核技术利用建设项目

连云港市第一人民医院质子中心项目（连云港经济技术开发区人民医院质子中心项目）

环境影响报告书

（公示版）

连云港市第一人民医院

2023 年 12 月

环境保护部监制

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 建设单位及运营单位概况 ..... - 2 -

1.2.2 项目背景、意义 ..... - 3 -

1.2.3 本次环评内容 ..... - 4 -

1.2.4 产业政策和规划符合性 ..... - 6 -

1.2.5 周边环境概况 ..... - 9 -

1.2.6 核技术利用现状 ..... - 9 -

1.3 编制依据 ..... - 14 -

1.3.1 法律、法规和规章 ..... - 14 -

1.3.2 技术导则、标准 ..... - 16 -

1.3.3 其他文件、资料 ..... - 18 -

1.4 评价标准 ..... - 19 -

1.4.1 剂量限值和剂量约束值 ..... - 19 -

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 ..... - 19 -

1.4.3 放射性废物免于辐射防护监管标准 ..... - 25 -

1.4.4 空气中放射性核素导出浓度 ..... - 25 -

1.4.5 O_3 和 NO_X 排放标准 ..... - 26 -

1.4.6 废水排放标准 ..... - 26 -

1.4.7 噪声排放标准 ..... - 27 -

1.4.8 其他标准 ..... - 27 -

1.5 评价范围和保护目标 ..... - 28 -

1.5.1 评价范围 ..... - 28 -

1.5.2 环境保护目标 ..... - 29 -

2 自然环境和社会环境状况 ..... - 32 -

2.1 自然环境状况 ..... - 32 -

2.1.1 地理位置 - 32 -
2.1.2 地形、地质、地貌和地震 - 32 -
2.1.3 气候气象 - 33 -
2.2 社会经济状况 - 33 -
2.3 环境质量和辐射现状 - 34 -
2.3.1 监测内容 - 34 -
2.3.2 监测/取样点位 - 35 -
2.3.3 监测设备和监测方法 - 35 -
2.3.4 质量保证措施 - 38 -
2.3.5 监测结果 - 39 -
2.4 场址适宜性评价 - 44 -
3 工程分析与源项 - 45 -
3.1 项目规模与基本参数 - 45 -
3.2 工程设备与工艺分析 - 50 -
3.2.1 质子治疗系统 - 50 -
3.2.2 射波刀 - 60 -
3.2.3 医用直线加速器 - 64 -
3.2.4 后装机（III类放射源） - 67 -
3.2.5 CT 模拟定位机 - 69 -
3.3 污染源项 - 71 -
3.3.1 质子治疗系统 - 71 -
3.3.2 II、III类射线装置 - 97 -
3.3.3 后装机（III类放射源） - 98 -
3.4 废弃物 - 99 -
3.4.1 废气 - 99 -
3.4.2 废水 - 99 -
3.4.3 固体废物 - 99 -
4 辐射安全与防护设施 - 102 -

4.1 场所布局与屏蔽 ..... - 102 -
4.1.1 质子治疗系统 ..... - 102 -
4.1.2 Ⅱ类射线装置 ..... - 112 -
4.1.3 后装机（Ⅲ类放射源） ..... - 117 -
4.1.4 Ⅲ类射线装置 ..... - 119 -
4.2 辐射安全与防护措施 ..... - 120 -
4.2.1 质子治疗系统 ..... - 120 -
4.2.2 Ⅱ类射线装置 ..... - 127 -
4.2.3 后装机（Ⅲ类放射源） ..... - 130 -
4.2.4 Ⅲ类射线装置 ..... - 131 -
4.3 三废的治理 ..... - 132 -
4.3.1 质子治疗系统 ..... - 132 -
4.3.2 Ⅱ、Ⅲ类射线装置 ..... - 140 -
4.3.3 后装机（Ⅲ类放射源） ..... - 141 -
4.4 服务期满后的环境保护措施 ..... - 141 -
5 环境影响分析 ..... - 143 -
5.1 建设阶段对环境的影响 ..... - 143 -
5.2 运行阶段环境影响分析 ..... - 143 -
5.2.1 质子治疗系统 ..... - 143 -
5.2.2 射波刀 ..... - 179 -
5.2.3 医用直线加速器（Vital Beam 型） ..... - 186 -
5.2.4 医用直线加速器（Halcyon 型） ..... - 201 -
5.2.5 后装机（Ⅲ类放射源） ..... - 214 -
5.2.6 Ⅲ类射线装置 ..... - 219 -
5.2.7 辐射剂量叠加分析 ..... - 221 -
5.3 事故影响分析 ..... - 224 -
5.3.1 质子治疗系统 ..... - 224 -
5.3.2 射波刀、医用直线加速器（Ⅱ类射线装置） ..... - 227 -

5.3.3 后装机（III类放射源）.....- 229 -
5.3.4 III类射线装置.....- 231 -
6 辐射安全管理.....- 233 -
6.1 机构与人员.....- 233 -
6.2 辐射安全管理规章制度.....- 236 -
6.3 辐射监测.....- 237 -
6.3.1 环境监测.....- 237 -
6.3.2 个人剂量监测.....- 238 -
6.3.3 监测设备.....- 239 -
6.4 辐射事故应急.....- 240 -
7 利益-代价简要分析.....- 243 -
7.1 利益分析.....- 243 -
7.2 代价分析.....- 244 -
7.2.1 经济代价.....- 244 -
7.2.2 社会和环境代价.....- 244 -
7.2.3 资源代价.....- 244 -
7.3 正当性分析.....- 244 -
8 结论与建议.....- 245 -
8.1 项目工程概况.....- 245 -
8.2 辐射安全与防护.....- 245 -
8.3 环境影响分析.....- 246 -
8.4 辐射安全管理.....- 247 -
8.5 公众参与.....- 247 -
8.6 建议和承诺.....- 247 -

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：连云港市第一人民医院质子中心项目（连云港经济技术开发区人民医院质子中心项目）

建设地点：连云港市经济技术开发区环湖路西侧、连云港市第一人民医院开发区院区北侧（地理位置示意图见图 1-1）

建设性质：新建

政府代建单位：连云港经济技术开发区政府投资工程服务中心

建设使用单位：连云港市第一人民医院

建设规模：本项目为连云港市第一人民医院开发区院区配套工程，拟在开发区院区北侧建设质子中心（为一栋地上主体 2 层，局部地下 1 层的单体建筑），开展放射治疗相关工作，包括 1 套质子治疗系统（Ⅰ类射线装置，机房内配套有 1 台 CT 模拟定位机和 1 台 X 射线模拟定位机，均为III类射线装置）、1 台 X 线立体定向放射治疗系统（简称“射波刀”，Ⅱ类射线装置）、2 台医用直线加速器（Ⅱ类射线装置）、1 台后装机（内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，为III类放射源）和 1 台 CT 模拟定位机（III类射线装置）。

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



图 1-1 连云港市第一人民医院质子中心项目地理位置示意图

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位及运营单位概况

本项目政府代建单位为连云港经济技术开发区政府投资工程服务中心（以下简称“服务中心”），成立于 2020 年 7 月，代表管委会行使非经营性财政投资项目及管委会指定的其他项目的业主职能和项目管理职能，进行工程建设管理。

本项目建成后的运营单位为连云港市第一人民医院。连云港市第一人民医院始建于 1951 年 10 月，现已发展成为徐淮东部地区规模最大的三级甲等综合医院。连云港市第一人民医院有通灌院区（本部）、高新院区、开发区院区三个院区，其中通灌院区位于连云港市海州区通灌北路 182 号，高新院区位于连云港市海州区振华东路 6 号，开发区院区位于连云港市经济技术开发区环湖路。

本项目设计及施工期由政府代建单位，即服务中心作为本项目的责任主体，项目建成后，运营期负责运营的责任主体为连云港市第一人民医院，由连云港市

第一人民医院办理本项目的环境影响评价审批手续和辐射安全许可证申请手续。（本报告关于核技术利用与辐射安全管理现状、辐射安全管理机构与人员、辐射安全管理规章制度、辐射事故应急等内容主要介绍连云港市第一人民医院的相关情况。）

1.2.2 项目背景、意义

恶性肿瘤已经成为严重威胁中国人群健康的主要公共卫生问题之一，恶性肿瘤死亡占居民全部死因的23.91%。据统计，2015年全国估计新发恶性肿瘤病例约392.9万例，死亡约233.8万人，且近10多年来，恶性肿瘤发病率每年保持约3.9%的增幅，死亡率每年保持2.5%的增幅。当前我国癌症治疗水平与美国等国家相比还有很大差距。

质子治疗系统是一种新型的放疗设备，和目前广泛使用的高能光子和电子相比（例如医用直线加速器），质子能使射线的能量更好地集中在所需要治疗的肿瘤靶区，而避开周围的正常器官和组织，因此可使肿瘤得到足够剂量照射，提高肿瘤局部控制率，同时大大降低正常器官和组织放射并发症。目前，质子治疗肿瘤的适应症可包括：脑和脊髓肿瘤、颅底肿瘤和有关疾病、眼部肿瘤、头颈部肿瘤、胸腹部肿瘤、盆腔肿瘤和儿童肿瘤等多种肿瘤。尤其对于早期肿瘤患者，质子治疗的五年生存率可达到80%以上。对于有重要器官包绕的肿瘤来说，质子治疗也显示了极大的优越性。质子治疗是目前世界上放射治疗领域最为精确和副作用最小、最先进和成熟的高科技治疗手段之一，预计在我国未来20~30年内将会成为肿瘤放射治疗的主流手段。

伴随着人口老龄化的趋势，肿瘤诊疗的需求将持续增长。质子治疗装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备，目前我国多地都在建设/筹建质子治疗中心。为提高连云港市医疗服务保障水平，建设单位拟在连云港市第一人民医院开发区院区北侧新建质子中心项目，是为了顺应放疗“精确诊断、精确定位、精确计划、精确治疗”的新时代，顺应政府鼓励社会办医打造多元化医疗服务的政策，顺应连云港市及周边地区肿瘤患者高端治疗的迫切需求，通过引进质子治疗装置，满足连云港市及周边地区的恶性肿瘤精准高端治疗的需求，提升癌症治疗水平。

射波刀和医用直线加速器可利用 X 射线或电子线，对患者体内的肿瘤进行直接照射；后装治疗机可利用放射源进入腔内病灶实施近距离照射，从而达到消除或减小肿瘤的目的，对广大患者提高治愈率、改善生活质量等方面有重大帮助。

项目建成后，将大大提高连云港市在医疗临床研究和应用方面的科技实力，带动连云港市整体医疗水平的提升。同时，本项目的建设将推动连云港市医疗卫生健康事业发展，对提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

1.2.3 本次环评内容

“连云港市第一人民医院质子中心项目”选址建于连云港市经济技术开发区环湖路西侧、连云港市第一人民医院开发区院区北侧，为连云港市第一人民医院开发区院区配套工程，本项目总用地面积约 10320m^2，总建筑面积约 5500m^2，主要建设内容为新建一栋地上主体 2 层，局部地下 1 层的单体建筑。质子中心地下一层为质子治疗机房的设备底坑，地上一层为患者治疗用房（包括质子治疗机房的患者治疗机房、射波刀机房、医用直线加速器机房、后装治疗机房和 CT 模拟定位机房等），地上二层为质子治疗机房的维修平台和医护办公用房（具体的平面布局见 3.1 节），并配套采购相关设备，配建道路绿化、停车场、雨污水、供电、供水及围墙等附属工程。本次环评为质子中心的辐射环境影响评价，建设阶段已填报建设项目环境影响登记表（备案号：20233207000100000016，见附件 3），本报告书主要针对涉及核技术利用活动的建设内容开展评价，具体如下：

（1）质子治疗机房。该机房位于质子中心的地下一层、地上一层和地上二层东北角。拟于质子治疗机房使用 1 套迈胜医疗设备有限公司生产的 MPT S250i 型单室质子治疗系统，整套系统由束流发生系统（超导同步质子回旋加速器）、束流传输系统、患者定位系统和控制系统组成，提供 70MeV~230MeV 能量的连续可调质子束，属于 I 类射线装置。此外，该系统还配套使用 2 台定位用 X 射线装置（包括 1 台 CT 模拟定位机和 1 台 X 射线模拟定位机），属于Ⅲ类射线装置。

（2）射波刀机房。该机房位于质子中心的地上一层北部，质子治疗机房的

西侧。拟于射波刀机房内配备 1 台 M6 FM 型射波刀，X 射线最高能量为 6MV，0.8m 处输出剂量率最大为 1000cGy/min，属于Ⅱ类射线装置。

（3）医用直线加速器机房。该机房位于质子中心的地上一层北部，射波刀机房的西侧。拟新建 2 座医用直线加速器机房（1#、2#医用直线加速器机房），拟将位于连云港市海州区振华东路 6 号高新区院区肿瘤放疗中心一层直线加速器 1 室内的瓦里安 Vital Beam 型医用直线加速器（X 射线能量：6、10MV，1m 处输出剂量率最大为 600cGy/min；电子线能量：6、9、12、16MeV，1m 处输出剂量率最大为 1000cGy/min）搬迁至 1#医用直线加速器机房；拟于 2#医用直线加速器机房内配备 1 台 Halcyon 型医用直线加速器（X 射线能量：6MV，1m 处输出剂量率最大为 800cGy/min），均属于Ⅱ类射线装置。

（4）后装治疗机房。该机房位于质子中心的地上一层西北角，医用直线加速器机房的西侧。拟将位于连云港市海州区振华东路 6 号高新区院区肿瘤放疗中心一层后装机房内的 KL-HDR-C 型后装机搬迁至此，后装机内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 3.70E+11Bq，属于Ⅲ类放射源。退役时对原机房进行检查和检测，达开放场址要求，以确保今后场地使用安全。

（5）CT 模拟定位机房。该机房位于质子中心的地上一层南部。拟将位于连云港市海州区振华东路 6 号高新区院区肿瘤放疗中心一层 CT 模拟机房内的 SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机搬迁至此，该设备 X 射线管电压最大为 140kV，管电流最大为 800mA，属于Ⅲ类射线装置。

表 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	所在位置	备注
1	质子治疗系统	1 套	Ⅰ类	地下一层、地上一层和二层质子治疗机房	新增
2	CT 模拟定位机	1 台	Ⅲ类	地上一层质子治疗机房	新增
3	X 射线模拟定位机	1 台			新增
4	射波刀	1 台	Ⅱ类	地上一层射波刀机房	新增

序号	射线装置名称	数量	类别	所在位置	备注
5	医用直线加速器	1 台	II 类	地上一层 1#医用直线加速器机房	搬迁
6		1 台		地上一层 2#医用直线加速器机房	新增
7	CT 模拟定位机	1 台	III类	地上一层 CT 模拟定位机房	搬迁

表 1-2 本项目使用放射源情况

序号	放射源名称	数量	活度	类别	所在位置	备注
1	^{192}Ir	1 枚	3.70E+11Bq	III类	地上一层后装治疗机房	搬迁

本项目建成后，高新区院区肿瘤放疗中心的射线装置及放射源，除 1 台 UNIQUE 型医用直线加速器因设备老旧计划淘汰外，其余射线装置及放射源（包含 1 台瓦里安 Vital Beam 型医用直线加速器、1 台 KL-HDR-C 型后装机（内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源）和 1 台 SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机）均搬迁至开发区院区质子中心，高新区院区放射治疗工作均转移至高新区院区开展。

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（2019 年本）》（2021 年修改）中第一类“鼓励类”项目中第三十七款第 5 条的“医疗卫生服务设施建设”类项目。因此，本项目建设符合国家相关产业政策。

1.2.4.2 规划符合性分析

1.2.4.2.1 与医疗卫生相关规划符合性

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。2017 年国务院印发《“十三五”卫生与健康规划》

中确定的工作任务中就包括加强重大疾病防治，建立专业公共卫生机构、综合性医院和专科医院、基层医疗卫生机构“三位一体”的防控机制。2017 年国务院办公厅印发的《中国防治慢性病中长期规划（2017-2025 年）》中将降低重大慢性病过早死亡率作为核心目标，提出到 2020 年和 2025 年，力争 30~70 岁人群因心脑血管疾病、癌症、慢性呼吸系统疾病和糖尿病导致的过早死亡率分别较 2015 年降低 10%和 20%。

本项目为以质子为特色的专科治疗项目，该项目的建设有利于提高连云港市的医疗能力和水平，因此，本项目的建设与国家医疗卫生事业相关规划是相符的。

1.2.4.2.2 与土地利用规划的符合性

拟建项目位于连云港市经济技术开发区环湖路西侧、连云港市第一人民医院开发区院区北侧地块，该地块用地性质为医疗卫生用地，已于 2023 年 6 月 16 日取得建设用地规划许可证，详见附件 4。因此，拟建项目符合土地利用规划要求。

综上所述，本项目的建设符合相关政策和规划的要求。

1.2.4.2.3 “三线一单”相符性

（1）与生态空间管控区域规划的相符性

对照《江苏省政府关于印发江苏省国家级生态红线规划的通知》（苏政发〔2018〕74 号）、《省政府关于印发江苏省生态管控区域规划的通知》（苏政发〔2020〕1 号），本项目用地不占用国家级保护红线和江苏省生态空间管控区，距离本项目最近的生态空间保护区域为连云港花果山省级森林公园，该区域位于本项目南侧，距离约 1.6 公里。对照《省政府关于印发江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知》（苏政发〔2020〕49 号），本项目用地不涉及江苏省内优先保护单元，符合相关法规的要求。本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系见图 1-2。

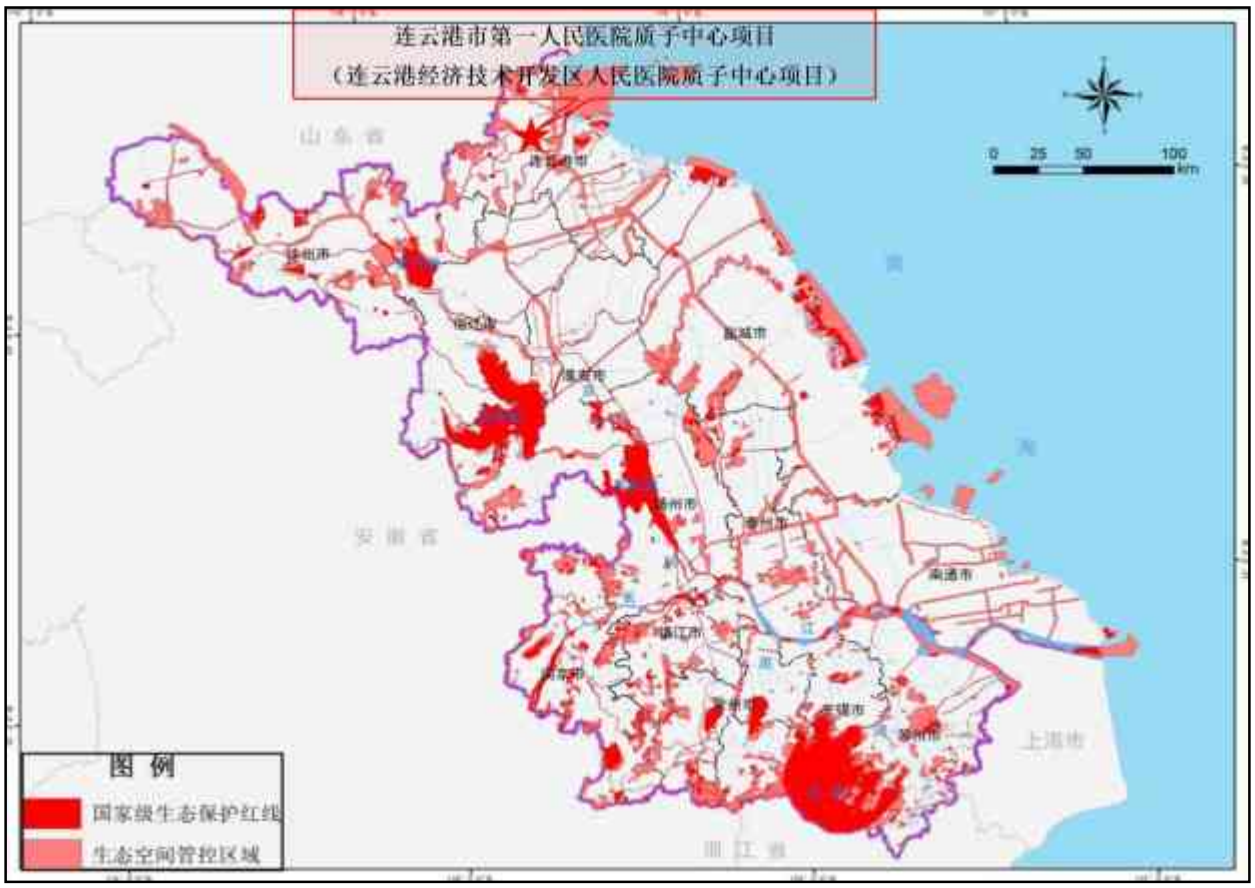

图 1-2 本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系图

（2）环境质量底线相符性

本项目可能产生的室内 O_3 和 NO_x 浓度均低于《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）中规定的 O_3 和 NO_x 职业接触限值，因此本项目的建设不会突破环境质量底线。

（3）资源利用上线相符性

本项目为新建项目，新建的质子中心总建筑面积约 5500m^2，根据《中华人民共和国土地管理法》《中华人民共和国城乡规划法》和国家有关规定，本项目建设工程符合国土空间规划和用途管制要求。在项目运行期间需用水、电等能源。项目的建设不会突破区域资源利用上线。

（4）环境准入负面清单

本项目属于《产业结构调整指导目录（2019 年本）》（2021 年修改）中“鼓励类”的范畴，不属于国家产业政策的“限制类”及“禁止类”。

1.2.5 周边环境概况

本项目建设地点位于连云港市经济技术开发区环湖路西侧、连云港市第一人民医院开发区院区北侧，质子中心东侧为制剂楼（远景规划，现为空地），南侧为连云港市第一人民医院开发区院区停车场，西侧为感染门诊楼，北侧为空地和环湖路，项目周围环境见图 1-3。

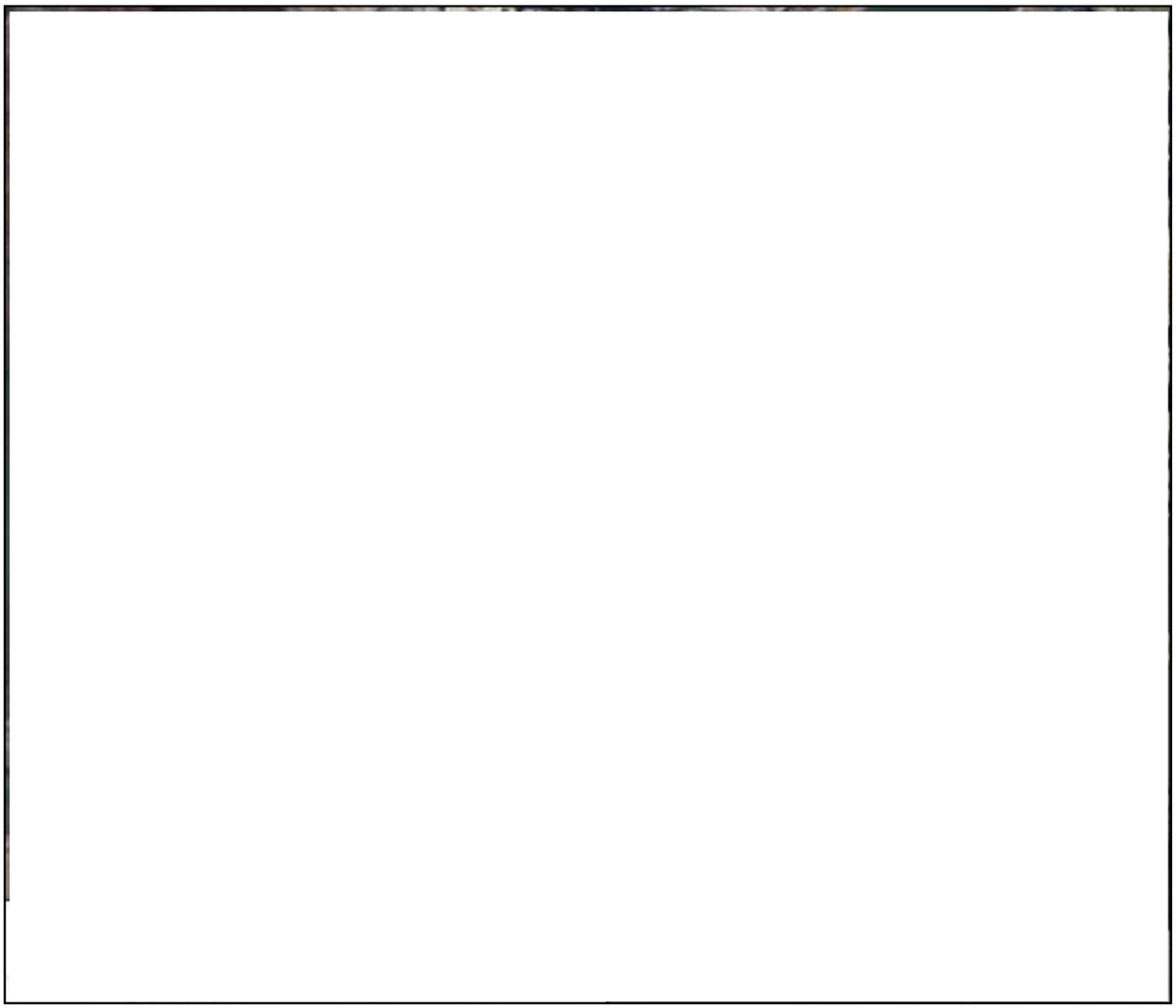

图 1-3 本项目周边关系图

1.2.6 核技术利用现状

连云港市第一人民医院现持有江苏省生态环境厅核发的辐射安全许可证（苏环辐证[01300]），有效期至：2028 年 4 月 29 日，许可种类和范围为“使用Ⅲ类、Ⅴ类放射源；使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所”。医院辐射安全许可证正副本见附件 5，原有核技术利用项

目情况见表 1-3。

医院已开展的核技术利用项目均已履行环保手续，无环保遗留问题。

表 1-3 核技术利用项目基本情况一览表

放射源								
序号	放射源名称	数量	单枚活度（Bq）	放射源类别	工作场所名称	使用情况	环评、许可及验收情况	备注
1	Sr-90	1	1.48E+9	Ⅴ类	高新院区核医学科	使用	已许可、已验收	/
2	Ir-192	1	3.7E+11	Ⅲ类	高新院区后装治疗室	使用	已许可、已验收	拟搬迁
3	Ge-68	3	1.48E+8	Ⅴ类	高新院区核医学科	使用	已许可、已验收	/
非密封放射性物质								
序号	核素名称	日等效最大操作量（Bq）	工作场所等级	工作场所名称		使用情况	环评、许可及验收情况	备注
1	Tc-99m	2.22E+7	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
2	Sr-89	5.92E+6	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
3	Sm-153	3.55E+7	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
4	P-32	3.7E+6	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
5	Mo-99（Tc-99m）	2.22E+7	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
6	I-131	2.59E+9	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
7	I-125（粒子源）	1.78E+6	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
8	F-18	2.22E+6	乙级	高新院区核医学科		使用	已许可、已验收	/
射线装置								
序号	射线装置名称	规格型号	类别	工作场所名称		使用情况	环评、许可及验收情况	备注
1	直线加速器	UNIQUE	Ⅱ类	高新院区放疗中心		使用	已许可、已验收	拟淘汰
2	直线加速器	VitalBeam	Ⅱ类	高新院区放疗中心		使用	已许可、已验收	拟搬迁

3	CT 模拟机	SOMATOM Confidence	III类	高新院区放疗中心	使用	已许可、已验收监测	拟搬迁
4	PET/CT	Biograph mCT Flow 64 2016 MOH	III类	高新院区核医学科	使用	已许可、已验收	/
5	SPECT/CT	symbia T2	III类	高新院区核医学科	使用	已许可、已验收	/
6	DSA	Innova IGS 520	II类	高新院区介入科	使用	已许可、已验收	/
7	DSA	Innova IGS 540	II类	高新院区介入科	使用	已许可、已验收	/
8	CT	Optima CT680	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
9	双源 CT	SOMATOM Drive	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
10	CT	SOMATOM go.Up	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
11	CT	Optima CT680	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
12	CT	Emotion16	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
13	口腔颌面锥形束计算机体层摄影设备（口腔CBCT）	DENTRI-S	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
14	牙片机	RAY68（W）	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
15	移动式C形臂X射线机	CiosSelectS1	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
16	移动式C形臂X射线机	CiosSelectS1	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
17	血液辐照仪	RS3400	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
18	双能X线骨密度仪（局部）	EXA-3000	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
19	碎石机	HD.ESWL-Vm	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
20	移动 DR	KD-M800	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/

21	移动 DR	KD-M800	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
22	DR	Multix Fusion Max 翔龙 Max	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
23	C 臂机	ARCADIS Varic	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
24	C 臂机	ARCADIS Orbic	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
25	DR	DigitalDiagnost C50（单板）	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
26	C 臂机	Cios Select S1	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
27	DR	DR30	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
28	数字胃肠机	OPERA FP	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
29	DR	DigitalDiagnost t4.1	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
30	移动 DR	XR220	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
31	乳腺钼靶机	Selenia Dimensions	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
32	C 臂机	OEC9900Elite	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
33	DR	Dura Diagnost	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
34	C 臂机	Cios Select S1	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
35	C 臂机	Cios Select S1	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
36	骨密度仪	Discovery	III类	高新院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
37	牙片机	FOCUS	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
38	口腔 CBCT	Smart 3D-X	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
39	CT	SOMATOM go.Top	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/

40	乳腺机	uMammo890i	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
41	数字胃肠机	Luminos Fusion 智捷	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
42	DR	uDR760i	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
43	DR	uDR 760i	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
44	移动 DR	uDR380i	III类	开发区院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
45	DSA	Innova4100-IQ	II类	通灌院区介入科	使用	已许可、已验收	/
46	DSA	Innova IGS 540	II类	通灌院区介入科	使用	已许可、已验收	/
47	DSA	Artis Zee Floor	II类	通灌院区介入科	使用	已许可、已验收	/
48	双源 CT	SOMATOM Defintion	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
49	CT	SOMATOM Emotion16	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
50	16 排螺旋 CT	Bright Speed	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
51	X 射线计算机体层摄影设备	uCT528	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
52	64 排 CT	LightspeedVCT	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
53	移动 CT	NL3000	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
54	口腔 CT	NewTow VG	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
55	口腔全景机	MyrayHyperionX7	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
56	牙片机	BLUEX	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
57	移动 DR	KD-M800	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
58	移动 DR	KD-M800	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
59	床边 DR	佳能	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/

60	骨密度仪	Exploror	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
61	DR	yiso	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
62	DR	BUCKY-TH	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
63	骨密度仪	EXA3000	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
64	碎石机	JDPN-VC	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
65	DR	DigitalDiagnost-VS	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
66	数字胃肠机	Precision THUNIS 800	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
67	DR	Digital diagnost	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
68	C 臂机	Bv Endura	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
69	钼靶机	Sengorophe200d	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
70	移动 DR	mira max	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
71	移动 DR	mira max	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/
72	移动 DR	KD-M800	III类	通灌院区影像科	使用	已许可、已验收监测	/

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，中华人民共和国主席令第 9 号；

（2）《中华人民共和国环境影响评价法》，中华人民共和国主席令 第七十七号，2002 年 10 月 28 日发布，根据 2016 年 7 月 2 日第十二届全国人民代表大

会常务委员会第二十一次会议《关于修改〈中华人民共和国节约能源法〉等六部法律的决定》第一次修正，根据2018年12月29日第十三届全国人民代表大会常务委员会第七次会议《关于修改〈中华人民共和国劳动法〉等七部法律的决定》第二次修正；

（3）《中华人民共和国放射性污染防治法》，中华人民共和国主席令 第六号，2003年10月1日起实施；

（4）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院令 第449号，2005年12月1日起施行；2019年修改，国务院令 第709号，2019年3月2日施行；

（5）《建设项目环境保护管理条例》，中华人民共和国国务院令 第253号，1998年11月29日发布，根据2017年7月16日《国务院关于修改<建设项目环境保护管理条例>的决定》（中华人民共和国国务院令 第682号）修订；

（6）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2021年修正本），生态环境部部令 第20号，2021年1月4日起施行；

（7）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环保部令 第18号，2011年5月1日起施行；

（8）《关于发布〈射线装置分类〉的公告》，环境保护部、国家卫生和计划生育委员会，公告2017年 第66号，2017年12月5日起施行；

（9）《江苏省辐射污染防治条例》（2018年修正本），江苏省第十三届人民代表大会常务委员会第二次会议第2号公告，2018年5月1日起实施；

（10）《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021年版），生态环境部令第16号，2021年1月1日起施行；

（11）《产业结构调整指导目录（2019年本）》（2021年修改），国家发展和改革委员会令 第49号，2021年12月30日起施行；

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

（13）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》，生态环境部公告 2019 年 第 57 号，2019 年 12 月 24 日发布；

（14）《环境保护部关于发布<建设项目竣工环境保护验收暂行办法>的公告》，国环规环评〔2017〕4 号，2017 年 11 月 20 日起施行；

（15）《放射源分类办法》，国家环境保护总局公告 2005 年 第 62 号，2005 年 12 月 23 日起施行；

（16）《省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》，苏政发〔2018〕74 号，2018 年 6 月 9 日发布；

（17）《省生态环境厅关于进一步做好建设项目环境影响报告书（表）编制单位监管工作的通知》，苏环办〔2021〕187 号，2021 年 5 月 28 日发布；

（18）《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》，苏政发〔2020〕1 号，2020 年 1 月 8 日发布；

（19）《江苏省政府关于印发江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知》，苏政发〔2020〕49 号，2020 年 6 月 21 日发布；

（20）《江苏省辐射事故应急预案》（2020 年修订版），苏政办函〔2020〕26 号，2020 年 2 月 19 日发布。

1.3.2 技术导则、标准

（1）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；

（2）《声环境质量标准》（GB 3096-2008）；

（3）《电离辐射监测质量保证通用要求》（GB 8999-2021）；

（4）《放射性废物管理规定》（GB 14500-2002）；

（5）《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）；

（6）《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597-2023）；

（7）《社会生活环境噪声排放标准》（GB 22337-2008）；

（8）《高纯锗γ能谱分析通用方法》（GB/T 11713-2015）；

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

（10）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

（11）《水质总α放射性的测定 厚源法》（HJ 898-2017）；

（12）《水质总β放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）；

（13）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

（14）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）。

（15）《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）；

（16）《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）；

（17）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

（18）《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）；

（19）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）；

（20）《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）；

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

（22）《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）；

1.3.3 其他文件、资料

（1）本项目环境影响评价委托书，见附件 1；

（2）《关于对连云港经济技术开发区政府投资工程服务中心连云港市第一人民医院开发区院区项目环境影响报告书的批复》，见附件 2；

（3）连云港经济技术开发区人民医院质子中心项目环境影响登记表和立项文件，见附件 3；

（4）本项目建设用地规划许可文件，见附件 4；

（5）连云港市第一人民医院辐射安全许可证正副本，见附件 5；

（6）环境质量和辐射现状监测报告，见附件 6；

（7）本项目拟搬迁设备原有环保手续相关材料，见附件 7；

（8）质子治疗机房设备噪声噪声源（声功率级）的相关技术资料，见附件 8；

（9）质子治疗机房辐射水平计算分析报告，见附件 9；

（10）建设单位提供的与本项目相关的技术资料；

（11）NCRP REPORT No.144《Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities》，2003；

（12）NCRP REPORT No.151《Structural shielding design and evaluation for megavoltage X-and gamma- ray radiotherapy facilities》，2005。

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》（GB 18871-2002）规定，工作人员的职业照射和公众照射的剂量限值如下：

对象	要求
职业照射剂量限值	应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值： ①由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量，20mSv； ②任何一年中的有效剂量，50mSv。
公众照射剂量限值	实践使公众有关关键人群组的成员所受的平均剂量估计值不应超过下述限值： ①年有效剂量，lmSv； ②特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 lmSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。
剂量约束值通常应在公众照射剂量限值 10%~30%（即 0.1mSv/a~0.3mSv/a）的范围之内。	

1.4.1.2 剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）照射剂量约束和潜在照射危险约束的防护要求，剂量约束值通常应在公众照射剂量限值的10%-30%范围之内。综合考虑《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）等评价标准要求，本项目剂量约束值为：从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a，公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

参照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）、《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）、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）、《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$\dot{H}_c$：

机房外辐射工作人员：$\dot{H}_c$≤100μSv/周；

机房外非辐射工作人员：$\dot{H}_c$≤5μSv/周。

通过周剂量控制参考水平求得关注点的导出剂量率参考控制水平$\dot{H}_{c,d}$（μSv/h）：

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

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。

（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）。

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

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

（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 至表 1-5，参考点的分布见图 5-21 至图 5-23、图 5-26 至图 5-29。

表 1-4 质子治疗机房外的周围剂量当量率参考控制水平

参考点				居留因子 T	使用因子 U	周剂量控制值（μSv/周）	周工作时间（h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）		
								$\dot{H}_{c,d}$	$\dot{H}_{c,max}$	$\dot{H}_c$
质子治疗机房	1	设备底坑东墙外 30cm 处	土层	/	1	/	7.8	/	10	**10**
	2	设备底坑南墙外 30cm 处	楼梯间	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	3	设备底坑南墙外 30cm 处	工艺冷却水设备间	1/20	1	100		255	10	**10**
	4	设备底坑南墙外 30cm 处	隔离变压器室	1/20	1	100		255	10	**10**
	5	设备底坑防护门外 30cm 处	走廊	1/8	1	5		5.10	10	**5.10**
	6	设备底坑防护门上方穿墙管道外 30cm 处	走廊上空	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	7	设备底坑西墙外 30cm 处	走廊	1/8	1	5		5.10	10	**5.10**
	8	设备底坑西墙外 30cm 处	活化水暂存池	1/20	1	100		255	10	**10**
	9	设备底坑北墙外 30cm 处	土层	/	1	/		/	10	**10**
	10	患者治疗机房东墙外 30cm 处	院内绿化	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	11	患者治疗机房南墙外 30cm 处	楼梯间	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	12	患者治疗机房南墙外 30cm 处	UPS 室	1/20	1	100		255	10	**10**
	13	患者治疗机房南墙外 30cm 处	设备间	1/20	1	100		255	10	**10**
	14	患者治疗机房南墙外 30cm 处	控制室	1	1	100		12.8	2.5	**2.5**
	15	患者治疗机房防护门外 30cm 处	走廊	1/8	1	5		5.10	10	**5.10**
	16	患者治疗机房防护门上方穿墙管道外 30cm 处	走廊上空	1/40	1	5		25.5	10	**10**

参考点				居留因子 T	使用因子 U	周剂量控制值（μSv/周）	周工作时间（h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）		
								$\dot{H}_{c,d}$	$\dot{H}_{c,max}$	$\dot{H}_c$
	17	患者治疗机房西墙外 30cm 处	院内绿化	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	18	患者治疗机房北墙外 30cm 处	院内绿化	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	19	维修平台东墙外 30cm 处	临空	/	1	/		/	10	**10**
	20	维修平台南墙外 30cm 处	楼梯间	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	21	维修平台南墙外 30cm 处	补风机房	1/20	1	100		255	10	**10**
	22	维修平台南墙外 30cm 处	CT 设备间	1/20	1	100		255	10	**10**
	23	维修平台南墙外 30cm 处	备件间	1/20	1	100		255	10	**10**
	24	维修平台防护门外 30cm 处	走廊	1/8	1	5		5.10	10	**5.10**
	25	维修平台防护门上方穿墙管道外 30cm 处	走廊上空	1/40	1	5		25.5	10	**10**
	26	维修平台西墙外 30cm 处	临空	/	1	/		/	10	**10**
	27	维修平台北墙外 30cm 处	临空	/	1	/		/	10	**10**
	28	设备底坑混凝土底板下方	土层	/	1	/		/	5000	**5000**
	29	维修平台楼顶外 30cm 处	不上人屋面	/	1	/		/	100	**100**

