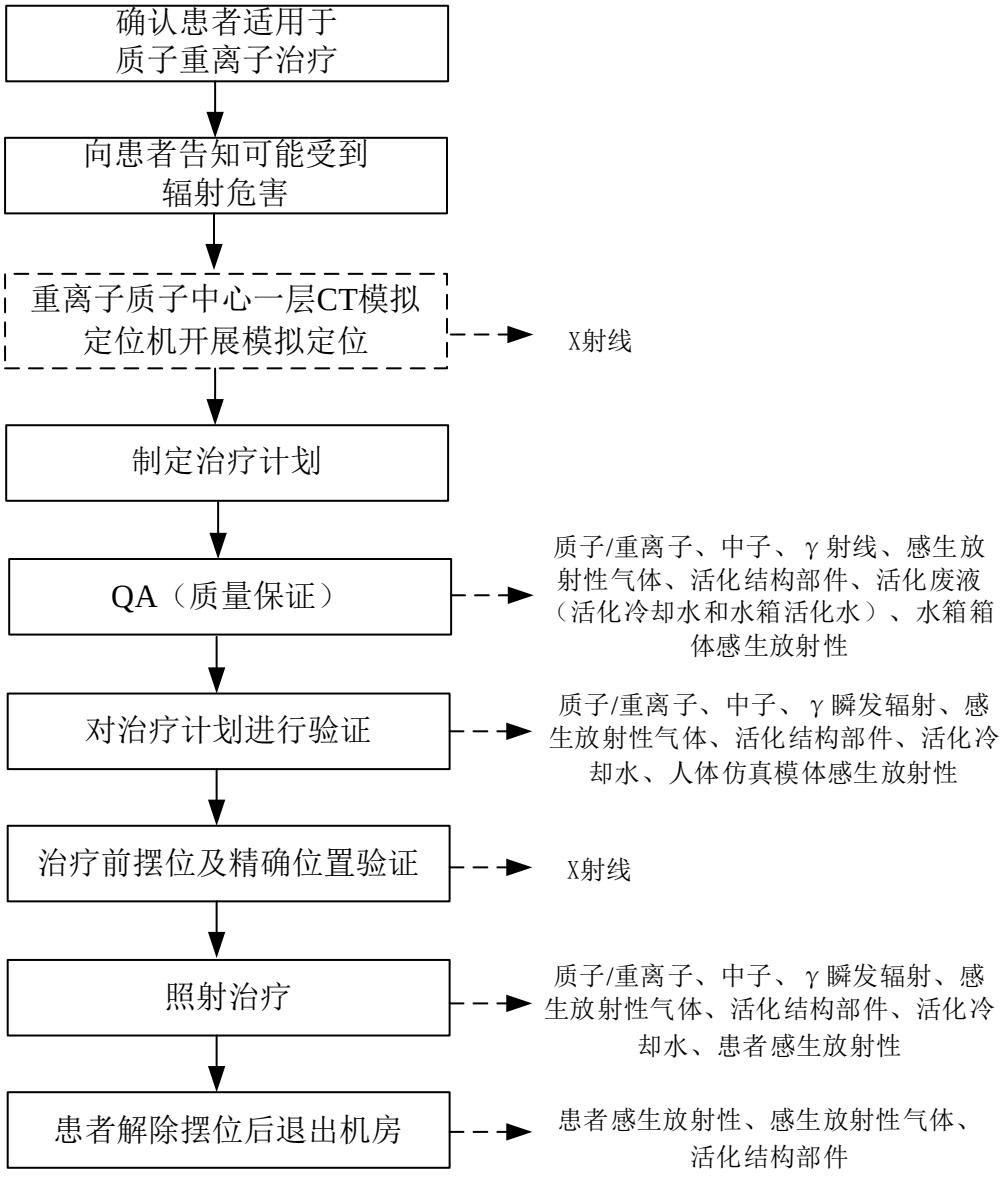


图 3.2.1-16 质子重离子放射治疗系统治疗流程及产污环节示意图

3.2.1.5 人员和物流路径规划

本项目工作场所分别设置相对独立的人员和物流通道。人流和物流路径规划图见图 3.2.1-17，具体路线设置描述如下：

（一）辐射工作人员路径

治疗医生的工作地点主要在办公室内，仅在临床试验期间以及质子重离子机房内出现突发状况时会进入质子重离子机房内部，人员路径集中在质子重离子机房一层，主要是从治疗大厅进入控制台，通过迷道后进入质子重离子机房。工作结束后，按原路离开。

治疗技师的工作地点主要在控制室、质子重离子机房，人员路径与治疗医生一致，不再赘述；物理师的工作地点主要在治疗计划室、办公室、控制室、质子重离子机房，人员路径与治疗医生一致，不再赘述。

厂家维修工程师的工作地点主要在中央控制室、质子重离子机房，设备开机前，由厂家维护人员对加速器大厅、高能线爬升区、治疗室按照既定路线进行清场、巡检。日常治疗过程中，厂家维护人员在中控室内 24 小时监视设备运行情况。清场巡检路线见图 4.1.2-6。

护士从等候区引导患者进入治疗室接受放射治疗，引导结束后从原路离开。

（二）患者路径

患者路径集中在质子重离子机房治疗层，主要是从治疗大厅进入，再进入质子重离子机房。治疗结束后，按原路离开。

（三）物流路径

设备在安装阶段，质子重离子机房西侧墙体预留了设备吊装口，待设备进入后，再用密度高于 2.35g/cm^3 的混凝土预制块进行砌筑，做到错缝安装确保该部分墙体等效混凝土厚度高于原墙体。

建设单位拟在质子重离子机房内 3F 高能射线爬升区东北侧设置 2.2m 高不锈钢围栏作为放射性固体废物间，该放射性废物间仅用于暂存质子重离子放射治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固体废物，不用于存放其他备件，房间尺寸约 3m×2m×2.2m（长×宽×高），容积约为 13.2m^3。感生放射性固废分类收集后暂存于放射性固体废物间铅箱内，对每次放射性固体废物的贮存和处置情况进行记录并存档，对于经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中解控标准的放射性固废作为医疗废物处理，对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。

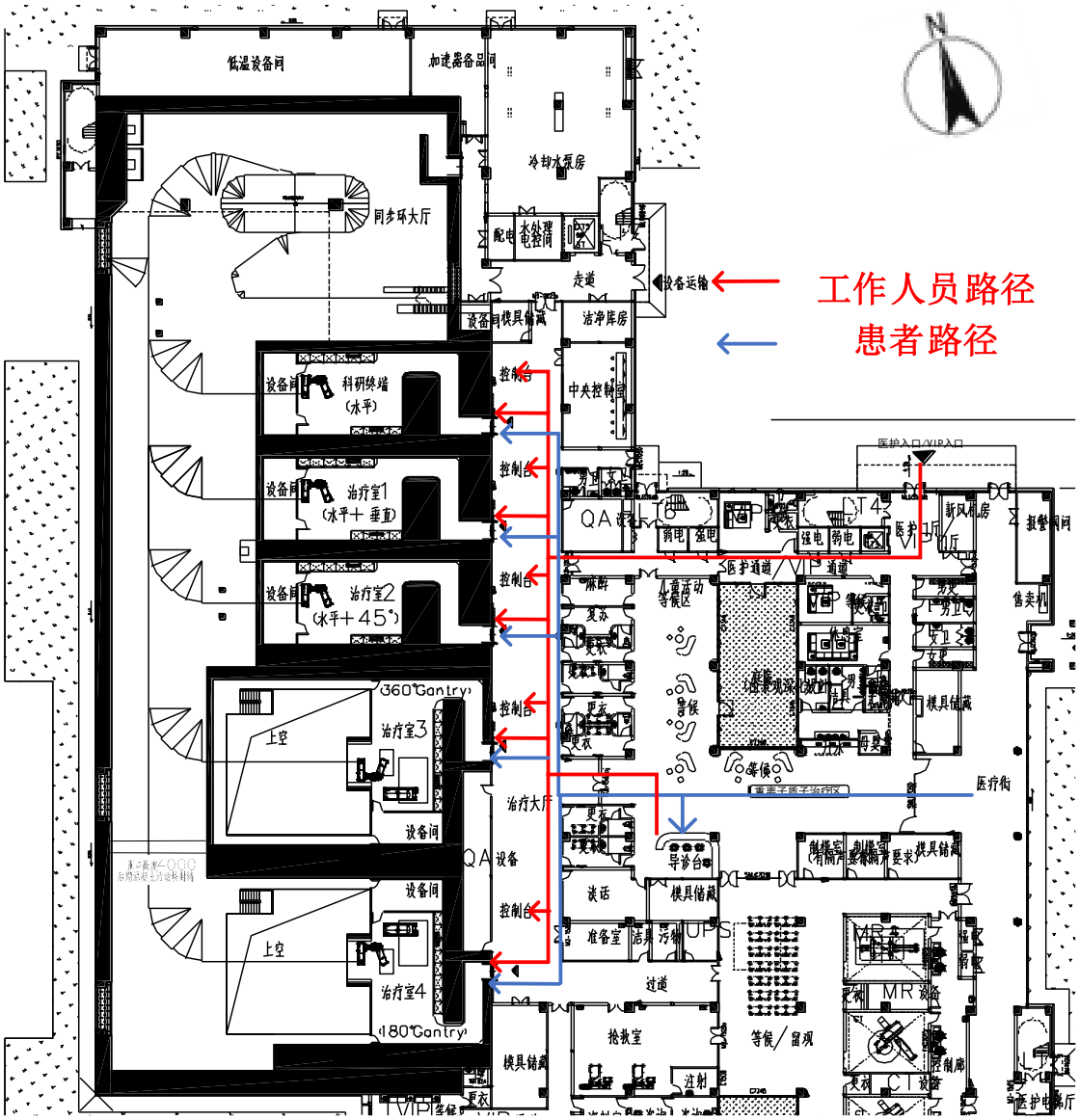


图 3.2.1-17 人员物流路径图

3.2.2 电子直线加速器工程设备和工艺分析

3.2.2.1 电子直线加速器的组成

电子直线加速器主要由三大部分组成：电子发射单元，电子加速单元和电子线引出单元。它的结构单元为：加速管、电子枪、微波系统、调制器、束流传输系统及准直系统、真空系统、恒温水冷系统和控制保护系统。电子治疗子系统基本组成部件主要包括初级准直器、散射箔、托盘、均整器、电离室、光阑、附件接口、限光筒。

典型电子直线加速器外部结构如图 3.2.2-1 所示，内部结构如图 3.2.2-2 所示。

本项目电子直线加速器有电子线和 X 射线两种治疗模式，治疗模式如图 3.2.2-3 所示。

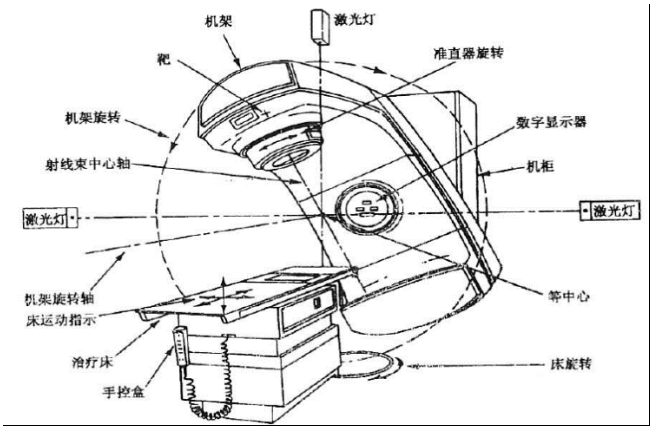


图 3.2.2-1 典型电子直线加速器机外部结构示意图

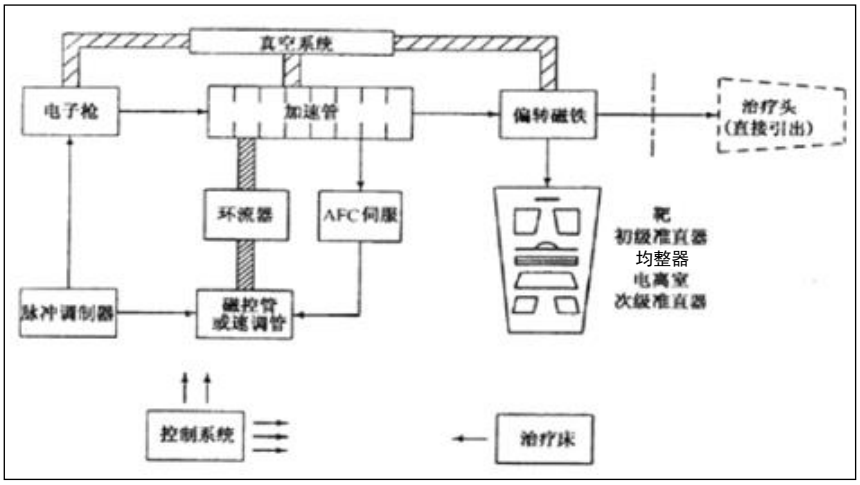


图 3.2.2-2 典型电子直线加速器机内部结构示意图

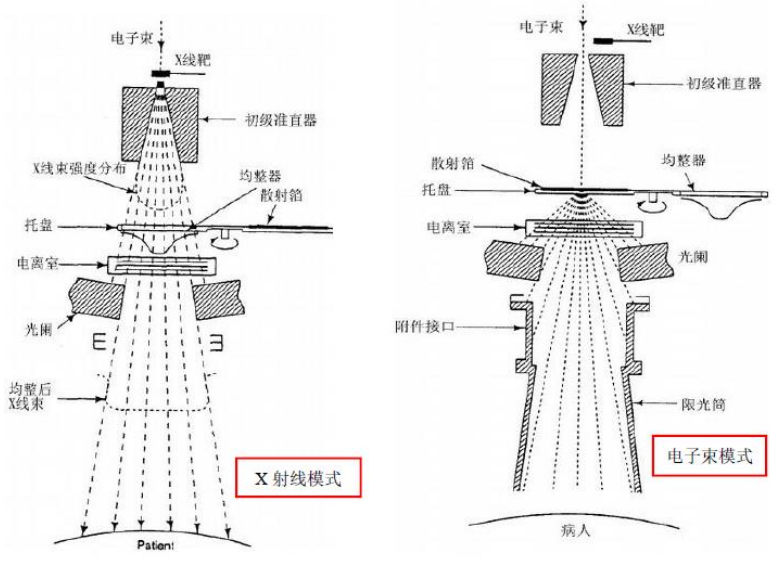


图 3.2.2-3 X 射线和电子线治疗模式结构示意图

3.2.2.2 电子直线加速器的工作原理

电子直线加速器是将电子枪产生的电子经加速管加速后形成高能电子束的装置。

电子枪产生的电子束由微波加速波导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子束由电子窗口射出，经调制、准直后射向患者病灶；或电子束与靶物质相互作用产生韧致辐射 X 射线束，经一次准直器和滤线器形成剂量均匀的 X 射线束，再经监测电离室和二次准直器限束，到达患者病灶实现治疗目的。

随着技术的发展，现代直线加速器开始支持 FFF 模式，即去除均整块，直接使用未经平坦化的射线束进行治疗。由于去除了均整块的吸收作用，FFF 模式下的射线束具有更高的峰值剂量率和更陡峭的剂量下降梯度，使得剂量主要集中在目标区域内。有均整块模式：剂量分布相对均匀，适用于需要大面积均匀照射的治疗方案。

因此，作为一种体外照射的放射治疗设备，电子直线加速器利用产生的高能电子束或 X 射线，对人体病灶部位进行照射，使肿瘤组织受到不可逆损伤。根据癌症类型及其所在位置、患者的身体状况等，选择不同的输出方式对肿瘤进行照射，同时使肿瘤周围正常组织得到最大限度的保护，达到治疗肿瘤的目的。

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

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

CBCT 的优势在于重复模拟定位时的体位，保证与计划设计时靶区、靶区与危及器官和射野空间位置关系一致性，使肿瘤组织得到精准照射，提高治愈率，减少放疗副作用。图像引导放射治疗通过 CBCT 图像引导配准，可以实现病人凸显的在线或离线配准，保证病人每次治疗体位的重复性和一致性。

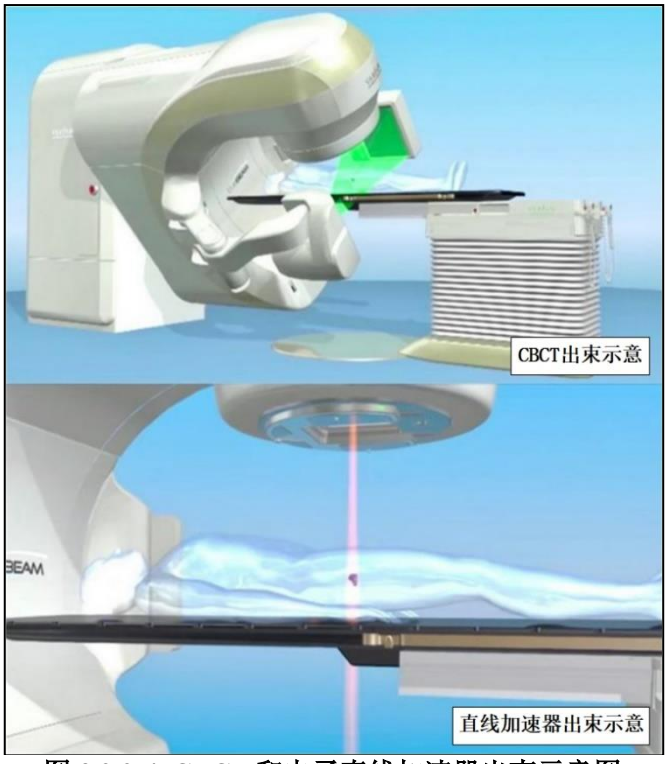


图 3.2.2-4 CBCT 和电子直线加速器出束示意图

3.2.2.3 电子直线加速器的工作流程

治疗前先确认治疗方案，包括确定照射时间和剂量，定位患者照射部位，调整照射角度和视野，再开机进行治疗。在电子直线加速器治疗过程中，除患者外其他人员均不在治疗室内，医护人员通过视频监控系统观察患者情况。工艺流程及产污环节如图 9.3.3-1 所示。

具体操作流程为：

①根据医生指导意见，需要接受治疗的患者提前预约登记，以确定治疗时间；

②预约患者首先在质子重离子中心一层模拟定位区 CT 上进行肿瘤定位，确定肿瘤的具体位置和形状；

③物理师通过医生给出的治疗剂量，通过治疗计划系统（TPS）制定治疗计划；

④肿瘤患者在技师协助下躺上治疗床，进行摆位，根据 TPS 确定照射位置和面积；

⑤CBCT 采集图像进行位置验证；

⑥根据放疗计划，实施照射；

⑦照射结束后，患者离开机房。

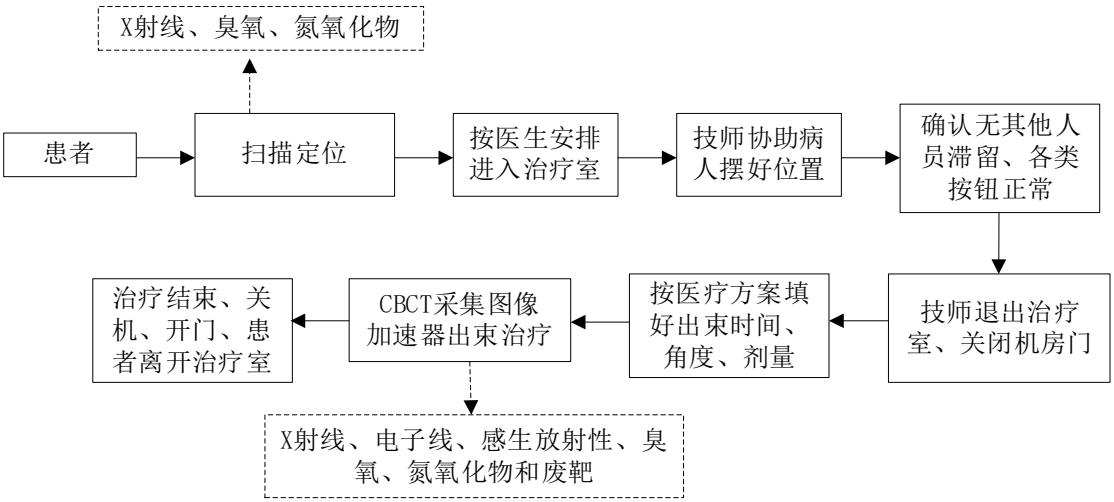


图 3.2.2-5 电子直线加速器工作流程及产污环节示意图

3.2.2.4 人员路径规划

①患者路径

患者在机房东侧等候区进行候诊，根据叫号后进入电子直线加速器机房进行治疗，治疗结束后原路离开。

②工作人员路径

工作人员从东侧进入各电子直线加速器机房的控制室，通过各电子直线加速器机房防护门进入治疗室对患者进行摆位，完成工作后原路返回控制室。

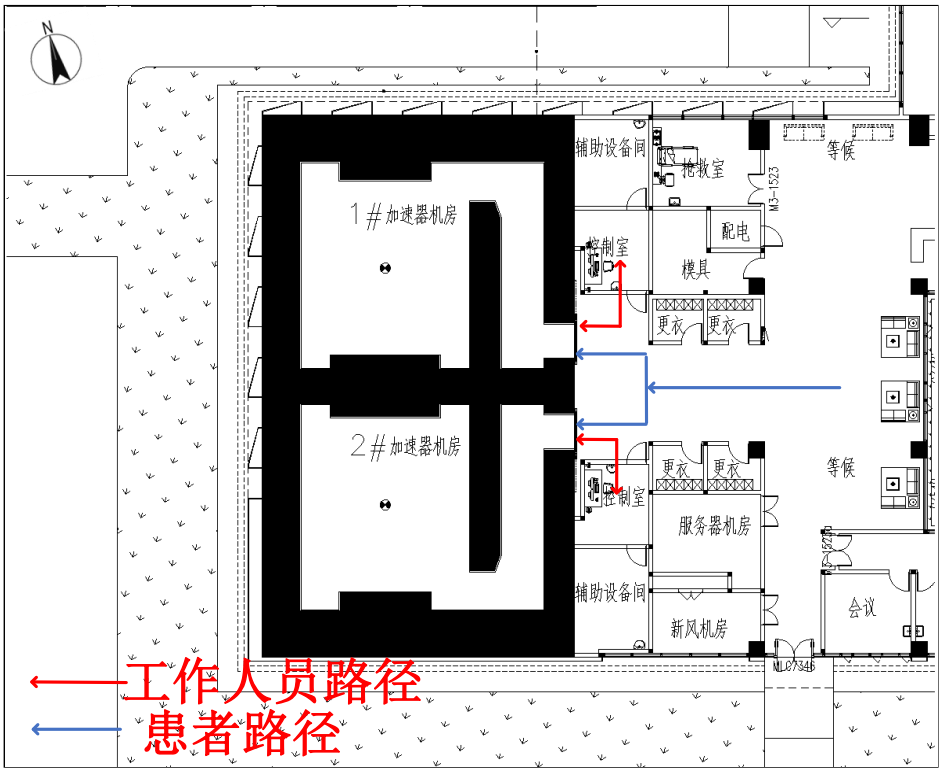


图 3.2.2-6 电子直线加速器人员路径图

3.2.3 模拟定位 CT 机

（1）设备技术参数

根据建设单位配置计划，拟购 2 台模拟定位 CT 机，主要技术参数如下表所示。

表 3.2.3-1 模拟定位机的技术参数

装置名称	类别	数量	型号	最大管电压	最大管电流	使用位置
模拟定位 CT 机	III类	2 台	待定	150kV	1250mA	重离子质子中心一层模拟定位 CT 机房

（2）工作原理

CT主要由扫描部分、计算机系统、图像显示和存储系统组成，其中扫描部分由X线管、探测器和扫描架组成。

X射线装置主要由X射线管和高压电源组成。X射线管由安装在真空玻璃壳中的阴极和阳极组成，阴极是钨制灯丝，它装在聚焦杯中，当灯丝通电加热时，电子就“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚集成束，直接向嵌在金属阳极中的靶体射击。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成。高电压加在X射线管的两极之间，使电子在射到靶体之前被加速达到很高的速度，这些高速电子到达靶面为靶所突然阻挡从而产生X射线。X射线管基本结构如图3.2.3-1所示。

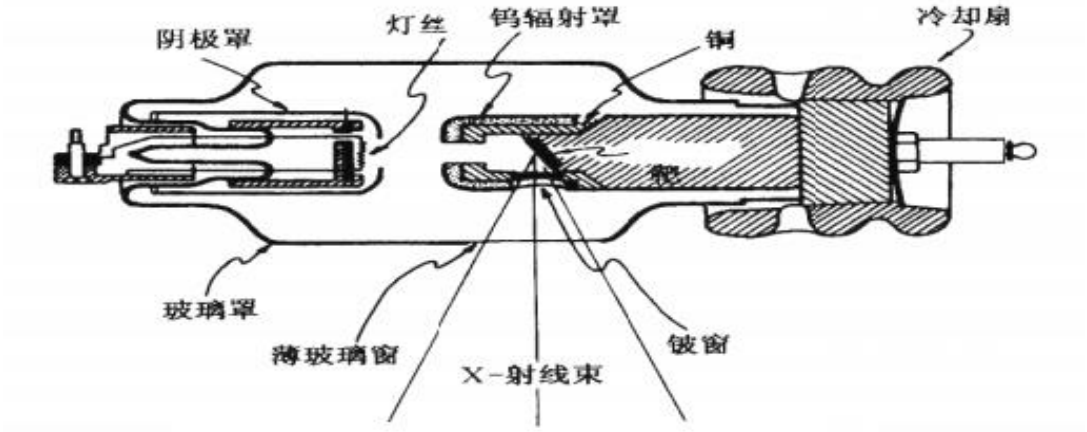


图3.2.3-1 X射线管基本结构图

（3）工作流程及产污环节

模拟定位 CT 影像诊断是指利用 X 射线的穿透性取得人体内器官与组织的影像信息以判断肿瘤大小、位置的技术，本项目模拟定位 CT 机诊断流程如下：

①病人经医生诊断、正当性判断后，确定需要 X 射线影像诊断的病人与放疗科预约登记；

②患者在医护人员的指导下正确摆位；

③进行隔室操作，利用模拟定位 CT 机进行肿瘤定位；

④检查结束离开检查室。

诊断流程及产污环节见下图。

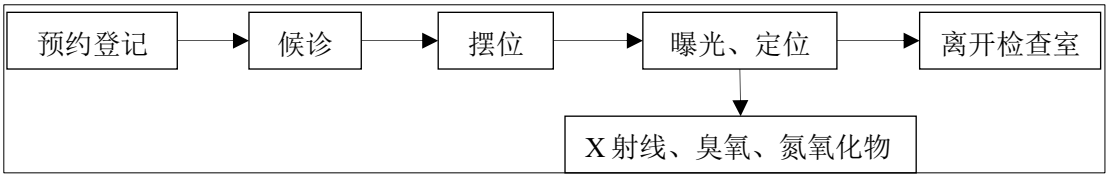


图 3.2.3-2 模拟定位诊断流程及产污环节

综上所述，模拟定位 CT 机正常工况下，污染源项主要为开机状态下产生的 X 射线，同时产生少量臭氧和氮氧化物。

（4）人员路径

①患者路径：患者在西侧候诊区等候，经候诊区后由机房西侧防护门进入模拟定位 CT 机房进行模拟定位，结束后沿原路返回。

②医护人员路径：医护人员从东侧重离子质子中心，进入向西进入控制廊，摆位人员由模拟定位CT机房东侧防护门进入机房对患者进行摆位，完成工作后原路返回控制廊。

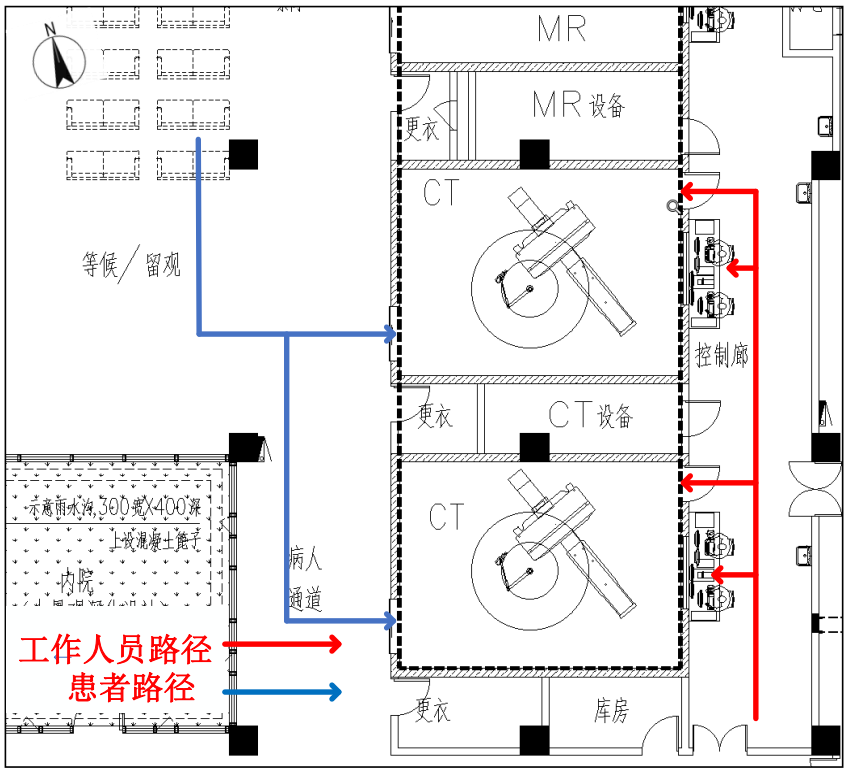


图 3.2.3-2 模拟定位 CT 人员路径图

3.3 辐射污染源项分析

3.3.1 质子重离子放射治疗系统

质子重离子放射治疗系统运行过程中产生的辐射场，主要为装置运行期间产生的“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终端的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、机房内空气等被主束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

对于质子重离子治疗系统，其能量、流强变化大，束流在轰击病灶时全部损失。加速器运行时产生的辐射主要是高能粒子引起的核反应而发射出的瞬发中子：主要包括由核内级联产生的高能中子（前倾）及复合核退激出射的蒸发中子（各向同性）两部分。其他粒子（电子，γ 射线等）不论是产生的量还是穿透能力皆小于中子，对屏蔽外剂量当量的贡献与中子相比可以忽略。因此对于中高能的质子重离子加速器，中子是决定屏蔽厚度的主要因素。同时，次级中子也是造成空气、冷却水和屏蔽体活化的主要因素。

由质子重离子一体化治疗系统的直线加速器部分提供的初级束流注入环，进行束流积累，全环存储的离子数可达 10^6-10^8 个。接着对积累的束流进一步加速到预定能量（需 3~13 秒钟），然后存储并引出（需 1 秒），到下一次注入之间的间隔为 3 秒，这样，整个过程需要 7~17 秒。从同步环引出的束流产生的辐射源项主要有以下几种：

（1）同步环注入线（直线加速器）的低能损失；

（2）同步环注入线（直线加速器）引出的集中损失；

（3）同步环及束流引出口的离子损失；

（4）治疗室束流终端的离子损失。

本项目治疗采用质子（H^+）、氦离子（$^4He^{2+}$）、碳离子（$^{12}C^{6+}$）、氧离子（$^{16}O^{8+}$），治疗束能量最高分别为 230MeV、230MeV/u、430 MeV/u、430 MeV/u，配送到治疗端的最大粒子束分别为 2.00×10^{11}ppm、6.00×10^{10}ppm、9.00×10^{9}ppm、9.00×10^{9}ppm，并且

束流全部损失在治疗室内，质子/碳离子/氧离子/氦离子的危害主要出现在治疗室内，其中氧离子/氦离子仅在科研室内。

虽然质子重离子一体化治疗系统的辐射场是非常复杂的，但对该系统来说，次级中子起着决定性的作用。因为其它瞬发辐射，在离子能量不太高的情况下，其对屏蔽外剂量当量的贡献与中子相比可以忽略。同时，次级中子也是造成空气、冷却水和屏蔽体活化的主要因素。高能质子重离子核反应出射的次级中子，其成份包括由核内级联产生的高能中子（前冲分布，角分布主要集中在重离子入射前方）和复合核退激出射的蒸发中子（各向同性分布）两部分。退激过程伴随发射 γ 射线，中子与周围部件、屏蔽体等物质相互作用也会放出γ射线，高能γ射线与物质发生（γ，n）反应产生的中子。

此外，患者定位系统的 X 射线管和滑轨 CT 机出束期间，会产生 X 射线，也是质子重离子放射治疗系统运行期间瞬发辐射场的组成部分。

3.3.1.1.2 辐射场源项估算

3.3.1.1.2.1FLUKA 程序

FLUKA 程序是由 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、量热学、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。

FLUKA 可以高准确度模拟约 60 种不同粒子的相互作用和物质传播，包括 100 eV 到 1 keV 甚至数千 TeV 的光子和电子，任何能量的中微子，能量高达 20 TeV（通过 FLUKA 与 DPM JET 代码链接可达 10 PeV）的夸克，以及所有相应的反粒子，低至热能的质子和重离子。该程序还可以传输偏振光子（例如同步辐射）和光学光子，可以在线进行不稳定残留核发出的辐射的时间演变和跟踪。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、电子加速器实验室中有多年的使用经验，其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。

综上所述，本报告在对辐射场源项进行估算时，主要采用 FLUKA 程序，通过该程

序模拟质子重离子与不同材质的靶体作用的中子能谱分布。

3.3.1.1.2.2 中子能谱

1998 年，日本的 Kurosawa 等人做了一项实验，他们用 100 和 180MeV/u 的 ^{4}He,100、180 和 400MeV/u 的 ^{12}C 轰击不同的厚靶(靶的厚度大于该粒子在靶中的射程)，用飞行时间法来测量中子产额、角分布和能量分布。实验表明：

（1）中子产额近似与入射离子单核能的平方成正比；

（2）100 和 400MeV/u ^{12}C＋Cu 反应的次级中子具有相似的谱形。

图 3.3.1-1 为 Kurosaws 给出的 400MeV/uC＋Cu 反应在出射角为 0°、6.5°、15°、30°、60°及 90°时中子能谱测量结果。从图中可以看到 400MeV/uC＋Cu 反应的次级中子谱有以下特征：

（1）在 0°方向，中子能谱有明显峰值，峰位中子能量约在入射离子单核能的 Eu 的 2/3 左右；

（2）中子最高能量可达 Eu 的 2 倍；

（3）在前向，En>100MeV 的中子占绝对优势，而 En<100MeV 中子成分仅占 1/10 左右。因此，在束流方向的屏蔽只是由 En>100MeV 的中子决定；

（4）在大角方向，情况正好相反，En<100MeV 的中子占绝对优势。例如，在 60°方向，En>100MeV 的中子成分仅占 2%。因此，在计算侧向屏蔽时应当特别谨慎对待中、低能中子。

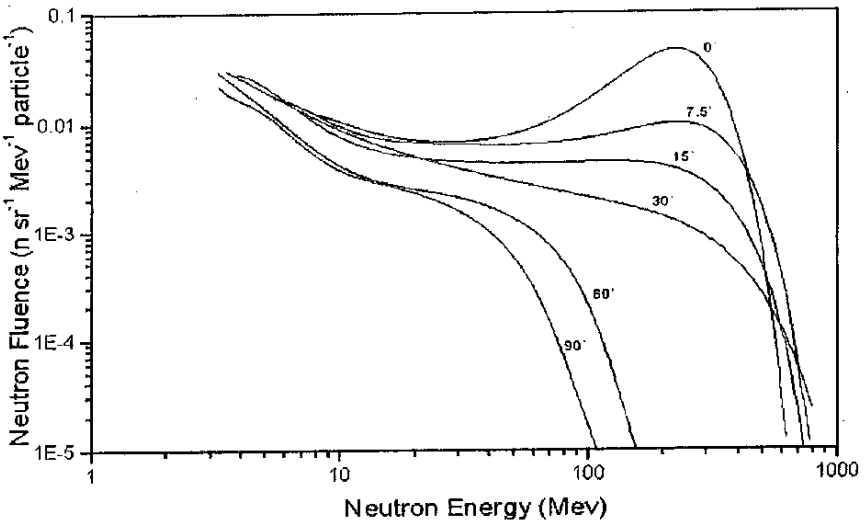


图 3.3.1-1 400MeV/u C+Cu 次级中子分布

表 3.3.1-1 给出了根据图 3.3.1-1 积分得到的中子场分布。

表 3.3.1-1 400MeV/u 的 ^{12}C 与厚 Cu 靶的中子产额 Y，(单位：n sr^{-1} $particles^{-1}$)

	0°	30°	60°	90°
>100MeV	9.33E+00	3.98E-01	2.51E-03	1.32E-04
50<En<100MeV	9.94E-01	3.35E-01	1.79E-01	1.47E-01
10<En<50MeV	3.29E-01	2.09E-01	1.48E-01	1.40E-01
<10MeV	3.57E-02	4.54E-02	5.62E-02	6.69E-02
Total	1.03E+01	6.33E-01	1.82E-01	1.47E-01

采用 FLUKA 程序，根据常用到的靶和重离子治癌的实际情况，我们选择 Cu，H_2O 作为靶体材料。次级中子的产额会随靶的厚度变化而变化，这是由于高能中子在物质传输过程有个增殖因子，因此在选择靶的厚度时，选取比离子射程稍微大一些作为靶的厚度。

蒙特卡罗计算结果如图 3.3.1-2 至图 3.3.1-4 所示：

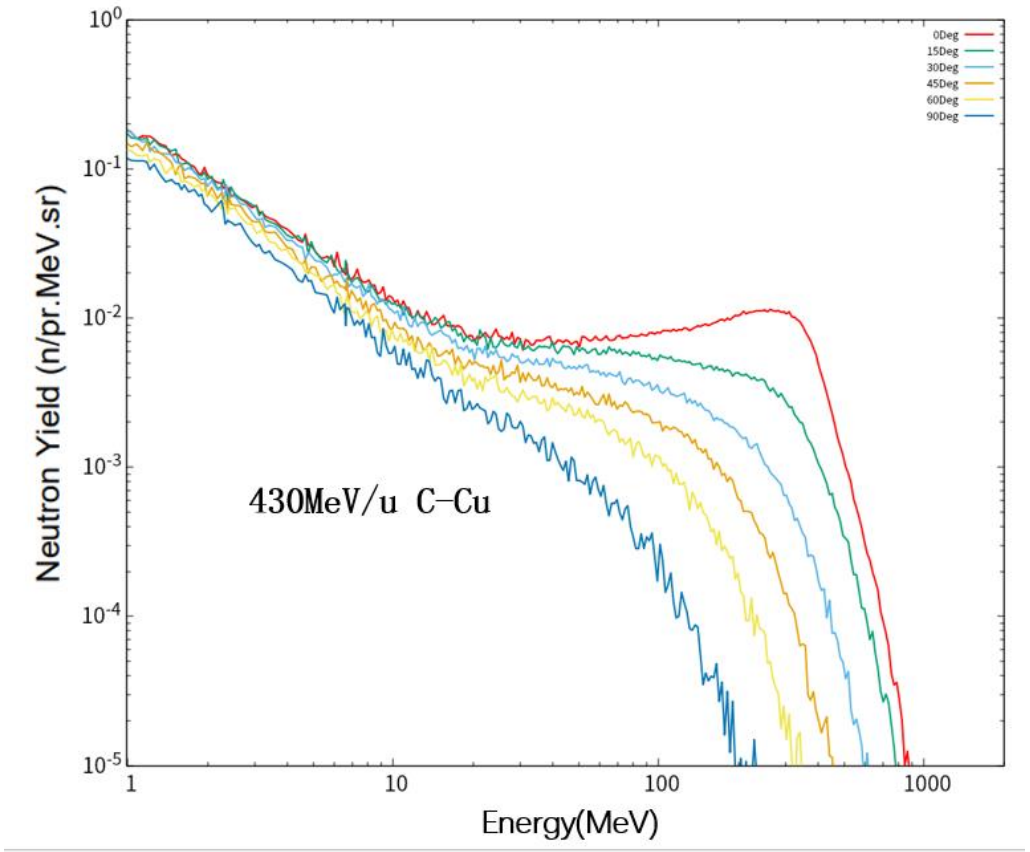


图 3.3.1-2 430MeV/u C 打 Cu 中子辐射场

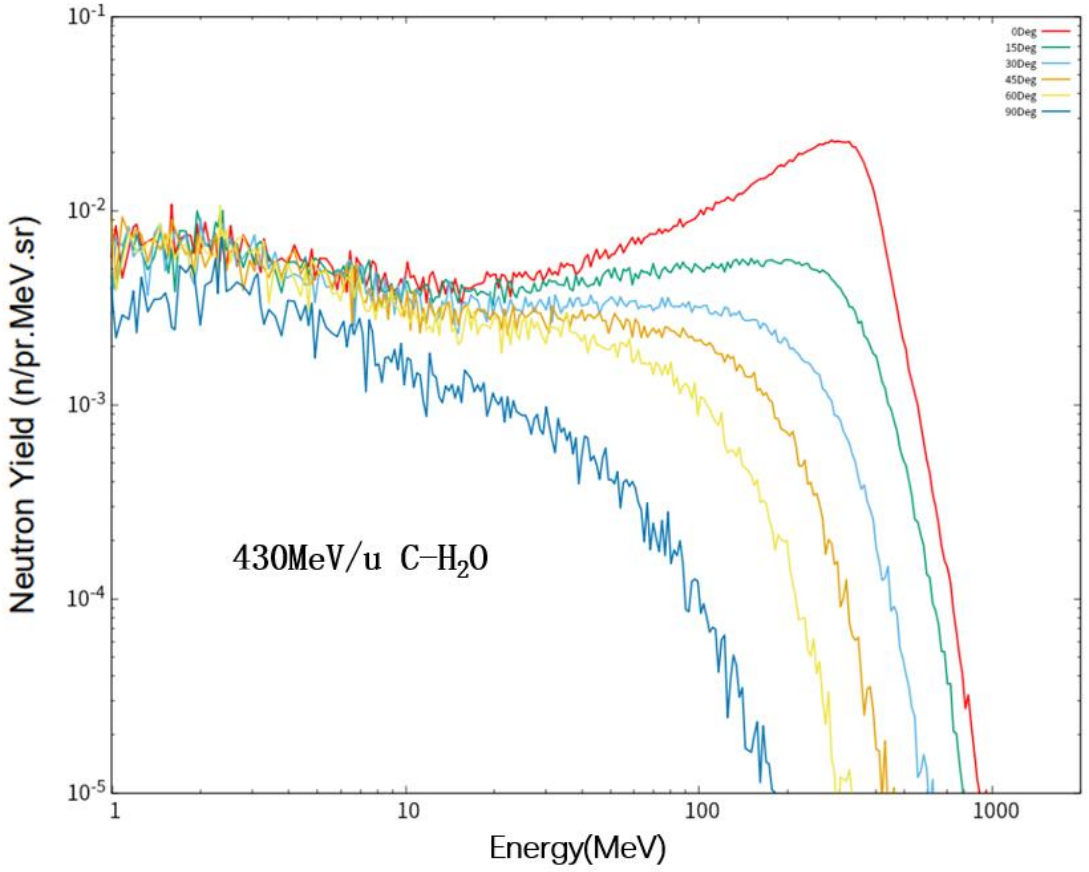


图 3.3.1-3 430MeV/u C 打 H_2O 中子辐射场

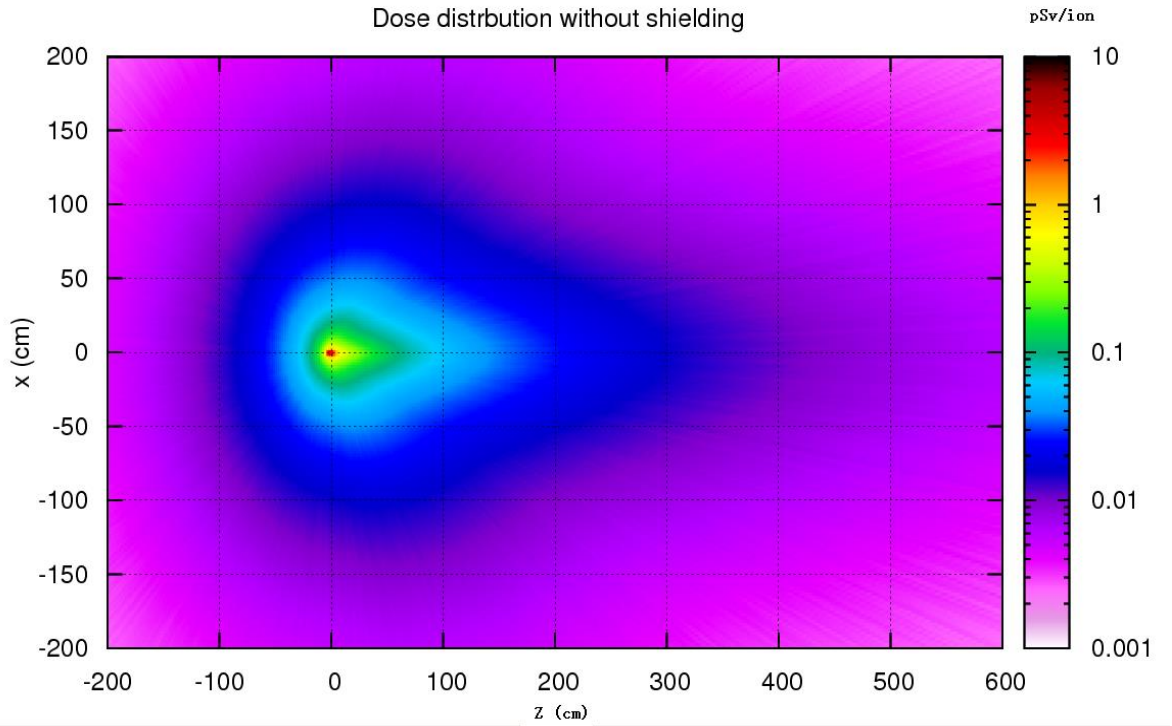


图 3.3.1-4 430MeV/u C 打厚 Cu 靶周围无屏蔽时周围剂量分布

3.3.1.1.2.3 光子能谱

以碳离子为例，本次评价利用 FLUKA 程序模拟了 430MeV/u 碳离子打铁靶和水靶产生的光子能谱，如图 3.3.1-5 和图 3.3.1-6。从角分布来看，光子几乎是各向同性的。

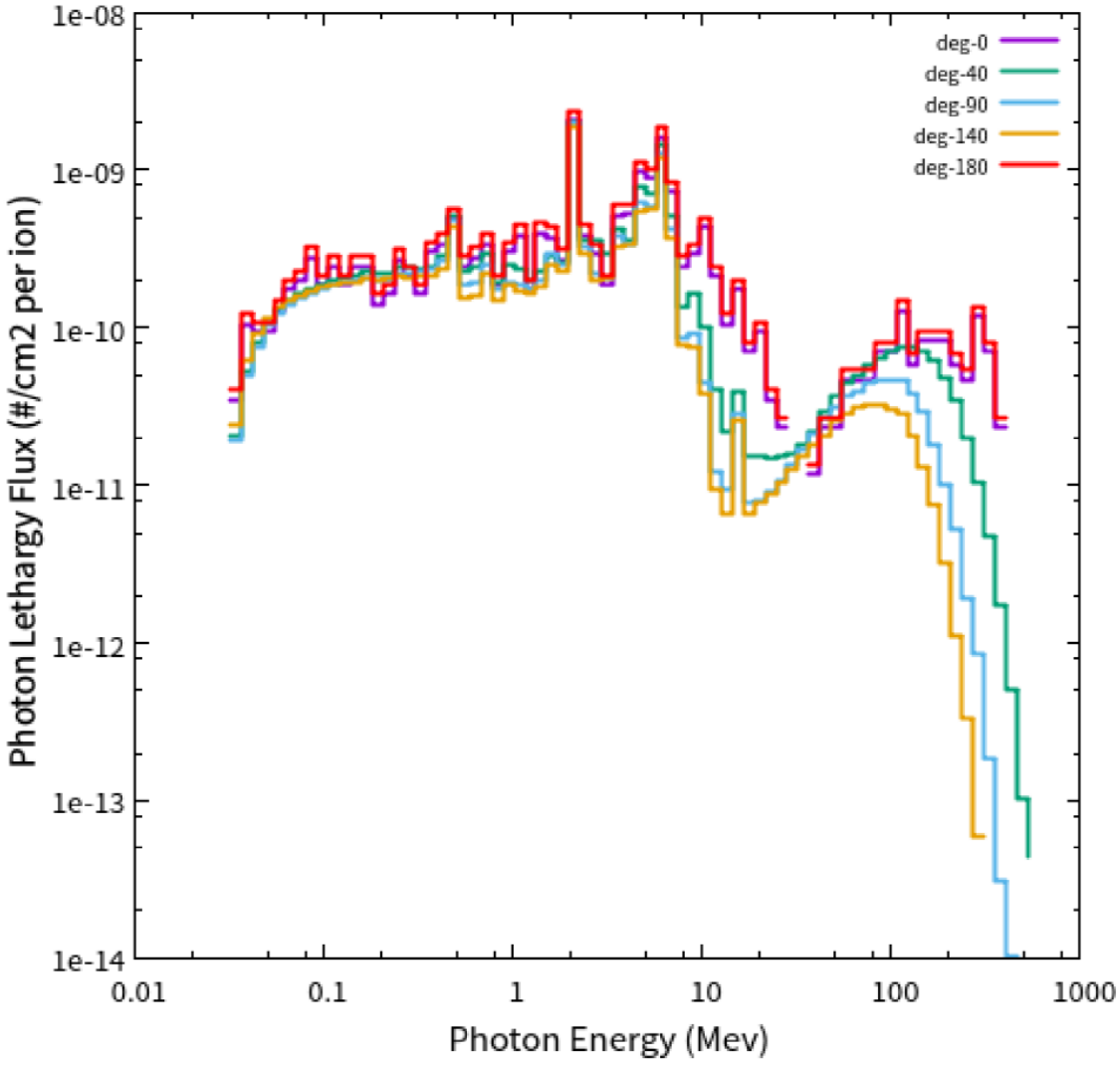


图 3.3.1-5 430MeV/u 碳离子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

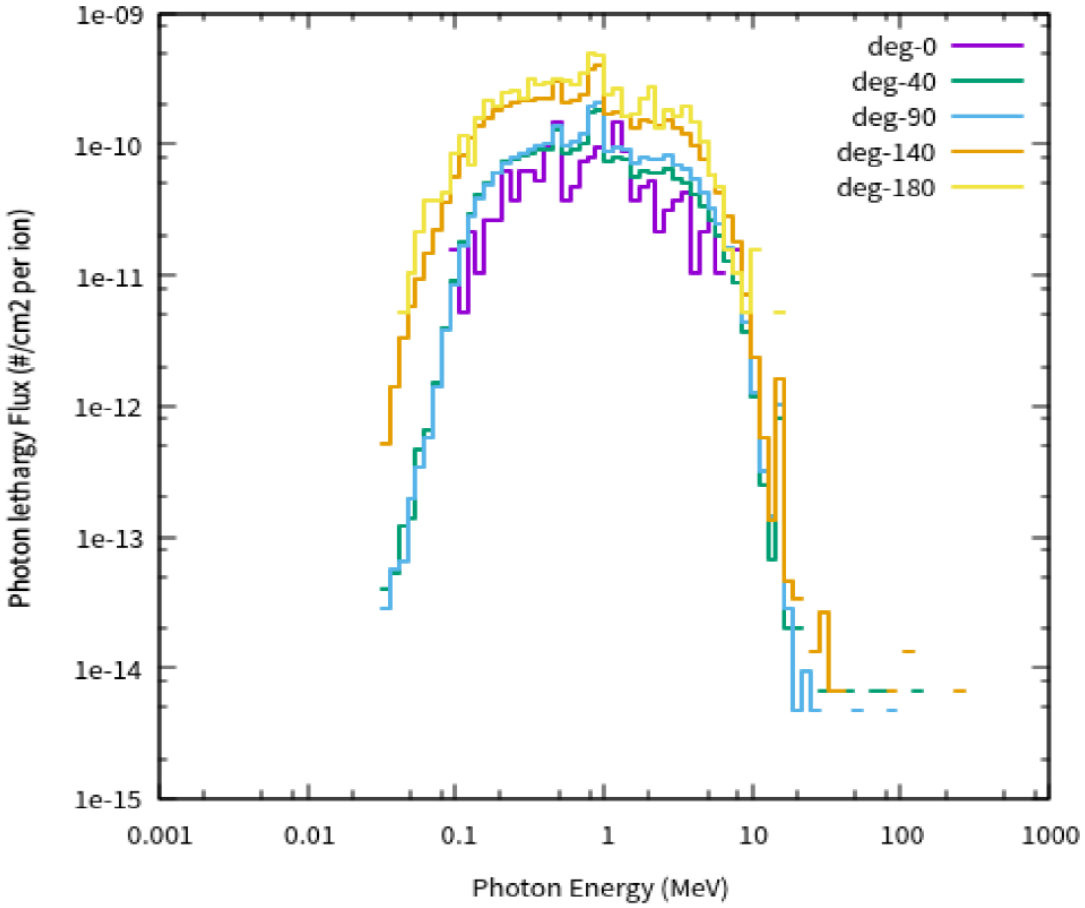


图 3.3.1-6 430MeV/u 碳离子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

3.3.1.1.3 各环节束流损失分析

束流在产生、输运、注入、加速、引出及治疗过程中，会不可避免地出现束流损失，从而产生次级辐射。根据建设单位和设备厂家提供的资料可知，本项目质子重离子一体化治疗系统调试和正常运行期间，束流将主要损失点位及参数如表 3.3.1-2~表 3.3.1-4 所示。由于经过计算验证，重离子在注入、加速、引出及终端损失所需的屏蔽厚度大于质子在注入、加速、引出及终端损失屏蔽厚度，因此本项目屏蔽验证均以重离子为例。分析可知，高能段各损失点上的射线能量远高于其余各点，因此辐射防护验证时主要考虑高能段的辐射屏蔽加速器产生的束流。

表 3.3.1-2 各阶段束流损失参数（碳离子/氧离子）

	束流强度 (ppm)	传输效率	束流损失 (ppm)	能量	损失方式	靶材料
同步环注入线	6.02E+10	95%	3.01E+09	7MeV/u	均匀损失	不锈钢
同步环环口	5.72E+10	40%	3.43E+10	7MeV/u	集中损失	不锈钢

同步环全环俘获	2.29E+10	54.60%	1.04E+10	7MeV/u	均匀损失	不锈钢
同步环全环加速	1.25E+10	90%	1.25E+09	430MeV/u	均匀损失	不锈钢
慢引出	1.12E+10	90%	1.12E+09	430MeV/u	集中损失	不锈钢/铜
高能线	1.01E+10	89%	1.11E+09	430MeV/u	均匀损失	不锈钢
终端	9.00E+09	0	9.00E+09	430MeV/u	集中损失	水/组织等效材料

表 3.3.1-3 各阶段束流损失参数（质子）

	束流强度(ppm)	传输效率	束流损失(ppm)	能量	损失方式	靶材料
同步环注入线	1.34E+12	95%	6.69E+10	7MeV	均匀损失	不锈钢
同步环环口	1.27E+12	40%	7.62E+11	7MeV	集中损失	不锈钢
同步环全环俘获	5.08E+11	54.60%	2.31E+11	230MeV	均匀损失	不锈钢
同步环全环加速	2.77E+11	90%	2.77E+10	230MeV	均匀损失	不锈钢
慢引出	2.50E+11	90%	2.50E+10	230MeV	集中损失	不锈钢/铜
高能线	2.25E+11	89%	2.47E+10	230MeV	均匀损失	不锈钢
终端	2.00E+11	0	2.00E+11	230MeV	集中损失	水/组织等效材料

表 3.3.1-4 各阶段束流损失参数（氦离子）

	束流强度(ppm)	传输效率	束流损失(ppm)	能量	损失方式	靶材料
同步环注入线	4.01E+11	95%	2.01E+10	7MeV/u	均匀损失	不锈钢
同步环环口	3.81E+11	40%	2.29E+11	7MeV/u	集中损失	不锈钢
同步环全环俘获	1.52E+11	54.60%	6.92E+10	230MeV/u	均匀损失	不锈钢
同步环全环加速	8.32E+10	90%	8.32E+09	230MeV/u	均匀损失	不锈钢
慢引出	7.49E+10	90%	7.49E+09	230MeV/u	集中损失	不锈钢/铜
高能线	6.74E+10	89%	7.42E+09	230MeV/u	均匀损失	不锈钢
终端	6.00E+10	0	6.00E+10	230MeV/u	集中损失	水/组织等效材料

备注：ppm 为一分钟粒子数，加速器每分钟配送的粒子数是固定的

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，部分辐射将又回到地面。

本项目质子重离子机房为四层结构，拟建于重离子质子中心的负一层、一层、二层和三层，机房顶棚采用混凝土屏蔽，顶棚上方为不上人屋面。根据后文“5.2 正常运行下的环境影响”，质子重离子放射治疗系统运行时，重离子质子中心顶棚处的最大剂量率满足屏蔽体外剂量率控制水平要求，天空反散射造成的辐射影响将会更小。