参考文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，土壤的感生放射性很小，处于可忽略水平。因此，本项目质子治疗机房混凝土底板（与土壤交接处）的辐射剂量率控制水平取 5mSv/h。

表 1-5 射波刀、医用直线加速器、后装治疗机房外周围剂量当量率参考控制水平

参考点			居留因子 T	使用因子 U	周剂量控制值（μSv/周）	周工作时间（h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）		
							$\dot{H}_{c,d}$	$\dot{H}_{c,max}$	$\dot{H}_c$
射波刀机房	东墙（a 点）	院内道路	1/40	1/20	5	20	200	10	**10**
	东墙（b 点）	院内绿化	1/40	1/20	5		200	10	**10**
	南墙（c 点）	控制室	1	1/20	100		100	10	**10**
	南墙（d 点）	设备间	1/20	1/20	5		100	10	**10**
	西墙（e 点）	2#医用直线加速器机房	1/8	1/20	100		800	10	**10**
	北墙（f 点）	院内绿化	1/40	1/20	5		200	10	**10**
	屋顶（l 点）	屋顶	1/20	1/20	5		100	10	**10**
	迷道入口防护门（g 点）		1/8	1/20	5		40	10	**10**
1#医用直线加速器机房	东墙主屏蔽（a 点）	2#医用直线加速器机房	1/8	1/4	100	12.5	256	10	**10**
	西墙主屏蔽（b 点）	变配电间	1/20	1/4	5		32	10	**10**
	屋顶主屏蔽（l 点）	屋顶	1/20	1/4	5		32	10	**10**
	东墙次屏蔽（c_1、c_2 点）	2#医用直线加速器机房	1/8	1	100		64	10	**10**
	西墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	后装治疗机房/变配电间	1/8	1	5		3.2	10	**3.2**
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	屋顶	1/20	1	5		8	10	**8**
	北墙（e 点）	院内绿化	1/40	1	5		16	10	**10**
	南侧迷道墙外（f 点）	控制室	1	1	100		8	2.5	**2.5**
	南侧迷道外墙（k 点）	设备间	1/20	1	5		8	10	**8**
	迷道入口防护门（g 点）		1/8	1	5		3.2	10	**3.2**

参考点			居留因子 T	使用因子 U	周剂量控制值（μSv/周）	周工作时间（h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）		
							$\dot{H}_{c,d}$	$\dot{H}_{c,max}$	$\dot{H}_c$
2#医用直线加速器机房	西墙主屏蔽（a 点）	1#医用直线加速器机房	1/8	1/4	100	6.7	480	10	**10**
	东墙主屏蔽（b 点）	射波刀机房	1/8	1/4	100		480	10	**10**
	屋顶主屏蔽（l 点）	屋顶	1/20	1/4	5		60	10	**10**
	西墙次屏蔽（c_1、c_2 点）	1#医用直线加速器机房	1/8	1	100		120	10	**10**
	东墙次屏蔽（d_1 点）	射波刀机房	1/8	1	100		120	10	**10**
	东墙次屏蔽（d_2 点）	院内绿化	1/40	1	5		30	10	**10**
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	屋顶	1/20	1	5		15	10	**10**
	北墙（e 点）	院内绿化	1/40	1	5		30	10	**10**
	南侧迷道墙外（f 点）	控制室	1	1	100		15	2.5	**2.5**
	南侧迷道外墙（k 点）	设备间	1/20	1	5		15	10	**10**
	迷道入口防护门（g 点）		1/8	1	5		6	10	**6**
后装治疗机房	东墙（a 点）	1#医用直线加速器机房	1/8	1	100	10	80	10	**10**
	东墙（b 点）	设备间	1/20	1	5		10	10	**10**
	南墙（c 点）	控制室	1	1	100		10	2.5	**2.5**
	西墙（d 点）	柴油发电机房	1/20	1	5		10	10	**10**
	北墙（e 点）	变配电间	1/20	1	5		10	10	**10**
	屋顶（l 点）	屋顶	1/20	1	5		10	10	**10**
	迷道入口防护门（g 点）		1/8	1	5		4	10	**4**

距 CT 模拟定位机房墙体、门、观察窗表面外 30cm 处、顶棚上方（楼上）

距顶棚地面 100cm 处的辐射剂量率目标控制值均为 2.5μSv/h。

1.4.3 放射性废物免于辐射防护监管标准

依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）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”，与本项目相关放射性核素的豁免活度浓度和活度列于表 1-6。

表 1-6 人工放射性核素豁免活度与豁免活度浓度

核素	活度（Bq）	活度浓度（Bq/g）	核素	活度（Bq）	活度浓度（Bq/g）
^{3}H	1E+09	1E+06	^{54}Mn	1E+06	1E+01
^{7}Be	1E+07	1E+03	^{51}Cr	1E+07	1E+03
^{15}O	1E+09	1E+02	^{45}Ca	1E+07	1E+04
^{18}F	1E+06	1E+01	^{37}Ar	1E+08	1E+06
^{59}Fe	1E+06	1E+01	^{35}S	1E+08	1E+05
^{56}Co	1E+05	1E+01	^{33}P	1E+08	1E+05
^{55}Fe	1E+06	1E+04	^{22}Na	1E+06	1E+01

1.4.4 空气中放射性核素导出浓度

根据职业照射剂量限值 5mSv/a、公众照射剂量限值 0.1mSv/a，年照射时间工作人员取 2000h、公众成员取 8760h，综合考虑吸入内照射和浸没外照射剂量贡献，依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）、ICRP 68 号出版物、ICRP 89 号出版物、FGR 15 号报告，得到空气中放射性核素导出空气浓度限值见表 1-7。

表 1-7 空气中放射性核素导出空气浓度限值

核素	半衰期	导出空气浓度（Bq/m³）	
		辐射工作人员	公众
H-3	12.33y		
Be-7	53.29d		
C-11	20.39min		
N-13	9.965min		
O-15	122.2s		
Ar-41	109.34min		

1.4.5 O_3 和 NO_x 排放标准

本项目室内 O_3 和 NO_x 浓度限值参照执行《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）中工作场所空气中化学有害因素职业接触限值，具体标准值见表 1-8。

表 1-8 O_3 和 NO_x 浓度限值

污染物	室内浓度限值	
	最高容许浓度（mg/m³）	时间加权平均容许浓度（mg/m³）
O_3	0.3	/
NO_x	/	5

1.4.6 废水排放标准

质子治疗系统运行期间产生的活化冷却水，存放在活化水暂存池中，排放前在冷却水排放口取样对水质进行检测，满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）“表 2 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值（日均值）”中总β的排放标准要求（列于表 1-9），方可排放。

表 1-9 《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）中综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值中总β的排放标准

项目	排放标准（Bq/L）
总β	10

根据 2019 年连云港经济技术开发区环境保护局对连云港市第一人民医院开发区院区项目环境影响报告书的批复文件（文号：连开环复〔2019〕67 号），医院内废水进入医院污水站处理后接管市政污水管网，进入西北组团污水处理厂集中处理。

1.4.7 噪声排放标准

根据 2019 年连云港经济技术开发区环境保护局对连云港市第一人民医院开发区院区项目环境影响报告书的批复文件（文号：连开环复〔2019〕67 号），项目运营期噪声执行《社会生活环境噪声排放标准》（GB 22337-2008）中 1 类标准，具体见表 1-10。

表 1-10 运行期厂界噪声排放标准

执行标准	昼间	夜间
《社会生活环境噪声排放标准》（GB 22337-2008）1 类	55dB	45dB

1.4.8 其他标准

1.4.8.1 CT 模拟定位机房面积、单边长度

CT 模拟定位机房的面积、单边长度执行标准列于表 1-11。

表 1-11 CT 模拟定位机房面积、单边长度执行标准

机房名称	机房面积	单边长度	执行标准
CT 模拟定位机房	不小于 30m^2	大于 4.5m	《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）

1.4.8.2 CT 模拟定位机房的辐射屏蔽

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关要求，本项目CT 机房的墙体屏蔽按“2.5mm 铅当量”执行。

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》（HJ 10.1-2016）“1.5 节评价范围和保护目标”中的相关规定“放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围），对于Ⅰ类放射源或Ⅰ类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”，本项目使用的质子治疗系统为Ⅰ类射线装置，其主要的辐射环境影响途径为瞬发辐射外照射以及运行期间感生放射性气体对人员造成的照射。考虑到拟使用的质子治疗系统严格按照我国相关法规标准的要求进行治疗机房的辐射屏蔽设计，采用混凝土作为主屏蔽材料，确保机房屏蔽体外剂量率满足要求。综上所述，参照《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》（HJ 10.1-2016）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，质子治疗系统外照射的评价范围取机房四周实体屏蔽墙向外 100 米的范围，气态流出物的评价范围取排放口周围 100 米的范围。其余Ⅱ类射线装置、Ⅲ类放射源取机房四周实体屏蔽墙向外 50m 的范围，具体见图 1-4。

本项目电离辐射环境影响评价范围如表 1-12 所示。

表 1-12 本项目电离辐射环境影响评价范围

装置名称	电离辐射环境影响评价范围	依据
质子治疗系统	质子治疗机房四周实体屏蔽墙体向外 100m 的范围	Ⅰ类射线装置
射波刀、医用直线加速器	射线装置机房四周实体屏蔽墙向外 50m 的范围	Ⅱ类射线装置

装置名称	电离辐射环境影响评价范围	依据
后装机	机房四周实体屏蔽墙向外 50m 的范围	III类放射源

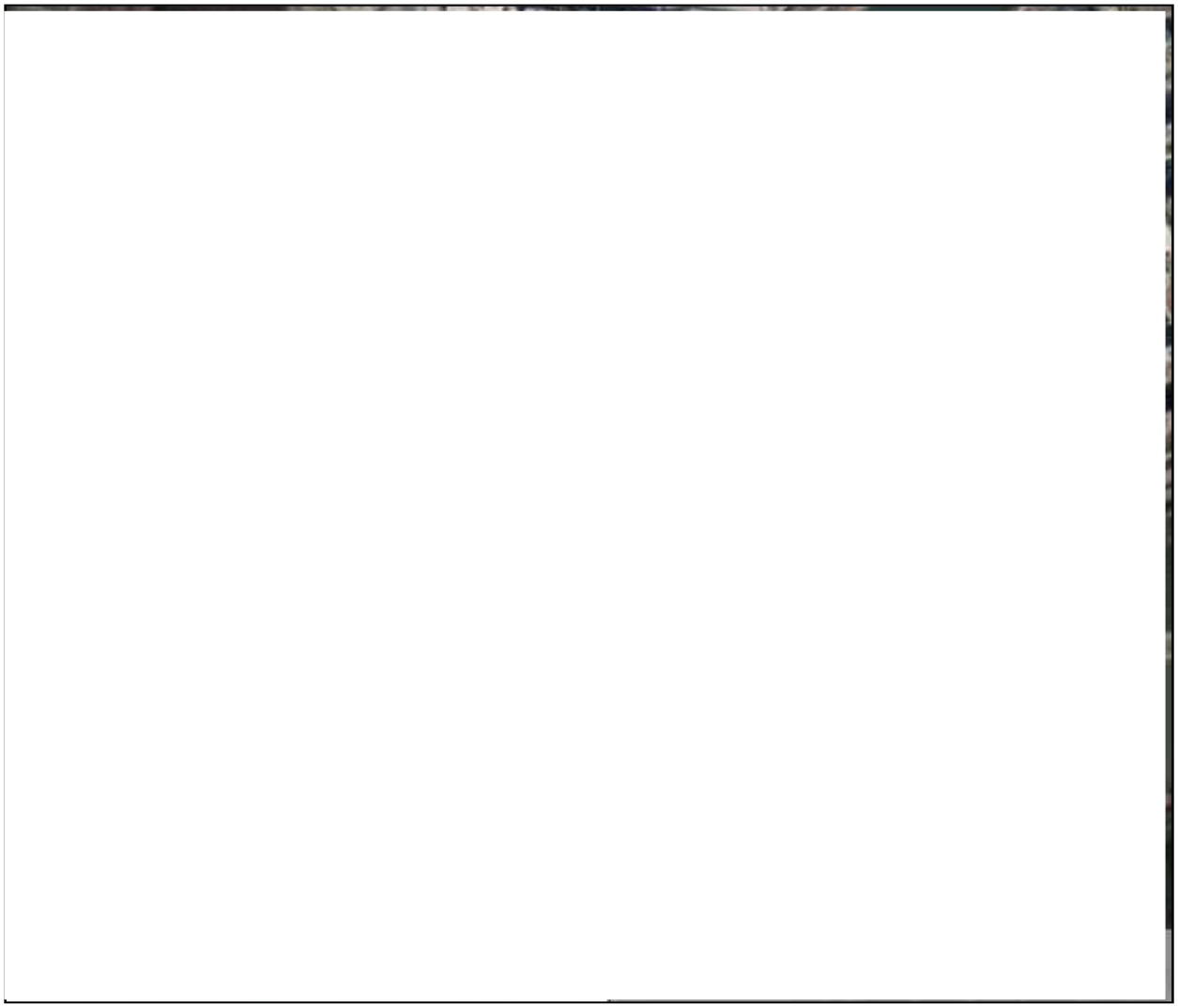

图 1-4 本项目电离辐射评价范围及位置关系图

1.5.2 环境保护目标

本项目拟建质子中心为一栋地上主体 2 层，局部地下 1 层的单体建筑。其中地下一层为质子治疗机房的设备底坑；地上一层为患者治疗用房，从东向西分别布置：质子治疗机房、射波刀机房、2 座医用直线加速器机房、后装治疗机房，CT 模拟定位机房位于质子中心的地上一层南部；地上二层为质子治疗机房的维修平台和医护办公用房，并配套采购相关设备，配建道路绿化、停车场、雨污水、供电、供水及围墙等附属工程。

本项目评价范围除东北至环湖路（距质子治疗机房最近约 45m 处）外，其

余方向均位于开发区院区现有院界和空地内。质子治疗机房、放疗机房、CT 模拟定位机房距开发区院区停车场最近距离分别为 59m、58m、33m，距在建的感染门诊楼最近距离分别为 84m、33m、74m，距院区北侧云庭水岸小区最近距离为 127m。

由此可知，本项目评价范围内无自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的对象，无居民小区、学校等环境敏感点。评价范围内的环境保护目标以本项目相关工作人员、周边相关场所其他工作人员以及在相关场所活动的公众成员为主，具体列于表 1-13。

表 1-13 本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

工作场所	方位	周围环境情况	保护对象类别	距本项目最近距离	人口规模	照射途径
质子治疗机房	东侧	环湖路	公众			
	南侧	控制室、设备间、UPS 室、隔离变压器室、工艺冷却水设备间、活化物暂存间、备件间、CT 设备间、补风机房	辐射工作人员			
		走廊、库房、手术室、办公室、更衣室、资料室、示教室、接待室、会议室	公众			
		开发区院区停车场、道路	公众			
	西侧	射波刀机房、1#、2#医用直线加速器机房、后装治疗机房	辐射工作人员			
		感染门诊楼（在建址）	公众			
	北侧	院内绿化、空地、环湖路	公众			
射波刀机房、1#、2#	东侧	质子治疗机房	辐射工作人员			

工作场所	方位	周围环境情况	保护对象类别	距本项目最近距离	人口规模	照射途径
医用直线加速器机房、后装治疗机房	南侧	控制室、设备间	辐射工作人员			
		走廊、庭院、CT 模拟定位机房、MRI 机房及其控制室、观察室、门厅	公众			
	西侧	柴油发电机房	公众			
		感染门诊楼（在建址）	公众			
	北侧	空地	公众			
CT 模拟定位机房	东侧	手术室、器械室、办公室	公众			
	南侧	开发区院区停车场、道路	公众			
	西侧	控制室、准备间	辐射工作人员			
		门厅、MRI 机房及其控制室、设备间、消防控制室	公众			
	北侧	空地	公众			

2 自然环境和社会环境状况

2.1 自然环境状况

2.1.1 地理位置

连云港市位于东经 118°24′~119°48′和北纬 34°~35°07′之间，东西长 129 公里，南北宽约 132 公里，水域面积 1759.4 平方公里。中国沿海中部，东濒黄海，西与徐州市、宿迁市相连，南与淮安市和盐城市毗邻，北与山东省日照市、临沂市相邻。

项目落地于连云港经济技术开发区，地理位置见图 1-1，项目周边关系见图 1-3。

2.1.2 地形、地质、地貌和地震

连云港市位于鲁中南丘陵与淮北平原的结合部，地势由西北向东南倾斜，平均比降 1‰～9‰。地貌以平原为主，兼有山地、丘陵、岗地。地形多样，层次分明，可以分为四个区域，分别为西部低山丘陵区，中部平原区，东部沿海滩涂区和云台山区。新浦和海州城区以海滨平原为主，地面较开阔平坦，地势较低，起伏不大，地面绝对高程 4～20m。

连云港市地质构造属华北地块南延地带，整个市区可划分三个大的工程地质区，分别为剥蚀山地、山前堆积台区和海积平原。

连云港经济技术开发区内西有蝙蝠山，东南有华盖山，其他范围地势平坦。云台山区系云母片岩、片麻状片岩和近代洪积、冲积及海积层。云台山及其冲积台地地表属山地棕壤，厚度小、变化大，较贫瘠。该区北部是海积平原，表层冲积相粘土、亚粘土，以盐渍土为主，沿海海岸为滨海盐渍土。

连云港地区尚未发生过较强的地震。据史料记载，1668 年 7 月 25 日，郯城 8.5 级强震曾波及本区。连云港境内于 1989 年 8 月 24 日、1990 年 10 月 7 日、1991 年 4 月 23 日分别发生了 1.2、0.6、0.8 三次微地震，地震总的特点是震级小，发震率较低，震中较分散。虽然中远场强震对厂址区造成一定的影响，但未来百

年内重复发生强震的可能性不大。

根据《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010），本项目所在区域的抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.10g，地震分组属第三组。综上所述，本项目所在区域的稳定性属基本稳定。

2.1.3 气候气象

连云港市地处暖温带和北亚热带的过渡地带，属暖温带南缘湿润性季风气候，既有暖温带气候特征，又有北亚热带气候特征。气候总的特点是：四季分明，光照充足，雨量适中，气候温和。该区年平均气温 14.1℃，年均降水量 985mm，年主导风向为 SE，次主导风向为 SSW、ENE，年静风频率为 11.04%。评价区域内因地势平坦，滨临黄海，加之受季风影响，平均风速较大，各月平均风速在 2.9～4.3m/s 之间，年平均风速为 3.1m/s，大气输送条件较好，有利于大气污染物扩散。区域受陆地、海洋不同热力作用影响，地面气温水平分布表现出明显规律性，秋、冬季为东暖西冷。

2.2 社会经济状况

连云港经济技术开发区是 1984 年 12 月经国务院批准设立的首批国家级开发区，位于连云港市区的地理中心，辖朝阳、中云、猴嘴三个街道和台北、青口两个盐场。根据第七次人口普查数据，截至 2020 年 11 月 1 日零时，连云港经济技术开发区所在连云区常住人口为 29.28 万人。

连云港经济技术开发区重点发展新医药、新材料、新业态、高端装备制造等主导产业，已建成全国最大的抗肿瘤药物、抗肝类药物生产基地，全国重要的现代中药生产基地，全国最大的碳纤维生产基地，亚洲最大的风电装备生产基地。高新技术产业产值占规模以上工业总产值的比重达 77.7%。

2021 年，开发区规模以上工业企业实现产值 780.2 亿元，增长 5.4%。三大主导产业实现产值 606.2 亿元，增长 3.9%，占全区总产值 77.7%，其中，新医药产业实现产值 446.5 亿元，增长 1%；新材料产业实现产值 54.6 亿元，增长 50%；高端装备制造实现产值 105.1 亿元，较去年持平。

距离本项目最近的居民区为云庭水岸小区，规划建设744户，位于项目建设址北侧，直线距离约127米。

2.3 环境质量和辐射现状

为了解本项目质子中心拟建址及周围环境的辐射环境、声环境现状，评价单位（CMA证书编号：221020340350）对拟建址及周围环境进行了环境质量现状检测，部分监测项目委托江苏省疾病预防控制中心（CMA证书编号：220003102849）对拟建址及周围环境进行检测，检测期间质子中心尚未开始土建施工。监测报告见附件6。

2.3.1 监测内容

根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征，本次环境质量现状调查选取的监测因子包括环境γ辐射空气吸收剂量率、中子周围剂量当量率、空气中氚、空气中γ核素、土壤中γ核素、水中γ核素、水中氚、水中总α、总β、环境噪声。

本项目不直接向周围环境排放废水，质子治疗系统冷却水系统的去离子水定期作为清净下水排放，接入市政污水管网。现场踏勘发现项目拟建址东北侧边界外有地表水（昌圩湖），经走访附近没有地下水取水井，医院周围也没有向环境排放放射性废水的企业。综合以上区域环境现状和本项目污染物排放特点，本次环境现状监测时对医院周围地表水取样，未进行地下水取样。

辐射环境现状监测对象和监测项目列于表2-1。

质子治疗系统运行期间的辐射场为中子和γ辐射混合场，因此陆地γ辐射监测内容包括γ辐射空气吸收剂量率和中子剂量当量率。

质子治疗系统运行期间，贯穿质子治疗机房底板屏蔽体的次级辐射可能会引起底板周围土壤和地表水的活化。因此本次辐射环境现状调查中，对土壤和地表水中相关核素的活度浓度进行分析。此外，考虑到总α、总β能够反应某区域的总放射性水平，因此本次现状调查对地表水中总α、总β的活度浓度也进行了分析。

表 2-1 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
1	陆地γ辐射	γ辐射空气吸收剂量率
		中子剂量当量率
2	噪声	医院厂界和周围区域声环境质量
3	土壤	γ核素
4	空气	γ核素、空气中氚
5	地表水	γ核素、总α、总β活度浓度、水中氚

2.3.2 监测/取样点位

环境γ辐射空气吸收剂量率监测点位主要布设在质子中心拟建址及相邻建筑以及周围有公众居留的区域，共设置 11 个检测点位。中子周围剂量当量率监测点位主要布设在质子治疗机房拟建址，共设置 5 个检测点位。

在院区四周厂界和周围公众居留区域的声环境质量现状进行检测，检测频次为昼夜各 1 次。

选取医院质子机房拟建址进行气溶胶和土壤取样，并进行实验室分析测量，检测空气中γ核素、空气中氚和土壤中γ核素。

根据周围地表水分布情况，在院区东北侧昌圩湖中进行地表水取样并进行实验室分析测量，检测水中γ核素、水中氚、水中总α、总β。

2.3.3 监测设备和监测方法

2.3.3.1 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-2。中子周围剂量当量率监测时间为 2023 年 8 月 22 日，环境γ辐射空气吸收剂量率、噪声监测时间为 2023 年 8 月 24 日，土壤样品、空气中γ核素、地表水样品分析的时间为 2023 年 8 月 30 日~9 月 5 日，空气中氚的水样分析时间为 2023 年 9 月 23 日。监测、分析时仪器设备均处于检

定有效期内。

表 2-2 仪器设备及性能指标

仪器名称	仪器型号	仪器编号	主要技术指标	检测单位
中子周围剂量当量率仪	FH40G+FHT762	NJRS-022	能量响应：0.025eV～5GeV 测量范围：1nSv/h～100mSv/h 检定证书编号：DLjs2023-00990 检定有效期限：2023.03.31～2024.03.30	南京瑞森辐射技术有限公司
X-γ辐射监测仪	6150AD6/H+6150AD-b/H	NJRS-126	能量响应：20keV～7MeV 测量范围：1nSv/h～99.9μSv/h 检定证书编号：Y2022-01092888 检定有效期限：2022.11.14～2023.11.13	
声级计	AWA6228+	NJRS-042	测量范围：23dB（A）～133dB（A） 检定证书编号：第 01487110 号 检定有效期限：2023.6.21～2024.6.20	
声校准器	AWA6221A	NJRS-034	检定证书编号：E2023-0153162 检定有效期限：2023.8.23～2024.8.22	
风速仪	HT625B	NJRS-136	检定证书编号：H2023-0061445 检定有效期限：2023.5.22～2024.5.21	
GEM40 型高纯锗伽马谱仪	GEM40	NJRS-833	检定证书编号：Y2022-3076934 检定有效期限：2022.11.1～2024.10.31 测量范围：能量非线性＜0.01%	
低本底α、β测量仪	RJ41-2	NJRS-938	检定证书编号：2023H21-20-4661277002 检定有效期限：2023.6.21～2025.6.20 通道一α探测效率为 83.2%，β探测效率为 52.8%；通道二α探测效率为 84.2%，β探测效率为 52.2%；通道一α本底≤0.0041 计数 $min^{-1}\cdot cm^{-2}$，β本底≤0.15 计数 $min^{-1}\cdot cm^{-2}$；通道二α本底≤0.0030 计数 $min^{-1}\cdot cm^{-2}$，β本底≤0.18 计数 $min^{-1}\cdot cm^{-2}$	

仪器名称	仪器型号	仪器编号	主要技术指标	检测单位
液体闪烁计数器	Quantulus GCT 6220	31-0123	检定证书编号：Y2022-3047433 检定有效期限：2022.7.21～2023.7.20 本底计数率：^{3}H 道，30.6min^{-1}；^{14}C 道，35.2min^{-1}； 探测效率：^{3}H 道，61.4%；^{14}C 道，96.5%； 重复性：0.16%。	江苏省疾病预防控制中心

2.3.3.2 监测方法

本项目具体监测方法见表 2-3。

表 2-3 监测方法

序号	监测对象	监测方法	标准依据
1	γ辐射空气吸收剂量率	采用网格均匀布点的方式布设γ辐射空气吸收剂量率监测点位，共计 11 个监测点位。采用便携式监测仪表，以定点测量方式进行。每个监测点位测量 10 次，监测结果取平均值。	《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）、《辐射防护仪器 中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T 14318-2019）
2	中子周围剂量当量率	采用网格均匀布点的方式布设，共计 5 个监测点位。采用中子剂量当量（率）仪，以定点测量的方式进行。每个监测点位测量 5 次，监测结果取平均值。	
3	噪声	对院区四周厂界和公众居留区域的声环境质量现状进行检测，昼夜各 1 次。	《声环境质量标准》（GB 3096-2008）
4	空气中γ核素	在质子机房拟建址进行气溶胶采样，采集 10000m^{3}。	《空气中放射性核素的γ能谱分析方法》（WS/T 184-2017）
5	空气中氚	在质子治疗机房拟建址使用冷凝法对空气中氚进行取样，采集水样约 2L。	《水中氚的分析方法》（HJ 1126-2020）
6	地表水中氚	在项目拟建址东北侧昌圩湖中取样，采集水样约 2L，样品送实验室分析。	

序号	监测对象	监测方法	标准依据
7	地表水中总α、总β、γ核素	在项目拟建址东北侧昌圩湖中取样，样品送实验室分析，用高纯锗γ能谱仪进行γ核素活度浓度测量，用液闪谱仪进行 ^{3}H 活度浓度测量，用低本底α、β测量仪进行总α、总β活度浓度测量。	《高纯锗γ能谱分析通用方法》（GB/T 11713-2015）、《土壤中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T 11743-2013）、《水中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T 16140-2018）、《水中氚的分析方法》（HJ 1126-2020）、《水质总α放射性的测定 厚源法》（HJ 898-2017）、《水质总β放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）。
8	土壤	采集土壤，除去树枝、石块、草根等杂物，将采集到的样品现场混合后取约2kg。土壤样品送实验室预处理后采用高纯锗γ谱仪测量γ核素活度浓度。	

2.3.4 质量保证措施

（1）监测单位具备所监测项目的资质；

（2）合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性；

（3）针对各类样品的采集，监测单位制定了操作规程，要求参加采样人员在实施采样前充分了解，并在采样过程中严格执行；

（4）采样器符合国家技术标准的规定，使用前须检验并确认其性能良好后方可采样，保证采样器和样品容器的清洁，防止交叉污染。

（5）采样时注意样本的均匀性和稳定性，严格按照要求采集样品。

（6）采样后按规定方法进行暂存或预处理，并尽快送往实验室，做好样品交接工作；

（7）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；

（8）监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用；

（9）每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；

（10）由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；

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

2.3.5 监测结果

2.3.5.1 陆地γ辐射

本次监测的γ辐射空气吸收剂量率、中子周围剂量当量率监测点位布设位置见图 2-1。

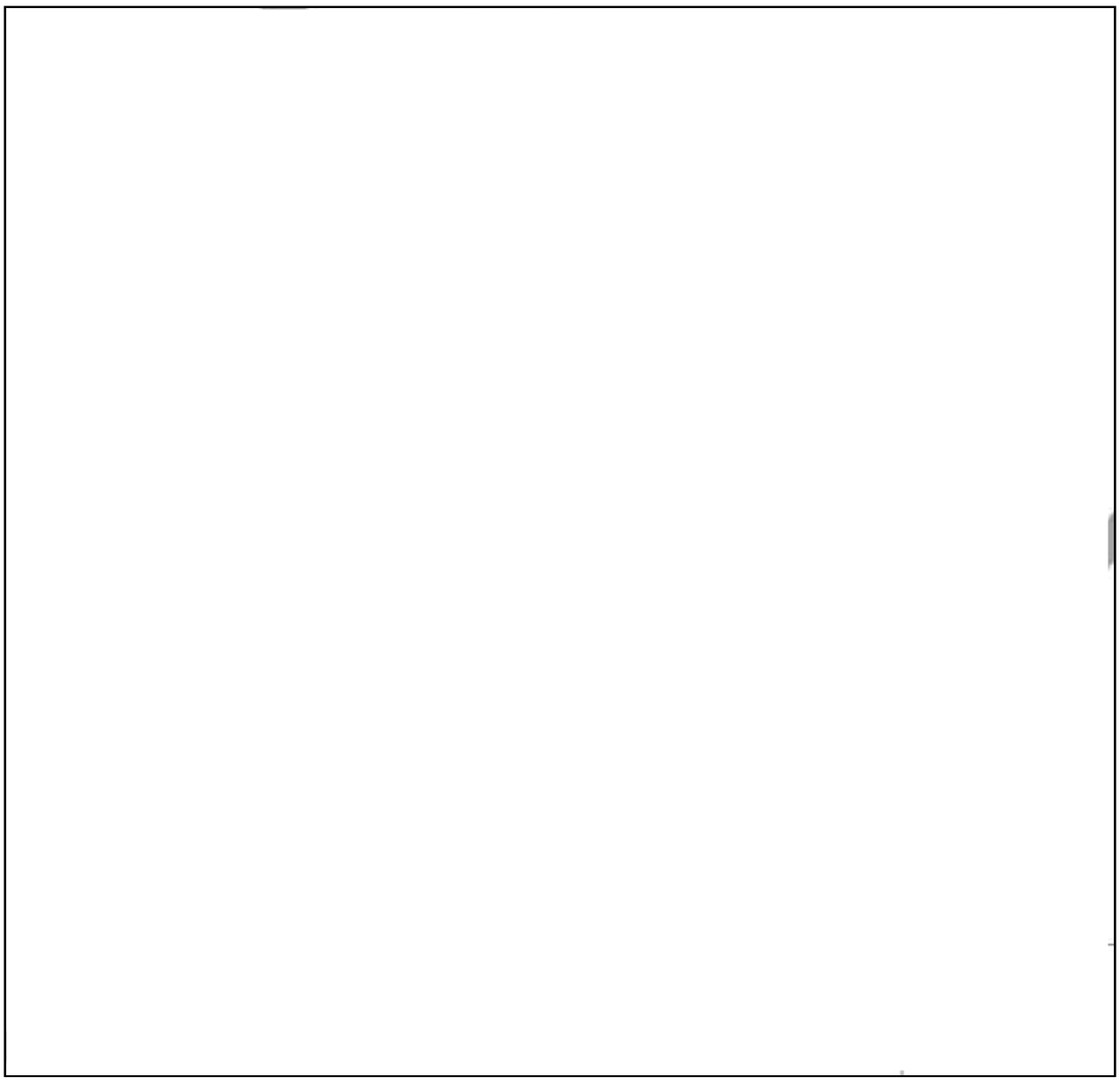

图 2-1 质子中心拟建场址及周边监测点位布设示意图

本项目拟建址及周围环境的γ辐射空气吸收剂量率和中子剂量当量率监测结

果见表 2-4 和表 2-5。

表 2-4 项目拟建址周围γ辐射空气吸收剂量率监测结果

测点编号	点位描述	监测结果（nGy/h）
1	质子中心拟建址内东部（原野）	61
2	质子中心拟建址内东部（原野）	58
3	质子中心拟建址内中部（原野）	60
4	质子中心拟建址内中部（原野）	60
5	质子中心拟建址内西部（原野）	60
6	质子中心拟建址内西部（原野）	58
7	质子中心拟建址东侧（制剂楼拟建址，原野）	59
8	质子中心拟建址南侧(开发区院区停车场,道路）	68
9	质子中心拟建址西侧(感染门诊楼在建址,道路）	63
10	开发区院区东侧（环湖路，道路）	66
11	开发区院区北侧（云庭水岸小区南侧，道路）	62

表 2-5 项目拟建址周围中子剂量当量率监测结果

测点编号	点位描述	监测结果（μSv/h）
1	质子治疗机房拟建址东部	＜LLD
2	质子治疗机房拟建址南部	＜LLD
3	质子治疗机房拟建址西部	＜LLD
4	质子治疗机房拟建址北部	＜LLD
5	质子治疗机房拟建址中部	＜LLD

注：仪器探测下限（LLD）为 1nSv/h。

由监测结果可知，本项目拟建址原野（1#~7#点位）周围环境γ辐射剂量率在 58nGy/h～61nGy/h 之间，属江苏省原野γ辐射（空气吸收）剂量率本底水平

（33.1nGy/h～72.6nGy/h）；室外（8#~11#点位）周围环境γ辐射剂量率在62nGy/h～68nGy/h之间，属江苏省道路γ辐射（空气吸收）剂量率本底水平（18.1nGy/h～102.3nGy/h），均位于江苏省环境天然γ辐射水平涨落区间。新建质子治疗机房拟建址及其周围中子剂量当量率低于仪器探测下限。因此，本项目拟建址及周围环境的辐射环境质量现状无异常。

2.3.5.2 声环境质量现状

院区四周厂界和周围公众居留区域的声环境质量现状检测结果见表2-6，噪声监测点位布设位置见图2-1。

表2-6 项目拟建址周围声环境现状监测结果

测点编号	点位描述	昼间噪声值（Leq（dB（A）））	夜间噪声值（Leq（dB（A）））
1	质子中心拟建址中心	43	40
2	开发区院区东侧环湖路	48	44
3	开发区院区东南侧跃湖路	50	42
4	开发区院区南侧昌圩路	48	44
5	开发区院区西侧规划道路	43	39
6	开发区院区北侧云庭水岸	45	40

由监测结果可知，院区四周厂界和北侧云庭水岸小区的昼间声环境噪声为（43~50）dB（A），夜间声环境噪声为（39~44）dB（A）。项目区域及周围环境声环境质量良好，满足《社会生活环境噪声排放标准》（GB 22337-2008）中1类声环境功能区要求。

2.3.5.3 土壤

本项目拟建址土壤样品中γ核素的活度浓度测量结果见表2-7。

表 2-7 土壤样品中γ核素活度浓度监测结果

采样地点/样品编号	核素	监测结果（Bq/kg）
质子中心拟建址土壤/2301017	^{40}K	908±8
	^{226}Ra	28.10±0.58
	^{232}Th	57.58±0.97
	^{238}U	23.1±2.5
	^{7}Be	＜LLD（1.96×10^{-1}）
	^{51}Cr	＜LLD（4.8×10^{-2}）
	^{54}Mn	＜LLD（3.67×10^{-2}）

由表 2-7 监测结果可知，拟建址土样中 U-238、Th-232、Ra-226 的活度浓度分别为（23.1±2.5）Bq/kg、（57.58±0.97）Bq/kg、（28.10±0.58）Bq/kg，对照《2022 年全国辐射环境质量报告》和《中国环境天然放射性水平》（江苏省），上述核素的活度浓度均处于正常波动范围（U-238：（17~56）Bq/kg、Th-232：（39~63）Bq/kg、Ra-226：（25~48）Bq/kg）；土样中 K-40 的活度浓度为（908±8）Bq/kg，略高于江苏省土壤天然本底水平（302.6~876.2）Bq/kg，土样中 Be-7、Cr-51、Mn-54 活度浓度均低于探测下限。

2.3.5.4 空气

本项目拟建址空气水蒸汽中氚、空气中γ核素活度浓度测量结果见表 2-8 和表 2-9。

表 2-8 空气水蒸汽中氚活度浓度监测结果

样品名称	监测结果（Bq/L）
空气中水	2.5

表 2-9 空气中γ核素活度浓度监测结果

采样地点/样品编号	核素	监测结果（Bq/m³）
质子中心拟建址气溶胶/2301018	^{40}K	＜LLD（2.8×10^{-5}）
	^{226}Ra	＜LLD（7.0×10^{-6}）
	^{7}Be	$1.1\times10^{-2}\pm5.0\times10^{-2}$

由监测结果可知，拟建址空气水蒸汽中氚的活度浓度为 2.5Bq/L，对照《2022 年全国辐射环境质量报告》，全国空气水蒸汽中氚的活度浓度范围为（1.2~3.8）Bq/L，项目周围空气中氚的活度浓度处于正常水平。拟建址气溶胶中 Be-7 的活度浓度为（$1.1\times10^{-2}\pm5.0\times10^{-2}$）Bq/m³，对照《2022 年全国辐射环境质量报告》，气溶胶中 Be-7 的活度浓度为处于正常波动范围（Be-7（0.054~23）mBq/m³）；拟建址气溶胶中 K-40、Ra-226 的活度浓度均低于探测下限。

2.3.5.5 地表水

本项目拟建址地表水中氚、总α、总β、γ核素的活度浓度分析测量结果见表 2-10。

表 2-10 地表水中氚、总α、总β、γ核素活度浓度监测结果

采样地点/样品编号	监测项目	监测结果（Bq/L）
院区东北侧昌圩湖水样/2301016	^{3}H	1.7
	总α	＜LLD（0.082）
	总β	0.922±0.083
	^{40}K	＜LLD（3.7×10^{-1}）
	^{226}Ra	＜LLD（7.6×10^{-2}）
	^{232}Th	＜LLD（1.72×10^{-2}）
	^{238}U	＜LLD（7.3×10^{-1}）

由上表可知，拟建址东北侧昌圩湖的水中氚活度浓度为 1.7Bq/L，地表水的

总β分析结果在分析结果在（0.922±0.083）Bq/L 范围内，对照《2022 年全国辐射环境质量报告》，略高于全国主要江河流域总β（0.025~0.40）Bq/L 的活度浓度范围。地表水的总α、K-40、Ra-226、Th-232、U-238 活度浓度均低于探测下限。

2.4 场址适宜性评价

本项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响射线装置、放射源和放射性同位素稳定运行和安全使用的颠覆性因素。

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

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

综上所述，本项目选址适宜开展所申请的核技术利用活动。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

本项目拟建质子中心，为一栋地上主体 2 层，局部地下 1 层的单体建筑。其中地下一层为质子治疗机房的设备底坑；地上一层为患者治疗用房，从东向西分别布置：质子治疗机房、射波刀机房、2 座医用直线加速器机房、后装治疗机房，CT 模拟定位机房位于质子中心的地上一层南部；地上二层为质子治疗机房的维修平台和医护办公用房。各层具体的布置见表 3-1，功能布局图见图 3-1 至图 3-3。

表 3-1 质子中心不同楼层功能布局分布

楼层		布局分布
地下一层		**质子治疗机房的设备底坑**、隔离变压器室、工艺冷却水设备间、活化水暂存池、活化物暂存间、强电间等房间
地上一层	北部	**质子治疗机房**及其控制室、设备间和 UPS 室、**射波刀机房**及其控制室和设备间、**医用直线加速器机房**及其控制室和设备间、**后装治疗机房**及其控制室和妇检冲洗间、柴油发电机房、油箱间、走廊、楼梯间、强电间等房间
	中部	医护更衣室、洗消间、库房、接待休息室、热疗机房及其控制室、观察室、模具制模室、备用间、备品间、卫生间、茶水间、污洗间、内天井、庭院、走廊、电梯间等房间
	南部	办公室、污洗间、污物暂存间、器械室、卫生间、超声微创手术室及其准备间和设备间、污物走廊、**CT 模拟定位机房**及其控制室和准备间、手臂港植入室、门厅、MRI 机房及其准备间、设备间和控制廊、消防控制室、楼梯间等房间
地上二层	北部	**质子治疗机房的维修平台**、备件间、CT 设备间、补风机房、库房、气体间、盥洗间、淋浴间、值班室、更衣室、质子维修工程师办公室、维修间、模具存放室、信息机房、集中办公区、楼梯间等房间
	中部	资料室、示教室、技师办公室、工程师办公室、茶水间、物理师办公室、强电间、弱电间、服务器室、卫生间、污洗间、报警阀间、走廊、屋面、内天井上空、电梯间等房间
	南部	资料室、办公室、专家接待室、专家休息室、多媒体会议室、小会议室、门厅上空、物理计划室、工具间、楼梯间等房间

除质子治疗系统外，本项目拟配备的射线装置和放射源均设置在质子中心地上一层，主要参数列于表 3-2。

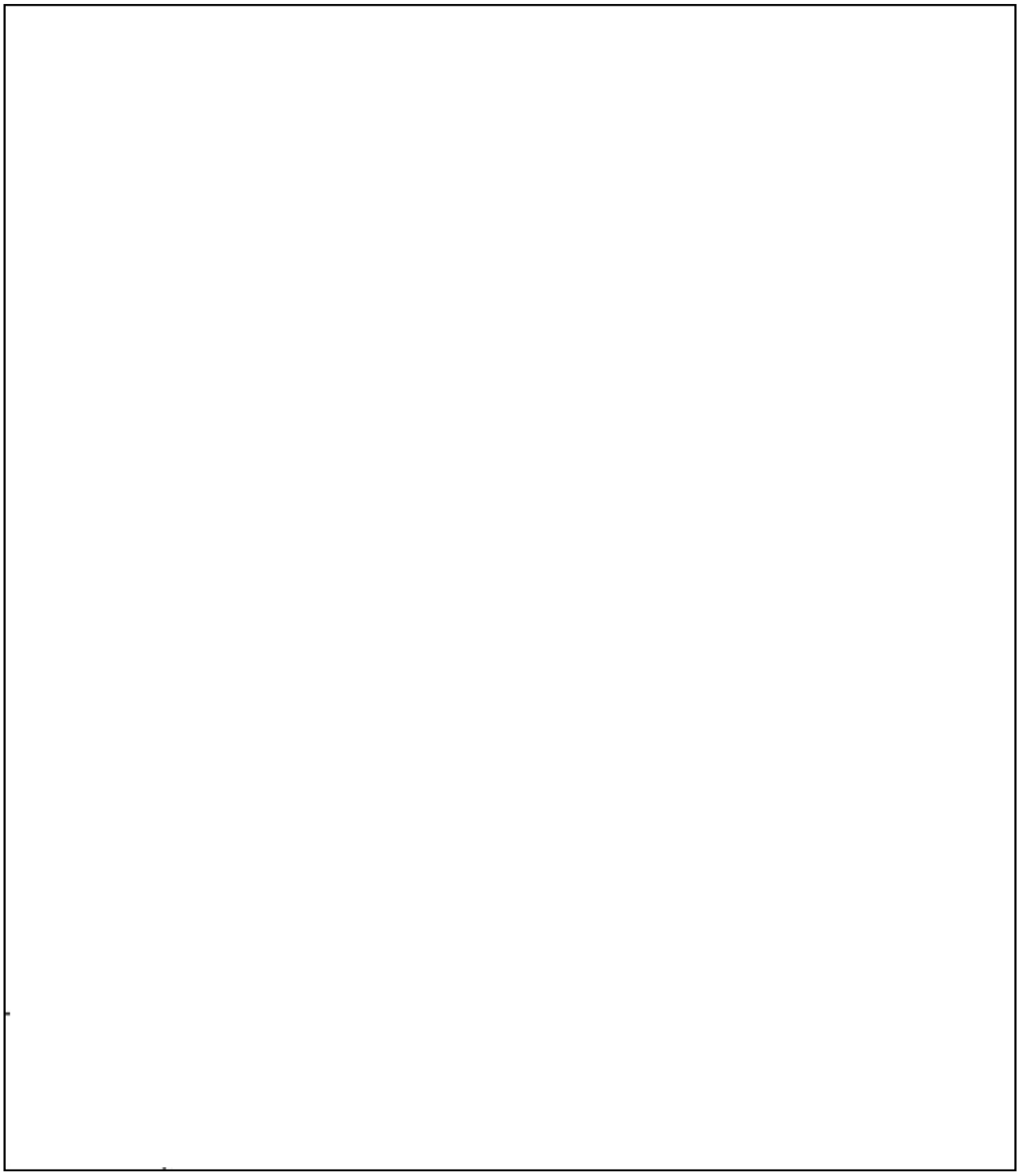

图 3-1 质子中心地下一层平面布局图



图 3-2 质子中心地上一层平面布局图



图 3-3 质子中心地上二层平面布局图

表 3-2 本项目拟配备的射线装置、放射源一览表

序号	射线装置/放射源名称	规格型号	主要参数（能量/等中心点输出剂量率/活度/管电压、管电流）	生产厂家	数量	类别	所在位置
1	质子治疗系统	MPT S250i 型		迈胜	1 套	Ⅰ类	质子治疗机房
2	CT 模拟定位机	SOMATOM Confidence 型		西门子	1 台	Ⅲ类	
3	X 射线模拟定位机	A277 型		Varex	1 台	Ⅲ类	
4	射波刀	M6 FM 型		安科锐	1 台	Ⅱ类	质子中心地上一层射波刀机房
5	医用直线加速器	VitalBeam 型		瓦里安	1 台	Ⅱ类	质子中心地上一层1#医用直线加速器机房
6	医用直线加速器	Halcyon 型		瓦里安	1 台	Ⅱ类	质子中心地上一层2#医用直线加速器机房
7	^{192}Ir	/		/	1 枚	Ⅲ类	质子中心地上一层后装治疗机房
8	CT 模拟定位机	SOMATOM Confidence 型		西门子	1 台	Ⅲ类	质子中心地上一层CT 模拟定位机房

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 质子治疗系统

3.2.1.1 设备组成

本项目拟配置 1 套由迈胜医疗设备有限公司生产的质子治疗系统，采用先进的回旋加速器，提供 70MeV~230MeV 能量的连续可调质子束，具体技术指标见表 3-3。该系统是一款小型化、集成化的单室质子治疗系统，整套系统由束流发生系统、束流传输系统、患者定位系统和控制系统组成。束流发生系统是一台超导同步质子回旋加速器，加速器模块安装在可 190°旋转的机架上。束流传输系统包含扫描磁铁、束流射程调节器、自适应准直器和一个 190°旋转机架。加速器旋转机架和治疗旋转机架的旋转各自独立旋转。加速器产生的束流加速至 230MeV 后引出，经束流传输系统调节，根据实际治疗时患者肿瘤的深度和厚度，在治疗室输出端可得到 70~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。本项目质子治疗系统结构组成示意图见图 3-4 和图 3-5 所示。

表 3-3 质子治疗系统的主要技术参数

指标	参数
加速器类型	
射线种类	
引出能量	
治疗时能量范围（可调）	
治疗时最大引出流强	
引出效率	
输出剂量率	

指标	
照射野范围	
加速器射频频率	
加速器功率	
机架旋转范围	
设备预期使用寿命	

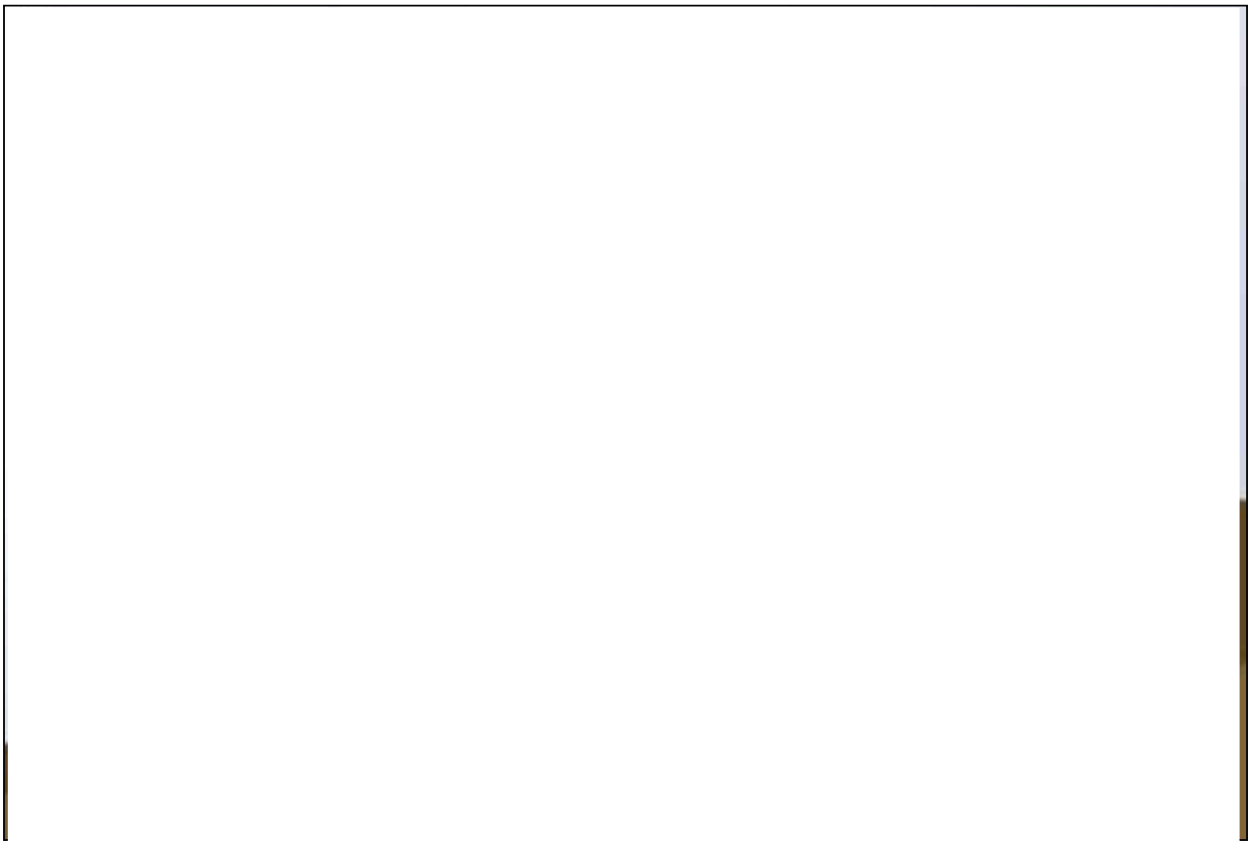

图 3-4 本项目质子治疗系统结构示意图

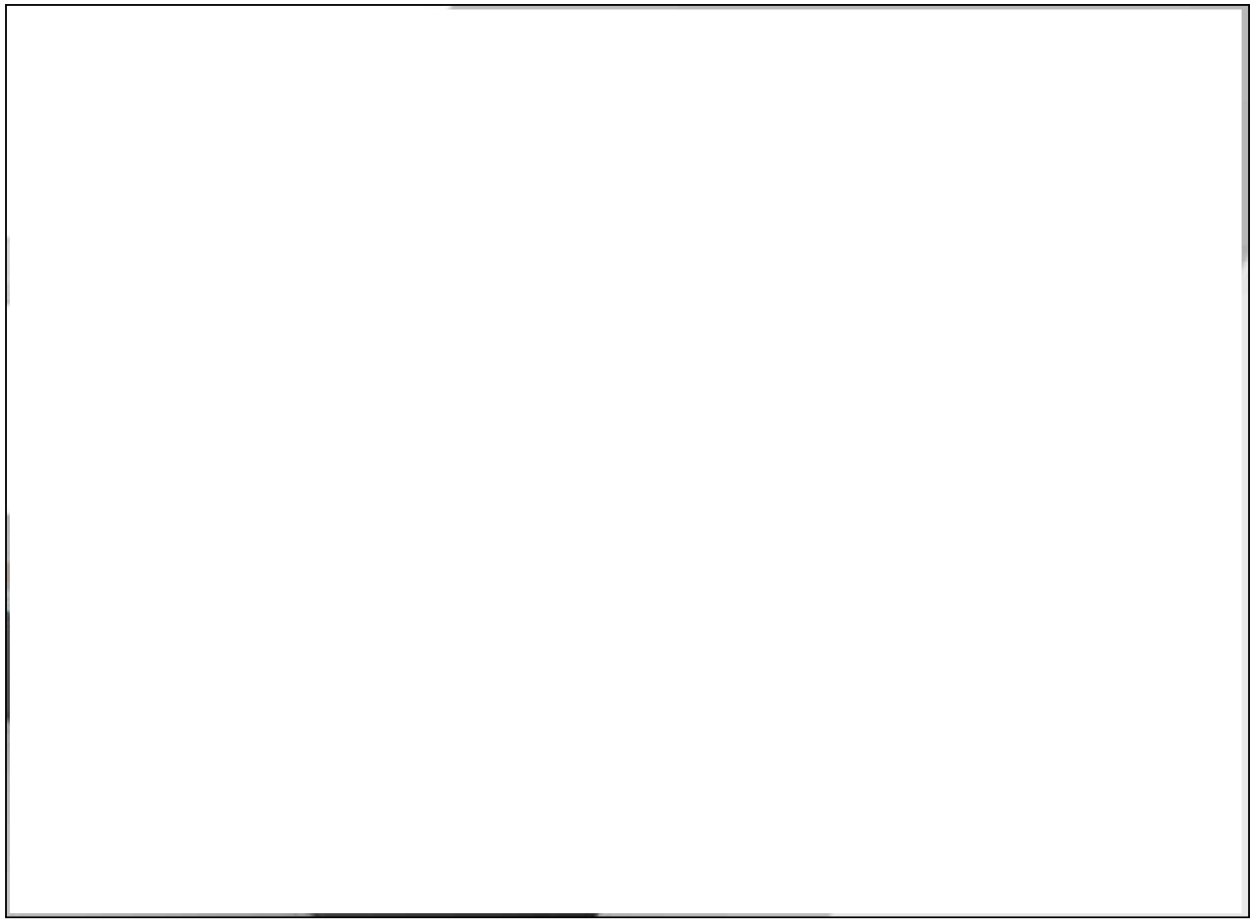

图 3-5 本项目质子治疗系统结构组成示意图

3.2.1.2 工作原理

3.2.1.2.1 束流发生系统

束流发生系统是质子治疗系统的核心部件，主要由一台超导质子回旋加速器及其结构支撑旋转机架组成，加速器安装于旋转机架上。回旋加速器由磁铁、离子源、射频系统、束流引出系统和真空系统组成。两个离子源经两个磁极插入加速器，在加速器内将氢气进行游离，成为氢离子，即一个带正电的质子。在两个实心磁极中间安装有两个 D 形真空盒，盒内抽真空。

质子在 D 形盒内旋转，每次通过 D 形真空盒间隙时，因间隙上的高频电压而获得加速，能量增加，旋转半径也随之增加。当质子多次通过高频间隙，能量不断增加，一直加速到最高能量 230MeV 时也对应旋转到最外面一圈，再利用磁和电偏转将质子束从加速器引出，其结构图见图 3-6。

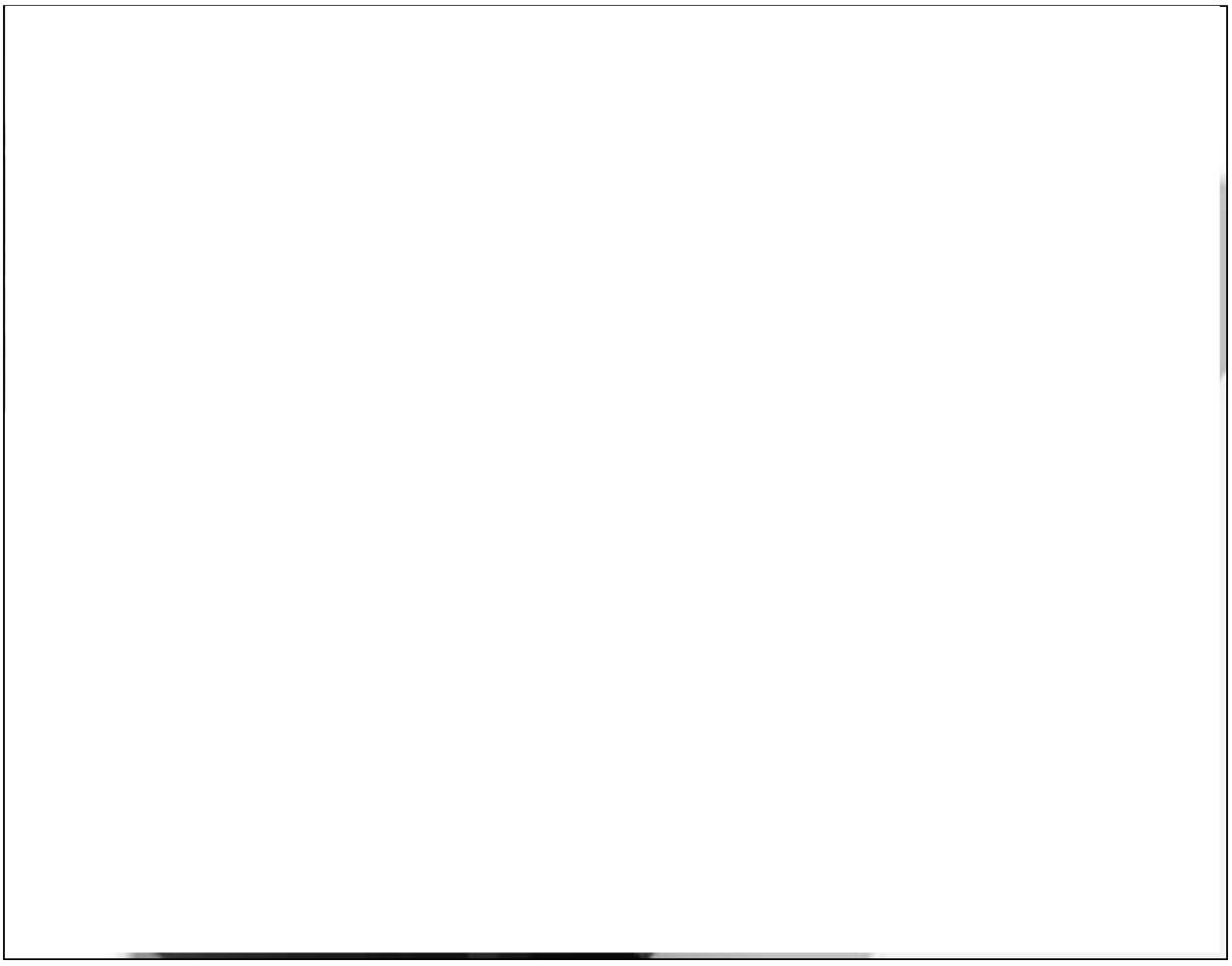

图 3-6 质子回旋加速器示意图

3.2.1.2.2 束流传输系统

束流传输系统包括扫描磁铁、束流射程调节器、自适应准直器和一个 190°旋转机架，如图 3-7 所示。各模块主要功能如下：

（1）扫描磁铁，扫描磁铁用于对束流方向进行控制，在出束过程中，可实现束流在 X\Y 方向连续移动（束流方向为 Z 方向），从而达到对肿瘤组织进行扫描治疗的目的。

（2）射程调节器，本项目质子回旋加速器出口束流能量为 230MeV，为了在治疗终端获得不同的束流能量，在束流传输线上增加了射程调节器。射程调节器由一组间隔紧密的聚碳酸酯平板组成，聚碳酸酯具有耐久性、低散射效率和高传输效率等特点，射程调节器结构如图 3-8 所示。通过调节束线路径上聚碳酸酯平板的数量，可使束流能量从最大 230MeV 调节至 70MeV，从而达到对不同深度肿瘤组织进行治疗的目的。

（3）准直器，束流通过射程调节器后部分线束偏离预定方向，为避免对患者正常组织造成照射并提高扫描精度，需剔除偏离部分的线束，因此在束流传输线末端增加了准直器。准直器由对质子束流有强阻挡能力的镍片组成，如图 3-9 所示。

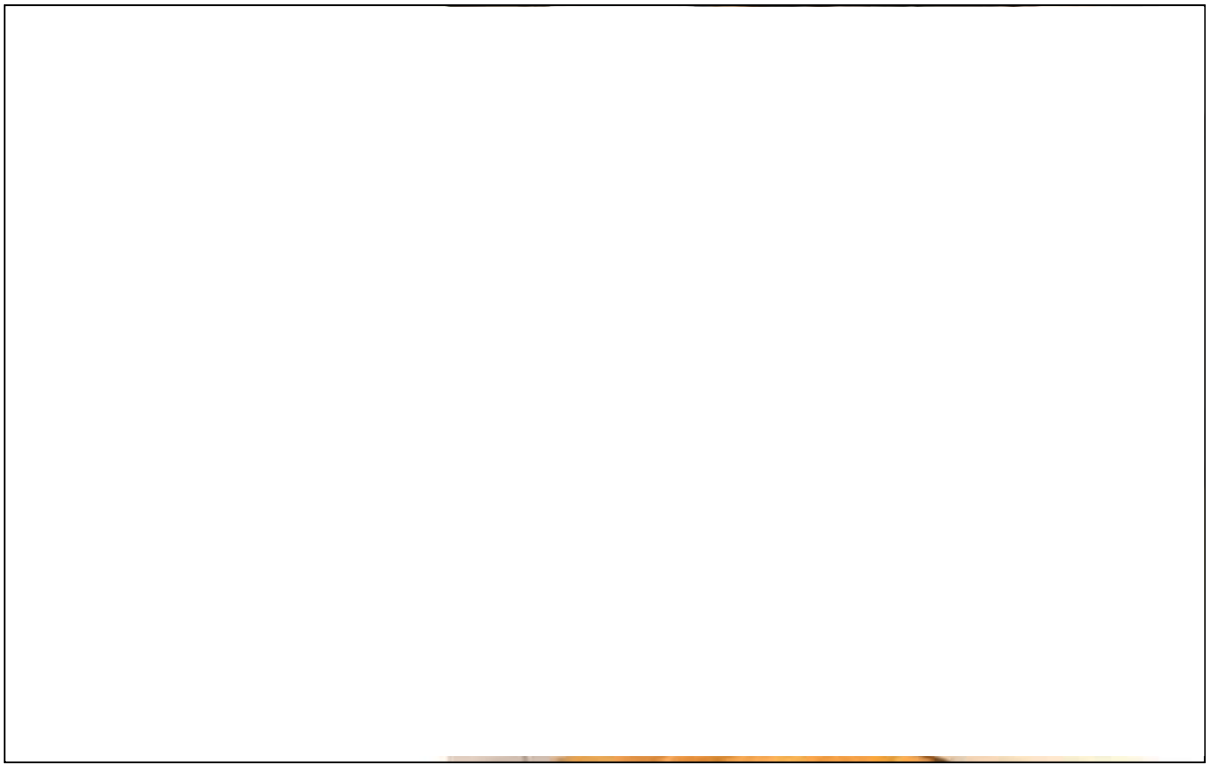

图 3-7 束流传输系统结构示意图

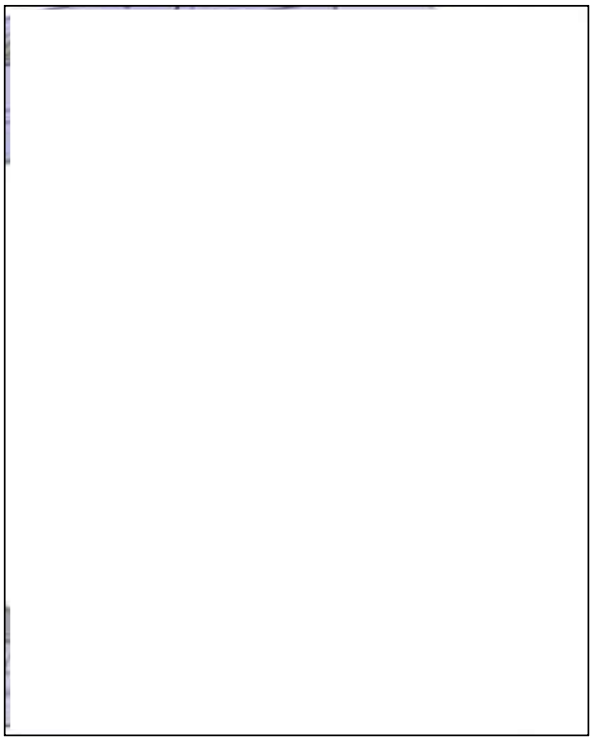

图 3-8 射程调节器结构示意图

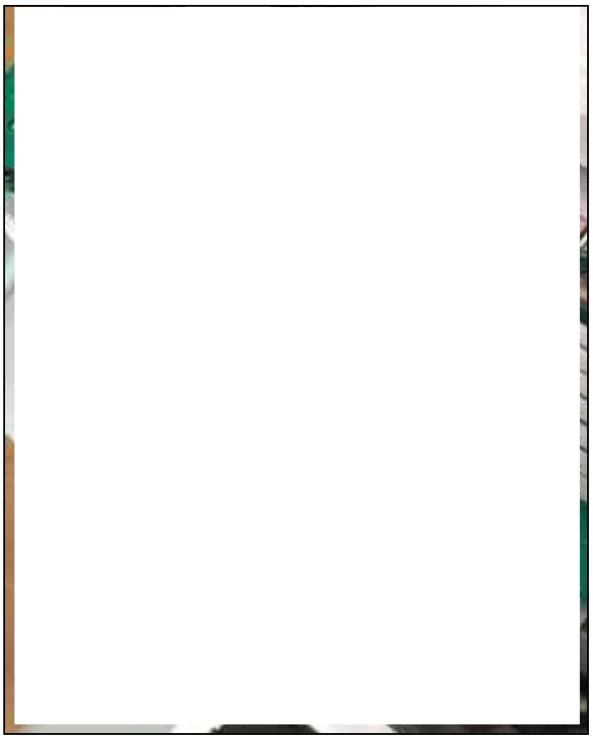

图 3-9 准直器结构示意图

3.2.1.2.3 患者定位系统

患者定位系统为患者治疗提供物理支撑，并允许基于在治疗之前获得的图像将患者移动到适当的位置进行治疗。主要包括治疗床和 2D/3D 成像系统。患者定位系统基于在治疗室中获取的 2D X 射线或 3D CT 图像帮助临床医生确定患者在治疗室中的正确位置。

2D 成像系统由设备配套的 A277 型 X 射线模拟定位机的 X 射线源、X 射线面板组件组成，配备两个 X 射线管，用于从不同角度对患者进行定位，分别位于地下和北侧屏蔽墙上。每个 X 射线管的最大管电压 150kV，最大管电流为 1000mA。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。医生可以通过调整两个正交图像对患者和治疗床的位置进行精确调整和位移。

3D 成像系统由设备配套的 SOMATOM Confidence 型的 CT 模拟定位机提供。通过 3D 成像对患者进行治疗前的定位。CT 模拟定位机最大管电压为 140kV，最大管电流为 800mA，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。

X 射线模拟定位机和 CT 模拟定位机的控制室位于一层治疗机房内（辐射工作人员也在治疗机房内，俗称同室操作）。为了确保 X 射线模拟定位机和 CT 模拟定位机出束期间，治疗室内的辐射工作人员操作台位置的辐射水平低于 2.5μSv/h，在治疗机房内设置 1 座 X 射线影像亭，X 射线影像亭的位置避开了束流直接照射的方向，防护效果不低于 4mm 铅当量。治疗机房内定位系统布设见图 3-10，X 射线影像亭在治疗机房内的相对位置见图 3-2。

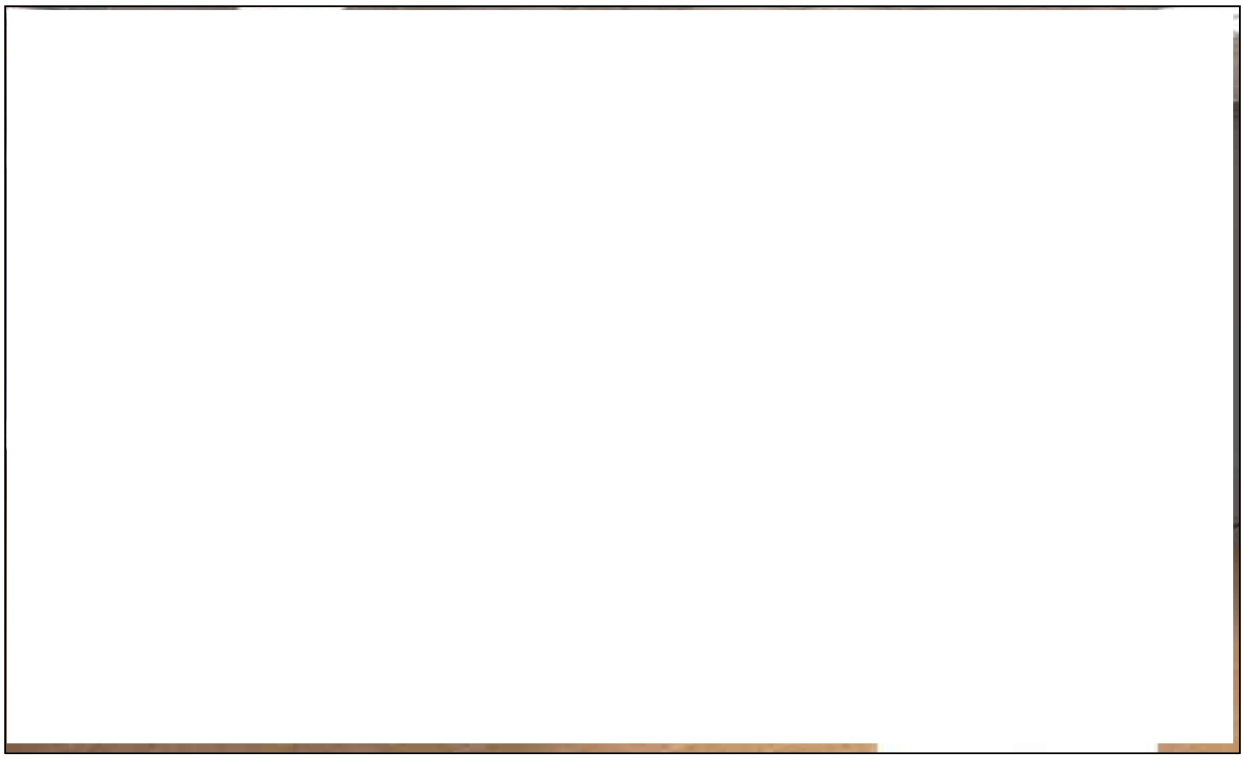

图 3-10 患者定位系统结构组成图

3.2.1.2.4 控制系统

控制系统使用通信接口控制和协调质子治疗系统的所有子系统操作和操作状态。控制系统提供用户界面以及控制参数，使物理师能够制定有效的治疗计划，操作设备的技师能够完成预期出束。

3.2.1.2.5 辅助系统

质子治疗装置辅助系统主要包括冷却水系统和通风空调系统，作为配套设施提供满足加速器装置运行要求的环境条件。

（1）冷却水系统

质子治疗机房内设冷却水循环系统。冷却水的冷源由制冷机组提供，经板式换热器热交换之后产生冷却水为加速器、电源柜、真空系统提供冷却。冷却水使用去离子水。

质子治疗系统中冷却水共有 3 个回路，每个回路中冷却水量为 0.16m^3。本项目在质子治疗机房设备底坑设置了专用的活化废水管道、普通废水管道和应急用水管道，质子治疗系统维修拆卸设备时，冷却水系统中涉及活化的 1 个回路冷却

水（约 0.16m^3）穿过西墙排放至机房西北侧的活化水暂存池，另 2 路不涉及活化的冷却水（约 0.32m^3）穿过南墙排放至楼梯间地埋式应急水池。单个水池可以容纳质子治疗系统内所有冷却水。

应急水池也承担冷却水系统漏水事故工况下应急排水。冷却水系统设置水量检测仪器，发生泄漏引起系统水量减少时，系统报警。地下一层设备底坑的角落处设置了地漏，机房地面形成一定坡度，在冷却水泄漏时能依靠重力自行流入地漏，自动监测收集系统发现有泄漏后，将收集的冷却水泵入应急水池中。

活化水暂存池和应急水池均采用混凝土浇筑，池内四壁、底部采用防水涂料覆盖，防止冷却水渗漏。冷却水中主要核素 H-3 为纯β核素，Be-7 核素发射少量γ射线，但活度浓度较低，水池上部剂量预计低于 0.1μSv/h。水池上部均覆盖钢板，防止人员坠落。

活化冷却水在日常运行时每年排放 1 次（更换去离子水），另外应急情况下也可能排放活化冷却水，按照医院操作规程和管理规定，这部分冷却水暂存在活化水暂存池内，排放前进行检测，低于豁免水平后作为普通废水排放。

（2）通风与空调系统

通风与空调系统为控制区、监督区的工作人员提供新鲜空气并控制空气的温湿度，可实现空气净化、除湿、降温、供暖、新风量调节等多种功能。

通风与空调系统利用新风过滤器对入风进行净化，新风从一层治疗机房送入。3 层屏蔽机房共用 1 套排气管道，通风管道延伸至质子中心（地上二层建筑）顶部，设置单独的 1 个排放口，用于排放机房内活化空气。为满足工作人员的可居留性要求，控制区的换气次数为 5.8 次/h，并维持控制区压力小于监督区，保证新鲜空气从监督区流向控制区，防止污染。

3.2.1.3 工艺流程

质子治疗系统工艺流程及产污环节图如图 3-11 所示：

图 3-11 质子治疗系统工艺流程及产污环节示意图

（1）患者经医师会诊，判断其符合质子治疗适应症后（诊断、治疗正当性判断），由科室医师、物理师、技师联合讨论，制定治疗预案并预约定位时间和治疗时间；

（2）首诊患者由医师陪同至治疗机房，护士站的护士接诊后根据预约时间，安排患者首先在模具制模室制作固定装置，再由 X 射线模拟定位机或者 CT 模拟定位机开机进行定位，采集患者数据并确定等中心。技师在治疗机房内的 X 射线影像亭内操作，并将采集的数据传输至物理计划室内的肿瘤信息系统（OIS 系统）内；定位时间约 2min；

（3）科室医师和物理师通过治疗计划系统确定靶区并制定治疗计划，该过程在计算机上完成，然后由物理师在地上一层治疗机房的控制室内进行治疗计划的验证；

（4）计划验证通过并获得批准执行后，患者在技师和护士的协助下，根据治疗方案在治疗室内进行摆位，整个摆位时间约 5min；

（5）摆位过程中需使用治疗机房内的 CT 模拟定位机进行精确的位置验证，验证时间需要约 3min；

（6）摆位验证完成后，技师进入控制室内，确定所有的安全联锁建立后，启动质子治疗系统进行出束治疗。平均每个患者治疗出束时间约为 4min（2 个照射野，每个照射野 2min）。每天的首次治疗开始前，物理师需要先在控制室内对质子治疗系统进行质量验证（QA），该过程中出束时间约 30min；

（7）患者治疗结束后等待约 10min 后，技师和护士进入治疗机房内，对患者解除摆位并协助其离开机房，居留时间约 1min，为下个患者治疗做准备。单个患者治疗后，防护门设置了延时 10min 进入的安全联锁，该功能通过加速器程序控制。

3.2.1.4 设备运行负荷

质子治疗系统的运行负荷是决定感生辐射水平的主要因素之一，本项目质子治疗系统治疗期间运行负荷见表 3-4。从表中可知，质子治疗系统单次（治疗）最长连续出束时间为 4min，每天累积治疗时间不超过 64min，考虑质量验证开机时间后设备每年累积开机时间不超过 392h。

表 3-4 质子治疗系统治疗期间运行负荷

序号	项目	最大运行负荷	备注
1	单次出束时间		
2	最长连续出束次数		
3	每小时出束次数		
4	每天出束次数		
5	每年出束次数		
6	治疗日最长出束时间		
7	年最长治疗出束时间		
8	QA 每天最长出束时间		
9	QA 每年最长出束时间		
10	年出束总时间		

注：QA 是指设备运行时定期出束，修正设备参数等质量控制形式。

3.2.2 射波刀

3.2.2.1 设备组成

本项目拟于射波刀机房内配备的 M6 FM 型射波刀 X 射线最高能量为 6MV，主要技术指标列于表 3-5。

表 3-5 本项目射波刀的主要技术指标

项目名称	技术参数
型号	M6 FM 型
位置	质子中心地上一层射波刀机房
主要技术指标	
射线最大出射角	
源轴距 SAD	
等中心点至机房地坪的高度	
距靶 0.8m 处 X 辐射剂量率	
最大照射野大小	
X 射线泄漏率	
靶材料	

射波刀包括以下部分：

（1）直线加速器（Linear Accelerator）：射波刀使用一个紧凑型、能产生 6MVX 射线的轻型直线加速器，直线加速器安装在由机器人控制的机械臂上。该直线加速器配有 12 个准直器，准直器直径从 5mm 到 60mm；

（2）机器人机械臂（Robot Arm）：机器人机械臂头端上安装有直线加速器，它带动直线加速器围绕患者在前、后、左、右、上、下六度空间自由转动，按照计算机预设的路线，机械臂可将直线加速器调整到最多两百余个位置（或节点），在每个节点处可以从 12 个角度投照射线，因此提供多达最多三千个方位发出射

线。每到一个预设治疗点，机械臂停止运动，直线加速器对准靶区投照相应的放射剂量；

（3）治疗床（Treatment Table）：射波刀的治疗床也由机器人控制，可以在六度空间自由移动；

（4）靶区定位（影像）追踪系统（Target Localization System）：与传统放射外科使用立体定向架固定患者头部以确保射线精确投照不同，射波刀使用人体骨骼结构作为参考框架，颅内病灶与颅骨之间产生固定的对应关系。靶区定位（影像）追踪系统是利用天花板上安装的两组诊断 X 射线球管和安装于地板平面下的影像探测器组成。两组 X 射线球管发出的低能 X 线相互垂直，交叉穿过头颅（或患者肿瘤的治疗部位），影像探测器获得颅骨的数字图像，并将影像资料传输到数据处理系统（Image Processing System，IPS），计算机与事先 CT 扫描获得的颅骨数字重建图像（DDR）相比较，首相先确定颅骨的精确位置，然后得出治疗靶目标（病灶）的精确位置。靶区定位追踪系统使用 4 套计算机软件，治疗颅内病变时，使用 6 维颅骨追踪软件；治疗脊髓、脊柱及其周围肿瘤时，使用 Xsight Spine（脊柱追踪软件）；治疗部分周围型肺癌时，使用 Xsight Lung（肺部追踪软件）；治疗随呼吸运动的肿瘤时或需要埋置金标时，使用金标追踪和呼吸追踪系统；

（5）治疗计划系统：治疗计划系统由计算机工作站和 Multiplan 治疗计划软件组成。患者治疗前，先作 CT 或 MRI 定位，将定位影像传输到计算机内。医生先勾画出计划治疗的肿瘤和重要器官，然后设置中心点，最后选择准直器并给出肿瘤和重要器官的剂量要求，计算机能自动设计一个满足设定条件、适形满意、剂量分布均匀、照射范围与肿瘤形状几乎吻合的治疗计划。根据治疗的需要，医生可设计单次治疗，也可设计分次治疗。射波刀治疗计划系统不仅具有常规的正向治疗计划，而且还有任意形状逆向治疗计划。正向治疗计划是医生根据病灶的大小和形状，选择相应的准直器和照射方式逐步设计出一个和病灶形状几乎一样的照射形状，然后给出周边剂量和中心剂量。逆向治疗计划是医生先勾画出计划照射的靶区以及给出靶区和重要器官的剂量要求，计算机自动设计一个满足设定条件的治疗计划；