3.3.1.3 感生放射性

质子重离子放射治疗系统的感生放射性主要是质子重离子束流与设备部件相互作用产生的感生放射性和质子重离子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。

质子重离子放射治疗系统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，需要进入质子重离子机房内工作的辐射工作人员，这种情况下，工作人员会受到质子重离子放射治疗系统周边空气、冷却水、结构部件、模体的感生放射性影响。大部分感生都是束流产生中子，中子再去发生反应，所以跟入射束流种类有关系，但是区别不大。且本项目氧离子和氦离子仅作科研，使用频率较小，而碳离子比氢离子有更好的布拉格峰，更好的剂量分布，正常情况下能使用碳离子治疗就不会使用质子，故本项目感生放射性以碳离子为例。

对于地下水和土壤，粒子加速器常常不被认为是环境的潜在污染物。实际上，与反应堆相比，加速器产生放射性的能力是相当弱的。如果通过合适的地基厚度将进入到土壤或地下水中的粒子通量降到很低的水平，则加速器对土壤和地下水的活化可以降到可以忽略的水平。据文献《恒健质子重离子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。根据后文“5.2 正常运行下的环境影响”，质子重离子放射治疗系统运行时，地坪外表面与土层接触的边界处最大剂量率为 442.9μSv/h 远小于 5000μSv/h，因此本项目质子重离子放射治疗系统运行可忽略土壤和地下水的感生放射性，故不对其进行分析评价。

此外，考虑到每次治疗任务结束后，短时间可能进入质子重离子机房的治疗技师

对治疗结束后的患者进行解除摆位操作时可能受到照射，本报告对质子重离子机房内患者的感生放射性进行了分析计算。

综上所述，本报告主要对质子重离子放射治疗系统周边空气、冷却水、结构部件、模体和治疗室内患者的感生放射性进行分析评价。

3.3.1.3.1 感生放射性气体

质子重离子放射治疗系统运行期间产生的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 ^{3}H、^{7}Be、^{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 ^{3}H 和 ^{7}Be，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，具体见下表。

表 3.3.1-5 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）和（γ，αn）	0.7
		N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	（γ，T）和（γ，αn）	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 感生放射性气体静态饱和浓度

本报告利用 FLUKA 计算了无通风的情况下，质子重离子系统运行 260 天后，质子重离子机房内感生放射性气体静态饱和活度，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（430MeV）和最高损失流强为依据进行保守估算。计算结果列于下表。

表 3.3.1-6 无通风的情况下质子重离子机房内感生放射性气体静态饱和活度

区域	核素	静态饱和活度浓度，Bq/m^3
科研室、治疗室 1-4	^{11}C	5.79E+02
	^{13}N	5.42E+02
	^{15}O	3.95E+02
	^{41}Ar	6.98E+01
同步环大厅、高能线水平区、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域	^{11}C	1.73E+01
	^{13}N	2.31E+01
	^{15}O	1.27E+01
	^{41}Ar	1.28E+01
注：①科研室和治疗室 1-4 静态饱和活度浓度以体积最小的治疗室 1 估算。 ②同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域保守以考虑所有束流强度都损失于同步环大厅和高能线水平区域来计算。		

3.3.1.3.1.2 考虑通风的情况下，感生放射性气体动态饱和活度

质子重离子放射治疗系统运行期间，机房内一直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。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} C_{sat} \qquad （式 3-1）$$

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饱和浓度，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静态饱和浓度，Bq/m^3；

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

r_1 为正常运行时房间内的换气次数，s^{-1}；

（一）各参数的取值

（1）λ

λ 计算结果如下表所示。

表 3.3.1-7 放射性核素衰变常数计算结果

放射性核素	$T_{1/2}$，s	λ，s^{-1}
^{11}C	1.22E+03	5.68E-04

^{13}N	6.00E+02	1.16E-03
^{15}O	1.26E+02	5.50E-03
^{41}Ar	6.48E+03	1.07E-04

（2）r_1

根据建设单位提供的资料，质子重离子机房各区域的通风换气设计情况为科研室、治疗室内不小于 4 次/h（4/3600=1.11E-03s^{-1}），其他区域不小于 0.5 次/h（0.5/3600=1.39E-04s^{-1}）。具体通风系统设计情况见“4.1.2.3 通排风系统”的描述。

（二）计算结果

利用式3-1可计算得出考虑通风的情况下，质子重离子机房内感生放射性气体的动态饱和浓度。具体结果如下表所示。

表 3.3.1-8 考虑通风的情况下质子重离子机房内感生放射性气体的动态饱和浓度

核素	感生放射性气体的动态饱和浓度，Bq/m^3	
	同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域	科研室、治疗室 1-4
^{11}C	1.39E+01	1.96E+02
^{13}N	2.06E+01	2.77E+02
^{15}O	1.24E+01	3.29E+02
^{41}Ar	5.55E+00	6.14E+00

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”，质子重离子放射治疗系统运行期间和停机通风期间向周围环境排放的感生放射性气体总活度可由下式计算。

$$Q_t = \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat}\left(1-e^{-(\lambda+r_1)t}\right) R_t\, dt = \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t \int_0^t \left(1-e^{-(\lambda+r_1)t}\right) dt =$$

$$\frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t \left(t - \frac{1}{\lambda+r_1} + \frac{e^{-(\lambda+r_1)t}}{\lambda+r_1}\right)$$

（式 3-2）

$$Q_{t_c} = \int_0^{t_c} C_{t_c} R_{t_c} dt = \int_0^{t_c} C_t e^{-(\lambda+r_2)t_c} R_{t_c} dt = C_t R_{t_c} \int_0^{t_c} e^{-(\lambda+r_2)t_c} dt$$

$$= C_t R_{t_c} \frac{1-e^{-(\lambda+r_2)t_c}}{\lambda+r_2}$$

（式 3-3）

式中，Q_t 和 Q_{tc} 分别为质子重离子放射治疗系统运行 t 时间和停机排放 tc 时间向周围环境排放的感生放射性气体的总活度，Bq；本项目设备最大运行时间见表 3.4.1-2，

同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域每年运行通风时间均保守按取2620h，科研室和治疗室1-4每年运行通风时间均保守取602h，取质子重离子放射治疗系统治疗时间为10小时/天，则每年停机通风时间保守取1998h。

R_t和R_{tc}分别为质子重离子放射治疗系统正常运行和停机通风状态下的通风速率，m^3/h；

由此可计算得出质子重离子放射治疗系统运行和停机期间每年排入环境的感生放射性气体总量和年均排放速率，具体结果如下表所示。

表3.3.1-9质子重离子系统运行和停机期间每年排入环境的感生放射性气体总量和排放速率

区域	核素	年排放量，Bq	年平均排放速率，Bq/s
科研室、治疗室1-4	^{11}C	1.30E+09	5.99E+02
	^{13}N	1.83E+09	8.46E+02
	^{15}O	2.18E+09	1.01E+03
	^{41}Ar	4.24E+07	1.96E+01
	总计	1.07E+09	2.47E+03
同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域	^{11}C	1.25E+08	1.33E+01
	^{13}N	1.86E+08	1.97E+01
	^{15}O	1.12E+08	1.19E+01
	^{41}Ar	5.04E+07	5.34E+00
	总计	4.74E+08	5.02E+01

本项目拟在重离子治疗中心楼顶废气排放口设置活性炭过滤装置，一般一年更换一次，每年产生约10kg的活性炭滤材等。

3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

本项目质子重离子一体化治疗系统拟设置独立的主冷却水回路，分别冷却同步加速器、束流线上的磁体等需冷却的设备和部件。其中只有用于冷却同步加速器和高能线爬升区上磁铁的冷却水，可能受到束流损失处产生的中子照射而被活化。

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^{16}O发生散裂反应，主要产生^{3}H、^{7}Be、^{11}C、^{13}N、^{15}O等放射性核素，各放射性核素的参数见下表。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^{3}H和^{7}Be。

表3.3.1-10 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}	生成核反应	反应截面，mb

^{3}H	12.3a	1.78E-09	（n，sp）	33
^{7}Be	53.1d	1.51E-07	（n，sp）	9.3
^{11}C	20.4min	5.67E-04	（n，sp）	10
^{13}N	9.97min	1.16E-03	（n，sp）	5
^{15}O	2.04min	5.67E-03	（n，sp）	28
注：反应截面数据取自 IAEA 技术报告系列 NO.283 号报告。				

本报告利用FLUKA程序对加速器冷却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）束流损失：同步加速器处损失束流能量为430MeV，损失流强为0.017nA；

（2）模型简化：加速器的冷却水主要用于冷却微波系统和电磁偏转系统，微波系统中束流的能量还十分的低，因此主要考虑电磁偏转系统中的冷却水感生放射性。详细的模拟冷却水的结构比较困难，但考虑到束流在偏转磁铁上的运动轨迹，我们可以做一个理想的，保守的简化，将束流以一个非常小的角度损失在铁块上（图中右侧部分）来模拟束流在偏转磁铁上的损失，磁铁背后紧贴一层水模，用于模拟冷却水流经偏转磁铁的情形。

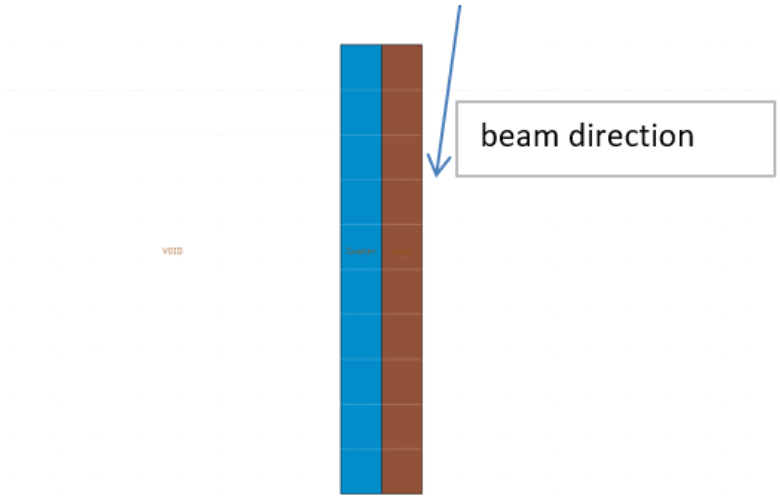


图 3.3.1-7 冷却水活化计算模型

（3）保守取质子重离子放射治疗系统连续出束2620h。

计算结果列于下表。

表 3.3.1-11 冷却水感生放射性计算结果

核素	饱和活度，Bq	饱和浓度，Bq/L	单次排放限值 $1ALI_{min}$，Bq	单月排放限值 $10ALI_{min}$，Bq	豁免活度，Bq	豁免活度浓度，Bq/g
^{3}H	2.23E+05	5.18E+01	1.11E+09	1.11E+10	1E+09	1.0E+06
^{7}Be	2.63E+06	6.13E+02	3.85E+08	3.85E+09	1E+07	1.0E+03

总计	2.85E+06	6.65E+02	/	/	/	/

由上表可知冷却水中 ^{3}H 和 ^{7}Be 的感生放射性远低于其单次排放限值 1 ALI_{min}、单月排放限值 10ALI_{min}、豁免活度和豁免活度浓度。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修或发生冷却水泄漏事故时才需要排放，本项目冷却水最大排放量约 4.3m^3。本项目质子重离子机房内拟设置 4 个事故收集池（其中两个有效容积为 11.7m^3，一个有效容积为 9m^3，一个有效容积为 8.7m^3），总有效容积为 41.1m^3，活化废液经衰变后排放。排放前取样监测，满足排放标准后排入医院污水管网。

此外，活化冷却水循环过程会使用离子交换树脂过滤进行过滤处理，该过滤树脂一般 1~3 年更换一次，全部过滤树脂重量约 200kg，则每年产生约 200kg 的废树脂。

3.3.1.3.3 结构部件的感生放射性

感生放射性主要是一些材料受到初级和次级辐射照射发生活化从而产生一些放射性核素，它们发射γ或β射线。在重离子加速器上，产生的次级中子不论能量如何，都可能使受到中子照射的材料成为感生放射性材料。加速器上可以通过很多种核反应产生感生放射性，例如（γ，n）、（p，xγ）、（n，xp）、（p，pn）、热中子俘获、散裂或碎裂反应等，从而加速器产生的感生放射性核素的活度和半衰期的范围很宽，但是大多数放射性核素的半衰期比较短。

对重离子加速器来说，感生放射性主要是由重离子打靶产生的次级中子引起的。在加速器运行期间，初级粒子或次级粒子与加速器部件、冷却水、加速器室内空气、加速器室内墙壁等相互作用产生感生放射性，其辐射水平取决于加速离子的能量、种类、流强、加速器运行时间、冷却时间和被照材料性质等诸多因素。

在加速器运行期间，由于有足够的结构屏蔽，由部件产生的感生放射性不会危害在屏蔽体外的工作人员。但在加速器停机后，工作人员进入加速器厅、调节实验装置或检修加速器等操作时，则可能受到辐射危害。医用重离子加速器的感生放射性衰变比较快，因此，对感生放射性的有效防护措施之一是等其衰变。

表 3.3.1-12 在加速器周围受辐照的材料中通鉴出来的放射性核素一览表

靶材料	放射性核素	半衰期	靶材料	放射性核素	半衰期
塑料与油	^{7}Be	53.6d	钢	^{54}Mn	300d
	^{11}C	20.4min		^{56}Co	77d
杜拉铝	同上加以下			^{57}Co	270d
	^{18}F	110min		^{58}Co	72d
	^{22}Na	2.60a		^{55}Fe	2.94a

	^{24}Na	15.0h		^{58}Fe	5.1d
钢	同上加以下		不锈钢	同上加以下	
	^{42}K	12.47h		^{60}Co	5.27a
	^{43}K	22.4h		^{57}Ni	37h
	^{44}Sc	3.92h		^{60}Cu	2.4min
	^{44m}SC	2.44d	铜	同上加以下	
	^{46}Sc	83.79d		^{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
	^{51}Cr	27.8d		^{63}Zn	38.3min
	^{52}Mn	5.55d		^{65}Zn	2.5d
	^{52m}Mn	21.3min			

根据厂家的防护设计报告，组成加速器的主要材料为塑料、铝、铁和铜，正常运行情况下，除少数特殊部件（如束流引出、偏转磁极等），大部分加速器结构都不会被长期大束流照射，仅在异常或事故情况下可能发生束流的异常损失，在异常或事故情况下，束流一般会被引导至束流闸（beam stopper）上损失，束流闸的主要成分为铜，已知每个治疗室前至少会设置 1 个束流闸，那么保守估计一个治疗室每年 1/10 的照射时间是事故或异常照射，那每个束流闸的使用时间为总时间的十分之一，其他结构的受照时间难以估算，但一般不会比束流闸更长，因此也已这个时间来估计其感生放射性，利用 FLUKA 程序计算了主要束流损失点的感生放射性，计算时所用参数如下：

运行工况：铁保守取质子重离子放射治疗系统连续出束 2620h，其他感生部件连续出束 60.2h；

束流参数：能量为 430MeV/u，束流损失为 0.14nA；

模型简化：以最大束流轰击不同加速器材料的厚靶（靶的厚度大于该粒子在靶中的射程）上来进行感生放射性分析。

各结构部件感生放射性活度的计算结果见表 3.3.1-13~表 3.3.1-15。由此可知，结构部件感生放射性水平较低，多数核素的活度均低于其豁免活度，停机后 1h 感生放射性主要来自 ^{3}H、^{7}Be、^{32}P、^{46}Sc、^{47}Sc、^{48}V、^{51}Cr、^{52}Mn、^{54}Mn、^{55}Fe、^{59}Fe、^{56}Co 等中长寿命放射性核素。

表 3.3.1-13 铁的感生放射性模拟计算结果

核素	活度值，Bq				豁免活度，Bq
	冷却 1 小时	冷却 1 天	冷却 1 月	冷却 1 年	
^{3}H	1.38E+05	1.38E+05	1.37E+05	1.30E+05	1E+09
^{7}Be	3.17E+05	3.13E+05	2.15E+05	2.75E+03	1E+07
^{22}Na	3.88E+03	3.87E+03	3.79E+03	2.97E+03	1E+06
^{24}Na	3.19E+04	1.10E+04	——	——	1E+05

^{32}P	1.18E+05	1.13E+05	2.76E+04	1.26E+01	1E+05
^{33}P	6.37E+04	6.21E+04	2.81E+04	2.94E+00	1E+08
^{35}S	4.33E+04	4.29E+04	3.41E+04	2.40E+03	1E+08
^{37}Ar	1.60E+05	1.57E+05	8.82E+04	1.17E+02	1E+08
^{42}K	8.54E+04	2.36E+04	5.20E+01	5.10E+01	1E+06
^{43}K	3.84E+04	1.88E+04	——	——	1E+06
^{45}Ca	2.81E+04	2.79E+04	2.47E+04	5.99E+03	1E+07
^{43}Sc	1.52E+05	2.53E+03	——	——	——
^{44}Sc	5.69E+05	2.53E+05	6.51E+02	5.77E+02	——
^{46}Sc	2.53E+05	2.51E+05	1.98E+05	1.24E+04	1E+06
^{47}Sc	1.90E+05	1.56E+05	5.10E+02	——	1E+06
^{48}Sc	4.88E+04	3.39E+04	5.40E-01	——	1E+05
^{45}Ti	3.62E+05	2.05E+03	——	——	——
^{48}V	1.89E+06	1.81E+06	5.15E+05	2.50E-01	1E+05
^{49}V	6.78E+05	6.77E+05	6.38E+05	3.21E+05	——
^{48}Cr	6.82E+04	3.25E+04	——	——	——
^{51}Cr	5.34E+06	5.21E+06	2.52E+06	5.77E+02	1E+07
^{52}Mn	1.73E+06	1.54E+06	4.23E+04	——	1E+05
^{54}Mn	2.40E+06	2.39E+06	2.24E+06	1.07E+06	1E+06
^{56}Mn	2.19E+06	4.53E+03	——	——	1E+05
^{52}Fe	6.73E+04	9.80E+03	——	——	1E+06
^{55}Fe	1.60E+06	1.60E+06	1.57E+06	1.24E+06	1E+06
^{55}Co	9.23E+04	3.72E+04	——	——	1E+06
^{56}Co	2.48E+05	2.45E+05	1.89E+05	9.37E+03	1E+05
^{57}Co	2.14E+04	2.13E+04	1.98E+04	8.43E+03	1E+06
^{58}Co	7.71E+03	7.66E+03	5.77E+03	2.17E+02	1E+06
总计	1.89E+07	1.52E+07	8.50E+06	2.81E+06	——

表 3.3.1-14 塑料感生放射性模拟计算结果

核素	活度值，Bq				豁免活度，Bq
	冷却 1 小时	冷却 1 天	冷却 1 月	冷却 1 年	
^{3}H	9.06E+03	9.06E+03	9.02E+03	8.57E+03	1.00E+09
^{7}Be	2.42E+05	2.39E+05	1.64E+05	2.10E+03	1.00E+07
^{14}C	2.37E+06	——	——	——	1.00E+07
总计	2.62E+06	2.48E+05	1.73E+05	1.07E+04	——

表 3.3.1-15 铜感生放射性模拟计算结果

核素	活度值，Bq				豁免活度，Bq
	冷却 1 小时	冷却 1 天	冷却 1 月	冷却 1 年	
^{3}H	2.86E+04	2.86E+04	2.85E+04	2.70E+04	1E+09
^{7}Be	9.53E+04	9.41E+04	6.45E+04	8.27E+02	1E+07
^{22}Na	4.71E+02	4.70E+02	4.60E+02	3.61E+02	1E+06

^{24}Na	1.82E+05	6.26E+04	——	——	1E+05
^{32}P	6.50E+04	6.21E+04	1.52E+04	1.55E+00	1E+05
^{33}P	2.20E+04	2.14E+04	9.68E+03	1.01E+00	1E+08
^{35}S	6.23E+03	6.19E+03	4.92E+03	3.46E+02	1E+08
^{37}Ar	2.92E+04	2.87E+04	1.61E+04	2.14E+01	1E+08
^{42}K	3.03E+05	8.33E+04	7.13E+00	6.99E+00	1E+06
^{43}K	1.60E+05	7.84E+04	——	——	1E+06
^{45}Ca	1.29E+04	——	——	——	1E+07
^{43}Sc	3.63E+03	——	——	——	——
^{44}Sc	3.22E+03	3.21E+03	2.84E+03	6.87E+02	——
^{46}Sc	1.64E+04	1.42E+04	1.68E+02	——	1E+06
^{47}Sc	3.58E+05	5.95E+03	——	——	1E+06
^{48}Sc	9.32E+05	2.98E+05	1.05E+02	2.82E+01	1E+05
^{48}V	2.18E+04	2.16E+04	1.70E+04	1.06E+03	1E+05
^{49}V	2.49E+05	2.07E+05	1.02E+03	——	——
^{48}Cr	1.29E+05	8.99E+04	1.43E+00	——	——
^{51}Cr	2.90E+05	2.81E+05	8.07E+04	——	1E+07
^{52}Mn	2.46E+04	2.46E+04	2.32E+04	1.17E+04	1E+05
^{54}Mn	9.65E+04	4.61E+04	——	——	1E+06
^{56}Mn	4.18E+05	4.09E+05	1.98E+05	4.53E+01	1E+05
^{52}Fe	5.19E+05	4.65E+05	1.28E+04	——	1E+06
^{55}Fe	5.73E+04	5.71E+04	5.36E+04	2.55E+04	1E+06
^{59}Fe	1.85E+06	3.82E+03	——	——	1E+06
^{55}Co	7.41E+04	1.08E+04	——	——	1E+06
^{56}Co	3.20E+04	3.23E+04	3.19E+04	2.53E+04	1E+05
^{57}Co	4.35E+04	4.28E+04	2.73E+04	1.48E+02	1E+06
^{58}Co	7.31E+05	2.94E+05	——	——	1E+06
^{60}Co	1.74E+05	1.72E+05	1.34E+05	6.66E+03	1E+05
^{56}Ni	1.74E+05	1.74E+05	1.64E+05	6.96E+04	——
^{57}Ni	7.08E+05	7.67E+05	5.88E+05	2.22E+04	——
^{63}Ni	1.52E+04	1.52E+04	1.50E+04	1.33E+04	1E+08
^{61}Cu	2.70E+04	2.41E+04	8.00E+02	——	——
^{62}Cu	5.48E+05	3.50E+05	——	——	——
^{64}Cu	2.59E+03	2.59E+03	2.59E+03	2.57E+03	1E+06
^{66}Cu	3.33E+07	2.79E+05	——	——	——
^{67}Cu	2.87E+06	1.74E+05	——	——	——
^{62}Zn	1.19E+08	3.39E+07	——	——	——
^{65}Zn	5.18E+03	4.38E+02	——	——	1E+06
^{66}Ga	1.86E+03	1.44E+03	5.89E-01	——	——
^{67}Ga	9.72E+05	1.71E+05	——	——	——
^{68}Ga	7.45E+03	7.43E+03	6.84E+03	2.64E+03	——
^{66}Ge	3.52E+04	6.64E+03	——	——	——
^{69}Ge	1.42E+04	1.16E+04	2.44E+01	——	——

^{71}As	7.96E+03	7.57E+01	7.02E+01	2.98E+01	——
^{72}As	1.24E+03	1.07E+00	——	——	——
总计	1.65E+08	3.88E+07	1.50E+06	2.10E+05	——

3.3.1.3.4 科研室和治疗室内患者的感生放射性

本项目质子重离子放射治疗系统每小时治疗 3 个患者，因此平均每 20min 内都需要对患者进行摆位/解除摆位一次。由于解除摆位时，治疗技师处于质子重离子机房内且近距离接触刚受到照射的患者，因此需计算分析此时质子重离子机房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质子重离子机房内对患者解除摆位，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。

3.3.1.3.4.1 计算条件

质子重离子机房内由于照射患者所致感生放射性强度的计算条件如下：

（1）采用最保守的束流条件：束流能量最高 430MeV，患者处的损失流强 0.14nA，连续治疗 3min。

（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，列于下表，靶的尺寸近似取直径 30cm、长度 35cm 的圆柱体。

表 3.3.1-16 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

3.3.1.3.4.2 单次治疗后治疗室内剩余剂量率

结合实际治疗情况，以最保守的治疗条件 430MeV/0.14nA 的束流连续治疗 3min，假设患者不移动，计算了停机 1min、2min、5min、10min 时刻治疗室内剩余剂量率分布。计算结果列于下表。

表 3.3.1-17 患者感生放射性剂量率随停机时间的变化，μSv/h

停机时间	**距靶（患者）50cm 处**	**距靶（患者）100cm 处**
1min	6.379	2
2min	4.636	1.453
5min	2.105	0.659
10min	0.897	0.276

由此可知，以 430MeV/0.14nA 连续治疗 3min，治疗结束 1min 后，若患者不移动，质子重离子机房内距患者 50cm 处的剂量率最高可达 6.379μSv/h，距患者 100cm 处的剂量率最高可达 2μSv/h；停机 10min 后，距患者 50cm 处剂量率降至 0.897μSv/h，距患者 100cm 处剂量率降至 0.276μSv/h。

3.3.1.3.5 模体的感生放射性

本项目涉及模体主要有两种，第一种模体是人体仿真模体，计划验证中利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行人体仿真模体（一般为等效水模体）模拟治疗。由于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，且计划验证采用的人体仿真模体与患者组成配比相似，故人体仿真模体的感生放射性参考“3.3.1.3.4 治疗机房内患者的感生放射性”。

第二种模体是 QA（质量保证）期间，每日利用模体（一般为三维水箱）对质子重离子放射治疗系统进行剂量学部分的检测。本项目利用 FLUKA 程序计算了三维水箱内部的去离子水和外部箱体的感生放射性，计算时所用参数如下：

（1）束流参数：能量为 430MeV，束流损失为 0.14nA；

（2）水箱尺寸和材质：尺寸为 500mm×500mm×400mm，箱体内部为去离子水，外部材料为 PMMA（有机玻璃）。

（3）照射时间为 3min。

表 3.3.1-18 三维水箱不同距离处剂量率随时间的变化，μSv/h

停机时间	**距水箱 50cm 处**	**距水箱 100cm 处**
0min	14.291	5.017
1min	7.966	2.421

2min	6.01	1.828
5min	3.052	0.921
10min	1.557	0.461

由上表可知，停机时刻水箱表面剂量率水平较高，停机 10min 后，水箱表面剂量率大幅度降低。

综上所述，在 QA 完成后，辐射工作人员有必要利用辐射监测仪测得水箱表面 30cm 处剂量率不高于 2.5μSv/h，再进入质子重离子机房开展后续工作。

3.3.1.4 臭氧等有害气体的产生

科研室及各治疗室、加速器大厅等场所的空气在电离辐射作用下可能会产生少量臭氧、氮氧化物等污染空气的有害气体。对于本项目加速器，其次级辐射场主要为中子和少量光子，中子场不会引起空气电离在光子的作用下，空气中的氧分解成自由基，氧自由基与空气中的氧气作用生成臭氧、氮氧化物等有害气体，因此，臭等有害气体的产生主要是空气受光子辐照所致。

参考《高等电离辐射防护教程》（夏益华，哈尔滨工程大学出版社）P10 公式 2.17，带电粒子辐射能量损失率即韧致辐射产生率与粒子质量的平方成反比，故粒子质量越大，其韧致辐射产生率越小。对质子重离子放射治疗系统而言，其辐射场主要为中子辐射，光子产额很小，且 C 粒子的质量比电子高 4~5 个量级，质子的质量比电子的质量高 3 个量级，其韧致辐射产额也比电子加速器韧致辐射产额低的多。因此，与电子加速器相比，重离子加速器运行时所致臭氧、氮氧化物的产生量也很小，可以不用考虑。

同时，根据《三种电子加速器产生的臭氧危害分析》（中国辐射卫生 2020 年 6 月第 29 卷第 3 期），常见束流损失情况下，500MeV 高能电子直线加速器 6GeV 同步加速器运行期间按照 1 次 h 的通风换气次数，产生的饱和臭氧浓度为（2.21×10^{-5}~5.89×10^{-3})mg/m^3。根据该估算结果可推测，高能电子直线加速器同步加速器在运行期间，臭氧排放浓度将远低于《环境空气质量标准》(GB3095-2012)及其修改单中二级标准限值(1 小时平均限值 200μg/m^3)。

综上所述，本项目质子重离子放射治疗系统运行时所致 O_3 和 NO_2 的产生量和浓度均很小。

3.3.2 电子直线加速器污染源项描述

（1）正常工况

电子直线加速器运行过程中，高能量的电子线与物质相互作用产生瞬发辐射；产生的这些辐射与周围物质相互作用产生感生放射性，即缓发辐射。前者随着加速器运行产生、停机后消失；后者在加速器停机后仍然存在，且随着加速器运行时间的增加而增加。此外，射线与空气作用引起空气中氧分解生成自由基，产生臭氧和氮氧化物。项目加速器主要技术参数见下表。

表 3.3.2-1 本项目电子直线加速器主要技术参数

参数名称	参数值
加速器型号	未定
射线类型和最大能量	X 射线最大能量：10MV 电子线最大能量：20MeV
CBCT（加速器集成）	最大管电压 150KV/最大管电流 1000mA
X 射线泄漏率	≤0.1%
源轴距 SAD	1m
等中心高度	1.3m
距靶 1m 处常用最高剂量率	常规模式：6/10MV，X 射线最大剂量率：600cGy/min FFF 模式：6MV，X 射线最大剂量率：1400cGy/min 10MV，X 射线最大剂量率：2400cGy/min 电子线治疗模式：最大剂量率≤2400cGy/min
最大照射野大小	40cm*40cm
机架旋转角度	±180°
靶材料	未定

①X 射线

电子直线加速器运行时，从电子枪发出来的电子束，在加速管内经加速电压加速，轰击到钨金靶上，产生 X 射线用于治疗。本项目电子直线加速器 X 射线最大能量为 10MV。由于 X 射线贯穿能力强，将对工作人员、公众及周围环境造成一定的辐射污染，包含以下几种 X 射线辐射：

a 有用线束

当电子直线加速器光阑完全打开时，从辐射头靶射出的 X 射线为一个半角 14°的锥形线束。有用线束是唯一用于治疗目的的射线。

b 泄漏辐射

由靶向外从各个方向穿过辐射头泄漏出来的射线称为漏射线。漏射线遍布机架各处，因此泄漏线辐射源到任一点的距离会因机架角度不同而变化。

c 散射辐射

当有用线束射入治疗床上的人体时，会产生散布于各个方面上的次级散射辐射，这种射线的能量和剂量率比有用线束低得多，剂量率大小决定于被照区域，初级射线能量和散射角度。

②电子线和感生放射性

本项目电子直线加速器产生的电子线，最大能量为 20MeV，随机器的开关而产生和消失。根据《辐射防护手册：辐射源与屏蔽》（第一分册）中 P226 页，绝大数天然核素的（γ，n）反应阈能在 10MeV 以上。电子直线加速器处于电子束治疗模式，电子线最大的能量为 20MeV，电子线与电子直线加速器内部构件和空气作用，使构件激发感生放射性和产生感生放射性核素，如感生放射性核素 ^{15}O、^{13}N 等。一般在正常通风情况下，感生放射性气体不会对辐射工作人员和患者造成危害。

③中子

电子直线加速器在运行过程中产生的高能 X 射线与周围物质相互作用时，会产生中子。电子直线加速器治疗机头外的杂散中子成为直接光中子，来源于 X 射线中能量大于 10MV 的光子与电子直线加速器的靶、准直器及电子束和光子束通道上的其他物质相互作用发生光核反应所产生的中子。

④固体废物

电子直线加速器的金属靶件更换时会有废靶件产生，根据运行经验，约 5 年更换一次，更换工作由厂家完成，由厂家回收；若放射性超标，则委托有资质单位处置。

⑤臭氧和氮氧化物

电子直线加速器在运行过程中，X 射线作用于空气以及次级辐射等因素，可产生少量臭氧及氮氧化物，通过排风系统排入大气。

（2）事故工况

本评价项目使用电子直线加速器射线装置时，可能发生的辐射事故有以下几种：

①电子直线加速器正常工作时，人员误留、误入机房，导致发生误照射；

②电子直线加速器的安全联锁系统失效，装置在机房内部有放射工作人员停留或者机房防护门未关闭的情况下启动出束；

③放射工作人员对电子直线加速器进行误操作或电子直线加速器出现故障导致出束剂量超过放射治疗要求；

④电子直线加速器所在房间的局部屏蔽防护遭受损坏，导致射线泄漏，机房外部

辐射剂量率超标。

事故工况产生的污染因子与正常工况下相同。

3.3.3 模拟定位 CT、滑轨 CT 机和 X 射线管

本项目使用模拟定位 CT、滑轨 CT 机和 X 射线管期间，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。

3.4 工作负荷预估

3.4.1 各设备出束时间

根据建设单位提供的资料，本项目直线加速器和模拟定位 CT 预期运行情况见表 3.4.1-1，质子重离子一体化治疗系统预期运行情况见表 3.4.1-2。

表 3.4.1-1 本项目直线加速器和模拟定位 CT 预期运行情况一览表

分类	每次出束时间	每年治疗/扫描人次	每年的出束时间
直线加速器 1	1.5min	15000	375h
直线加速器 2	1.5min	15000	375h
模拟定位 CT	1min	10000	166.7h

表 3.4.1-2 本项目质子重离子一体化治疗系统预期运行情况一览表

分类	内容	单位	科研室	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3	治疗室 4
质子重离子一体化治疗系统	每小时每室治疗次数	人次/h/室	3	3	3	4	4
	每天每室治疗时间	h/d/室	10	10	10	10	10
	每天每室治疗人次	人次/d/室	30	30	30	40	40
	每室每年治疗天数	d/a/室	260	260	260	260	260
	每人平均治疗次数	次/人	26	26	26	26	26
	每室每年治疗人数	人/室/a	300	300	300	400	400
	每室每年治疗人次	人次/室/a	7800	7800	7800	10400	10400

分类	内容	单位	科研室	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3	治疗室 4
	每人次平均出束时间	min/人次	3	3	3	3	3
	每室每天平均出束时间	h/室/d	1.5	1.5	1.5	2	2
	每室每年治疗出束时间	h/室/a	390	390	390	520	520
	每室每日平均 QA 出束时间	h/室/d	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	每室每周平均 QA 出束时间	h/室/周	1	1	1	1	1
	每室每年 QA 出束时间	h/室/a	52	52	52	52	52
	每室每年治疗计划验证出束时间	h/室/a	2 次/人*3min*300 人/60=30	30	30	40	40
	每室每周治疗+治疗计划验证+QA 出束时间	h/室/a	9.08	9.08	9.08	11.58	11.58
	每室每年治疗+治疗计划验证+QA 出束时间	h/室/a	472	472	472	602	602
	年总出束时间	h/a	2620				
定位 X 射线管	每室每次定位出束时间	s/室/次	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	每室每年最大定位人次数	人次/室/a	7800	7800	7800	10400	10400
	每室每年的出束时间	h/室/a	1.08	1.08	1.08	1.44	1.44
滑轨 CT	每室每次定位出束时间	min/室/次	/	/	/	2	2
	每室每年最大定位人次数	人次/室/a	/	/	/	1600	1600
	每室每年的出束时间	h/室/a	/	/	/	53.3	53.3

3.4.2 治疗涉及辐射工作人员年受照时间

本项目质子重离子拟配备辐射工作人员 52 名（治疗医生 20 人，治疗技师 20 人，物理师 10 人，护士 2 人），其中依托医院现有放疗科 25 名辐射工作人员，新增辐射工作人员 27 名。除上述医院人员外，兰州泰基常驻 15 名维修工程师负责质子重离子放射治疗系统运行期间日常的维护保养、故障维修，不作为医院人员进行管理，其辐射安全与防护培训、个人剂量监测和职业健康管理均由兰州泰基负责，但考虑到维修工程师为本项目射线装置专职驻场维修人员，故保留其受照剂量估算等内容。

本项目每间直线加速器机房配备 2 名技师，2 间加速器机房共配备 2 名医生和 2 名物理师，共 8 名辐射工作人员，均为新增。本项目每间模拟定位 CT 机房配备 2 名技师，2 间模拟定位 CT 机房共 4 名辐射工作人员，均为新增。

表 3.4.2-1 本项目辐射工作人员工作量汇总表

<table>
<tr><td colspan="5">质子重离子</td></tr>
<tr><td>岗位类别</td><td>人数</td><td>工作内容</td><td>工作地点</td><td>年受照时间</td></tr>
<tr><td rowspan="2">治疗医生</td><td rowspan="2">20 人，10 人一组，轮班工作</td><td>诊断、放射治疗方案的确定、治疗效果评定</td><td>办公室和诊室</td><td>不涉及辐射工作</td></tr>
<tr><td>突发状况应急处理</td><td>质子重离子机房</td><td>小于 20h/人</td></tr>
<tr><td rowspan="6">治疗技师</td><td rowspan="6">科研室、每个治疗室 2 人，5 个治疗室共 10 人为一个班次。共两个班次轮岗，共 20 人。</td><td>治疗前摆位</td><td rowspan="2">质子重离子机房</td><td>433.3h/人（2 名治疗技师共同完成一次工作，每次治疗前摆位所需时间为 5min，以治疗人次较多的治疗室 3、4 保守考虑（下同），每年总治疗次数为 10400 人次）</td></tr>
<tr><td>治疗后解除摆位并协助其离开机房</td><td>86.7h/人（1 名治疗技师完成一次工作，治疗后对患者解除摆位并协助其离开机房所需时间为 2min，每年总治疗次数为 10400 人次）</td></tr>
<tr><td>操作质子重离子放射治疗系统出束</td><td rowspan="3">控制台</td><td>260h/人（2 名治疗技师共同完成一次工作，每年总治疗次数为 10400 人次，每次治疗出束 3min）</td></tr>
<tr><td>操作 X 射线管出束</td><td>0.72h/人（2 名治疗技师共同完成一次工作，每年总治疗次数为 10400 人次，每次 X 射线管的出束时间不超过 0.5s）</td></tr>
<tr><td>操作滑轨 CT 机出束</td><td>26.7h/人（2 名治疗技师共同完成一次工作，每年总治疗次数为 1600 人次，每次滑轨 CT 机的总出束时间不超过 2min）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">物理师</td><td rowspan="2">10 人，轮班工作</td><td rowspan="2">治疗前的计划验证</td><td>控制室</td><td>40h/人（患者治疗前的计划验证次数年合计为 800 次，2 名物理师共同完成一次工作，每次计划验证出束 3min）</td></tr>
<tr><td>质子重离子机房内</td><td>18.7h/人（患者治疗前的计划验证次数年合计为 800 次，2 名物理师共同完成一次工作，每次摆位 7min）</td></tr>
</table>

		QA（质量保证）	控制室	52h/人（QA 每年出束 52h，2 名物理师共同完成一次工作）
			质子重离子机房内搬运水箱	11h/人（每次搬运 5min，一年合计 22h，1 名物理师完成一次工作）
护士	2 人，1 人 1 组，轮班工作	患者引导	等候区/导诊台	/
兰州泰基维修工程师	15 人轮班工作	负责质子重离子放射治疗系统运行期间日常的维护保养、故障维修	办公室、质子重离子机房	引用已批复的兰州泰基离子技术有限公司《兰州泰基离子技术有限公司销售(含建造)和使用小型化重离子治疗装置项目环境影响报告书》的评价结论，见表 5.2.3-12。
直线加速器				
岗位类别	人数	工作内容	工作地点	年受照时间
技师	2	操作直线加速器 1	控制室	375h/人（2 名技师共同完成一次工作，每年治疗 15000 人次，每次出束时间为 3min）
	2	操作直线加速器 2	控制室	375h/人（2 名技师共同完成一次工作，每年治疗 15000 人次，每次出束时间为 3min）
医生	2	问诊、出具治疗方案	诊室	/
物理师	2	制定治疗计划	办公室	/
模拟定位 CT				
岗位类别	人数	工作内容	工作地点	年受照时间
技师	2	操作模拟定位 CT 机	CT 模拟定位机房对应控制廊	166.7h/人（2 名技师共同完成一次工作，每年模拟定位为 10000 人次，CT 模拟定位机出束时间为 1min）
注：质子重离子机房工作人员工作量以治疗人次较多的治疗室 3、4 保守考虑。				

3.5 主要辐射污染因子小结

综上所述，本项目运行期间主要的辐射污染因子列于下表。

表 3.5-1 本项目正常运行期间主要辐射污染因子

装置名称	主要污染因子	产生情况	处理方式及去向
质子重离子放射治疗系统	质子	最高能量 230MeV	机房屏蔽体防护
	氦离子	最高能量 230MeV/u	机房屏蔽体防护
	碳离子	最高能量 430MeV/u	机房屏蔽体防护
	氧离子	最高能量 430MeV/u	机房屏蔽体防护
	中子	最高能量 430MeV	机房屏蔽体防护
	γ 光子	最高能量小于 430MeV	机房屏蔽体防护

	感生放射性气体	主要为 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等短半衰期核素，年总排放量为 1.54E+09Bq。	经机房通排风系统引至重离子质子中心顶部排出。
	活化废液	用于冷却同步加速器部件的回路更换下来的冷却水：主要核素为 ^{3}H、^{7}Be 活度浓度为 665Bq/L。	质子重离子机房内拟设置 4 个事故收集池（其中两个有效容积为 11.7m^3，一个有效容积为 9m^3，一个有效容积为 8.7m^3），总有效容积为 41.1m^3，活化废液经衰变后排放。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	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，年产生量不超过 10kg。	质子重离子机房内部设置放射性废物间，仅用于暂存质子重离子放射治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固体废物。待废物暂存量达到一定量，由医院委托有资质单位进行集中测量分析，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中解控要求的（具体见本报告的表 1.4.3-3），不属于放射性废物，医院按一般固体废物处理或回收利用；不满足解控要求的，属于放射性废物，医院不能自行处理，需委托有资质单位处理。
	离子交换树脂	该过滤树脂一般 1~3 年更换一次，全部过滤树脂重量约 200kg，则每年产生约 200kg 的废树脂	
	活性炭过滤装置	一般一年更换一次，每年产生约 10kg	
	患者感生放射性	人体与质子束流直接作用产生，随着停机时间的增加快速下降。停机 30min 后，距患者 50cm 处剂量率降至 2.4μSv/h，距患者 100cm 处剂量率降至 0.7μSv/h。	自然衰变，患者照射结束后，停机等待一定时间后再进入机房内工作。
	模体感生放射性	人体仿真模体感生放射性同患者感生放射性。	自然衰变，计划验证中照射结束后，停机等待一定时间后再进入机房内工作。
		表面剂量率水平较高，停机 10min 后，水箱表面剂量率大幅度降低。	QA 完成后，辐射工作人员有必要利用辐射监测仪测得质检设备表面 30cm 处剂量率不高于 2.5μSv/h，再进入质子重离子机房开展后续工作。
	配备 X 射线管产生的 X 射线	——	机房屏蔽体防护
	配套 X 射线管产生的臭氧、氮氧化物	少量	经机房通排风系统引至重离子质子中心顶部排出。

电子直线加速器	X 射线、中子、电子线	——	机房屏蔽体防护
	感生放射性气体	少量	经机房通排风系统引至重离子质子中心顶部排出。
	废靶	约 5 年更换一次	由厂家回收；若放射性超标，则委托有资质单位处置。
	臭氧、氮氧化物	少量	经机房通排风系统引至重离子质子中心顶部排出。
模拟定位 CT、滑轨 CT 机、X 射线管	X 射线	——	机房屏蔽体防护
	臭氧、氮氧化物	少量	经机房通排风系统引至重离子质子中心顶部排出。

4 辐射安全与防护设施

4.1 质子重离子放射治疗系统

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

为了便于加强管理，切实做好辐射安全防护工作，按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，在辐射工作场所内划出控制区和监督区，在项目运营期间采取分区管理措施。

控制区：在正常工作情况下控制正常照射或防止污染扩散，以及在一定程度上预防或限制潜在照射，要求或可能要求专门防护手段和安全措施的限定区域。在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平指示。

监督区：未被确定为控制区，正常情况下不需要采取专门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。在监督区入口处的合适位置设立表明监督区的标牌和标识。

质子重离子机房辐射工作场所分区图如图 4.1.1-1~图 4.1.1-4 所示，具体如下：

（1）控制区

负一层：质子重离子治疗室 3 和 4 安装基坑、事故收集池；

一层、二层和三层：质子重离子机房内部；

（2）监督区

一层：中央控制室、走廊、设备间、模具储藏室、治疗大厅、QA 设备室、VIP 等候、更衣、卫生间、楼梯间、转运平台、加速器备品间、低温设备室、质子重离子机房西侧和南侧 1m 范围内；

二层：同步环电源间、2#变电所、走廊、高能线电源间、Gantry 电源间、空调机房、楼梯间、质子重离子机房南侧 1m 范围内。

三层：上人屋面、同步环电源间空调机房、高能线电源间空调机房、治疗室空调机房、高能线空调机房、Gantry 电源间、转运平台

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。

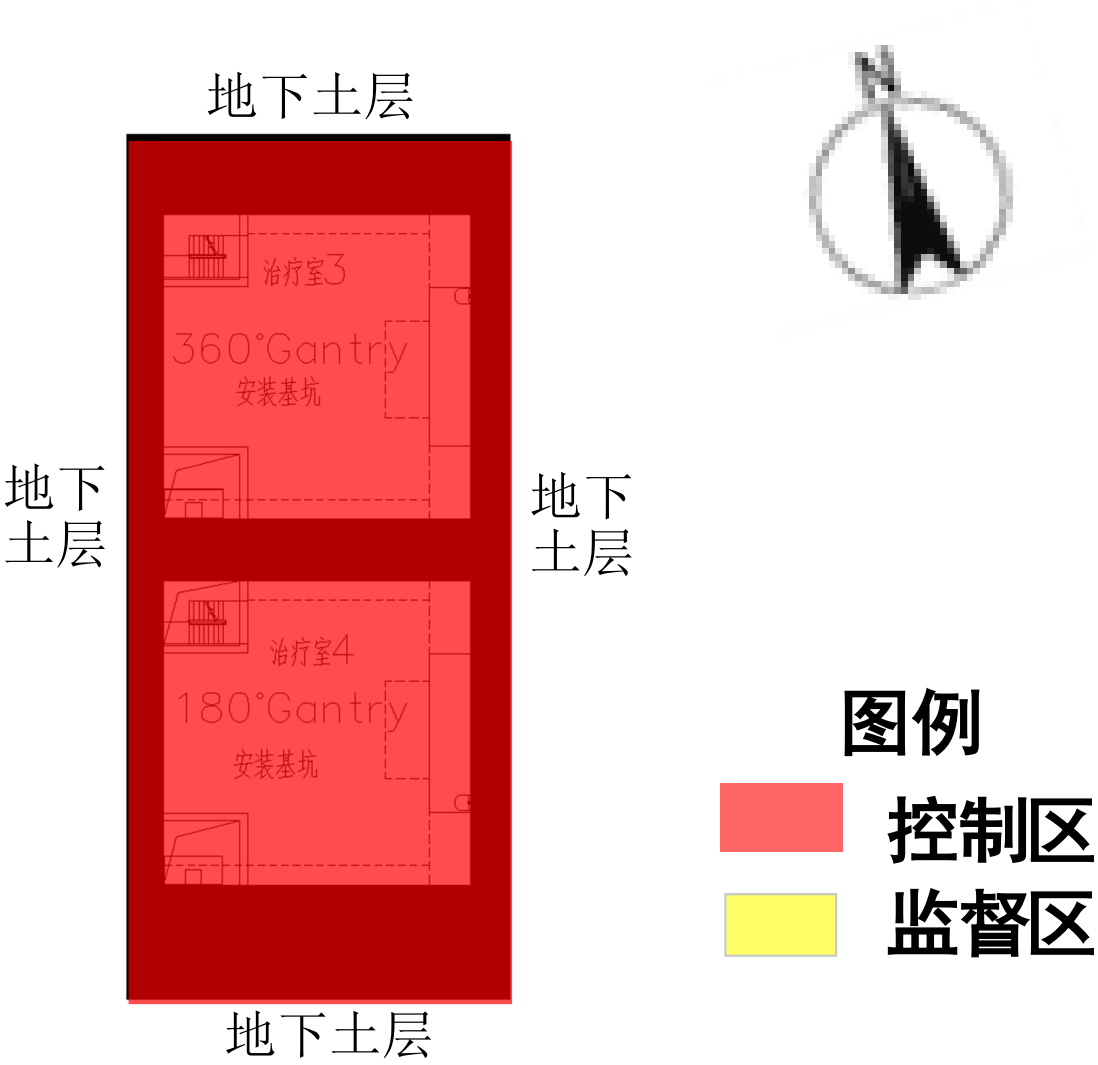


图 4.1.1-1 质子重离子机房辐射工作场所分区图（负一层）

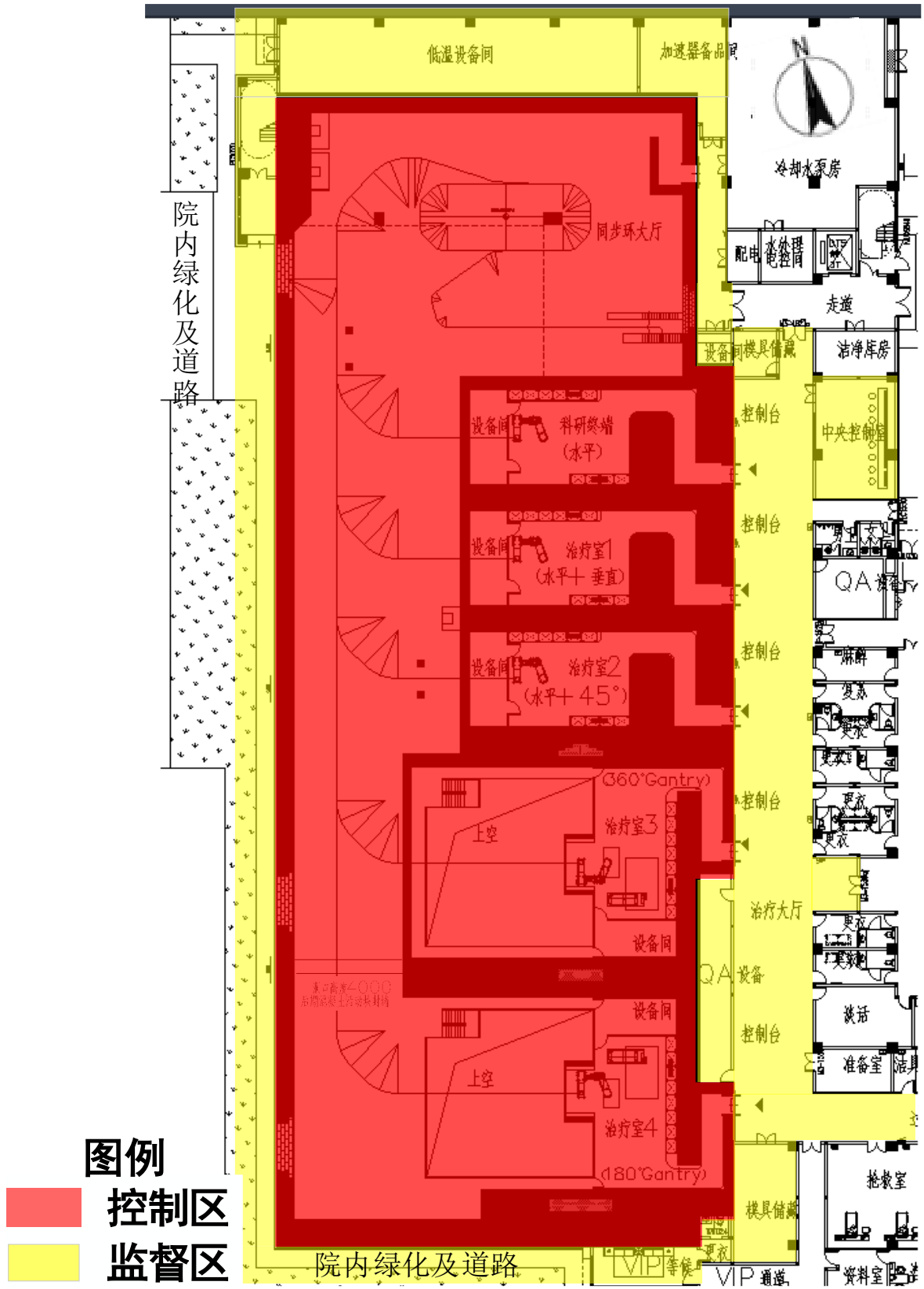


图 4.1.1-2 质子重离子机房辐射工作场所分区图（一层）

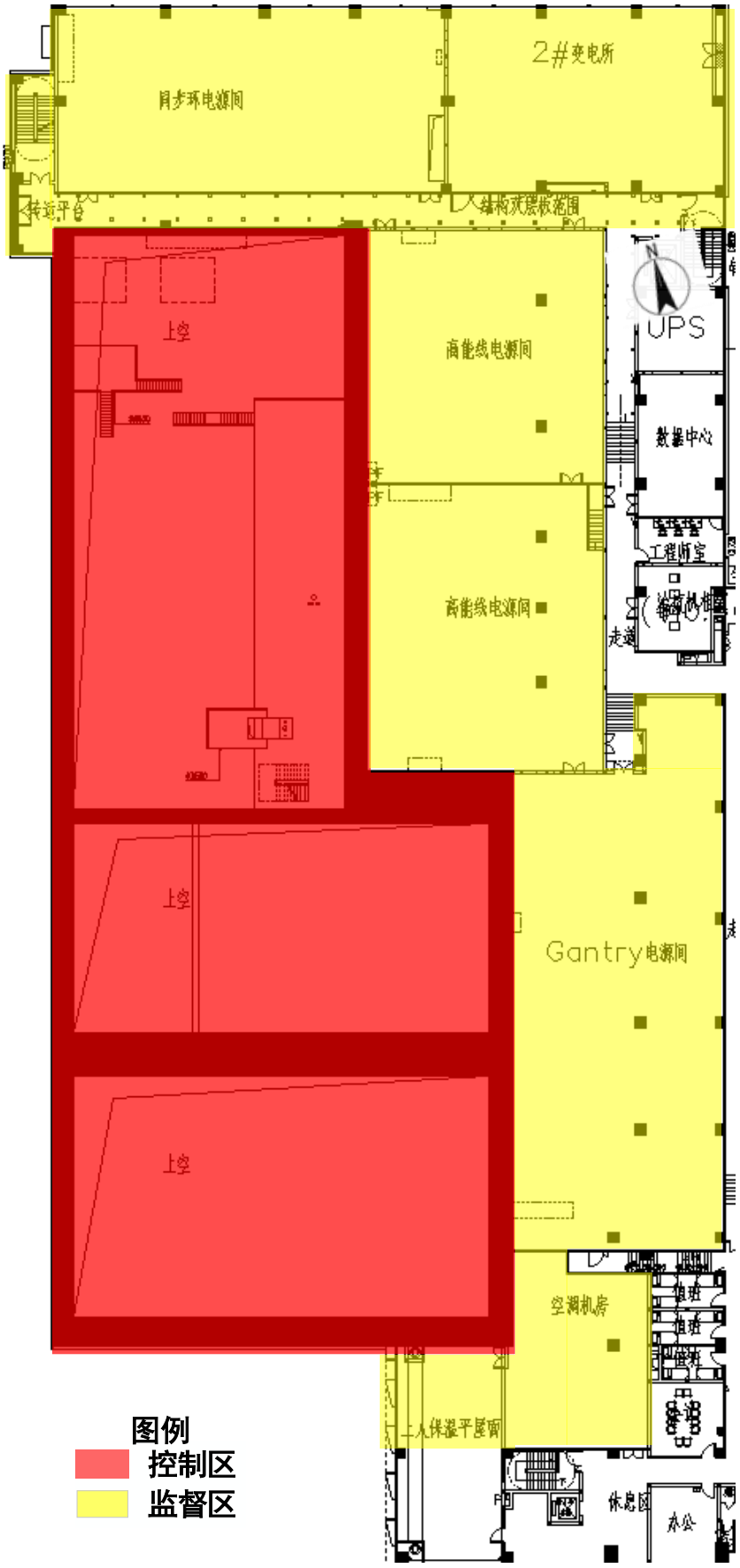


图 4.1.1-3 质子重离子放射治疗系统辐射工作场所分区图（二层）

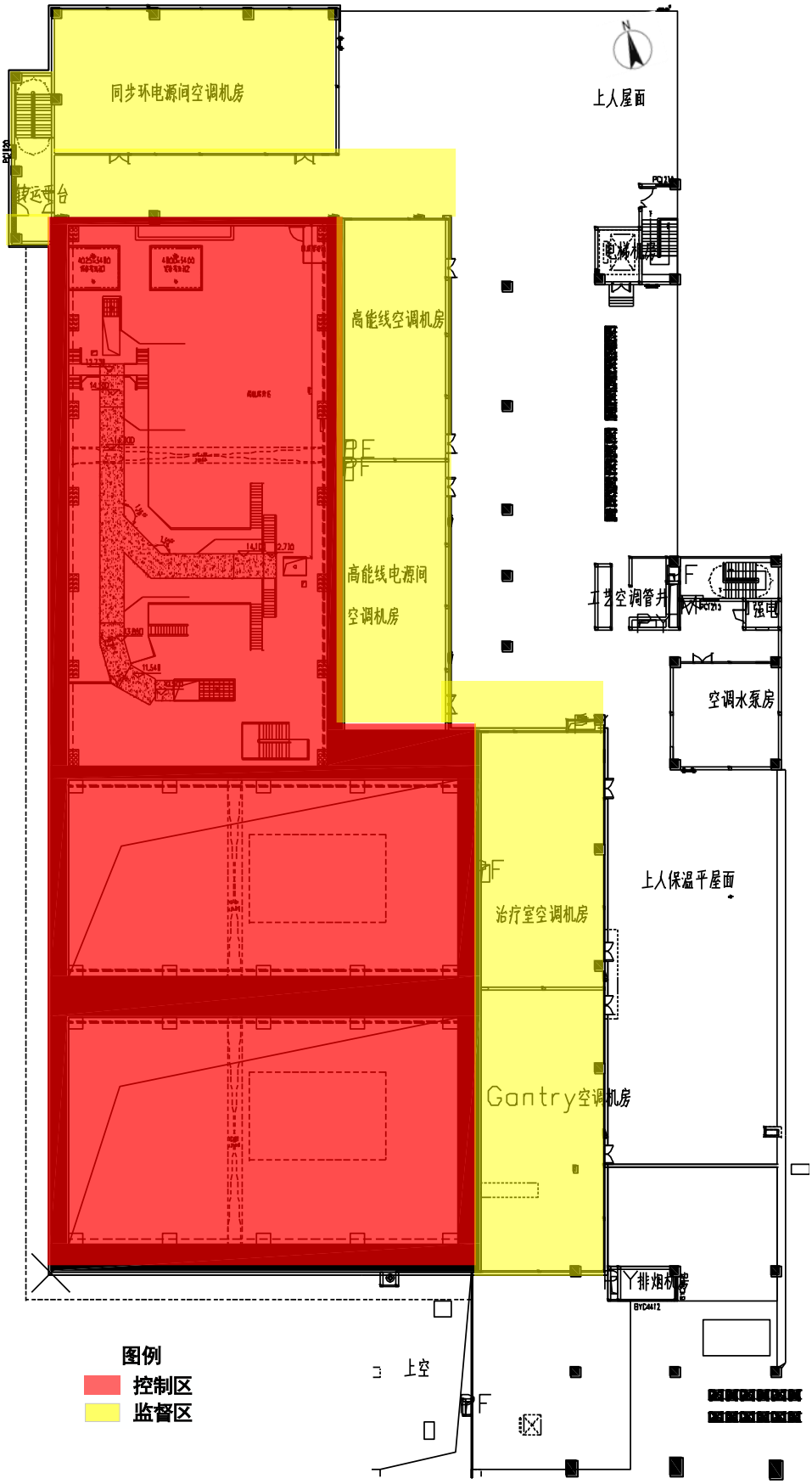


图 4.1.1-4 质子重离子放射治疗系统辐射工作场所分区图（三层）

4.1.1.1.2 布局合理性分析

本项目质子重离子机房拟在重离子质子中心的西侧单独设置，避开了人员密集区域。质子重离子机房为四层结构，负一层为安装基坑和事故收集池，一层至三层为机房区域。控制室设于地上一层，与质子重离子机房治疗室分离，机房东侧设有“L”形迷道。科研室、治疗室 1、2 控制室不在有用线束可直接照射到的区域。治疗室 3 为 360°旋转治疗室，主射方向朝向南、北墙、顶棚、底板 360°照射，主射方向避开控制室，治疗室 4 为 180°旋转治疗室，主射方向朝向南墙、顶棚、底板 180°照射，主射方向避开控制室。紧邻质子重离子机房屏蔽墙体的区域中除控制室外，无办公室等人员常居留场所。