（6）呼吸追踪系统：当治疗肺部肿瘤或受呼吸运动影响的肿瘤（肝癌、胰腺肿瘤等）时，肿瘤随着患者的呼吸而上下左右运动。治疗这些体部肿瘤之前，需要向肿瘤内或周围放置金标（由黄金制成的，长 5mm，直径 0.8mm 的圆柱体称为金标），金标放置 5-7 天后才能实施射波刀治疗。呼吸追踪是让患者穿上胸前带有发红光二极管的背心，呼吸追踪摄像机通过捕捉二极管的运动获得肺部的呼吸运动节律，计算机建立呼吸模型。治疗时，通过追踪金标的位置获得肿瘤的精确位置，同时计算机根据呼吸节律，自动微调机器人机械臂，让射线始终精确瞄准病灶；

（7）计算机网络集成与控制系统：射波刀拥有一个计算机工作站（SGI），SGI 计算机通过网络控制机器人机械臂、控制直线加速器何时投照射线、治疗床的移动和治疗靶区位置的追踪。此外，治疗时获得的骨骼图像与定位图像的自动比对均在 SGI 计算机掌控下自动进行。

3.2.2.2 工作原理

射波刀是一种新型立体定向放治疗装置，集影像引导系统和高准确性的治疗于一身，将一个 6MVX 射线的轻型电子直加速器安放在一个有 6 个自由度的机械臂上，利用机械臂的全向投照能力对肿瘤进行精确地、非共面和多中心的放射治疗。射波刀是全球唯一整合最先进的机器人技术和智能影像实时监控、追踪系统的放射治疗系统，尤其擅长对颅内肿瘤进行立体定向放射治疗、对运动器官进行追踪治疗。

3.2.2.3 工艺流程

射波刀工艺流程及产污环节图如图 3-12 所示，具体工艺流程如下：

图 3-12 射波刀工艺流程及产污环节示意图

（1）患者在经诊断确诊需要进行放射治疗后（诊断、治疗正当性判断），根据肿瘤分期、分型确定治疗方案，确定模拟定位治疗的时间；

（2）对于首次预约治疗的患者，需要在利用 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，照射时间为 1min。该环节在质子中心地上一层 CT 模拟定位机房内进行，由治疗技师和护士进行操作；

（3）在治疗计划系统内勾画病变靶区和正常器官，根据患者瘤体的类型、部位和大小等初步确定照射剂量和照射时间，并进一步制定相应的治疗计划。该环节在物理计划室内进行，由科室医师和物理师进行操作。然后由物理师在地上一层治疗机房的控制室内进行治疗计划的验证；

（4）计划验证通过并获得批准执行后，患者在技师和护士的协助下，根据治疗方案在治疗室内进行摆位，整个摆位时间约 1min；

（5）技师确认机房内无其他人员滞留，确认各类按钮工作正常后，关闭防护门；

（6）技师在控制室内设置参数，按照治疗方案调整好出束时间、角度、剂量，然后进行出束治疗，该过程中出束时间约 15min。治疗过程，会产生 X 射线，机房内的空气会电离产生臭氧和氮氧化物；

（7）治疗结束后，停止出束，解除定位，关闭系统，患者离开治疗室。

3.2.2.4 设备运行负荷

本项目 M6 FM 型射波刀单次治疗照射时间约 15min，日接诊量最大 16 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，则年出束运行时间约 1000h。

3.2.3 医用直线加速器

3.2.3.1 设备组成

本项目拟搬迁至 1#医用直线加速器机房的瓦里安 Vital Beam 型医用直线加速器 X 射线最高能量为 10MV，拟于 2#医用直线加速器机房内配备的 Halcyon 型医用直线加速器 X 射线最高能量为 6MV，主要技术指标列于表 3-6。

表 3-6 本项目医用直线加速器的主要技术指标

项目名称	技术参数	
型号	Vital Beam 型	Halcyon 型
位置	质子中心地上一层 1#医用直线加速器机房	质子中心地上一层 2#医用直线加速器机房
主要技术指标		
射线最大出射角		
源轴距 SAD		
等中心点至机房地坪的高度		
距靶 1m 处 X 辐射剂量率		
最大照射野大小		
机架旋转		
自带屏蔽壳体		
X 射线泄漏率		
靶材料		

医用直线加速器是以磁控管为微波功率源的直线加速器，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。电子枪产生的电子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，通过 2cm 左右的空气射到金属钨靶，产生大量高能 X 射线，经初级准直器和均整器形成剂量均匀的 X 射线束，再通过监测电离室和次级准直器限束，最后到达患者病灶实现治疗目的。医用直线加速器内部结构图 3-13 所示。

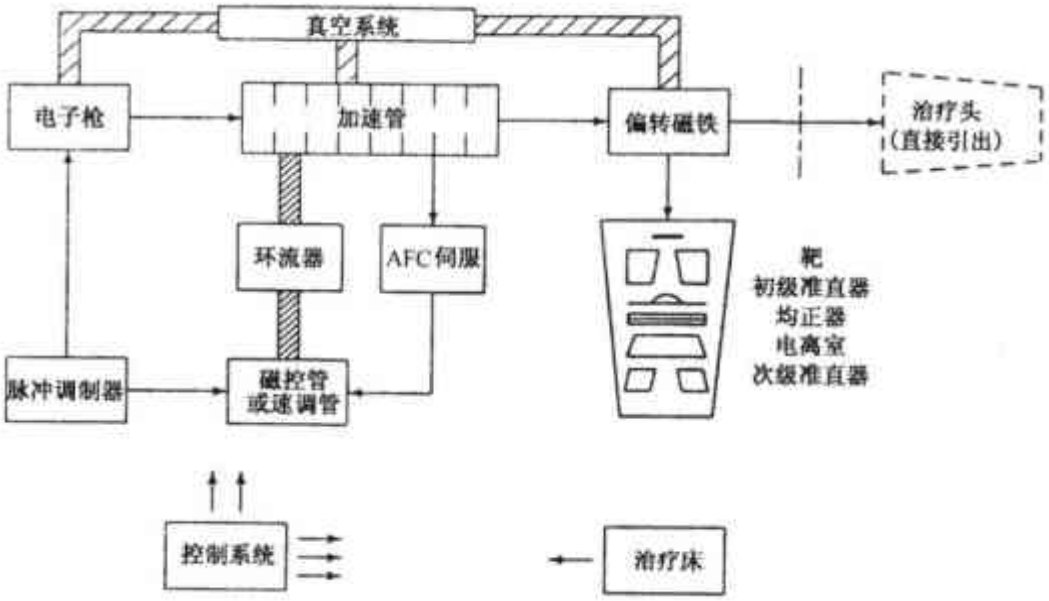

图 3-13 医用直线加速器内部结构图

3.2.3.2 工作原理

医用直线加速器是产生高能电子束的装置。电子枪发射电子，在由磁控管速调管为功率源的加速管中加速，当达到所需能量时，经散射箔和准直器得治疗电子束。电子束射到金属靶上产生轫致辐射，经准直得到治疗 X 射线。加速器放射治疗的工作方式为：以一个或几个疗野定向照射，获得计划所需的治疗剂量。医用直线加速器系统结构示意图如图 3-14 所示。

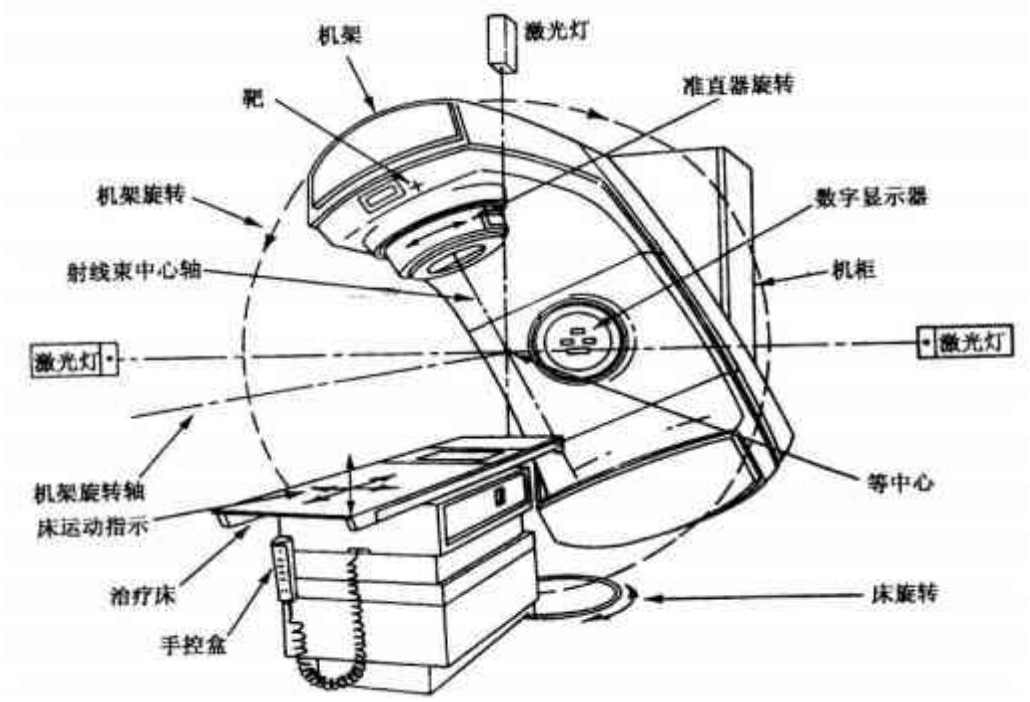

图 3-14 医用直线加速器系统结构示意图

3.2.3.3 工艺流程

医用直线加速器工艺流程及产污环节图如图 3-15 所示，具体治疗流程如下：

图 3-15 医用直线加速器治疗流程及产污环节示意图

（1）患者在经诊断确诊需要进行放射治疗后（诊断、治疗正当性判断），根据肿瘤分期、分型确定治疗方案，确定模拟定位治疗的时间；

（2）对于首次预约治疗的患者，需要在利用 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，照射时间为 1min。该环节在

质子中心地上一层 CT 模拟定位机房内进行，由治疗技师和护士进行操作；

（3）在治疗计划系统内勾画病变靶区和正常器官，根据患者瘤体的类型、部位和大小等初步确定照射剂量和照射时间，并进一步制定相应的治疗计划。该环节在物理计划室内进行，由科室医师和物理师进行操作。然后由物理师在地上一层治疗机房的控制室内进行治疗计划的验证；

（4）计划验证通过并获得批准执行后，患者在技师和护士的协助下，根据治疗方案在治疗室内进行摆位，摆位时间约 1min；

（5）技师确认机房内无其他人员滞留，确认各类按钮工作正常后，关闭防护门；

（6）技师在控制室内设置参数，按照治疗方案调整好出束时间、角度、剂量，然后进行出束治疗，该过程中出束时间约 2~3min。治疗过程，会产生 X 射线、电子线，机房内的空气会电离产生臭氧和氮氧化物；

（7）治疗结束后，停止出束，解除定位，关闭系统，患者离开治疗室。

3.2.3.4 设备运行负荷

本项目 Vital Beam 型医用直线加速器单次治疗照射时间约 3min，日接诊量最大 50 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，则年出束运行时间约 625h。

本项目 Halcyon 型医用直线加速器单次治疗照射时间约 2min，日接诊量最大 40 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，则年出束运行时间约 333.3h。

3.2.4 后装机（Ⅲ类放射源）

3.2.4.1 设备组成

本项目拟由高新区院区肿瘤放疗中心搬迁至开发区院区质子中心地上一层后装治疗机房的 KL-HDR-C 型后装机，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 3.70E+11Bq，属于Ⅲ类放射源。

后装机的结构主要包括施源主机、放射源、控制系统、监视系统、附属安全

设备和施源器、治疗床等。

3.2.4.2 工作原理

后装治疗是放射治疗的一种方法，所谓后装就是预先在患者需要治疗的部位正确地放置施源器，然后采用自动或手动控制，将贮源器内放射源输入施源器内实施治疗的技术。后装治疗属近距离放疗，治疗时依照临床要求，使γ放射源在人体自然腔、管道或组织间驻留而达到预定的剂量及其分布的治疗手段，后装治疗具有治疗距离短、局部剂量高、周边剂量迅速跌落的特点，主要治疗不同部位的肿瘤以及手术难以切净，而周围又有重要脏器限制外照射剂量的患者，如胰腺、胆管、膀胱癌、直肠癌及头颈部恶性肿瘤等。

3.2.4.3 工艺流程

后装机的工艺流程和产污环节图如图 3-16 所示，其具体治疗流程如下：

图 3-16 后装机工艺流程及产污环节图

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

（2）放疗医师根据医学影像临床诊断资料，提出放射治疗方案和精确治疗计划；

（3）放射治疗计划完成，并经放疗医师确认后，放疗技师领患者进入治疗室，对患者进行摆位，摆位时间约 1min。将施源器与后装机连接，放入腔内；

（4）技师确认治疗室内无其他人员滞留，确认各类按钮工作正常后，关闭防护门；

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

（6）治疗结束，确认放射源回位后，对患者解除摆位并协助其离开治疗室，解除摆位时间约 1min。

3.2.4.4 设备运行负荷

本项目 KL-HDR-C 型后装机单次治疗照射时间约 10min，日接诊量最大 12 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，则年出源照射时间约 500h。

3.2.5 CT 模拟定位机

3.2.5.1 设备组成

本项目拟由高新区院区肿瘤放疗中心搬迁至开发区院区质子中心地上一层 CT 模拟机房的 SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机，主要技术指标列于表 3-7。

表 3-7 本项目 CT 模拟定位机的主要技术指标

项目名称	技术参数
型号	SOMATOM Confidence 型
位置	质子中心地上一层 CT 模拟机房
最大管电压	
最大管电流	

CT 模拟定位机主要由 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 3-17 所示。

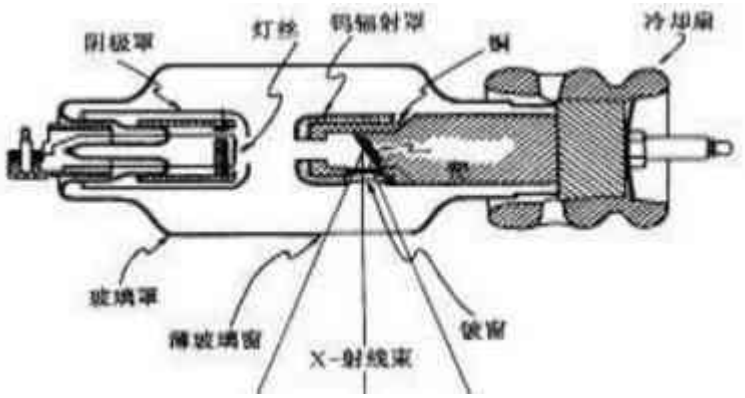

图 3-17 X 射线管基本结构示意图

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

另外，本项目质子治疗系统于质子治疗机房内配套设置有 1 台 A277 型 X 射线模拟定位机和 1 台 SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机，已在“3.2.1.2.3”节中进行描述。

3.2.5.2 工作原理

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

CT 模拟定位机的机架旋转、机头转动、限束器开闭、距离指示、照射野指示、治疗床各部分运动，都与医用直线加速器一样，因此它能准确地模拟医用直线加速器的一切机械运动。并通过模拟定位机的 X 线影像系统准确定出肿瘤的

照射位置、照射面积、肿瘤深度、等中心位置等几何参数，以及机架旋转、机头旋转角度、源瘤距、源皮距、限束器开度、升床高度等机械参数，为治疗摆位提供了有力的依据，确保放射治疗的正确实施。

3.2.5.3 工艺流程

患者经医生诊断后，预约登记诊断时间。受检者按约定时间在候诊区准备和等候。受检者进入机房在医务人员的指导下正确摆位。摆位完成后，除患者外，无关人员退出机房。工作人员检查无误后，即开启模拟定位机进行摄影/模拟定位。检查结束后，受检者离开机房。CT 模拟定位机工艺流程及产污环节图见图 3-18。

图 3-18 CT 模拟定位机工艺流程及产污环节示意图

3.2.5.4 设备运行负荷

本项目 SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机单次出束时间约 15s，日接诊量最大 120 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，则年出束运行时间约 125h。

3.3 污染源项

3.3.1 质子治疗系统

3.3.1.1 束流损失

质子治疗系统运行时产生的辐射场主要包括两类，一类为加速器运行时由初级束和次级束产生的瞬发辐射，另一类为加速器停机后由感生放射性核素产生的缓发辐射。

瞬发辐射和缓发辐射均由质子束流在运输过程中的损失所引起，其大小与损失束流的能量、强度、方向以及靶体材料等相关。

（1）束流损部件

本项目质子治疗系统的质子束流运输示意图见图 3-19。质子束流从加速到引出治疗的过程中，束流依次损失在回旋加速器内部（①）、束流传输线（②）、射程调节器（③）、多叶准直器（④）和终端（⑤）。

图 3-19 加速器束流运输示意图（图中单位为 cm）

加速器内部的束流损失考虑为均匀损失，束流损失方向为加速器的腔体径向。加速器径向由内向外依次为半径 66.5cm 的加速器腔体、30cm 厚的磁铁、5cm 厚的硼化聚乙烯和 13cm 厚的不锈钢。加速器轴向长 137cm，其中加速器腔体长 37cm，两端各为厚 50cm 的不锈钢，加速器轴向剖面结构示意图见图 3-20。

图 3-20 回旋加速器轴向剖面示意图（图中单位为 cm）

束流引出后在射程调节器、多叶准直器和治疗终端中的损失考虑为集中损失，束流在束流传输线上沿行程考虑为均匀损失。本项目束流损失部件结构、材料信息见表 3-8。

表 3-8 束流损失部件结材料信息表

序号	束流损失区域	材料名称	几何尺寸	化学组分
①	加速器内部	铁		
		硼化聚乙烯		
		铁		
②	束流传输线	空气		
③	射程调节器	聚碳酸酯		
④	多叶准直器	镍		
⑤	治疗终端	患者		

（2）束流损失参数表

质子束流的束流损失参数由加速器的系统特性决定，本项目质子治疗系统束

流损失参数见表 3-9、表 3-10。其中表 3-9 为采用 230MeV 能量的质子对患者治疗的工况，表 3-10 为 70MeV 能量的质子治疗工况。

表 3-9 束流损失参数表（230MeV 能量治疗工况）

序号	束流损失区域	束流能量（MeV）	束流强度（nA）	损失束流（nA）	靶材料	损失方式
1	加速器内部				铁	均匀损失
2	束流传输线				空气	均匀损失
3	射程调节器				聚碳酸酯	集中损失
4	多叶准直器				镍	集中损失
5	患者				体模	集中损失

表 3-10 束流损失参数表（70MeV 能量治疗工况）

序号	束流损失区域	束流能量（MeV）	束流强度（nA）	损失束流（nA）	靶材料	损失方式
1	加速器内部				铁	均匀损失
2	束流传输线				空气	均匀损失
3	射程调节器				聚碳酸酯	集中损失
4	多叶准直器				镍	集中损失
5	患者				体模	集中损失

3.3.1.2 瞬发辐射

瞬发辐射一般远高于缓发辐射，它决定了屏蔽体的设计厚度。缓发辐射是辐射工作人员受照剂量的主要来源之一。

本项目辐射工作人员在质子治疗系统停机后需要进入质子治疗机房的患者治疗机房（地上一层）内，协助患者离开治疗机房，并在下一次开机前对患者进行摆位。设备维修维护人员在质子治疗系统停机后需要进入质子治疗机房的设备底坑（地下一层）和维修平台（地上二层），开展维修和维护保养工作。本项目的设备维修维护工作委托设备生产单位开展，医院的辐射工作人员一般不进入设

备底坑和维修平台。

瞬发辐射由加速器运行时损失束流与加速器部件、终端靶和屏蔽墙等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但随着加速器的停机而完全消失。

质子与靶发生核反应得到的中子产额、能谱和角分布与入射粒子种类、能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。中子产额与能量都随粒子单核能量的提高而单调上升。在单核能量相同的情况下，中子产额随入射粒子质量数的增加而上升。中、高能质子核反应瞬发中子有两个突出的特点：从角分布看，正前方有尖锐的峰值；从能谱看，几乎各个方向都有高能中子，这些高能中子是辐射屏蔽的主要对象。

230MeV 能量的质子束流轰击靶材产生的中子、光子能谱见图 3-21，70MeV 能量的质子束流轰击靶材产生的中能、光子能谱见图 3-22

（a）中子能谱

（b）光子能谱

图 3-21 230MeV 质子束流轰击靶材后的中子能谱和光子能谱

（a）中子能谱

（b）光子能谱

图 3-22 70MeV 质子束流轰击靶材后的中子能谱和光子能谱

质子轰击体模（数模计算中采用设备性能检测使用的标准体模代替患者）中的总辐射剂量场和中子剂量场见图 3-23。从图中可知，瞬发辐射场是以中子和光子为主的辐射场，中子对辐射剂量场的贡献大于 90%。

图 3-23 质子轰击体模的总辐射剂量率场（左）和中子辐射剂量场（右）

瞬发辐射的强度决定了质子治疗机房四周屏蔽体的主要屏蔽参数，本报告书将在第 5 章中对不同工况下的瞬发辐射场所辐射水平进行估算和评价。

3.3.1.3 感生放射性

对于能量较高的质子治疗系统，感生放射性是辐射工作人员受照剂量的主要来源之一。感生放射性主要由质子束、次级中子、γ光子与加速器部件、冷却水及机房内空气、混凝土墙体、土壤等相互作用引起。其辐射水平取决于加速粒子的能量、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。对于单次运行时间较短的质子治疗系统，长半衰期放射性核素产额低，短半衰期放射性核素产额高。但短半衰期核素衰变快，缓发辐射剂量场可在短时间内衰减到较低的辐射水平。

质子治疗系统在 230MeV 和 70MeV 两种工况下的束流损失参数有差别，从表 3-9 和表 3-10 中可知，能量较低的 70MeV 工况下束流损失略大于 230MeV 工况。本项目保守计算时，感生放射性的束流能量取最大值 230MeV，束流损失按 70MeV 工况下的束流损失参数取值，计算时相应的束流损失参数见表 3-11。

表 3-11 感生放射性计算用束流损失参数表

序号	束流损失区域	束流能量（MeV）	束流强度（nA）	损失束流（nA）	靶材料	损失方式
1	加速器内部				铁	均匀损失
2	束流传输线				空气	均匀损失
3	射程调节器				聚碳酸酯	集中损失
4	多叶准直器				镍	集中损失
5	患者				体模	集中损失

（1）空气感生放射性

质子治疗系统运行期间次级粒子（中子、光子等）与机房内空气分子的直接核反应是空气感生放射性核素的主要来源。空气感生放射性核素一般为短半衰期核素，核素在放射性衰变和空气稀释效应下可快速降低到较低的放射性水平。

空气中活化的放射性核素主要通过热中子俘获、（n，2n）、（γ，n）反应和散裂反应而产生。产生的活化核素主要有 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等短半衰期核

素，对人体的危害途径主要为气体浸没外照射和吸入内照射。

按照表 3-11 中束流损失参数，本项目每天出束时间总和为 64min，因此按照质子治疗系统连续运行 64min 对空气活化进行保守计算。机房内空气活化主要放射性核素活度浓度计算结果见表 3-12。

本项目质子治疗机房设有通风换气系统，排风量 6000m^3/h，机房净体积约 1032m^3，换气次数为 5.8 次/h。在此通风条件下，表 3-12 给出了机房内放射性核素活度浓度值，计算公式来自于 NCRP 144 号报告，具体见公式（3.1）。

$$A_r = A_{max} \times \lambda_{dec} / \lambda_{eff-r} \quad (3.1)$$

式中：A_r—考虑了通风换气后机房内的空气活度浓度，Bq/m^3；

A_{max}—机房内连续运行 4min 后的活化核素活度浓度，Bq/m^3；

λ_{dec}—核素的衰减系数，s^{-1}；

λ_{eef-r}—运行时核素的有效衰减系数，见公式（3.2）：

$$\lambda_{eff-r} = \lambda_{dec} + R_r / V \quad (3.2)$$

式中：R_r—运行时通风量，m^3/h；

V—机房空间体积，m^3。

表 3-12 空气感生放射性活度浓度

核素	半衰期	不通风时房内最大活度浓度（Bq/m^3）	有通风机房内最大活度浓度（Bq/m^3）	导出活度浓度限值 ALI_{min}（Bq/m^3）
Be-7				
C-11				
N-13				
O-15				
Ar-41				

从表中可知，质子治疗系统运行期间向环境排放的放射性核素主要为短半衰期核素 C-11、N-13、O-15 和 Ar-41 以及少量的 Be-7。计算结果表明，由于质子治疗机房设置了通风系统，降低了空气中粒子受照时间，从而有效降低了向环境中排放的核素活度水平，特别是对于半衰期稍长的核素影响更为显著。

依据本项目职业照射剂量限值 5mSv/a，表 1-7 给出了空气中放射性核素导出空气浓度限值 ALI_{min}。对比可知，质子治疗系统运行时排放的感生放射性核素活度浓度远低于导出活度浓度限值。

（2）冷却水中感生放射性

质子治疗系统运行期间产生的次级射线（主要是中子）穿过冷却水管使冷却水受照活化，主要反应为中子引起水中 O-16 散裂，活化后放射性核素以 O-15、C-11 和 Be-7 为主。本项目质子治疗系统冷却水系统位于地下一层设备底坑内，冷却水从热交换机依次流入加速器电源、加速器扫描磁铁和加速器射频导体，然后返回冷却水热交换机。其中扫描磁铁和加速器射频导体处中子通量较大，是冷却水活化的主要来源。

加速器循环冷却水量为 160L，其中扫描磁铁周围水管内有约 5.7L，射频导体周围有约 10L。根据加速器结构设计，建立如图 3-24 的冷却水活化数学模型。扫描磁铁的冷却水位于加速器线束出口处，该位置的中子通量主要来源于束流在加速器内部的损失和在射程调节器上的损失；射频导体位于加速器表面，数学模型设置为加速器表面 1.0cm 厚度的水层，中子通量主要来源于磁铁内部的束流损失。

图 3-24 冷却水活化计算模型

冷却水回路采用闭式循环，冷却水来源为外购的去离子水。质子治疗系统运行一段时间后，由于冷却水系统管道腐蚀少量粒子进入冷却水，去离子水的水质下降，不满足质子治疗系统运行要求后需要更换。根据设备生产单位维护保养程序，冷却水每年更换一次。经估算，进入活化水暂存池中的放射性核素活度浓度，以及在活化水暂存池中存放 1 年后的活度浓度结果见表 3-13。

表 3-13 冷却水感生放射性核素活度浓度计算结果

活化核素	核素半衰期	质子治疗系统连续运行 1 年后活度浓度（Bq/L）	在活化水暂存池中存放 1 年后活度浓度（Bq/L）
H-3			
Be-7			
C-11			
N-13			
O-14			
O-15			

注：表中活度浓度按照冷却水量 160L 计算。

从表中可知，质子治疗系统连续运行 1 年（392h）后，冷却水中主要放射性核素为β核素，另外 H-3 活度浓度为 6.48Bq/L，存放 1 年后活度浓度为 6.13Bq/L。参考《2022 年全国辐射环境质量报告》中统计的降水中 H-3 活度浓度范围为 0.44~4.1（Bq/L），降水是环境中地表水和地下水的主要来源，因此可以认为本

项目冷却水中 H-3 的活度浓度略高于天然环境中水中 H-3 的活度浓度。

质子治疗系统连续运行 1 年后冷却水中因 Be-7 等短半衰期核素的影响，水中总β活度浓度超过 2.92E+02Bq/L，但在活化水暂存池中存放 1 年后可以降至 2.52Bq/L，远低于《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）中对医疗机构废水排放的限值要求：总β不超过 10Bq/L。

活化冷却水需在排放前委托有资质的单位进行检测，确保低于豁免水平后可作为普通废水排放。

（3）质子治疗系统部件、混凝土、土壤和地下水中感生放射性

质子治疗系统的活化部件主要是束流损失区域的部件，包括加速器内部磁铁、射程调节器、多叶准直器和碳纤维治疗床。

计算时，保守考虑质子治疗系统单个年度连续运行 392h 和连续运行 20 年两种工况对质子治疗系统部件的活化核素放射性水平进行计算。束流损失工况按照保守的最大工况计算，计算结果见表 3-14。

表 3-14 质子治疗系统运行 1 年后的各类部件介质的感生放射性

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
加速器 射程调节器	聚碳酸酯	F-18		
		O-15		
		N-13		
		C-11		
		Be-7		
		H-3		
加速器 准直器	镍	Ni-65		
		Cu-64		
		Ni-63		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Co-62		
		Cu-62		
		Fe-61		
		Co-61		
		Cu-61		
		Co-60		
		Cu-60		
		Fe-59		
		Cu-59		
		Co-58		
		Mn-57		
		Co-57		
		Ni-57		
		Cr-56		
		Mn-56		
		Co-56		
		Ni-56		
		Cr-55		
		Fe-55		
		Co-55		
		Mn-54		
		V-53		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Fe-53		
		V-52		
		Mn-52		
		Fe-52		
		Ti-51		
		Cr-51		
		Mn-51		
		V-49		
		Cr-49		
		V-48		
		Cr-48		
		V-47		
		Ti-45		
		Sc-49		
		Sc-48		
		Sc-47		
		Sc-46		
		Ca-45		
		Sc-44		
		K-43		
		Sc-43		
		K-42		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Cl-39		
		Cl-38		
		K-38		
		Ar-37		
		P-33		
		P-32		
		P-30		
		Al-29		
		Al-28		
		Na-24		
		F-18		
		O-15		
		N-13		
		C-11		
		Be-7		
		H-3		
治疗床	碳纤维	O-15		
		N-13		
		C-11		
		Be-7		
		H-3		
加速器磁铁	铁	Fe-59		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Co-58		
		Mn-57		
		Co-57		
		Cr-56		
		Mn-56		
		Co-56		
		Ni-56		
		Fe-55		
		Co-55		
		Mn-54		
		V-53		
		Fe-53		
		V-52		
		Mn-52		
		Fe-52		
		Ti-51		
		Cr-51		
		Mn-51		
		Sc-49		
		V-49		
		Cr-49		
		Sc-48		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Cr-48		
		Sc-48		
		Sc-47		
		V-47		
		Sc-46		
		Ca-45		
		Ti-45		
		Sc-44		
		Sc-43		
		K-44		
		K-43		
		K-42		
		Ar-41		
		Cl-39		
		Cl-38		
		K-38		
		Ar-37		
		S-35		
		P-33		
		P-32		
		Si-31		
		P-30		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Al-29		
		Al-28		
		Na-24		
		F-18		
		O-15		
		N-13		
		C-11		
机房屏蔽墙	混凝土	Fe-59		
		Mn-57		
		Mn-56		
		Co-56		
		Co-56		
		Ni-56		
		Co-55		
		Mn-54		
		V-53		
		Fe-53		
		V-52		
		Mn-52		
		Fe-52		
		Ti-51		
		Cr-51		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Mn-51		
		Sc-49		
		V-49		
		Cr-49		
		Cr-48		
		Ca-47		
		Sc-47		
		V-47		
		Sc-46		
		Ca-45		
		Ti-45		
		Sc-44		
		Sc-43		
		K-45		
		K-44		
		K-43		
		K-42		
		Ar-41		
		Cl-39		
		Cl-38		
		K-38		
		Ar-37		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		S-35		
		P-33		
		P-32		
		Si-31		
		P-30		
		Al-29		
		Al-29		
		Mg-28		
		Al-28		
		Mg-27		
		Ne-24		
		Na-24		
		Na-22		
		F-18		
		O-15		
		N-13		
		C-11		
机房底板下土壤	土壤	Fe-59		
		Mn-56		
		Fe-55		
		Mn-54		
		Fe-53		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		Mn-52		
		Cr-51		
		Mn-51		
		Cr-49		
		Cr-48		
		Sc-47		
		V-47		
		Ti-45		
		Sc-44		
		Si-31		
		Al-29		
		Mg-28		
		Al-28		
		Mg-27		
		Ne-24		
		Na-24		
		F-18		
		O-15		
		N-13		
		C-11		
机房底板下水	水	O-15		
		N-13		

介质	部件材料	感生放射性核素	半衰期（min）	活度（Bq）
		C-11		
		Be-7		

从表 3-14 中可以看到，质子治疗系统连续运行 1 年（392h）后，质子治疗系统各部件的感生放射性核素活度，随着部件材料原子序数越高，产生的感生放射性核素种类越多。另外质子治疗系统部件由于活化产生的放射性核素除了大量短半衰期核素外，还有少量的 Fe-55、Mn-54 等半衰期较长的核素，该类核素是将来活化部件退役处置时需重点关注的核素。

表 3-15~表 3-19 分别为加速器磁铁、射程调节器、准直器、混凝土屏蔽墙和机房底板下的土壤在质子治疗系统连续使用 20 年后活化活度，以及使用 20 年且暂存 1 年后（即停止使用后退役前）的活度水平，表中未列出的核素是经过 1 年时间存放后，核素放射性活度已降至可忽略水平。

表 3-15 加速器磁铁（含磁轭）中感生放射性活度

序号	核素	半衰期（d）	连续运行 20 年后的活度（Bq）	停止使用暂存 1 年后的活度（Bq）	GB 18871-2002 可申请豁免值（Bq）
1	Fe-59				1E+06
2	Co-58				1E+06
3	Co-57				1E+06
4	Fe-55				1E+06
5	Mn-54				1E+06
6	Cr-51				1E+03
7	V-49				/
8	Sc-46				1E+01
9	Ca-45				1E+04
10	Ar-37				1E+08

序号	核素	半衰期（d）	连续运行20年后的活度（Bq）	停止使用暂存1年后的活度（Bq）	GB 18871-2002 可申请豁免值（Bq）
11	S-35				1E+08
12	Be-7				1E+07
13	H-3				1E+09

表 3-16 射程调节器感生放射性活度

序号	核素	半衰期（d）	运行 20 年后的活度（Bq）	暂存 1 年后的活度（Bq）	GB 18871-2002 可申请豁免值（Bq）
1	Be-7				1E+07
2	H-3				1E+09

表 3-17 准直器中感生放射性活度

序号	核素	半衰期（d）	运行 20 年后的活度（Bq）	暂存 1 年后的活度（Bq）	GB 18871-2002 可申请豁免值（Bq）
1	Ni-63				1E+08
2	Co-60				1E+05
3	Co-58				1E+06
4	Co-57				1E+06
5	Fe-55				1E+06
6	Mn-54				1E+06
7	Cr-51				1E+07
8	V-49				/
9	Sc-46				1E+06
10	Ca-45				1E+04
11	Be-7				1E+07
12	H-3				1E+09

表 3-18 混凝土屏蔽墙中感生放射性活度

序号	核素	半衰期（d）	运行 20 年后的活度（Bq）	暂存 1 年后的活度（Bq）	GB 18871-2002 可申请豁免值（Bq）
1	Fe-59				1E+06
2	Mn-54				1E+06
3	V-49				/
4	Ca-45				1E+07
5	Ar-37				1E+08
6	S-35				1E+08
7	Na-22				1E+06
8	Be-7				1E+07
9	H-3				1E+09

表 3-19 机房底板下土壤感生放射性活度

序号	核素	半衰期（d）	运行 20 年后的活度（Bq）	暂存 1 年后的活度（Bq）	GB 18871-2002 可申请豁免值（Bq）
1	Fe-55				1E+06
2	Mn-54				1E+06
3	Na-22				1E+06
4	Be-7				1E+07
5	H-3				1E+09

从表中可以看到，加速器磁铁活化后活度较高的核素有 Fe-55、Mn-54、V-49 和 H-3 等；射程调节器中的活化核素活度较高的是核素 B-7 和 H-3；准直器中和活化核素活度相对较高，活化核素主要有 Ni-63、Co-60、Co-58、Co-57、Fe-55、Mn-54 和 H-3 等。治疗床和地下水中的活化核素由于其半衰期较短，1 年后已降至至可忽略水平，在上述表中未列出。

通过活化核素与 GB 18871-2002 中可申报豁免的核素活度值相比较，可以发

现质子治疗机房屏蔽墙和机房底板下土壤中感生放射性活度很低，均小于可申请豁免的活度值，因此质子治疗系统长时间运行对底板下部土壤的影响时可接受的。而对于加速器磁铁和准直器，暂存 1 年后其中的感生放射性核素 Co-57、Fe-55 依然高于豁免值，这些部件应作为放射性废物管理。

3.3.1.4 电磁辐射

质子治疗系统运行可能产生电磁辐射的区域主要有离子源系统、加速腔、高压电源等。

本项目质子治疗系统模型见图 3-25。从图中可以看到，整个加速器均位于金属外壳内，而电源机柜材质同样为金属。金属外壳能有效的屏蔽电磁辐射，且机房采用钢筋混凝土结构，因此电磁辐射不会对周围环境造成影响。

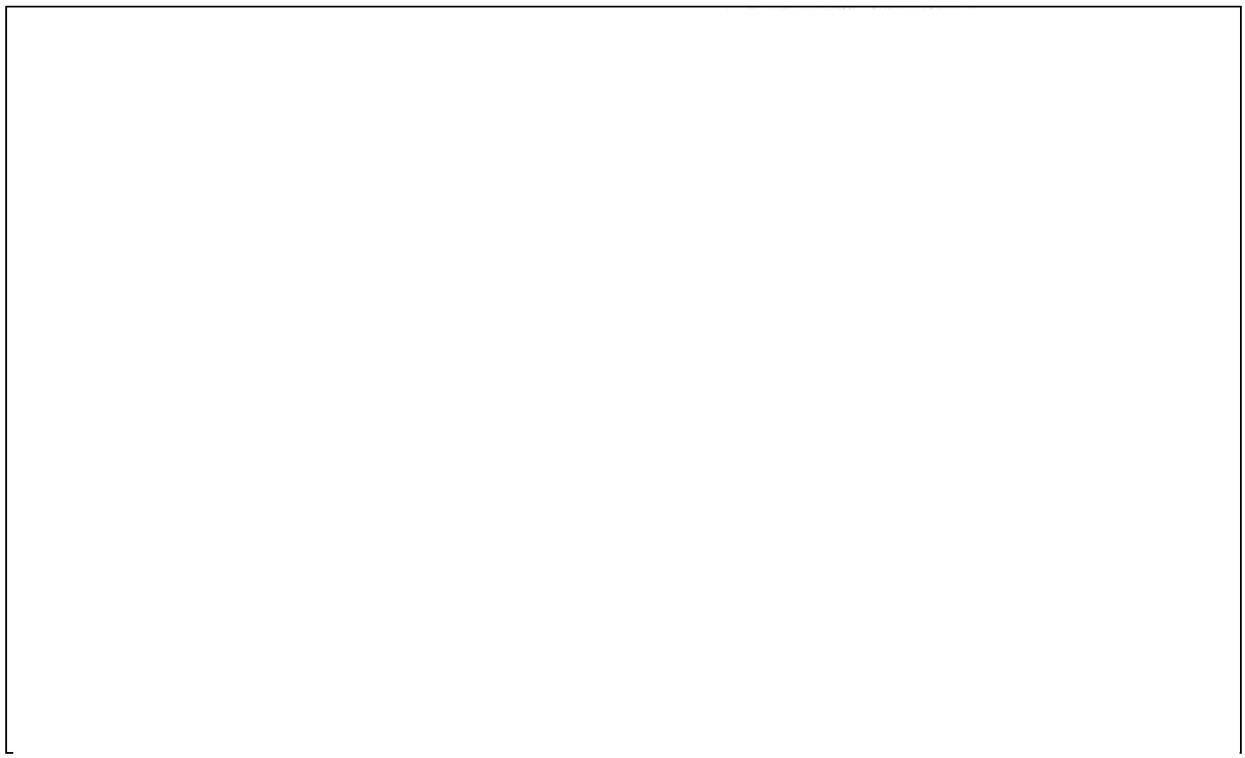

图 3-25 本项目质子治疗系统模型

3.3.1.5 噪声

本项目的噪声源位于地下一层设备底坑内的 1 台低温压缩机和 1 台（套）低温冷却系统（见附件 8），上述设备产生的噪声源（声功率级）分别不超过 63dB（A）和 50dB（A），声源距离机房外环境至少 5m 以上。本项目机房单侧混凝土屏蔽墙厚度至少 190cm，地上一层患者治疗机房混凝土底板厚度约 30cm，因

此本项目质子治疗机房的隔声效果较好。质子治疗机房距离四周医院边界的最近距离约 44m（北侧厂界），噪声随距离衰减效果显著。综合来看，通过建筑隔声和距离衰减，地下一层设备底坑内设备噪声源对厂界噪声贡献值可忽略。

3.3.1.6 臭氧

质子治疗系统输出的粒子束流和空气作用会产生臭氧，依据美国辐射防护委员会 NCRP 144 号报告，可以采用公式（3.3）估算臭氧的产生量。

$$N(t)=\frac{gI}{\alpha+kI+Q/V}\left[1-e^{-(\alpha+kI+Q/V)t}\right] \quad (3.3)$$

对长时间照射，t 趋于∞，上式推演为：

$$N=\frac{gI}{\alpha+kI+Q/V} \quad (3.4)$$

式中：N—单位体积内产生的臭氧分子数，m^{-3}；

I—单位体积单位时间直接致电离粒子（本项目考虑光子）在空气中的沉积能量，$eV\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}$；

g—单位能量产生的臭氧分子数，

α—臭氧分子的分解速率，　　；

k—单位能量和单位体积被破坏的臭氧分子数量，　　；

Q—为排气速率，$m^3\cdot s^{-1}$；

V—质子治疗机房屏蔽体体积，m^3。

采用 FLUKA 程序对光子在空气中的能量沉积进行计算，计算结果：质子治疗系统在最大工况（230MeV）运行条件下，机房中光子的能量沉积为　　机房内空气中产生的臭氧分子数为　　，臭氧浓度为　　计算结果远远低于《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）中工作场所臭氧最高容许浓度（MAC）0.30mg/m^3。

查询文献 NCRP 51 号报告和 NCRP 144 号技术报告，上述技术文件中描述的臭氧问题都是针对电子加速器和大型正负电子对撞机，并未提到质子治疗系统臭氧对环境的影响问题。

从数模计算和文献查询两个方面综合考虑，本项目质子治疗系统臭氧的产生量和产生浓度均很小，可以不考虑其作为环境污染因子。

3.3.2 Ⅱ、Ⅲ类射线装置

3.3.2.1 X 射线

射波刀在治疗过程中，会产生最大能量为 6MV 的 X 射线，等中心处 X 射线最高输出剂量率为 100cGy/min；Vital Beam 型医用直线加速器在治疗过程中，会产生最大能量为 6、10MV 的 X 射线，等中心处 X 射线最高输出剂量率为 600cGy/min；Halcyon 型医用直线加速器在治疗过程中，会产生最大能量为 6MV 的 X 射线，等中心处 X 射线最高输出剂量率为 800cGy/min。由于 X 射线的贯穿能力极强，将对工作人员、公众及周围环境辐射造成辐射污染。

模拟定位机在工作状态下会发出 X 射线，拟配置的 1 台 CT 模拟定位机最大管电压为 140kV、最大管电流为 800mA，质子治疗系统配套使用 2 台定位用 X 射线装置（包括 1 台 CT 模拟定位机和 1 台 X 射线模拟定位机），最大管电压≤150kV、最大管电流≤1000mA，产生的 X 射线会对患者和医务人员有一定的附加辐射剂量。

3.3.2.2 电子束

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

本项目拟搬迁的 Vital Beam 型医用直线加速器电子线最大能量为 16MeV，1m 处电子线最高输出剂量率为 1000cGy/min。医用直线加速器在运行时产生的高能电子束，因其贯穿能力远弱于 X 射线，在 X 射线得到充分屏蔽的条件下，

电子束亦能得到足够的屏蔽。因此，在医用直线加速器电子束治疗时间时，电子线对周围环境辐射影响小于 X 射线治疗，可忽略对外环境的影响。

3.3.3 后装机（III类放射源）

后装机未使用时，放射源处于屏蔽位，少量的γ射线会穿透屏蔽体，对进入机房的人员及室外公众等产生照射。

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

本项目 KL-HDR-C 型后装机内配备有 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 3.70E+11Bq，^{192}Ir 放射源特性见表 3-20，衰变纲图见图 3-26。

表 3-20 ^{192}Ir 放射性核素特性

核素名称	半衰期	衰变类型及分支比（%）	主要α、β辐射能量（keV）与绝对强度（%）	主要γ、X 射线能量（keV）与绝对强度（%）	空气比释动能率常数（Gy·m2·Bq^{-1}·h^{-1}）
^{192}Ir	74.0d	β$^-$（95.13） ε（4.87）	538.3（41.43） 675.1（48.0） 258.7（5.6）	316.5（82.75） 468.1（47.81） 308.5（29.68） 296.0（28.72） 604.4（8.2）	1.11E-13

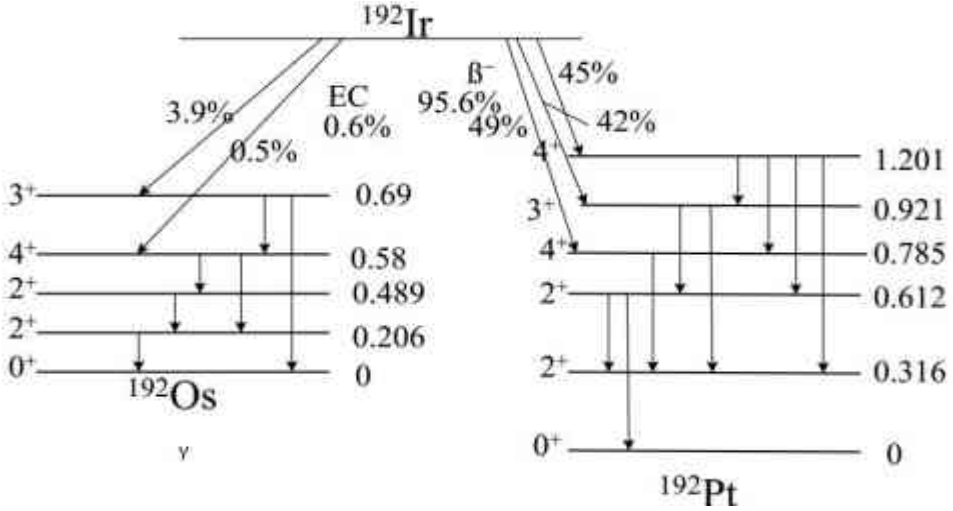

图 3-26 ^{192}Ir 衰变纲图

3.4废弃物

3.4.1 废气

放射性废气来源于质子治疗系统出束期间，初级粒子或次级粒子与空气相互作用产生放射性气体。

气体放射性主要通过热中子俘获、（n，2n）、（γ，n）反应和散裂反应而产生。产生的核素主要包括 H-3、Be-7、C-11、N-13、O-14、O-15 和 Ar-41，对人体的危害途径主要为气体浸没外照射和吸入内照射。除了 H-3 和 Be-7 半衰期较长外，其他核素半衰期都很短，机房内保持通风换气，活化核素不会长期累积；且空气中活化核素的毒性较小，对进入治疗机房工作的人员和周围公众影响较小。

射波刀、医用直线加速器、模拟定位机在工作状态下发射的 X 射线，后装机出源过程中发射的γ射线，会使机房内的空气产生电离，产生臭氧和氮氧化物，少量臭氧和氮氧化物可通过排风管排出机房，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

3.4.2 废水

质子治疗系统的放射性废液主要是被活化的冷却水。本项目所用冷却水为去离子水，由医院外购。去离子水在设备中循环使用，正常运行期间冷却水闭路循环不排放。系统长时间运行后因水质下降需要更换这部分去离子水，更换时活化冷却水（约 0.16m^3）一次性排入活化水暂存池。冷却水系统运行期间，如系统发生漏水或出现异常运行情况，可将冷却水（约 0.32m^3）排至应急水池。整个冷却水系统（包括三个回路）排放量约 0.48t。

活化水暂存池和应急水池中的水，排放前委托有资质单位进行检测，低于豁免水平后可作为普通废水排放。废水中活化核素主要是 H-3 和 Be-7，其他核素活度因半衰期很短已降至可忽略水平。

3.4.3 固体废物

质子治疗系统运行、维修过程中产生的放射性固体废物主要为废活化元器件、

废冷却水过滤滤芯及离子交换树脂等，产生量约 200kg/年。统一收集后存放至活化物暂存间中。

固体废物中活化核素包括了元器件活化、衰变后产生的短半衰期核素，如 Na-22、Fe-55、Mn-54、Co-60 等，还有来自滤芯和离子交换树脂中吸附的冷却水中活化核素 H-3、Be-7 等，固体废物在活化物暂存间中存放一段时间后，大多数核素活度已降至较低的水平。

（1）活化部件

质子治疗系统定期维护保养、维修过程中更换部分部件（磁铁、射程调节器），每年估计约 180kg（0.1m^3），这部分元器件不能再利用而成为放射性固体废物。

（2）冷却水过滤滤芯和离子交换树脂

闭式循环水净化系统过滤冷却水运行过程中，会产生含放射性核素的过滤器滤芯和离子交换树脂等。滤芯和离子交换树脂不能重复利用，每年消耗量不超过 15kg，因吸收了冷却水中活化的核素作为放射性废物。废树脂同时也属于危险废物，编号为 HW13 的有机树脂类废物，编号 900-015-13，医院拟委托有相应资质的单位处置。

（3）易耗品

易耗品主要包括调试和维修所用的口罩、手套、抹布等，该类物品的产生量根据调试维修的工作量而变化，每年产生约 5kg，放射性水平较低。表 3-21 为质子治疗系统运行过程中各类放射性固体废物的来源、数量、主要核素等情况。

表 3-21 放射性固体废物源项一览表

放射性固体废物	来源	数量	主要核素
废活化元器			
口罩、手套、抹布等耗材			
废滤芯及离子交换树脂（危险固废）			

放射性固体废物	来源	数量	主要核素
总计		约 200kg	/

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

4 辐射安全与防护设施

4.1场所布局与屏蔽

本项目拟建质子中心，为一栋地上主体 2 层，局部地下 1 层的单体建筑，为连云港市第一人民医院开发区院区配套工程，位于连云港市第一人民医院开发区院区北侧。其中地下一层为质子治疗机房的设备底坑，地上一层为患者治疗用房（包括质子治疗机房的患者治疗机房、射波刀机房、医用直线加速器机房、后装治疗机房和 CT 模拟定位机房等），二层为医护办公用房，并配套采购相关设备，配建道路绿化、停车场、雨污水、供电、供水及围墙等附属工程。质子中心平面布置情况见图 4-1。

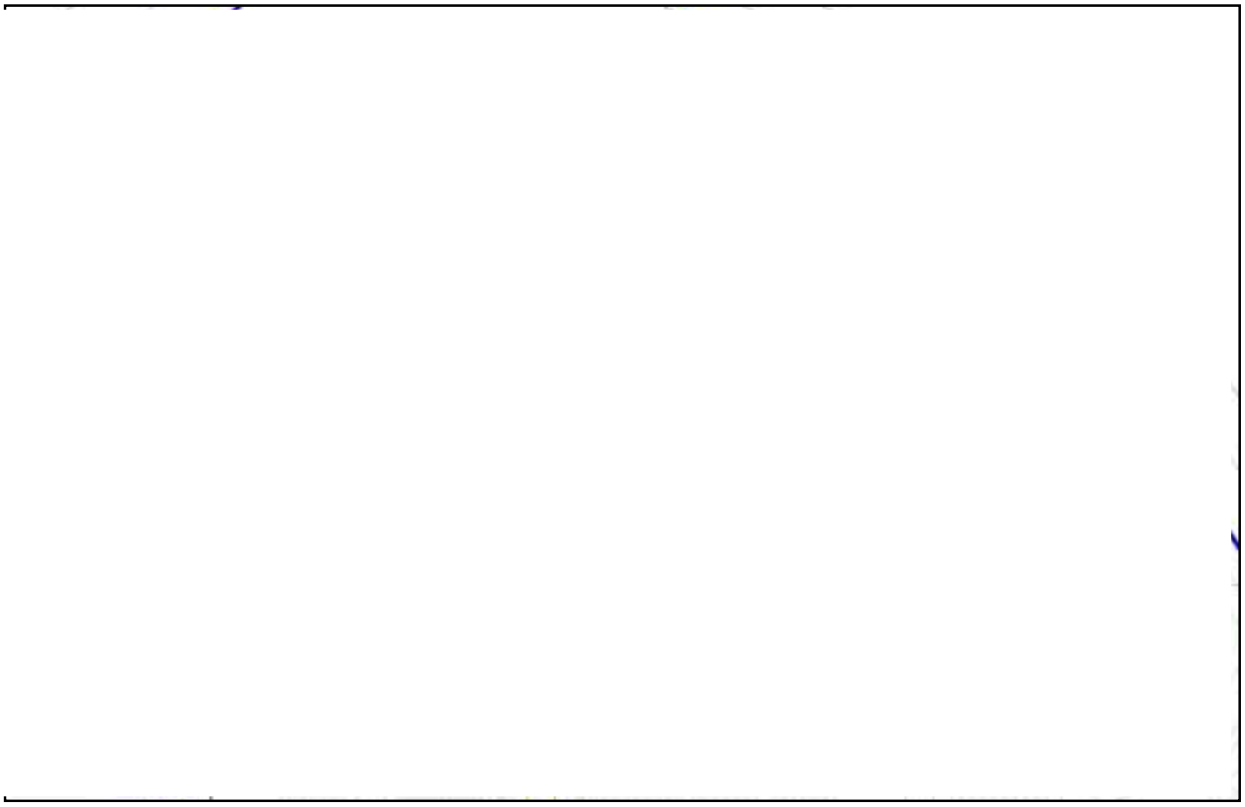

图 4-1 质子中心平面布置图

4.1.1 质子治疗系统

4.1.1.1 场所布局与分区

本项目质子治疗机房位于位于质子中心的地下一层、地上一层和地上二层东北角。质子治疗机房屏蔽体南北长 14.22m，东西长 17.00m，屋顶标高 9.03m。

质子治疗机房屏蔽体内上下共三层，地下一层为设备底坑（安装质子治疗系统主设备），地上一层为患者治疗机房（用于患者治疗、候诊和辐射工作人员操作），地上二层为维修平台，三个楼层的机房相互贯通，但人员无法在屏蔽体内跨越各层。进入相应楼层的机房时，需从屏蔽体外的楼梯上下，再通过各层防护门进出。地下一层设备底坑东侧、北侧均为土层，南侧为隔离变压器室、工艺冷却水设备间、楼梯间、活化物暂存间和强电间等，西侧为活化水暂存池和走廊；地上一层患者治疗机房东侧、北侧均为院内绿化，南侧为控制室、设备间、UPS 室和楼梯间等，西侧为院内绿化和走廊；地上二层维修平台东侧、北侧临空，南侧为备件间、CT 设备间、补风机房、楼梯间、库房和气体间等，西侧为楼梯间，屋面不上人。

本项目质子治疗机房位于建筑物底部，周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中关于选址与布局的规定。

医院对质子治疗机房辐射工作场所进行分区管理，设置控制区和监督区，具体见图 4-2~图 4-4。

为加强辐射防护管理和职业照射控制，本项目拟将三个楼层的屏蔽体（设备底坑、患者治疗机房及维修平台）作为辐射防护控制区，在设备开机时禁止任何人员进入，并在各楼层入口处设置电离辐射警告标志，控制区内设置视频监控；拟将地下一层的活化水暂存池、活化物暂存间也作为控制区，设置双人双锁；拟将与质子治疗机房相邻的隔离变压器室、工艺冷却水设备间、控制室、设备间、UPS 室、备件间、CT 设备间、补风机房、维修平台防护门外楼梯间及东南侧楼梯间作为辐射防护监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌，监督区边界安装门禁，经授权的辐射工作人员才能进入。

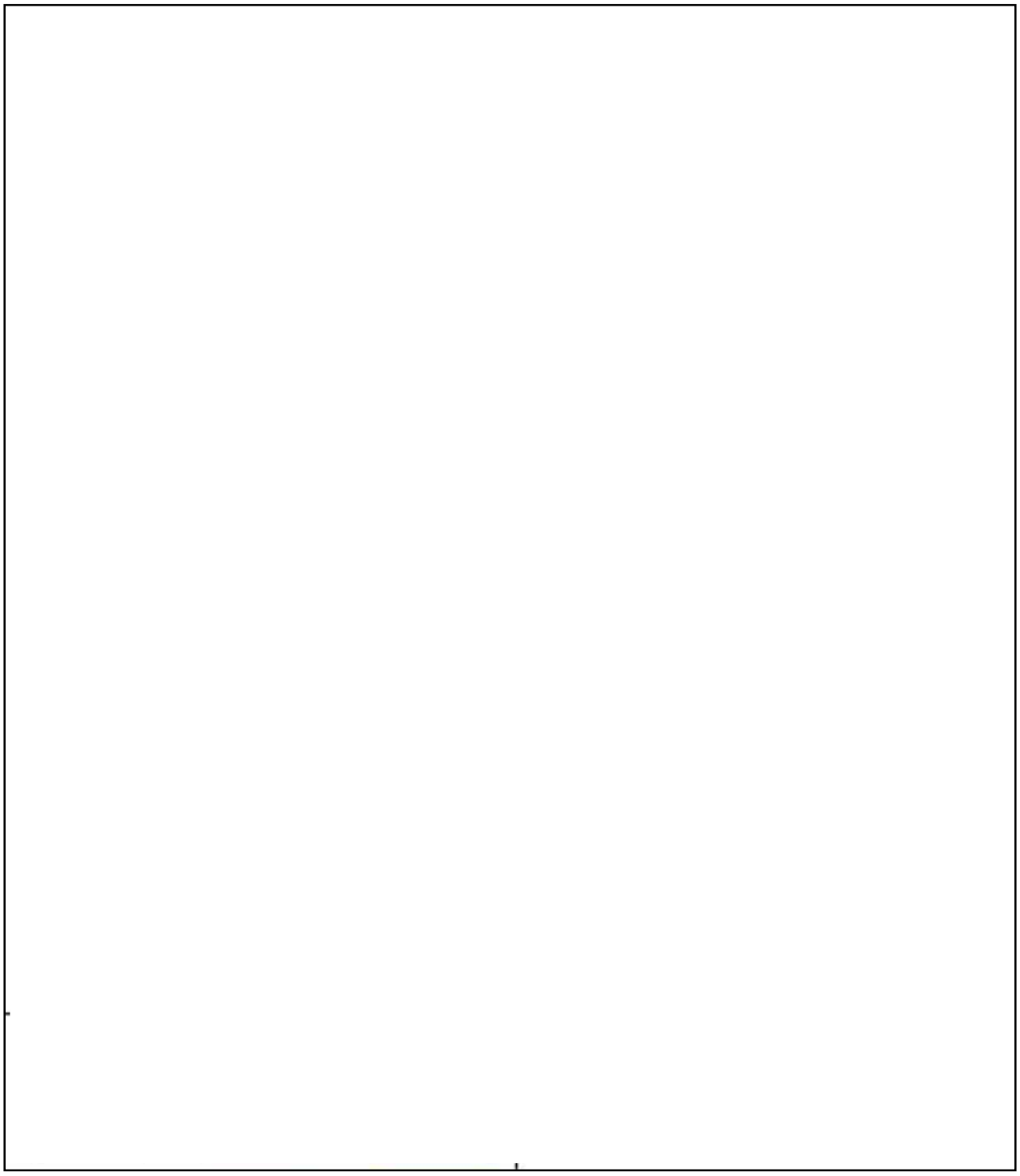

图 4-2 质子中心辐射工作场所分区（地下一层）

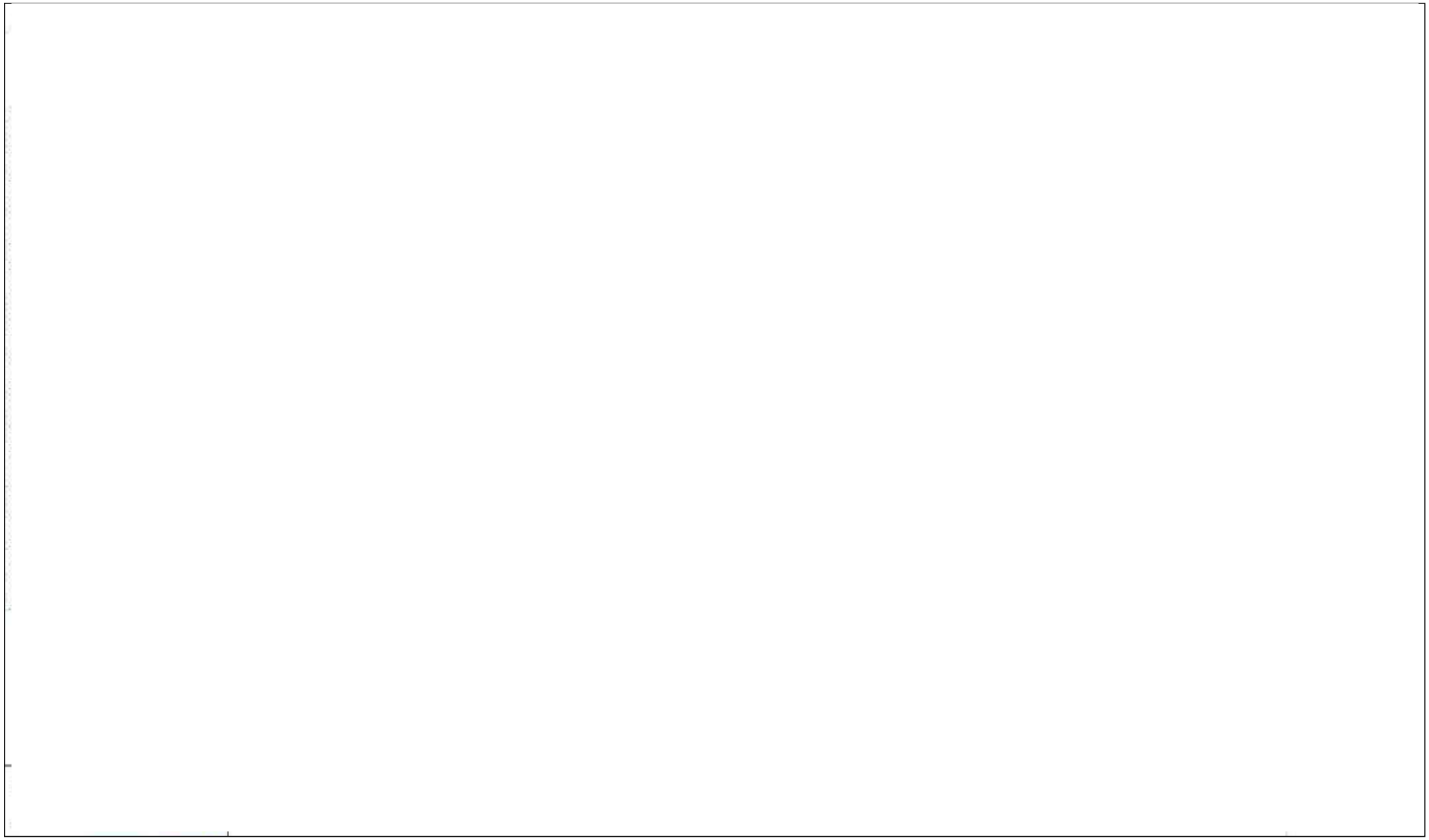

图 4-3 质子中心辐射工作场所分区（地上一层）



图 4-4 质子中心辐射工作场所分区（地上二层）

4.1.1.2 屏蔽设计

本项目质子治疗机房的三层建筑为整体浇筑的混凝土屏蔽体，每个楼层的屏蔽厚度基本一致。质子治疗系统出束时主射线可以朝向东侧屏蔽墙、底部及顶部，其他方向为漏射线和散射线。东墙为 340cm 混凝土（混凝土密度 2.35g/cm^3，下同），南侧迷道内墙为 125cm 混凝土、迷道外墙为 100cm 混凝土，西墙为 250cm 混凝土，北墙为 190cm 混凝土，屋顶为 350cm 混凝土。

质子治疗机房各楼层均设计了迷道，主射线方向不朝向迷道。地下一层迷道内墙中部设置有 1 扇维修门供检修人员进出，维修门外设置 3cm 厚铁门。各楼层出入口均设置了防护门，地下一层设备底坑、地上一层患者治疗机房防护门均为 15cm 含硼聚乙烯+0.4cm 不锈钢，地上二层维修平台防护门为 7cm 含硼聚乙烯+0.4cm 不锈钢。

为尽量降低射线在防护门及门缝处泄漏，三个楼层的机房入口处防护门、地下一层迷道内墙中部维修门均采用单扇电动平移门，与左右两侧墙体的重叠宽度为 15cm，上下墙体的重叠宽度为 10cm，门缝缝隙不大于 1cm。

质子治疗机房屏蔽设计参数见表 4-1，各楼层屏蔽设计示意图见图 4-5。质子治疗机房效果图见图 4-6。

表 4-1 质子治疗机房屏蔽设计参数一览表

场所名称		位置	屏蔽设计（厚度及材质）
质子治疗机房	设备底坑	东墙	
		南侧迷道内墙	
		南侧迷道外墙	
		西墙	
		北墙	
		顶部	
		底部	

场所名称		位置	屏蔽设计（厚度及材质）
		迷道内墙中部维修门	
		迷道外口防护门	
	患者治疗机房	东墙	
		南侧迷道内墙	
		南侧迷道外墙	
		西墙	
		北墙	
		顶部	
		底部	
		迷道外口防护门	
	维修平台	东墙	
		南侧迷道内墙	
		南侧迷道外墙	
		西墙	
		北墙	
		顶部	
		底部	
		迷道外口防护门	
	X 射线影像亭	东墙	
		南、西、北墙	
		南侧防护门	
		西北侧观察窗	

场所名称		位置	屏蔽设计（厚度及材质）
		顶部	
		底部	
活化水暂存池		东墙	
		南、西、北墙	
		顶部	
		底部	
活化物暂存间		东、南墙	
		西、北墙	
		顶部	
		底部	
		防护门	



图 4-5 质子治疗机房（地下一层至地上二层）屏蔽设计示意图

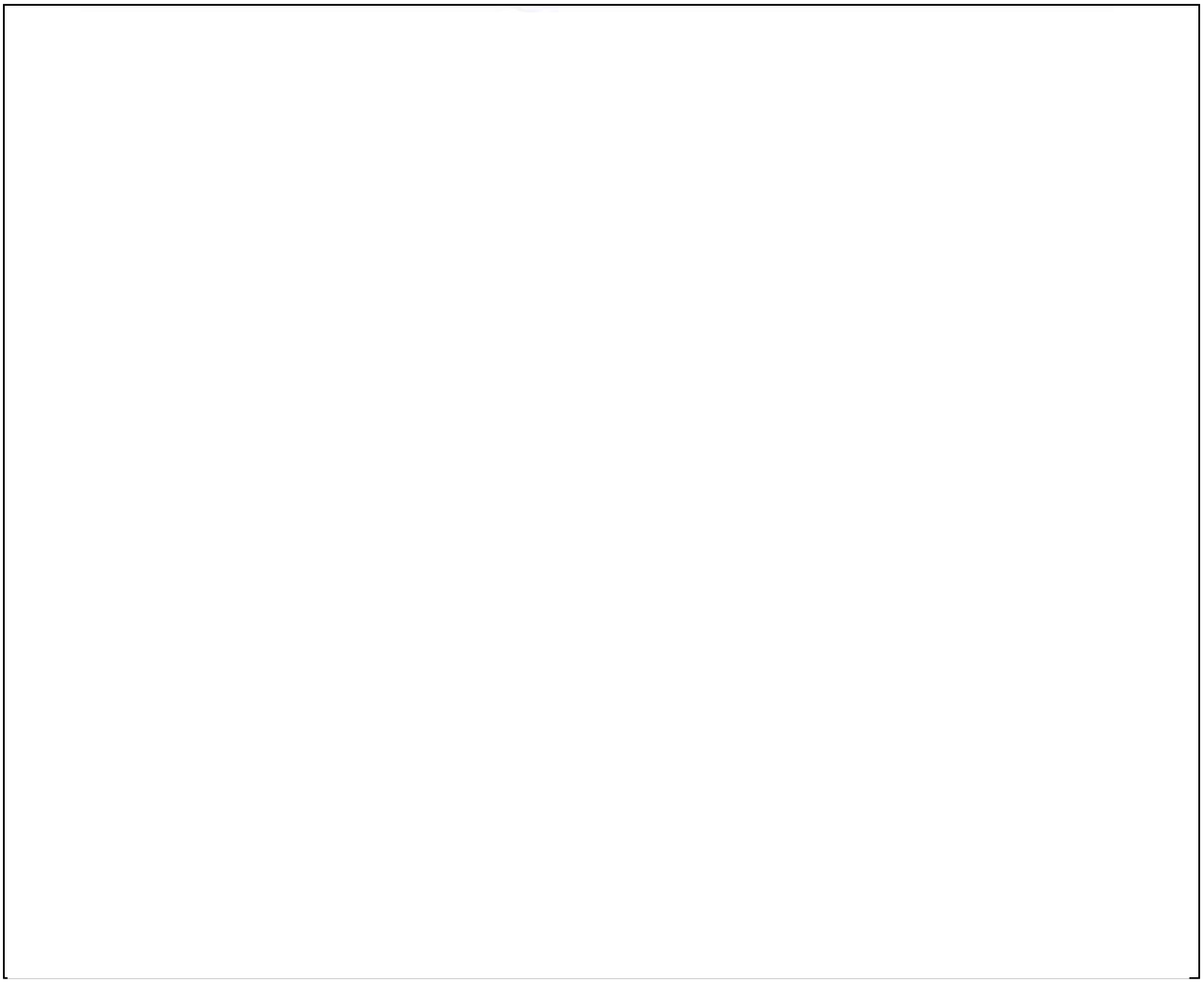

图 4-6 质子治疗机房效果图

（3）穿墙管道设计

本项目通风管道均穿过防护门上方的屏蔽墙进出机房，拟采用“Z”型或斜穿屏蔽墙，电缆穿墙方式拟采用“U”型穿墙管道，其余空调冷媒套管、工艺冷却水套管等预留套管均拟采用 45°斜穿近防护门侧迷道外墙的穿墙方式，未采取其他屏蔽补偿措施，见图 4-5。

（4）出入口迷道设计

本项目设置迷道，通过多次散射降低出入口处的辐射剂量率。机房最终的束流引出方向均不朝向迷道内口，可以有效使束流产生的辐射到达防护门口的路径至少多经历一次散射。通过数模计算，质子治疗系统出束时防护门外辐射剂量率均能低于 2.5μSv/h。

4.1.2 II类射线装置

4.1.2.1 场所布局与分区

本项目1座射波刀机房、2座医用直线加速器机房均位于质子中心地上一层北部，位于建筑物底部的一端，周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中关于选址的规定。

射波刀机房位于质子治疗机房的西侧，拟于射波刀机房内配备1台M6 FM型射波刀（X射线最高能量为6 MV），用于肿瘤的放射治疗。射波刀机房东侧、北侧均为院内绿化，南侧为控制室、设备间和走廊，西侧为2#医用直线加速器机房，下方为土层，上方无建筑。

2座医用直线加速器机房（由西向东依次为1#、2#医用直线加速器机房）位于射波刀机房的西侧，于1#医用直线加速器机房配备1台瓦里安Vital Beam型医用直线加速器（X射线能量：6、10MV），于2#医用直线加速器机房内配备1台Halcyon型医用直线加速器（X射线能量：6MV），用于肿瘤的放射治疗。1#、2#医用直线加速器机房东侧为射波刀机房，南侧为控制室、设备间和走廊，西侧为1#医用直线加速器机房，北侧为院内绿化，下方为土层，上方无建筑。

射波刀机房控制室与治疗室分离，治疗室东西长6.80m、南北长8.10m、净面积为55.08m^2（不含迷道），机房顶部屏蔽内表面至地面约4.40m（装饰面层下机房高3.00m），设置有直迷道，迷道横宽2.00m，迷道内口宽2.00m，迷道口设有防护门；2座医用直线加速器机房控制室与治疗室分离，1#医用直线加速器机房治疗室东西长8.00m（东侧、西侧主屏蔽区墙的内表面距离）、南北长8.00m、净面积为69.04m^2（不含迷道），机房顶部屏蔽内表面至地面约3.90m（装饰面层下机房高3.00m），设置有“L”型迷道，迷道横宽2.20m，迷道内口宽2.90m，迷道口设有防护门，有用线束仅向东墙、西墙、地面及屋顶照射；2#医用直线加速器机房治疗室东西长8.00m（东侧、西侧主屏蔽区墙的内表面距离）、南北长8.00m、净面积为69.08m^2（不含迷道），机房顶部屏蔽内表面至地面约3.90m（装饰面层下机房高3.00m），设置有“L”型迷道，迷道横宽2.20m，迷道内口宽

2.20m，迷道口设有防护门。射波刀机房、医用直线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/T 201.1-2007）中“治疗装置控制室应与治疗机房分离”的规定及《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中“放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需求”、“治疗机房均应设置迷道”等规定，本项目射波刀机房、医用直线加速器机房布局合理。

为加强辐射防护管理和职业照射控制，本项目拟将屏蔽产生射线的射波刀机房、医用直线加速器机房治疗室作为辐射防护控制区，严格控制人员进出，并在治疗室入口处设置电离辐射警告标志；拟将控制室和设备间作为辐射防护监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌，分区示意图见图 4-3。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定要求。

4.1.2.2 屏蔽设计

本项目 1 座射波刀机房、2 座医用直线加速器机房均位于质子中心地上一层北部，采用混凝土浇筑结构，迷道入口设铅防护门。具体屏蔽设计参数见表 4-2，屏蔽设计示意图见图 4-7。

表 4-2 射波刀机房、医用直线加速器机房屏蔽设计参数一览表

场所名称	位置		屏蔽设计（厚度及材质）
射波刀机房	东墙	迷道内墙	
		迷道外墙	
	南墙		
	西墙	主屏蔽区	
		次屏蔽区	
	北墙		
	顶部		

场所名称	位置		屏蔽设计（厚度及材质）
	底部		
	迷道外口防护门		
1#医用直线加速器机房	东墙	主屏蔽区	
		次屏蔽区	
	南墙	迷道内墙	
		迷道外墙	
	西墙	主屏蔽区	
		次屏蔽区	
	北墙		
	顶部	主屏蔽区	
		次屏蔽区	
	底部		
	迷道外口防护门		
2#医用直线加速器机房	东墙	主屏蔽区	
		次屏蔽区	
	南墙	迷道内墙	
		迷道外墙	
	西墙	主屏蔽区	
		次屏蔽区	
	北墙		
	顶部	主屏蔽区	
		次屏蔽区	
	底部		

场所名称	位置	屏蔽设计（厚度及材质）
	迷道外口防护门	

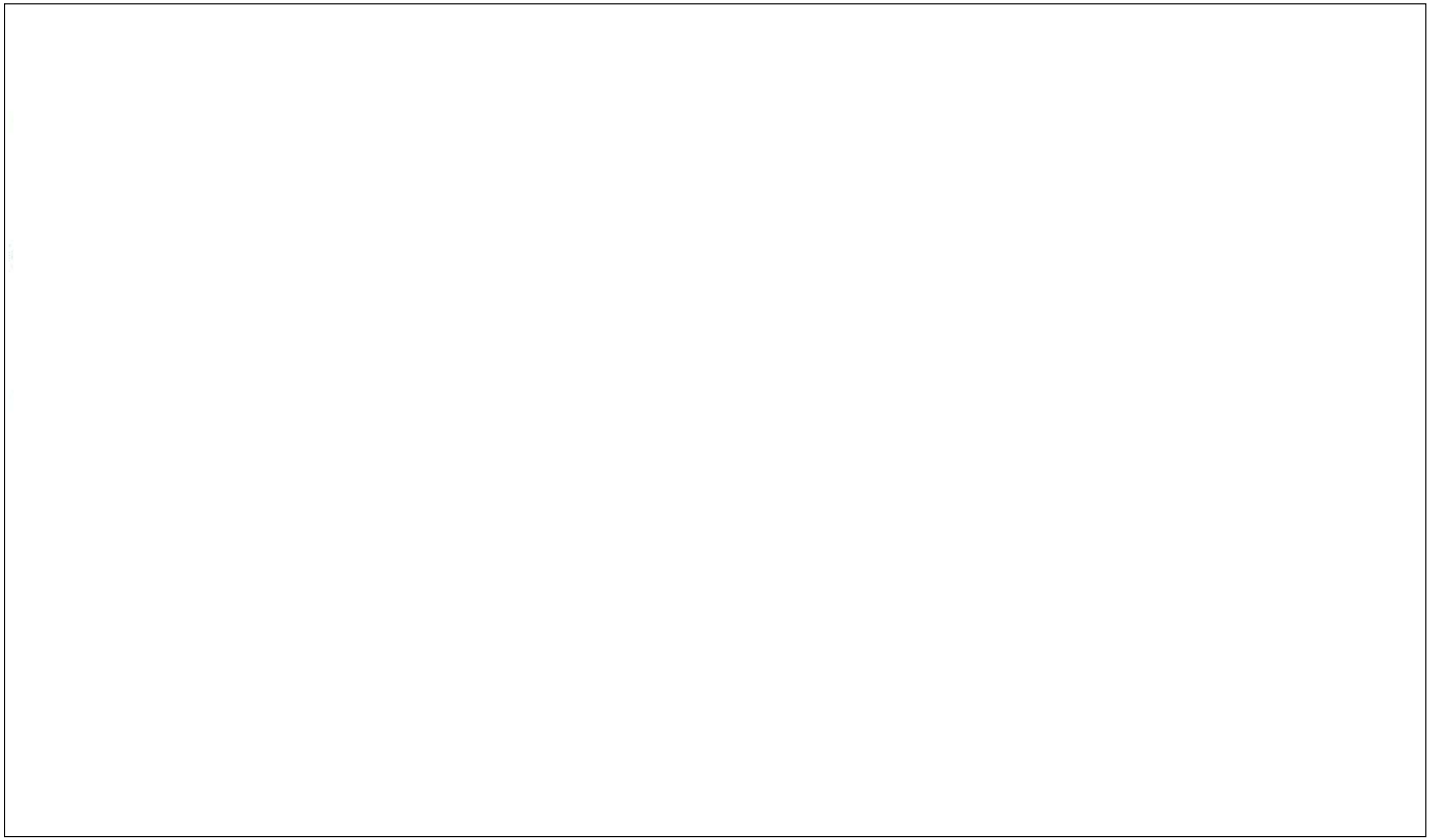

图 4-7 射波刀机房、医用直线加速器机房屏蔽设计示意图

4.1.3 后装机（III类放射源）

4.1.3.1 场所布局与分区

本项目后装治疗机房位于质子中心地上一层西北角，位于建筑物底部的一端，周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中关于选址的规定。

后装治疗机房位于1#医用直线加速器机房的西侧，拟于后装治疗机房内配备1台KL-HDR-C型后装机（内含1枚^{192}Ir放射源，单枚最大装源活度为3.70E+11Bq），用于肿瘤的放射治疗。后装治疗机房东侧为1#医用直线加速器机房，南侧为控制室、妇检冲洗间和走廊，西侧为柴油发电机房，北侧为变配电间，下方为土层，上方无建筑。