本项目设置了相对独立的质子重离子区，并设置了物理隔离和相对独立的人流路线，辐射工作场所的进出口处均设置门禁管理，防止无关人员进入，便于场所的防护管理与安全控制。整个质子重离子区域功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关要求，因此，该区域布局是合理的。

4.1.1.2 辐射屏蔽

4.1.1.2.1 设计标准

质子重离子放射治疗系统辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

（1）年剂量约束值

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）4.9 从事放射治疗的工作人员职业照射和公众照射的剂量约束值应符合以下要求：a）一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a。b）公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。因此，本项目以 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值，以 0.1mSv/a 作为公众人员的年剂量约束值。

（2）屏蔽体外剂量率控制水平

质子重离子机房屏蔽体外剂量率水平的计算依据见“1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平”，计算结果见表 1.4.2-2。

4.1.1.2.2 屏蔽设计

质子重离子机房四层建筑设计为整体屏蔽，机房屏蔽墙体、顶棚和地坪均采用密度 2.35g/cm^3 的普通混凝土，治疗室局部使用密度 7.96g/cm^3 铁块进行增

强屏蔽，迷道设计为“L”形迷道，各层迷道口采用普通电动门。质子重离子机房辐射屏蔽设计如图 4-6~图 4-9 所示。

为方便设备在安装阶段进入机房，质子重离子机房西侧墙体预留了设备吊装口，待设备进入后，再用密度高于 2.35g/cm^3 的混凝土预制块进行砌筑，做到错缝安装确保该部分墙体等效混凝土厚度不低于原墙体。

表 4.1.1-1 质子重离子机房辐射屏蔽设计及周围环境分布情况

机房尺寸（长×宽×高）	位置	屏蔽体厚度	周围环境	
同步环大厅	东墙	迷道内墙：700mm 混凝土；迷道外墙：1100mm 混凝土	一层	过道、设备间
		1750mm 混凝土	二层	高能线电源间
		1350mm 混凝土	三层	高能线空调机房
	东门	普通电动门	一层	过道
	南墙	1000mm 混凝土	一层	科研室
	西墙	1400mm 混凝土	一层	楼梯间、转运平台
			二层	楼梯间
			三层	楼梯间
	北墙	2500mm 混凝土	一层	加速器备品间、低温设备室
		600mm 混凝土	二层	电缆夹层、走廊
		600mm 混凝土	三层	走廊
	顶棚	1000mm 混凝土	二层	电缆夹层
	地坪	1800mm 混凝土	土层	
高能射线爬升区	东墙	600mm 混凝土	一层	科研室、治疗室 1-3
		/	一层	治疗室 4
		1750mm 混凝土	二层	高能线电源间
		1350mm 混凝土	三层	高能线空调机房、高能线电源间空调机房
	南墙	2600mm 混凝土	一层	院内道路
		1100mm 混凝土	二层	治疗室 3 上空
		1100mm 混凝土	三层	治疗室 3 上空
	西墙	1400mm 混凝土	一层	院内道路及绿化
			二层	临空
			三层	临空
	北墙	/	一层	同步环大厅
		600mm 混凝土	二层	电缆夹层、走廊
		600mm 混凝土	三层	走廊

	顶棚	800mm 混凝土	三层	高能射线爬升区
		600mm 混凝土	屋顶层	不上人屋面
	地坪	1800mm 混凝土	土层	
科研室 13.35m×8m×4m（净高）；不含迷道、不含墙体；	东墙	迷道内墙：3400mm 混凝土；迷道外墙：3050mm 混凝土	一层	过道、控制台
	东门	普通电动门	一层	过道
	南墙	1900mm 混凝土	一层	治疗室 1
	西墙	600mm 混凝土	一层	高能射线爬升区
	北墙	1000mm 混凝土	一层	同步环大厅
	顶棚	500mm 混凝土	机房上空	
		2300mm 混凝土	电缆夹层	
	地坪	1600mm 混凝土	土层	
治疗室 1（13.35m×8m×4m（净高）；不含迷道、不含墙体；）	东墙	迷道内墙：3400mm 混凝土；迷道外墙：3050mm 混凝土	一层	过道、控制台
	东门	普通电动门	一层	过道
	南墙	1900mm 混凝土	一层	治疗室 2
	西墙	600mm 混凝土	一层	高能射线爬升区
	北墙	1900mm 混凝土	一层	科研室
	顶棚	500mm 混凝土	治疗室 1 上空	
		2300mm 混凝土	电缆夹层	
	地坪	1600mm 混凝土	土层	
治疗室 2（13.35m×8m×4m（净高）；不含迷道、不含墙体；）	东墙	迷道内墙：3400mm 混凝土；迷道外墙：3050mm 混凝土	一层	过道、控制台
	东门	普通电动门	一层	过道
	南墙	3200mm 混凝土	一层	治疗室 3
	西墙	600mm 混凝土	一层	高能射线爬升区
	北墙	1900mm 混凝土	一层	治疗室 1
	顶棚	500mm 混凝土	治疗室 2 上空	
		2300mm 混凝土	电缆夹层	
	地坪	1600mm 混凝土	土层	
治疗室 3（16m×7m×4.7m；不含迷道、不含墙体；）	东墙	迷道内墙：1800mm 混凝土；迷道外墙：800mm 混凝土	一层	过道、控制台
		800mm 混凝土	一层	模具储藏
		1800mm 混凝土	二层	Gantry 电源间
		1350mm 混凝土	三层	治疗机房空调机房
	东门	普通电动门	一层	过道

	南墙	3200mm 混凝土 其中一层内嵌 900mm 厚， 4000mm 高， 3600mm 宽铁块增强块	负一层-三层	治疗室 4 安装基坑、 治疗室 4 及其上空
	西墙	600mm 混凝土	一层	高能射线爬升区
		1400mm 混凝土	一层	院内道路及绿化
		1400mm 混凝土	二层	临空
		1400mm 混凝土	三层	临空
	北墙	3200mm 混凝土 内嵌 300mm 厚（共 900mm 厚）， 4000mm 高， 1200mm/2400mm/3600mm 宽铁块增强块	一层东	治疗室 2
		1100mm 混凝土	一层西	高能射线爬升区
		1100mm 混凝土	二层	治疗室 2 上空
		1100mm 混凝土	三层	高能射线爬升区
	顶棚	3600mm 混凝土	不上人屋面	
	地坪	1600mm 混凝土	土层	
治疗室 4（16m×7m×4.7m；不含迷道、不含墙体；）	东墙	迷道内墙：1800mm 混凝土；迷道外墙：800mm 混凝土	一层	过道、模具储藏
		800 mm 混凝土	一层	设备间、模具储藏
		2500mm 混凝土	二层	Gantry 电源间
		1350mm 混凝土	三层	治疗机房空调机房
	东门	普通电动门	一层	过道
	南墙	2200mm 混凝土	一层西	院内道路及绿化
		4700mm 混凝土	一层中	VIP 等候
		2200mm 混凝土	一层东	更衣、卫生间
		2600mm 混凝土	二层西	临空、可上人屋面
		1300mm 混凝土	二层东	空调机房
		2600mm 混凝土	三层西	临空
		1300mm 混凝土	三层东	Gantry 空调机房
	西墙	/	一层	高能射线爬升区
		1400mm 混凝土	一层	院内道路及绿化
		1400mm 混凝土	二层	临空
		1400mm 混凝土	三层	临空
	北墙	3200mm 混凝土 其中一层内嵌 900mm 厚， 4000mm 高， 3600mm 宽铁块增强块	负一层-三层	治疗室 3 安装基坑、治疗室 3 及其上空

	顶棚	3600mm 混凝土	不上人屋面
	地坪	1600mm 混凝土	土层
治疗室 3 安装基坑	东墙	2000mm 混凝土	土层
	南墙	3200mm 混凝土	
	西墙	1900mm 混凝土	
	北墙	4150mm 混凝土	
	地坪	1600mm 混凝土	
治疗室 4 安装基坑	东墙	2000mm 混凝土	
	南墙	5900mm 混凝土	
	西墙	1900mm 混凝土	
	北墙	3200mm 混凝土	
	地坪	1600mm 混凝土	

本项目屏蔽设计见下图。

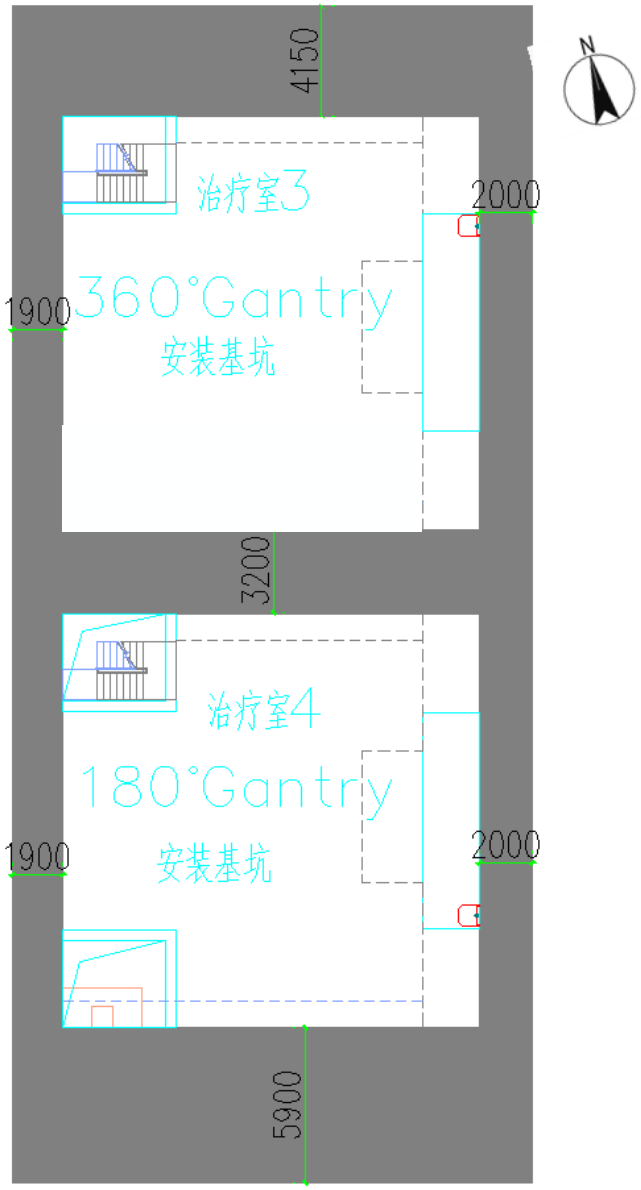


图 4.1.1-5 质子重离子机房辐射屏蔽设计（负一层）

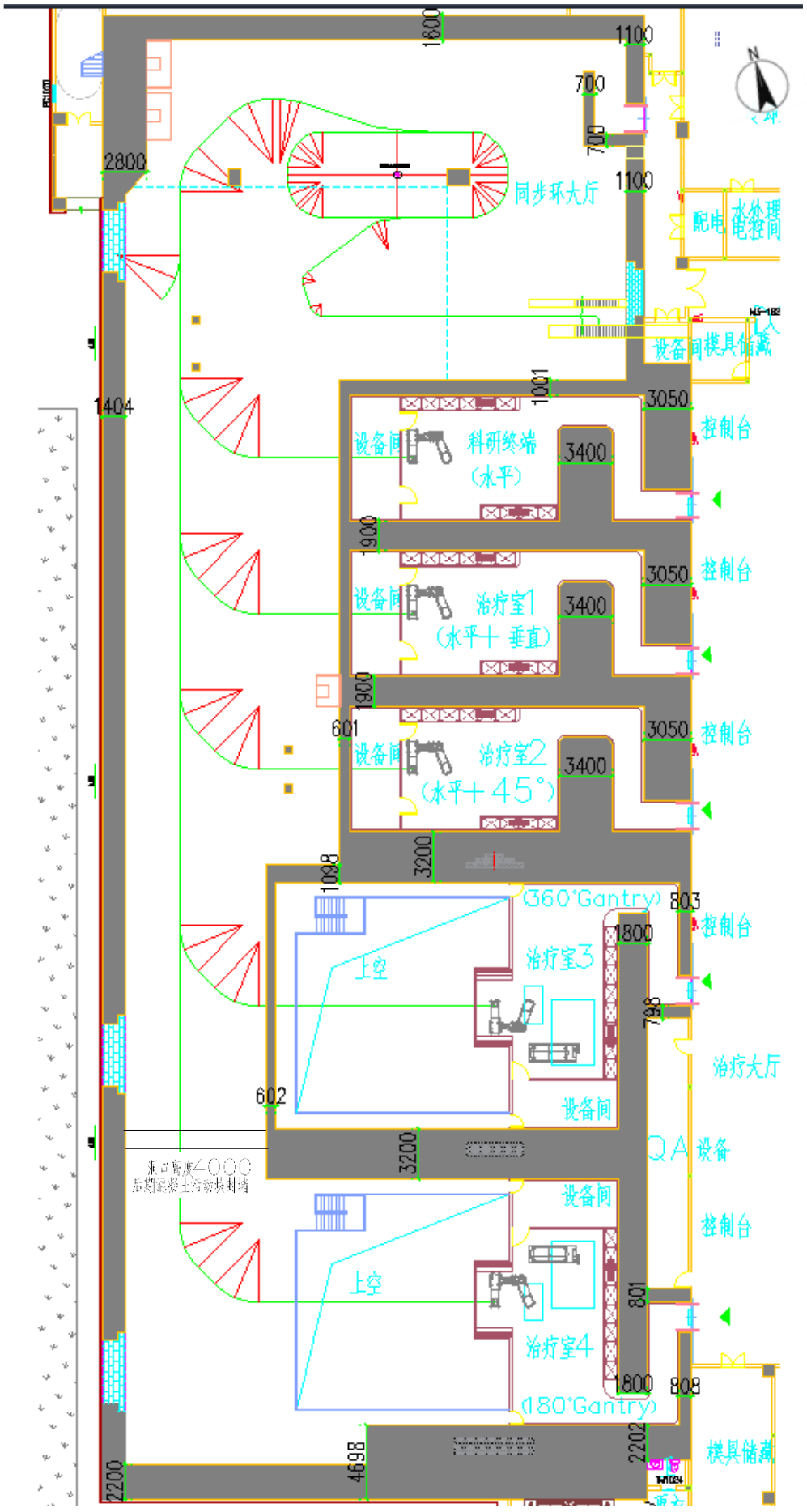

1600
1100
700
700
1100
2800
同步环大厅
配电
水处理
电控间
设备间模具储藏
1404
1001
3050
控制台
设备间
科研终端
(水平)
3400
1900
3050
控制台
设备间
治疗室1
(水平+垂直)
3400
1900
601
3050
控制台
设备间
治疗室2
(水平+45°)
3400
3200
1098
(360°Gantry)
803
控制台
1800
上空
治疗室3
798
治疗大厅
602
设备间
3200
QA设备
设备间
控制台
上空
治疗室4
801
1800
808
(180°Gantry)
4698
2202
模具储藏
2200

图 4.1.1-6 质子重离子机房辐射屏蔽设计（一层）

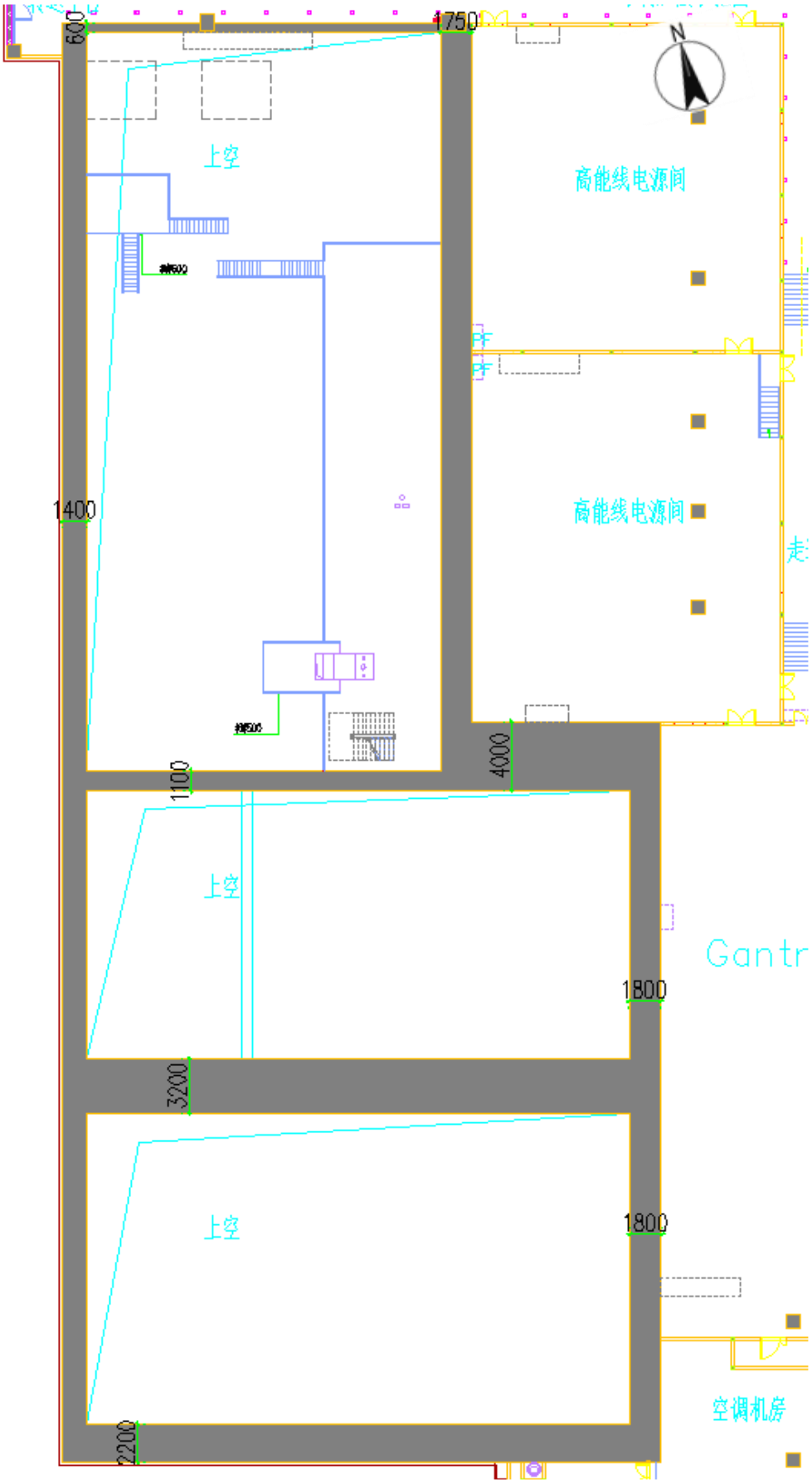


图 4.1.1-7 质子重离子机房辐射屏蔽设计（二层）

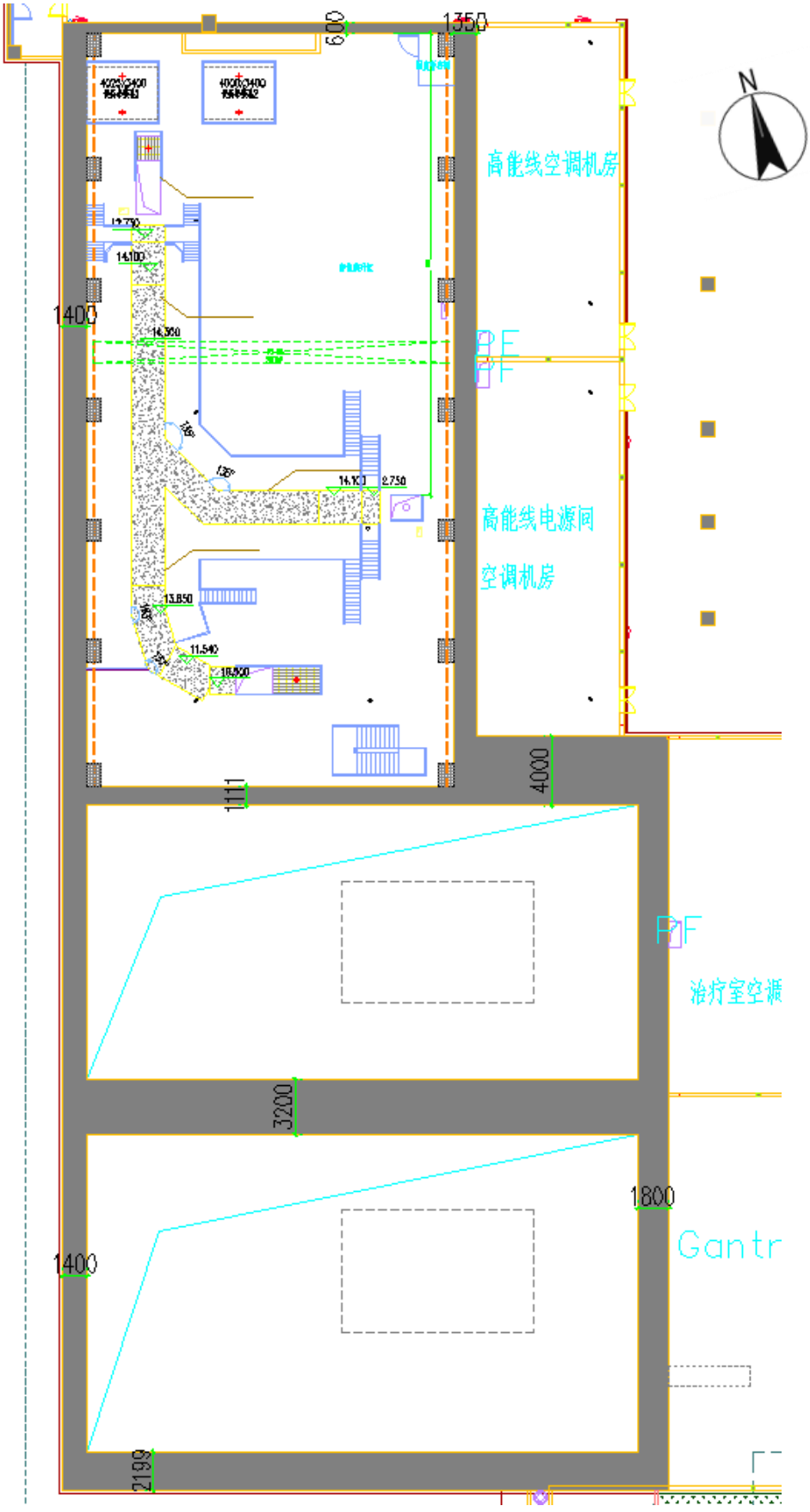


图 4.1.1-8 质子重离子机房辐射屏蔽设计（三层）

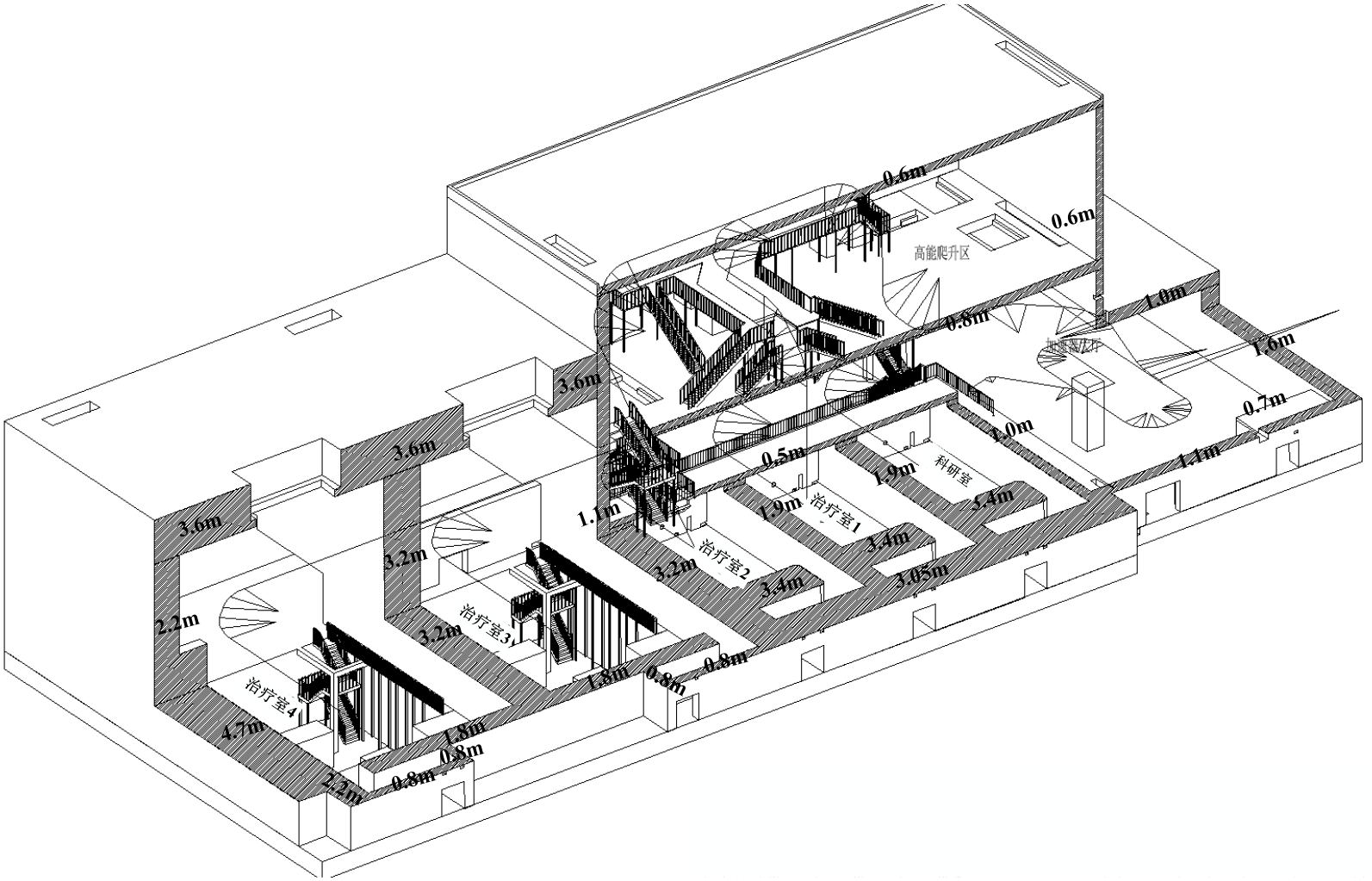


图 4.1.1-9 质子重离子机房辐射屏蔽设计（剖面图）

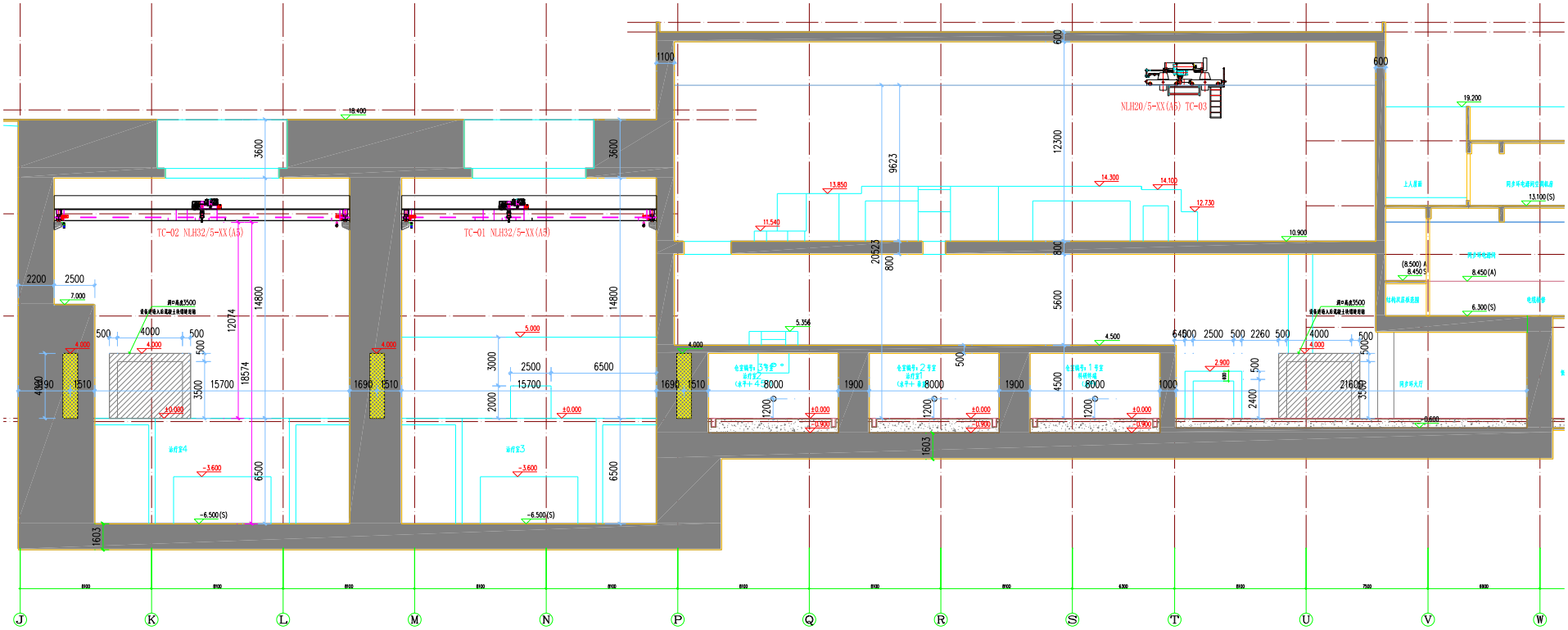


图 4.1.1-10 质子重离子机房辐射屏蔽设计（剖面图）

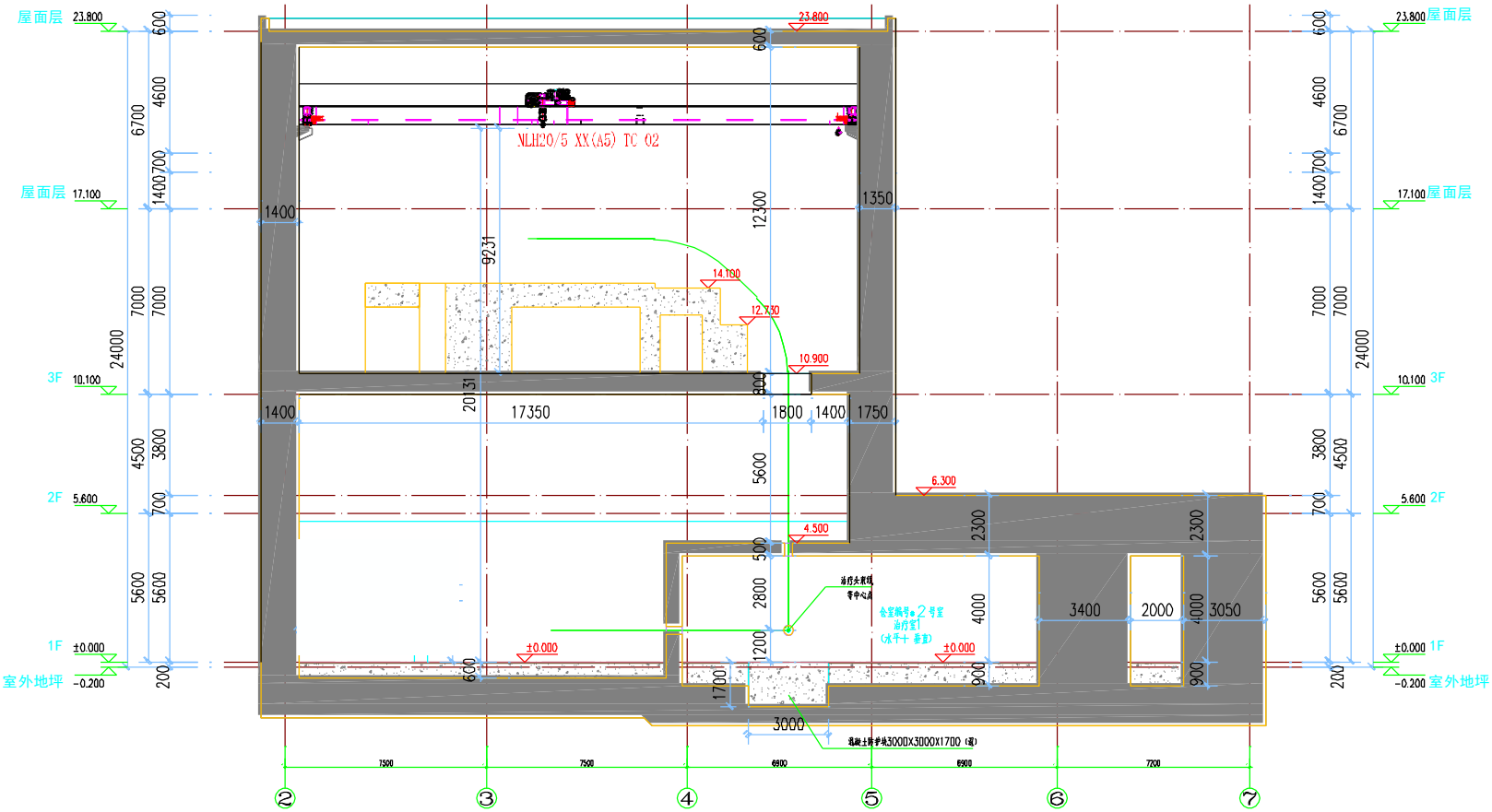


图 4.1.1-11 质子重离子机房辐射屏蔽设计（剖面图）

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 设计原则

质子重离子放射治疗系统人身安全联锁系统设计时，遵循以下原则：

（1）分区联锁：根据质子重离子一体化治疗系统运行模式，利用实体屏蔽及“束流闸”（Beam Stopper）将整个加速器辐射区分为控制区和监督区。按工艺要求，在束流上流区域有束流时，可以允许下流无束流区域人员进入工作；利用“束流闸”保证束流不会被送到有人区域。

（2）实现辐射区门与区域内辐射剂量的双重联锁，即某一区域有束流时，工作人员不能进入该区域；而在某一区域有人时，束流不能被送到相应区域。此外，辐射监测信号也将作为安全联锁信号，当一区域辐射剂量超过所设阈值时即便在无束流的状态也不允许人员进入，保障工作人员安全。

（3）“冗余”设计及独立性：控制区的每个门都有三重联锁：一为限位开关；二为身份识别卡，可对进入隔离区的人员确认其身份，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中；三为钥匙箱，确保在钥匙箱上的钥匙没有全部归还的情况下束流闸不会被打开。采用冗余设计的多套联锁设施相互独立，不会因为一套系统的失效而影响到其它系统的安全性。

（4）最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是机器的最初始的运行功能（如离子源的高压等），更好的保证在后级区域的辐射安全。

（5）所有的线路、气动装置、电动装置均采用失效保护设计。门的限位开关在门关上后不能立即接通联锁，需要旋转在中控室的区域控制总钥匙才能接通。急停开关在计划停机或被自救人员按下后即处于断开状态，需安全人员到当地进行复位后才能重新开机，所以急停开关同时也是开机前的清场检查站。这均属失效保护设计。

4.1.2.1.2 系统结构和功能

4.1.2.1.3 系统组成

重离子治疗系统的人身安全联锁系统主要由 PLC、出入控制管理设备、急停按钮、急停清场盒、声光报警器等组成。PLC 可以收到各个联锁装置的状态情况，并与主控

室 PLC 进行通信，得知哪些主要设备在工作，治疗室内是否有束流供给旦出现与安全逻辑相冲突的事件，安全 PC 就触发一系列保护动作包括停止束流和发出警报。

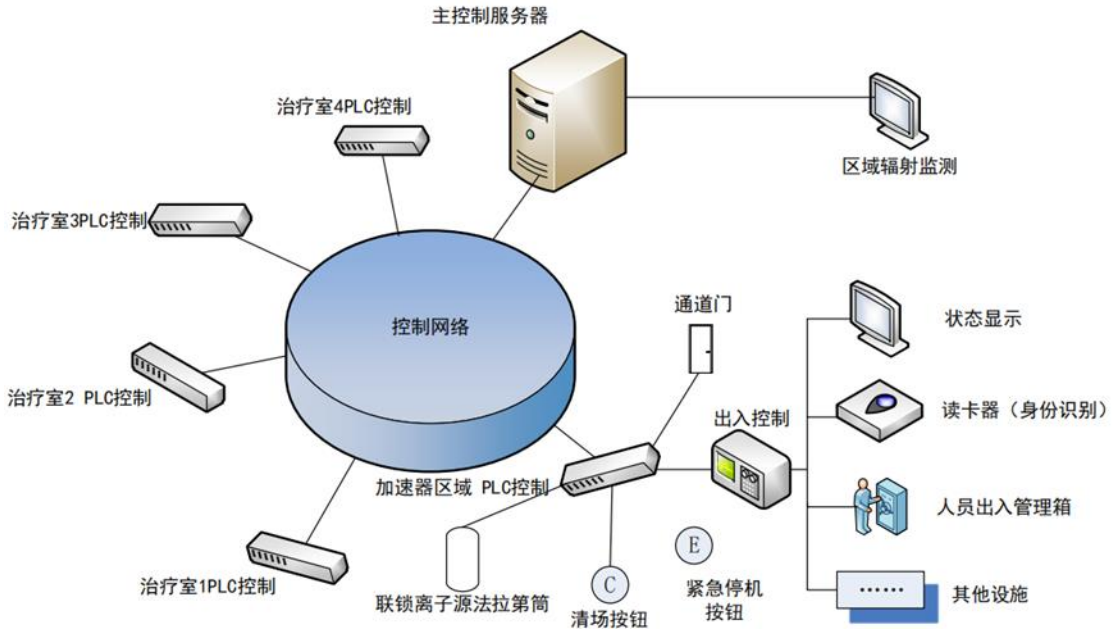


图 4.1.2-1 人身安全联锁系统结构示意图

4.1.2.1.3.1PLC 逻辑控制

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加速器束流闸、通道门、区域剂量及紧急停机按钮等设施或信号进行联锁，规定了人身安全联锁各子系统的联锁逻辑关系，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。各个子 PLC 逻辑控制系统能够独立运行，对各安全联锁设施进行最底层的操作且具有最高优先权。当一个子系统发生问题时，不影响其他子系统。

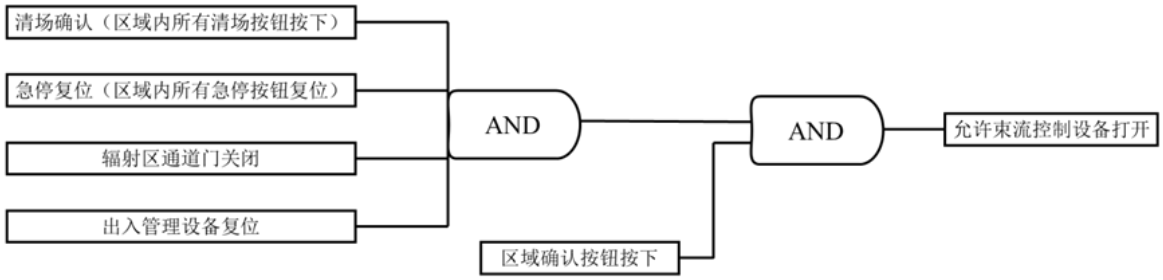


图 4.1.2-2 质子重离子一体化治疗系统 PLC 联锁逻辑

4.1.2.1.3.2 剂量联锁

这一部分包括现场剂量联锁与个人剂量联锁。现场剂量联锁的主要功能：

1）、保障在加速器停机后，人员不会进入有较高残余放射性的区域；

2）、若某一治疗室处于没有清场的状态，也就是人员可能仍在治疗室内，此时若该治疗室区域突然发生误照射，监测到超过阈值的辐射剂量率，则联锁系统启动，能迅速降下束流闸切断束流。

个人剂量联锁可以保障受照剂量超过年剂量限值（5mSv/a）的工作人员不能进入放射性工作区域。

4.1.2.1.3.3 人员出入管理系统

人员出入管理系统包括人员出入管理箱、个人剂量管理平台两部分，完成对进出加速器区域和个人剂量的统计和管理。

个人剂量是指对从事放射性工作的人员进行的年累计剂量的统计，当个人剂量超限时，不允许进入加速器区域。对进入加速器区域的人员确认其身份，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中，PLC 控制系统根据服务器的个人剂量数据进行判断，当某一个人的个人剂量值超限时，不允许进入加速器区域，以保证人员的安全。

个人剂量管理平台可实现工作人员 IC 卡和个人剂量计的自动绑定，每次进入加速器区域累积剂量的自动累加统计，超出安全阈值后禁止进入加速器区域等功能。

人员出入管理箱主要实现对进出加速器区域的人员统计和管理，主要有 IC 读卡器、ARM 处理器、指示灯及按钮等。人员出入管理箱是确保人员安全的重要部件，放置在加速器区域入口，工作人员可以通过刷卡或刷个人剂量计进出加速器区域。服务器和 PLC 相互通信，只有经过授权和累积剂量未超限的人员刷卡（或个人剂量计）后才能够分配开门权限，按下按钮后开门指令会发送至 PLC 内，控制通道门打开。钥匙箱自身的状态可以分为“全部在位”与“未在位”两种，其状态将作为联锁信号接入 PLC 联锁系统。PLC 监测钥匙箱上的通道门、主钥匙、清场、急停按钮的状态，在没有全部生效的情况下束流阀不会被打开，确保在辐射区内有人的情况下束流不会进入该区域。人员出入管理箱实物照片如图 4.1.2-3 所示。

图 4.1.2-3 同步环大厅门口人员出入管理箱示例照片（红色代表全部就位）

治疗室区域由于医生和患者需要频繁进出治疗室，所以设计一人一卡的人员出入控制系统不符合实践需求。治疗室内需要供束时，对治疗室进行巡检后由医护人员在医生控制台采用刷卡启动束流闸的控制方式，且授权卡由专人保管。治疗室需要进入时在医生控制台医生控制盒（图 4.1.2-4）刷卡关闭束流闸后方可进入。

图 4.1.2-4 控制室台的医生控制盒

4.1.2.1.3.4“清场”/急停按钮及声光警示

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。

紧急停机按钮及“清场”确认按钮均匀分布于同步环大厅、高能线爬升区、科研室及各治疗室中。同步环大厅和高能线爬升大厅内设置有急停清场盒和一一对应的声光报警灯，急停按钮按下后，只有人工就地复位并通过控制台才能重新启动设备，清场按钮主要功能是实现加速器开机准备前的清场功能。加速器开机前，厂家工程进入同步环大厅、高能线水平区和高能线爬升区内按巡检路线巡检，若无人员误留则按下清场按钮，在按下清场按钮后对应声光报警灯发出声光警示，提醒加速器联锁区域内未离开人员迅速撤离，完成巡检流程后加速器才能开启高压。若在加速器开机之后仍有工作人员在大厅内，可按下大厅内设置的紧急停机按钮来切断加速器运行，待确认联锁区域内没有工作人员并压下“清场”确认按钮后可重新进行开机操作。

科研室及各治疗室内均拟设置急停清场盒（含急停按钮和清场按钮），同时会有语音提示，不设置声光报警灯，急停按钮按下后，只有人工就地复位并通过控制台才能重新启动设备；清场按钮用于治疗室供束前搜索对应区域无人员滞留后按下清场按钮，若有人员滞留治疗室，可按下治疗室内设置的紧急停机按钮切断治疗室束流，待确认联锁区域内没有工作人员并压下“清场”确认按钮后可重新进行开机操作。

本项目质子重离子一体化治疗系统拟设置 24 个急停清场盒（同步环大厅及高能线爬升大厅共 10 个，科研室、治疗室 1-2 各 2 个，治疗室 3 和 4 各 4 个），设置位置距地面高度约 1.5m，样式如图 4.1.2-5 所示，其设置位置及巡检路径如图 4.1.2-6 所示。

加速器大厅及高能线爬升区巡检路径描述：从加速器大厅门进入清场（），按下急停清场盒 1→急停清场盒 2→按下急停清场盒 3→从 1F 科研室背后扶梯上至夹层平台→急停清场盒 4→由扶梯上高能爬升区平台→急停清场盒 5→急停清场盒 6→急停清场盒 7→从扶梯下至 1F 科研室背后→急停清场盒 8→急停清场盒 9→急停清场盒 10→加速器大厅迷路离开。

科研室和治疗室 1~2 巡检路径描述:按下急停清场盒 1→对治疗室及其内部清场→进入设备间一按下急停清场盒 2→关闭设备间门→治疗室迷路离开。

治疗室 3 巡检路径描述:按下急停清场盒 1→按下停清场盒 2→检修区上方按下急停清场盒 3→下检修层对治疗室及其内部清场→按下急停清场盒 4→返回治疗室 3→治疗室 3 迷路离开。

治疗室 4 巡检路径描述:按下急停清场盒 1→按下停清场盒 2→高能线爬升区按下急停清场盒 3→下检修层对治疗室及其内部清场→按下急停清场盒 4→返回治疗室 4→治疗室 4 迷路离开。

巡检人员需要按照规定的巡检路径、时间内完成巡检，若在规定时间内未完成巡检，则需重新从巡检路径的起始点（该区域编号为 1 的急停清场盒）开始重新巡检。

图 4.1.2-5 急停清场盒现场照片（示意）

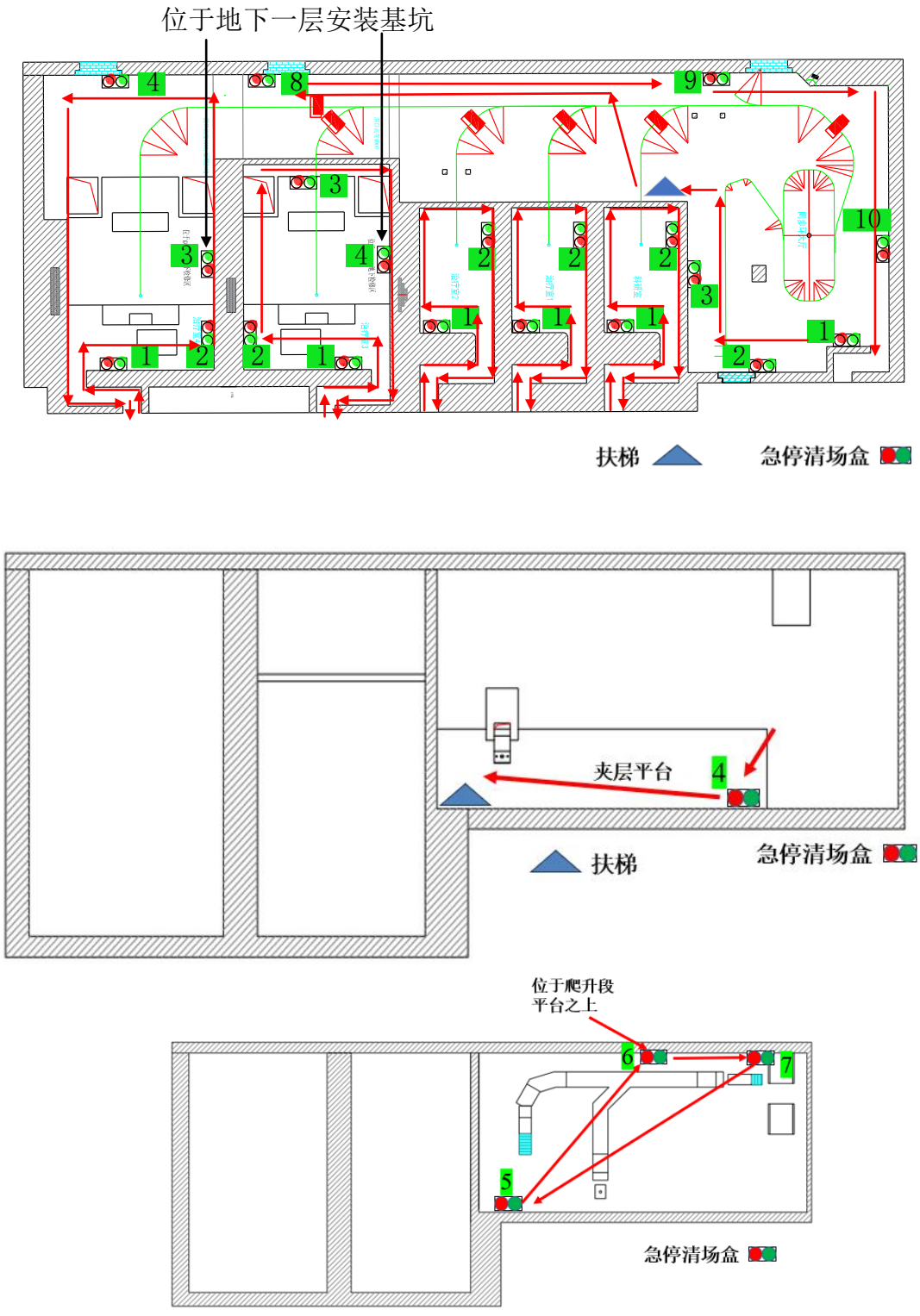


图 4.1.2-6 各关键联锁设备位置分布示意及巡检路线示意图

4.1.2.1.3.5 束流闸

根据“硬件最可靠”这一联锁原则，每个辐射分区前都有一个束流闸，其主要作用是防止误操作，保证有人区域为绝对的封闭区间。束流闸只有当下游的联锁逻辑符合条件时才可打开，束流方可进入下游区域。重离子治疗装置共需束流闸 8 个，其位置

分布如图 4.1.2-7 所示。

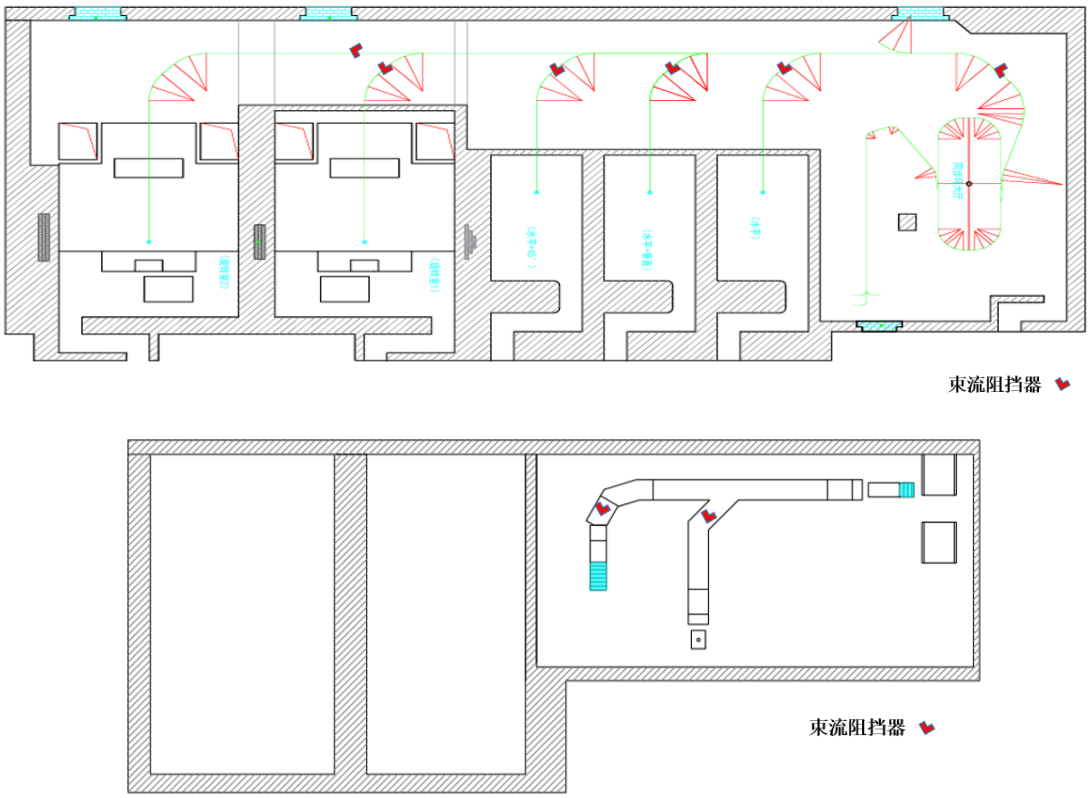


图 4.1.2-7 束流闸位置分布图

4.1.2.1.3.6 质子重离子一体化治疗系统安全联锁系统的工作流程

本项目质子重离子一体化治疗系统安全联锁系统设计工作流程如图 4.1.2-8 所示。

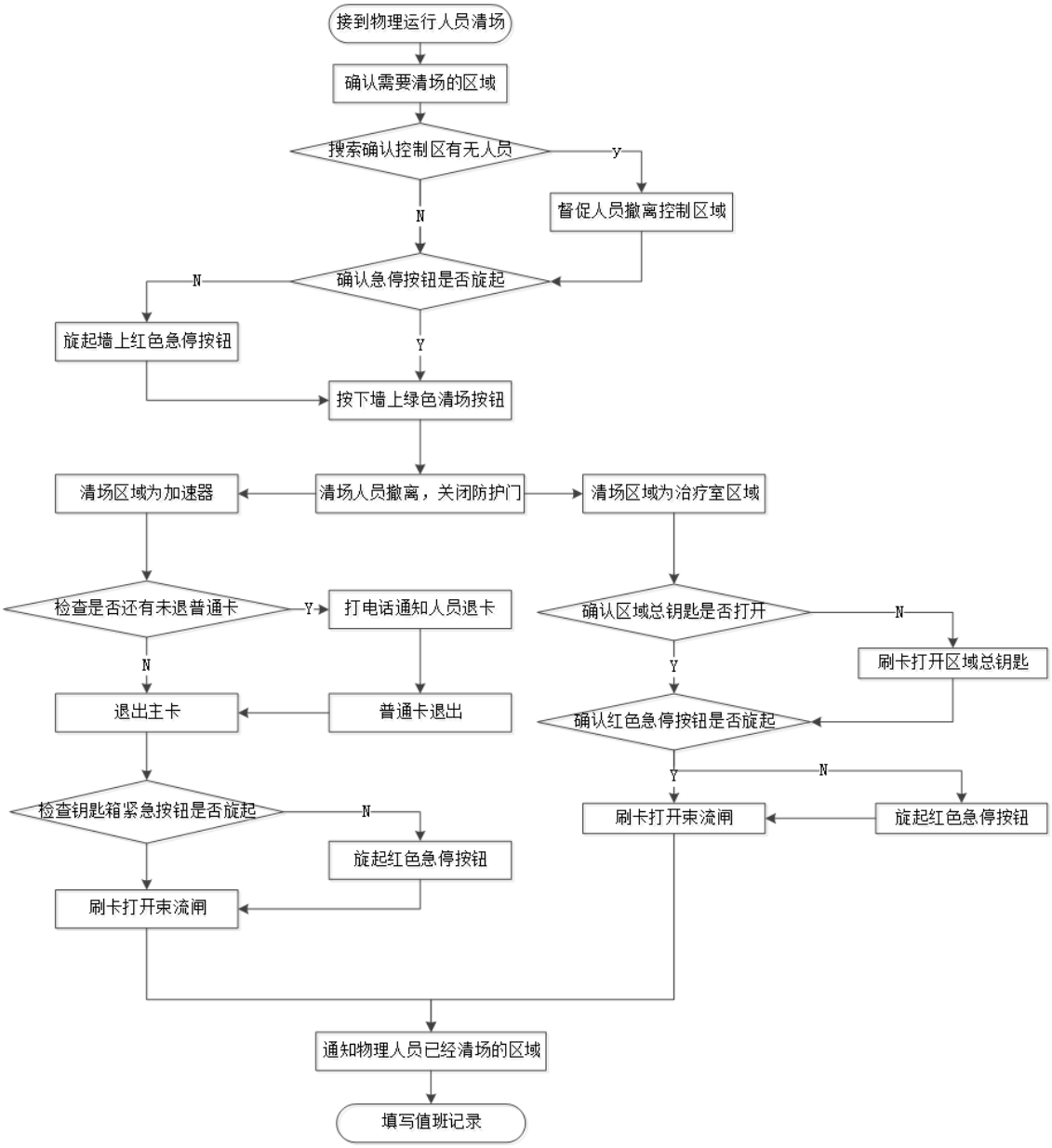


图 4.1.2-8 人身安全联锁系统的工作流程

4.1.2.1.3.7场所辐射监测系统和工作状态指示灯

1）重离子质子中心内

本项目拟在同步环大厅及高能线爬升大厅共安装 5 个固定式辐射剂量监测仪，在科研室及各治疗室内固定安装 1 个固定式辐射剂量监测仪，科研室及各治疗室及加速器大厅外门口固定安装 1 个固定式辐射剂量监测仪。各固定式辐射剂量监测仪可实时显示中子剂量率及γ剂量率，且设定报警阈值为 2.5μSv/h，当监测到该区域剂量率高于报警阈值，会发出声音提示（科研室及治疗室内除外）。