后装治疗机房控制室与治疗室分离，治疗室东西长5.20m、南北长6.00m、净面积为31.20m^2（不含迷道），机房顶部屏蔽内表面至地面约4.75m（装饰面层下机房高3.00m），设置有直迷道，迷道横宽1.60m，迷道内口宽1.60m，迷道口设有防护门。后装治疗机房布局符合《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第1部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）中“治疗装置控制室应与治疗机房分离”的规定及《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中“放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需求”、“治疗机房均应设置迷道”等规定，本项目后装治疗机房布局合理。

为加强辐射防护管理和职业照射控制，本项目拟将后装治疗机房治疗室作为辐射防护控制区，严格控制人员进出，并在治疗室入口处设置电离辐射警告标志；拟将控制室和妇检冲洗间作为辐射防护监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌，分区示意图见图4-3。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定要求。

4.1.3.2 屏蔽设计

本项目后装治疗机房位于质子中心地上一层西北角，采用混凝土浇筑结构，迷道入口设铅防护门。具体屏蔽设计参数见表 4-3，屏蔽设计示意图见图 4-8。

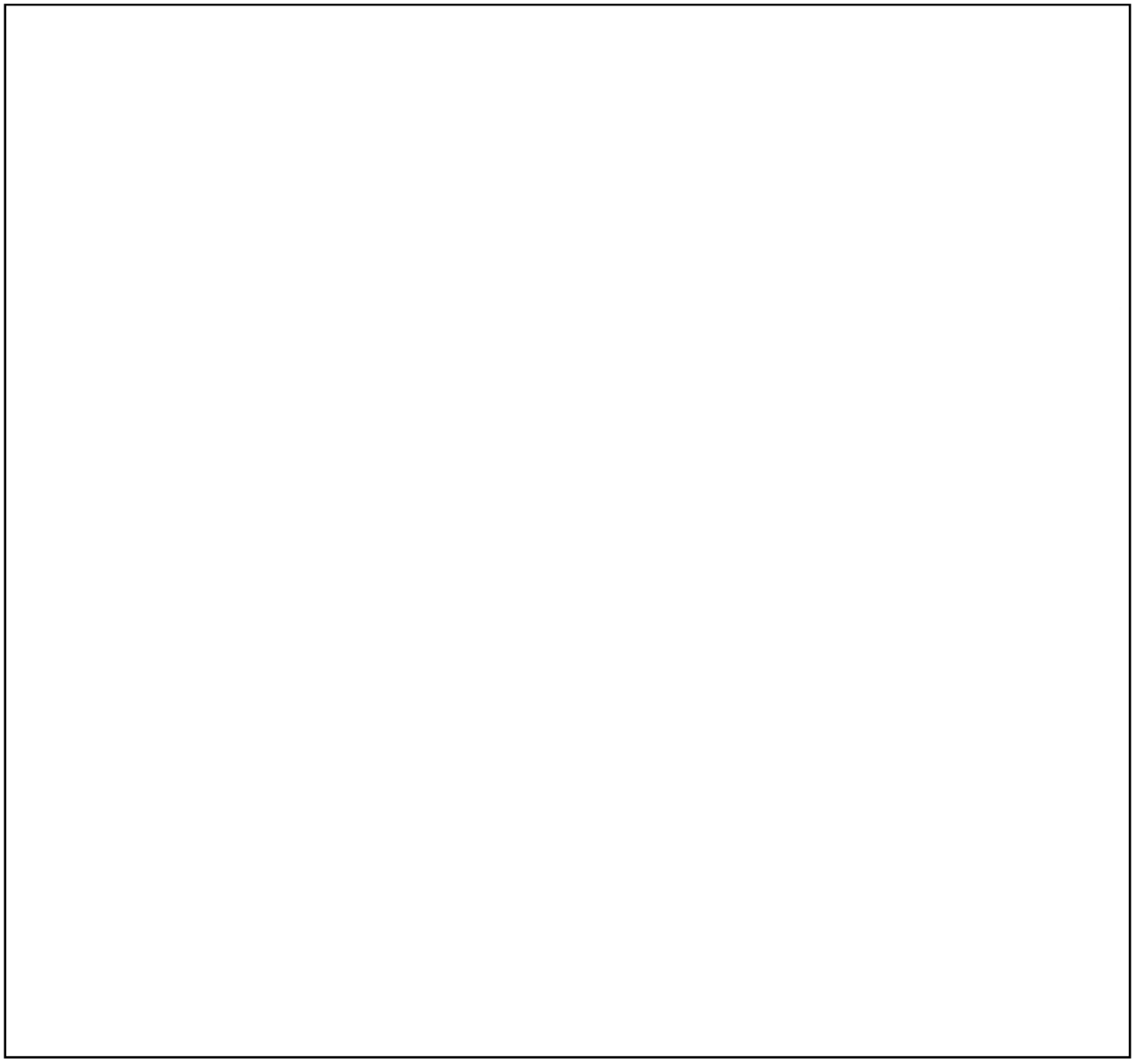

图 4-8 后装治疗机房屏蔽设计示意图

表 4-3 后装治疗机房屏蔽设计参数一览表

场所名称	位置		屏蔽设计（厚度及材质）
后装治疗机房	东墙		
	南墙		
	西墙	迷道内墙	
		迷道外墙	

场所名称	位置	屏蔽设计（厚度及材质）
	北墙	
	顶部	
	底部	
	迷道外口防护门	

4.1.4 III类射线装置

4.1.4.1 场所布局与分区

本项目CT模拟定位机房位于质子中心地上一层南部，拟于CT模拟定位机房内配备1台SOMATOM Confidence型CT模拟定位机，用于模拟定位。CT模拟定位机房东侧为准备间和设备间，南侧为走廊，西侧为控制室和准备间，北侧为走廊，下方为土层，上方为多谋体会议室。CT模拟定位机房控制室与诊断机房分开单独布置，区域划分明确，项目布局合理。

CT模拟定位机房控制室与诊断机房分离，诊断机房东西长7.52m、南北长7.20m、净面积为54.14m^2。本项目CT模拟定位机房的有效使用面积、最小单边长度均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中CT机房的相关要求，即：最小单边长度不少于4.5m，有效使用面积不少于30m^2。CT模拟定位机房的布局符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中“每台固定使用的X射线设备应设有单独的机房”的规定，本项目CT模拟定位机房布局合理。

为加强辐射防护管理和职业照射控制，本项目拟将CT模拟定位机所在机房作为辐射防护控制区，在机房入口处粘贴有电离辐射警告标志；与机房相邻的控制室、准备间和设备间划为监督区，在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌，分区示意图见图4-3。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定。

4.1.4.2 屏蔽设计

本项目CT模拟定位机房位于质子中心地上一层南部，具体屏蔽设计参数见

表 4-4。

表 4-4 CT 模拟定位机房屏蔽设计参数一览表

场所名称	位置	屏蔽设计（厚度及材质）
CT 模拟定位机房	四侧墙体	
	顶部	
	底部	
	防护门	
	铅玻璃窗	

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

4.2辐射安全与防护措施

4.2.1 质子治疗系统

4.2.1.1 系统安全联锁设计

（1）安全联锁设计原则

安全联锁系统的设计，用于保护辐射工作人员的人身安全，避免质子治疗系统开机出束时人员受到意外照射。安全联锁的设计主要遵循以下原则：

①简单可靠：系统设计应在简洁基础上保证运行可靠性及稳定性。

②最优切断：当质子治疗系统处于“准备”或“运行”状态时，安全联锁系统在中央控制系统联锁逻辑中具有最优先的权力切断质子治疗系统束流。

③失效保护：当安全联锁系统关键设备失效时，系统有相应的应急保护措施来保障工作人员的人身安全。

④冗余：系统关键设备要采取冗余设计，以保障系统的可靠性、减少系统故障时间并预留有进一步改进的余地。

⑤纵深防护：在设计系统时要充分考虑并合理安排辐射安全设施设备的联锁

逻辑，实现对工作人员人身安全的交叉纵深防护。

⑥自我巡检：系统能对所属联锁设备的工作状态进行巡检，并能将巡检结果实时显示，如在巡检过程中发现设备工作异常则生成报警事件并通知工作人员进行处理；

⑦以人为本：安全联锁系统是在保障工作人员人身安全的基础上兼顾加速器的运行安全，此外系统要具备人性化的特点——联锁逻辑简洁合理、操作简单、维护方便、人机交互性好。

（2）安全联锁设计

安全联锁系统由逻辑控制系统、钥匙开关、急停按钮、清场巡检系统、剂量联锁、声光报警、工作状态指示灯、门-机联锁、紧急开门装置、光电联锁等设备等构成。逻辑控制系统实现对这些系统信号和设备的联锁控制，保障人员在控制区时加速器无法开机。

具体的安全联锁设计如下，安全设施布设示意图见图 4-9 至图 4-11。

①急停按钮：每个楼层机房内、迷道、治疗床和操作台上设置急停按钮。按下急停按钮后质子治疗系统立即停止出束。任何一处急停被触发，质子治疗系统都无法运行。急停按钮处设置有醒目标识及文字显示能让人员从各个方向均能观察到且便于触发。急停按钮不会自动复位，需要工作人员现场检查、复位后才能再次开机。

②清场巡检系统：每个楼层机房内根据人员清场检查和巡逻路线设置巡检开关。辐射工作人员在每次开机前需要根据规定的路线依次触发开关，确认机房内没有人员滞留后，退出机房，关闭防护门，完成清场流程，才能开启质子治疗系统。控制台显示终端界面处显示“已清场”状态。对于完成清场后一直保持“已清场”状态的机房，在下次出束前不用再进行清场巡检。防护门打开后，相应楼层的巡检开关被复位，需重新触发后才能开机。如整个区域的清场超出时限（本项目清场巡检的最长相应时间为 2min），则本次清场失效，辐射工作人员必须重新进行清场巡检。

巡检路径从机房内部至机房外口，再至迷道依次按下。未按规定的次序巡检，则设备也不能出束。

③门-机联锁：质子治疗机房的防护门与质子治疗系统束流联锁，防护门未完全关闭时不能出束照射。在设备开机状态突然打开防护门，则质子治疗系统立即停止出束。单个患者治疗后，各防护门设置了延时 10min 进入的安全联锁，该功能通过质子治疗系统程序控制，延时的目的是使得通过通风和时间衰减，降低机房内的感生放射性。根据 5.2.1.1.5 节计算结果，质子治疗系统停机后 10min 后，出束机头周围 50cm 处剂量率已从停机后 1min 的 29.52μSv/h，降至 14.52μSv/h。

④剂量联锁：在地上一层患者治疗机房的迷道内口设置剂量探头，包括中子和γ剂量率探测器，并有异常情况下报警功能，辐射剂量率测量结果实时显示在控制台上，当剂量率高于预设阈值时，质子治疗系统处于运行状态，各防护门不能从外面打开，只能通过迷道入口内侧紧急开门装置打开（此时触发急停）或停机后打开防护门。

⑤紧急开门装置：在迷道入口内侧设置有紧急开门装置，防护门设有防夹伤功能。若有人员滞留在机房内，可通过紧急开门装置打开防护门。在设备控制台上也装有紧急开门装置，控制台上的紧急开门装置必须在质子治疗系统停机后方可按动。

⑥钥匙开关：地上一层患者治疗机房南侧控制室内操作台上设置钥匙开关，钥匙由专人保管，只有插入钥匙后质子治疗系统才能开机使用。关机后辐射工作人员拔出钥匙，避免未授权的人员开机运行。

⑦工作状态指示灯：每个楼层机房防护门上方均设置工作状态指示灯，并与质子治疗系统供束联锁，绿灯表示可以进入，黄灯表示待机状态，红灯表示装置正在出束运行。

⑧声光报警：每个楼层机房入口处设置电离辐射警告标志。每个楼层机房门口和机房内均安装声光报警。在质子治疗系统开启出束前，黄灯亮起并伴随警报声（预备信号）提醒控制区内的人员撤离，预备信号持续足够长的时间，提醒控制区内人员尽快离开。

⑨视频监控：在每个楼层迷道内和机房内均安装视频监控，在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域清单，实现机房内视频全覆盖。视频探头可加装铅玻璃罩以延长视频设备的使用寿命。

医院在落实以上安全防护措施好措施后，能满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中相关要求。

本项目另在每个楼层的入口处安装有光电联锁，质子治疗系统运行期间，光电联锁打开，有人员误入时，出发光电联锁，质子治疗系统停止出束。



图 4-9 质子治疗机房地下一层设备底坑安全设施平面图

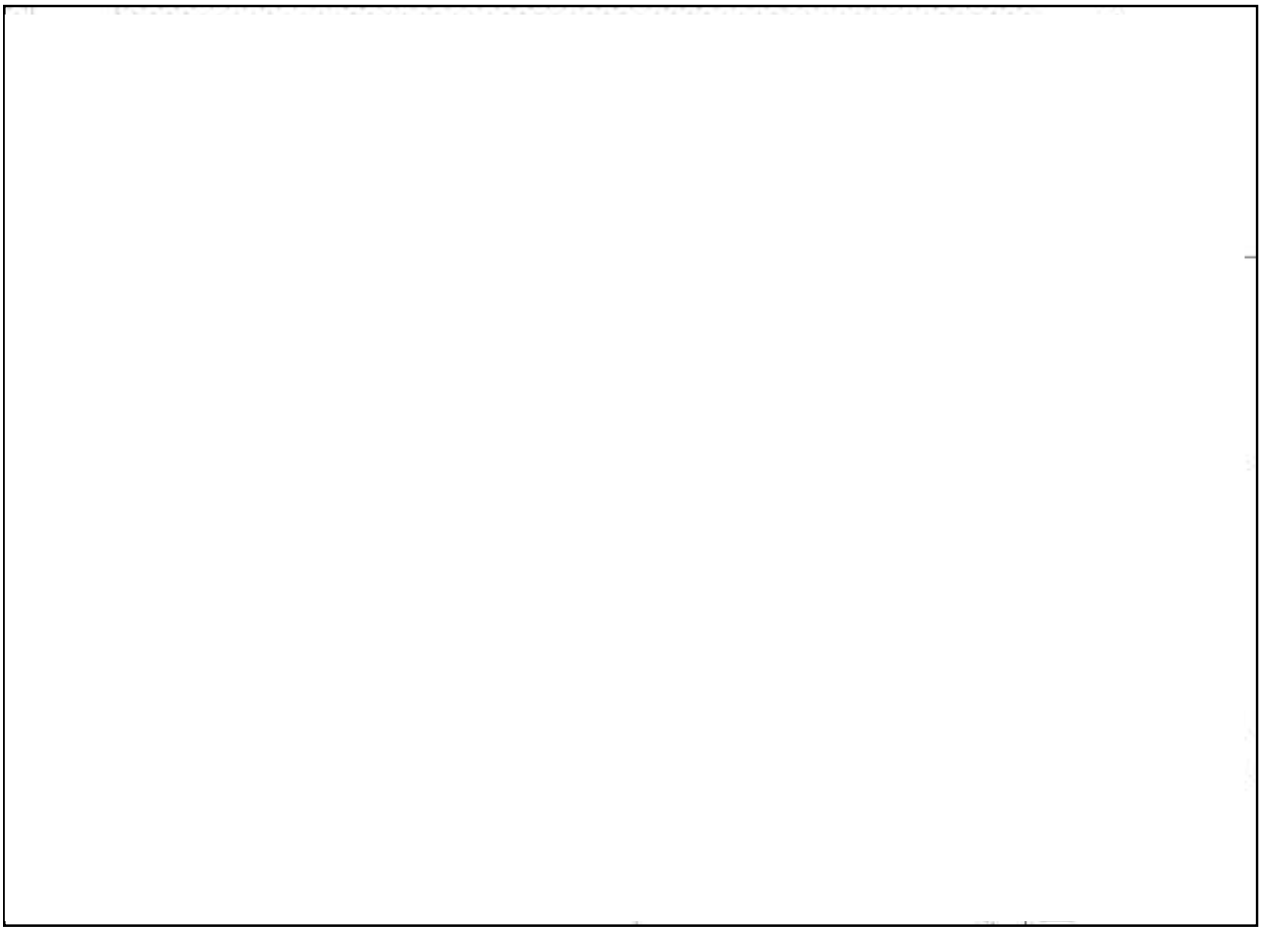

图 4-10 质子治疗机房地上一层患者治疗机房安全设施平面图

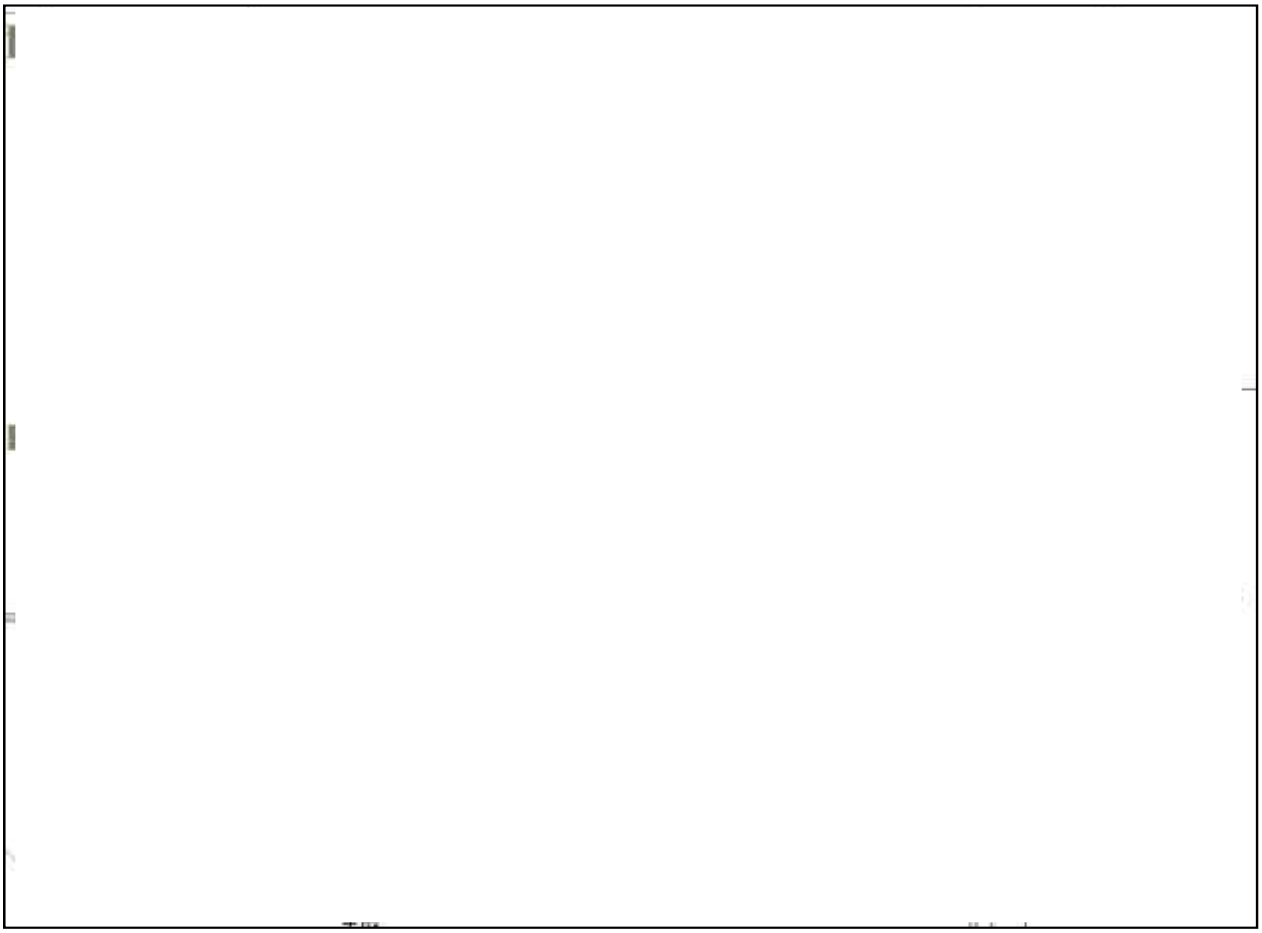

图 4-11 质子治疗机房地上二层维修平台安全设施平面图

在质子治疗系统处于治疗工作状态或者维修维护状态时，上述安全联锁装置均有效的工况下设备才能出束，若其中任意一项安全联锁装置无法工作或者旁路，设备均不能出束。设备出束和安全联锁遵循图 4-12 中的逻辑控制。

治疗工作状态和维修维护工作状态下，进入各楼层的门禁系统权限会进行相应调整。治疗工作结束后，在控制系统中确认进入设备维修维护状态，此时门禁系统（包括三个楼层的门禁）只授权有维修维护的工作人员进入的权限。反之，维修维护工作结束后，系统中确认进入治疗状态，此时门禁系统只授权医院辐射工作人员进入的权限。上述设计考虑的是防止不同授权的人员同时进入机房及相邻监督区内，不同工种同时作业容易发生人员滞留和误照射事故。

各设施设备正常情况下，质子治疗系统开机前开始清场（巡检），播放离场广播，检查急停开关，退出后关闭防护门，防护门关闭到位的信号触发，人员返回控制室，插入钥匙开关，启动质子治疗系统出束治疗。接收到“开机”信号时，按预定要求管制相关区域。接收到“停机”信号后，允许授权人员按规定方式进入控制区。出现异常情况时，可通过急停按钮、门机联锁或开门开关触发紧急停机动作，待异常情况解除后才可重新复位开机。质子治疗机房安全联锁系统的逻辑图见图 4-12。

图 4-12 质子治疗机房安全联锁控制逻辑图

4.2.1.2 安全保卫

从质子治疗机房辅房、楼梯等不受控区域进入辐射工作场所的监督区入口处安装门禁，在各楼层机房的防护门口处也设置门禁系统，有运行权限的辐射工作人员在防护门外刷门禁后进入机房，从机房离开时，通过迷道口的开门开关打开

防护门。门禁安装位置见图 4-9 至图 4-11。

门禁有专人授权管理，只有经过授权的辐射工作人员才能刷卡进入相应的区域。其他人员如有必要确需进入，则应由辐射安全管理人员陪同。

4.2.2 II 类射线装置

（1）电线电缆布设：射波刀机房、医用直线加速器机房电缆线穿墙方式拟采用“U”型穿墙管道，穿墙处埋地深度为 0.40m，电缆沟不会破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

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

（3）本项目射波刀机房、医用直线加速器机房拟设计有通风装置，治疗室内拟采用机械进、出风，通风换气次数不少于 4 次/h。进风口拟设在射波刀机房、医用直线加速器机房治疗室东南角或西南角顶部吊顶处，排风口拟设在医用直线加速器机房治疗室东北角或西北角，下沿距治疗室地面 0.3m 高，进风口与排风口位置拟对角设置，以确保室内空气充分交换。射波刀机房、医用直线加速器机房进排风管道避开主射线方向，射线经多次散射后，进出风管道进出口处辐射剂量将在控制范围内。

（4）电离辐射警告标志和工作状态指示灯：射波刀机房、医用直线加速器机房入口拟设置电离辐射警告标志和工作状态指示灯，防止无关人员逗留和误入。

（5）紧急停机装置：在射波刀机房、医用直线加速器机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧、防护门内迷道入口处、控制室控制台及设备壳体上均拟设置急停按钮，以避免射波刀机房、医用直线加速器机房内人员尚未完全清空的情况下开机，产生误照射。

（6）开门装置：射波刀机房、医用直线加速器机房拟设置从室内开启治疗机房门的装置，防护门拟设有防挤压功能。

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

（8）视频装置和双向交流对讲装置：本项目射波刀机房、医用直线加速器机房控制室拟设置在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统，实时观察机房内的动态。

（9）固定式辐射剂量监测仪：本项目射波刀机房、医用直线加速器机房治疗室迷道的内入口处拟设置固定式辐射剂量监测仪并拟有异常情况下报警功能，其显示单元拟设置在控制室内。



图 4-13 射波刀、医用直线加速器、后装治疗机房主要安全设施位置示意图

图 4-14 射波刀、医用直线加速器、后装机安全联锁逻辑图

4.2.3 后装机（III类放射源）

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

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

（3）急停按钮：控制台、后装机设备表面人员易触及位置以及治疗机房内墙面拟各设置安装急停按钮，并设有醒目标识及文字，若人员误留治疗室或其他事故情况，可在治疗室内立即按下急停开关，后装机会执行紧急收源程序。后装治疗设备控制系统拟设置有安全锁等多重保护和联锁装置。治疗室内拟配有合适的储源容器、长柄镊子等应急设备。

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

（5）视频装置和双向交流对讲装置：本项目放疗机房控制室拟设置在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统，实时观察机房内的动态。

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

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

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

（9）本项目后装机房内拟配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具。

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

4.2.4 III类射线装置

（1）电离辐射警告标志：CT 模拟定位机房入口处拟设置有“当心电离辐射”警告标志和中文警示说明。

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

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

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

（5）观察窗：CT 模拟定位机房控制室侧墙体上设置有观察窗，可有效观察到患者和受检者状态。

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

连云港市第一人民医院在落实以上辐射安全措施后，将满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）及《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关标准要求。

4.3 三废的治理

4.3.1 质子治疗系统

4.3.1.1 通风系统管道及路径设计

质子治疗机房内共设置 2 套排风系统，其中设备底坑、患者治疗机房和维修平台共用 1 套新风和排风系统。机房南侧辅房共用 1 套排风系统，并采用自然进风。2 套排风系统的排放口均设置在质子中心屋顶上。

质子治疗机房地下一层涩北底坑、地上一层患者治疗机房进风管道管径为 400mm×250mm，均穿过机房防护门上方墙体进入迷道，于迷道中段吊顶处设置有 1 个进风口。

质子治疗机房排风管道穿过地上二层维修平台防护门上方墙体进入迷道，沿迷道天花板上方向东延伸，再分两路，一路管径为 500mm×200mm，沿东侧屏蔽墙体向下延伸并由南向北分别设置 1 个灾后排风口（位于东南角，排风口下缘距地面 0.3m）、2 个平时排风兼液氦泄漏时排风口（位于东侧屏蔽墙中段和北段，排风口下缘距地面 0.3m）；另一路管径为 630mm×500mm，延伸至机房东北角，穿维修平台、患者治疗机房楼板，设排风立管，负担质子治疗机房 3 个楼层的排风，每层于高出机房地面约 0.3m 处设置 1 个排风口。设备底坑、患者治疗机房和维修平台通风管道布设示意图见图 4-15 至图 4-17。

质子治疗机房排风管道于机房南侧排风井延伸至顶层并在顶层东南角排风口排出，质子中心屋顶通风管道排风口布设示意图见图 4-18。本项目质子治疗机房容积约 1032m^3（包括迷道），排风机的设计通风量为 6000m^3/h，通风换气次数约为 5.8 次/h，能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“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”的相关要求。

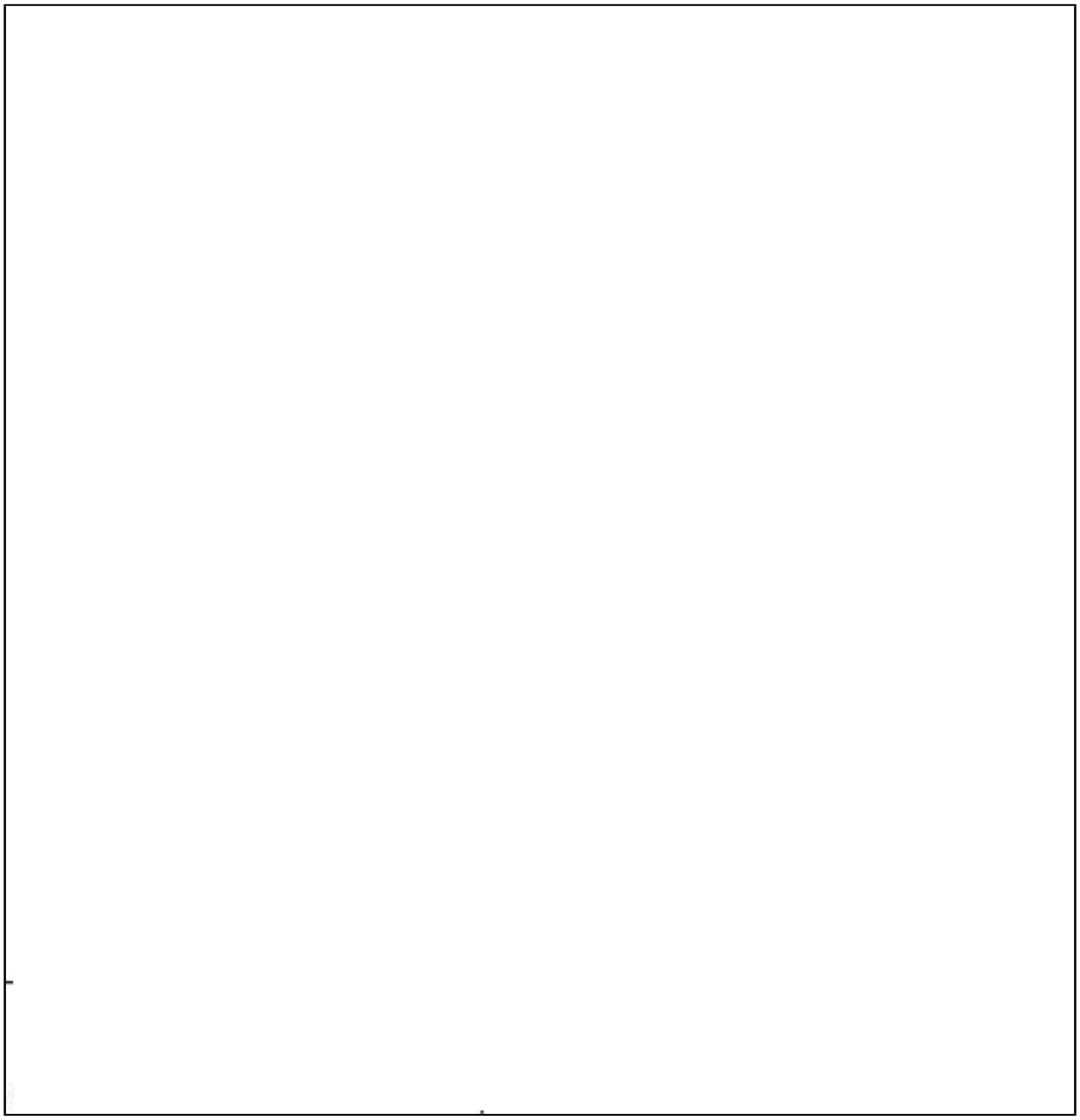

图 4-15 质子中心地下一层通风管道布设示意图



图 4-16 质子中心地上一层通风管道布设示意图



图 4-17 质子中心地上二层通风管道布设示意图



图 4-18 质子中心屋顶通风管道排风口布设示意图

4.3.1.2 废气处理措施

质子治疗系统运行时，机房内空气通过热中子俘获、（n，2n）、（γ，n）反应和散裂反应而被活化，产生的活化核素主要有 H-3、Be-7、C-11、N-13、O-15 和 Ar-41 等。

本项目计算了质子治疗系统运行时机房内空气活化产生的主要放射性核素活度浓度（具体见第 5 章）。质子治疗机房排风量为 6000m^3/h，机房有效容积约 1032m^3，在机房通风换气次数为 5.8 次/h 的前提下，活化产物比活度较低，气态途径使得进入治疗机房的辐射工作人员和机房外公众受到的剂量较小。因此本项目通风系统的设计和废气排放的方式是可行的，少量放射性核素排放对人员和周围环境影响很小。

4.3.1.3 废水处理措施

（1）废水收集方式

本项目产生的放射性废液主要是活化的冷却水。MPT S250i 型质子治疗系统所用冷却水为去离子水，冷却水系统全部水量是 0.48m^3，其中射频放大器和扫描磁铁（较低活化）回路中涉及活化的冷却水的水量是 0.16m^3。本项目在质子治疗机房设备底坑设置了专用的活化废水管道、普通废水管道和应急用水管道，质子治疗系统维修拆卸设备时，冷却水系统中涉及活化的 1 个回路冷却水（约 0.16m^3）穿过西墙排放至机房西北侧的活化水暂存池，另 2 路不涉及活化的冷却水（约 0.32m^3）穿过南墙排放至楼梯间地埋式应急水池，设备底坑地面设置自流坡度，如发生冷却水泄漏，泄漏的冷却水通过地漏经排水管进入应急水池。活化水暂存池的设计尺寸为 2.2m×2.0m×1.9m、有效容积为 6.6m^3，应急水池的设计尺寸为 1.5m×1.5m×1.5m、有效容积为 2.5m^3，均可以满足质子治疗系统内冷却水的暂存要求。

（2）废水排放方式

活化冷却水暂存在活化水暂存池内，暂存池设计有液位计和取样口，计划每

1~3 年排放 1 次。排放前委托有资质的单位进行检测，冷却水排放执行《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）中对医疗机构废水排放的限值要求：总β不超过 10Bq/L。排放时采用提升泵加压，经医院管网接入区域市政污水管道。

4.3.1.4 放射性固体废物处理措施

（1）放射性固体废物来源

放射性固体废物主要来自质子治疗系统运行、维修和维护保养过程中产生的废活化元器件、废冷却水过滤滤芯及离子交换树脂、及其他耗材，年产生量不超过 200kg。

质子治疗系统运行过程中难免会有束流偏转损失，高能粒子撞击加速器结构部件造成部件活化。质子治疗系统产生的感生放射性的特点是短寿命核素较多，对环境有影响的长寿命核素有 Co-60（半衰期 5.3 年）、Fe-55（半衰期 2.94 年）、Mn-54（半衰期 300 天）等。本项目质子治疗系统每年更换的活化部件预计为 180kg（约 0.1m^3）。

更换的冷却水过滤滤芯和离子交换树脂及其他等耗材中的长半衰期感生放射性核素主要是 H-3 和 Be-7。其中 Be-7 核素经过一段时间存放后活度浓度可降至较低水平。

（2）放射性固体废物处理措施

放射性固体废物由承担维护保养的设备生产单位（迈胜公司）负责从设备底坑中取出，分类暂存于活化物暂存间中。医院负责登记和安全保卫工作，设置放射性废物进出库台账、委托检测和处置台帐，做好日常记录。

活化物暂存间位于地下一层，设备底坑东南侧，单独设置，设计尺寸：3.3m×3.5m×3.7m，库容约 42.7m^3，满足质子治疗系统运行寿期的放射性固体废物暂存空间要求。活化物暂存间北墙、西墙及顶部为 20cm 混凝土，东墙、南墙为 40cm 混凝土，暂存间门采用 4mm 铅当量防护门。暂存间入口处设置双人双锁管理和电离辐射标志，暂存间内设置厚度为 1.5cm 的铁桶若干，容量为 100L/个。放射性固体废物按半衰期和活度进行分类存放，废物桶装完废物后保持密封。暂

存间内码放高度原则上不允许超过 2 层。体积小的码放在体积大的铅桶上面，重量小的放在重量大的上面。废物桶按照入库时间依次码放，桶之间留有空间，便于运输。每个废物桶外设置电离辐射标志和放射性废物标签，该标签上包括贮存日期、材料来源和性质、表面剂量率以及收集人员签名等内容。

活化物暂存间内备有铅屏风等防护用品，当检测到铅桶外部辐射水平较高时，增加防护措施（如使用铅屏风遮挡等）。暂存间外辐射剂量率控制在 2.5μSv/h 水平以下。

医院根据放射性固体废物的贮存情况，定期委托有资质的单位进行检测和分析，对于满足解控要求的固体废物，报审管部门备案和认可后，作为一般固体废物处理。对于经衰变后仍超出清洁解控水平的放射性固体废物，医院送交有资质的单位收贮。

（3）危险废物处置

冷却水系统产生的废树脂、滤芯等废物，在活化物暂存间内暂存，经检测和分析满足解控条件的情况下，可以作为非放射性废物，转移至医院内集中存放的危险废物库中，医院定期委托有危废处置资质的单位进行处置。

按照国家法规的要求，危险废物与其他固废分类存放，设置警示标志。危险废物采用专用容器（容器上有相应的标签）并防止泄漏。做好危险废物的相关记录，包括名称、来源、数量、特性和包装容器的类别、入库时间、存放库房、废物出库日期和接收单位。废物库按照危险废物暂存场所的要求配备通讯设施、照明设施和应急工具。医院对危险废物采取上述存储条件并进行有效的安全管理，满足《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597-2023）对危险废物暂存场所的管理要求。

医院委托有资质单位处置这部分危险废物，根据《危险废物转移联单管理办法》（原国家环保总局令 第 5 号）等要求，建立危险废物进出和处置台账，移交有资质单位处理前，办理相关危险废物转移联单。

4.3.2 Ⅱ、Ⅲ类射线装置

本项目拟配备的 M6 FM 型射波刀、Halcyon 型医用直线加速器 X 射线能量最大为6MV，Vital Beam 型医用直线加速器X射线能量最大为10MV，SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机 X 射线管电压最大为 140kV，运行期间均不会产生感生放射性和放射性三废。在开机出束时，可能会产生少量的臭氧和氮氧化物，通风系统正常运行可排出机房内的臭氧和氮氧化物。

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

本项目 1 座射波刀机房、2 座医用直线加速器机房内均设有通风装置，采用机械排风方式。3 座机房采用上进下出的通风系统，从防护门上方至机房内。射波刀机房内进风口拟设在治疗室东南角和西南角顶部吊顶处，排风口拟设在治疗室东北角和西北角，下沿距治疗室地面 0.3m 高；1#医用直线加速器机房内进风口拟设在治疗室东北角和东南角顶部吊顶处，排风口拟设在治疗室西北角和西南角，下沿距治疗室地面 0.3m 高；2#医用直线加速器机房内进风口拟设在治疗室西北角和西南角顶部吊顶处，排风口拟设在治疗室东北角和东南角，下沿距治疗室地面 0.3m 高。放疗机房通风管道布设示意图见图 4-17。

本项目射波刀机房治疗室容积约 348m^3（包括迷道），机房内排风机的设计通风量为 2000m^3/h，通风换气次数约为 5.7 次/h；1#医用直线加速器机房治疗室容积约 380m^3（包括迷道），机房内排风机的设计通风量为 2500m^3/h，通风换气次数约为 6.5 次/h；2#医用直线加速器机房治疗室容积约 362m^3（包括迷道），机房内排风机的设计通风量为 2500m^3/h，通风换气次数约为 6.9 次/h，均能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“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”的相关要求。

4.3.3 后装机（III类放射源）

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

本项目后装治疗机房内拟配备的 KL-HDR-C 型后装机出源照射期间，机房内的空气在γ射线作用下，可能会产生少量的臭氧和氮氧化物，通风系统正常运行可排出机房内的臭氧和氮氧化物。

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

本项目 1 座后装治疗机房内设有通风装置，采用机械排风方式。机房采用上进下出的通风系统，从防护门上方至机房内。后装治疗机房内进风口拟设在治疗室西南角顶部吊顶处，排风口拟设在治疗室东北角，下沿距治疗室地面 0.3m 高。放疗机房通风管道布设示意图见图 4-17。

本项目后装治疗机房治疗室容积约 207m^3（包括迷道），机房内排风机的设计通风量为 1000m^3/h，通风换气次数约为 4.8 次/h，能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“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”的相关要求。

4.4服务期满后的环境保护措施

本项目中质子治疗系统的设计使用寿命约 20 年，届时整个质子治疗机房将按照国家法规要求进行退役，并另行履行环保手续。机房中各类设施和设备经检测满足相关标准，经审管部门批准后才可清洁解控。

退役期间，做好安全保卫工作，禁止与退役无关的人员进入机房辐射工作场所，通过划定区域、安排人员值守、实施放射性废物管控等环境保护措施，确保退役人员和周围公众安全。

射波刀、医用直线加速器、后装机等终止运行后可能产生放射性污染的射线装置、放射源，或因搬迁等原因不再使用时，医院应编制相应的退役方案、制定退役目标，确保放射性废物与放射源得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

5 环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

本项目质子中心总建筑面积约 5500m^2，其中包括了质子治疗系统、射波刀、医用直线加速器、后装机、CT 模拟定位机的屏蔽机房及辅助用房，预计 2024 年 2 月开工，2024 年 12 月建成，整个施工周期约 10 个月，施工期对周围的大气环境、水环境、声环境等产生一定的影响。