同步环大厅入口处设置工作状态显示装置，以提示同步环大厅内出束状态。科研室及各治疗室防护门外上方设置工作状态指示灯，设置“射线有害，灯亮勿入”的警示语句，并设置与防护门有效联动；防护门旁设置工作状态显示屏（剂量柱），设置与治疗终端联锁，显示“停止照射”、“正在照射”等，并可实时显示对应治疗室内相应点位的γ、中子剂量率监测数值。此外，在中控室控制台上可直观显示加速器工作状态，以及各固定式量报警仪实时监测数据、束流阀状态、急停清场盒、急停按钮状态。

图 4.1.2-9 防护门外剂量柱现场照片（示意）

图 4.1.2-10 固定式辐射剂量监测仪现场照片（示意）

2）重离子质子中心外

重离子质子中心外环境辐射监测系统用于测量穿过屏蔽后泄露到环境中的中子、γ辐射水平。在质子重离子一体化治疗系统主体建筑周围设置若干监测站，每个站内设置中子、γ探测器各一个，实时测量环境中子、γ辐射水平。

环境辐射监测系统的组成如图4.1.2-11所示，系统由若干现场监测子站和一个数据处理服务器组成。现场监测子站的主要任务：对环境 γ 辐射剂量率进行连续监测；存储监测数据；通过有线或无线通讯设备向数据处理中心实时传输数据。数据处理服务器的主要任务：收集各现场监测子站的监测数据和设备工作状态信息，并对所收取得监测数据进行判别、检查和存储；对采集的监测数据进行统计处理、分析、显示、报表；向上级数据处理中心发送监测数据。现场监测子站主要是由辐射监测仪器、气象仪器、就地二次仪表、数据传输设备及其配套设备等组成。

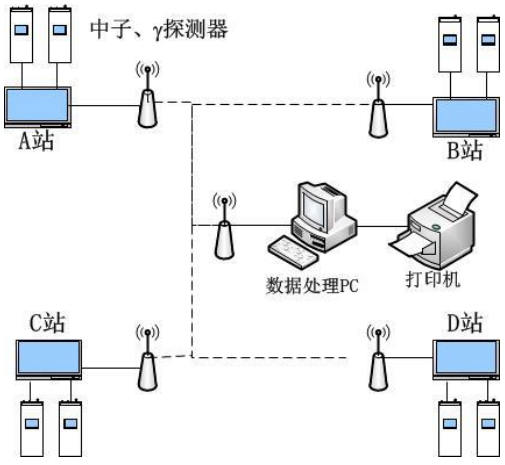


图 4.1.2-11 环境辐射监测系统组成

4.1.2.1.3.8视频监控和对讲装置

同步环大厅、高能线爬升区、科研室及各治疗室内及内部设备间、迷道等主要位置均拟设有若干摄像头，以便工作人员直观的观察各区域内人员的活动情况和设备的运行情况。视频画面在中控室及各治疗操作台、操作室可实时查看。

治疗室与各操作台、操作室之间拟设置双向患者监测对讲系统，确保治疗、摆位验证期间医护人员可通过该对讲按钮与治疗室内的病人进行实时交流。

4.1.2.1.3.9 防夹装置和电离辐射警告标志

质子重离子机房各出入口防护门均设置防夹功能，关门过程中探测到有遮挡物或碰撞到门体时，防护门反向打开，避免人员夹伤。各通道门限位开关、防夹装置及紧急开门装置。

本项目拟在同步环大厅、科研室及各治疗室防护门外的醒目位置设置电离辐射警告标志，在控制区和监督区的入口处位置设置控制区、监督区的标识。

4.1.2.1.3.10 各通道门、紧急开门按钮

科研室及各治疗室门内、外侧均拟设置紧急开门按钮，外侧的紧急开门按钮设置自锁，只有钥匙插入转到运行才可以开门。当遇到意外情况，可按下紧急开门按钮（或从外侧使用机械钥匙）打开通道门，切断束流。同步环大厅入口迷道设对射型红外光电开关，可以有效防止巡检时有人跟随。同步环大厅、科研室及各治疗室门和设备间门，均拟设置限位开关。

表 4.1.2-1 质子重离子机房内安全设施的数量（单位：个）

楼层	场所名称	安全联锁设备	
		名称	数量（个）
B1	治疗室3安装基坑	视频监控摄像头	5
		急停清场盒	1
	治疗室4安装基坑	视频监控摄像头	5
		急停清场盒	1
1F	同步环大厅、高能线水平区和高能线爬升区	束流阻挡器	5
		对射型红外光电开关	2
		急停清场盒	5

	（除治疗室4高能线水平区）	声光报警灯	5
		大功率声光报警灯	1
		红外网络摄像头	1
		视频监控摄像头	9
		区域辐射监测仪	5
		人员出入管理箱	1
		通道门开关门按钮	1
		通道门内紧急开门按钮	1
		限位开关	1
		LED状态显示屏	1
	科研室、治疗室1/2（每间）	急停清场盒	2
		急停按钮	5
		视频监控摄像头	5
		区域辐射监测仪	2（室内、外各1套）
		剂量柱	1
		通道门开关门按钮	1
		通道门内紧急开门按钮	1
		对讲装置	1套
		限位开关	3
	治疗室3及其检修区	急停清场盒	3
		急停按钮	5
		视频监控摄像头	5
		区域辐射监测仪	2（室内、外各1套）
		剂量柱	1
		通道门开关门按钮	1
		通道门内紧急开门按钮	1
		对讲系统	1套
		限位开关	4
	治疗室4及其检修区、治疗室4高能	急停清场盒	3
		急停按钮	5

	线水平区	视频监控摄像头	8
		区域辐射监测仪	2（室内、外各1套）
		剂量柱	1
		通道门开关门按钮	1
		通道门内紧急开门按钮	1
		对讲装置	1套
		限位开关	4
	中央控制室	区域总钥匙箱	1
	5间治疗室控制台	治疗室控制箱（含对讲系统和急停按钮）	5
2F	高能线爬升区	急停清场盒	1
		声光报警灯	1
3F	高能线爬升区	急停清场盒	3
		声光报警灯	3
		视频监控摄像头	6

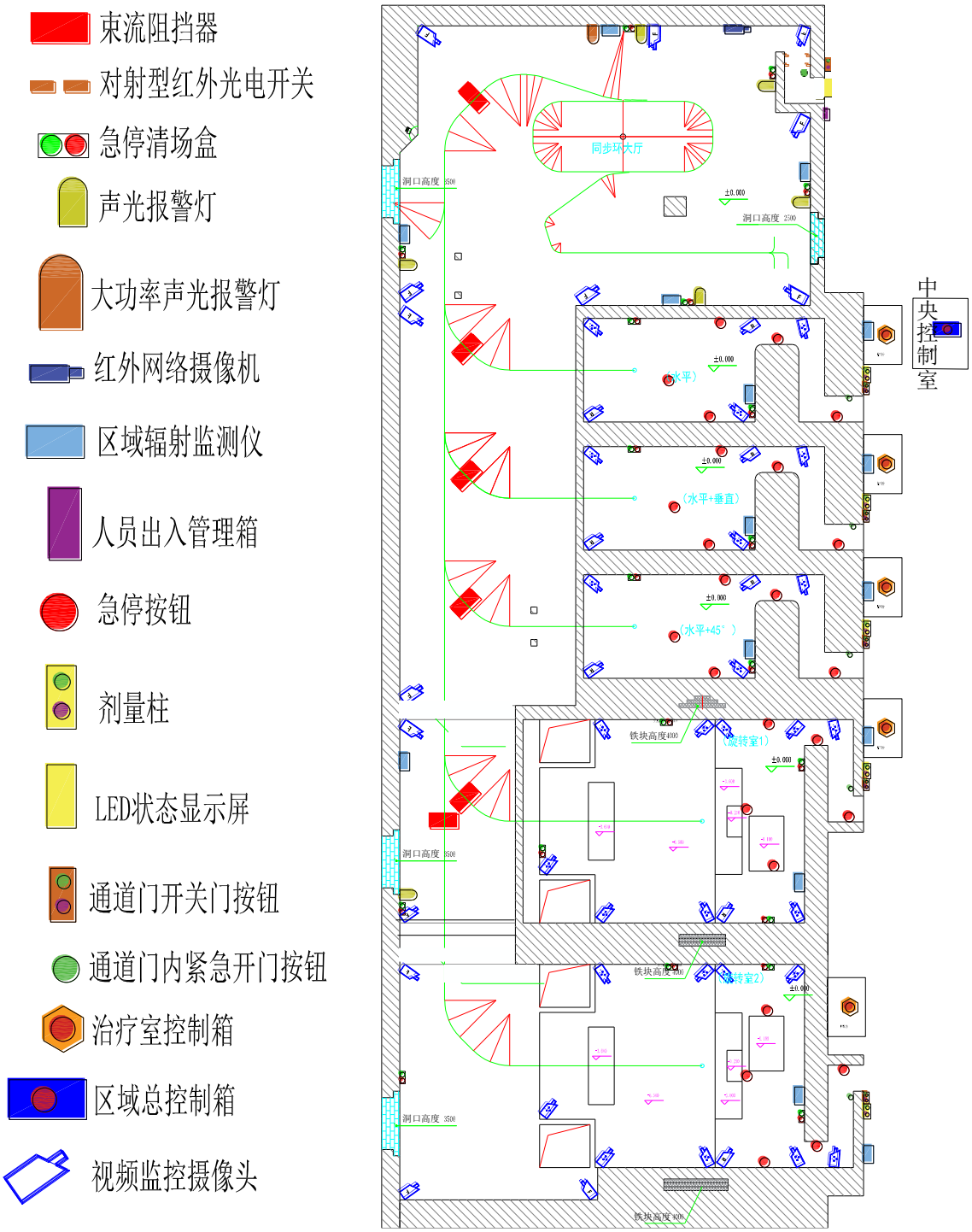


图 4.1.2-12 质子重离子机房内安全联锁设施安装点位（一层）

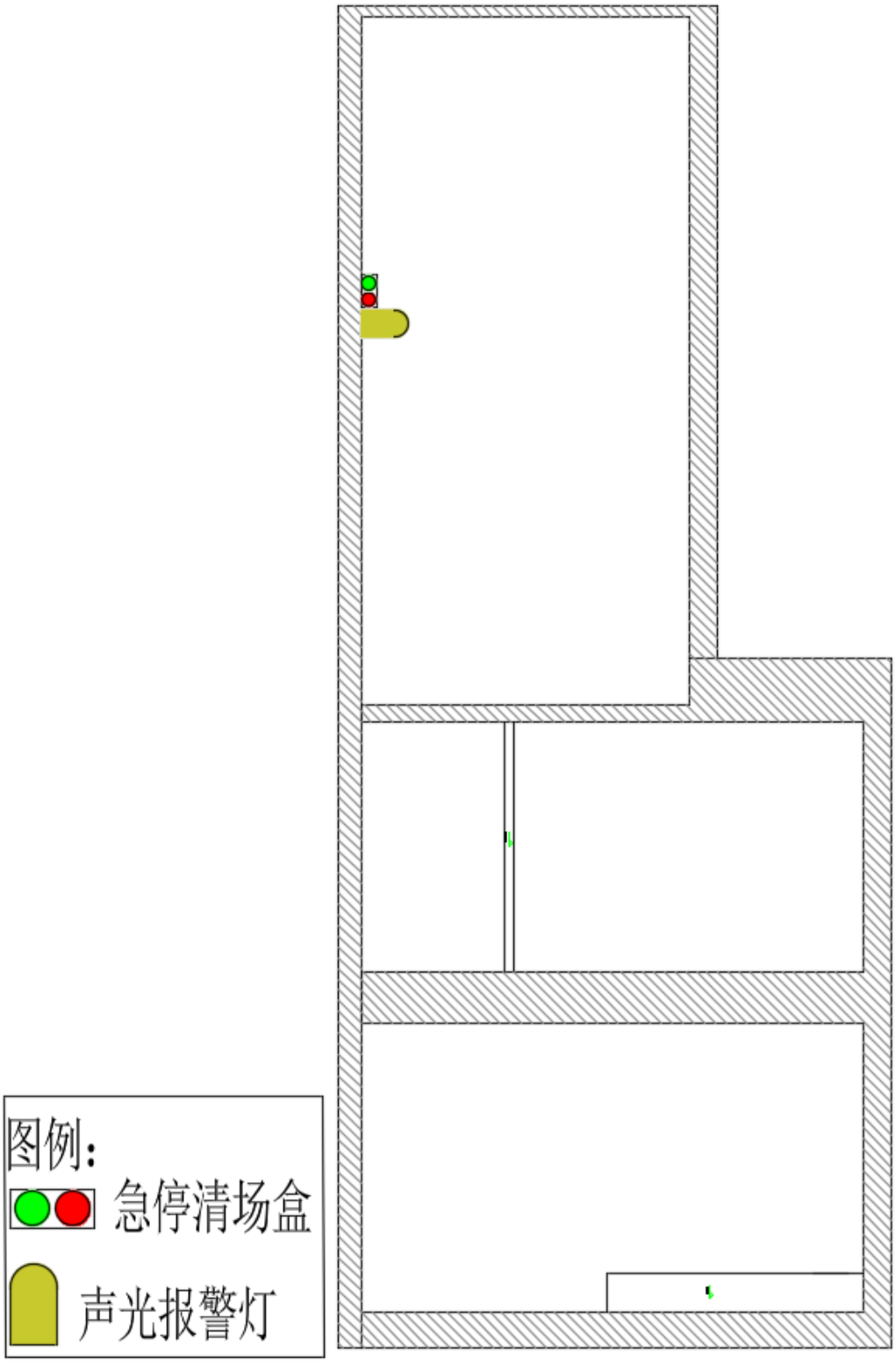


图 4.1.2-13 质子重离子机房内安全联锁设施安装点位（二层）

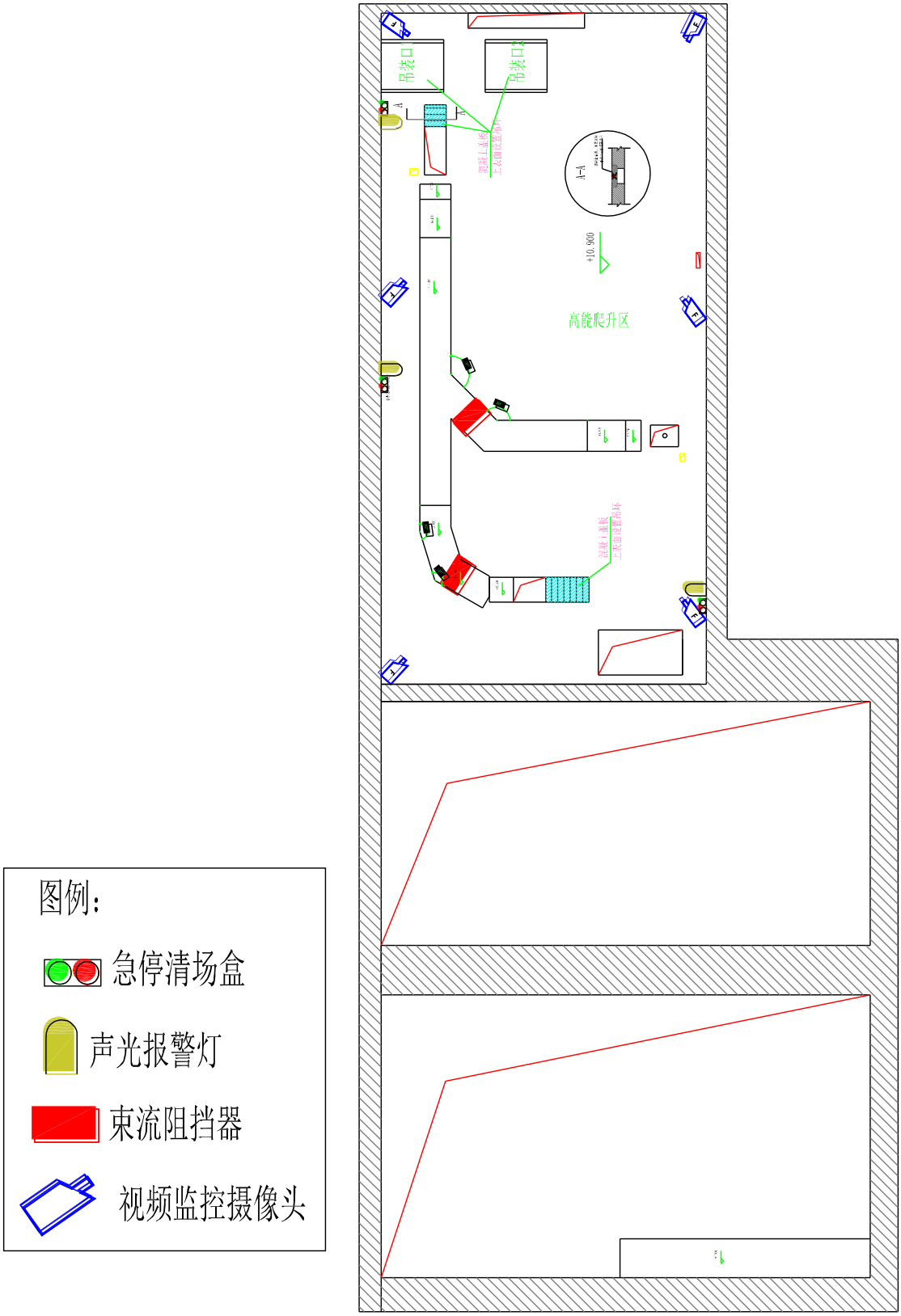


图 4.1.2-14 质子重离子机房内安全联锁设施安装点位（三层）

4.1.2.2 加速器大厅及治疗室和科研室出束条件及切断条件

加速器大厅出束的联锁条件包括 10 个紧急按钮，10 个清场按钮及 1 个人员出入管理箱和 1 个通道门，1 个区域总钥匙确认按钮。加速器大厅出束前，必须满足大厅内所有急停按钮复位，巡检人员按照固定巡检路线按下所有清场按钮后退出加速器大厅，等加速器大厅通道门关闭后，归还人员出入管理箱上所有门禁卡，前往中控室在区域总钥匙箱上刷卡授权按下加速器大厅按钮后，加速器调试人员（物理人员）方可进行开启离子源（ECR）。出束后，除加速器调试人员主动切断束流外，人员也可通过破坏联锁条件切断束流。（巡检有时间窗限制，即在规定时间内未完成巡检则必须重新巡检）

a）控制台或中央控制室：刷卡按下加速器大厅按钮或按下区域总钥匙箱急停按钮。

b）加速器大厅：若有人员滞留加速器大厅，可通过按下加速器大厅内任意一个急停按钮或从加速器大厅内部开启通道门。

加速器大厅出束联锁逻辑图如下所示：

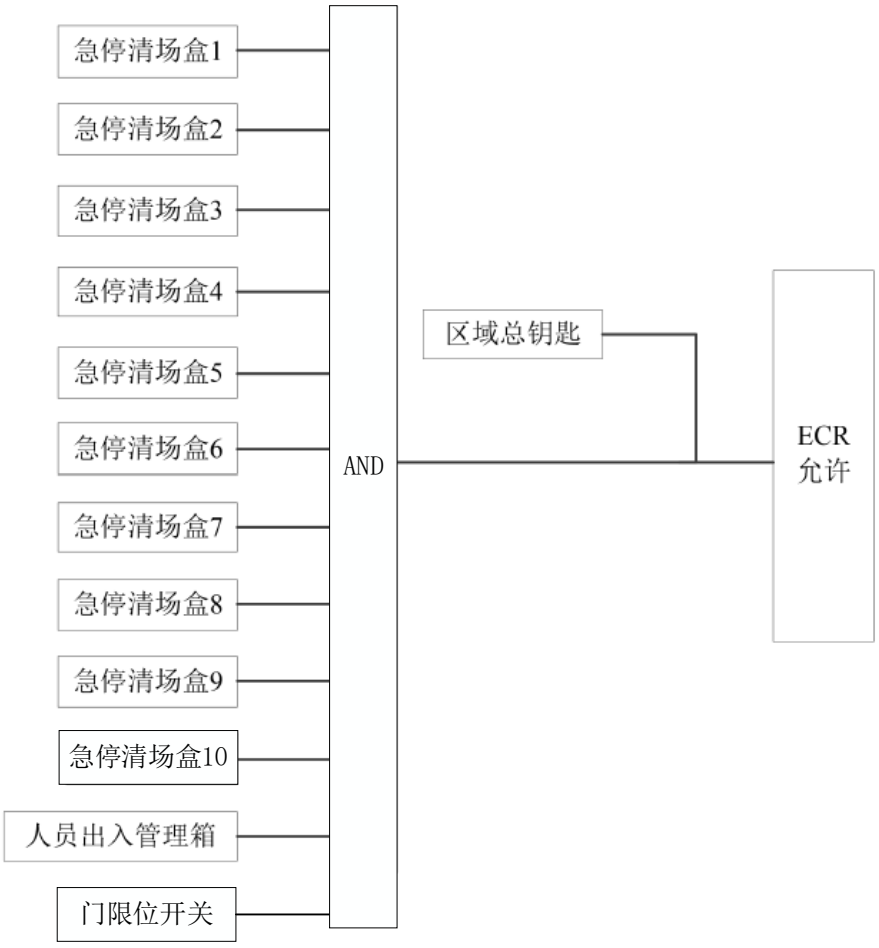


图 4.1.2-15 加速器大厅出束联锁逻辑图

科研室和各治疗室出束的联锁条件包括急停按钮、清场按钮、门磁开关、中控室区域总钥匙及治疗室医生控制台确认按钮。科研室和各治疗室出束的前提条件是加速器大厅首先满足供束条件，然后当医护进入科研室和各治疗室确认急停按钮复位后，巡检科研室和各治疗室内无人员滞留后按下清场按钮，退出科研室和各治疗室，关闭科研室和各治疗室通道门，最后和中控室确认此科研室和各治疗室能否供束。（巡检有时间窗限制，即在规定时间内未完成巡检则必须重新巡检）若可以供束，则通知中控室调试人员在区域总钥匙箱刷卡授权对应治疗室允许按钮，医护人员方可在医生控制台刷卡按下科研室和各治疗室允许，使联锁束流阻挡器离线，此时科研室和各治疗室方可出束。治疗室出束联锁逻辑图如下图所示：

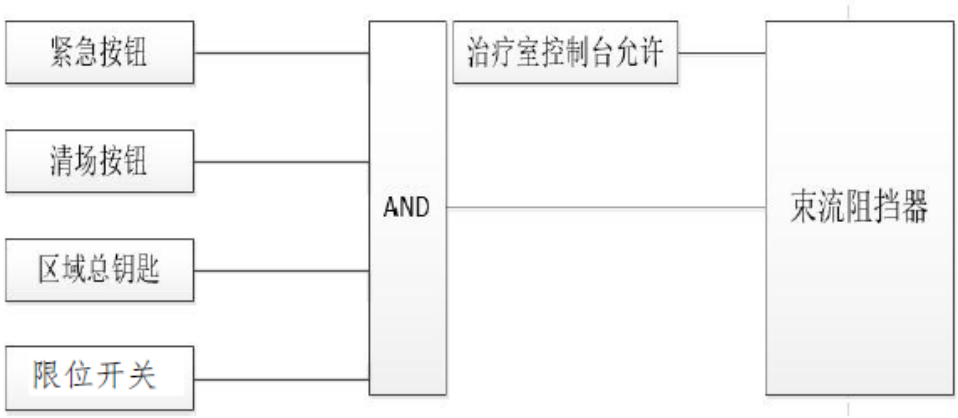


图 4.1.2-16 治疗室出束联锁逻辑图

4.1.2.3 通排风系统

同步环大厅、高能线爬升大厅及治疗室散热量大，运行时由于感生活化作用，空气中含有一定的放射性感生活化气体、尘埃颗粒，会对人体造成内照辐射。放射性物质在主装置区内的扩散量和向环境中的排放量必须执行国家现行标准，遵循“合理、可行、尽量低”的原则。

本项目质子重离子一体化治疗机房各区域均拟采用机械通风的方式，并拟采用负压通风的方式，设计排风量大于送风量以维持室内微负压。质子重离子一体化治疗机房通风系统的设计参数及通风换气次数情况见表 4.1.2-2，各层通风口和风管走向见图 4.1.2-17 至图 4.1.2-20。

表 4.1.2-2 质子重离子一体化治疗机房各区域通风换气设计情况

序号	系统/位置	体积（m^3）	换气次数	排风量（m^3/h）	备注
1	同步环大厅	/	事故：5 次/h，平时：0.5 次/h	事故：150000 平时：15000	全空气空调机组
2	高能线水平区				全空气空调机组
3	高能线爬升区				全空气空调机组
4	治疗室 3 检修区及其上空				全空气空调机组
5					全空气空调机组
6	治疗室 4 检修区及其上空				全空气空调机组
7					全空气空调机组
8	科研室	427	排风不小于 4 次/h	2200	排风热回收机组
9	治疗室 1	427		2200	排风热回收机组
10	治疗室 2	427		2200	排风热回收机组
11	治疗室 3	534		2200	排风热回收机组
12	治疗室 4	534		2200	排风热回收机组

（4）总排气口

质子重离子机房治疗室的排风，经重离子质子中心中部排风井，向上引至屋顶排出，排放高度不低于 18.8m；同步环大厅、高能线爬升大厅和治疗室 3、4 检修区经重离子质子中心北部排风井，向上引至屋顶排出，排放高度不低于 24m。总排气口位于重离子质子中心屋顶中部和北部，如图 4-23 所示，周围非人员长居留场所，符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中“排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置”要求。

根据“5.2.4.2 感生放射性气体排放造成的辐射剂量”分析内容，感生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，本项目感生放射性气体导致公众年有效剂量最大 2.57E-06mSv（具体见表 5.2.4-7），远低于 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值，对周围环境影响很小。因此，总排气口的位置设置是合理的。

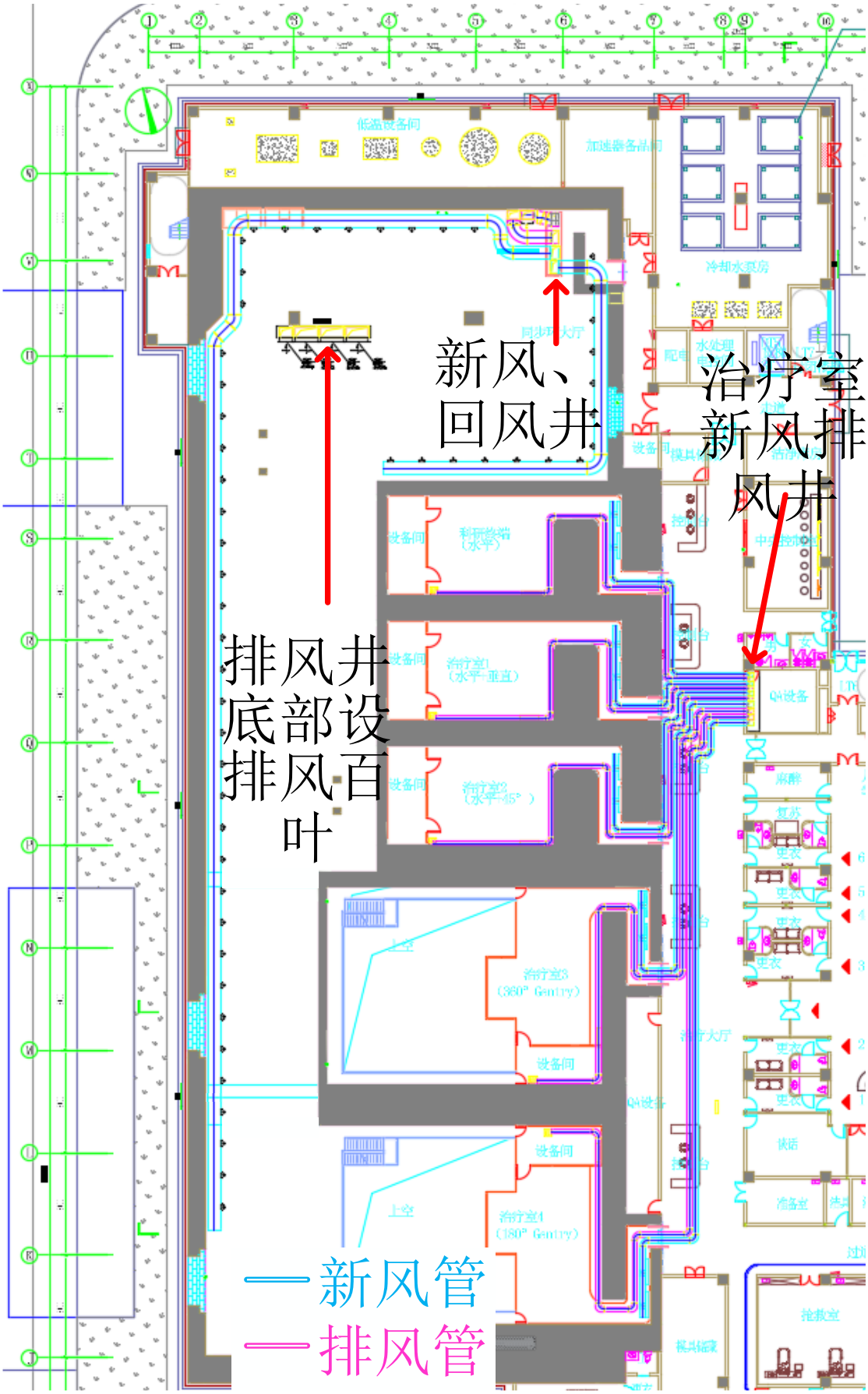


图 4.1.2-17 质子重离子机房通排风管道示意图（一层）

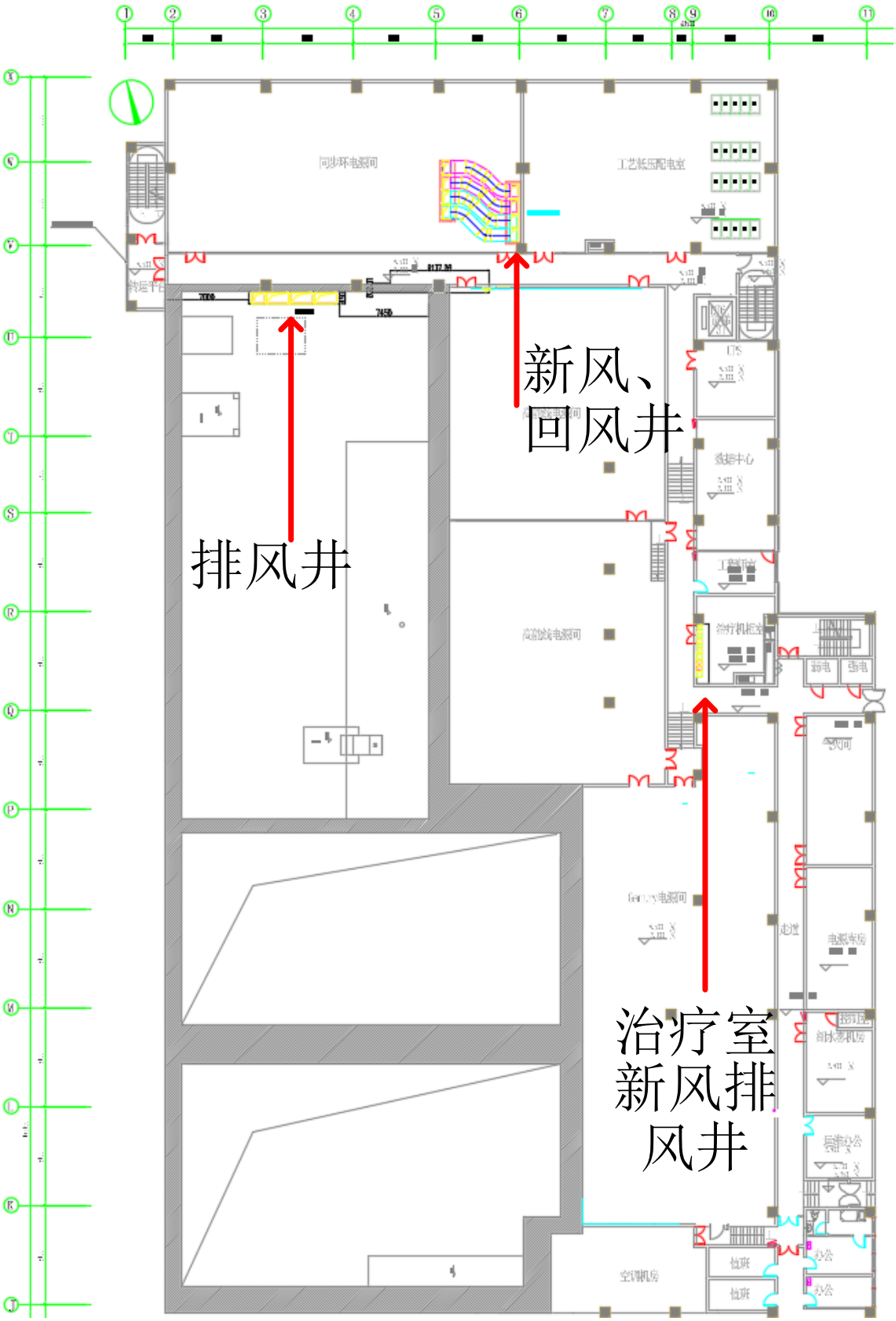


图 4.1.2-18 质子重离子机房通排风管道示意图（二层）

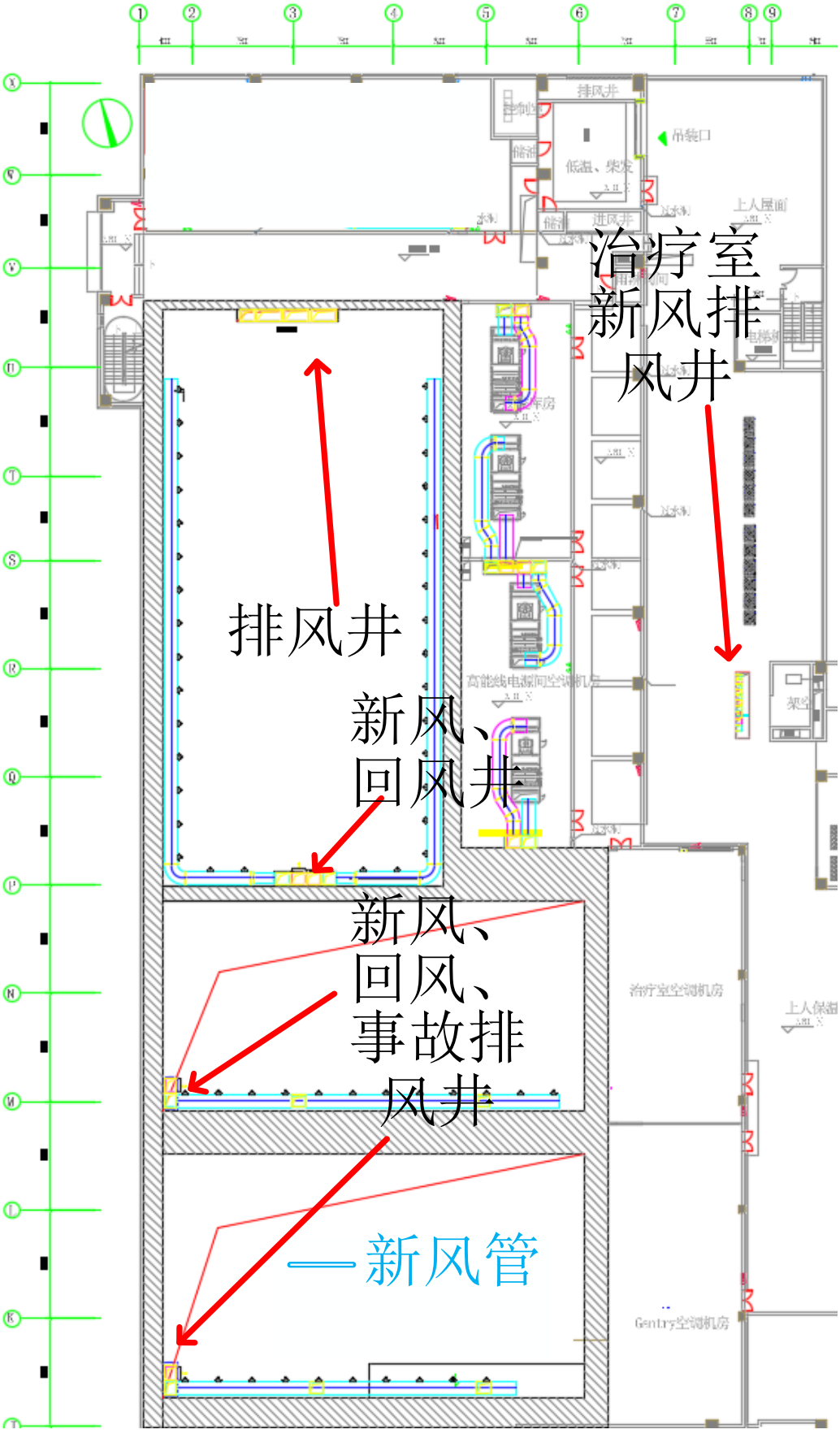


图 4.1.2-19 质子重离子机房通排风管道示意图（三层）

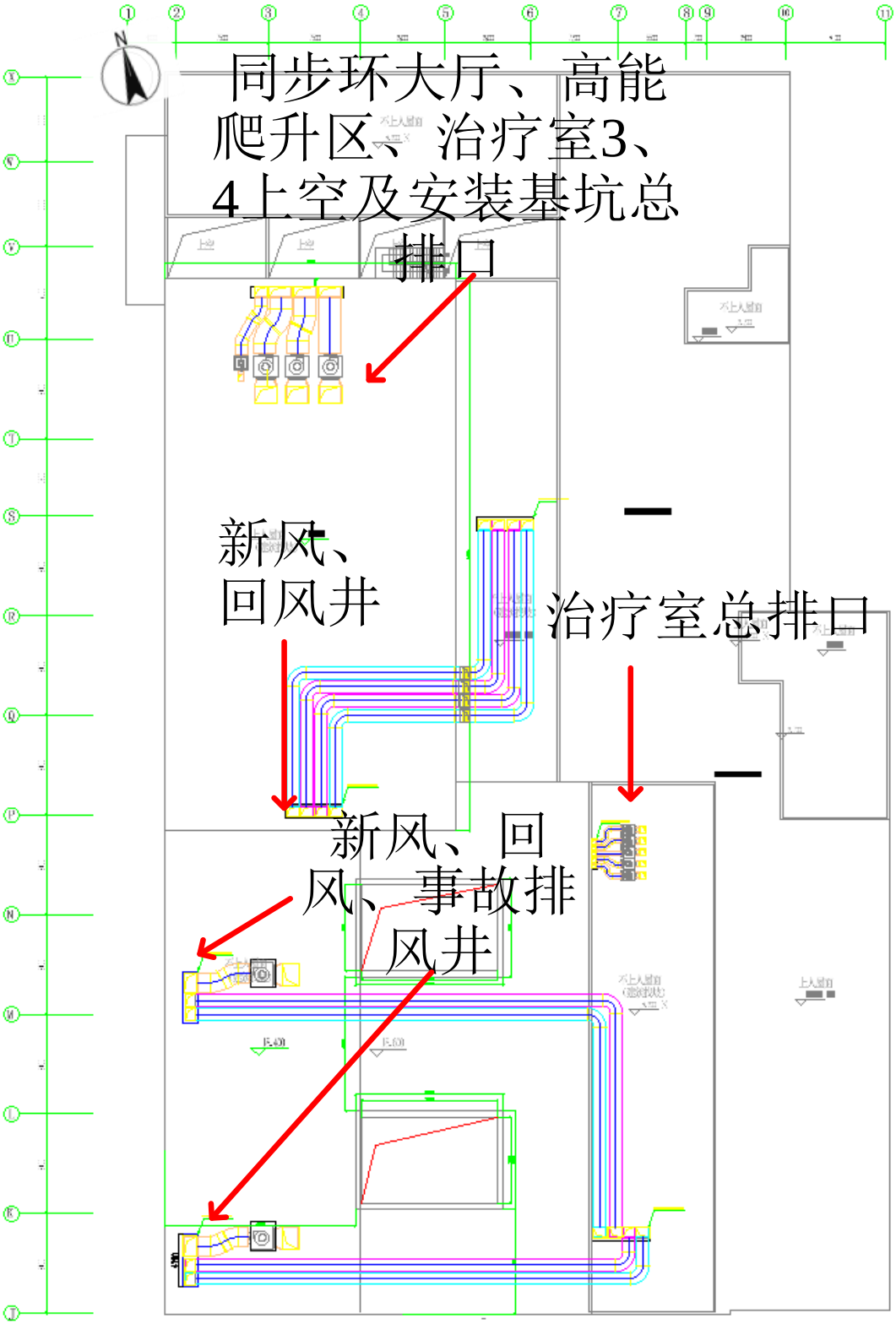


图 4.1.2-20 质子重离子机房总排气口位置示意图（屋顶层）

4.1.2.4 电缆洞口及通风管道洞口

本项目质子重离子一体化治疗机房的穿墙管道主要包括电缆、电气、水冷管线及通风管道洞口，均拟采用直穿的形式，穿墙位置详见表 4.1.2-3。经后文预测，各洞口旁关注点剂量率低于剂量率控制限值。

表 4.1.2-3 质子重离子一体化治疗机房主要管线穿墙情况

楼层	位置	名称	标高	尺寸（mm）及数量
1F（地面回填后标高 0.00m）	科研室、治疗室 1-4 门上方墙体	通风管洞口	标高 3.6m	1000×400，5 个
		工艺电气桥架穿墙孔	标高 3.6m	300×200，18 个
	科研室、治疗室 1-2、治疗室 4 东侧墙体	双层电缆预埋管洞口	标高-0.45m/-0.25m	Φ150，4 组
	科研室、治疗室 1-2 东侧墙体	单层电缆预埋管洞口	标高 3.7m	Φ150，3 组
	科研室、治疗室 1-3 南侧墙体	双层电缆预埋管洞口	标高-0.45m/-0.25m	Φ150，4 组
	科研室、治疗室 1-2 西侧墙体	给排水穿墙孔	标高-0.4m	DN125，3 个
		工艺电缆桥架穿墙孔	标高 3.8m	300×200，3 个
			标高 0.05m	600×200，3 个
			标高 0.05m	300×200，6 个
	同步环大厅顶部墙体	通风管洞口	标高 5.6m	1200×5000，1 个
	同步环大厅北侧墙体	工艺低温桥架穿墙孔	标高 5.05m	1000×200，4 个
	同步环大厅东侧墙体	工艺水冷管线	标高 3.2m	800×500，1 个
	同步环大厅东侧墙体（迷路外墙）	工艺电缆桥架穿墙孔	标高 4m	300×200，1 个
	高能射线爬升区西侧墙体	给排水穿墙孔	标高-0.4m	DN100，4 个
2F（地面标高 5.9m）	高能射线爬升区东墙	工艺电缆桥架穿墙孔	标高 7.3m	800×300，3 个
	高能射线爬升区北墙	工艺电缆桥架穿墙孔	标高 7.65m	1000×300，2 个
		工艺电缆桥架穿墙孔	标高 7.65m	700×300，1 个
	治疗室 3-4 东墙	工艺电气桥架穿墙孔	标高 7.3m	1000×600，4 个

楼层	位置	名称	标高	尺寸（mm）及数量
3F（地面标高 10.9m）	高能射线爬升区东墙	工艺电缆桥架穿墙孔	标高 11.05m	1000×300，3 个
4F（屋顶层）	高能线爬升区顶部	通风管洞口	标高 24m	7500×950，1 个
		通风管洞口	标高 24m	4700×1100，1 个
	治疗室 3 顶部	通风管洞口	标高 18.8m	4200×1200，1 个
	治疗室 4 顶部	通风管洞口	标高 18.8m	4200×1200，1 个

4.1.3 放射性三废处理

4.1.3.1 放射性废气及其处理措施

（1）废气来源

根据“3.3.1.3.1 空气的感生放射性”分析内容，质子重离子放射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 ^{11}C（$T_{1/2}[^{11}C]$=20.39min）、^{13}N（$T_{1/2}[^{13}N]$=9.965min）、^{15}O（$T_{1/2}[^{15}O]$=2.037min）和 ^{41}Ar（$T_{1/2}[^{41}Ar]$=1.8h）。各核素年产生量见表 3.3.1-6。

（2）废气处理措施

质子重离子放射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。本项目设有通排风系统，根据“4.1.2.3 通排风系统”可知，质子重离子一体化治疗机房的科研室及各治疗室、同步环大厅和高能线爬升大厅均设有排风口，装置运行过程中产生的感生放射性气体由各区域屋面排入环境，排风口设高效过滤器。

根据“5.2.4.2 感生放射性气体排放造成的辐射剂量”分析内容，感生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，本项目感生放射性气体导致公众年有效剂量最大为 2.57E-06mSv（具体见表 5.2.4-7），远低于 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值，对周围环境影响很小。

4.1.3.2 放射性废液及其处理措施

质子重离子一体化治疗系统在正常运行工况下，工艺水系统管路内冷却水循环使用不外排，在设备检修或发生冷却水泄漏事故时才需要排放，将产生感生放射性废水。

本项目质子重离子一体化治疗系统所用冷却水均为去离子水，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如表 3.3.1-10 所示。除 ^{7}Be、^{3}H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间可以快速衰变至较低水平。根据对放射性废液感生放射性核素活度浓度的计算结果（表 3.3.1-11），本项目质子重离子一体化治疗系统可能产生感生放射性的冷却水中 ^{3}H 和 ^{7}Be 的活度浓度不大于 6.65E+02Bq/L，饱和活度不大于 2.85E+06Bq，远低于 ^{3}H 和 ^{7}Be 的单次排放限值 1 ALI_{min} 和单月排放限值 10 ALI_{min}。

本项目质子重离子机房同步环大厅西北角拟设置 2 个事故收集池，尺寸（长×宽×

深）为 3m×1.5m×2.6m，单个事故收集池有效贮存容积约为 11.7m^3，在一层治疗室 3 西侧拟设置 1 个事故收集池，尺寸（长×宽×深）为 2m×1.5m×2.9m，事故收集池有效贮存容积约为 8.7m^3；治疗室 4 地下一层安装基坑西南角拟设置 1 个事故收集池，尺寸（长×宽×深）为 3m×1.5m×2m，事故收集池有效贮存容积约为 9m^3。若出现设备维修或发生冷却水泄漏事故，可能被活化的冷却水排入事故收集池。各事故收集池位置见图 4.1.3-1。

本项目 4 个事故收集池池底和池壁拟采用钢筋混凝土结构并做防水防腐处理，池顶拟采用 5mm 厚钢盖板。相关区域拟设置排水地沟和防倒流地漏，泄漏的感生放射性废水将按 1%坡度通过排水地沟、地漏通过自留的方式汇集到相应事故收集池。

事故收集池上设有取样口，放射性废液在排放前必须进行取样测量，放射性废液中主要核素 ^{3}H 和 ^{7}Be 满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的相关规定（豁免活度浓度：^{3}H 1.0E+06Bq/g，^{7}Be 1.0E+03Bq/g；豁免活度：^{3}H 1.0E+09Bq，^{7}Be 1.0E+07Bq；单次排放限值 $1ALI_{min}$：^{3}H 1.11E+09Bq，^{7}Be 3.85E+08Bq），且总 α、总 β 满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）中表 2 的相关要求（总 α：1Bq/L，总 β：10Bq/L），方可作为一般废水排放。

事故收集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，通过管道将废液排入医院污水管网。每次排放需记录存档，记录废液来源、排放量、活度浓度监测结果、排放去向等信息。

综上所述，质子重离子放射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产生冷却水，本项目产生的放射性废液活度远低于排放限值，且采取了有效的废液收集和暂存措施。因此，放射性废液对环境的影响很小。

4.1.3.3 放射性固体废物及其处理措施

4.1.3.3.1 放射性固体废物来源

本项目质子重离子一体化治疗系统运行过程中将产生感生放射性固体废物，主要包括加速器维护维修时产生的废弃的加速器结构部件等，加速器停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的核素与质子治疗系统类似，主要是 ^{54}Mn、^{51}Cr、^{52}Mn、^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。此外，冷却水循环系统使用的聚酯纤维滤芯和放射性废气活性炭吸附装置中定期更换的废弃滤芯和活性炭也作为放射性固体废物管理。

这些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下表。停机后感生放射性主要来自 ^{3}H、^{7}Be、^{32}P、^{46}Sc、^{47}Sc、^{48}V、^{51}Cr、^{52}Mn、^{54}Mn、^{55}Fe、^{59}Fe、^{56}Co 等中长寿命放射性核素。

表 4.1.3-1 活化结构部件主要感生放射性核素及其半衰期

放射性核素	半衰期	放射性核素	半衰期
^{3}H	12.3a	^{51}Cr	27.8d
^{7}Be	53.6d	^{52}Mn	5.55d
^{32}P	14.3d	^{54}Mn	300d
^{46}Sc	83.8d	^{55}Fe	2.94a
^{47}Sc	3.43d	^{59}Fe	44.495d
^{48}V	16.0d	/	/

4.1.3.3.2 放射性固体废物处理措施

建设单位拟在质子重离子机房内 3F 高能射线爬升区东北侧设置 2.2m 高不锈钢围栏作为放射性固体废物间，该放射性废物间仅用于暂存质子重离子放射治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固体废物，不用于存放其他备件，房间尺寸约 3m×2m×2.2m（长×宽×高），容积约为 13.2m^3，具体位置见图 4.1.3-1。

放射性废物间内设若干废物柜/废物箱（具体数量根据医院运行期间实际产生的放射性固体废物量确定），门外拟设置电离辐射警告标志和中文标签。对剂量率水平较高的部件，需暂存在带锁的屏蔽容器内。对于表面剂量率水平较低的废物，直接袋装后集中暂存。屏蔽容器或废物袋上贴有警示标志和标签，标明废物名称、剂量率水平和存放日期等信息。

待废物暂存量达到一定量，由医院委托有资质单位进行集中测量分析：

对于满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中解控要求的（具体见本报告的表 1.4.3-3）：

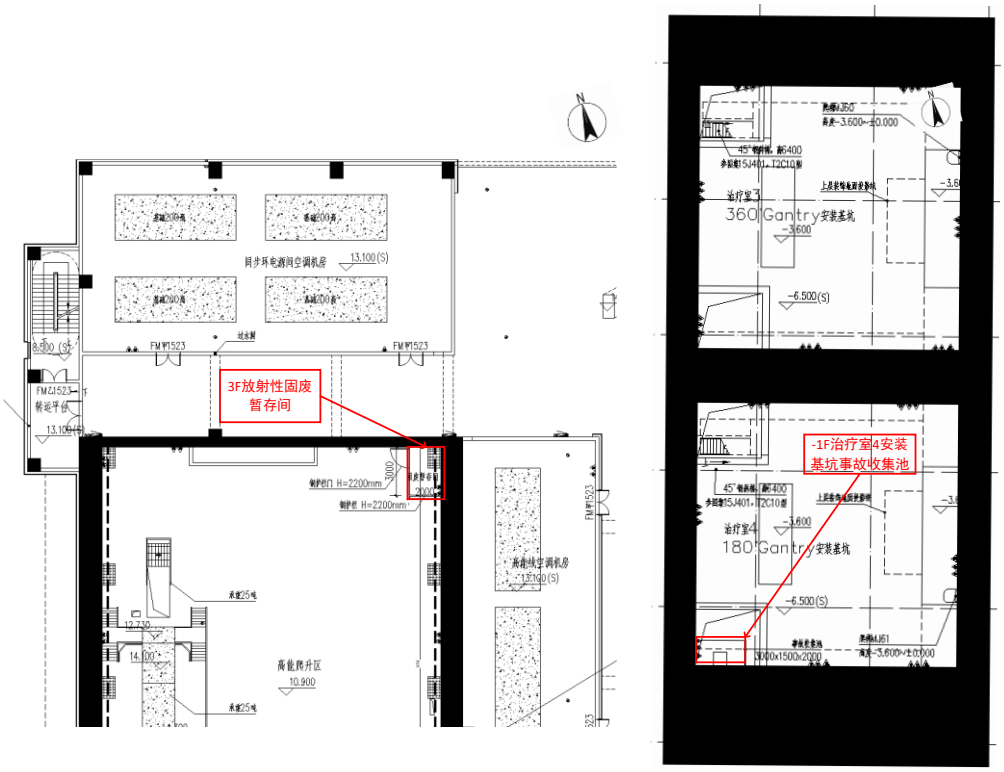
（1）可回收利用的部件，由兰州泰基回收后复用。

（2）不能回收利用的部件，经审管部门认可后，解控后按一般固体废物处理。

对于不满足解控要求的，属于放射性废物，医院不能自行处理，需委托有资质单位处理。

医院应建立放射性固体废物台账，对每次放射性固体废物的贮存和处置情况进行

记录并存档，具体记录内容包括固体废物名称、废物量、剂量率监测结果、是否满足解控要求、最终处置情况等。



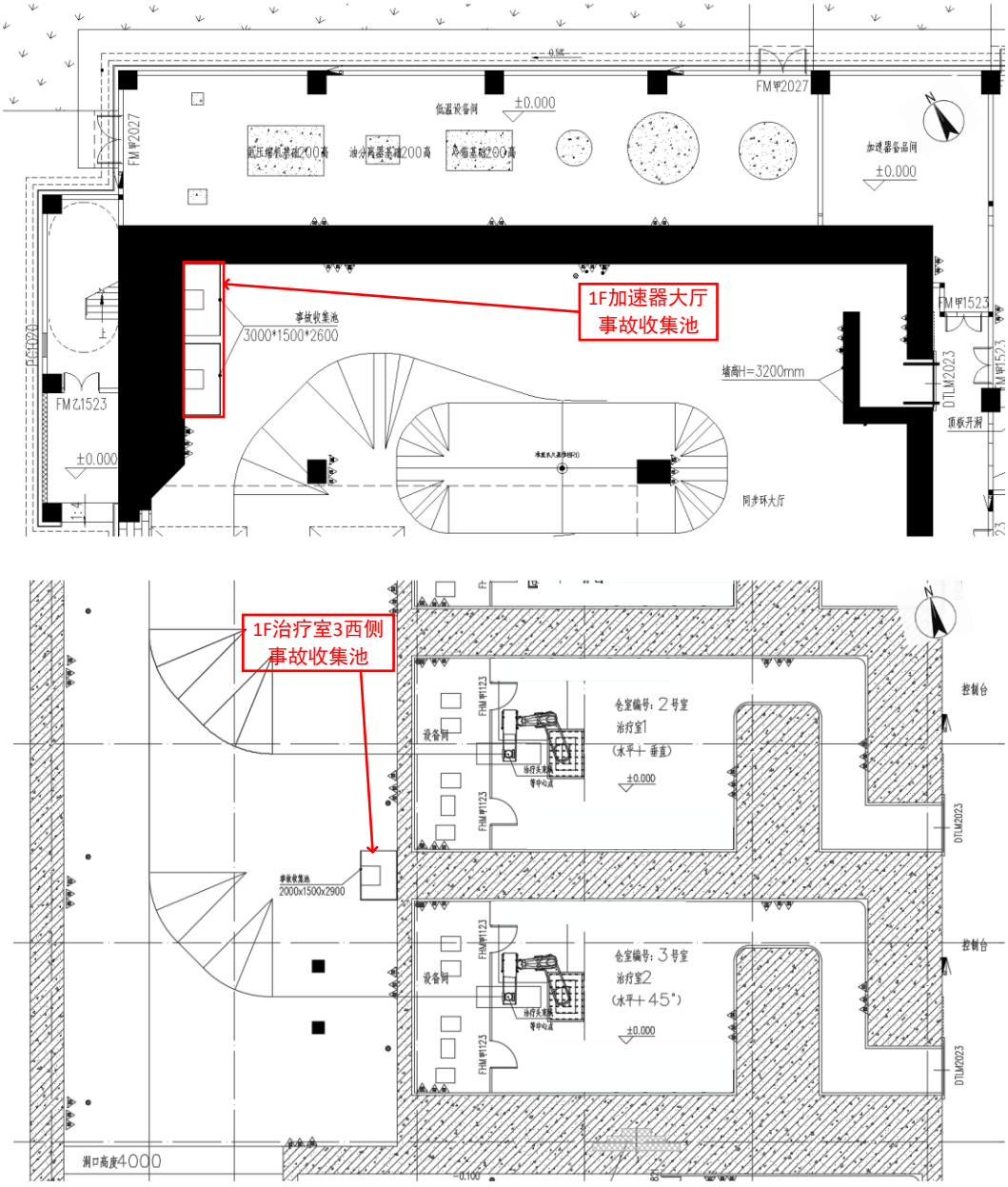


图 4.1.3-1 事故收集池和放射性废物间位置示意图

4.1.4 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析

质子重离子放射治疗系统拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）和《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中相关要求的对比情况列于下表。

表 4-7 拟采取的辐射安全与防护措施与标准相关要求对比

与《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中相关要求的对比情况			
标准要求		本项目建设情况	是否符合
5 选址、布局与分区要求	5.1.1 放射治疗场所应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	质子重离子机房拟建于重离子质子中心内部，重离子质子中心属于医院医疗用房。	符合
	5.1.2 放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设在多层建筑物的底层的一端尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。	质子重离子机房为四层结构，集中建设在重离子质子中心的负一层、一层、二层和三层，重离子质子中心无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集处，无人员流动性大的商业活动区域。	符合
	5.2.1 放射治疗场所应分为控制区和监督区。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。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，但需经常对其职业照射条件进行监督和评价的区划定为监督区。	工作场所按控制区和监督区划分，其中质子重离子机房内部为控制区，质子重离子机房屏蔽墙体外四周相邻场所均为监督区。	符合
6 放射治疗场所辐射安全与防护要求	6.1.1 放射治疗室屏蔽设计按照额定最大能量、最大剂量率、最大工作负荷、最大照射野等条件和参数进行计算，同时应充分考虑所有初、次级辐射对治疗室邻近场所中驻留人员的照射。	屏蔽设计时，对每个束流损失点均考虑了最高能量和最大流强的条件进行计算，同时考虑了所有初级、次级辐射的影响。	符合
	6.1.2 放射治疗室屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能，符合最优化要求质子重离子加速器，须考虑中子屏蔽。	质子重离子机房主体屏蔽墙体采用密度不低于 2.35g/cm^3 的普通混凝土，治疗室 3 和 4 在混凝土墙体内增加额外的铁块屏蔽，经后文预测防护门处剂量率可满足要求，无需额外屏蔽。	符合
	6.1.3 管线穿越屏蔽体时应采取不影响其屏蔽效果的方式，并进行屏蔽补偿。应充分考虑防护门与墙体的搭接，确保满足屏蔽体外的辐射防护要求。	质子重离子机房科研室及各治疗室、加速器大厅均采用迷路设计，其门上方穿墙风管采用直穿的方式，根据预测，穿墙风管不影响科研室及各治疗室、加速器大厅、高能线爬升区防护能力。防护门无需采取额外屏蔽防护。	符合
	6.1.4 剂量控制的要求	机房屏蔽体外各剂量率控制水平选择由区域的周剂量参考控制水平计算得出导出剂量率参考控制水平和由居留因子确定的各	符合

		关注点的高剂量率参考控制水平中的较小值，本项目质子重离子机房各关注点处的剂量率均低于对应剂量率控制水平。	
	6.2.1 放射治疗工作场所，应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等： a)放射治疗工作场所的入口处应设置电离辐射警告标志；b)放射治疗工作场所控制区进出口及其他适当位置应设电离辐射警告标志和工作状态指示灯；c)控制室应设有在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统。	a)质子重离子放疗区入口处设电离辐射警告标志。 b)质子重离子区的控制区进出口明显位置处设置醒目的电离辐射警告标志，在监督区入口处的适当位置设置表明监督区的标牌。 c)质子重离子机房设有摄像头，并设置双向患者监测对讲系统，控制室内的医护人员可通过该对讲系统与治疗室内的患者进行实时交流。	符合
	6.2.2 质子重离子加速器大厅和治疗室内(一般在迷道的内入口处)应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内或机房门附近。	质子重离子加速器大厅及科研室及各治疗室拟在迷道内口附近设置固定式辐射剂量监测仪(可监测 X-γ 辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率)，异常情况下有报警功能，在中控室、控制台等均可显示实时剂量率监测值，	符合
	6.2.3 放射治疗相关的辐射工作场所，应设置防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全联锁措施： a)质子重离子加速器大厅和治疗室应设置门机联锁装置，防护门未完全关闭状态不能出束，出束状态下开门即停止出束； b)质子重离子加速器大厅和治疗室应设室内紧急开门装置，防护门应设置防夹伤功能； c)质子重离子加速器大厅和束流输运线隧道内、治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁和控制室内应设急停开关。急停开关应有醒目标识及文字显示确保上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发； d)应设置清场巡检系统、门钥匙开关，身份识别系统。质子重离子加速器大厅和束流输运线隧道内建立分区清场巡检和束流控制的逻辑关系，清场巡检系统应考虑清场巡检的最长响应时间和分区调试情况的联锁设置。日常清场巡检时，如超出设定的清场巡检响应时间，需重新进行清场巡检； e)应考虑建立调试、检修、运行维护人员的人身安全联锁系	a)机房联锁门与质子重离子放射治疗系统联锁，机房门处于打开状态时，质子重离子放射治疗系统无法出束，出束期间打开机房门即停止出束。 b)质子重离子机房内部设有开门装置，不需要验证权限，机房内的人员可随时开门离开；防护门都设置了防夹功能。 c) 拟在质子重离子控制室控制台、治疗室/机房迷道出入口、防护门内侧、治疗室四周墙壁、加速器大厅、高能线爬升区设置多个急停开关及急停清场盒，急停按钮拟设置醒目中文标识，并能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。 d) 本项目质子重离子治疗系统拟设置清场巡检系统、人员出入管理箱、门禁卡。按照规定路线、时间清场巡检后，方可启动束流闸。如超出设定的清场巡检响应时间，需重新进行清场巡检。 e) 本项目质子重离子治疗系统拟设置调试、检修、运行维护人员的人身安全联锁系统，人员年剂量超过 5mSv/a，不能进入质子重离子机房内。 f)安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位且在控制室内通	符合

	统，将调试、检修、运行维护人员的受照剂量与进入控制区的权限实施联锁管控； f)安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位并通过控制台才能重新启动放疗活动；任何联锁旁路应通过管理制度进行审批，并在单位辐射安全管理机构的见证下进行，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。	过控制系统才能重新建立联锁，启动装置出束；安全联锁装置不得设置旁路，维修维护后必须恢复原状。任何联锁旁路应通过管理制度进行审批，并在医院辐射安全管理机构的见证下进行，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。	
7 操作的辐射安全与防护要求	7.1 医疗机构应对辐射工作场所的安全联锁系统定期进行试验自查，保存自查记录，保证安全联锁的正常有效运行。	医院制定了相应的规章制度，定期对安全联锁系统进行检查，确保其能够正常有效运行，检查内容和整改措施记录存档。	符合
	7.2 治疗期间，应有两名及以上人员协调操作，认真做好当班记录，严格执行交接班制度:加速器试用、调试、检修期间，控制室须有工作人员值守。	每次治疗期间，将至少有两名工作人员同时在场。制定工作人员岗位职责，要求操作人员认真做好当班记录，严格执行交接班制度；质子重离子放射治疗系统工作（包括开机出束、停机检修维护）期间，控制室内始终有人。	符合
	7.3 任何人员未经授权或允许不得进入控制区。工作人员须在确认放射治疗或者治疗室束流已经终止的情况下方可进入放射治疗室，进入质子重离子装置的治疗室前须携带个人剂量报警仪。检修人员进入质子重离子加速器大厅和束流输运通道区域前，应先进行工作场所辐射监测，在单位辐射安全管理机构批准后方可进入。进入质子重离子加速器大厅和束流输运通道区域的参观人员须在辐射工作人员带领下进入。	医院拟按照规定制定相关制度，进入质子重离子治疗室、加速器大厅、高能线爬升区拟设置门禁卡，规定放射工作人员在确认加速器终止出束后方可进入机房内。 当辐射安全联锁系统的联锁建立后，装置出束期间，人员从机房外无法利用钥匙/门禁卡开门。只有当联锁解除后，才允许钥匙/门禁卡开门。进入机房内部时需佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。 根据装置运维方兰州泰基公司的工作制度，对于进入检修人员进入质子重离子加速器大厅和高能线爬升区域前，应先进行工作场所辐射监测，在单位辐射安全管理机构批准后方可进入。 有可能接触高放射性水平结构部件的区域工作前，必须由现场工程师对工作区域的辐射剂量率水平进行监测并记录，再根据本次任务可能的工作时间，估算出本次任务期间工作人员最大受照剂量，并以此为依据制定工作计划，安排工作量，设置工作人员单次工作累积剂量报警阈值。 医院制定相应的参观工作管理制度，规定进入机房内部的参观人员须在辐射工作人员带领下讲入。	符合
8 放射性废物	8.2.2.1 质子重离子加速器调试和运行期间，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止其及加速器靶等组成部件，	质子重离子机房内设置单独的放射性废物间，仅用于暂存质子重离子放射治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固	符合

管理要求	在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理。拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。	体废物。 待废物暂存量达到一定量，由医院委托有资质单位进行集中测量分析：	
	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，集中放置在固态废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平送交有资质的单位收贮。	对于满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中解控要求的（具体见本报告的表 1.4.3-3）： （1）可回收利用的部件，由兰州泰基回收后复用。 （2）不能回收利用的部件，经审管部门认可后，解控后按一般固体废物处理。	符合
	8.2.2.3 建立放射性固态废物台账，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态废物处置，并做好存档记录。	对于不满足解控要求的，属于放射性废物，医院不能自行处理，需委托有资质单位处理。 医院应建立放射性固体废物台账，对每次放射性固体废物的贮存和处置情况进行记录并存档，具体记录内容包括固体废物名称、废物量、剂量率监测结果、是否满足解控要求、最终处置情况等。	符合
	8.3 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。	质子重离子机房内设置 4 个事故收集池。若出现设备维修或发生冷却水泄漏事故，可能被活化的冷却水（即用于冷却同步加速器部件的回路中的冷却水）排入事故收集池。 事故收集池上设有取样口，放射性废液在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.3.1 节”所列中放射性废液排放标准，方可排放。事故收集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，通过管道将废液排入医院污水管网。每次排放需记录存档，记录废液来源、排放量、活度浓度监测结果、排放去向等信息。	符合
	8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。	质子重离子机房内科研室及各治疗室设通排风系统，换气次数均大于 4 次，排风口拟设置于重离子质子中心屋顶，排放高度不低于 18.8m。排气口位置不在有门、窗或人流较大的过道等位置。	符合
	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。	质子重离子放射治疗系统停机后，质子重离子机房加强通风排气，停机一段时间后，人员才能进入机房。	符合
与《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）符合性分析表			

标准要求	本项目建设情况	是否符合
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。	滑轨 CT、X 射线管拟安装在治疗室内配合质子重离子放射治疗前定位，治疗室四周墙体、顶棚、地板采用足够厚混凝土，考虑了邻室(含楼上和楼下)及周围场所的人员防护与安全。	符合
6.1.3 每台固定使用的 X 射线设备应设有单独的机房，机房应满足使用设备的布局要求。 6.1.5 双管头 X 射线设备机房有效使用面积不小于 30m^2，单边长不小于 4.5m。	滑轨 CT、X 射线管在质子重离子治疗装置出束前单独使用。 滑轨 CT、X 射线管使用时位于治疗室内，治疗室最小有效使用面积、最小单边长符合要求。	符合
6.2.1 X 射线设备机房：有用线束方向铅当量 2mm，非有用线束方向铅当量 2mm。 6.2.3 机房的门和窗关闭时，也要满足 6.2.1 的要求。	滑轨 CT、X 射线管使用时位于治疗室内，科研室及各治疗室的屏蔽防护均不低于 GBZ130-2020 表 3 的规定	符合
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。 7.1.9 工作人员应在有屏蔽的防护设施内进行曝光操作，并应通过观察窗等密切观察受检者状态。	治疗室设有监控系统，显示设备设置在控制室，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。	符合
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。 6.4.2 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。	本项目有用线束未直接照射门、窗、管线口和工作人员操作位，机房内设有通风系统。机房内无与该设备诊断工作无关的杂物。	符合
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。 7.1.5 X 射线设备曝光时，应关闭与机房相通的门、窗。	本项目治疗室门外均设置电离辐射警告标志；治疗室门上方有醒目的工作状态指示灯和可视警示语句；电动推拉式治疗室门设有防夹装置，同时设有门灯联锁装置，工作状态指示灯能与治疗室门有效关联。已在候诊区设置放射防护注意事项告知栏。	符合
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 0.025 mmPb；甲状腺、性腺防护用品铅当量应不小于 0.5 mmPb；移动铅防护屏风铅当量应不小	本项目拟配备的防护用品种类和数量均满足要求。	符合

于 2 mmPb。		

4.2 直线加速器

4.2.1 工作场所布局及屏蔽防护设计

（1）工作场所布局分析及分区情况

①工作场所布局分析

本项目拟建2间加速器机房位于重离子质子中心一层南侧，下方为地下土层，2间直线加速器机房南北方向并排排列，符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中“放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。”的要求。2间加速器机房的下层均为地下土层，顶棚上方为不上人屋面、进排风机房、空调外机等。

表 4.2.1-1 加速器机房相邻环境状况

机房名称	东面	南面	西面	北面	顶棚	下层
1 号加速器机房	控制室、辅助设备间	2 号加速器机房	院内道路及绿化	院内道路	不上人屋面、进排风机房	地下土层
2 号加速器机房	控制室、辅助设备间	院内道路及绿化	院内道路及绿化	1 号加速器机房	不上人屋面、进排风机房、空调外机	地下土层

本项目2间直线加速器机房均设有控制室和辅助设备间等附属用房；机房内设有L型迷道，主射线不向迷道照射，且控制室避开了主束方向，机房迷道口处安装有防护门对射线进行屏蔽。

加速器机房布局均符合《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第1部分：一般原则》(GBZ/T201.1-2007)中“治疗装置控制室应与治疗机房分离”的规定及《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中“X 射线管治疗设备的治疗机房、术中放射治疗手术室可不设迷路；γ 刀治疗设备的治疗机房，根据场所空间和环境条件，确定是否选用迷路；其他治疗机房均应设置迷路”、“治疗设备辅助机械、电器、水冷设备，凡是可以与治疗设备分离的，尽可能设置于治疗机房外”等规定，布局基本合理。

②工作场所分区情况

为了便于加强管理，切实做好辐射安全防护工作，按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，在辐射工作场所内划出控制区和监督区，

在项目运营期间采取分区管理措施。

医院拟对加速器的工作场所以加速器机房屏蔽墙和防护门等屏蔽体为界，加速器机房（包含迷路）划定为控制区，加速器机房控制室、辅助设备间、防护门及屏蔽墙外 1m 处划定为监督区。两区划分图见附图 4。

（2）辐射防护屏蔽设计

本项目新增 2 台直线加速器，位于重离子质子中心一层南侧。根据院方提供的资料，加速器机房四侧墙体、顶棚拟采用标准混凝土（ρ=2.35g/cm^3）浇筑而成，防护门拟采用铅板制作。

本项目加速器机房辐射防护屏蔽设计参数表见表 4.2.1-2。加速器机房平面图和剖面图见下图。

表 4.2.1-2 加速器机房辐射屏蔽设计技术参数

机房名称	方位	区域	照射线束	材料及厚度
1 号直线加速器机房	东墙	迷路外墙	非有用线束	1500mm 混凝土
		迷路内墙	非有用线束	1200-1500mm 混凝土
	南墙	主屏蔽区	有用线束	3000mm 混凝土（宽度 5400mm）
		次屏蔽区	非有用线束	1700mm 混凝土
	西墙	侧屏蔽墙	非有用线束	1900mm 混凝土
	北墙	主屏蔽区	有用线束	3200mm 混凝土（宽度 4500mm）
		次屏蔽区	非有用线束	2200mm 混凝土
	顶棚	主屏蔽区	有用线束	3000mm 混凝土（宽度 4700mm）
		次屏蔽区	非有用线束	1500mm 混凝土
	防护门		非有用线束	15mm 铅
	治疗室南北长度		10300mm	
	治疗室东西宽度		12200mm	
	迷道宽度		2200mm	
	迷道内入口宽度		2000mm	
	迷道外入口（门洞）宽度		1800mm	
	机房净高		4750mm	
2 号直线加速器机房	东墙	迷路外墙	非有用线束	1500mm 混凝土
		迷路内墙	非有用线束	1200-1500mm 混凝土
	南墙	主屏蔽区	有用线束	3200mm 混凝土（宽度 4500mm）
		次屏蔽区	非有用线束	2200mm 混凝土
	西墙	侧屏蔽墙	非有用线束	1900mm 混凝土
	北墙	主屏蔽区	有用线束	3000mm 混凝土（宽度 5400mm）
		次屏蔽区	非有用线束	1700mm 混凝土
	顶棚	主屏蔽区	有用线束	3000mm 混凝土（宽度 4700mm）
		次屏蔽区	非有用线束	1500mm 混凝土
	防护门		非有用线束	15mm 铅
	治疗室南北长度		10300mm	
	治疗室东西宽度		12200mm	

	迷道宽度	2200mm
	迷道内入口宽度	2000mm
	迷道外入口（门洞）宽度	1800mm
	机房净高	4750mm

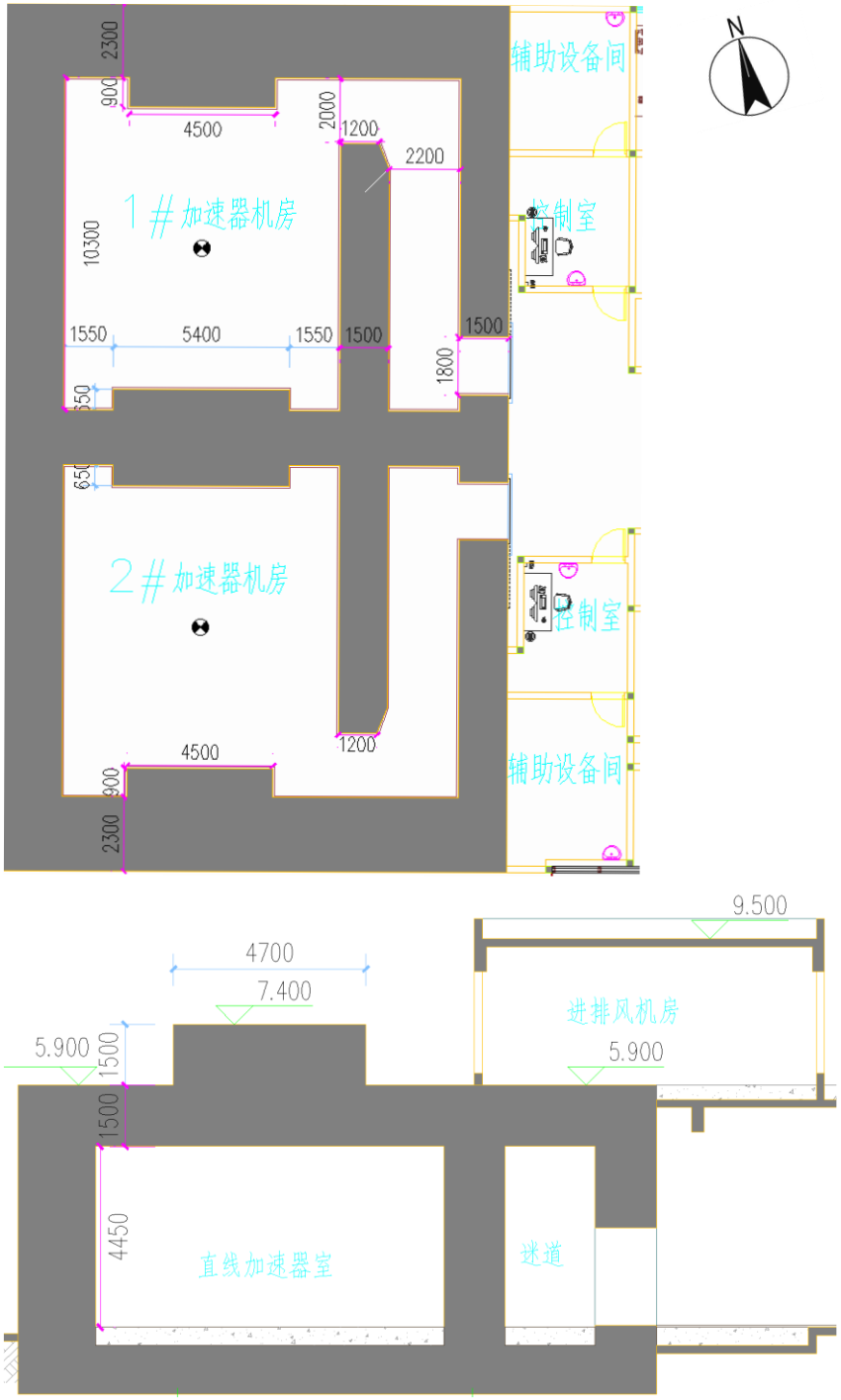


图 4.2.1-1 加速器机房平面图和剖面图

4.2.2 安全防护措施

（1）设备固有安全性

本项目直线加速器拟购于正规厂家，采用目前较先进的技术，设备各项安全措施齐备，本身具备多种安全防护措施。

①控制台上的显示装置可显示辐射类型、标称能量、照射时间、吸收剂量、治疗方式等参数，操作人员可以随时了解设备运行情况。

②病人剂量监测与治疗控制安全联锁。为保证病人治疗剂量准确，不致出现超剂量照射，系统设置了治疗剂量联锁、治疗时间联锁和治疗中旋转机架角度联锁。当治疗剂量、时间及治疗机头旋转角度其中之一到达设定值时，联锁装置会自动停止照射。

③运动使能开关。为防止工作人员误操作造成事故，在手控盒两侧设置了运动使能开关，只有当左右两侧的开关同时按下时才有可能对机器运动部件进行起动和控制。

④急停开关。当发现异常后，按下此开关，机器将自动切断加速器主电源。

⑤剂量测试系统。在控制系统主菜单中有“剂量系统测试”部分，可以随时了解病人剂量情况。

⑥密码设置。设置有密码，操作密码只有具体操作人员掌握，只有输入正确的密码后才可能进行操作和参数的修改等。

⑦系统操作联锁。加速器设置了硬件联锁，在非正常操作或在异常情况下，可以停止机器运行或切断电源，以备特殊情况下应急之用。系统操作联锁情况见下表 4.2.2-1。

表 4.2.2-1 加速器硬件联锁一览表

名称	装置部位	功能	备注
急停开关	主机架、治疗床及控制台	紧急切断系统控制电源	意外情况下可以切断控制电源
碰撞保护环	附件盘、影子盘	发生碰撞时停止机械部件运动	发生碰撞时自动停止机器运动
运动部件二级限位开关	旋转机架、治疗床升降、辐射头旋转	二级限位开关，切断动力电源	异常情况切断动力电源

（2）加速器机房辐射防护设施设计

①固定式剂量报警装置：加速器机房内迷路内入口处设置固定式剂量报警装置，显示及报警系统位于控制室，可对剂量率实时查看，超过设定值时可发出警报，用于控制室内人员通过剂量率水平了解加速器的工作状态（是否在出束），以避免在加速器出束状态下误入机房内。

②视频监视系统、对讲系统：单个加速器机房的治疗室和控制室之间安装有监视器 4 个（防护门迷道内 1 个、迷道内墙 1 个、侧屏蔽墙体 2 个）、双向对讲装置 1 套，

控制室内能通过视频监视治疗室内患者的治疗情况，并通过对讲系统与室内人员联系，以便于医师在控制室观察患者在治疗室的状况、及时处理意外情况。视频监控数量和位置能实时、全方位观察治疗室及迷道内状况，可以保障治疗室内及迷道不留视频监控死角，因此视频监控布局数量及位置可行。

③急停按钮：加速器设备自带急停按钮。医院拟在每台加速器机房的控制室、防护门内侧、治疗室四周墙壁各设置急停按钮。机房内急停按钮设在工作人员易于接触的地方（距离地面 1.2m 高处）安装，且相互串联，每个急停按钮独立工作，按下任意开关可使设备停止出束，以避免机房内人员尚未完全撤离或误入的情况下受到误照射。急停按钮按下后，只有人工就地复位并通过控制台才能重新启动设备；急停按钮应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且易于触发。

④设置门机安全联锁，防护门未完全关闭时不能出束，出束状态下开门停止出束。防护门上方设有工作状态指示灯与加速器关联，机房门关闭后，装置才能启动，装置启动时工作状态指示灯亮起。防护门为电动移门，防护门与墙搭接处应尽可能减小缝隙漏泄辐射，防护门宽于门洞的部分应大于“门-墙”间隙的十倍。防护门设红外防挤压装置，防止人员被夹伤。另外防护门靠近机房内侧设紧急开门装置，在紧急情况下能从机房内开门。

⑤加速器机房入口处设置电离辐射警告标志和中文警示说明。

直线加速器机房内安全防护设施分布如图 4.2.2-1 所示。

（3）其他防护措施

①每个辐射工作人员均配备 1 枚 TLD 个人剂量计。

②配备 1 台便携式 X-γ 剂量率监测仪；每间机房配备 1 套固定式剂量报警仪、2 台个人剂量报警仪

③操作室上张贴相应的辐射工作制度、操作规程、岗位职责等；

④受检者出入口门外地面应设置黄色警戒线，告诫无关人员请勿靠近。

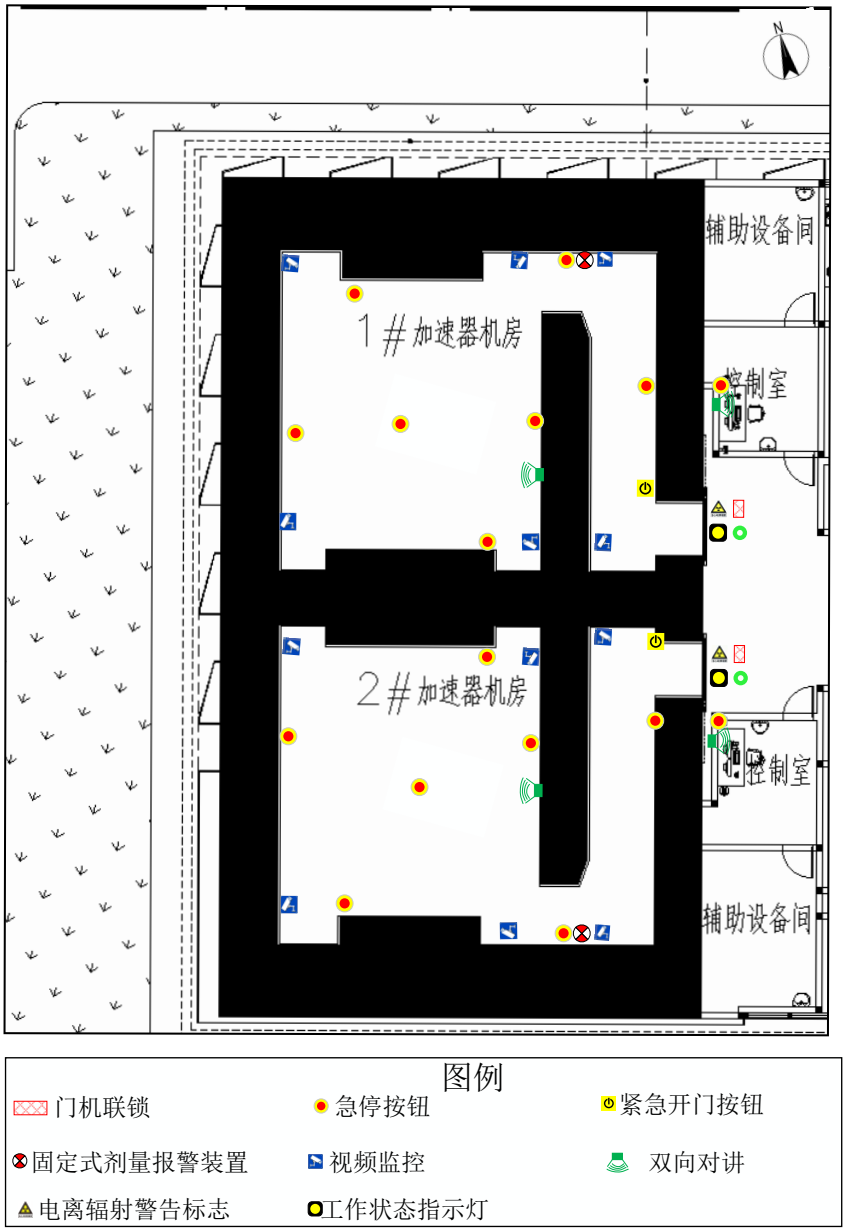


图 4.2.2-1 加速器机房急停按钮、监视系统等安全设施分布示意图

4.2.3 机房通风、电缆管线设置

①通风

加速器运行过程中，射线会与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物等有害气体。机房设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，新风口排风口呈现上进下排，对角设置。机房内将设置 2 个进风口和 2 个排风口，排风和进风管道拟穿过迷道顶部防护墙进入机房，绕经迷道内墙进入治疗室，排风口将设置在机房非主束投照部位墙角处，风管底部（吸风口）离地 30～40cm，再沿墙体内壁向上接近顶板处进出机房。通排风管线布置示意图见图 4.2.3-1。新风管道、排风管道穿墙部分均拟采用 45° 斜穿，

穿墙口与机房内有迷路墙阻挡，机房内射线不会直接照向通风管口，射线经迷路散射、管道多次折返等衰减，并且排风管道穿墙处两端外包铅防护材料，可有效补偿管线穿墙的影响，预埋风管穿墙剖面示意图见图 4.2.-2。

废气经排风系统一并引至重离子质子中心二层进排风机房屋面排放，排气口不朝向门、窗或人流量较大的过道等位置。排风机设计排风量为 2400m^3/h，加速器机房体积约为 468m^3，机房换气次数不小于 5 次/h，符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中放射治疗机房通风换气次数应不小于 4 次/h 的规定。

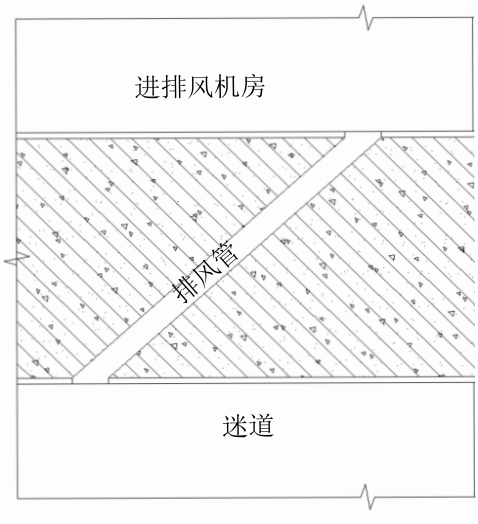


图 4.2.3-1 加速器机房通排风管线穿墙示意图

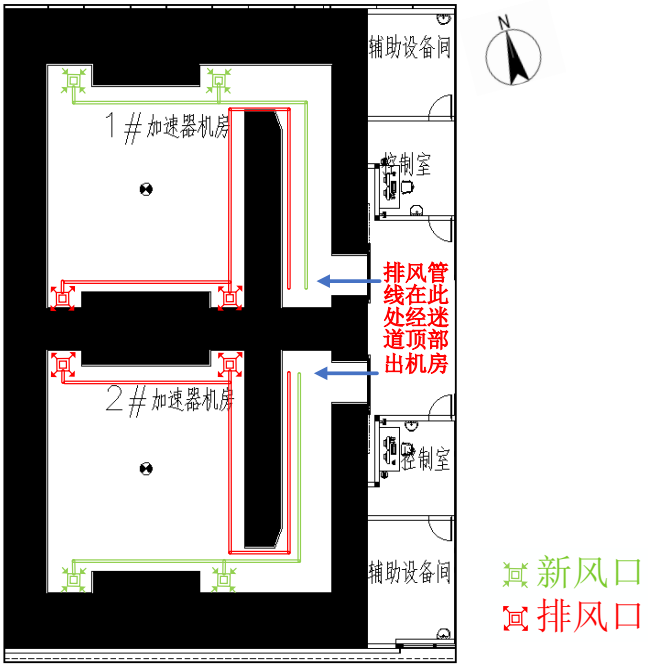


图 4.2.3-2 加速器机房通排风示意图

②电缆布设

加速器治疗室与控制室操作台之间的各种电缆管线，室内部分以地沟形式在地坪以下布设，采用“U”型路径设计，电缆沟盖板采用 2mm 厚铅板覆盖，从而保证不减弱屏蔽墙体的屏蔽效果。其他所有电、水、气管、物理测试管线布设走向必须符合辐射屏蔽防护要求，并在非主束投照部位采用迷道形式穿越墙体或顶盖，如在防护墙体部位设置开关箱等嵌入式电气设备，要在箱体后背衬填相应厚度的铅板。电缆管线以“U”字型穿过迷路外墙，管道穿墙方式下图所示。

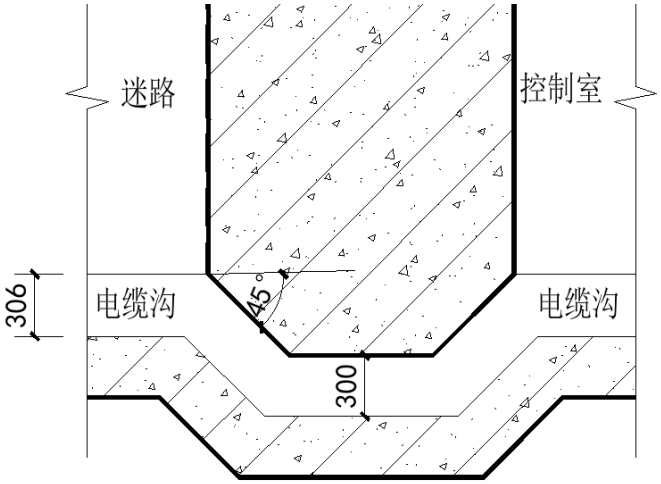


图 4.2.3-3 加速器机房电缆穿墙示意图

4.2.4 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析

加速器拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中相关要求的对比情况列于下表。

《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中相关防护要求	**项目设计情况**	**符合性**
放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。	加速器建设场地位于重离子质子中心一层南侧，处于建筑底层的一端，机房位于医院主体建筑内，为医疗用房。重离子质子中心无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集处，无人员流动性大的商业活动区域。	符合
放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下，控制区包括治疗室（含迷路）等场所。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（如加速器治疗室相邻的控制室及与机房相邻区域等）。	加速器采取分区管理，将加速器机房内部划为控制区，治疗机房防护门上设计安装电离辐射警告标志，严格控制非相关人员进入控制区；将加速器机房屏蔽墙体外四周相邻场所均为监督区，定期对监督区进行监督和评价。	符合
放射治疗室屏蔽设计应按照额定最大能量、最大剂量率、最大工作负荷、最大照射野等条件和参数进行计算，同时应充分	加速器机房有用线束照射的防护墙（包括顶棚）按初级辐射防护要求进行设计，其余按照次级辐射防护要求进行设计。通过预测分	符合

考虑所有初、次级辐射对治疗室邻近场所中驻留人员的照射。	析，治疗机房有用线束照射方向的防护设计满足主射线束的防护要求，其余方向的防护设计满足泄漏辐射及散射辐射的防护要求。	
管线穿越屏蔽体时应采取不影响其屏蔽效果的方式，并进行屏蔽补偿。应充分考虑防护门与墙的搭接，确保满足屏蔽体外的辐射防护要求。	新风管道、排风管道穿墙部分均拟采用 45°斜穿，并且排风管道穿墙处两端外包铅防护材料，可有效补偿管线穿墙的影响；电缆管线采用“U”型路径设计，电缆沟盖板采用 2mm 厚铅板覆盖，从而保证不减弱屏蔽墙体的屏蔽效果。防护门与墙搭接处应尽可能减小缝隙漏泄辐射，防护门宽于门洞的部分大于“门-墙”间隙的十倍，确保满足屏蔽体外的辐射防护要求。	
放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。	本项目加速器机房设计安装动力通排风系统用于治疗机房正常通风。机房内设置 1 个进风口、1个排风口，排风量为2400m³/h，通风换气次数不小于 4 次/小时。废气引至二层进排风机房屋面排放，排气口不朝向门、窗或人流量较大的过道等位置。	符合
放射治疗室应设置室内紧急开门装置，防护门应设置防夹伤功能；放射治疗室应设置门－机联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束照射，出束状态下开门停止出束或放射源回到治疗设备的安全位置。	本项目加速器设置防护门和迷路。治疗机房防护门与加速器高压联锁，以实现防护门开启或意外开启状态下，无法出束或自动停止出束。机房防护门设计安装开门装置，机房迷路内设置紧急开门装置，在应急情况下，可以由防护门内侧（迷路一侧）开启防护门，防护门设施有防夹功能。	符合
放射治疗工作场所，应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等。	本项目加速器机房防护门上设计安装工作状态指示灯和电离辐射警告标志。其中，工作状态指示灯与加速器联锁，显示加速器工作状态。	符合
应在放射治疗设备的治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁内设置急停按钮。控制室应设有在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷路区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统。	本项目加速器机房和控制室设计安装紧急停机装置，以便应急状态下停止出束。紧急停机开关分布于控制室控制台上、治疗床侧、机房内墙上、迷路墙上等位置，便于机房内人员观察到且易于触发。设置监控和对讲系统。	符合
医用电子加速器治疗室（一般在迷路的内入口处）应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内或机房门附近。	本项目加速器机房迷路内口处设置固定式剂量报警装置。	符合

4.3 模拟定位 CT

4.3.1 辐射工作场所分区

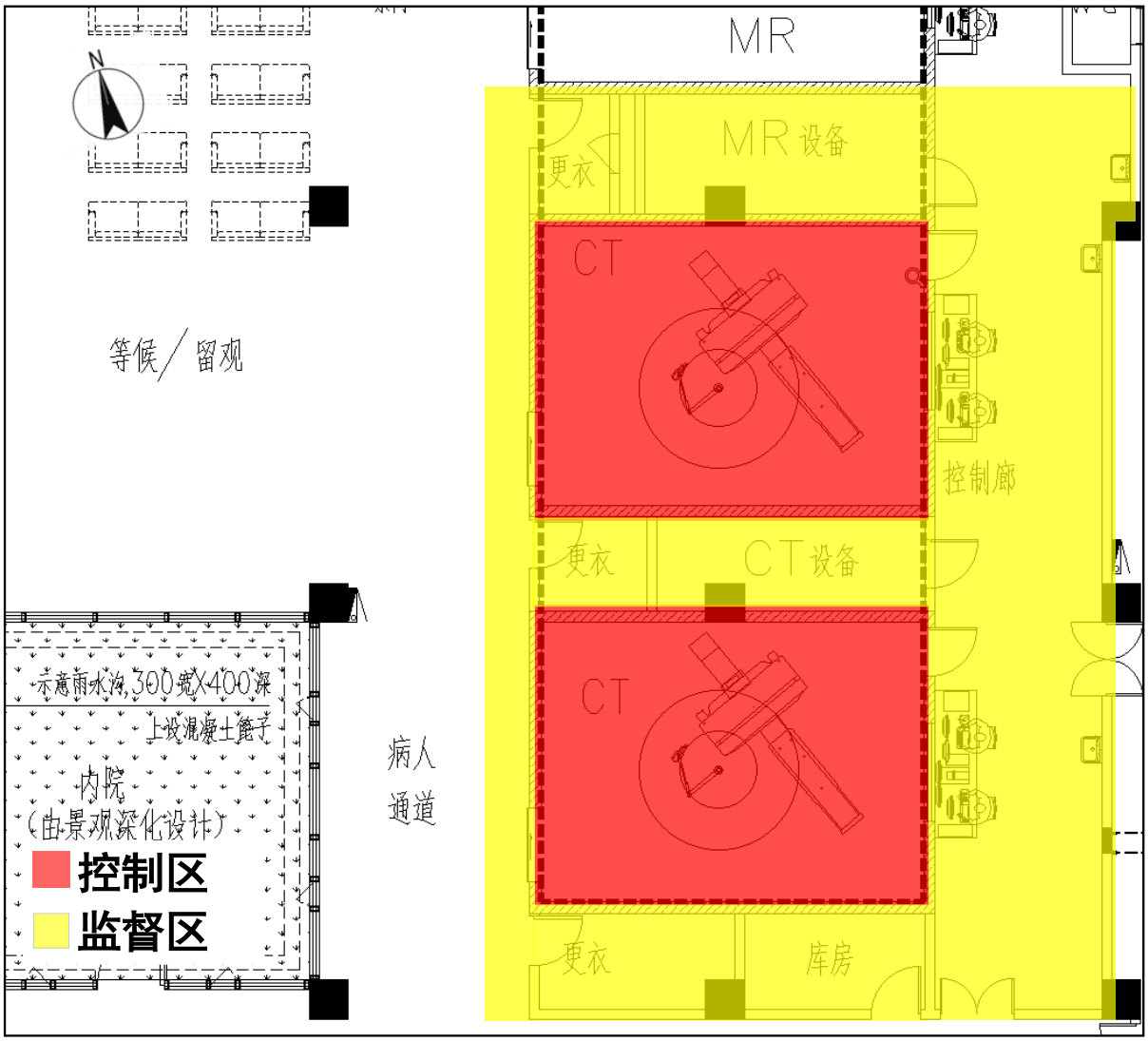


图 4.3.1-1 模拟定位 CT 辐射工作场所分区图

模拟定位 CT 机房为控制区；控制廊、CT 设备间、更衣室、库房、MR 设备间和防护门及屏蔽墙外 1m 处为监督区。机房门外有醒目的电离辐射警示牌和工作指示灯，避免人员误闯入或误照射。

4.3.2 机房布局和辐射屏蔽

模拟定位 CT 机与《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）要求对照情况列于下表。

表 4.3.2-1 模拟定位 CT 机房有效使用面积及单边长度一览表

工作场所	拟设置情况		GBZ130-2020 表 2 标准要求		符合性评价
	最小单边长度（m）	最小有效使用面积（m^2）	最小单边长度（m）	最小有效使用面积（m^2）	
模拟定位 CT 机房	5.8	42.5	4.5	30	符合

表 4.3.2-2 模拟定位 CT 机房屏蔽防护情况一览表

工作场所	防护设施	屏蔽材料及厚度（折算铅当量：mmPb）	GBZ130-2020 表 3 标准要求	符合性评价
模拟定位 CT 机房	四侧墙体	240mm 混凝土实心砖+30mm 硫酸钡防护涂料（3.5mmPb）	有用线束及非有用线束方向铅当量均不小于 2.5mmPb	符合
	顶棚	120mm 混凝土+30mm 硫酸钡防护涂料（2.6mmPb）		符合
	防护门	内衬 4mm 铅板（4.0 mmPb）		符合
	观察窗	4.0mmPb 铅玻璃（4.0 mmPb）		符合

注：①混凝土密度取 2.35g/cm^3 核算等效屏蔽厚度，折算铅当量参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中附录 C 中式（C.1）和式（C.2）及表 C.2，在 150kV 电压下，150mm 混凝土折算为 1.4mmPb 当量，120mm 混凝土折算为 1.1mmPb 当量。
②由于《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）附录 C 中未提供实心砖在 150kV 电压的拟合参数，无法进行等效铅当量厚度的计算，故参考《放射防护实用手册》（主编赵兰才、张丹枫）表 6.14，实心砖密度取 1.65g/cm^3 核算等效屏蔽厚度，24cm 实心砖折算为 2mmPb 当量。
③硫酸钡防护涂料密度不低于 3.2g/cm^3，20mm 厚度等效为 1mmPb。

4.3.3 拟采取的其他安全与防护措施

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

（1）机房外部的控制室设有监控系统的显示装置，机房内设有摄像头，位置便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

（2）机房设有通排风系统，保持良好的通风。

（3）机房门外设电离辐射警告标志，门上方设醒目的工作状态指示灯，灯箱处设警示语句；候诊区设放射防护注意事项告知栏。机房门设有闭门装置，工作状态指示灯能与机房门有效关联。

（4）机房应配备相应的防护用品与辅助防护设施，其配置要求需按照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）的要求进行配备。

表 4.3.3-1 个人防护用品和辅助防护设施配置要求

场所类型	工作人员		患者和受检者	
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施
模拟定位 CT	—	—	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子各 1 件	—

4.3.4 放射性三废

模拟定位 CT 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，不产生放射性废水、废气和固体废物。

4.4 臭氧、氮氧化物等有害气体

根据“3.3.1.4 臭氧等有害气体的产生”的描述，本项目质子重离子放射治疗系统运行时所致 O_3 和 NO_2 的产生量和浓度均很小，可以不考虑其作为环境污染因子。

本项目使用模拟定位 CT、滑轨 CT 机和 X 射线管期间，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。质子重离子机房拟设置通排风系统，臭氧、氮氧化物等有害气体经排风管道通过排风机最终引至屋顶排出，对周围环境影响很小。模拟定位 CT 内设动力通风装置，满足通风要求。

直线加速器运行时，射线均会与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物等有害气体。本项目 2 间加速器治疗室均计排风量均为 2400m^3/h，机房容积约 570m^3，换气次数不小于 4.2 次/h。直线加速器产生的废气经由排风井内单独密闭管道排至重离子质子中心楼顶，并高出屋脊排放，排气口不朝向门、窗或人流量较大的过道等位置。

4.5 服务期满后的环境保护措施

本项目涉及 I 类射线装置（质子重离子放射治疗系统）、II类射线装置（直线加速器，10MV）和III类射线装置（模拟定位 CT、滑轨 CT 机）的使用，其中质子重离子放射治疗系统服务期满不再使用后，医院应对辐射工作场所进行监测，若存在放射性污染，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（中华人民共和国生态环境部令第 16 号）中“五十五、核与辐射”中“173、核技术利用项目退役—使用I类、II 类射线装置（X 射线装置和粒子能量不高于 10 兆电子伏的电子加速器除外）存在污染的”，应编制项目退役环境影响报告表，并取得生态环境主管部门审批后才能正式按照方案实施退役活动。

在退役过程中应首先进行污染源项调查，编制相应的退役方案、制定退役目标，首先安全、妥善处理放射性废物，对无法达到解控水平的设施、设备应组织开展去污处理工作，对无法去污的需进行集中收集衰变或交由资质单位处理，确保放射性废物得到安全、妥善处理。医院应做好退役实施期间的辐射安全防护等工作，实施退役的工作人员应作为辐射工作人员进行管理，并做好个人防护。退役工作完成后，医院应按照国家相关规定，委托有资质的技术机构,对去污处理后拟退役的场所进行终态验收监测，组织自主竣工环保验收，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

CT 机报废时，医院应对射线装置内的高压射线管进行拆解，进行去功能化，并报

颁发辐射安全许可证的生态环境部门核销。

5 环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

《复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）环境影响报告书》已取得福州市生态环境局批复，批复文号：榕环评〔2025〕50 号。有关主体工程施工期环境影响内容详见《复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）环境影响报告书》有关章节，本次评价不再做相关的环境影响评价。

5.2 质子重离子放射治疗系统的辐射环境影响

5.2.1 系统年使用规划

根据建设单位提供的资料，本项目质子重离子放射治疗系统的年使用规划列于表 3.4.1-2。质子重离子放射治疗系统每位患者平均在质子重离子机房停留 20 分钟，主要包括治疗前摆位 5min、精确位置验证 5min、治疗出束 3min、停机 5min、解除摆位 1min 和离开机房 1min。

每名患者的治疗计划都需进行一次治疗前的计划验证，质子重离子放射治疗系统科研室、治疗室 1 和治疗室 2 每年总治疗患者人数约各 300 人，每名患者整个疗程治疗次数约 26 次，每年总治疗次数为 7800 人次；治疗室 3 和 4 每年总治疗患者人数约各 400 人，每名患者整个疗程治疗次数约 26 次，每年总治疗次数为 10400 人次。每次计划验证的出束时间为 3min，因此本项目科研室、治疗室 1 和治疗室 2 用于患者计划验证的年出束时间均为 30h，治疗室 3 和 4 用于患者计划验证的年出束时间均为 40h。

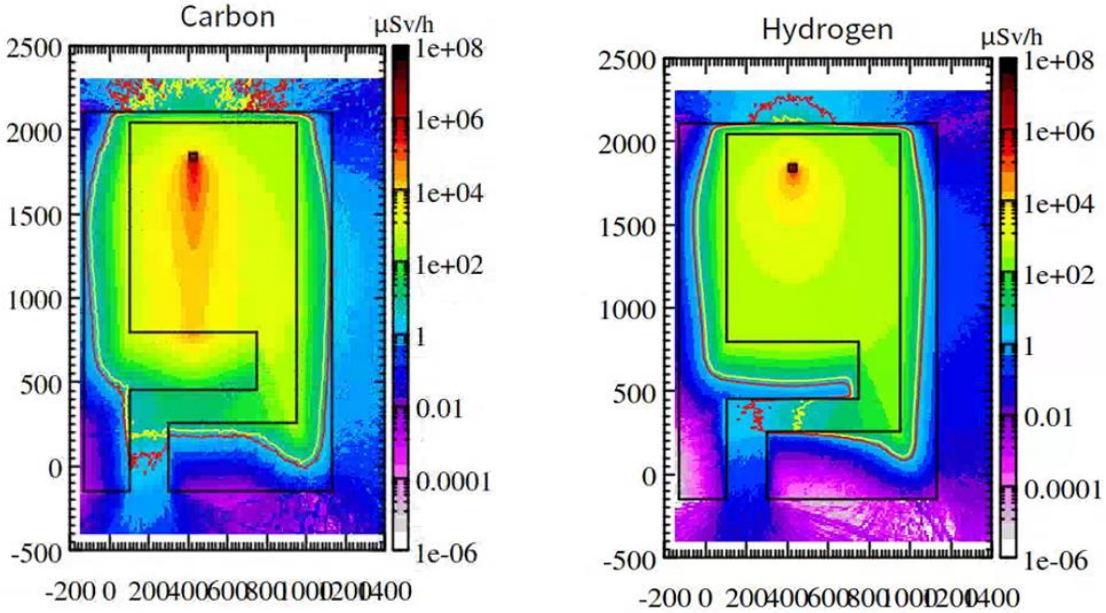
每天治疗患者前，质子重离子放射治疗系统要开展 QA（质量保证），分为状态检测和稳定性检测，一般选用质子重离子放射治疗系统临床常用能量区进行检测。检测类别一般分为设备防护安全、剂量学部分、机械部分，检测周期分为日检、月检、半年检和年检，不同检测项目对应不同检测周期，具体要求见《医用质子重离子放射治疗设备质量控制检测标准》（WS 816-2023）附录 B 和 C，本报告不详细描述。根据医院提供资料，本项目每年每间治疗室 QA 出束时间约 52h。

5.2.2 机房屏蔽体外剂量率计算

5.2.2.1 计算时使用的源项和模型

本报告采用目前国内外通用的FLUKA程序计算质子重离子放射治疗系统辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平，FLUKA 程序相关介绍具体见前文“3.3.1.1.2.1FLUKA 程序”。我国电离辐射防护相关法律法规和标准中使用的运行实用量一般为周围剂量当量，因此本项目 FLUKA 的运算结果最终应表示为环境剂量当量（Ambient dose equivalent）H*(10)较为合适，而质子重离子放射治疗系统运行时，同时存在质子束、重离子束、次级中子、光子等，为考虑电离辐射不同的影响，本项目FLUKA程序预测结果已采用 ICRP 74 和 M.Pelliccioni 所著的《Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code》中推荐的转换系数群对不同辐射进行权重修正，后续公众和职业人员年有效剂量计算不再考虑相应权重因子。

本次预测计算所用束流损失数据见表 3.3.1-2~表 3.3.1-4，本项目质子重离子一体化治疗系统可提供质子（H^+）、氦离子（$^4He^{2+}$）、碳离子（$^{12}C^{6+}$）、氧离子（$^{16}O^{8+}$），设备厂家选取其中 1 间治疗室以质子（H^+）和碳离子（$^{12}C^{6+}$）模式设计最大能量和流强进行计算，分别给出了碳离子模式和质子模式下治疗室的剂量率分布情况，具体见图 5.2.2-1。



碳离子　　质子

图 5.2.2-1 治疗室运行时的剂量率分布

根据图 5.2.2-1 的计算结果可知，碳离子治疗模式的剂量率贡献大于质子治疗模式，

因此，对本项目后文屏蔽体外剂量率分布计算以碳离子/氧离子/氦离子模式进行评价考虑，其中氧离子/氦离子仅在科研室使用。

分析可知，科研室紧贴同步环大厅，其辐射环境与同步环大厅相互影响最甚，当科研室和同步环大厅同时出束时，若屏蔽防护满足要求，则其余各治疗室与同步环大厅同时工作亦满足辐射防护要求，故在论证其余各治疗室的辐射防护时，不再重复设定同步环大厅内同步加速器环、慢引出和高能线的出束条件。各工作场所照射条件设定如表 5.2.2-1 所示。

表 5.2.2-1 计算用照射条件设定

序号	场所	照射条件（考虑损失阶段）
1	同步加速器大厅、科研室	同步环全环加速：加速环内均匀损失 慢引出：朝向高能线一端的集中损失，靶材料为铜 高能线：线性均匀损失，靶材料为铁 终端：向东照射，集中损失，靶材料为水
2	治疗室 1	终端：朝向底部照射，集中损失，靶材料为水
3		终端：向东照射，集中损失，靶材料为水
4	治疗室 2	终端：斜向45°朝向底部照射，集中损失，靶材料为水
5		终端：向东照射，集中损失，靶材料为水
6	治疗室 3（360°Gantry）	终端：向北照射，集中损失，靶材料为水
7		终端：向南照射，集中损失，靶材料为水
8		终端：斜向45°朝向顶部照射，集中损失，靶材料为水
9		终端：向顶棚照射，集中损失，靶材料为水
10		终端：向地坪照射，集中损失，靶材料为水
11	治疗室 4（180°Gantry）	终端：向南照射，集中损失，靶材料为水
12		终端：向顶棚照射，集中损失，靶材料为水
13		终端：向地坪照射，集中损失，靶材料为水
14	高能爬升大厅	高能线：线性均匀损失，靶材料为铁