由于本项目施工期不长，对当地大气环境、水环境、声环境、生态环境等影响时间较短，只要施工单位认真制定和落实施工期应该采取的环保对策措施，委托有资质的单位开展环境监理，工程施工的环境影响可以得到有效控制，不会降低当地环境质量现状。

本项目各机房及工作场所建设属于整个连云港市第一人民医院开发区院区基础建设的部分工程，建设阶段环境影响已于《连云港经济技术开发区政府投资工程服务中心连云港市第一人民医院开发区院区项目环境影响报告书》详细描述，建设阶段环境影响报告书已取得连云港经济技术开发区生态环境局（原连云港经济技术开发区环境保护局）批复（批复文号：连开环复〔2019〕67 号，见附件 2），本次主要针对涉及核技术利用活动的建设内容开展评价。

5.2 运行阶段环境影响分析

5.2.1 质子治疗系统

根据质子治疗系统工作原理，质子治疗系统运行时产生的辐射源项包括瞬发辐射、缓发辐射和感生放射性。辐射源除通过贯穿辐射途径对机房屏蔽体外环境产生辐射影响外，辐射工作人员在质子治疗系统停机后进入治疗机房，受到活化部件的辐射影响。另外工作场所空气中的感生放射核素还将以气载流出物的形式进入大气环境，主要通过空气浸没外照射和吸入内照射途径对人员产生辐射影响。

5.2.1.1 场所辐射水平

本项目在对辐射场源项进行估算时，主要采用 FLUKA 程序，通过该程序模拟不同能量的质子与不同材质的靶体作用的中子和光子能谱及其角分布。

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。可模拟包括中子、电子、质子在内的 60 余种不同的粒子及重离子，其中子能量范围从 10-5eV 到 20TeV，光子能量范围从 100eV 到 10000TeV，电子从 1keV 到 1000TeV，带电粒子及其反粒子为 1keV 到 20TeV，重离子为＜1000TeV/n。该程序还可以传输偏振光子（如同步辐射）和光学光子，在线进行不稳定剩余核辐射的时间演化和跟踪。FLUKA 还可以处理非常复杂的几何图形，能正确跟踪带电粒子，还提供各种可视化和调试工具。

FLUKA 的数据库主要采用了美国核数据中心 NNDC 的数据，在 CERN、SLAC 等国际大型质子、电子加速器中有多年的使用经验，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。

本项目屏蔽计算和物质活化所采用的屏蔽体几何数模与质子治疗机房结构设计一致，对加速器磁铁、射程调节器、多叶准直器等复杂结构采取保守的简化处理。

质子治疗系统运行分 230MeV 和 70MeV 两种出束工况，每一种工况下束流出束方向均可从垂直向下到水平侧墙，再到垂直向上的 190°范围内旋转。机房周围辐射水平计算时，根据辐射屏蔽设计参数，分别建立了射线出束为水平（朝东墙）、垂直向上（朝顶部）和垂直向下（朝底部）三种数模，出束工况模型见图 5-1。

（a）水平出束

（b）向上出束

（c）向下出束

图 5-1 质子治疗机房辐射计算模型

根据机房穿墙管线设计，在数模中增加了穿墙穿管模拟，保守未考虑在管道外包覆铅皮等其他屏蔽补偿措施。设备底坑（地下一层）、患者治疗机房（地上一层）和维修平台（地上二层）管线穿墙模型见图 5-2。计算结果统计时包含了中子、光子等所有粒子的贡献，对于屏蔽体和迷道外均包含了射线透射和散射剂量的贡献。

（a）计算模型　　（b）地下一层设备底坑穿墙孔洞

（c）地上一层患者治疗机房穿墙孔洞　　（d）地上二层维修平台穿墙孔洞

图 5-2 质子治疗机房穿墙孔洞计算模型

5.2.1.1.1 230MeV 工况下机房周围环境辐射水平估算（瞬发辐射）

根据质子治疗系统 230MeV 工况下的束流损失参数，分别以束流水平方向（垂直入射东侧屏蔽墙）、垂直向上（垂直入射顶部屏蔽墙）和垂直向下（垂直入射机房底板）等三种工况对质子治疗机房周围环境辐射水平进行模拟。上述三种工况中，束流线垂直入射东侧屏蔽墙时，机房屏蔽墙外辐射剂量率相对较高。

（1）水平方向出束

束流以水平方向出束时，设备底坑、患者治疗机房和维修平台这三个楼层的机房周围辐射剂量率计算结果分别见图 5-3、图 5-4 和图 5-6，三个楼层的机房垂直剖面的辐射剂量率分布见图 5-7。图中红色包络线为 2.5μSv/h 的辐射剂量率限值边界。从图中可知，除了机房混凝土底板以外，2.5μSv/h 的包络线均位于各层机房的屏蔽体内，即各机房的屏蔽设施外辐射剂量率均不超过 2.5μSv/h。

图 5-5 给出了地上一层患者治疗机房辐射剂量率沿南北、东西两个水平剖面的变化情况，图 5-8 给出了三个楼层的机房辐射剂量率在垂直剖面方向的变化情况。从图中可以看出屏蔽体边界处的辐射剂量率数值。

图 5-3 地下一层设备底坑（水平方向出束）辐射剂量率分布图

图 5-4 地上一层患者治疗机房（水平方向出束）辐射剂量率分布图

（a）南北屏蔽墙

（b）东西屏蔽墙

图 5-5 地上一层患者治疗机房（水平方向出束）南北、东西屏蔽墙辐射剂量率变化示意图

图 5-6 地上二层维修平台（水平方向出束）辐射剂量率分布图

图 5-7 质子治疗机房（水平方向出束）垂直剖面辐射剂量率分布图

图 5-8 质子治疗机房（水平方向出束）垂直剖面辐射剂量率变化示意图

从图中可见，束流水平朝东侧屏蔽墙出束时，地上一层患者治疗机房周围剂量率最大值位于南侧屏蔽墙外 30cm 处，为 8.35E-01μSv/h。质子治疗机房顶部和混凝土底板下的辐射剂量率分别为<1.00E-04μSv/h 和 1.46E+01μSv/h。

230MeV 工况水平方向出束时，三个楼层迷道出口防护门外辐射剂量率随距离的变化情况见图 5-9。从图中可以看到，各层迷道防护门外的辐射剂量率均低于 2.5μSv/h 的剂量率限值。

（a）设备底坑

（b）患者治疗机房

（c）维修平台

图 5-9 机房（水平方向出束）迷道各防护门外辐射剂量率随距离变化情况

其中，地下一层设备底坑迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 2.84E-01μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 7.08E-01μSv/h；地上一层患者治疗机房迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 3.28E-01μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 1.80μSv/h；地上二层维修平台迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 8.55E-01μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 5.66E-02μSv/h。

（2）垂直向上出束

束流垂直向上出束时，设备底坑、患者治疗机房和维修平台这三个楼层的机房周围水平和垂直剖面辐射剂量率分布见图 5-10。图中红色包络线为 2.5μSv/h 剂量率限值边界。从图中可知，除了机房混凝土底部外，2.5μSv/h 的包络线均位于各层机房的屏蔽体内，即各机房屏蔽墙周围辐射剂量率均不超过 2.5μSv/h。

图 5-11 分别给出辐射剂量率沿南北和东西屏蔽墙剖面的变化。从图中可见，束流垂直向上出束时，地上一层患者治疗机房周围剂量率最大值位于北侧屏蔽墙外 30cm 处，为 9.85E-01μSv/h。质子治疗机房顶部和混凝土底板下的辐射剂量率分别为 2.39μSv/h 和 3.45μSv/h。

（a）地下一层设备底坑　　（b）地上一层患者治疗机房

（c）地上二层维修平台　　（d）质子治疗机房垂直剖面

图 5-10 质子治疗机房（垂直向上出束）周围辐射剂量率分布图

（a）南北屏蔽墙

（b）东西屏蔽墙

图 5-11 地上一层患者治疗机房（垂直向上出束）南北、东西屏蔽墙辐射剂量率变化示意图

图 5-12 质子治疗机房（垂直向上出束）垂直剖面辐射剂量率变化示意图

230MeV 工况束流垂直向上出束时，三个楼层迷道防护门外辐射剂量率随距离的变化见图 5-13。从图中可以看到，各层迷道防护门外的辐射剂量率均低于 2.5μSv/h 的剂量率限值。

（a）设备底坑

（b）患者治疗机房

（c）维修平台

图 5-13 机房（垂直向上出束）迷道各防护门外辐射剂量率随距离变化情况

其中，地下一层设备底坑迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 6.77E-01μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 9.59E-01μSv/h；地上一层患者治疗机房迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 5.26E-01μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 1.41μSv/h；地上二层维修平台迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 8.50E-02μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 1.92E-01μSv/h。

（3）垂直向下出束

束流垂直向下出束时，设备底坑、患者治疗机房和维修平台这三个楼层的机房周围水平和垂直剖面辐射剂量率分布见图 5-14。图中红色包络线为 2.5μSv/h 剂量率限值边界。从图中可知，除了机房混凝土底部外，2.5μSv/h 的包络线均位于各层机房的屏蔽体内，即各机房屏蔽墙周围辐射剂量率均不超过 2.5μSv/h。

图 5-15 分别给出辐射剂量率沿南北和东西屏蔽墙剖面的变化。从图中可见，束流垂直向下出束时，地上一层患者治疗机房周围剂量率最大值位于北侧屏蔽墙外 30cm 处，为 3.90E-01μSv/h。质子治疗机房顶部和混凝土底板下的辐射剂量率分别为<1.00E-04μSv/h 和 3.19E+02μSv/h。

（a）地下一层设备底坑　　（b）地上一层患者治疗机房

（c）地上二层维修平台　　（d）质子治疗机房垂直剖面

图 5-14 质子治疗机房（垂直向下出束）周围辐射剂量率分布图

（a）南北屏蔽墙

（b）东西屏蔽墙

图 5-15 地上一层患者治疗机房（垂直向下出束）南北、东西屏蔽墙辐射剂量率变化示意图

图 5-16 质子治疗机房（垂直向下出束）垂直剖面辐射剂量率变化示意图

230MeV 工况束流垂直向下出束时，三个楼层迷道防护门外辐射剂量率随距离的变化见图 5-17。从图中可以看到，各层迷道防护门外的辐射剂量率均低于 2.5μSv/h 的剂量率限值。

（a）设备底坑

（b）患者治疗机房

（c）维修平台

图 5-17 机房（垂直向下出束）迷道各防护门外辐射剂量率随距离变化情况

其中，地下一层设备底坑迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 1.46μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 1.47μSv/h；地上一层患者治疗机房迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 1.00μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 9.08E-01μSv/h；地上二层维修平台迷道防护门外 30cm 处辐射剂量率为 1.22E-01μSv/h，防护门上方穿墙管道外 30cm 处辐射剂量率为 7.48E-02μSv/h。

5.2.1.1.2 70MeV 工况下机房周围环境辐射水平估算（瞬发辐射）

根据质子治疗系统 70MeV 工况下的束流损失参数，分别以束流水平方向（垂直入射东侧屏蔽墙）、垂直向上（垂直入射顶部屏蔽墙）和垂直向下（垂直入射机房底板）等三种工况对质子治疗机房周围环境辐射水平进行模拟。

束流以水平方向出束时，设备底坑、患者治疗机房和维修平台这三个楼层的机房周围水平和垂直剖面辐射剂量率分布见图 5-18；束流垂直向上出束时，这三个楼层的机房周围水平和垂直剖面辐射剂量率分布见图 5-19；束流垂直向下出束时，这三个楼层的机房周围水平和垂直剖面辐射剂量率分布见图 5-20。

（a）地下一层设备底坑　　（b）地上一层患者治疗机房

（c）地上二层维修平台　　（d）质子治疗机房垂直剖面

图 5-18 质子治疗机房（水平方向出束）周围辐射剂量率分布图

（a）地下一层设备底坑　　（b）地上一层患者治疗机房

（c）地上二层维修平台　　（d）质子治疗机房垂直剖面

图 5-19 质子治疗机房（垂直向上出束）周围辐射剂量率分布图

（a）地下一层设备底坑　　（b）地上一层患者治疗机房

（c）地上二层维修平台　　（d）质子治疗机房垂直剖面

图 5-20 质子治疗机房（垂直向下出束）周围辐射剂量率分布图

从辐射剂量分布图中可以看到。除了底部屏蔽体外，屏蔽墙周围辐射剂量率

均不超过 2.5μSv/h。对比 230MeV 出束工况，70MeV 出束时，大部分能量损失在加速器内部。因此，70MeV 出束时设备底坑、患者治疗机房、维修平台以及垂直剖面辐射剂量率均低于 230MeV 出束工况，其中在主射线方向差别更为明显。

5.2.1.1.3 机房周围环境辐射水平汇总（瞬发辐射）

230MeV 工况下，不同出束方向、各楼层机房屏蔽体外 30cm 处辐射剂量率水平计算结果见表 5-1。计算点位布设详见图 5-21、图 5-22 和图 5-23。

表 5-1 230MeV 出束工况机房周围参考点位辐射剂量率计算结果

序号	参考点	参考点所在场所	环境辐射剂量率（μSv/h）		
			水平出束	向上出束	向下出束
1	设备底坑东墙外 30cm 处	土层			
2	设备底坑南墙外 30cm 处	楼梯间			
3	设备底坑南墙外 30cm 处	工艺冷却水设备间			
4	设备底坑南墙外 30cm 处	隔离变压器室			
5	设备底坑防护门外 30cm 处	走廊			
6	设备底坑防护门上方穿墙管道外 30cm 处	走廊上空			
7	设备底坑西墙外 30cm 处	走廊			
8	设备底坑西墙外 30cm 处	活化水暂存池			
9	设备底坑北墙外 30cm 处	土层			
10	患者治疗机房东墙外 30cm 处	院内绿化			
11	患者治疗机房南墙外 30cm 处	楼梯间			
12	患者治疗机房南墙外 30cm 处	UPS室			
13	患者治疗机房南墙外 30cm 处	设备间			
14	患者治疗机房南墙外 30cm 处	控制室			

序号	参考点	参考点所在场所	环境辐射剂量率（μSv/h）		
			水平出束	向上出束	向下出束
15	患者治疗机房防护门外30cm处	走廊			
16	患者治疗机房防护门上方穿墙管道外30cm处	走廊上空			
17	患者治疗机房西墙外30cm处	院内绿化			
18	患者治疗机房北墙外30cm处	院内绿化			
19	维修平台东墙外30cm处	临空			
20	维修平台南墙外30cm处	楼梯间			
21	维修平台南墙外30cm处	补风机房			
22	维修平台南墙外30cm处	CT设备间			
23	维修平台南墙外30cm处	备件间			
24	维修平台防护门外30cm处	走廊			
25	维修平台防护门上方穿墙管道外30cm处	走廊上空			
26	维修平台西墙外30cm处	临空			
27	维修平台北墙外30cm处	临空			
28	设备底坑混凝土底板下方	土层			
29	维修平台楼顶外30cm处	不上人屋面			

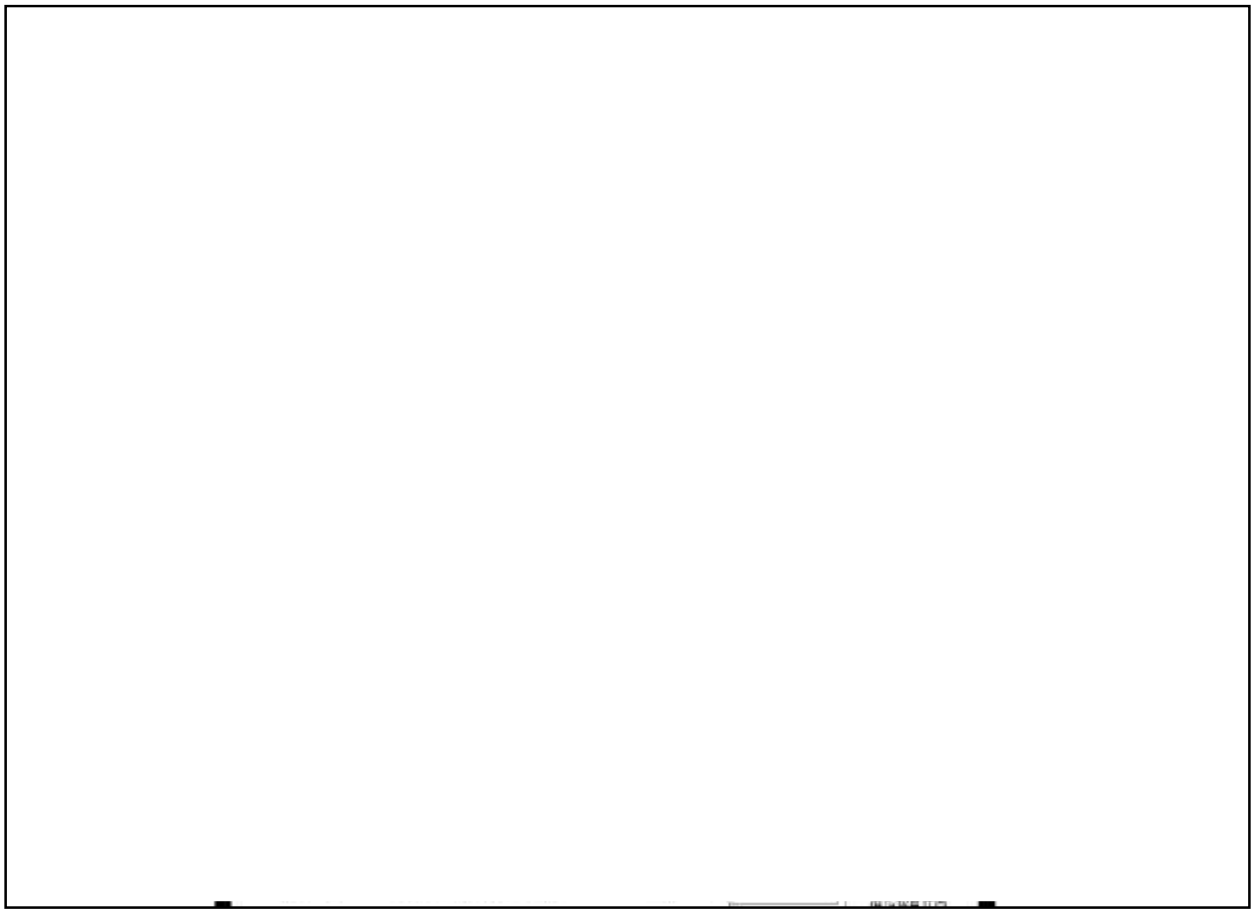

图 5-21 地下一层设备底坑周围辐射剂量率点位布设示意图

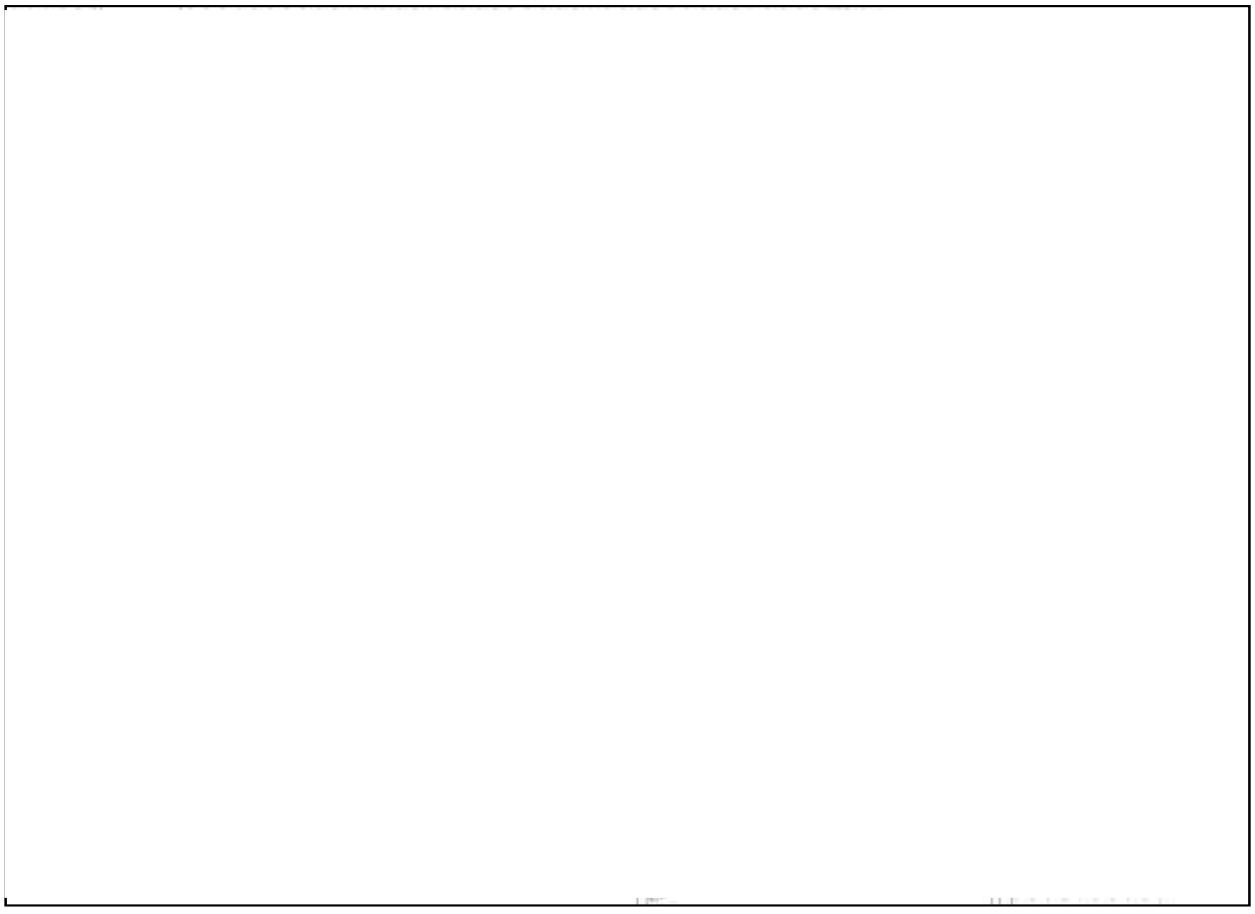

图 5-22 地上一层患者治疗机房周围辐射剂量率点位布设示意图

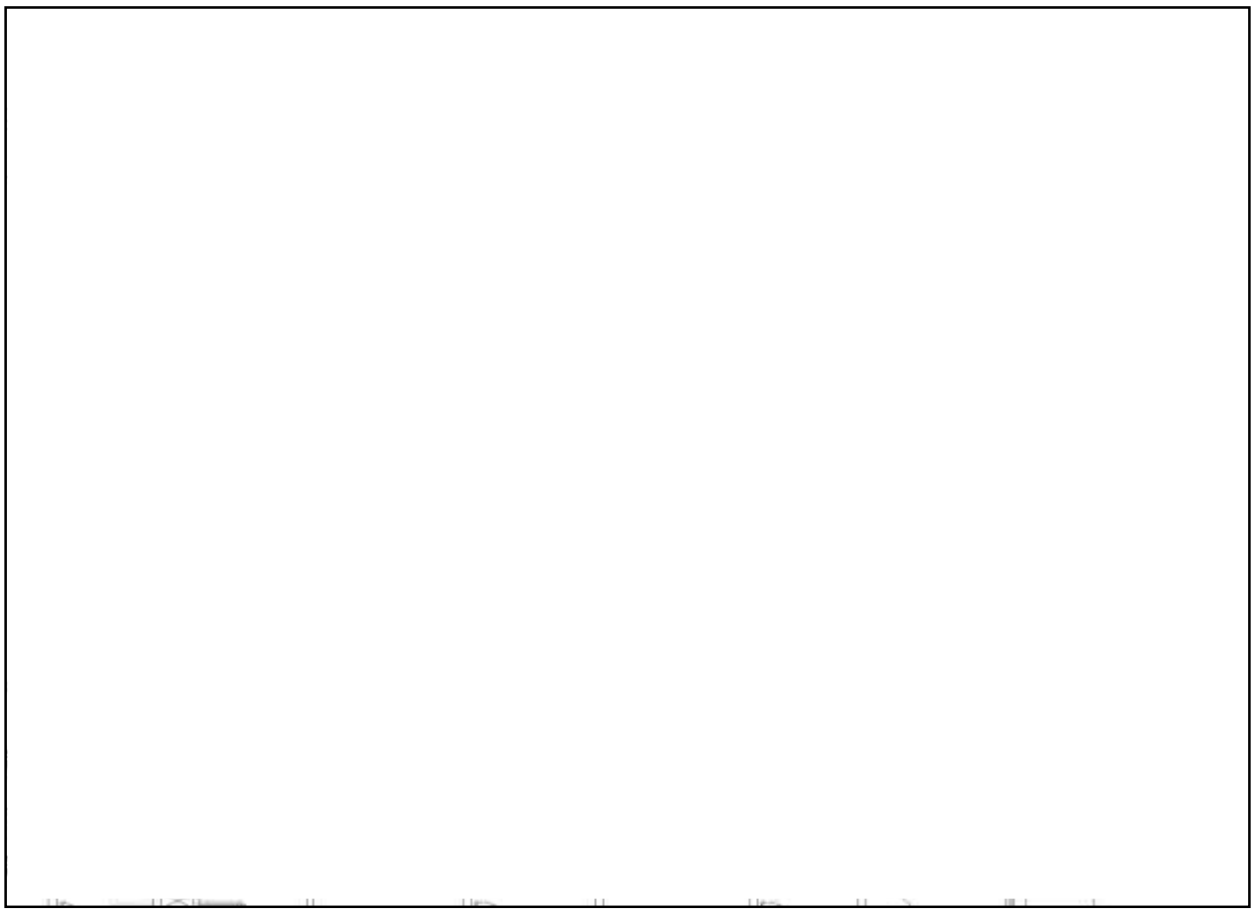

图 5-23 地上二层维修平台周围辐射剂量率点位布设示意图

根据表 5-1 中的计算结果，质子治疗机房三个楼层屏蔽体外（除底板外），包括屏蔽墙体、防护门、穿墙孔洞外以及机房周围辐射工作人员、公众居留场所的辐射剂量率均低于 2.5μSv/h，满足环境辐射水平的管理要求。

5.2.1.1.4 天空散射辐射影响

为进一步估算天空反散射在质子治疗机房周围地面造成的辐射影响，通过公式（5.1）进行计算。

$$H = 2.5\times10^{-2}\cdot H_O\cdot\Omega^{1.3}/r_s{}^2 \qquad (5.1)$$

式中：H—天空散射在机房外引起的附加剂量率，μSv/h；

H_O—屋顶上方 2m 处的当量剂量率，μSv/h；

Ω—射线源与屋顶之间包含的立体角，Sr；

r_s—射线源与计算点之间的距离，m。

射线源与屋顶之间包含的立体角Ω可通过公式（5.2）进行计算：

$$\Omega = 4arctan(a \cdot b / c \cdot d) \quad (5.2)$$

式中：a—机房屋顶长度的一半，m；

b—机房屋顶宽度的一半，m；

c—射线源到屋顶表面中心的距离，m；

d—射线源到屋顶边缘的距离，m。

质子治疗机房顶部的辐射剂量率最大值为 2.39μSv/h，经计算天空反散射在地面造成的剂量率＜0.001μSv/h，因此瞬发辐射穿过机房顶部在地面造成的剂量很小，处于可忽略水平。

5.2.1.1.5 停机后工作场所辐射水平

质子治疗系统停止运行后，由于机房内加速器部件（加速器磁铁、射程调节器、准直器）、终端体模、混凝土墙和室内空气活化导致在短时间内质子治疗机房内有较强的辐射场。束流在各部件的损失情况见表 3-11“感生放射性计算用束流损失参数表”，束流损失从大到小依次为终端体模、回旋加速器、射程调节器、多叶准直器和束流传输线。

停机后工作场所的缓发辐射数模计算的工况：质子治疗系统以最大能量 230MeV、最大束流损失、水平方向出束治疗后停机。缓发辐射场包含了机房内未解除摆位的患者（体模）产生的感生放射性，以及加速器上活化部件、活化冷却水、混凝土建筑等所有被活化物件产生的感生放射性。

活化水平除与物质活化截面有关外，主要还与活化核素的半衰期有关，通常半衰期越长活化产额越低。大部分核素半衰期较短，机房内活化产生的辐射场在短时间内便可降至低水平。

质子治疗系统停机后，医院辐射工作人员需要进入治疗机房，可能受到这部分缓发辐射的辐射影响。在计算缓发辐射的辐射影响时，参照本项目质子治疗系统运行工作负荷以及束流损失参数，当主线束为水平方向时束流主要损失在治疗机房内。

丿

丰

乙

纟

氵

讠

图 5-25 停机 10min 后患者治疗机房内束流方向辐射剂量率变化

5.2.1.2 人员受照剂量

本项目辐射工作人员和公众的受照剂量来源有 4 个途径，分别为：（1）质子治疗系统运行时瞬发辐射穿透屏蔽体后对机房周围职业人员和公众的外照射；（2）质子治疗系统停止运行后，医院辐射工作人员进入治疗机房工作受到的缓发辐射外照射；（3）质子治疗系统停机后，医院辐射工作人员进入治疗机房，受到室内活化空气的浸没外照射和吸入内照射；（4）质子治疗系统运行期间，活化气体排放周围环境，对公众造成浸没外照射和吸入内照射；（5）考虑在治疗机房内开展定位和 CT 定位操作时，同室的辐射工作人员受照剂量。上述途径所致辐射剂量计算方法如下：

5.2.1.2.1 瞬发辐射、缓发辐射所致人员受照剂量估算

瞬发辐射和缓发辐射对人员造成的外照射，按公式（5.3）计算：

$$H = D \times t \times T \qquad (5.3)$$

式中：H—人员年受照剂量，mSv/a；

D—人员所在场所辐射剂量率，mSv/h；

t—人员年受照时间，h/a；

T—居留因子，无量纲。

（1）瞬发辐射所致人员受照剂量估算

将表 5-1 中质子治疗机房外各参考点处的辐射剂量率估算值代入公式(5.3)。本项目质子治疗系统年出束运行时间约 392h（含质量验证出束时间），考虑周围辐射工作人员及公众的居留因子，根据公式（5.3）估算辐射工作人员及公众的年有效剂量，瞬发辐射致机房周围辐射工作人员及公众受照剂量计算结果见表 5-2。

表 5-2 瞬发辐射致质子治疗机房周围人员年有效剂量

序号	参考点		参考点所在场所	居留因子 T[1)]	剂量率估算值[2)]（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
1	设备底坑	东墙外	土层	/				/
2		南墙外	楼梯间	1/40				满足
3		南墙外	工艺冷却水设备间	1/20				满足
4		南墙外	隔离变压器室	1/20				满足
5		防护门外	走廊	1/8				满足
6		防护门上方穿墙管道外	走廊上空	1/40				满足
7		西墙外	走廊	1/8				满足
8		西墙外	活化水暂存池	1/20				满足
9		北墙外	土层	/				/
10	患者治疗机房	东墙外	院内绿化	1/40				满足
11		南墙外	楼梯间	1/40				满足
12		南墙外	UPS 室	1/20				满足
13		南墙外	设备间	1/20				满足

序号	参考点		参考点所在场所	居留因子 T[1)]	剂量率估算值[2)]（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
14		南墙外	控制室	1				满足
15		防护门外	走廊	1/8				满足
16		防护门上方穿墙管道外	走廊上空	1/40				满足
17		西墙外	院内绿化	1/40				满足
18		北墙外	院内绿化	1/40				满足
19	维修平台	东墙外	临空	/				/
20		南墙外	楼梯间	1/40				满足
21		南墙外	补风机房	1/20				满足
22		南墙外	CT 设备间	1/20				满足
23		南墙外	备件间	1/20				满足
24		防护门外	走廊	1/8				满足
25		防护门上方穿墙管道外	走廊上空	1/40				满足
26		西墙外	临空	/				/
27		北墙外	临空	/				/
28	设备底坑混凝土底板下方		土层	/				/
29	维修平台楼顶外 30cm 处		不上人屋面	/				/

注：1、居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A；

2、剂量率估算值取水平方向、垂直向上和垂直向下出束这三种工况下的较大值。

根据表 5-2 结果分析知，该项目质子治疗系统投入运行后，机房外辐射工作人员的年有效剂量最大为 0.10mSv，周围公众的年有效剂量最大为 0.07mSv，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效

剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

（2）缓发辐射所致人员受照剂量估算

缓发辐射由质子治疗机房内的感生放射性核素衰变产生，只对进入机房内的辐射工作人员产生剂量贡献。缓发辐射所致剂量主要由缓发辐射剂量水平和辐射工作人员的居留时间有关。

辐射工作人员进入患者治疗机房的主要工作是为患者摆位或者解除摆位。机房中辐射工作人员距离治疗机头最近距离通常不会小于 50cm。根据操作规程，辐射工作人员在距上次治疗结束 10min 后进入治疗机房，单次摆位时间约为 5min，解除摆位时间约为 1min，单次照射时间共计 6min。根据 5.2.1.1.5 节“停机后工作场所辐射水平”计算结果。质子治疗系统单次连续出束 4min，停机 10min 后距离出束治疗机头 50cm 处的辐射辐射剂量率为 14.52μSv/h。

根据表 3-4 可知，本项目质子治疗系统正常运行状态下单次出束时间为 2min，最长连续出束 2 次（即 4min），每日累积治疗时间为 64min，按每年 250 个工作日计算，则年累计出束时间约为 267h。此外，质子治疗系统每个工作日用于质量控制的 QA 出束时间为 30min，每年 QA 出束时间为 125h，则质子治疗系统每年累积出束时间为 392h。

医院拟为质子治疗系统运行配备的辐射工作人员包括医师、技师、物理师和护士，各岗位辐射工作人员在质子治疗机房内的工作负荷如下：

医师需在患者首诊时全过程跟踪和治疗，期间在质子治疗机房内指导摆位。本项目年接诊量最大为 800 人次（每位患者在治疗周期内平均照射 10 次），医师陪同每位患者治疗约 3 次，则医师每年陪同治疗次数约 2400 次。每次摆位时间约 6min，则每年缓发辐射受照时间为 240h。

技师需在每次治疗前进入质子治疗机房内摆位，治疗后进入质子治疗机房内解除摆位以及在控制室内操作设备出束，每年辅助治疗次数约 8000 次。另外同室操作的定位和 CT 验证均由技师在质子治疗机房内的 X 射线影像亭中开展。每

次摆位时间约 6min，则每年缓发辐射受照时间为 800h。

物理师需在控制室内对质子治疗系统进行 QA 测试，用于质量控制的 QA 出束时间为每日 30min，每年 QA 出束时间为 125h。物理师无需进入质子治疗机房内部，不受缓发辐射影响。

护士需进入质子治疗机房内协助技师进行摆位和解除摆位工作，每年协助摆位次数约 5600 次。每次进行摆位和解除摆位时间约 6min，则每年缓发辐射受照时间为 560h。

根据辐射工作人员居留时间、质子治疗机房内缓发辐射剂量率，对辐射工作人员各岗位年受照剂量进行了估算，结果见表 5-3。

表 5-3 缓发辐射致辐射工作人员年受照剂量计算结果

辐射工作人员岗位	机房内辐射剂量率（μSv/h）	年参与治疗次数（次）	受照时间（h/a）	年受照剂量（mSv/a）
医师				
技师				
物理师				
护士				

5.2.1.2.2 空气浸没外照射和吸入内照射所致人员受照剂量估算

空气浸没外照射剂量计算参照公式（5.4）：

$$D_{EA} = t \times \left(\sum_i x_i \cdot DF_{EAi} \cdot F\right) \quad (5.4)$$

式中：D_{EA}—计算点处人员浸没于污染的半无限烟云中受到的有效剂量，Sv/a；

x_i—计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m^3；

DF_{EAi}—浸没于半无限烟云中放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，（Sv）/（s·Bq/m^3），取自《Federal Guidance Report No.15:External Exposure to Radionuclides in Air,Water and Soil》；

F—建筑物的屏蔽因子，无量纲，保守取 1；

t—质子治疗系统出束时间，s/a。

空气吸入内照射剂量计算参照公式（5.5）：

$$D_{EI} = t \times \left(\sum_i x_i \cdot DF_{EIi} \cdot B_\gamma\right) \quad (5.5)$$

式中：D_{EI}—计算点处人员吸入污染空气造成的有效剂量，Sv/a；

x_i—计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m^3；

DF_{EIi}—吸入放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq，取自《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和 ICRP 68 号报告。

B_γ—人的呼吸率，m^3/h，取自 ICRP 89 号出版物中不同年龄组不同性别人群每日空气摄入量。由于本次计算未区分性别，空气摄入量选取不同性别的最大值，每日的摄入时间按 24h 计，可推导得出每小时空气摄入量，本项目取 0.9m^3/h；

t—质子治疗系统出束时间，h/a。

（1）辐射工作人员剂量估算

医院辐射工作人员进入质子治疗机房，受到活化空气的空气浸没外照射和吸入内照射，估算这部分受照剂量涉及的参数见表 5-4。表 5-4 中空气感生放射性活度浓度来自于源项计算章节的表 3-12。计算方法见公式（5.4）和公式（5.5）。

表 5-4 空气浸没外照射和吸入内照射计算参数

序号	核素	活度浓度（Bq/m^3）	呼吸率（m^3/h）	吸入转换因子（Sv/Bq）	外照射转换因子（Sv/（s·Bq/m^3））
1	Be-7				
2	C-11				
3	N-13				
4	O-15				

序号	核素	活度浓度（Bq/m³）	呼吸率（m³/h）	吸入转换因子（Sv/Bq）	外照射转换因子（Sv/（s·Bq/m³））
5	Ar-41				

空气浸没外照射和吸入内照射致辐射工作人员年受照射剂量估算结果见表5-5。

表 5-5 空气浸没外照射和吸入内照射致辐射工作人员年受照剂量

辐射工作人员岗位	受照时间（h/a）	空气浸没外照射（mSv/a）	空气吸入内照射（mSv/a）	累积剂量（mSv/a）
医师				
技师				
物理师				
护士				

（2）公众剂量估算

本项目废气排放口位于质子中心顶部，排放口周围最近的公众位于质子中心东侧制剂楼（远景规划，现为空地），距离排放口约30.4m。根据数模计算结果，并采用《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ 2.2-2018）附录A推荐模型AERSCREEN对核素排放后在空气中的弥散和稀释进行保守计算。其他参数选取如下：质子中心顶部排放口高度9.8m、排风口内径800mm×630mm、烟气温度20℃，排风量约6000m³/h，小静风（风速小于1.5m/s），保守不考虑核素衰变。

受到废气排放影响，东侧制剂楼处核素活度浓度见表5-6，该处核素活度浓度为排放口的0.16%，排放口处放射性活度浓度来自于源项计算章节的表3-12。由此估算公众因空气浸没外照射和吸入内照射受到的年受照剂量＜0.001mSv/a，计算结果见表5-7。

表 5-6 最近保护目标空气中核素活度浓度

序号	核素	活度浓度（Bq/m³）	东侧制剂楼处活度浓度（Bq/m³）
1	Be-7		

序号	核素	活度浓度（Bq/m³）	东侧制剂楼处活度浓度（Bq/m³）
2	C-11		
3	N-13		
4	O-15		
5	Ar-41		

表 5-7 空气浸没外照射和吸入内照射对公众年受照剂量

人员类别	总居留时间（h/a）	空气浸没外照射（mSv/a）	空气吸入内照射（mSv/a）	累积剂量（mSv/a）
公众				

5.2.1.2.3 同室操作定位用 X 射线装置所致人员受照剂量估算

患者每次接受质子治疗前，需要进行肿瘤定位。患者治疗机房内安装有 2 台固定式医用 X 射线装置，其中 1 台是 A277 型的 X 射线模拟定位机，配备两个 X 射线管，每个 X 射线管的最大管电压 150kV，最大管电流为 1000mA，定位时双球管同时出束。另 1 台是 SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机，最大管电压为 140kV，最大管电流为 800mA。机房内每次只使用其中的 1 台定位设备，且不与质子治疗系统同时开机。