计算时使用计算模型如图 5.2.2-2~图 5.2.2-7 所示。

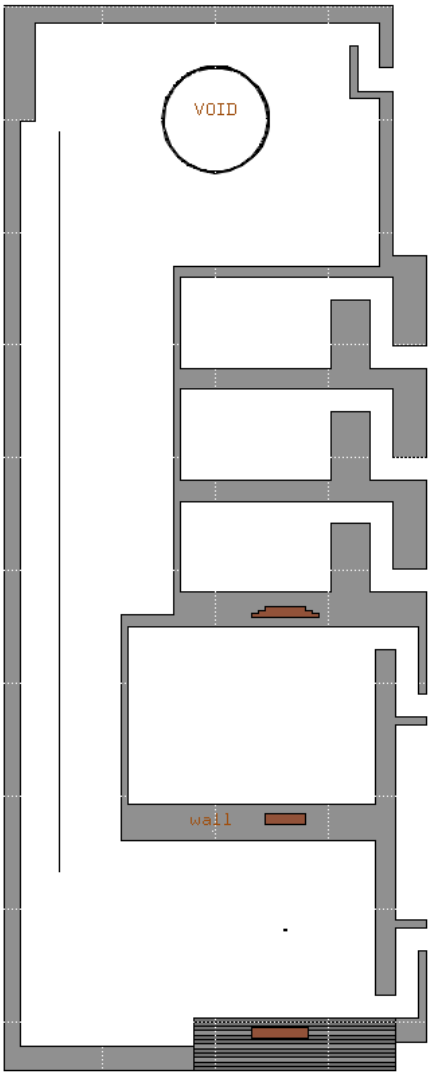


图 5.2.2-2 FLUKA 计算模型（平面图）

图 5.2.2-3 FLUKA 计算模型（科研室、治疗室 1-2 剖面图）

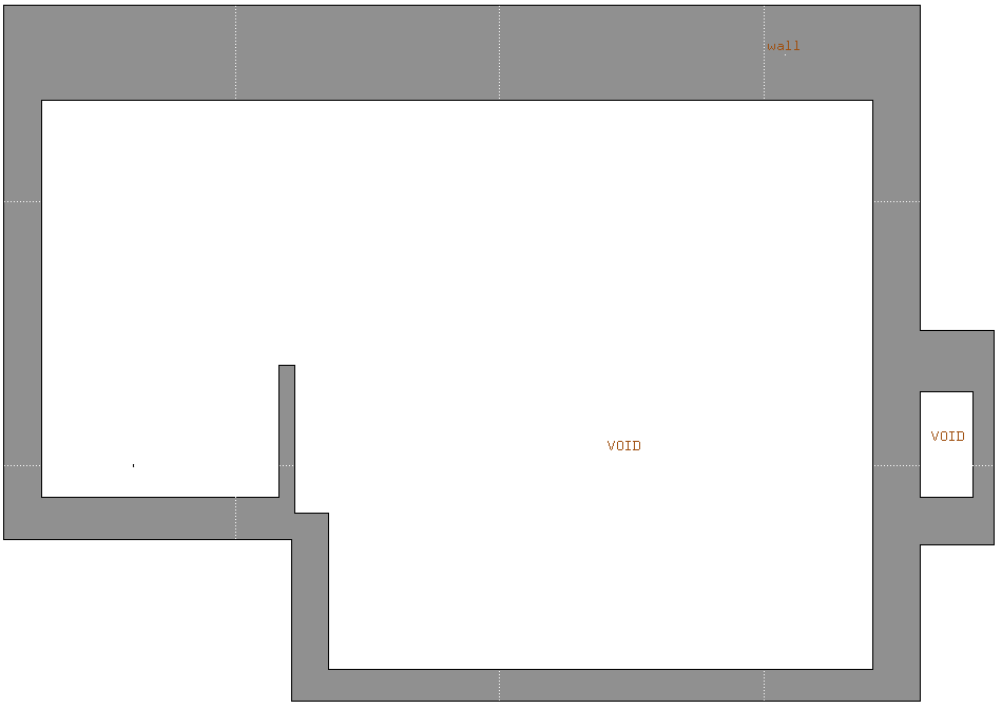


图 5.2.2-4 FLUKA 计算模型（治疗室 3 剖面图）

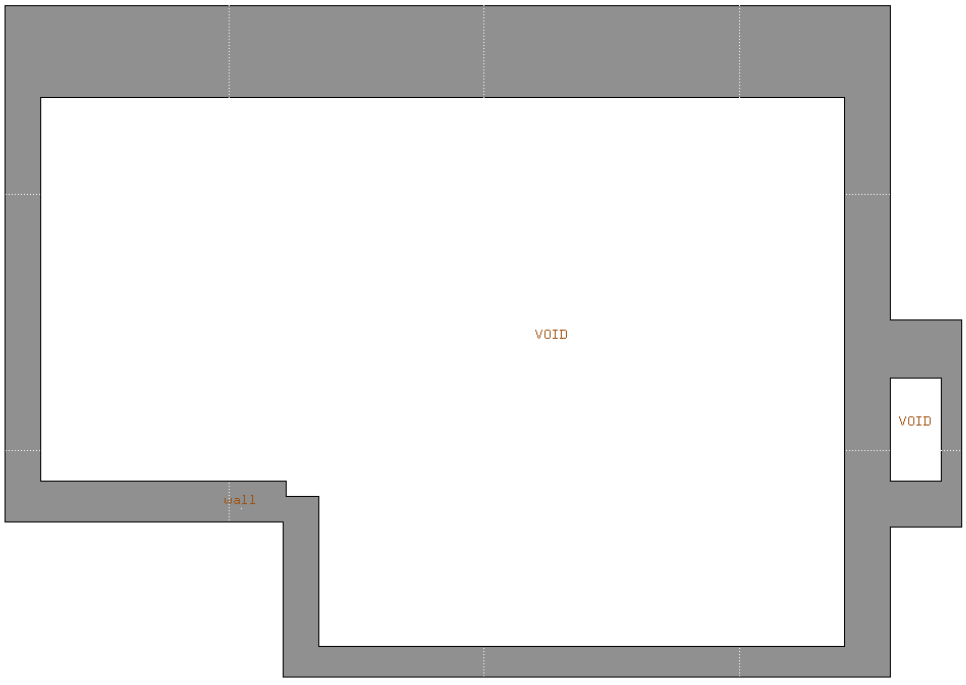


图 5.2.2-5 FLUKA 计算模型（治疗室 4 剖面图）

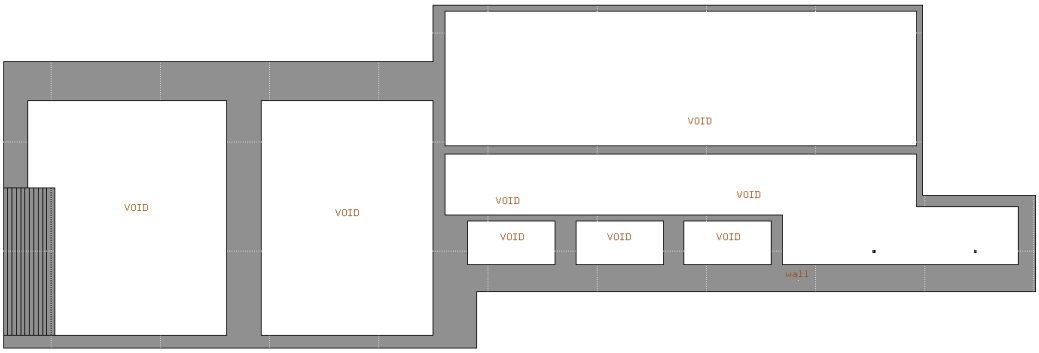


图 5.2.2-6 FLUKA 计算模型（剖面图）

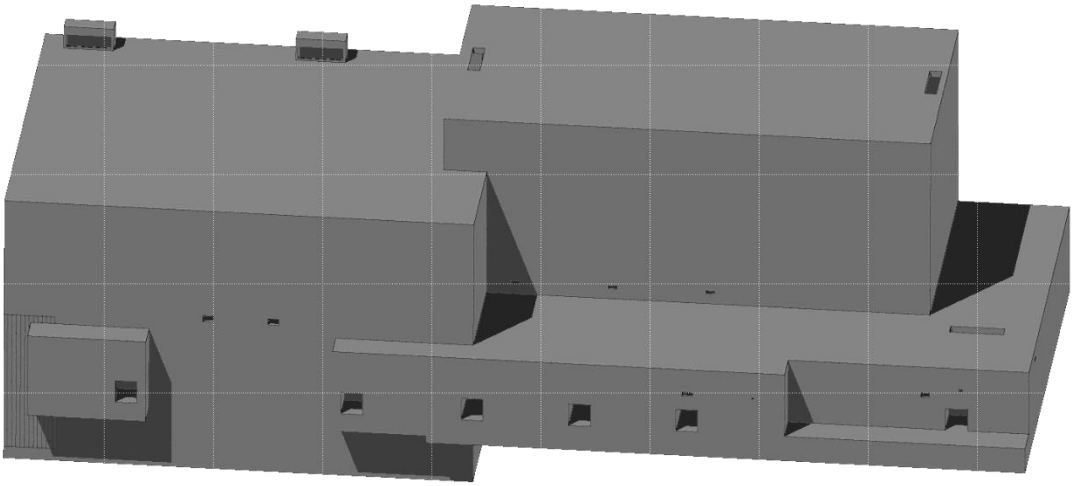


图 5.2.2-7 FLUKA 计算模型（三维立体正视图）

5.2.2.2 计算结果

5.2.2.2.1 同步环大厅和科研室照射

科研室为水平治疗终端，同步环大厅和科研室同时照射时，质子重离子机房剂量率分布图如下图所示。

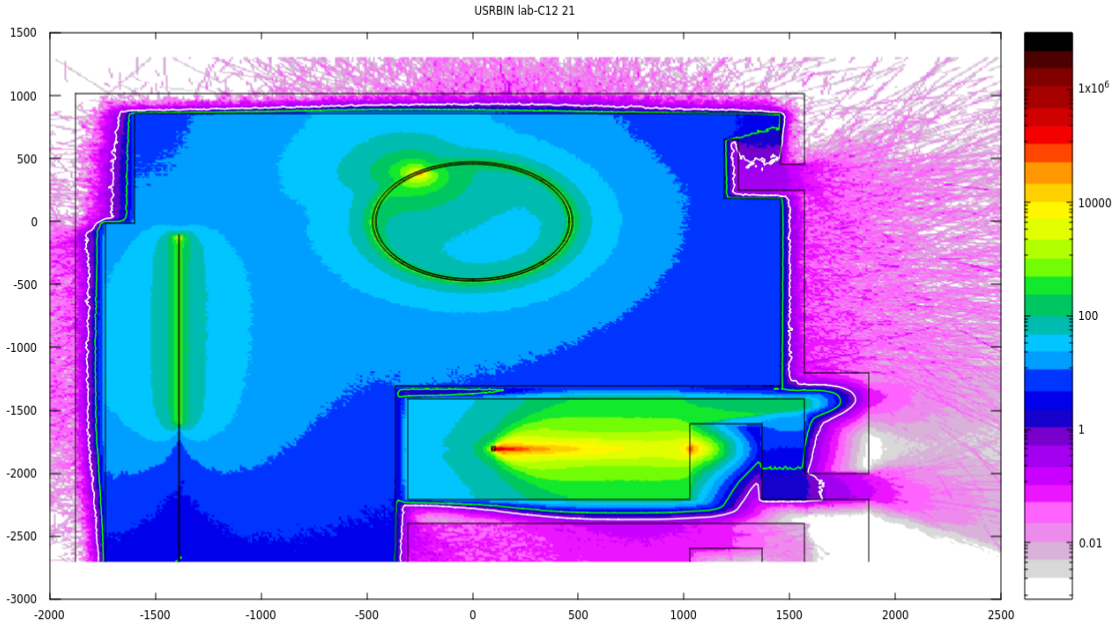


图 5.2.2-8 同步环大厅和科研室同时照射时剂量率分布图（碳离子），μSv/h

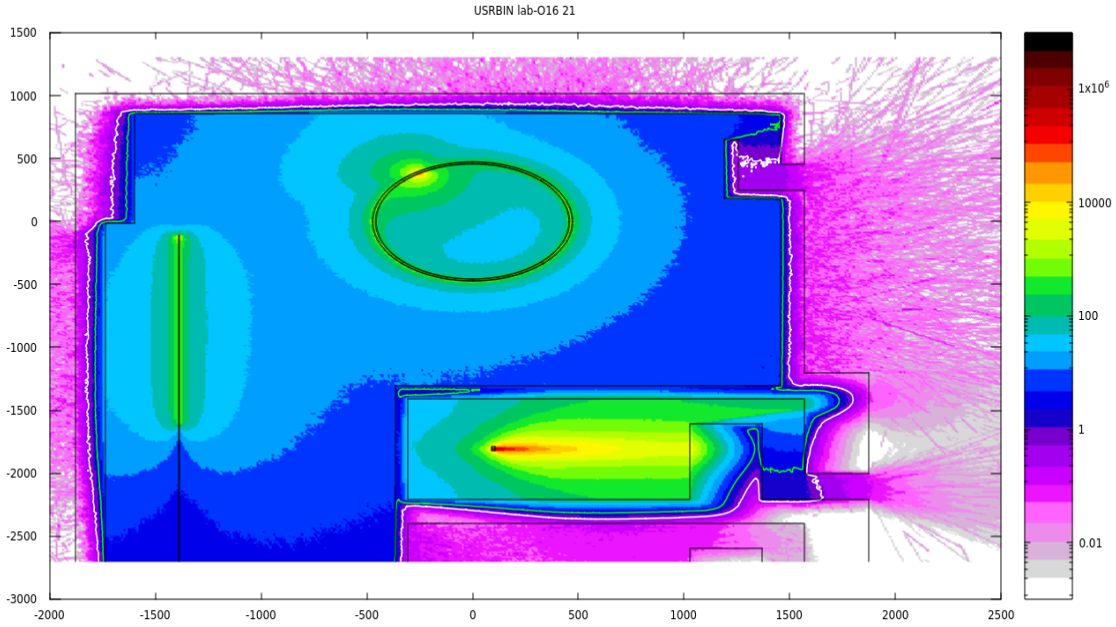


图 5.2.2-9 同步环大厅和科研室同时照射时剂量率分布图（氧离子），μSv/h

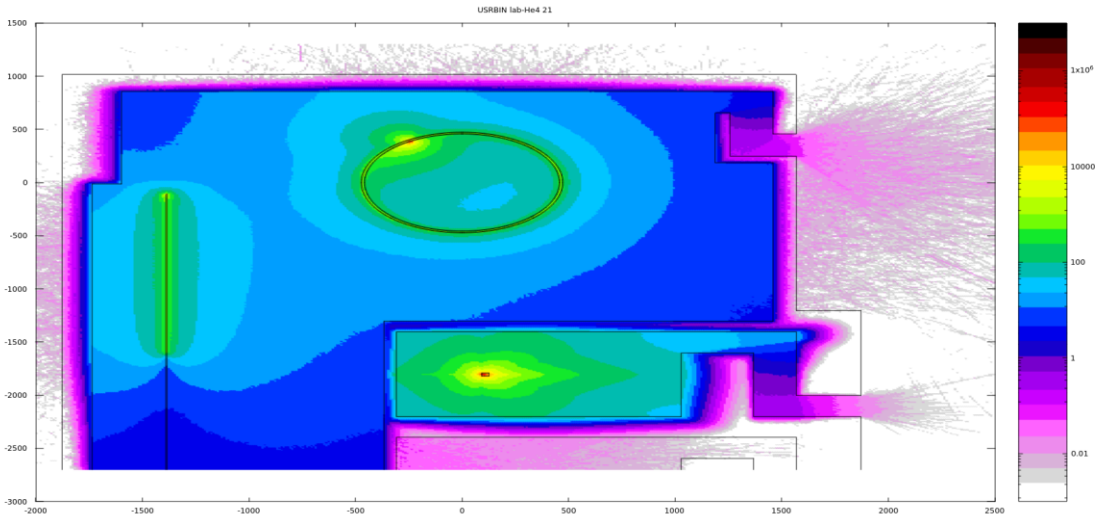


图 5.2.2-10 同步环大厅和科研室同时照射时剂量率分布图（氦离子），μSv/h

5.2.2.2.2 治疗室 1 照射

治疗室 1 为水平+垂直治疗终端，质子重离子机房剂量率分布图如下图所示。

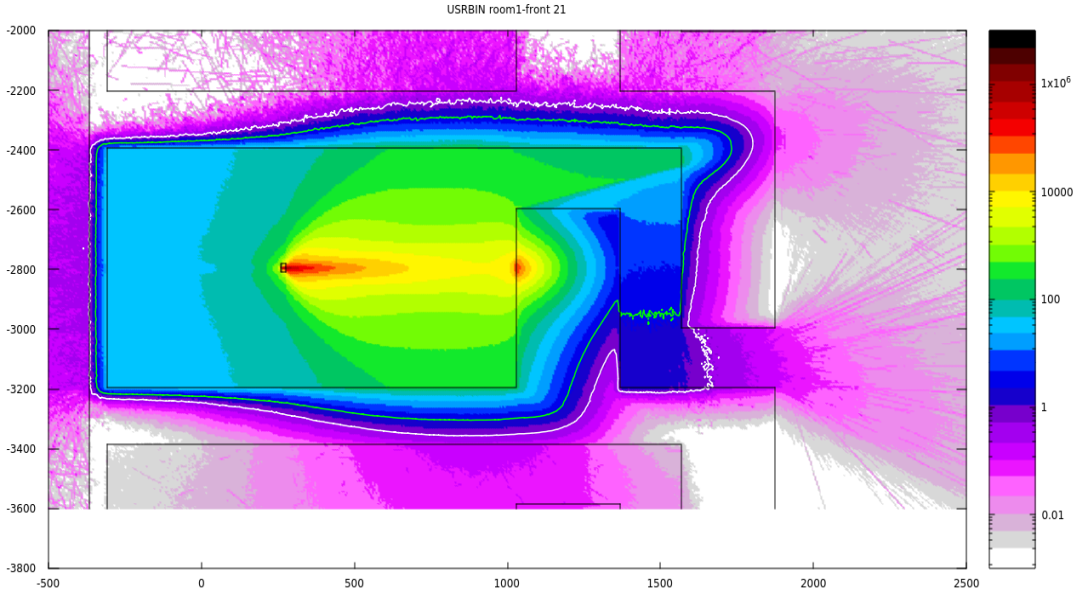


图 5.2.2-11 治疗室 1 水平向东照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

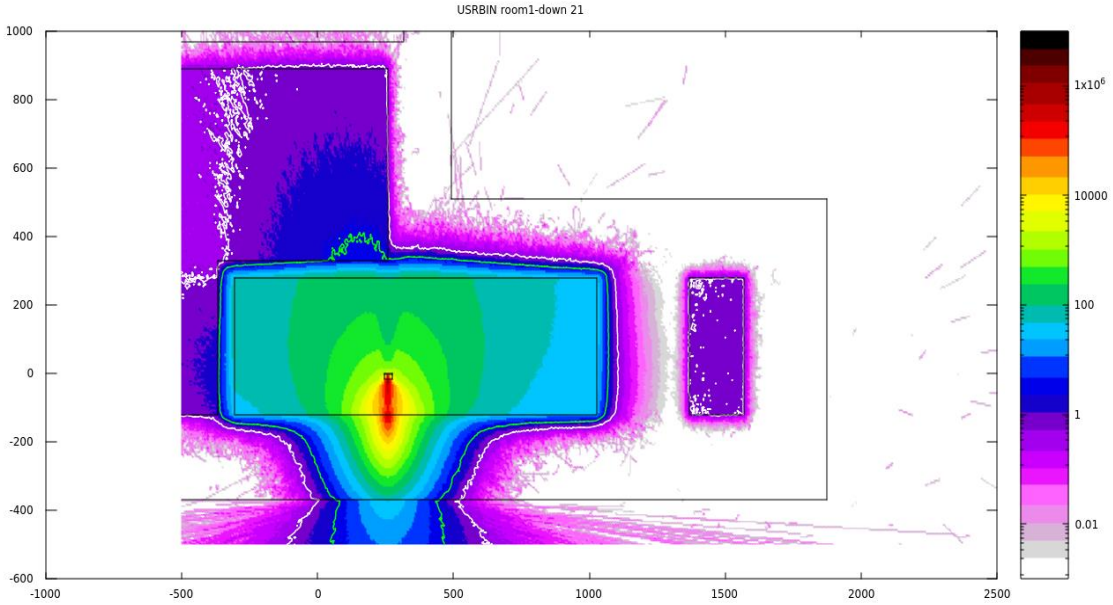


图 5.2.2-12 治疗室 1 垂直朝向地面照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

5.2.2.2.3 治疗室 2 照射

治疗室 2 为水平+45°治疗终端，治疗室 1 和 2 基本相同，水平照射时剂量率分布同治疗室 1，45°照射时质子重离子机房剂量率分布图如下图所示。

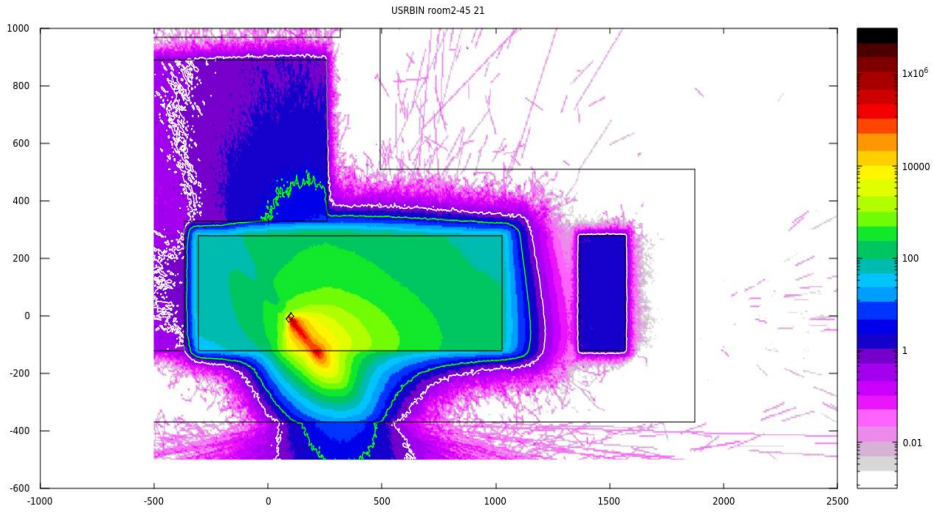


图 5.2.2-13 45°照射时，质子重离子机房负一层（设备层）剂量率分布，μSv/h

5.2.2.2.3 治疗室 3 照射

治疗室 3 为 360°旋转治疗室，质子重离子机房剂量率分布图如下图所示。

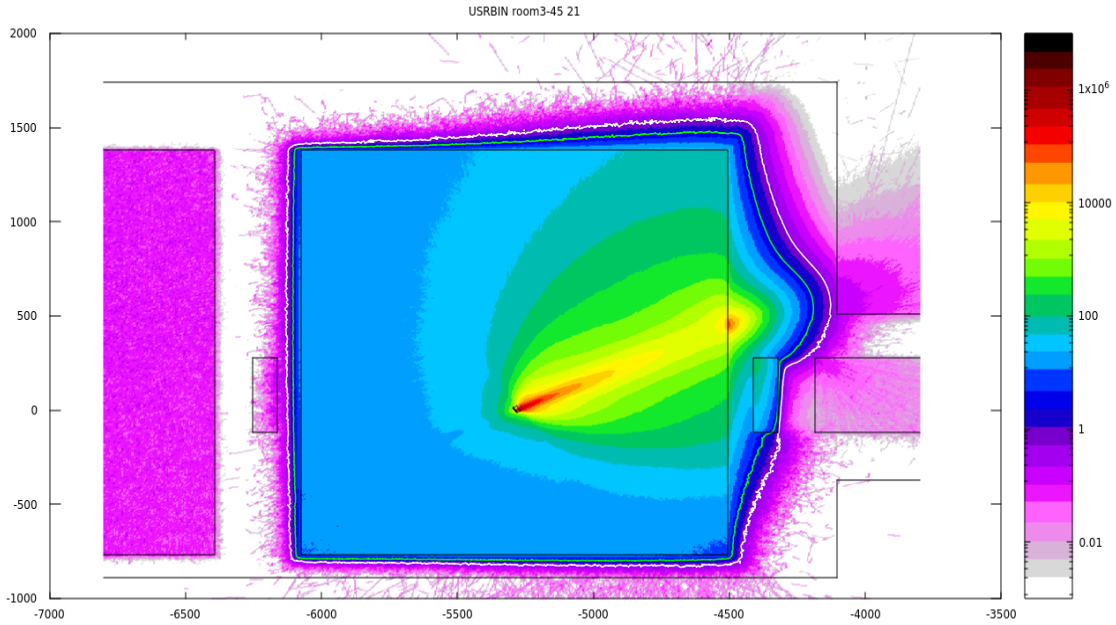


图 5.2.2-14 45°照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

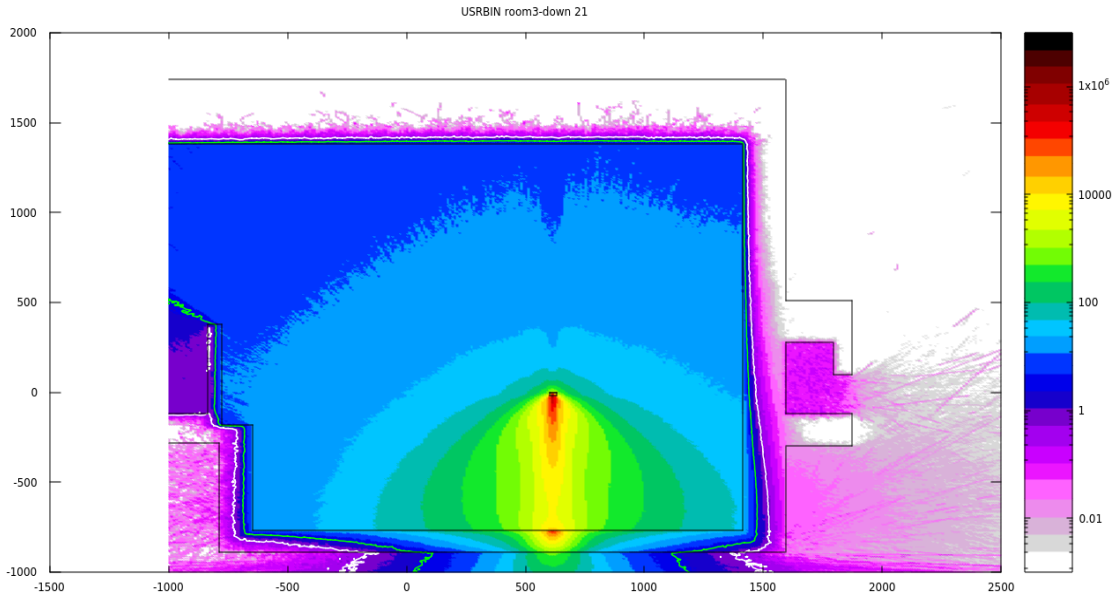


图 5.2.2-15 朝地面照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

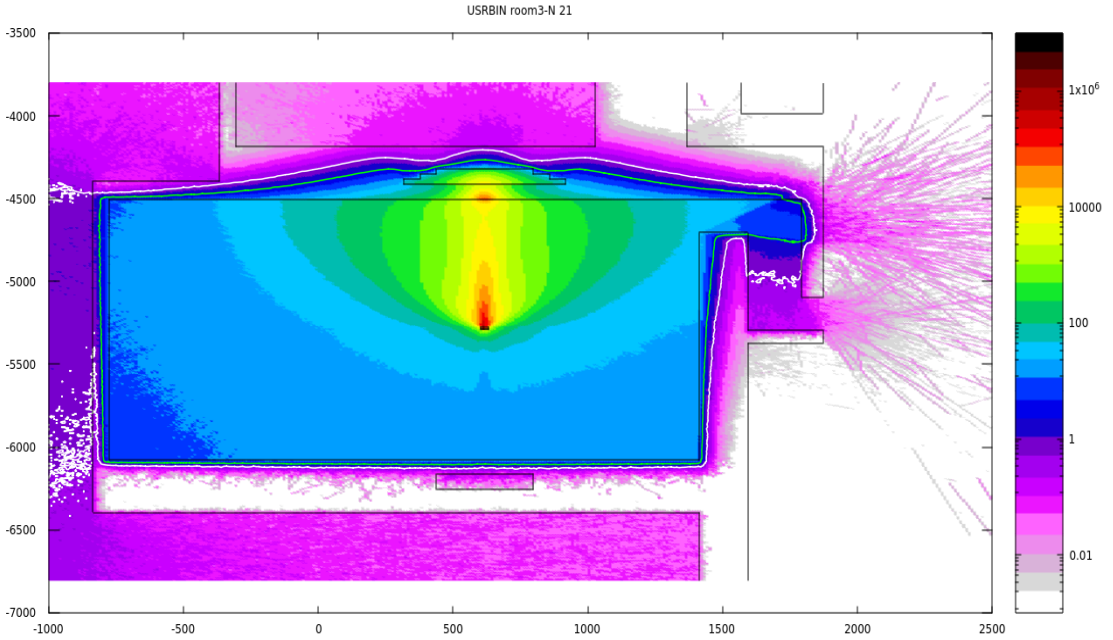


图 5.2.2-16 朝北照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

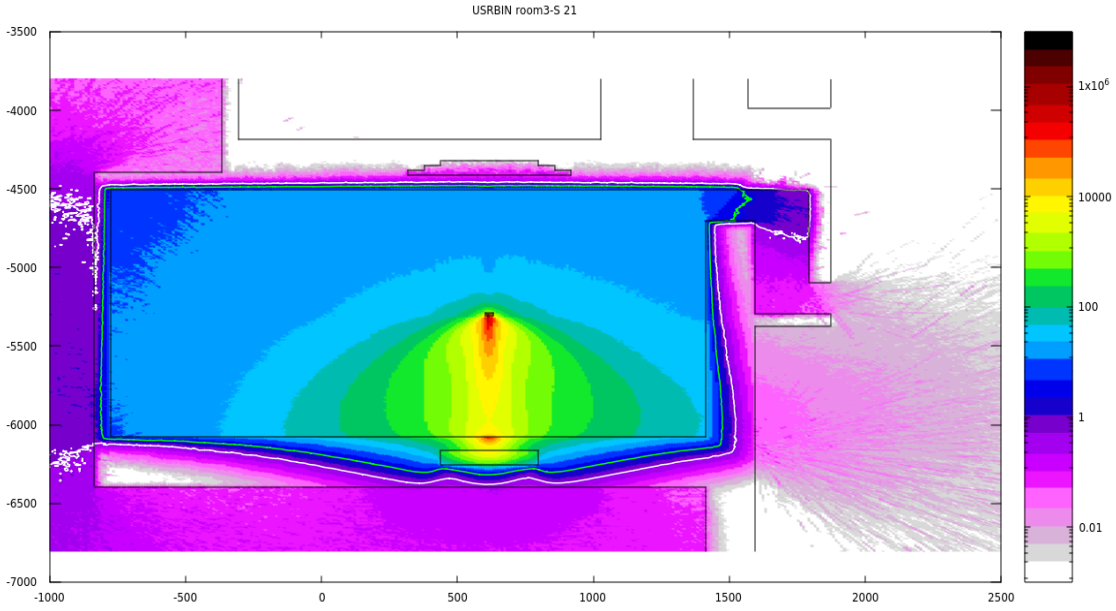


图 5.2.2-17 朝南照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

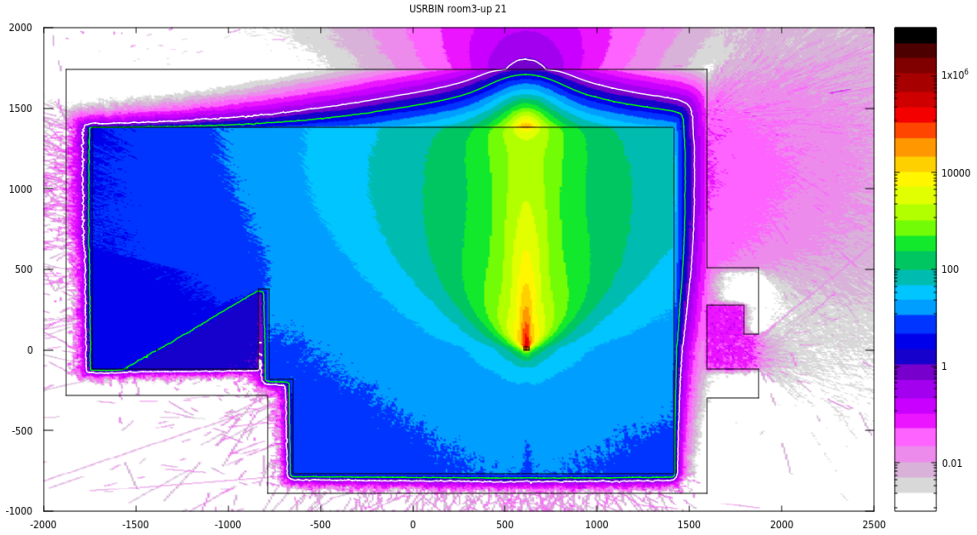


图 5.2.2-18 朝顶棚照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

5.2.2.2.4 治疗室 4 照射

治疗室 4 为 180°旋转治疗室，质子重离子机房剂量率分布图如下图所示。

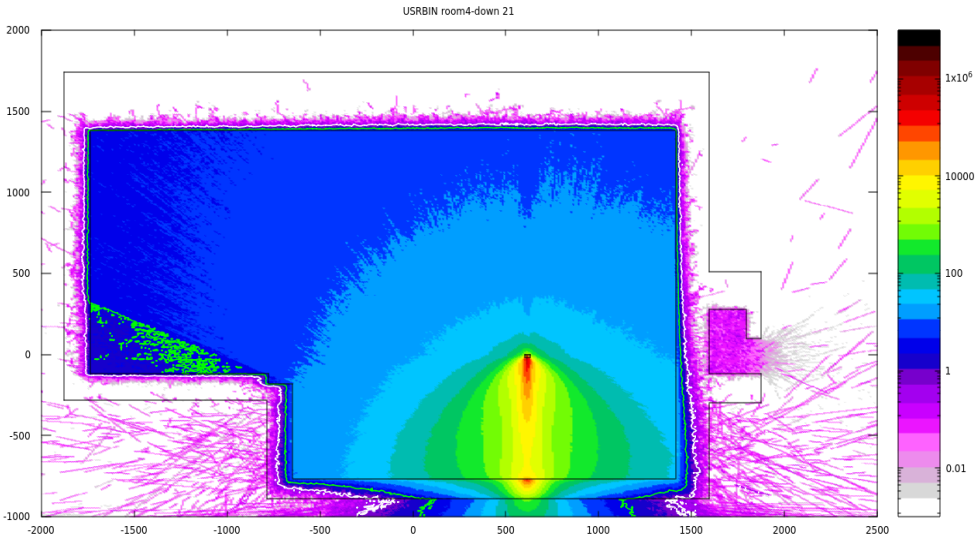


图 5.2.2-19 朝地面照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

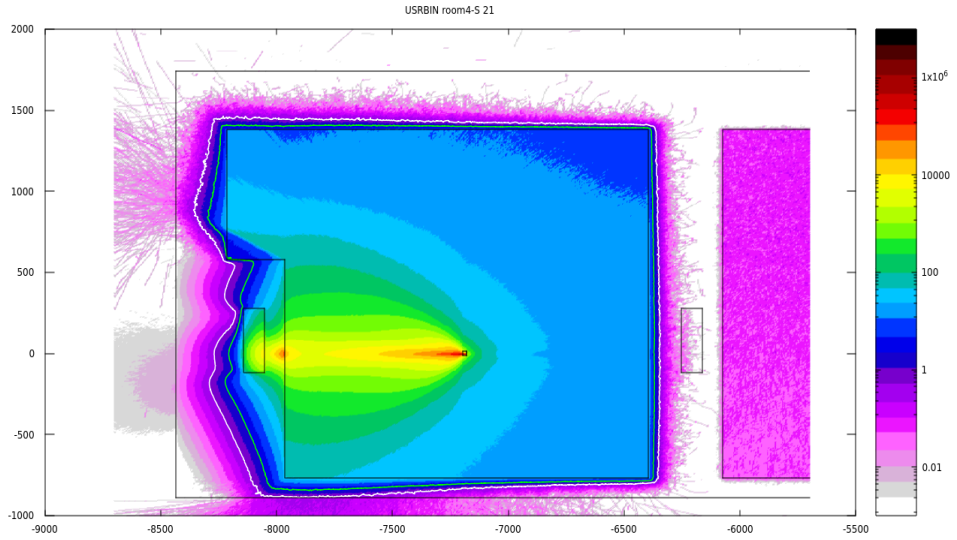


图 5.2.2-20 朝南面照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

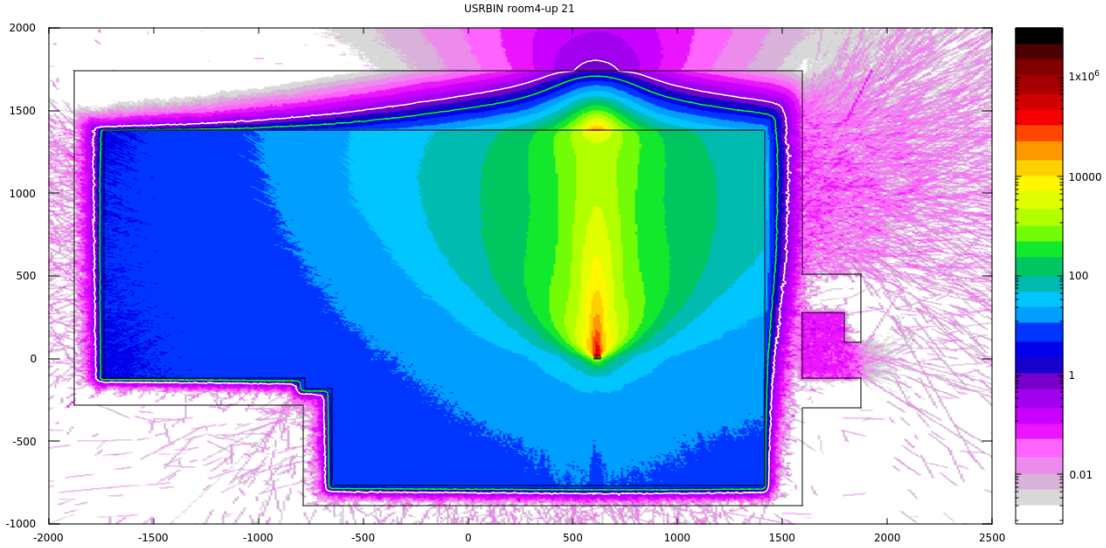


图 5.2.2-21 朝顶棚照射时，质子重离子机房剂量率分布图，μSv/h

5.2.2.2.5 高能射线爬升区

高能射线爬升区周围剂量率分布图如下图所示。

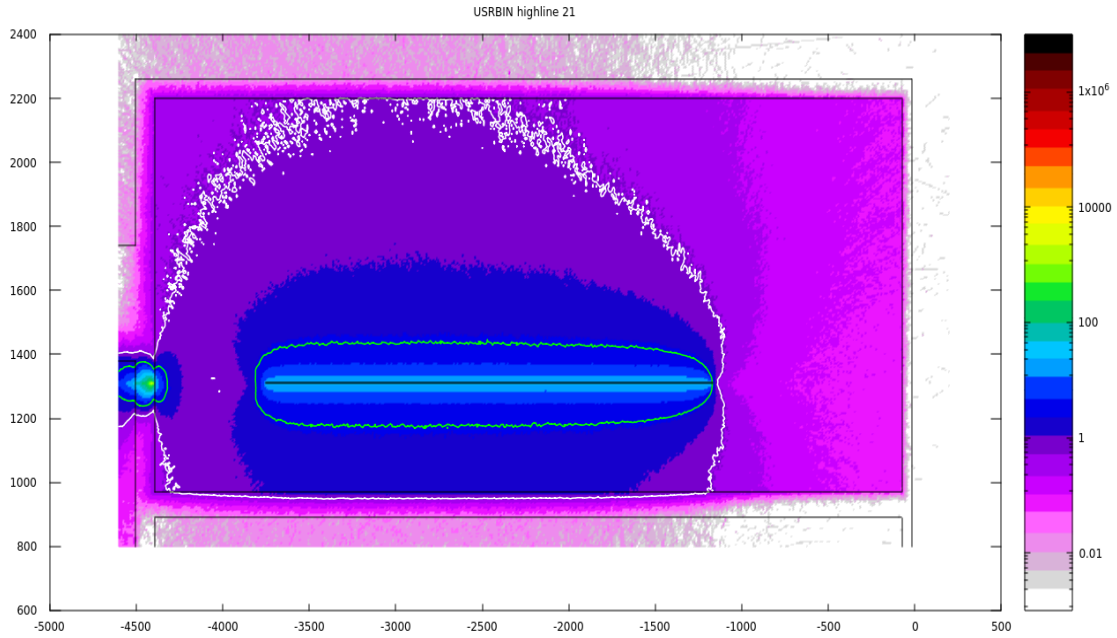


图 5.2.2-22 高能爬升区剂量率分布图，μSv/h

5.2.2.2.5 小结

本项目屏蔽计算的关注点主要包括质子重离子放射治疗系统运行时，质子重离子机房四周屏蔽墙外 30 cm 处、各屏蔽门外 30 cm 处、地坪下方 30 cm 处、顶棚上方 30 cm 处及管道穿墙处，关注点位置如图 5.5.2-23~图 5.5.2-28 所示，主要关注点处的剂量率列于下表。

质子重离子机房屏蔽体外剂量率水平见表 1.4.2-2。

表 5.2.2-2 质子重离子机房周围主要关注点剂量率计算结果

场所	楼层	方位	关注点	关注点位置	关注点所在区域	剂量率 μSv/h	剂量率控制水平 μSv/h
同步环大厅、科研室	一层	北	1-1~1-2	同步环大厅北墙外 30cm 处	低温设备间、加速器备品间	碳 0.054 氧 0.055 氮 0.009	1.59
		东	1-3	同步环大厅东墙外 30cm 处	加速器备品间	碳 0.009 氧 0.011 氮 0.006	1.59
			1-6		设备间	碳 0.098 氧 0.083 氮 0.013	1.59
			1-5		走道	碳 0.080 氧 0.061	0.50

场所	楼层	方位	关注点	关注点位置	关注点所在区域	剂量率 μSv/h	剂量率控制水平 μSv/h
						氦 0.015	
			1-4	同步环大厅迷宫门外 30cm 处	迷宫门外	碳 0.132 氧 0.107 氦 0.078	0.79
			1-7	科研室东墙外 30cm 处	模具储藏	碳 0.044 氧 0.045 氦 0.001	2.50
			1-8		控制台	碳 0.067 氧 0.036 氦 0.001	2.50
			1-9	科研室迷宫门外 30cm 处	迷宫门外	碳 0.112 氧 0.097 氦 0.065	2.50
		南	1-27	科研室南墙外 30cm 处	治疗室 1	碳 0.135 氧 0.115 氦 0.055	1.10
		西	1-32~1-34	同步环大厅西墙外 30cm 处	室外道路及绿化、转运平台及楼梯间	碳 0.064 氧 0.094 氦 0.009	1.59
	二层	顶	2-2~2-3	同步环大厅、科研室顶棚外 30cm 处	高能线电源间	碳 0.118 氧 0.086 氦 0.003	1.59
		顶	2-19	同步环大厅顶棚外 30cm 处	2#变电所	碳 0.031 氧 0.009 氦 0.007	1.59
		顶	2-1、2-11~2-16、2-18、2-20~2-21	同步环大厅、科研室顶棚外 30cm 处	电缆夹层、同步环电源间、走道	碳 0.196 氧 0.201 氦 0.122	1.59
		西	2-17	同步环大厅西墙外 30cm 处	转运平台及楼梯间	碳 0.022 氧 0.021 氦 0.006	1.59
	/	底部	5-1、5-2、5-7	同步环大厅、科研室底部外	土壤	碳 0.137 氧 0.132 氦 0.008	5000
治疗室 1	一层	东	1-10	东墙外 30cm 处	控制台	0.051	2.50
			1-11	迷宫门外 30cm 处	迷宫门外	0.128	2.50
		南	1-28	南墙外 30cm 处	治疗室 2	0.134	0.86
		北	1-26	北墙外 30cm 处	科研室	0.215	1.10
	/	顶部	2-4、2-11~2-16	顶棚外 30cm 处	高能线电源间、电缆夹层	0.096	2.50

场所	楼层	方位	关注点	关注点位置	关注点所在区域	剂量率 μSv/h	剂量率控制水平 μSv/h
	/	底部	5-3	地坪外	土层	35.8	5000
治疗室 2	一层	东	1-12	东墙外 30cm 处	控制台	0.003	2.50
			1-13	迷宫门外 30cm 处	迷宫门外	0.047	2.50
		南	1-42	南墙外 30cm 处	治疗室 2	0.068	1.10
		北	1-37	北墙外 30cm 处	科研室	0.062	1.10
	/	顶部	2-5、2-11~2-16	顶棚外 30cm 处	高能线电源间、电缆夹层	0.001	2.50
	/	底部	5-4	地坪外	土层	35.8	5000
治疗室 3	/	底部	5-5	地坪外	土层	440.1	5000
	负一	/	B1、B5、B6	墙外	土层	0.029	5000
	一层	东	1-14	东墙外 30cm 处	控制台	0.102	2.50
			1-15	迷宫门外 30cm 处	治疗室门外	0.042	2.50
			1-16	东墙外 30cm 处	模具储藏	0.042	2.50
		南	1-30	南墙外 30cm 处	治疗室 4	0.230	0.86
		北	1-28	北墙外 30cm 处	治疗室 2	0.206	0.86
	二层	东	2-7、2-11~2-16	东墙外 30cm 处	Gantry 电源间、电缆夹层	0.05	2.50
		北	2-6	北墙外 30cm 处	高能线电源间	0.213	2.50
	三层	东	3-5	东墙外 30cm 处	治疗室空调机房	0.047	2.50
	屋顶层	东	4-6	东墙外 30cm 处	上人屋面	0.025	2.50
		顶	4-15	顶棚外 30cm 处	不上人屋面	0.669	2.50
		顶	4-18	顶棚通风井		0.018	2.50
治疗室 4	底部	/	5-6	地坪外	土壤	442.9	5000
	负一	/	B1-2、B1-3、B1-4	墙外	土壤	0.029	5000
	一层	东	1-17、1-18、1-20	东墙外 30cm 处	模具储藏、控制台	0.003	2.50
			1-19	迷宫门外 30cm 处	治疗室门外	0.03	2.50

场所	楼层	方位	关注点	关注点位置	关注点所在区域	剂量率 μSv/h	剂量率控制水平 μSv/h
			1-20	东墙外 30cm 处	模具储藏	0.093	2.50
		南	1-21~1-25	南墙外 30cm 处	卫生间、更衣间、VIP 等候、室外道路及绿化	0.008	2.50
		西	1-31	西墙外 30cm 处	室外道路及绿化	0.011	2.50
		北	1-29	北墙外 30cm 处	治疗室 3	0.081	0.86
	二层	东	2-7~2-9、2-11~2-16	东墙外 30cm 处	电缆夹层、Gantry 电源间、空调机房	0.013	2.50
		南	2-10	南墙外 30cm 处	可上人屋面	0.002	2.50
	三层	东	3-6	东墙外 30cm 处	Gantry 空调机房	0.045	2.50
	屋顶层	东	4-7	东墙外 30cm 处	上人屋面	0.013	2.50
		顶	4-16	顶棚外 30cm 处	不上人屋面	0.669	2.50
			4-17	顶棚通风井		0.014	2.50
高能线爬升区	三层	北	3-1	北墙外 30cm 处	上人屋面	0.001	2.50
		东	3-2~3-4	东墙外 30cm 处	高能线空调机房、高能线电源间空调机房	0.001	2.50
		西	3-7	西墙外 30cm 处	转运平台及楼梯间	0.002	2.50
	屋顶层	顶	4-1~4-5	顶棚东侧	上人屋面	0.001	2.50
			4-8~4-9	顶棚西侧	转运平台及楼梯间	0.002	2.50
			4-10~4-14	顶棚外 30cm 处	不上人屋面	0.009	2.50
			4-19	顶棚通风井口		0.053	2.50
			4-20	顶棚通风井口		0.034	2.50

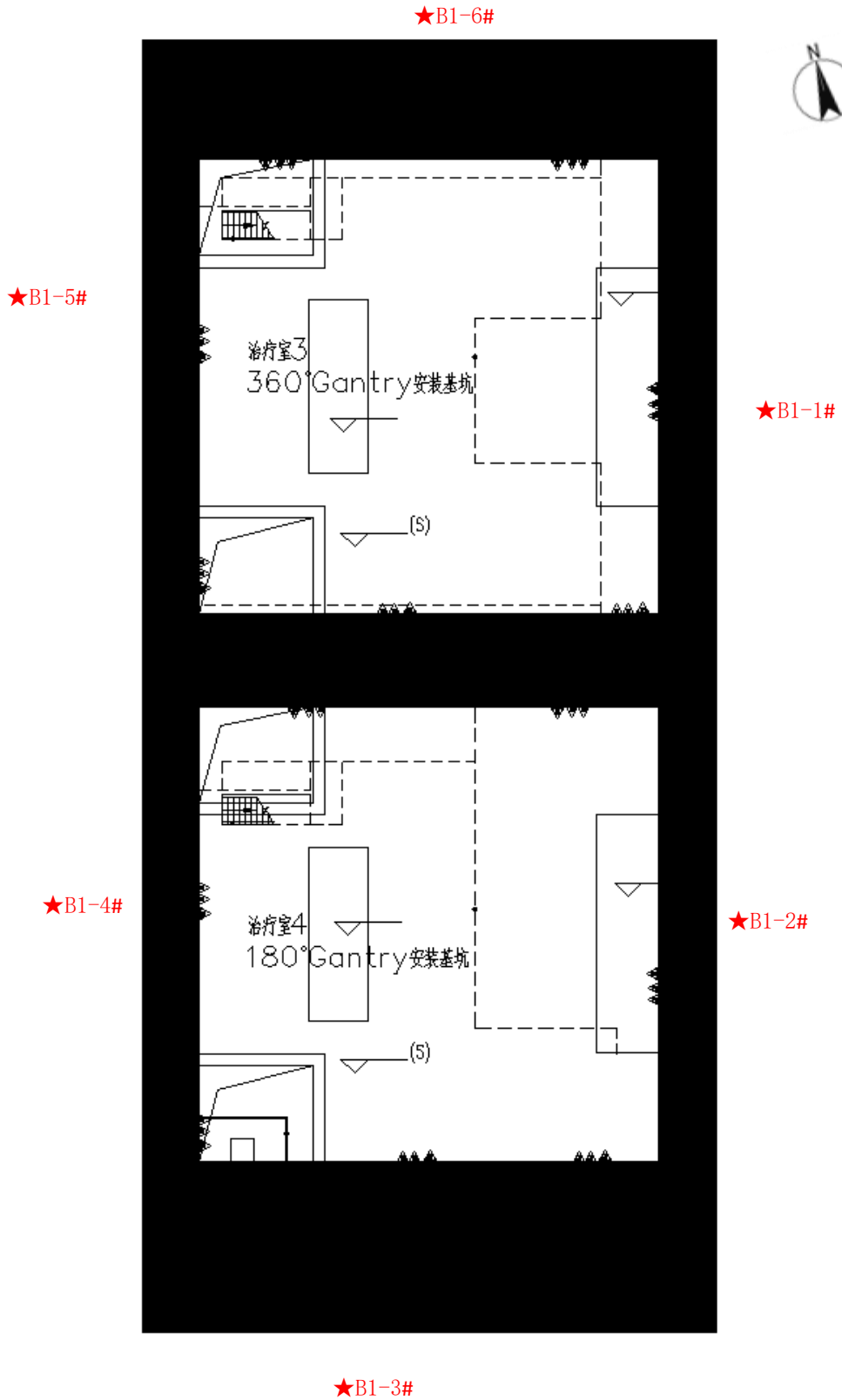


图 5.2.2-22 质子重离子机房负一层周围关注点示意图

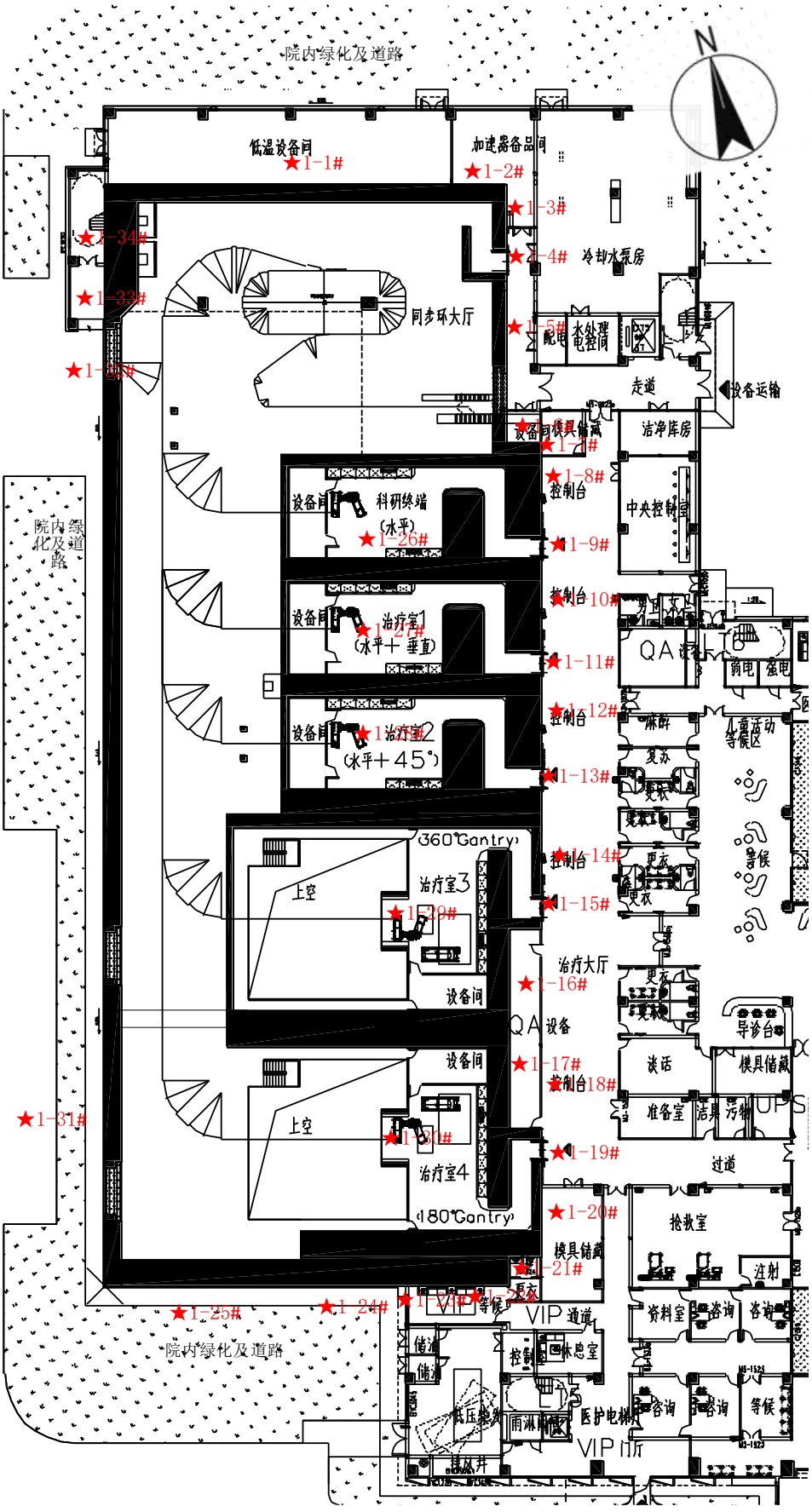


图 5.2.2-23 质子重离子机房一层周围关注点示意图

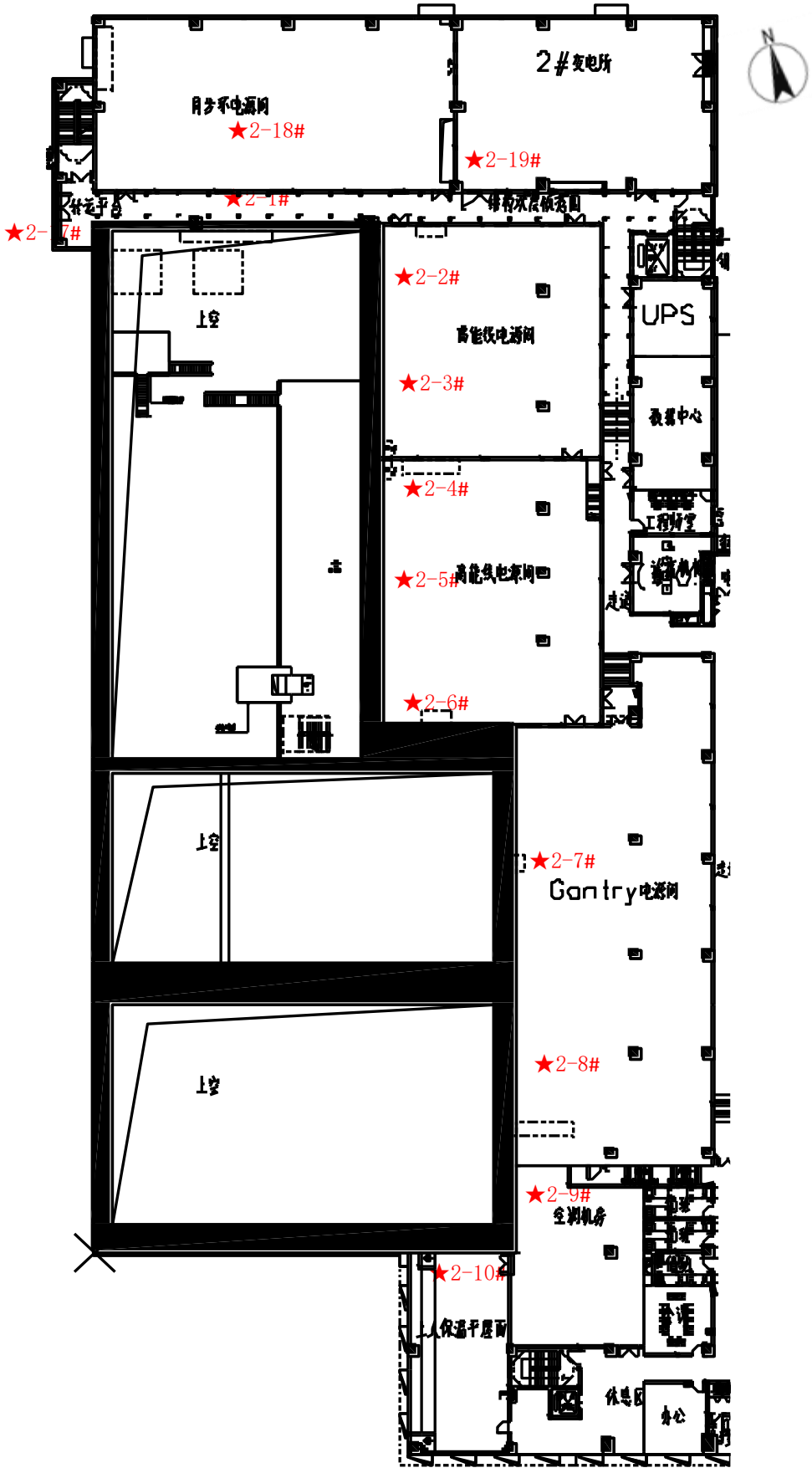


图 5.2.2-24 质子重离子机房二层周围关注点示意图

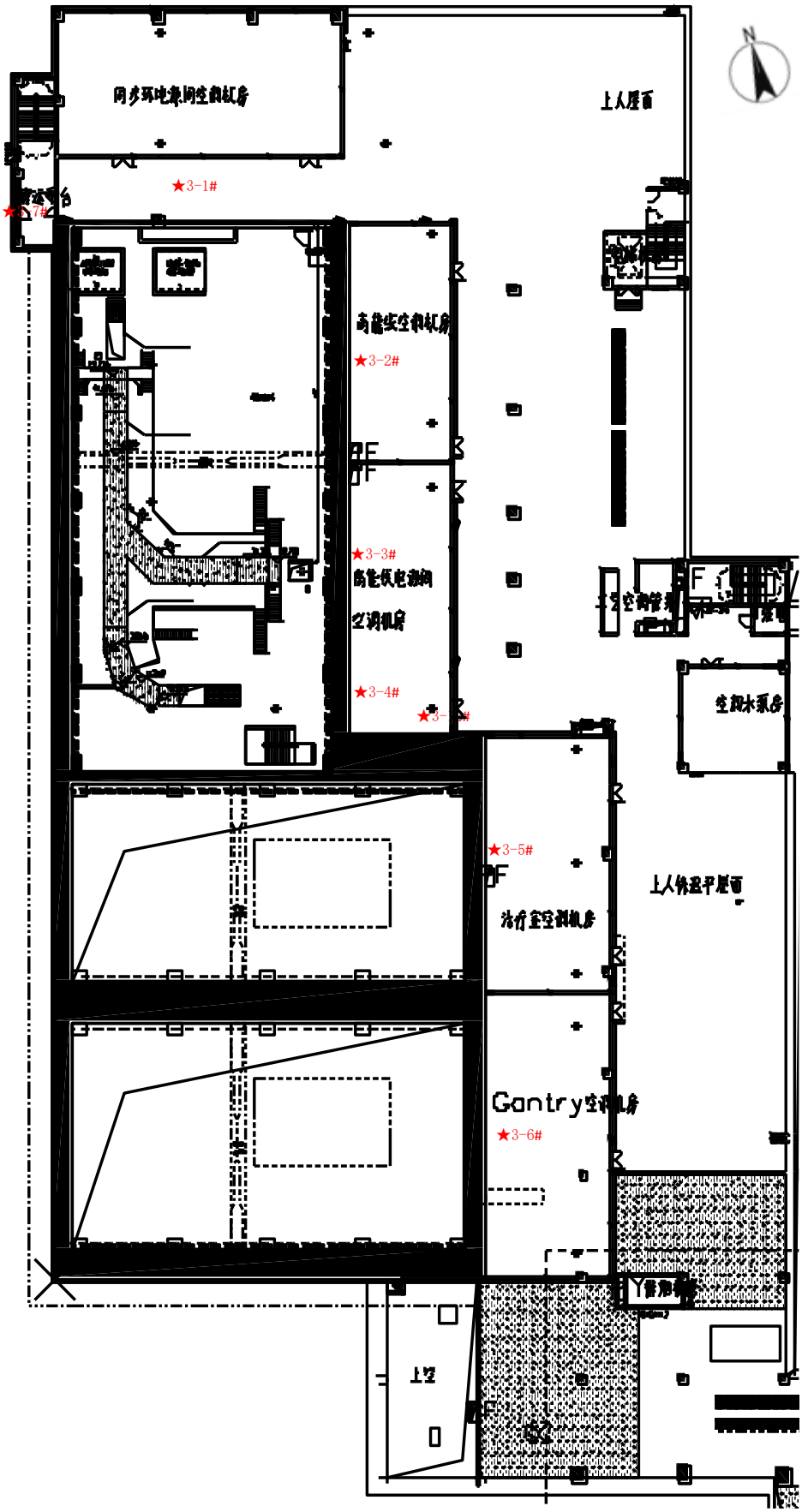


图 5.2.2-25 质子重离子机房三层周围关注点示意图

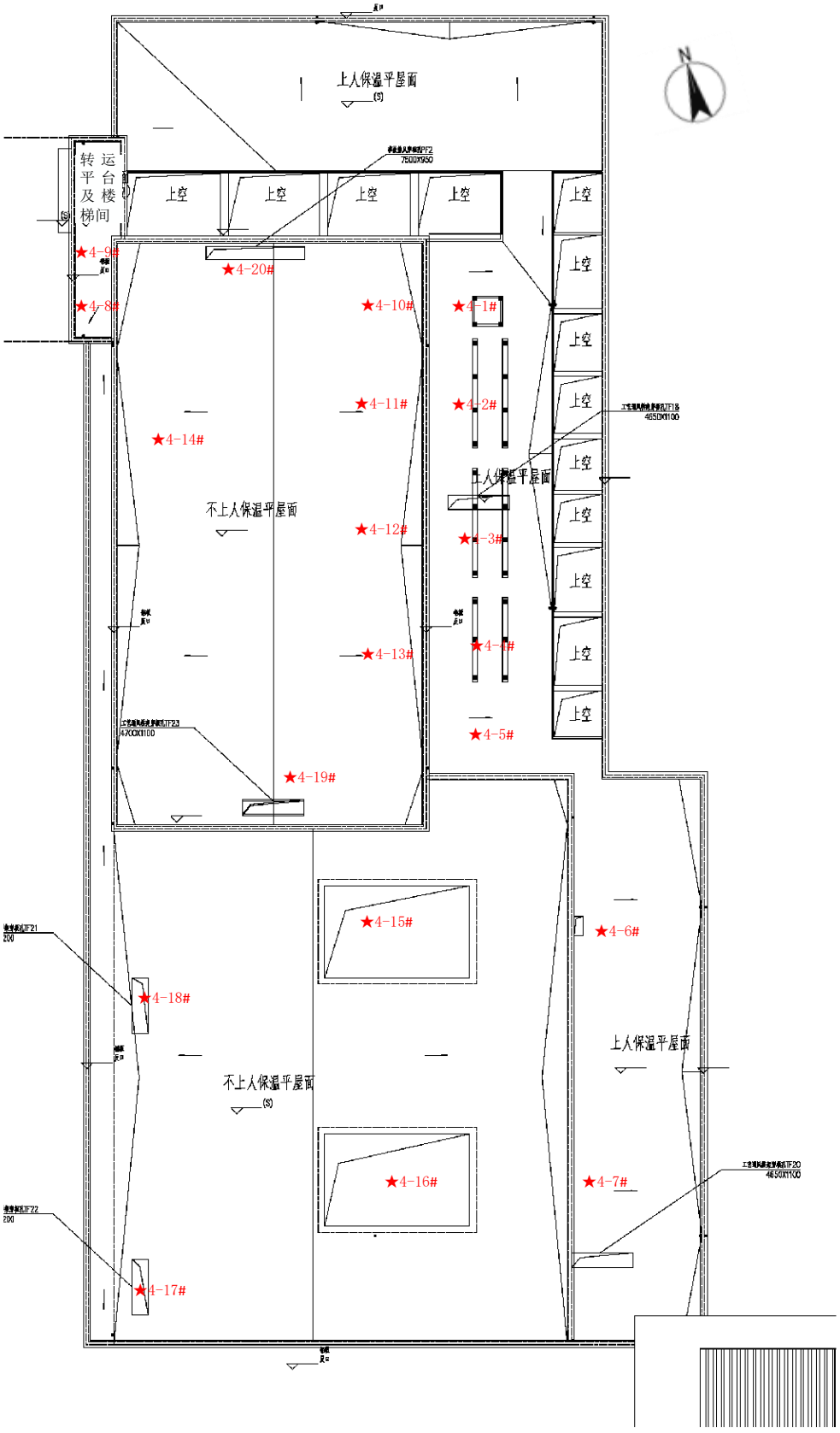


图 5.2.2-26 质子重离子机房屋顶周围关注点示意图

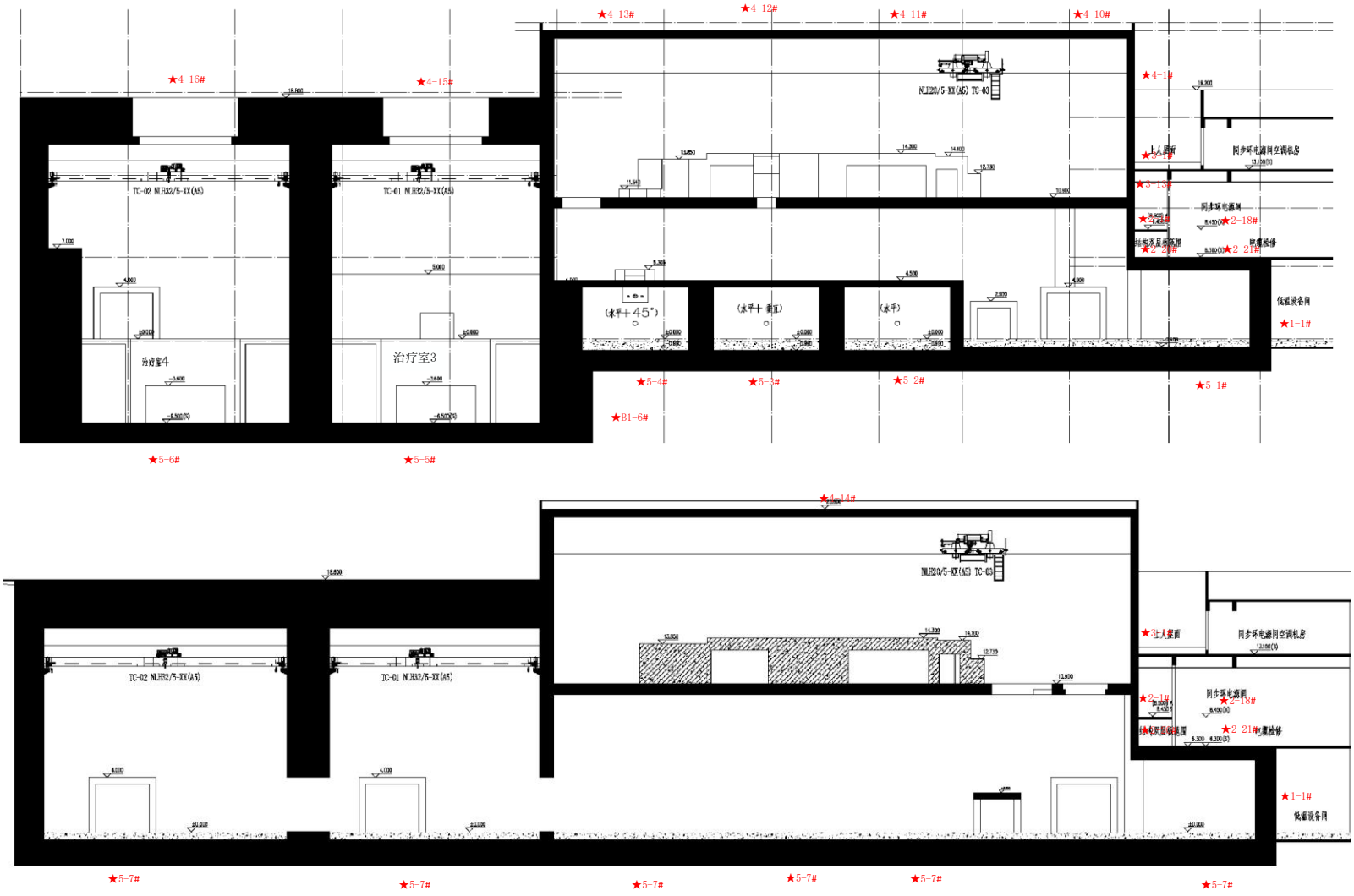


图 5.2.2-27 质子重离子机房周围关注点剖面示意图 1

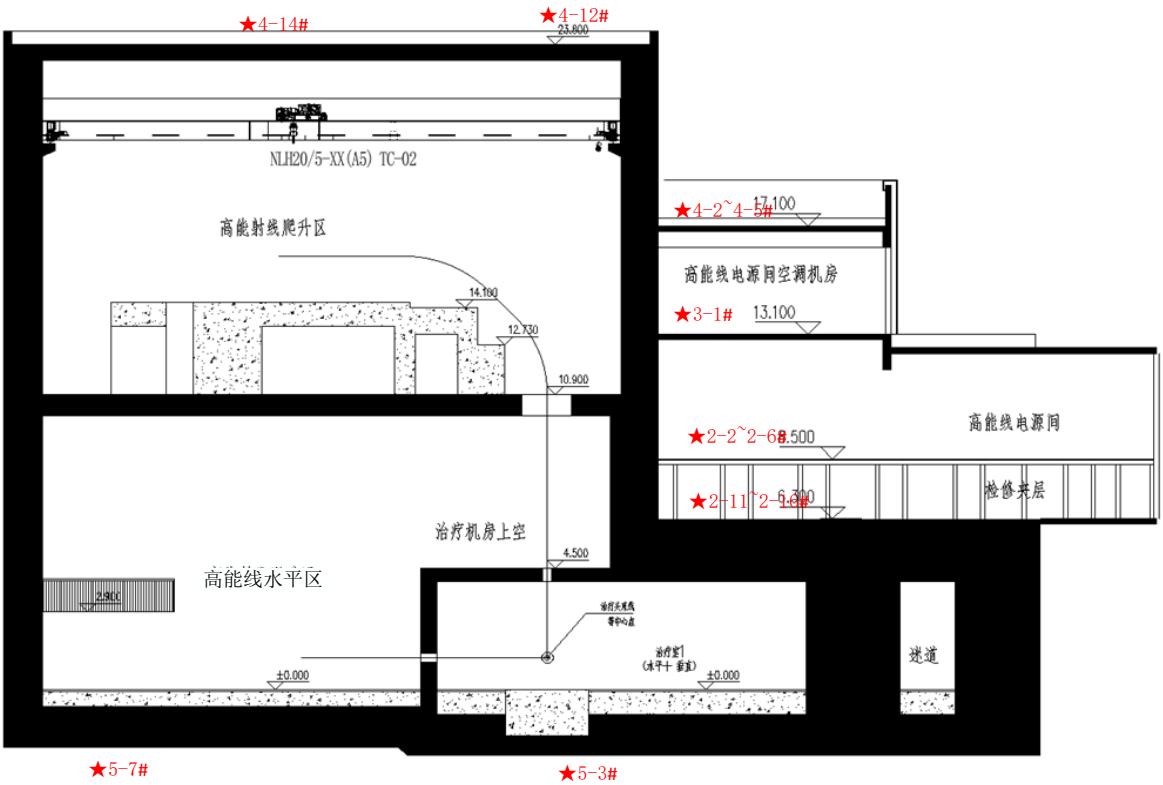


图 5.2.2-28 质子重离子机房周围关注点剖面示意图 2

5.2.3 工作人员受照剂量估算

本项目质子重离子放射治疗系统的工作人员主要包括治疗医生、物理师、治疗技师和维修工程师四类，其工作量汇总具体见表 3.4.2-1。

质子重离子放射治疗系统正常运行期间，人员的有效剂量参考方杰主编的《辐射防护导论》中的公式计算，计算公式如下：

$$D_{Eff}=Dr\times t\times T\times U \qquad （式 5.2.3-1）$$

式中：

D_{Eff}—辐射外照射人均年有效剂量，mSv；

Dr—辐射剂量率，mSv/h；

T—居留因子；

t—工作时间，h。

5.2.3.1 治疗技师

根据质子重离子放射治疗系统的治疗流程，治疗技师的工作内容主要包括在治疗前的模拟定位，在治疗机房指导患者治疗前摆位，在控制室内操作 X 射线管或滑轨 CT

机进行精确的位置验证，在控制室内操作质子重离子放射治疗系统出束，治疗结束后对患者解除摆位并协助其离开机房。其受照途径主要考虑外照射（瞬发辐射外照射和空气浸没外照射）和吸入内照射。

5.2.3.1.1 瞬发辐射外照射

5.2.3.1.1.1 质子重离子机房内协助患者摆位并协助其离开机房

患者每次治疗结束后，治疗技师在质子重离子机房接触的是受到照射的患者，除了质子重离子机房内感生放射性气体所致的浸没外照射剂量率，还需考虑照射结束后的患者产生的感生放射性剂量率，根据表 3.3.1-17，质子重离子放射治疗系统停机 5min 后，质子重离子机房内患者剂量率为 2.1μSv/h，保守以该数值作为治疗技师在治疗后解除摆位时受到的瞬时剂量率。相邻治疗室剂量率保守取最大剂量，即以治疗室 3 南侧相邻治疗室 4 的剂量率 0.230（取自表 5.2.2-2）。

质子重离子机房内的患者摆位分为两种，即治疗前摆位和治疗后解除摆位。根据表 3.4.2-1，每名治疗技师每年参与患者治疗前摆位年所需时间为 433.3h/人，治疗后对患者解除摆位并协助其离开机房年所需时间为 86.7h/人，共 520h/人。

患者每次治疗前，治疗技师在质子重离子机房接触的是未受到照射的患者，因此不考虑患者治疗前摆位时患者感生放射性对治疗技师的外照射影响。

由此可计算得出每名治疗技师协助患者摆位并协助其离开机房期间所受的年有效剂量，估算结果如下表所示。

表 5.2.3-1 每名治疗技师协助患者摆位并协助其离开机房期间所受的年有效剂量

摆位情况	来源	瞬时剂量率，μSv/h	年受照时间，h	居留因子	年受照剂量，mSv/a
治疗后解除摆位并协助其离开机房	患者感生放射性	2.1	86.7	1	1.82E-01
	相邻治疗室	0.230	520	1	1.20E-01
合计					3.02E-01

5.2.3.1.1.2 控制室内工作期间

质子重离子放射治疗系统、X 射线管和滑轨 CT 机出束期间，治疗技师在控制室内工作。考虑到质子重离子机房各屏蔽墙体的厚度远远高于 X 射线管和 CT 机的要求，且滑轨 CT 机和 X 射线管的总出束时间较短，因此 X 射线管和滑轨 CT 机出束期间对控

制室治疗技师的受照剂量可忽略。本次计算主要考虑质子重离子放射治疗系统出束期间对控制室治疗技师的受照剂量。

根据表 3.4.2-1，每名治疗技师每年在操作台工作时间为 260h/人。

根据表 5.2.2-2，1-13#点位（治疗室 3 东墙外 30 cm 处：控制台）的剂量率最大值为 0.102 μSv/h，作为治疗技师在控制台处工作期间的剂量率。由此可计算得出每名治疗技师在控制室工作期间所受的年有效剂量，估算结果如下表所示。

表 5.2.3-2 每名治疗技师在控制室工作期间所受的年有效剂量估算结果

工作区域	辐射剂量率，μSv/h	年受照时间，h	居留因子	年有效剂量，mSv
控制室	0.102	260	1	2.65E-02

5.2.3.1.2 空气浸没外照射

空气浸没外照射剂量可由式 5.2.3-2 计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \qquad （式 5.2.3-2）$$

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，本报告取 1；

G 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见下表，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子，本报告取 1。

表 5.2.3-3 剂量转换因子

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

质子重离子机房内的患者摆位分为两种，即治疗前摆位和治疗后解除摆位。根据表 3.4.2-1，每名治疗技师每年参与患者治疗前摆位年所需时间为 433.3h/人，治疗后对患者解除摆位并协助其离开机房年所需时间为 86.7h/人，共 520h/人。治疗室内空气感

生放射性数据见表 3.3.1-6。

根据式 5.2.3-2 可计算出治疗技师在治疗室内摆位空气浸没外照射剂量，估算结果见下表。

表 5.2.3-4 剂量转换因子

区域	核素	静态饱和活度浓度，Bq/m^3	空气浸没外照射剂量，mSv	合计 mSv
科研室、治疗室 1-4	^{11}C	5.79E+02	5.30E-05	1.48E-04
	^{13}N	5.42E+02	4.97E-05	
	^{15}O	3.95E+02	3.63E-05	
	^{41}Ar	6.98E+01	8.50E-06	

5.2.3.1.1.3 吸入内照射

工作人员在质子重离子机房内工作期间，除受到感生放射性气体的浸没外照射，还会由于吸入感生放射性气体受到内照射，吸入内照射剂量可由下式计算。

$$H_{h\cdot i} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \qquad （式 5.2.3-3）$$

式中：

$H_{h\cdot i}$ 为年吸入内照射年有效剂量，Sv/a；

T 为年受照时间，h/a；由前文可知，每名技师在质子重离子机房内的年总工作时间为 433.3h（治疗前摆位）+86.7h（解除摆位并协助离开机房）=520h；

u 为正常情况下的呼吸率，m^3/h，成人的呼吸率取值 1.2m^3/h；

$C_{a\cdot i}$ 为工作场所内部空气感生放射性核素的浓度，Bq/m^3；保守以机房内动态空气饱和浓度计算，见表 3.3.1-6。

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

表 5.2.3-5 吸入内照射剂量转换因子

核素	吸入内照射剂量转换因子，Sv/ Bq
^{11}C	1.80E-11
^{13}N	——
^{15}O	——
^{41}Ar	——

根据式 5.2.3-3，可计算得出每名治疗技师在控制室工作期间所受的年有效剂量，估算结果如下表所示。

表 5.2.3-6 每名治疗技师在机房内工作期间所受感生放射性气体吸入内照射剂量

核素	$C_{a,i}$，Bq/m³	T，h/a	u，m³/h	$g_{h,i}$，Sv/Bq	$H_{h,i}$，mSv/a
^{11}C	5.79E+02	520	1.2	1.80E-11	6.50E-03
^{13}N	5.42E+02	520	1.2	——	——
^{15}O	3.95E+02	520	1.2	——	——
^{41}Ar	6.98E+01	520	1.2	——	——
总计	——	——	——	——	6.50E-03

5.2.3.1.1.4 小结

综上所述，每位治疗技师工作期间所受的年有效剂量计算结果列于下表。

表 5.2.3-7 每位治疗技师工作期间所受的年有效剂量计算结果

来源		年有效剂量，mSv/a
瞬发辐射外照射	协助患者摆位并协助其离开机房期间	3.02E-01
	控制室内工作期间	2.65E-02
空气浸没外照射	质子重离子机房内工作	1.48E-04
空气吸入内照射	质子重离子机房内工作	6.50E-03
总计		3.35E-01

5.2.3.2 治疗医生

治疗医生的工作地点主要在办公室和诊室内，仅在临床试验期间以及质子重离子机房内出现突发状况时会进入机房内部，每名治疗医生在治疗机房内部的工作时间不会超过 20h/年。保守以治疗医生在患者治疗结束 1min 内进入质子重离子机房内部，距离患者 50cm 处的剂量率水平作为治疗医生在机房工作期间的剂量率，取值 6.379μSv/h（表 3.3.1-17）；相邻治疗室剂量率保守取最大剂量，即以治疗室 3 南侧相邻治疗室 4 的剂量率 0.230（取自表 5.2.2-2），每名治疗医生所受的年有效剂量估算结果如下表所示。

表 5.2.3-8 每名治疗医生所受的年有效剂量估算结果

工作区域	照射途径	辐射剂量率，μSv/h	年受照时间，h	居留因子	年有效剂量，mSv	合计 mSv
质子重离子机房内	患者感生放射性	6.379	20	1	1.28E-01	1.32E-01
	相邻治疗室	0.230	20	1	4.60E-03	
	浸没外照射	5.67E-06				
	吸入内照射	2.50E-04				

注：浸没外照射和吸入内照射计算方法同技师，照射时间取 20h。

5.2.3.3 物理师

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，主要是利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行人体仿真模体（一般为等效水模体）模拟治疗。每天治疗患者前，质子重离子放射治疗系统要开展QA（质量保证），分为状态检测和稳定性检测，一般选用质子重离子放射治疗系统临床常用能量区进行检测。检测类别一般分为设备防护安全、剂量学部分、机械部分，检测周期分为日检、月检、半年检和年检，不同检测项目对应不同检测周期，具体要求见《医用质子重离子放射治疗设备质量控制检测标准》（WS 816-2023）附录 B 和 C，本报告不详细描述。

物理师受照剂量主要来自其在治疗计划验证和 QA（质量保证）工作期间。

（1）治疗计划验证

根据表 3.4.2-1，每名物理师治疗计划验证期间每年在操作台工作时间为 40h/人，质子重离子机房内工作时间为 18.7h/人。

由于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，且计划验证采用的人体仿真模体与患者组成配比相似，故物理师在每次治疗计划验证期间的受照剂量保守与每次治疗期间技师在控制台的受照剂量取值一致。

物理师在质子重离子机房内工作期间，除受到感生放射性气体的浸没外照射，还会由于吸入感生放射性气体受到内照射。

根据表 5.2.2-2，1-13#点位（治疗室 3 东墙外 30 cm 处：控制台）的剂量率最大值为 0.102 μSv/h，作为物理师在控制室内工作期间的剂量率，相邻治疗室剂量率保守取最大剂量，即以治疗室 3 南侧相邻治疗室 4 的剂量率 0.230μSv/h，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的年有效剂量计算结果列于下表。

表 5.2.3-9 每名物理师进行治疗计划验证期间的年有效剂量计算结果

工作区域	辐射剂量率，μSv/h	年受照时间，h	居留因子	年有效剂量，mSv
控制室	0.102	40	1	4.08E-03
相邻治疗室	0.230	18.7	1	4.30E-03
机房内浸没外照射	5.31E-06			
机房内吸入内照射	2.34E-04			

合计	——	——	——	8.62E-03
注：浸没外照射和吸入内照射计算方法同技师，照射时间取 18.7h。				

（2）QA（质量保证）

根据表 3.4.2-1，每名物理师 QA（质量保证）期间在每年工作时间为 52h/人。

物理师 QA（质量保证）的工作地点包括质子重离子机房和控制室。根据表 5.2.2-2，1-13#点位（治疗室 3 东墙外 30 cm 处：控制台）的剂量率最大值为 0.102 μSv/h，作为物理师在控制室内工作期间的剂量率；相邻治疗室剂量率保守取最大剂量，即以治疗室 3 南侧相邻治疗室 4 的剂量率 0.230μSv/h。

物理师在质子重离子机房内工作期间，除受到感生放射性气体的浸没外照射，还会由于吸入感生放射性气体受到内照射。

检测周期分为日检、月检、半年检和年检，不同检测项目对应不同检测周期，每日 QA 均要用到三维水箱进行质子重离子放射治疗系统剂量学部分的检测。QA 完成后，物理师有必要利用辐射监测仪测得质检设备表面 30cm 处剂量率不高于 2.5μSv/h，再进入质子重离子机房开展后续工作，包括三维水箱的搬运。在此期间水箱表面 30cm 处剂量率按 2.5μSv/h 保守估计，根据表 3.4.2-1，每年搬运水箱的时间按 11h/人计，则由此可计算得出每名物理师 QA（质量保证）工作期间所受的年有效剂量，估算结果如下表所示。

表 5.2.3-10 每名物理师 QA（质量保证）工作期间所受的年有效剂量计算结果

工作内容	来源	剂量率，μSv/h	年受照时间，h	居留因子	年受照剂量，mSv/a
质子重离子机房内搬运水箱	浸没外照射	3.12E-06			
	吸入内照射	1.38E-04			
	活化水箱	2.5	11	1	2.75E-02
	相邻治疗室	0.230	11	1	2.53E-03
在控制室内操作系统出束	瞬发辐射	0.102	52	1	5.31E-03
总计	——	——	——	——	3.55E-02
注：浸没外照射和吸入内照射计算方法同技师，照射时间取 11h。					

（3）小结

综上所述，每位物理师工作期间所受的年有效剂量计算结果列于下表。

表 5.2.3-11 每名物理师工作期间所受的年有效剂量计算结果

治疗计划验证，mSv/a	QA（质量保证），mSv/a	年有效剂量，mSv/a
4.32E-03	3.36E-02	3.79E-02

5.2.3.4 维修工程师（兰州泰基）

兰州泰基拟为本项目配置 15 名维修工程师，负责质子重离子放射治疗系统运行期间日常的维护保养、故障维修，其从事维修维护工作的受照剂量已在已批复的兰州泰基离子技术有限公司《兰州泰基离子技术有限公司销售(含建造)和使用小型化重离子治疗装置项目环境影响报告书》中进行评价分析，批复文件见附件 15。本报告仅引用其评价结论，具体列于下表。本项目配备 1 套质子重离子放射治疗系统，因此，兰州泰基的工作人员从事本项目维修维护工作期间的年有效剂量为 2.69mSv/a。

表 5.2.3-12 兰州泰基维修维护人员的年有效剂量

质子重离子放射治疗系统数量，台	维护维修工作人员年有效剂量，mSv/a
1	2.69

5.2.3.6 工作人员受照剂量汇总

根据上述计算结果，本项目辐射工作人员年有效剂量汇总列于下表。

物理师、治疗技师和维修工程师只从事本项目质子放疗工作，治疗医生除从事本项目质子放疗工作外，还会继续从事放疗科现有的放疗工作。另外，兰州泰基常驻 2 名维修工程师不作为医院人员进行管理。

根据表 1.2.7-1 本项目依托现有辐射工作人员相关信息内容可知，本项目现有辐射工作人员连续四个季度的最大个人剂量检测值为 0.22mSv，故保守将 0.22mSv 作为治疗医生从事放疗科现有的放疗工作的受照剂量，与治疗医生从事本项目质子放疗工作的年有效剂量进行叠加。

由计算结果可知，本项目辐射工作人员年有效剂量最大值为 2.69mSv/a，低于工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5.2.3-13 本项目辐射工作人员年有效剂量计算结果

岗位类别	年有效剂量，mSv	从事放疗科现有的放疗工作的受照剂量，mSv/a	合计年有效剂量，mSv/a
治疗医生	1.32E-01	0.22	0.352
治疗技师	2.15E-01	——	2.15E-01
物理师	3.78E-02	——	3.78E-02
维修工程师（兰州泰基）	2.69E+00	——	2.69E+00

5.2.4 公众的受照剂量估算

质子重离子放射治疗系统正常运行期间，对公众的辐射影响主要来自质子重离子放射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。

5.2.4.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象为质子重离子机房屏蔽体外的公众。质子重离子机房屏蔽体外的公众主要为质子重离子机房四周屏蔽墙外 30 cm 处、各屏蔽门外 30 cm 处、顶棚上方 30 cm 处及管道穿墙处的公众，关注点位置如图 5.2.2-23~图 5.2.2-28 所示，各关注点处的剂量率列于表 5.2.2-2。

根据表 3.4.1-2，质子重离子机房每年总出束时间为 2620h。由此可计算得出质子重离子机房屏蔽体外的公众所受的年有效剂量，估算结果如下表所示。

表 5.2.4-1 质子重离子机房屏蔽体外的公众所受的年有效剂量计算结果

位置		方位	周围环境	最大剂量率，μSv/h	居留因子	与关注点距离	年受照时间，h	年有效剂量，mSv/a
质子重离子中心内部	一层	东	设备间	0.098	1/16	紧邻	2620	1.60E-02
			走道	0.132	1/5	紧邻	2620	6.92E-02
			模具储藏	0.093	1/16	紧邻	2620	1.52E-02
			QA 设备室	0.042	1/16	紧邻	2620	6.88E-03
			治疗大厅	0.128	1/5	紧邻	2620	6.71E-02
			同步环大厅迷宫门外	0.132	1/8	紧邻	2620	4.32E-02
			科研室迷宫门外	0.112	1/8	紧邻	2620	3.67E-02
			治疗室 1 迷宫门外	0.128	1/8	紧邻	2620	4.19E-02
			治疗室 2 迷宫门外	0.047	1/8	紧邻	2620	1.54E-02
			治疗室 3 迷宫门外	0.042	1/8	紧邻	2620	1.38E-02
			治疗室 4 迷宫门外	0.030	1/8	紧邻	2620	9.83E-03
		南	卫生间、更衣间	0.008	1/16	紧邻	2620	1.31E-03
			VIP 等候、室外道路及绿化	0.008	1/5	紧邻	2620	4.19E-03
		西	室外道路及绿化	0.094	1/5	紧邻	2620	4.93E-02
			转运平台及楼梯间	0.094	1/16	紧邻	2620	1.54E-02
		北	低温设备间、加速器备品间	0.055	1/16	紧邻	2620	9.01E-03
	二层	东	电缆夹层、高能线电源间、Gantry 电源间、空调机房	0.096	1/16	紧邻	2620	1.57E-02
		南	上人屋面	0.002	1/16	紧邻	2620	3.28E-04

		西	转运平台及楼梯间	0.022	1/16	紧邻	2620	3.60E-03
		北	2#变电所	0.031	1/16	紧邻	2620	5.08E-03
		北	电缆夹层、同步环电源间、走道、高能线电源间	0.201	1/16	紧邻	2620	3.29E-02
	三层	东	高能线空调机房、高能线电源间空调机房、治疗室空调机房、Gantry 空调机房	0.047	1/16	紧邻	2620	7.70E-03
		西	转运平台及楼梯间	0.001	1/16	紧邻	2620	1.64E-04
		北	上人屋面	0.001	1/16	紧邻	2620	1.64E-04
	屋顶层	东	上人屋面	0.025	1/16	紧邻	2620	4.09E-03
		西	转运平台及楼梯间	0.002	1/16	紧邻	2620	3.28E-04
质子重离子中心外部		东侧	停车场	0.132（1-4）	1/5	22	2620	1.40E-02
			住院综合楼		1	90	2620	9.61E-03
			门诊医技楼		1	82	2620	1.12E-02
			院内道路和景观花园		1/5	52	2620	4.57E-03
		南侧	院内道路	0.008（1-21~1-25）	1/5	20	2620	6.20E-04
			停车场		1/5	53	2620	1.53E-04
			二期预留用地		1	96	2620	2.78E-04
		西侧	院内道路	0.094（1-32~1-34）	1/5	9	2620	2.27E-02
			空地（规划南洋路）和河道		1/16	24	2620	3.01E-03
		北侧	院内道路及绿地	0.055（1-1~1-2）	1/16	6	2620	3.52E-03
			辅助用房		1/16	88	2620	9.38E-05
			万新路		1/16	100	2620	7.44E-05
注：1、保守按设备最大出束时间进行估算。 2、质子重离子中心外部公众的年剂量估算值考虑距离的衰减；以住院综合楼为例：住院综合楼距机房东侧的距离为 90m，则住院综合楼的年剂量估算值为（18）^{2}×0.132÷（18+90）^{2}×2620×1÷1000=2.59E-04mSv；其余非紧邻的公众的年剂量估算值计算方式同上，源与机房表面的距离分别为南：12.5m，西：19m，北：10m。								

5.2.4.2 感生放射性气体排放造成的辐射剂量

本报告使用 IAEA NO.19 技术报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》中推荐的简单稀释模式，估算质子重离子放射治疗系统正常运行工况下感生放射性气体的影响，感生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。计算时主要关注排气口所在建筑里的公众以及排气口近距离范围内公众的受照剂量。

表 5.2.4-2 质子重离子机房放射性排气口参数

排放高度，m	最靠近关注点的建筑物的最大截面积 A_b，m^2	临近最高建筑物高度 H_b，m
24	710（东侧门诊医技楼）	56.3（东侧住院综合楼）
18.8	710（东侧门诊医技楼）	56.3（东侧住院综合楼）

5.2.4.2.1 空气浸没外照射

由上表可知，质子重离子机房排气口高度 H＜2.5H_b（临近最高建筑物高度）：

（1）与排气口近距离范围内的公众，x≤2.5$\sqrt{A_b}$（x≤66.6m）

根据 IAEA NO.19 号报告，当 x≤2.5$\sqrt{A_b}$ 时，关注点处地面空气浓度可由式 5.2.3-4 计算：

$$c_{a,i}=\frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \qquad （式 5.2.3-4）$$

式中，

$C_{a,i}$ 为距离排气口 x 米处核素 i 的地面空气浓度，Bq/m^3；

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s，见表 3.3.1-9；

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

u_a 为释放高度上年平均风速，m/s，取值 2.2m/s；

K 为经验常数，m，取值 K=1m；

（2）与排气口距离 x＞2.5$\sqrt{A_b}$（x＞66.6m）

根据 IAEA NO.19 号报告，当 x＞2.5$\sqrt{A_b}$ 时，关注点处地面空气浓度可由式 5.2.3-5 计算：

$$c_{a,i}=\frac{P_p B Q_i}{u_a} \qquad （式 5.2.3-5）$$

式中：

B 为在下风距离 x 处的高斯扩散因子，$1/m^2$；由式 5.2.3-6 计算，该公式是在大气稳定度 D 条件下。

σ_z 为垂直扩散参数，m，

$$B=\frac{16}{\sqrt{2\pi^3}}\frac{1}{x\sum z}，\ \sum z=(\sigma_z^{\ 2}+A_b/\pi)^{0.5}，\ \sigma_z=\frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}}$$ （式 5.2.3-6）

下风向距排气口不同距离处空气浓度计算结果列于下表。

表 5.2.4-3 下风向距排气口不同距离处空气浓度计算结果，Bq/m³

排放口	核素	与排气口距离			
		≤66.6m	100m	150m	200m
科研室、治疗室 1-4 排放口	^{11}C	3.85E-01	8.63E-02	5.40E-02	3.77E-02
	^{13}N	5.44E-01	1.22E-01	7.63E-02	5.33E-02
	^{15}O	6.46E-01	1.45E-01	9.06E-02	6.33E-02
	^{41}Ar	1.26E-02	2.82E-03	1.76E-03	1.23E-03
同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域排放口	^{11}C	8.55E-03	1.91E-03	1.20E-03	8.37E-04
	^{13}N	1.27E-02	2.84E-03	1.78E-03	1.24E-03
	^{15}O	7.63E-03	1.71E-03	1.07E-03	7.47E-04
	^{41}Ar	3.44E-03	7.70E-04	4.82E-04	3.36E-04

空气浸没外照射剂量可由式 5.2.3-7 计算：

$$H_A=t\cdot S_f\cdot C_{a,i}\cdot G_A\cdot T$$ （式 5.2.3-7）

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；按一年 365 天计；

S_F为建筑物屏蔽因子，本报告取 1；

G 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见下表，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子，本报告取 1。

表 5.2.4-4 剂量转换因子

核素	剂量转换因子	
	空气浸没，(Sv/s)/(Bq/m³)	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	——

空气浸没外照射剂量计算结果列于下表。

表 5.2.4-5 空气浸没外照射剂量计算结果，mSv/a

排放口	核素	与排气口距离			
		≤66.6m	100m	150m	200m
科研室、治疗室1-4排放口	^{11}C	5.94E-07	1.33E-07	8.33E-08	5.81E-08
	^{13}N	8.41E-07	1.89E-07	1.18E-07	8.24E-08
	^{15}O	1.00E-06	2.25E-07	1.40E-07	9.80E-08
	^{41}Ar	2.58E-08	5.78E-09	3.61E-09	2.52E-09
同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域排放口	^{11}C	1.32E-08	2.95E-09	1.85E-09	1.29E-09
	^{13}N	1.96E-08	4.39E-09	2.75E-09	1.92E-09
	^{15}O	1.18E-08	2.65E-09	1.66E-09	1.16E-09
	^{41}Ar	7.05E-09	1.58E-09	9.88E-10	6.89E-10
总计		2.51E-06	5.63E-07	3.52E-07	2.46E-07

5.2.4.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由式 5.2.3-8 计算：

$$H_{h\cdot i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \qquad （式 5.2.3-8）$$

式中：

$H_{h\cdot i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，h/a；按一年 365 天计；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m^3/h，成人：$1.2m^3/h$；

$g_{h\cdot i}$ 为吸入放射性核素 i 产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq，见表 5.2.4-4，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子，本报告取 1。

吸入内照射剂量计算结果列于下表。

表 5.2.4-6 吸入内照射剂量计算结果，mSv/a

排放口	核素	与排气口距离			
		≤66.6m	100m	150m	200m
科研室、治疗室 1-4 排放口	^{11}C	6.07E-08	1.36E-08	8.51E-09	5.94E-09
同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室安装基坑和检修区及其上空区域排放口	^{11}C	1.35E-09	3.01E-10	1.89E-10	1.32E-10
合计		6.21E-08	1.39E-08	8.70E-09	6.08E-09

5.2.4.2.3 总受照剂量

感生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，将上

述计算结果列于下表。

表 5.2.4-7 空气浸没外照射和吸入内照射导致公众年有效剂量计算结果，mSv/a

关注点	与排气口距离			
	≤66.6m	100m	150m	200m
空气浸没外照射	2.51E-06	5.63E-07	3.52E-07	2.46E-07
吸入内照射	6.21E-08	1.39E-08	8.70E-09	6.08E-09
合计	2.57E-06	5.77E-07	3.61E-07	2.52E-07

5.2.4.3 公众受照剂量汇总

根据前文计算结果，结合本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况（表1.5.2-1），本项目公众年有效剂量汇总列于下表。

瞬发辐射外照射所致关注点公众年有效剂量引用表 5.2.4-1 中相关数据，其中重离子质子中心内部（医院内部工作人员、公众成员）选取质子重离子中心内部最大数据，即一层东侧走道处公众的年有效剂量 6.92E-02mSv；重离子质子中心外部（医院内部工作人员、公众成员）选取质子重离子中心外部最大数据，即质子重离子中心西侧院内道路处公众的年有效剂量 2.27E-02mSv。

空气浸没外照射和吸入内照射导致公众年有效剂量引用表 5.2.4-7 中相关数据。

表 5.2.4-8 公众年有效剂量汇总，mSv/a

关注点	年有效剂量，mSv/a		总计，mSv/a
	瞬发辐射外照射	空气浸没外照射和吸入内照射	
重离子质子中心内部（医院内部工作人员、公众成员）	6.92E-02	——	6.92E-02
重离子质子中心外部（医院内部工作人员、公众成员）	2.27E-02	2.57E-06	2.27E-02

由计算结果可知，本项目公众年有效剂量最大值为 6.92E-02mSv/a。根据“5.2.4 机房屏蔽体外剂量率计算小结”分析内容，医院原有核技术利用项目对本项目几乎没有影响，因此本项目正常运行期间，本项目运行所致公众年有效剂量最大值低于 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

5.2.5 叠加影响分析

质子重离子机房 100m 评价范围内还有两台直线加速器和两台模拟定位 CT，因此需考虑几台设备的叠加影响。由图 1.5.1-1 可知，质子重离子中心南侧需考虑模拟定位 CT、直线加速器叠加影响，东侧需考虑模拟定位 CT 叠加影响。由表 5.2.2-2 可知，质

子重离子中心南侧最大剂量率为 0.008μSv/h（1-21~1-25），公众最大年有效剂量为 4.19E-03 mSv；东侧最大剂量率为 0.128μSv/h（1-11）（模拟定位 CT 评价范围内），公众最大年有效剂量为 6.71E-02 mSv。模拟定位 CT 周边最近剂量率为 5.16E-02μSv/h，公众最大年有效剂量为 8.60E-03mSv；直线加速器周边最大剂量率为 0.656μSv/h，公众最大年有效剂量为 4.92E-02mSv；则叠加后机房为最大剂量率为 0.128+0.656+8.60E-03=0.793μSv/h，公众最大年有效剂量为 6.71E-02+8.60E-03=7.57E-02 mSv，4.19E-03+8.60E-03+4.92E-02=6.20E-02 mSv，均满足标准要求。

5.3 直线加速器运行时环境影响分析

5.3.1 直线加速器运行时环境影响分析

本项目加速器有电子线和 X 射线两种治疗模式，因电子线的穿透能力弱于 X 射线，所以一般情况下，机房屏蔽设计满足屏蔽 X 射线防护要求时即可满足屏蔽电子线的防护需要。本项目加速器 X 射线最大能量为 10MV，不需要考虑对中子的屏蔽。

本项目加速器集成一台 CBCT（最大管电压 150kV，最大管电流 1250mA）用于影像引导定位，CBCT 和加速器不会同时出束，加速器机房防护条件在满足加速器屏蔽要求的情况下，机房屏蔽体完全可以满足对 CBCT 开机产生 X 射线的防护，对辐射环境影响较小，因此以下主要对加速器使用 X 射线治疗过程中的环境影响进行分析。

本项目 2 间加速器机房设计相同，南北镜像，因此仅计算 1 号加速器机房周围剂量率，其余机房周围剂量率参考 2 号加速器机房。

根据医院提供资料，本项目拟新建 2 间直线加速器机房，分别安装 1 台电子直线加速器，投入使用后，预计每台加速器每天放射治疗患者最多为 60 人次，平均每名患者治疗照射最大时间为 1.5min，每周工作 5 天，则直线加速器日照射时间为 1.5h，周照射时间为 7.5h，年照射时间为 375h。本项目采用最大加载条件进行估算，即加速器最高标称能量、常用最大剂量率、最大照射野、最大工作负荷等参数进行，具体参数见表 5.3.1-2。

表 5.3.1-2 加速器设备参数

参数名称	参数值
能量	最大 X 射线能量：10MV；电子线能量：20MeV
X 射线泄漏率	X 射线：≤0.1%
正常治疗距离	100cm

常用最大剂量率	10MV：等中心处的 X 射线最大剂量率为 1.44×10^{9}μGy/h 6MV：等中心处的 X 射线最大剂量率为 8.4×10^{8}μGy/h
最大照射野大小	400mm×400mm
机架旋转角度	±180°

5.3.2 关注点选取

关注点选取详见图 5.3.1-1 与图 5.3.1-2。

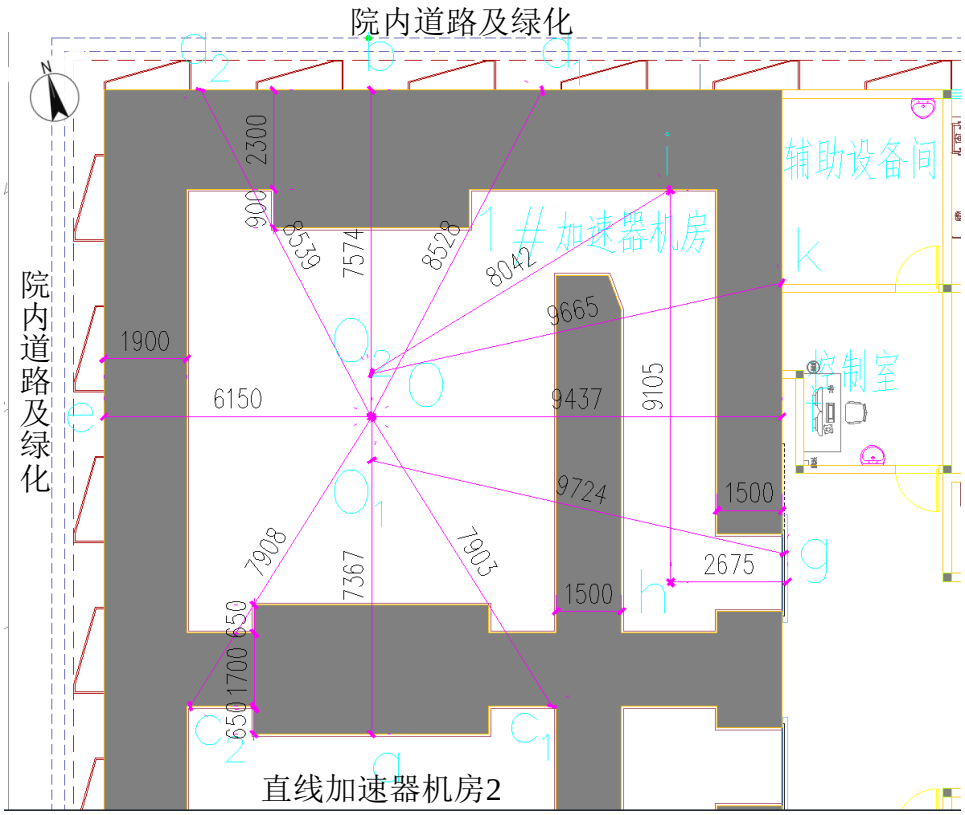


图 5.3.1-1 加速器机房平面布置图（单位 mm）

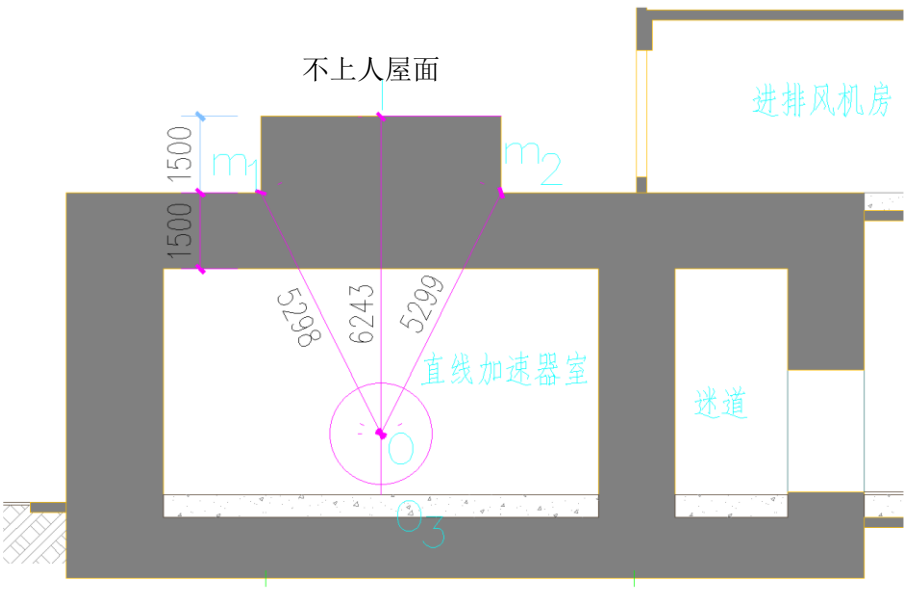


图 5.3.1-2 加速器机房剖面图（单位 mm）

5.3.3 屏蔽体外剂量的计算

本项目评价采用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》(GBZ/T201.1-2007)及《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011)中给出的方法计算。本项目直线加速器 X 射线最大能量 10MV， 10MV 加速器设 10MV、6MV 2 档，对应最高输出剂量率分别为 1440Gy/h、840Gy/h。同一能量档位，机房的辐射屏蔽防护在满足较高输出剂量率屏蔽要求时，也能满足更低输出剂量率的屏蔽防护要求。结合放疗科辐射工作场所布局情况，本项目采用 10MV、1440Gy/h 最大参数进行预测计算。

①有用线束主屏蔽区宽度计算

依据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011)中相应的计算模式及相关参数。

主屏蔽墙体的宽度计算公式：

$$Y_p=2[(a+SAD)\times\tan\theta+0.3]\quad\text{(式 5.3.1-1)}$$

式中：

Y_p——机房有用射线束主屏蔽区的宽度，m；

θ——治疗束的最大张角（相对束中的轴线），即射线最大出射角的一半；射线最大出射角 28°，θ 取 14°；

SAD——源轴距，m；（对于医用加速器 SAD=1m）

a——等中心至“墙”的距离；

当主屏蔽区向机房内凸时，“墙”指与主屏蔽相连接的次屏蔽墙（或顶）的内表面；当主屏蔽墙区向机房外凸时，“墙”指与主屏蔽区墙（或顶）的外表面。

本项目 2 间直线加速器机房需考虑南墙、北墙、顶棚主防护区，两间机房基本相同，南北镜像，以 1 号机房为例，计算结果如表 5.3.1-3 所示。

表 5.3.1-3 主屏蔽墙体的宽度计算一览表

机房名称	主屏蔽墙位置	a（m）	计算值（m）	设计值（m）	评价结果
1 号加速器机房	北墙主屏蔽墙宽度（内凸）	5.274	3.73	4.5	满足
	南墙主屏蔽墙宽度（外凸）	7.367	4.77	5.4	满足
	顶棚主屏蔽墙宽度（外凸）	6.243	4.21	4.7	满足

由上表可知：本项目直线加速器机房北侧、南侧和顶部主屏蔽区宽度符合计算要求。

经建设单位、设计单位向相关设备厂家咨询，目前等中心的位置能够满足设备安装和使用的空间需求；设备厂家和建设单位在进行直线加速器安装时，必须严格按照既定的设备朝向和等中心位置进行安装，即主射束为北侧、南侧、地坪及顶棚，杜绝安装后主射方向超出屏蔽范围的情况出现。

②有用线束主屏蔽区关注点的剂量率估算（关注点：a 点、b 点、l 点）

A、有效屏蔽厚度

当 X 射线束以 θ 角斜入射厚度为 X 的防护材料时，射线束在斜射路径上的防护材料有效屏蔽厚度 Xe 见下式。

$$X_e = X\,sec\,\theta$$……(式 5.3.1-2)

式中：

Xe—防护材料有效厚度，cm；

X—防护材料厚度，cm；

θ—为斜射角（即入射射线与防护材料平面的垂直线之间的夹角）；

B、有效屏蔽厚度的辐射屏蔽透射因子：

$$B = 10^{-(X_e+TVL-TVL_1)/TVL}$$……..（式 5.3.1-3）

式中：

B——辐射屏蔽透射因子；

Xe——有效屏蔽厚度，cm；

TVL_1—第一个十分之一值层厚度，cm；

TVL—平衡十分之一值层厚度，cm。

C、屏蔽体外关注点的剂量率：

引用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）第 5.2.1 节对于给定防护材料厚度时，防护墙体外关注点的剂量率计算公式如下。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B$$……..（式 5.3.1-4）

式中：

$\dot{H}$——相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_o$——加速器有用线束中心轴上距靶 1m 处的常用最高剂量率，μSv•m^2/h；

f——比例因子，对有用线束为1，对泄漏辐射为泄漏辐射比率；

R——辐射源点（靶点）至关注点的距离，m；

B—透射因子，无量纲。

主屏蔽墙外辐射剂量率计算参数及结果见下表5.3.1-4。

表 5.3.1-4 有用线束主屏蔽外关注点辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o$(μSv•m^2/h)	Xe（cm）	TVL_1（cm）	TVL（cm）	f	R（m）	$\dot{H}$(μSv/h)
a 点	1.44×10^9（10MV）	300	41	37	1	7.3+1+0.3	1.95E-01
b 点	1.44×10^9（10MV）	320	41	37	1	7.5+1+0.3	5.36E-02
l 点	1.44×10^9（10MV）	300	41	37	1	6.2+1+0.3	2.56E-01

③侧屏蔽墙及迷道外墙关注点的剂量率估算（关注点：e 点、f 点）

e 点、f 点主要考虑加速器泄漏辐射，泄漏辐射的辐射剂量估算公式同式 5.3.1-4，其中泄漏辐射比率 f 为 0.001，偏保守考虑入射角为 0º，计算参数及结果见表 5.3.1-5。

表 5.3.1-5 侧屏蔽墙关注点辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o$(μSv•m^2/h)	Xe（cm）	TVL_1（cm）	TVL（cm）	f	R（m）	$\dot{H}$(μSv/h)
e点	1.44×10^9（10MV）	190	35	31	0.001	6.1+0.3	3.52E-02
f 点	1.44×10^9（10MV）	150+150	35	31	0.001	9.1+0.3	4.61E-06
k 点	1.44×10^9（10MV）	120+150	35	31	0.001	9.6+0.3	3.86E-05

④与主屏蔽相连的次屏蔽墙外关注点的剂量率估算（关注点：c1 点、c2 点、d1 点、d2 点、m1 及 m2 点）

对于与主屏蔽区直接相连的次屏蔽区，除了考虑有用线束的泄漏辐射外，还需考虑有用线束水平或向顶部照射时，人体散射辐射穿过次屏蔽区后的剂量影响。

A、患者体表的散射辐射

散射辐射主要考虑患者一次散射辐射的剂量率，利用以下公式计算患者体表的散射辐射在防护实体外关注点的剂量率。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{{R_S}^2} \cdot B \qquad \text{（式 5.3.1-5）}$$

式中：

$\dot{H}$—防护实体外关注点的剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_o$—加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶1m处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h；

R_s—患者（位于等中心点）至关注点的距离，m；

α_{ph}—患者 400cm^2 面积上垂直入射 X 射线散射至距其 1m（关注点方向）处的剂量比例，又称 400cm^2 面积上的散射因子；

B—透射因子，无量纲；

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积，cm^2。

次屏蔽墙外关注点的散射辐射剂量率参数及结果见表 5.3.1-6。

表 5.3.1-6 次屏蔽墙外及迷道外墙关注点散射辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o$ (μSv•m^2/h)	Xe（cm）	TVLs（cm）	a_{ph}	F	R_s（m）	$\dot{H}_{散}$ (μSv/h)
c1/c2点	1.44×10^9（10MV）	196.3	28	3.18×10^{-3}	1600	7.9+0.3	2.66E-02
d1/d2点	1.44×10^9（10MV）	254.0	28	3.18×10^{-3}	1600	8.5+0.3	2.00E-04
m1/m2点	1.44×10^9（10MV）	173.2	28	3.18×10^{-3}	1600	5.3+0.3	3.81E-01
注：本表中Xe有效屏蔽厚度由式5.3.1-2计算得出，c1/c2、d1/d2和m1/m2斜射角均按30°计算。							

B、泄漏辐射

泄漏辐射的辐射剂量估算公式同式 5.3.1-4，其中泄漏辐射比率 f 为 0.001。次屏蔽墙外泄漏辐射剂量率计算参数及结果见表 5.3.1-7。

表 5.3.1-7 次屏蔽墙外及迷道外墙关注点泄漏辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o$(μSv•m^2/h)	Xe（cm）	TVL_1（cm）	TVL（cm）	f	R（m）	$\dot{H}_{漏}$(μSv/h)
c1/c2点	1.44×10^9（10MV）	196.3	35	31	0.001	7.9+0.3	1.34E-02
d1/d2点	1.44×10^9（10MV）	254.0	35	31	0.001	8.5+0.3	1.60E-04
m1/m2点	1.44×10^9（10MV）	173.2	35	31	0.001	5.3+0.3	1.60E-01
注：本表中Xe有效屏蔽厚度由式5.3.1-2计算得出，c1/c2、d1/d2和m1/m2斜射角均按30°计算。							

与主屏蔽相连的次屏蔽墙外及迷道外墙关注点的剂量率见表 5.3.1-8。

表 5.3.1-8 与主屏蔽相连的次屏蔽墙外关注点的剂量率

关注点		$\dot{H}_{散}$(μSv/h)	$\dot{H}_{漏}$(μSv/h)	$\dot{H}$(μSv/h)
c1/c2点	10MV	2.66E-02	1.34E-02	4.00E-02
d1/d2点	10MV	2.00E-04	1.60E-04	3.60E-04
m1/m2点	10MV	3.81E-01	1.60E-01	5.41E-01

⑤防护门外辐射剂量（关注点：g 点）

本项目加速器有用线束不向迷路照射，治疗机房迷路入口处 g 点位置的辐射剂量率，主要考虑人体受有用线束照射时，散射至 i 处的辐射并再次受墙的二次散射到 g 处的辐射，以及加速器的泄漏辐射经过迷路内墙屏蔽后在 g 处的辐射剂量。

A、泄漏辐射

泄漏辐射的辐射剂量估算公式同式 5.3.1-4，其中泄漏辐射比率 f 为 0.001。防护门外泄漏辐射剂量率计算参数及结果见表 5.3.1-9。

表 5.3.1-9 泄漏辐射经迷道内墙屏蔽后在迷道外口处的辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o$(μSv•m²/h)	Xe（cm）	TVL_1（cm）	TVL（cm）	f	R（m）	$\dot{H}_{og}$ (μSv/h)
g点	1.44×10^9（10MV）	173.2	35	31	0.001	9.7+0.3	5.33E-02
注：本表中Xe有效屏蔽厚度由式5.3.1-2计算得出，斜射角按30°计算。							

B、入口处的散射辐射剂量率$\dot{H}_g$

入口处的散射辐射剂量率$\dot{H}_g$

按下式计算：

$$\dot{H}_g = \frac{\alpha_{ph}\cdot(F/400)}{R_1^2}\times\frac{\alpha_2\cdot A}{R_2^2}\cdot\dot{H}_0 \qquad （式 5.3.1-6）$$

式中：

$\dot{H}_g$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

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

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积，cm²；

α_2—砼墙入射的患者散射辐射的散射因子，通常取 i（本项目为 B）处的入射角为 45°，散射角为 0°，α 值见（GBZ/T201.2-2011）附录 B 表 B.6，通常使用其 0.5MeV 栏内的值；

A—i 处的散射面积，m²；

R_1—“o-i”之间的距离，m；

R_2—“i-g”（本项目为 i-h+h-g）之间的距离，m；

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

表 5.3.1-10 关注点g点处的散射辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o$ (μSv•m²/h)	α_{ph}	α_2	A m²	F cm²	R_1 m	R_2 m	$\dot{H}_g$ μSv/h
g	1.44×10^9（10MV）	1.35×10^{-3}	22×10^{-3}	14.8	1600	8.0	9.1+2.6+0.3	275

C、防护门外辐射剂量率计算

在给定防护门的铅屏蔽厚度 X（cm）时，防护门外的辐射剂量率$\dot{H}$（μSv/h）按下式计算：

$$\dot{H} = \dot{H}_g \cdot 10^{-(\frac{X}{TVL})} + \dot{H}_{og} \qquad （式 5.3.1-7）$$

式中：

$\dot{H}$—防护门外的辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_g$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_{og}$—g 处的泄漏辐射剂量率，μSv/h；

X—防护门厚度，mm；

TVL—十分之一值层厚度，cm；在 g 处散射的辐射能量约 0.2MeV，铅中的 TVL 为 0.5cm。

表 5.3.1-11 防护门外的辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_g$ μSv/h	X mm	TVL mm	$\dot{H}_{og}$ μSv/h	$\dot{H}$ μSv/h
g	275	15	5	5.33E-02	3.28E-01

⑥加速器治疗室辐射防护评价小结

直线加速器机房周边关注点处辐射剂量率估算结果汇总见表 5.3.1-17。

表 5.3.1-17 各关注点剂量率预测结果与剂量率参考控制水平比较

关注点	预测剂量率（μSv/h）	居留因子	剂量率参考控制水平值（μSv/h）	是否满足控制要求
a 点	1.95E-01	1/2	1.33	满足
b 点	5.36E-02	1/5	3.33	满足
l 点	2.56E-01	1/16	10	满足
e 点	3.52E-02	1/5	3.33	满足
f 点	4.61E-06	1	2.5	满足
k 点	3.86E-05	1/16	10	满足
c1/c2 点	4.00E-02	1/2	1.33	满足
d1/d2 点	3.60E-04	1/5	3.33	满足
m1/m2 点	5.41E-01	1/16	10	满足
g	3.28 E-01	1/8	5.33	满足

加速器机房 1 防护门外 g 处，可能受到加速器机房 2 防护门外的影响，则 g 处的最大剂量率保守按 2 倍估算，为 0.328*2=0.656μSv/h，仍小于剂量率参考控制水平值 5.33μSv/h；加速器机房 1 顶部进排风机房外 m1/m2 处，可能受到加速器机房 2 顶部的

影响，则 m1/m2 处的最大剂量率为 0.541*2=1.08μSv/h，仍小于剂量率参考控制水平值 10μSv/h。

综上，经理论预测，本项目直线加速器运行时，加速器机房各屏蔽体外表面 30cm 处辐射剂量率均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）相应的剂量率参考控制水平。

5.3.4 年有效剂量预测分析

根据各关注点的剂量率，对直线加速器机房工作人员及周围的公众人员进行年有效剂量估算。关注点人员的有效剂量根据式 5.2.3-1 进行计算。

机房外职业人员和周围公众人员可能接受的最大辐射年有效剂量见下表。

表 5.3.1-18 电子直线加速器辐射工作人员及公众年有效剂量估算结果

机房	关注区域	辐射剂量率（μSv/h）	t（h/a）	U	T	年有效剂量(mSv/a)	备注
1号加速器机房	南侧 2 号加速器机房（a）	1.95E-01	375	1	1/2	3.66E-02	公众
	北侧院内绿化和道路（b）	5.36E-02	375	1	1/5	4.02E-03	公众
	上方进排风机房等（m1/m2）	5.41E-01	375	1	1/16	2.54E-02	公众
	西侧院内绿化和道路（e）	3.52E-02	375	1	1/5	2.64E-03	公众
	东侧控制室（f）	4.61E-06	375	1	1	1.73E-06	职业
	东侧辅助设备间（k）	3.86E-05	375	1	1/16	9.05E-07	公众
	东侧防护门外过道(g)	0.656	375	1	1/5	4.92E-02	公众
2号加速器机房	北侧 1 号加速器机房（a）	1.95E-01	375	1	1/2	3.66E-02	公众
	南侧院内绿化和道路（b）	5.36E-02	375	1	1/5	4.02E-03	公众
	上方进排风机房等（m1/m2）	5.41E-01	375	1	1/16	2.54E-02	公众
	西侧院内绿化和道路（e）	3.52E-02	375	1	1/5	2.64E-03	公众
	东侧控制室（f）	4.61E-06	375	1	1	1.73E-06	职业
	东侧辅助设备间（k）	3.86E-05	375	1	1/16	9.05E-07	公众
	东侧防护门外过道(g)	0.656	375	1	1/5	4.92E-02	公众
注：①加速器机房 2 和加速器机房 1 防护门外 g、上方进排风机房等（m1/m2）距离较近，考虑叠加影响。							

① 辐射工作人员年有效剂量

由上表可知，加速器机房工作人员在控制室进行设备操作时的年有效剂量最大值

为 4.61E-06mSv，在加速器机房内摆位时受相邻加速器影响的年有效剂量最大值为 3.66E-02mSv。且由于患者较多，辐射工作人员一般在医用电子直线加速器停机后 2min 左右就进入治疗室内，此时大部分感生放射性核素未能充分衰变，故还需考虑感生放射性对工作人员的影响，本项目按照平均每位患者摆位时间为 30s 考虑，则年总摆位时间为 125h，本项目每间直线加速器机房配置 2 名技师，则单名技师的年摆位时间保守按 62.5h 考虑，保守采用《医用电子直线加速器质量控制检测规范》（WS674-2020）标准规定限值最大值（距离外壳表面 1m 处≤20μSv/h）进行估算，则本项目辐射工作人员在摆位时受到的感生放射性年有效剂量最大为 1.25mSv。则加速器机房工作人员年有效剂量最大值为 1.29mSv。满足辐射工作人员年有效年剂量约束值不超过 5mSv 的要求。

② 公众年有效剂量

由表 5.3.1-18 可知，加速器机房外公众的年有效剂量最大值为 4.92E-02mSv，为上方进排风机房公众。满足本项目公众成员年有效剂量约束值不超过 0.1mSv 的要求。

因辐射剂量率随距离的增加呈现衰减趋势，所以本项目 50m 范围及更远的公众受照的年有效剂量率最大不超过 4.92E-02mSv，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于公众照射的“剂量限值”要求，也满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）提出的 0.1mSv 年剂量约束值。

综上所述，放疗科直线加速器机房辐射工作人员和周围的公众所受外照射年有效剂量符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于“限值”的要求和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中关于剂量约束值的要求，也低于本环评提出的年剂量约束值即工作人员 5mSv 和公众 0.1mSv。

5.3.5 天空散射和侧向散射

本项目机房顶部屏蔽厚度较厚，屏蔽体外关注点剂量率最大仅为 1.08μSv/h，故不考虑天空散射和侧向散射的影响。

5.3.6 电子线和感生放射性的影响分析

此外本项目加速器处于电子束模式下使用初始电子线进行浅层治疗时，会产生电子线。本项目加速器最大 X 射线能量为 10MV，电子线最大能量为 20MeV，由于电子束的穿透能力远小于 X 射线，对治疗 X 射线的屏蔽机房完全满足屏蔽电子束的要求。

电子束治疗时，平均束流为 nA 量级，X 射线治疗时平均束流为 μA 量级，治疗电子束所产生的韧致辐射远小于 X 射线治疗时的辐射，即使电子能量大于治疗 X 射线的最大能量，对屏蔽电子束的韧致辐射所需要的厚度也低于对于 10MVX 射线的屏蔽要求。

当治疗电子线能量大于 10MeV 时，会产生光核反应，从而产生感生放射性。它主要包括两个方面：1）加速器结构材料等（主要为加速器靶）的感生放射性；2）气态感生放射性核素。感生放射性气体产生量较少，且产生的气态感生放射性核素主要为 ^{15}O，^{13}N 和 ^{41}Ar，其半衰期分别为 2.0min，10.0min 和 1.82h，一般在正常通风情况下，感生放射性气体不会对辐射工作人员和病人造成危害。

5.3.7 废靶对环境的影响分析

直线加速器更换下来的废靶，由厂家回收；若放射性超标，则委托有资质单位收贮，对周围环境影响较小。

5.3.8 臭氧和氮氧化物对环境的影响分析

加速器运行过程，X 射线或电子线会与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物。本项目每间加速器治疗室拟安装有效通风量不小于 2400m^3/h 的风机进行通风，加速器机房有效容积约 468m^3，通风换气次数不小于 5 次/h，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）治疗室的通风换气次数应不小于 4 次/小时的要求。臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，对周围环境影响较小。

5.4 模拟定位 CT 运行阶段环境影响分析

5.4.1 机房周围辐射剂量率估算

对于模拟定位 CT 运行时产生的 X 射线的辐射屏蔽。本项目所使用的模拟定位 CT 最大管电压为 150kV，由于 CT 自身带有屏蔽系统，机房周围主要受泄漏辐射影响，参考《医用电气设备 第 1-3 部分：基本安全和基本性能的通用要求 并列标准：诊断 X 射线设备的辐射防护》（GB 9706.103-2020）中“12.4 加载状态下的泄漏辐射”，取本项目模拟定位 CT 距靶 1m 处的泄漏辐射在空气中的比释动能率为 1.0mGy/h。屏蔽计算时，参考 GBZ/T201.1，μGy/h 与 μSv/h 的转化因子取 1。

本项目模拟定位 CT 机房的各屏蔽体的有效屏蔽厚度均不低于 2.6mmPb，根据《放射诊断放射防护要求》附录 C 的 C.1.2 中式 C.1 计算得屏蔽透射因子最大为 2.48E-04，

距离屏蔽体外最近关注点的距离取 3.1m，剂量换算系数 Sv/Gy 取 1，则 CT 设备运行所致的辐射剂量率为 2.58E-02μSv/h，本项目两台模拟定位 CT 机房距离较近，考虑叠加影响后为 5.16E-02μSv/h，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）规定的 2.5μSv/h 控制剂量率要求。

5.4.2 人员受照剂量估算

本项目模拟定位 CT 机投入使用后，单台预计年扫描人数为 10000 人次，CT 的最大出束扫描时间为 1min，则单台模拟定位 CT 预计年出束时间为 166.7h。

对于职业人员，居留因子取 1，年受照时间为 166.7h，根据式 5.2.3-1 计算，则本项目模拟定位 CT 机房辐射工作人员受照的年有效剂量最大为 8.60E-03mSv（本项目两台模拟定位 CT 机房距离较近，已考虑叠加影响），能够满足本项目职业人员受照的年有效剂量不超过 5mSv 的年剂量约束值要求。

对于公众，居留因子保守取 1，年受照时间为 166.7h，根据式 5.2.3-1 计算，则本项目模拟定位 CT 机房周围公众受照的年有效剂量最大为 8.60E-03mSv（本项目两台模拟定位 CT 机房距离较近，已考虑叠加影响），能够满足本项目公众受照的年有效剂量不超过 0.1mSv 的年剂量约束值要求。

5.4.3 臭氧及氮氧化物影响分析

模拟定位 CT 运行过程中，X 射线或电子线会与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物。本项目模拟定位 CT 机房拟设置动力通风装置，进风口及排风口拟设置于机房吊顶，保证机房内有良好的通风。产生的少量臭氧和氮氧化物经动力通风装置收集后最终从夜间急诊楼楼顶排放。臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，可达标排放，对周围环境影响较小。

5.5 事故工况下的环境影响

5.5.1 质子重离子系统

5.5.1.1 事故情景

质子重离子放射治疗系统的核心是加速器，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。

质子重离子放射治疗系统运行期间可能发生的事故主要有：

（1）安全联锁系统失效、人员误入质子重离子机房内部造成的误照射事故；

（2）辐射工作人员在质子重离子机房内部工作期间，质子重离子放射治疗系统出束造成的误照射事故；

（3）冷却水泄漏事故。

5.5.1.2 误照射事故后果分析

假设在质子重离子系统出束期间发生人员误入或误留在机房内的情况，考虑人员在机房内短暂停留 30s，人员所在位置的剂量率保守按等中心输出剂量率 2Gy/min 考虑，则该事故情况下人员的受照剂量计算结果为 1Gy，超过（GB18871-2002）中特殊情况下职业人员 5 个连续年的年平均剂量限值（20mSv），公众 5 个连续年的年平均剂量限值（1mSv），急性放射病发生率超 20%[参考《实用辐射安全手册》（第二版）（丛慧玲，北京：原子能出版社）]，为较大辐射事故。

5.5.1.2.1 事故防范措施

质子重离子放射治疗系统设计有功能齐全、安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，采用清场搜索、紧急停机、分区控制、声光报警灯等安全设备和措施。通过搜索清场功能保障了人员在束流开启前及时离开控制区，防止人员被困在高辐射水平的控制区内；通过急停按钮、紧急开门等功能保障万一发生人员被困或误入正在出束的控制区内、或设备异常等情况时可以紧急关闭辐射源；声光报警和状态指示功能使工作人员了解工作情况，提示人员远离高辐射水平的区域。通过这些措施能够有效防止误入事故的发生。因此，人员误照射事故发生的概率非常小。

此外，为防止人员误照射事故的发生，可采取以下措施加强防范：

（1）为防止各项安全联锁硬件设施失效，应定期检查并确认安全联锁设施的有效性。

（2）开机出束前，撤离质子重离子机房时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和顺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。工作人员进入质子重离子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）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）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。

5.5.1.3 冷却水泄漏事故

5.5.1.3.1 事故后果分析

冷取水管路上安装有水压传感器，一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻发出报警信号同时启动安全联锁系统，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。

本项目质子重离子机房拟设置 4 个事故收集池，总有效容积为 41.1m^3，若出现设备维修或发生冷却水泄漏事故，可能被活化的冷却水（即用于冷却加速器部件的回路中的冷却水）排入事故收集池。事故收集池通过管道与质子重离子机房的地漏相连。事故收集池的标高低于质子重离子机房底板标高，且质子重离子机房设自流坡度确保冷却水能够自流并通过机房内地漏排入该事故收集池内暂存。因此，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

5.5.1.3.2 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。

5.5.2 直线加速器

（1）可能发生的辐射事故

因医用直线加速器本身自带屏蔽措施以及设备固有的安全联锁装置，故设备在正常使用的情况下发生事故的概率极小，可能发生的辐射事故主要包括：

①安全联锁失效，人员可能在防护门未关闭时误入机房，如果这时运行加速器，则可能造成误照射事故。

②除受治疗患者以外，机房中仍有其他人员未撤离时，操作人员未严格按照操作规程确认机房中环境便运行加速器，则会造成机房中人员误照射。

（2）误照射事故后果分析

假设在直线加速器出束期间发生人员误入或误留在机房内的情况，考虑人员在机房内短暂停留 10s，人员所在位置的剂量率保守按等中心输出剂量率 6Gy/min 考虑，则该事故情况下人员的受照剂量计算结果为 1Gy，超过（GB18871-2002）中特殊情况下职业人员 5 个连续年的年平均剂量限值（20mSv），公众 5 个连续年的年平均剂量限值（1mSv），急性放射病发生率超 20%[参考《实用辐射安全手册》（第二版）（丛慧玲，

北京：原子能出版社）]，为较大辐射事故。

（3）预防措施

一旦发现有人误入直线加速器机房，工作人员应立即利用最近的急停开关切断设备电源，启动医院辐射事故应急预案。为防止本项目放疗科设备辐射事故发生，应采取多种防范措施：

①控制台上有辐射类型、标称能量、照射时间、吸收剂量、治疗方式等参数的显示装置，操作人员可随时了解设备运行情况。

②条件显示联锁：加速器具有联锁装置，只有当射线能量、吸收剂量选值、照射方式和过滤器的规格等参数选定，并当治疗室与控制台等均满足预选条件后，照射才能进行。

③剂量控制联锁：安装有剂量监测系统，当吸收剂量未达到预选值时，照射终止。

④控制台上配置有独立于其他任何控制辐照终止系统的辐照控制计时器，当辐照终止后能保留计时器读数，计时器复零，才能启动下次辐照。

⑤有控制超剂量的联锁装置，当剂量超过预选值时，可自动终止照射。

⑥有剂量分布监测装置与辐照终止系统联锁，当剂量分布偏差超过预选值时，可自动终止辐照。

⑦有全部安全联锁设施检查装置，能保证所有安全联锁系统保持良好的运行状态。

⑧有门机安全联锁，机房门关闭后设备才能开机，被打开时会自动关机。

⑨有时间控制联锁，当预选照射时间已定时，定时器能独立地使照射停止。

⑩控制台和治疗室内均安有急停开关。

⑪机房门外设置有声音警示作用的工作状态指示灯和电离辐射警示标志。

⑫视频监控、对讲装置：治疗室和控制室之间安装有视频监控、对讲装置，控制室能通过视频监视治疗室内患者治疗的情况，并通过对讲机与室内人员联系，以便医师在操作时观察患者在治疗室的状态，及时处理意外情况。

5.5.3 模拟定位 CT

（1）事故工况主要包括以下三种情况：

①装置在运行时，由于门-灯联锁系统失效，人员误入或滞留在机房内而造成误照射；

②工作人员或病人家属还未全部撤离治疗机房，控制室人员启动设备，造成滞留

人员的误照射；

③X 射线装置工作状态下，没有关闭防护门对人员造成的误照射。

（2）误照射事故后果分析

假设在模拟定位 CT 出束期间发生人员误入或误留在机房内的情况，考虑人员在机房内短暂停留 10s，人员所在位置的剂量率保守按模拟定位 CT 距靶 1m 处的泄漏辐射在空气中的比释动能率 1.0mGy/h 考虑，则该事故情况下人员的受照剂量计算结果为 2.8E-03 mGy，未超过（GB18871-2002）中特殊情况下职业人员 5 个连续年的年平均剂量限值（20mSv）和公众 5 个连续年的年平均剂量限值（1mSv）。

（3）预防措施

将射线装置放置于专用机房内，机房墙体采用实心砖、硫酸钡防护涂料进行屏蔽，观察窗采用铅玻璃，并设置工作人员防护铅门、受检者防护铅门。受检者防护门处安装工作状态指示灯、设置电离辐射警告标志，防护门关闭时，工作状态指示灯亮，警示人员勿入，同时装置操作台处设置急停开关，操作人员可通过急停开关等停机操作来确保人员安全。因此射线装置发生的辐射事故及风险主要原因是管理上出的问题，工作人员平时必须严格执行各项管理制度，遵守操作规程，进行辐射工作前检查是否已按要求穿戴好各种辐射防护用品，并定期检查设备性能及有关安全警示标志和设施是否正常。对可能发生的辐射事故，应及时采取应急措施，妥善处理，以减少和控制事故的危害影响。

6 辐射安全管理

6.1 机构与人员

6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构

《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条规定：使用I类、II类、III类放射源，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。

医院目前已成立专门的辐射安全与环境保护管理委员会，全面负责医院的辐射安全管理工作及相关工作，见附件 6。该辐射安全与环境保护管理委员会的基本组成涵盖射线装置的管理与使用等相关部门，明确了组成人员及相关职责。本项目建成后，建议将本项目新增的相关人员纳入辐射安全与环境保护管理委员会。

6.1.2 辐射工作人员配备计划

本项目质子重离子拟配备辐射工作人员 52 名，其中依托医院现有放疗科 25 名辐射工作人员，新增辐射工作人员 27 名。本项目每间直线加速器机房配备 2 名技师，2 间加速器机房共配备 2 名医生和 2 名物理师，共 8 名辐射工作人员，均为新增。本项目每间模拟定位 CT 机房配备 2 名技师，2 间模拟定位 CT 机房共 4 名辐射工作人员，均为新增。现有辐射工作人员均已按要求进行了辐射防护与安全培训、个人剂量监测和职业健康体检。

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。辐射防护负责人及其他新增工作人员，医院应按要求每两年进行在岗期间职业健康体检，并建立职业健康档案；组织其参加全国核技术利用辐射防护与安全培训平台（http://fushe.mee.gov.cn/）的辐射防护与安全培训并考核合格，考核合格后，方可上岗，并按时接受再培训，仅操作

Ⅲ类射线装置的，可由医院自主培训合格后上岗；佩戴个人剂量计，建立剂量健康档案并存档保存，个人剂量计三个月送检一次。

除上述医院人员外，兰州泰基常驻 15 名维修工程师负责质子重离子放射治疗系统运行期间日常的维护保养、故障维修，不作为医院人员进行管理。维修工程师的辐射防护与安全培训、个人剂量监测和职业健康体检由兰州泰基负责。

6.2 辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规要求，使用放射性同位素、射线装置的单位，应有“健全的操作规程、岗位职责、辐射防护与安全保卫制度、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，完善的辐射应急措施，还应制定质量保证大纲”。

为加强辐射安全管理，医院在不断总结完善近年来核技术利用工作经验的基础上，制定了包括《辐射事故/事件应急预案》《对实施放射治疗患者的防护制度》《辐射测量仪器的使用与管理制度》《医科达加速器治疗系统操作规程》《辐射装置操作者(技术员)职责》《放疗科放射治疗设备安全防护管理规程》《放射治疗计划实施的质量保证要求》《放射工作人员职业健康检查及保健制度》《放射工作人员资格和培训管理制度》等规章制度（具体见附件 10 和附件 11），并严格按照规章制度执行，医院开展核技术利用项目以来未曾出现过辐射事故。

根据《生态环境部辐射安全与防护监督检查技术程序》的相关要求，将其与医院管理制度现状列于表 6-1 中进行对照分析。

表 6-1 质子（重离子）加速器治疗场所管理制度汇总对照表

序号	检查项目		落实情况	备注
1	A综合	辐射安全与防护管理大纲	已有	/
2		装置运行安全操作规程	/	需制定
3	B场所设施	场所分区管理规定	/	需制定
4		保安管理规定	已有	根据本项目情况进行完善
5		辐射安全和防护设施维护维修制度	已有	
6	C 监测	监测方案	已有	
7		监测仪表使用与校验管理制度	已有	
8	D 人员	辐射工作人员个人剂量管理制度	已有	/
9		辐射工作人员培训/再培训管理制度	已有	/

10	E应急	辐射事故/事件应急预案	已有	根据本项目情况进行完善
11	F废物	放射性“三废”管理规定	/	需制定

6.3 辐射监测

本项目辐射监测总体包括工作场所监测、个人剂量监测和环境监测。工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测主要以巡测的方式进行；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。

6.3.1 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，自行监测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。每年至少进行一次，监测数据记录存档。具体辐射工作场所监测计划列于下表。

表 6-3 本项目辐射工作场所监测计划表

机房	监测类别	监测方式	监测项目	监测点位	监测频次
质子重离子机房	自行监测	固定式仪表监测	X、γ辐射剂量率和中子剂量率	质子重离子机房内，控制室内，共 15 处，见图 4.1.2-12	实时
		便携式仪表监测		质子重离子机房四周和顶棚屏蔽墙体外、防护门外、放射性废物间、活化水间、监督区边界及周围需要关注的区域	1 次/半年
	委托监测		X、γ辐射剂量率和中子剂量率		1 次/年
直线加速器机房	自行监测	固定式仪表监测	X、γ辐射剂量率	直线加速器机房内迷道内口处，见图 4.2.2-1	实时
		便携式仪表巡测		防护门外、门缝、控制室、各侧屏蔽墙外 30cm 处及周围需要关注的监督区	1 次/半年
	委托监测				1 次/年
模拟定位 CT 机房	自行监测			防护门外、门缝、观察窗、控制台、各侧屏蔽墙外 30cm 处、顶棚上方（楼上） 距顶棚地面 100cm 处、管线洞口	1 次/半年
	委托监测				1 次/年

6.3.2 环境监测

参照《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）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下表。

根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）表 12 的备注，空气和气溶胶是根据感生放射性物质气态排放的情况决定是否开展监测，本次评价建议医院根据项目运行期间首次监测情况，自行安排后续是否开展监测。

表 6-4 本项目环境监测计划

监测类别	监测对象	监测方式	监测项目	监测点位	监测频次 运行期间
自行监测	外照射	便携式仪表巡测	X-γ 辐射剂量率和中子剂量率	质子重离子机房建筑墙外及上方、医院边界、环境敏感点开展定点监测	1 次/半年
		自动监测站	X-γ 辐射剂量率和中子剂量率	质子重离子中心周边	连续监测
	固体废物	便携式仪表检测	γ 辐射剂量率	固体废物表面	1 次/年
委托监测	外照射	便携式仪表检测	X-γ 辐射剂量率和中子剂量率	质子重离子机房建筑墙外及上方、医院边界、环境敏感点开展定点监测	1 次/年
	活化废液	样品分析	^{3}H、^{7}Be、总 β	事故收集池	每次排放前监测
	放射性固废外表面 30cm 处	样品分析	感生放射性核素、γ 辐射剂量率	/	委外送贮时
	环境介质（土壤）	样品分析	^{7}Be、^{22}Na、^{54}Mn、总 β	重离子质子中心上下风向各 1 个方位	1 次/年
	空气*	样品分析	^{3}H、^{14}C	重离子质子中心屋顶、环境敏感点开展定点监测	1 次/年
	气溶胶*	样品分析	感生放射性核素、γ 辐射剂量率	重离子质子中心屋顶、环境敏感点开展定点监测	1 次/年
注*：根据感生放射性物质气态排放的情况决定是否开展监测。					

6.3.3 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。质子重离子机房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。

医院为辐射工作人员配备了个人剂量计，并委托浙江建安检测研究院有限公司进

行个人剂量监测，个人剂量计三个月送检一次。安排专人负责个人剂量监测，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。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机房内部工作时使用，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。

6.3.4 监测设备

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式 γ 探测器、固定式中子探测器、便携式X-γ辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、个人剂量报警仪和个人剂量计。具体见下表。

表 6-5 本项目拟配备的辐射监测设备清单

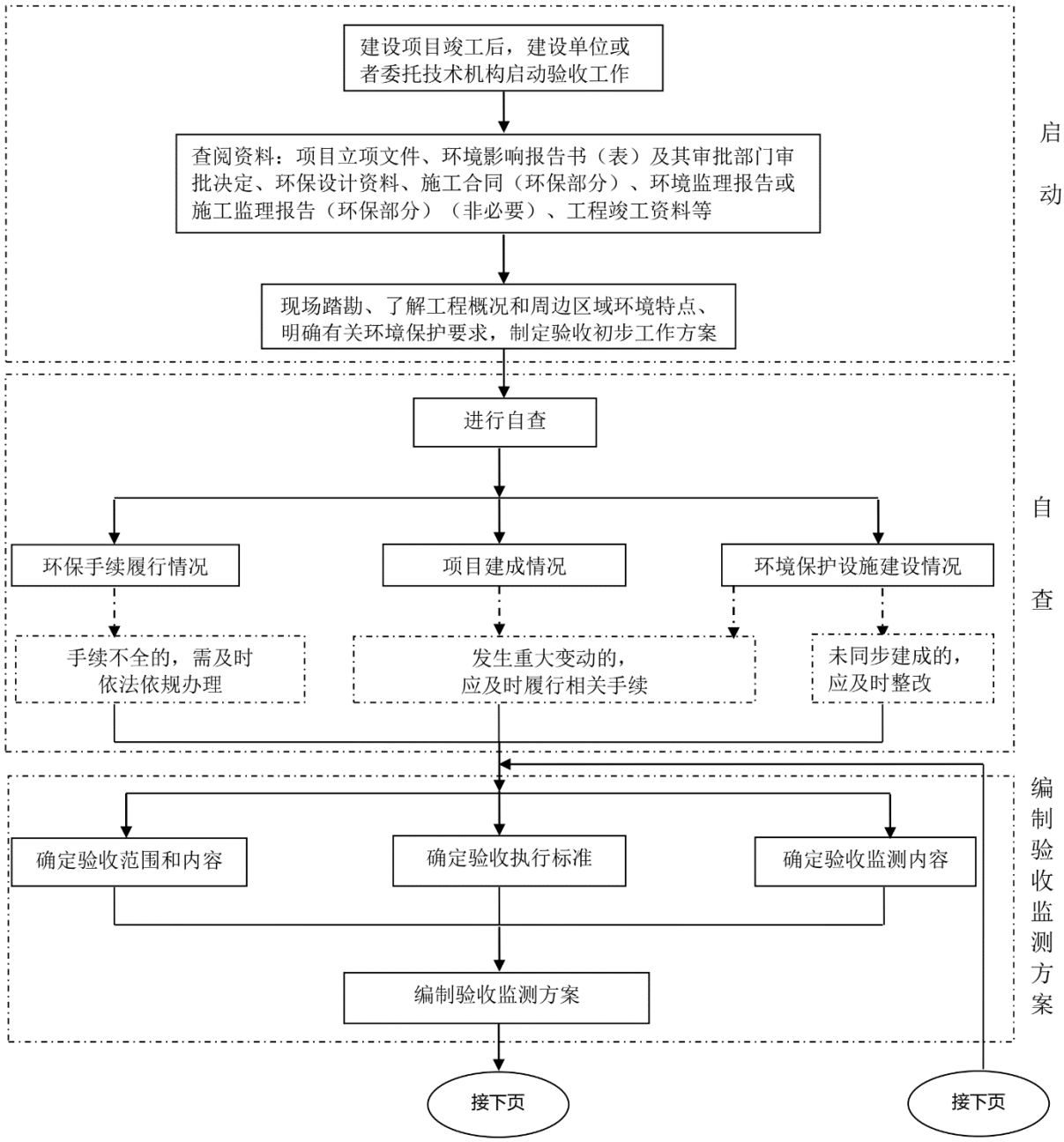
工作场所	监测仪器	配置情况说明	备注
质子重离子	便携式 X-γ 射线巡测仪	配置 1 台	/
	固定式辐射剂量监测仪（可监测 X-γ 辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率）	配置 5 台	/
	便携式中子巡检仪	配置 1 台	共用 1 台
	个人剂量报警仪	配置 10 台	需具有监测 X-γ 和中子的功能
2 间直线加速器机房	便携式 X-γ 射线巡测仪	配置 1 台	与模拟定位 CT 共用 1 台
	便携式中子巡检仪	配置 1 台	共用 1 台
	固定式剂量报警装置	机房内安装 1 台	2 间机房各安装 1 台
	个人剂量报警仪	配置 4 台	2 间机房各 2 台
模拟定位 CT 机房	便携式 X-γ 射线巡测仪	配置 1 台	与直线加速器共用 1 台

6.3.5 竣工环保验收监测

为有效落实环境保护“三同时”要求，确保环保设施的有效性，根据《建设项目环境保护管理条例》和《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ1326-2023），项目建设执行污染治理设施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的“三同时”制度。本项目竣工后，医院应自主开展竣工环保验收工作，对本项目相关环境保护设施的建设、调试、管理及其效果和污染物排放情况开展查验和监

测工作，编制验收监测报告。

医院承诺将在本项目调试阶段委托有资质的检测机构对质子重离子机房周围环境开展竣工环保验收监测，竣工环保验收监测的工作流程如下图所示。



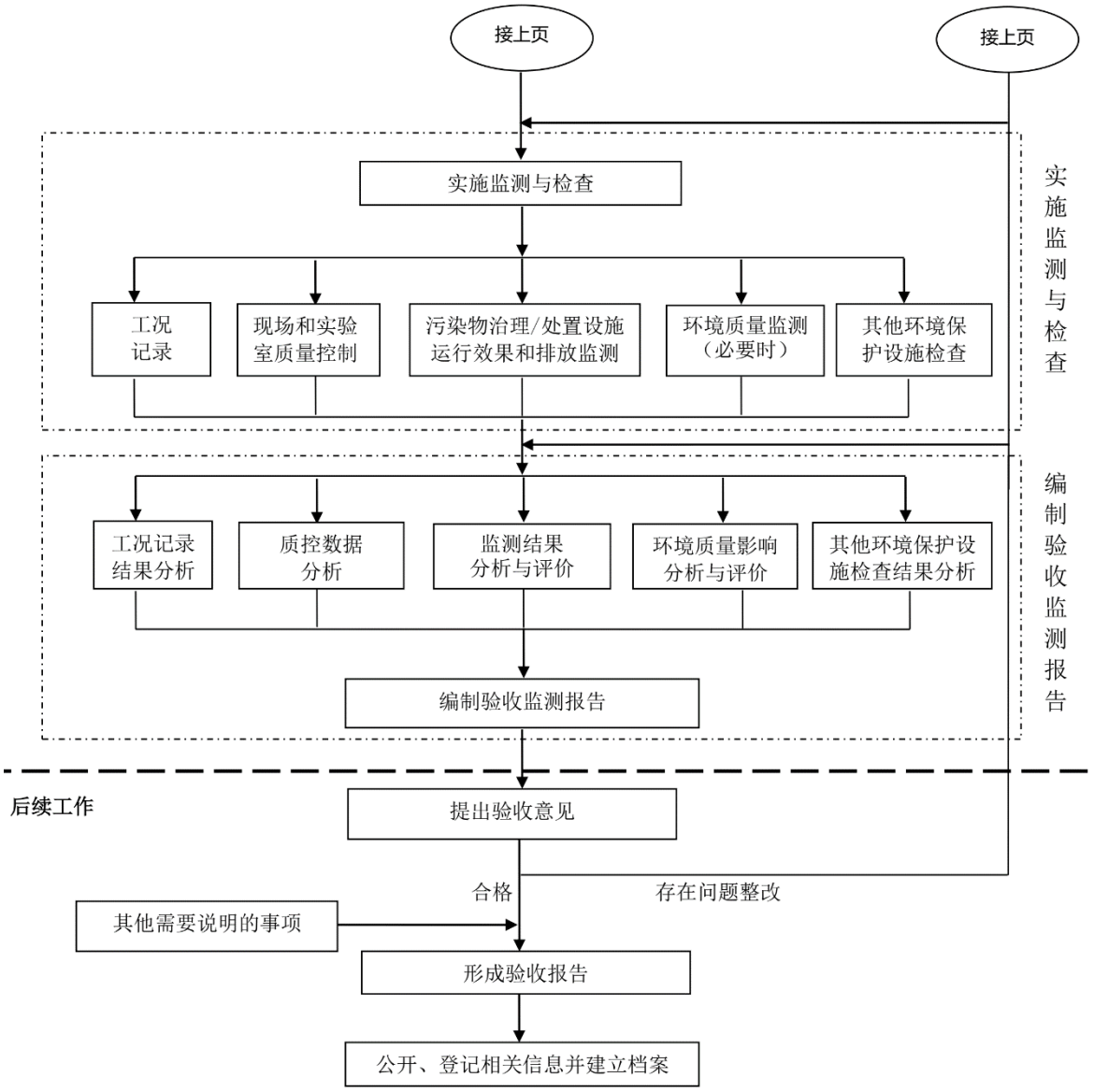


图 6-1 竣工环保验收工作流程

6.4 辐射事故应急

6.4.1 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》第四十一条对辐射事故应急预案内容的要求，辐射事故应急预案应当包括下列内容：

（1）应急机构和职责分工；

（2）应急人员的组织、培训以及应急和救助的装备、资金、物资准备；

（3）辐射事故分级与应急响应措施；

（4）辐射事故的调查、报告和处理程序。

医院目前制定有《辐射事故/事件应急预案》（具体见附件 11），预案中确定了应急小组的职责和相关应急部门的责任并针对医院可能出现的辐射事故制定了切实可行的辐射事故应急措施。主要包括以下内容：

（1）组织管理：医院成立了放射性事件应急处理领导小组并明确其职责，专门负责辐射事故应急工作的组织、指挥和协调。领导小组由组长、副组长和组员组成，领导小组下设办公室。此外，还成立了应急救援工作小组并明确其职责。

（2）应急准备：明确了放射测量仪器、放射防护用品、应急药物、应急设备等应急物资和装备。

（3）辐射事故上报程序：实行逐级报告制度，一旦发生辐射事故，现场工作人员应立即停止放射性工作，启动应急预案。同时报告医院辐射事故应急领导小组，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向福州市生态环境局报告。

（4）事故分级与应急处理程序：明确了辐射事故的分级，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级。根据医院情况明确了核医学科、放疗科和放射科及介入室对应的应急程序。

（5）辐射事故的调查：明确辐射事故发生后，各科室协助调查的程序。

（6）解除应急状态和事后处理：明确了应急状态终止的条件以及应急终止后应执行的行动。

综上所述，医院已制定的《辐射事故/事件应急预案》囊括了放射性事件应急处理的组织机构组成与职责分工、辐射事故等级划分、应急处置程序、事故报告、应急处置措施等内容，应急预案比较全面。医院运行至今，未发生放射性事故。

此外，还应根据本项目的建设内容和特点对现有的《辐射事故/事件应急预案》进行补充、完善，在本项目建成运行前，制定好可行、符合要求的应急预案。

6.4.2 辐射事故应急响应机构

医院已设置放射事件应急处理领导小组，小组组成及职责如下：

组长[redacted]负责全面指挥全院的应急救援工作，负责批准应急救援预案的启动与终止，接受政府的指令和调动，负责确定事故现场的指挥人员，负责确定事故状态下各级人员的职责，负责人员、资源配置、应急队伍的调动工作。

副组长[redacted]在总指挥不在时代替行使总指挥职责，负责事故应急救援中的现场抢险指挥工作，负责事故应急救援中的技术指挥工作，协调解决好医疗救护、后勤保障、通讯联络相关工作，协助总指挥协调事故现场的其他相关工作。

主要成员：

[redacted]负责应急预案的修订、落实演练，负责现场应急的具体工作。

[redacted]负责事故应急响应过程中医院内外通讯线路、通讯方式畅通，负责将应急总指挥的命令传达给责任人，及时将应急反应的情况反馈给总指挥，负责对外的联络在总指挥的授权下，发布污染事故信息、发生发展情况以及污染事故救援、人员伤亡、受影响情况等。

[redacted]负责具体实施抢险抢修过程中现场警戒、维持好现场，禁止非专业应急人员进入现场，做好交通管理工作，当需要疏散时，组织人员有序疏散，在指定集合点组织人员进行清点人数。

[redacted]负责协调财务保障、伤员运送保障、物资供应、车辆等保障工作，负责应急人员的吃、住、行的保障工作。

[redacted]协助总指挥做好污染事故的善后处理工作。

[redacted]组织调查承担放射性物质丢失原因，组织整改并采取预防措施并按“四不放过"原则进行处理。

[redacted]负责应急抢险工作中现场急救、伤员运送工作，对受伤人员进行现场处理，对伤情严重实施急救，协助后勤组或医院急救车送伤员到医院。

6.4.3 应急人员的培训演习

6.4.3.1 培训

医院已制定的《辐射事故/事件应急预案》中已明确应急救援工作人员需要接受全面的培训。应急救援工作人员应了解国家和地方对辐射应急准备和响应的要求和相关基本知识、了解各应急岗位的基本职责，掌握本岗位的技能要求，培训方式包括参加国家核技术利用辐射安全与防护培训平台和医院组织的相关培训。

应急救援工作人员每年应至少参加一次本项目辐射事故专项应急预案的培训学习，熟悉事故类型、危害与处置程序，使之正确理解应急响应要求，有效执行应急响应。应急培训应形成记录并保存。

6.4.3.2 演习

医院已配备相应的应急物资。每年至少开展 1 次辐射事故（件）应急演练。应急演练前编制演戏计划，根据可能发生的辐射事故（件）组织有针对性的演练，采取桌面推演、模拟现场演练等形式，突出练组织练指挥、练程序、练技术、练处置，不断提升辐射事故（件）的应急处置能力，并对每一次演练认真进行评价和总结。

医院最近一次应急演练时间为 2025 年 3 月 1 日，演练内容为后装机卡源，并对演练进行了认真评价和总结，见附件 14。

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的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度的评估报告。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）放射性同位素进出口、转让或者送贮情况以及放射性同位素；

（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。

医院已根据上述要求，编制完成 2024 年度评估报告，并于 2025 年 1 月提交给发证机关。待本项目运行后，一并纳入年度评估。

6.6 从事辐射工作能力评价

《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条规定了建设单位从事辐射活动应具备相应的条件，对照该办法，对医院从事辐射活动的能力进行评价，具体见下表。

表 6-6 医院从事辐射活动能力的评价

应具备条件	本项目落实情况	是否

		符合
使用I类、II类、III类放射源，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；其他辐射工作单位应当有 1 名具有大专以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作；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。	医院已成立专门的辐射安全与环境保护管理委员会，为满足本项目使用Ⅰ类射线装置的需求，还应调整辐射安全与环境保护管理委员会成员，并配备 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人。	符合
从事放射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。	本项目依托现有 25 名辐射工作人员，均已参加了国家核技术利用辐射防护与安全培训平台（http:/fushe.mee.gov.cn）的辐射防护与安全培训并考核合格，且目前均在有效期内。 辐射防护负责人及其他新增工作人员，医院应组织其参加全国核技术利用辐射防护与安全培训平台（http:/fushe.mee.gov.cn/）的辐射防护与安全培训并考核合格，考核合格后，方可上岗，并按时接受再培训。仅操作III类射线装置的，可由医院自主培训合格后上岗。	符合
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。	辐射工作场所设计有相应的屏蔽措施和相应的安全措施。	符合
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	辐射工作场所设计有相应的屏蔽措施和相应的安全措施。	符合
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，包括个人剂量计。	辐射工作场所配备固定式辐射剂量监测仪（质子重离子机房可监测 X-γ 辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率，直线加速器机房可监测 X-γ 辐射周围剂量当量率）、便携式 X-γ辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、个人剂量报警仪和个人剂量计。	符合
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、射线置装使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	医院已制定《辐射事故/事件应急预案》《对实施放射治疗患者的防护制度》《辐射测量仪器的使用与管理制度》《医科达加速器治疗系统操作规程》《辐射装置操作者(技术员)职责》《放疗科放射治疗设备安全防护管理规程》《放射治疗计划实施的质量保证要求》《放射工作人员职业健康检查及保健制度》《放射工作人员资格和培训管理制度》等规章制度。 在本项目建成运行前，应制定质子重离子放射治疗系统操作规程、场所分区管理规定和放射性废物处理制度，并完善保安管理规定、辐射安全和防护设施维护维修制度、监测方案、监测仪表使用与校验管理制度、辐射事故/事件应急预案等规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。	符合
有完善的辐射事故应急措施。	医院已制定的《辐射事故/事件应急预案》囊括	符合

	了放射性事件应急处理的组织机构组成与职责分工、辐射事故等级划分、应急处置程序、事故报告、应急处置措施等内容，应急预案比较全面。医院应根据本项目的建设内容和特点对现有的《辐射事故/事件应急预案》进行补充、完善，在本项目建成运行前，制定好可行、符合要求的应急预案。	
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。	放射性废液暂存在事故收集池，排放前必须进行取样测量，满足废水排放标准后方可排放。 质子重离子机房各层均设通排风系统，其中治疗室内换气次数均大于 4 次；同步环大厅、高能射线爬升区、治疗室 3 和治疗室 4 上空及其安装基坑排风管经重离子质子中心北部排风井，向上引至屋顶排出，排放高度不低于 24m。治疗室内排风管经重离子质子中心中部排风井，向上引至屋顶排出，排放高度不低于 18.8m。 质子重离子机房内部设置放射性废物间，仅用于暂存质子重离子放射治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固体废物。待废物暂存量达到一定量，由医院委托有资质单位进行集中测量分析，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中解控要求的（具体见本报告的表 1.4.3-3），不属于放射性废物，医院按一般固体废物处理或回收利用；不满足解控要求的，属于放射性废物，医院不能自行处理，需委托有资质单位处理。	符合

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。根据国家癌症中心最新癌症统计数据，2016年我国恶性肿瘤新发病例约406.4万人，死亡约241.4万人，我国恶性肿瘤负担日益加重，城乡差异较大，地区分布不均衡，癌症防控形势严峻。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子放射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，质子重离子显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。质子重离子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）本项目建成后，将给区域内外肿瘤患者提供更高质量的放疗服务和更便捷的就医环境，对推动区域医疗卫生健康事业的发展具有积极作用，对提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

（2）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、药品收入、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：本项目使用质子重离子放射治疗系统开展肿瘤质子放射治疗工作，建设一套质子重离子机房及其配套用房。

能源方面，项目运行期间消耗一定量的电能、水资源，项目资源消耗量相对区域资源利用量较少，符合资源利用上线要求。

（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三个方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的瞬发辐射穿过屏蔽体进入周围环境，辐射工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性气体进入大气环境；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，项目运行期间对环境的影响均低于国家标准中规定的限值。

7.3 实践的正当性分析

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中“4.3.1 实践的正当性 4.3.1.1 对于一项实践，只有在考虑了社会、经济和其他有关因素之后，其对受照个人或社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时，该实践才是正当的。”

质子重离子肿瘤技术具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应和更加精准的宽度方向控制，比传统放疗技术具有更为理想的肿瘤局控率和较少的副作用，在国际上被誉为 21 世纪最理想的放疗手段之一。质子重离子装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。本项目拟使用的质子重离子放射治疗系统设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽可能降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对辐射工作人员和公众的辐射影响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）大于可能引起的辐射危害。

通过对本项目的利益和代价的简要分析，考虑经济、社会、环境各方面的因素，利益大于代价，项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的“实践的正当性”，说明本项目满足正当性要求。

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患者。因此，本项目的实施是正当的。

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、现场张贴告示的方式进行了公众参与，公众参与过程中均未收到社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈环境保护相关的意见。

本项目公众参与的开展情况详见《复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）核技术利用项目环境影响评价公众参与说明》。

9 结论和建议

9.1 结论

9.1.1 项目工程概况

福建省肿瘤医院拟于滨海院区重离子质子中心建设质子重离子机房（地上三层，地下一层）及其附属用房，配备 HiTS 400S 型质子重离子一体化治疗系统（包括离子源、低能束运线、直线注入器、中能线、同步加速器、高能束运线和 5 个终端）1 套，5 个终端包括 1 间科研室和 4 间治疗室，科研室为水平治疗终端，治疗室 1 为水平+垂直治疗终端、治疗室 2 为水平+45°治疗终端、治疗室 3 为 360°旋转治疗室、治疗室 4 为 180°旋转治疗室。科研室及各治疗室均集成配备图像引导系统（X 射线管和平板探测器）进行图像引导和复定位，3 号治疗室和 4 号治疗室内拟分别配置 1 台滑轨 CT（Ⅲ类射线装置）用于精准定位。治疗用的粒子是碳离子（$^{12}C^{6+}$）和质子（$^{1}H^{+}$），通过主动式束流配送方式至终端进行治疗，碳离子最高能量 430MeV/u，质子最高能量 230MeV；此外科研室还可供氦离子（$^{4}He^{2+}$）和氧离子（$^{16}O^{8+}$），氦离子（$^{4}He^{2+}$）最高能量 230MeV/u，氧离子（$^{16}O^{8+}$）最高能量 430MeV/u。质子重离子一体化治疗系统属于Ⅰ类射线装置。

拟在滨海院区重离子质子中心一层新增 2 间直线加速器机房及其附属用房，并新增 2 台医用电子直线加速器（以下简称“电子直线加速器”），最大 X 射线能量均为 10MV，每台电子直线加速器集成一台 CBCT，开展放射治疗，属于Ⅱ类射线装置；新增 2 间 CT 模拟定位机房及其附属用房，并新增 2 台 CT 模拟定位机，属于Ⅲ类射线装置。

项目投资：项目总投资约为 80000 万元，其中环保投资约 7000 万元，占总投资的 8.75%。

项目运行期间的辐射污染源主要是使用射线装置时产生的“瞬发辐射”和质子重离子装置停机后依然存在的“感生放射性”，以及质子重离子装置运行期间产生的放射性三废。

9.1.2 实践的正当性

质子重离子肿瘤技术具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应和更加精准的宽度方向控制，比传统放疗技术具有更为理想的肿瘤局控率和较少的副作用，在国际上被誉为 21 世纪最理想的放疗手段之一。质子重离子装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。

本项目拟使用的质子重离子放射治疗系统设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽可能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）大于可能引起的辐射危害。

通过对本项目的利益和代价的简要分析，考虑经济、社会、环境各方面的因素，利益大于代价，项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的“实践的正当性”，说明本项目满足正当性要求。

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患者。因此，本项目的实施是正当的。

9.1.3 选址、布局合理性分析

本项目拟建于福建省肿瘤医院重离子质子中心内，该地块规划用地性质为医疗卫生用地，重离子质子中心属于医院医疗用房。本项目质子重离子机房为四层结构，集中建设在重离子质子中心的负一层、一层、二层和三层，直线加速器机房和模拟定位 CT 机房位于一层，重离子质子中心无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集处，无人员流动性大的商业活动区域，各层功能布置情况见表 1.2.1-1。项目选址满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）5.1.1 和 5.1.2 中有关选址的要求。

本次环评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，本项目采用混凝土作为机房主屏蔽体，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。通过理论预测，本项目正常运行期间，工作人员和公众所受年最大有效剂量均低于本报告确定的 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。

本项目单独选址、集中建设，设置在重离子质子中心内，并设置了相对独立的人流路线，辐射工作场所的进出口处均设置门禁管理，防止无关人员进入，便于场所的防护管理与安全控制。本项目射线装置机房功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关要求。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。

9.1.4 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）辐射安全联锁系统：质子重离子机房设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括门禁控制、门机联锁、清场搜索、急停按钮、声光报警灯、工作状态指示灯、视频监控以及电离辐射警告标志和中文警示说明，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）通排风系统：质子重离子机房设有独立的通排风系统，其排风量、换气次数、排风高度等的设计能够确保排入环境的放射性废气对环境的影响满足相关标准的要求。

加速器运行过程产生的臭氧、氮氧化物经机房强制排风系统排入大气环境后，经自然分解，可达标排放，对周围环境影响较小。感生放射性气体产生量较少，一般在正常通风情况下，感生放射性气体不会对辐射工作人员和病人造成危害。

模拟定位 CT 在曝光过程中产生的少量臭氧和氮氧化物经动力通风装置排入大气环境后，经自然分解，可达标排放，对周围环境影响较小。

（5）工作场所辐射监测系统：质子重离子机房、直线加速器机房内和控制室内均设有固定式辐射监测仪表，对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。

9.1.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，辐射工作人员年最大有效剂量和公众所受年最大有效剂量均低于本报告确定的 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。

9.1.6 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重离子放射治疗系统的运行。

质子重离子机房各层均设通排风系统，换气次数均大于 4 次，排风管经重离子质子中心中部排风井，引至重离子质子中心西北侧的排风井，向上引至屋顶排出，排放

高度不低于 24m。

本项目设有活化水间，放射性废液经管道排入事故收集池内，确保其在得到处置前能够安全暂存。经暂存衰变，取样监测后满足排放要求的排入医院污水管网。

质子重离子机房内部设置放射性废物间，仅用于暂存质子重离子放射治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固体废物。待废物暂存量达到一定量，由医院委托有资质单位进行集中测量分析，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中解控要求的（具体见本报告的表 1.4.3-3），不属于放射性废物，医院按一般固体废物处理或回收利用；不满足解控要求的，属于放射性废物，医院不能自行处理，需委托有资质单位处理。

9.1.7 辐射安全管理

医院目前已成立专门的辐射安全与环境保护管理委员会；为加强辐射安全管理，医院在不断总结完善近年来核技术利用工作经验的基础上，制定了一系列规章制度，并拟根据本项目的建设内容进行补充完善；制定了辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员均参加辐射防护与安全培训，考核合格后方可上岗，并按时接受再培训；已制定辐射事故应急预案，并定期演练；目前制定的辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

9.1.8 公众参与

本项目参照《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环境保护相关的意见。

9.1.9 总结

综上所述，复旦大学附属肿瘤医院福建医院项目二期（福建省肿瘤医院滨海院区一期）核技术利用项目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、公众和环境的辐射影响符合环境保护的要求，该项目对环境的辐射影响是可以接受的。福建省肿瘤医院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。

9.2 建议和承诺

（1）医院在本项目施工过程中必须加强监督，保证建筑材料和施工质量，混凝土施工时要确认成型密度、均匀、表观密度符合设计要求。对于嵌入式安装造成的局部屏蔽减弱部位，应进行屏蔽补偿。

（2）接受质子重离子的患者具有一定的感生放射性，应加强对治疗后患者的防护和管理。建议通过增加治疗技师人数、增加治疗结束后停机等待时间、增加与治疗结束后患者的接触距离，以降低人员受照剂量。

（3）根据环境影响评价结果，辐射工作人员的年有效剂量较高，建议运行后根据个人剂量监测情况酌情增加人员数量，分摊剂量，以满足剂量约束值的要求。

（4）加强对质子重离子机房内尤其是治疗头处感生放射性水平的监测，了解机房内的辐射水平。

（5）落实环评中提出的管理措施和辐射防护措施要求，在实践中建立和不断完善各项辐射管理规章制度和事故应急预案，并采取切实措施保证各种规章制度的有效执行。

（6）医院在本项目取得环评批复后，应向国务院生态环境主管部门申请领取辐射安全许可证。