操作 X 射线模拟定位机/CT 模拟定位机的工作由技师于质子治疗机房东南角的 X 射线影像亭内进行。

X 射线影像亭背靠质子治疗机房东侧屏蔽墙，北侧、西侧均采用 240mm 混凝土（约 2.7mm 铅当量）、南侧和顶部均采用 4mm 铅板防护（4mm 铅当量）。为便于观察患者，X 射线影像亭朝向治疗床的方向，采用 4mm 铅当量的铅玻璃观察窗。X 射线模拟定位机/CT 模拟定位机距离 X 射线影像亭最近约 3.8m。

X 射线模拟定位机和 CT 模拟定位机均属于医用 III 类射线装置，机房和人员的防护参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020），具体见表 5-8。

表 5-8 X 射线设备机房使用面积、单边长度和屏蔽防护铅当量要求

设备类型	《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）要求			
	机房最小有效使用面积（m^2）	机房最小单边长度（m）	有用线束方向铅当量（mmPb）	非有用线束方向铅当量（mmPb）
CT 机	30	4.5	2.5	2.5
双球管 X 射线设备	30	4.5	3.0	2.0

质子治疗机房的面积约为 84.6m^2，X 射线模拟定位机球管和 CT 模拟定位机距离 X 射线影像亭的最小距离约 3.8m。X 射线影像亭位于设备非有用线束方向，其屏蔽防护设计满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关要求，X 射线影像亭内辐射工作人员操作位置的辐射剂量率不超过 2.5μSv/h。

根据本项目质子治疗系统的最大工作负荷：每年 8000 次出束，每次因定位 X 射线装置出束时间不超过 15s，则承担同室操作的技师在 X 射线影像亭内受到照射的时间为 33.3h/a，由公式（5.3）估算该操作位的年受照剂量为 0.08mSv/a。

5.2.1.2.4 调试、维修维护所致人员受照剂量

质子治疗系统的调试、日常维修维护工作由设备生产单位负责，设备调试完成前未交付医院使用，设备投入运行后的维修维护都利用晚间或者节假日非治疗时间开展。医院内辐射工作人员不参与这部分工作，也不在质子治疗机房周围居留，因此可以不考虑调试、维修维护期间瞬发辐射对医院辐射工作人员的辐射影响。

调试、维修维护期间，质子治疗机房控制区周围辅房（隔离变压器室、工艺冷却水设备间、控制室、设备间、UPS 室、备件间、补风机房等）可能有提供设备维护的辐射工作人员，这部分人员不进入质子治疗机房，不接触感生放射性物质，但在机房周围居留的时间可能与质子治疗系统调试、维修维护时间有部分重叠，但居留时间不长。另外，在质子治疗机房周围的楼梯间、院内绿化等区域也有公众活动。

根据设备生产单位提供的资料，质子治疗系统初次安装后开展调试，出束时间不超过 720h/a（调试期不开展治疗），设备正式运行后每年维修维护出束时间

不超过 10h/a（与治疗时间错开）。调试和维修维护工况不超过本项目质子治疗系统治疗出束数模计算时采用的最大能量和束流损失工况。调试、维修维护期间质子治疗机房周围辐射剂量率水平可参考表 5-1 中的计算结果。考虑辐射工作人员和公众居留因子，调试、维修维护期间质子治疗机房周围人员的受照剂量见表 5-9。

表 5-9 调试、维修维护期间瞬发辐射致质子治疗机房周围人员年有效剂量

序号	参考点	居留因子 T[1)]	剂量率估算值[2)]（μSv/h）	受照时间（h/a）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）
调试期	地下一层至地上二层质子治疗机房外辅房					
	地上一层至二层质子治疗机房外楼梯间、院内绿化					
维修维护期	地下一层至地上二层质子治疗机房外辅房					
	地上一层至二层质子治疗机房外楼梯间、院内绿化					

注：1、居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A；

2、剂量率估算值取水平方向、垂直向上和垂直向下出束这三种工况下各参考点位的较大值。

根据表 5-9，质子治疗系统调试期出束，瞬发辐射致质子治疗机房周围辐射工作人员和公众受到的受照剂量最大值分别为 0.01mSv/a 和 0.02mSv/a；维修维护期出束，瞬发辐射致质子治疗机房周围辐射工作人员和公众受到的受照剂量均＜0.01mSv/a。

调试、维修维护期间，质子治疗机房出入口受到管控，不考虑机房内活化部件、活化空气等产生的感生放射性对公众的辐射影响。参考表 5-7 的计算结果，质子治疗系统调试、维修维护期间，质子治疗机房周围公众因空气浸没外照射和吸入内照射受到的年受照剂量也处于很低的水平。

5.2.1.2.5 人员受照剂量汇总

根据上述对本项目瞬发辐射、缓发辐射以及空气浸没外照射和吸入内照射、开展同室定位操作等照射途径的剂量贡献计算结果，辐射工作人员和公众年受照

剂量汇总见表 5-10。

表 5-10 质子治疗系统辐射工作人员和公众年受照剂量计算结果

人员类别		瞬发辐射外照射（mSv/a）	缓发辐射外照射（mSv/a）	空气浸没外照射和吸入内照射（mSv/a）	定位设备所致年受照剂量（mSv/a）	年受照剂量（mSv/a）	分摊后年受照剂量（mSv/a）
辐射工作人员	医师						
	技师						
	物理师						
	护士						
公众							

医院拟为质子治疗系统项目配备 3 名医师、4 名技师、3 名物理师和 4 名护士共 14 名辐射工作人员，该项目相关辐射工作由 14 人共同承担，医院拟采用轮班的方式，医师和物理师分为三组、技师和护士分为四组进行轮班，故本项目辐射工作人员的年有效剂量最大为 3.15mSv/a，周围公众的年有效剂量最大为 0.071mSv/a，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

5.2.2 射波刀

根据建设单位提供的资料，医院拟于质子中心的地上一层北部新建 1 座射波刀机房，配备 1 台 M6 FM 型射波刀，主要参数为：X 射线能量：6MV；靶至等中心的距离为 80cm，等中心点处输出剂量率：1000cGy/min。

5.2.2.1 场所辐射水平

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）的要求，在本项目射波刀机房外设定关注点。从保守角度出发，在射波刀机房设计的尺寸厚度基础上，假定射波刀最大功率运行并针对关注点最不利的情况进行预测计算。

本项目射波刀机房的关注点设定如图 5-26。

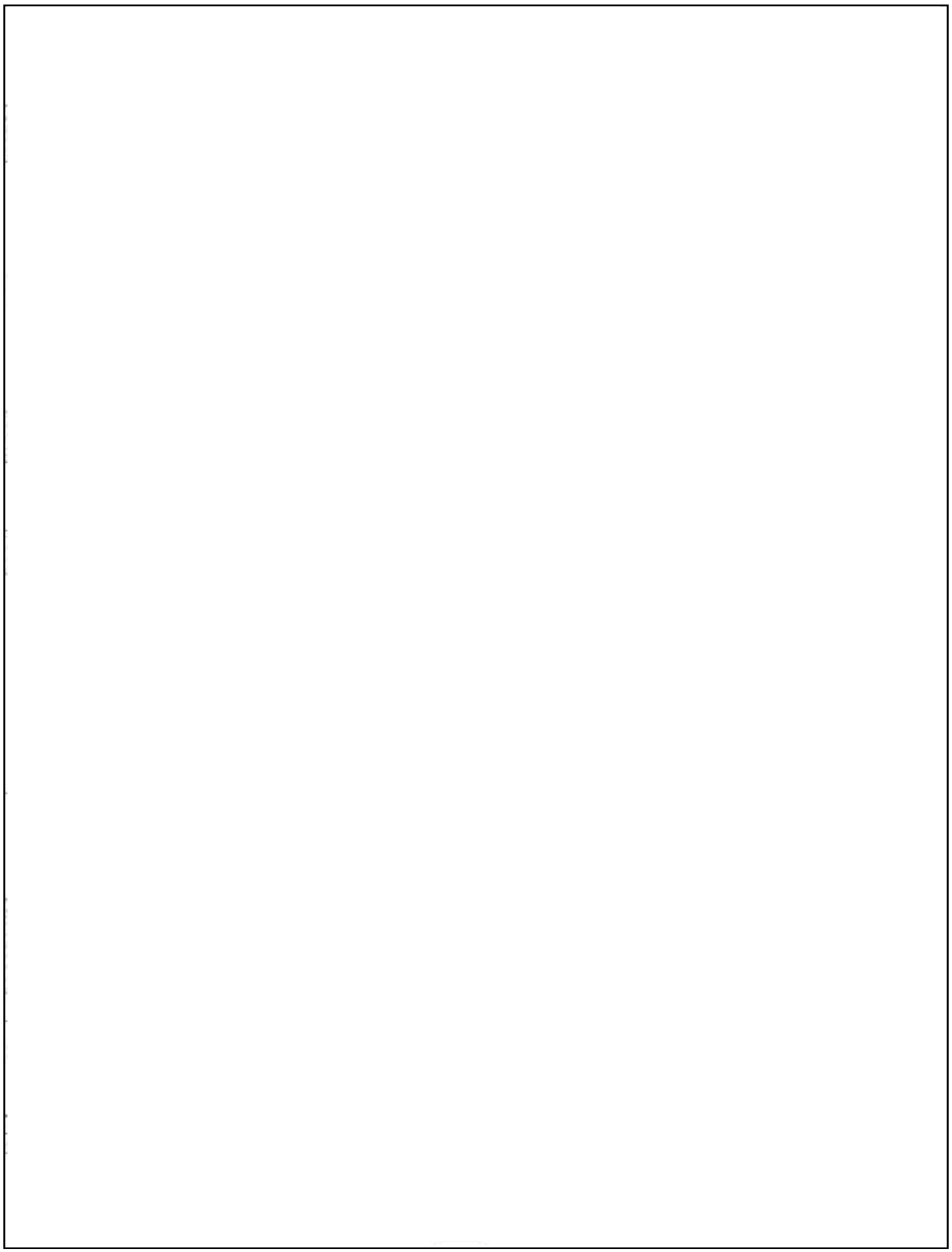

图 5-26 射波刀机房估算点位示意图

本项目射波刀是将小型加速器固定安装在机器人前臂，加速器在机器人臂的带动下可由空间任何方向以准直束线精确定位照射，故本项目在进行射波刀机房屏蔽设计核算时，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加

速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）中“D.3.3.1 各面均按有用线束（U＜0.05）考虑机房屏蔽”进行屏蔽计算。

（1）有用线束屏蔽设计核算

①射线路径（射线类型）：*o*→*a*（主射线），*o*→*b*（主射线），*o*→*c*（主射线），*o*→*d*（主射线），*o*→*e*（主射线），*o*→*f*（主射线），*o*→*l*（主射线），*o*→*g*（主射线）。

②计算模式及参数选择

使用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）的相关公式进行有用线束屏蔽设计核算，在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先按照公式（5.6）计算有效厚度 X_e（cm），按照公式（5.7）估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B，再按照公式（5.8）计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）。

$$X_e = X/\cos\theta = X \cdot \sec\theta \qquad (5.6)$$

式中：X—设计屏蔽厚度，cm；

θ—斜射角。

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \qquad (5.7)$$

式中，TVL_1（cm）和 TVL（cm）为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度，当未指明 TVL_1 时，TVL_1=TVL。对应 6MV 的 X 射线能量，查 GBZ/T 201.2-2011 的附录 B 表 B.1 的有用束值，混凝土 TVL_1 为 37cm，TVL 为 33cm；查 NCRP No.151，铅板的 TVL_1 和 TVL 均为 5.7cm。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \qquad (5.8)$$

式中：$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶（以下简称靶）1m 处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h，本项目为 3.84E+08μSv·m^2/h；

R—靶点至参考点的距离，m，本项目参考点均为相应墙外 30cm；

f—对有用线束为 1。

③预测计算结果汇总及评价

本项目射波刀机房外各关注点处的辐射剂量率预测结果见表 5-11，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 5-11 射波刀机房外关注点处辐射剂量率核算值

参数		东墙（*a* 点）	东墙（*b* 点）	南墙（*c* 点）	南墙（*d* 点）	西墙（*e* 点）	北墙（*f* 点）	顶部（*l* 点）	迷道入口处（*g* 点）
X（cm）									
X_e（cm）									
TVL_1（cm）	砼								
	铅								
TVL（cm）	砼								
	铅								
B									
R（m）									
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）									
f									
$\dot{H}$（μSv/h）									
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平									
评价		满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

注：本项目射波刀有用线束辐射在铅板中的 TVL_1 和 TVL 均为 5.7cm，取自 NCRP No.151。

（2）机房入口防护门屏蔽设计核算（g 点）

本项目射波刀机房入口设有直迷道，迷道口用 10mmPb 防护当量的防护门屏蔽散射至迷道入口处的散射线。

根据 GBZ/T201.2-2011，入口 g 点处的散射辐射剂量率 $\dot{H}_{oig}$ 按公式（5.9）计算。

$$\dot{H}_{oig}=\frac{\alpha_{ph}\cdot(F/400)}{R_1^2}\cdot\frac{\alpha_2\cdot A}{R_2^2}\dot{H}_0 \qquad (5.9)$$

式中：$\dot{H}_{oig}$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

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

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积，cm^2；

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

A—i 处的散射面积，m^2；

R_1—“$o\rightarrow i$”之间的距离，m；

R_2—“$i\rightarrow g$”之间的距离，m；

$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距靶 1m 处的最高剂量率，μSv·m^2/h。

表 5-12 迷道入口处的散射辐射剂量率核算值

参数	迷道入口处（g 点）
α_{ph}	
F（cm^2）	
α_2	
R_1（m）	
R_2（m）	

参数	迷道入口处（*g* 点）
A（m^2）	
$\dot{H}_0$（μSv·m^2/h）	
$\dot{H}_{oig}$（μSv/h）	

在给定防护门的铅屏蔽厚度 X（cm）时，防护门外 g 点处的辐射剂量率 $\dot{H}$（μSv/h）按公式（5.10）计算，预测结果见表 5-13。

$$\dot{H} = \dot{H}_{oig} \cdot 10^{-(X/TVL)} + \dot{H}_{og} \qquad (5.10)$$

式中：$\dot{H}_{og}$—g 处的泄漏辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_{oig}$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

TVL—辐射在铅中的什值层，cm。

表 5-13 迷道入口防护门外的辐射剂量率核算值

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

（3）预测计算结果汇总及评价

本项目射波刀机房外各关注点处的辐射剂量率预测结果见表 5-14。

表 5-14 射波刀机房外关注点处辐射剂量率理论估算结果汇总

参考点	剂量率估算值（μSv/h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
东墙（*a* 点）			满足
东墙（*b* 点）			满足
南墙（*c* 点）			满足
南墙（*d* 点）			满足
西墙（*e* 点）			满足
北墙（*f* 点）			满足
顶部（*l* 点）			满足
迷道入口防护门（*g* 点）			满足

由表 5-14 可知，本项目射波刀机房屏蔽设计能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求。

5.2.2.2 人员受照剂量

参考点人员的年有效剂量由《辐射防护导论》给出的公式进行估算：

$$D_{Eff} = H \cdot t \cdot T \cdot U \quad (5.11)$$

式中：D_{Eff}—参考点人员有效剂量，Sv；

H—参考点的辐射剂量率，Sv/h；

t—参考点处年受照时间，h；

T—居留因子；

U—使用因子。

将表 5-14 中射波刀机房外各典型参考点处的辐射剂量率估算值代入公式（5.11）。本项目射波刀年出束运行时间约 1000h，考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，根据公式（5.11）估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，计算

结果列于表 5-15。

表 5-15 射波刀机房周围人员年有效剂量

参考点		参考点所在场所	居留因子 T[1)]	使用因子 U[2)]	剂量率估算值（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
射波刀机房	东墙（a 点）	院内道路	1/40					满足
	东墙（b 点）	院内绿化	1/40					满足
	南墙（c 点）	控制室	1					满足
	南墙（d 点）	设备间	1/20					满足
	西墙（e 点）	2#医用直线加速器机房	1/8					满足
	北墙（f 点）	院内绿化	1/40					满足
	顶部（l 点）	屋顶	1/20					满足
	迷道入口防护门（g 点）		1/8					满足

注：1、居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A；
2、使用因子取值见 GBZ/T 201.2-2011 附录 D。

根据表 5-15 结果分析知，该项目射波刀投入运行后，辐射工作人员年有效剂量最大为 0.01mSv/a，周围公众年有效剂量＜0.01mSv/a，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

5.2.3 医用直线加速器（Vital Beam 型）

根据建设单位提供的资料，医院拟于质子中心的地上一层北部新建 2 座医用直线加速器机房（由西向东依次为 1#、2#医用直线加速器机房），于 1#医用直线加速器机房内由高新区院区肿瘤放疗中心一层直线加速器 1 室搬迁 1 台瓦里安 Vital Beam 型医用直线加速器，主要参数为：X 射线能量：6、10MV；电子线能量：6、9、12、16MeV；射线最大出射角：28°；1m 处最大输出剂量率：600cGy/min。

5.2.3.1 有用线束主屏蔽区的宽度核算

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

$$Y_p = 2\left[\left(a + SAD\right)\cdot \tan\theta + 0.3\right] \quad (5.12)$$

式中：Y_p—机房有用束主屏蔽区的宽度，m；

SAD—源轴距，m；

θ—治疗束的最大张角（相对束中的轴线），即射线最大出射角的一半；

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

将各参数代入公式（5.12），可估算出本项目的主屏蔽宽度核算结果并评价如表 5-16：

表 5-16 1#医用直线加速器机房主屏蔽区的宽度设计评价表

参数	东墙主屏蔽	西墙主屏蔽	屋顶主屏蔽
SAD（m）			
θ（°）			
a（m）			
Y_p 计算值（m）			
Y_p 设计值（m）			
评价结果	满足	满足	满足

由表 5-16 的理论估算结果可知，1#医用直线加速器机房东墙、西墙及屋顶主屏蔽区域屏蔽宽度均能够满足医用直线加速器的有用射线束的防护宽度要求。

5.2.3.2 场所辐射水平

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）的要求，在本项目 1#医用直线加速器机房外设定关注点。从保守角度出发，在 1#医用直线加速器机房设计的尺寸厚度基础上，假定医用直线加速器最大功率运行并针对关注点最不利的情况进行预测计算。

本项目 1#医用直线加速器机房的关注点设定如图 5-27。

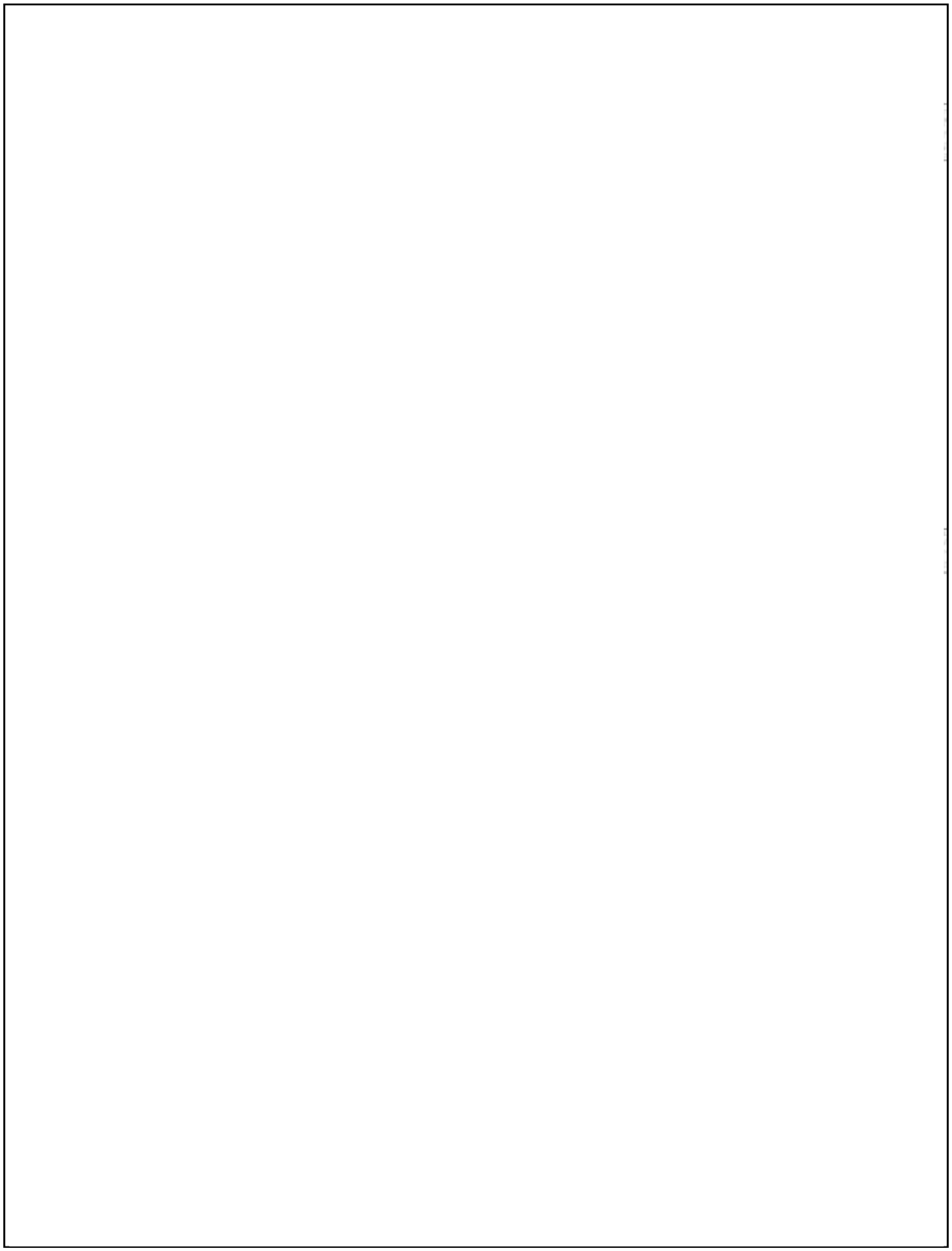

图 5-27 1#医用直线加速器机房估算点位示意图

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

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

②计算模式及参数选择

使用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.2-2011）的相关公式进行有用线束主屏蔽设计核算，在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先按照公式（5.6）计算有效厚度 X_e（cm），按照公式（5.7）估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B，再按照公式（5.8）计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）。

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta \qquad (5.6)$$

式中：X—设计屏蔽厚度，cm；

θ—斜射角。

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \qquad (5.7)$$

式中，TVL_1（cm）和 TVL（cm）为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度，当未指明 TVL_1 时，$TVL_1=TVL$。可根据加速器X射线能量查GBZ/T 201.2-2011的附录B表B.1。本项目中，对应10MV的X射线能量，混凝土 TVL_1=41cm，TVL=37cm。本项目中，a 点、b 点、l 点相应厚度主屏蔽的 B 值核算见表5-17。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \qquad (5.8)$$

式中：$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶（以下简称靶）1m处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h，本项目中，对应10MV的X射线能量，1m处的常用最高剂量率为3.60E+08μSv·m^2/h；

R—靶点至参考点的距离，m，本项目参考点均为相应墙外30cm；

f—对有用线束为1，对泄漏辐射为泄漏辐射比0.1%。

③预测计算结果

将相应主屏蔽厚度得出的辐射屏蔽透射因子 B 值代入，得到相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h），将其与本项目确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表5-17。

表 5-17 1#医用直线加速器机房主屏蔽外参考点辐射剂量率核算值

参数	东墙主屏蔽（*a* 点）	西墙主屏蔽（*b* 点）	屋顶主屏蔽（*l* 点）
X（cm）			
X_e（cm）			
TVL_1（cm）			
TVL（cm）			
B			
R（m）			
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）			
f			
$\dot{H}$（μSv/h）			
$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）			
评价	满足	满足	满足

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

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

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

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

②泄漏辐射计算模式及参数选择

泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。f=0.001（泄漏辐射比率，根据《放

射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取10^{-3}），公式（5.7）的TVL_1和TVL保守取附录B表B.1的泄漏辐射值，对应10MV的X射线能量，混凝土TVL_1=35cm，TVL=31cm。

③散射辐射计算模式及参数选择

在给定的屏蔽物质厚度X（cm）时，首先用公式（5.6）计算或直接在结构图中量出该屏蔽墙的有效厚度X_e（cm），按照公式（5.7）估算屏蔽物质的屏蔽透射因子B_s（其中患者散射辐射在混凝土中的什值层，查表B.4知，当散射角30°时，对于10MV射线，患者散射辐射在混凝土中什值层为28cm），再按照公式（5.13）计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）；

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^{\,2}} \cdot B \qquad (5.13)$$

式中：$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶（以下简称靶）1m处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h，本项目中，对应10MV的X射线能量，1m处的常用最高剂量率为3.60E+08μSv·m^2/h；

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。根据散射线能量和考察点斜射角，查GBZ/T 201.2-2011表B.2。本项目按10MV、30°取值，为3.18×10^{-3}。

F—治疗装置有用线束在等中心处的最大治疗野面积，cm^2，本项目为40cm×40cm=1600cm^2。

R_s—患者（位于等中心点）至关注点的距离，m。

④预测计算结果

叠加次屏蔽墙外泄漏辐射与患者一次散射辐射的瞬时剂量率值，将其与本项目确定的剂量率参考控制水平$\dot{H}_c$相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表5-18，其中X_e、R的取值由CAD图纸上读取。

表 5-18 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值

参数		东墙次屏蔽（c_1、c_2 点）	西墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）
X（cm）				
X_e（cm）				
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）				
泄漏辐射	TVL_1（cm）			
	TVL（cm）			
	B			
	R（m）			
	f			
	$\dot{H}$（μSv/h）			
散射辐射	TVL_1（cm）			
	TVL（cm）			
	R_s（m）			
	α_{ph}			
	B			
	F（cm²）			
	$\dot{H}$（μSv/h）			
$\dot{H}$（μSv/h）泄漏辐射和散射辐射的复合作用				
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平				
评价		满足	满足	满足

（3）侧屏蔽墙屏蔽设计核算（北墙 e 点、迷道墙外 f 点）

①射线路径（射线类型）：$o\rightarrow e$（泄漏射线），$o\rightarrow f$（泄漏射线）。

②计算模式及参数选择

该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。公式（5.8）中，f=0.001（泄漏辐射比率，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}）。公式（5.7）的 TVL_1 和 TVL 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 10MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=35cm，TVL=31cm。

③预测计算结果

e 点、f 点的辐射剂量率预测结果见下表 5-19，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 5-19 1#医用直线加速器机房侧屏蔽外泄漏辐射剂量率核算值

参数	北墙（e 点）	南侧迷道墙外（f 点）
X（cm）		
X_e（cm）		
TVL_1（cm）		
TVL（cm）		
B		
R（m）		
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		
f		
$\dot{H}$（μSv/h）		
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平		
评价	满足	满足

（4）迷道外墙屏蔽设计核算（迷道外墙 k 点）

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

②计算模式及参数选择

本项目有用线束不向迷道内墙照射，该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。公式（5.8）中，f=0.001（泄漏辐射比率，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}）。公式（5.7）的 TVL_1 和 TVL 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 10MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=35cm，TVL=31cm。

③预测计算结果

k 点的辐射剂量率预测结果见表 5-20，o_2 至 k 的泄漏辐射的斜射角较小，通常以 0°垂直入射保守估算，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 5-20 迷道外墙泄漏辐射剂量率核算值

参数	南侧迷道外墙（k 点）
X（cm）	
X_e（cm）	
TVL_1（cm）	
TVL（cm）	
B	
R（m）	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	
f	
$\dot{H}$（μSv/h）	
剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）	
评价	满足

（5）迷道内墙屏蔽设计核算（g 点）

根据 GBZ/T201.2-2011，g 点处同时受到迷道内散射辐射（$o_1 \rightarrow o \rightarrow i \rightarrow g$）及

加速器的泄漏辐射 o_1 经迷道内墙屏蔽后在迷道入口 g 点的辐射剂量。

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

②泄漏辐射计算模式及参数选择

g 点泄漏辐射剂量核算方法同 f 点。

其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读出，g 点的辐射剂量率预测结果见表 5-21。

表 5-21 1#医用直线加速器机房迷道入口处的泄漏辐射剂量率核算值

参数	迷道入口处（g 点）
X（cm）	
X_e（cm）	
TVL_1（cm）	
TVL（cm）	
B	
R（m）	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	
f	
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	
剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）*	
评价	满足

注：根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）中 4.3.2.5.1b），“核算加速器的泄漏辐射（以偏离 o 的位置 o_1 为中心）经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 g 的辐射剂量。核算结果应为 g 处的参考控制水平的一个分数（应小于 1/4）”，故本项目取 0.8μSv/h。

③散射辐射计算模式及参数选择

根据 GBZ/T 201.2-2011，入口 g 点处的散射辐射剂量率 $\dot{H}_{oig}$ 按公式（5.9）计算。

$$\dot{H}_{oig}=\frac{\alpha_{ph}\cdot(F/400)}{R_1^2}\cdot\frac{\alpha_2\cdot A}{R_2^2}\dot{H}_0 \qquad (5.9)$$

式中：$\dot{H}_{oig}$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

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

F—治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积，cm^2；

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

A—i 处的散射面积，m^2；

R_1—“$o\rightarrow i$”之间的距离，m；

R_2—“$i\rightarrow g$”之间的距离，m；

$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距靶 1m 处的最高剂量率，μSv·m^2/h。

表 5-22 迷道入口处的散射辐射剂量率核算值

参数	迷道入口处（g 点）
α_{ph}	
F（cm^2）	
α_2	
R_1（m）	
R_2（m）	
A（m^2）	
$\dot{H}_0$（μSv·m^2/h）	
$\dot{H}_{oig}$（μSv/h）	

③预测计算结果

在给定防护门的铅屏蔽厚度 X（cm）时，防护门外 g 点处的辐射剂量率 $\dot{H}$（μSv/h）按公式（5.10）计算，预测结果见表 5-23。

$$\dot{H} = \dot{H}_{oig} \cdot 10^{-(X/TVL)} + \dot{H}_{og} \qquad (5.10)$$

式中：$\dot{H}_{og}$—g 处的泄漏辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_{oig}$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

TVL—辐射在铅中的什值层，cm。

表 5-23 迷道入口防护门外的辐射剂量率核算值

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

（6）预测计算结果汇总及评价

综上所述，1#医用直线加速器机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇总见表 5-24。

表 5-24 1#医用直线加速器机房墙、顶、门外辐射剂量率理论估算结果汇总

参考点	剂量率估算值（μSv/h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
东墙主屏蔽（a 点）			满足

参考点	剂量率估算值（μSv/h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
西墙主屏蔽（*b* 点）			满足
屋顶主屏蔽（*l* 点）			满足
东墙次屏蔽（c_1、c_2 点）			满足
西墙次屏蔽（d_1、d_2 点）			满足
屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）			满足
北墙（*e* 点）			满足
南侧迷道墙外（*f* 点）			满足
南侧迷道外墙（*k* 点）			满足
迷道入口防护门（*g* 点）			满足

由表 5-16 和表 5-24 可知，本项目 1#医用直线加速器机房主屏蔽区宽度及屏蔽防护设计能够满足《放射治疗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）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求。

（7）电子线治疗时辐射防护评价

医用直线加速器处于电子束模式下使用初始电子线进行浅层治疗时，会产生电子线。本项目医用直线加速器最大 X 射线能量为 10MV，电子线最大能量为 16MeV，由于电子束的穿透能力远小于 X 射线，对治疗 X 射线的屏蔽机房完全满足屏蔽电子束的要求。电子束治疗时，平均束流为 nA 量级，X 射线治疗时平均束流为μA 量级，治疗电子束所产生的韧致辐射远小于 X 射线治疗时的辐射，即使电子线能量大于 X 射线最大能量，对屏蔽电子束的韧致辐射所需要的厚度也低于对于 MV 级 X 射线的屏蔽要求。

5.2.3.3 人员受照剂量

参考点人员的年有效剂量由《辐射防护导论》给出的公式进行估算：

$$D_{Eff} = H \cdot t \cdot T \cdot U \qquad (5.11)$$

将表 5-24 中 1#医用直线加速器机房外各典型参考点处的辐射剂量率估算值代入公式（5.11）。本项目瓦里安 Vital Beam 型医用直线加速器年出束运行时间约 625h（日接诊量最大 50 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，患者治疗照射时间平均按 3min 计，故年出束运行时间为 625h），考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，根据公式（5.11）估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，计算结果列于表 5-25。

表 5-25 1#医用直线加速器机房周围人员年有效剂量

参考点		参考点所在场所	居留因子 T^*	使用因子 U	剂量率估算值（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
1#医用直线加速器机房	东墙主屏蔽（a 点）	2#医用直线加速器机房						满足
	西墙主屏蔽（b 点）	变配电间						满足
	屋顶主屏蔽（l 点）	屋顶						满足
	东墙次屏蔽（c_1、c_2 点）	2#医用直线加速器机房						满足
	西墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	后装治疗机房/变配电间						满足
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	屋顶						满足
	北墙（e 点）	院内绿化						满足
	南侧迷道墙外（f 点）	控制室						满足
	南侧迷道外墙（k 点）	设备间						满足
	迷道入口防护门（g 点）							满足

注：居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A。

根据表 5-25 结果分析知，该项目医用直线加速器投入运行后，1#医用直线加速器机房外辐射工作人员的年有效剂量＜0.01mSv/a，周围公众的年有效剂量最大为 0.03mSv/a，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB

18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

5.2.4 医用直线加速器（Halcyon 型）

根据建设单位提供的资料，医院拟于质子中心的地上一层北部新建 2 座医用直线加速器机房（由西向东依次为 1#、2#医用直线加速器机房），于 2#医用直线加速器机房内配备 1 台 Halcyon 型医用直线加速器，主要参数为：X 射线能量：6MV；1m 处最大输出剂量率：800cGy/min。

5.2.4.1 有用线束主屏蔽区的宽度核算

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

$$Y_p = 2\left[\left(a + SAD\right)\cdot \tan\theta + 0.3\right] \qquad (5.12)$$

式中：Y_p—机房有用束主屏蔽区的宽度，m；

SAD—源轴距，m；

θ—治疗束的最大张角（相对束中的轴线），即射线最大出射角的一半；

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

将各参数代入公式（5.12），可估算出本项目的主屏蔽宽度核算结果并评价如表 5-26：

表 5-26 2#医用直线加速器机房主屏蔽区的宽度设计评价表

参数	东墙主屏蔽	西墙主屏蔽	屋顶主屏蔽
SAD（m）			
θ（°）			

参数	东墙主屏蔽	西墙主屏蔽	屋顶主屏蔽
a（m）			
Y_p 计算值（m）			
Y_p 设计值（m）			
评价结果	满足	满足	满足

由表 5-26 的理论估算结果可知，2#医用直线加速器机房东墙、西墙及屋顶主屏蔽区域屏蔽宽度均能够满足医用直线加速器的有用射线束的防护宽度要求。

5.2.4.2 场所辐射水平

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）的要求，在本项目 2#医用直线加速器机房外设定关注点。从保守角度出发，在 2#医用直线加速器机房设计的尺寸厚度基础上，假定 Halcyon 型医用直线加速器最大功率运行并针对关注点最不利的情况进行预测计算。

本项目 2#医用直线加速器机房的关注点设定如图 5-28。

图 5-28 2#医用直线加速器机房估算点位示意图

（1）有用线束主屏蔽设计核算（西墙 a 点、东墙 b 点和屋顶 l 点）

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

②计算模式及参数选择

使用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.2-2011）的相关公式进行有用线束主屏蔽设计核算，在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先按照公式（5.6）计算有效厚度 X_e（cm），按照公式（5.7）估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B，再按照公式（5.8）计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）。

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta \qquad (5.6)$$

$$B = 10^{-(X_e+TVL-TVL_1)/TVL} \qquad (5.7)$$

式中，TVL_1（cm）和 TVL（cm）为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度，当未指明 TVL_1 时，TVL_1=TVL。可根据加速器 X 射线能量查 GBZ/T 201.2-2011 的附录 B 表 B.1。本项目中，对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1 为 37cm，TVL 为 33cm；查 NCRP No.151，铅板的 TVL_1 和 TVL 均为 5.7cm。本项目中，a 点、b 点、l 点相应厚度主屏蔽的 B 值核算见表 5-27。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \qquad (5.8)$$

式中：$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶（以下简称靶）1m 处的常用最高剂量率，μSv·m²/h，本项目为 4.80E+08μSv·m²/h。

③预测计算结果

Halcyon 型医用直线加速器有用线束方向自带自屏蔽装置，有用线束在穿过患者的身体后会穿过该设备内部的屏蔽壳体（内含 172mm 铅板），将相应主屏蔽厚度得出的辐射屏蔽透射因子 B 值代入，得到相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h），将其与本项目确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表 5-27。

表 5-27 2#医用直线加速器机房主屏蔽外参考点辐射剂量率核算值

参数	西墙主屏蔽（*a* 点）	东墙主屏蔽（*b* 点）	屋顶主屏蔽（*l* 点）
X（cm）			

参数		西墙主屏蔽（*a* 点）	东墙主屏蔽（*b* 点）	屋顶主屏蔽（*l* 点）
X_e（cm）				
TVL_1（cm）	砼			
	铅			
TVL（cm）	砼			
	铅			
B				
R（m）				
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）				
f				
$\dot{H}$（μSv/h）				
$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）				
评价		满足	满足	满足

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

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

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

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

②泄漏辐射计算模式及参数选择

泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。f=0.001（泄漏辐射比率，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取10^{-3}），公式（5.7）的TVL_1和TVL保守取附录B表B.1的泄漏辐射值，对应6MV的X射线能量，混凝土TVL_1=34cm，TVL=29cm。

③散射辐射计算模式及参数选择

在给定的屏蔽物质厚度X（cm）时，首先用公式（5.6）计算或直接在结构图中量出该屏蔽墙的有效厚度X_e（cm），按照公式（5.7）估算屏蔽物质的屏蔽透射因子B_s（其中患者散射辐射在混凝土中的什值层，查表B.4知，当散射角30°时，对于6MV射线，患者散射辐射在混凝土中什值层为26cm），再按照公式（5.13）计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）；

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^{\,2}} \cdot B \qquad (5.13)$$

式中：$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距产生治疗X射线束的靶（以下简称靶）1m处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h，本项目中，对应6MV的X射线能量，1m处的常用最高剂量率为4.80E+08μSv·m^2/h；

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。根据散射线能量和考察点斜射角，查GBZ/T 201.2-2011表B.2。本项目按6MV、30°取值，为2.77×10^{-3}。

F—治疗装置有用线束在等中心处的最大治疗野面积，cm^2，本项目为28cm×28cm=784cm^2。

R_s—患者（位于等中心点）至关注点的距离，m。

④预测计算结果

叠加次屏蔽墙外泄漏辐射与患者一次散射辐射的瞬时剂量率值，将其与本项目确定的剂量率参考控制水平$\dot{H}_c$相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表5-28，其中X_e、R的取值由CAD图纸上读取。

表 5-28 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值

参数		西墙次屏蔽（c_1、c_2 点）	东墙次屏蔽（d_1 点）	东墙次屏蔽（d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）
X（cm）					
X_e（cm）					
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）					
泄漏辐射	TVL_1（cm）				
	TVL（cm）				
	B				
	R（m）				
	f				
	$\dot{H}$（μSv/h）				
散射辐射	TVL_1（cm）				
	TVL（cm）				
	R_s（m）				
	α_{ph}				
	B				
	F（cm²）				
	$\dot{H}$（μSv/h）				
$\dot{H}$（μSv/h）泄漏辐射和散射辐射的复合作用					
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平					
评价		满足	满足	满足	满足

（3）侧屏蔽墙屏蔽设计核算（北墙 e 点、迷道墙外 f 点）

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

②计算模式及参数选择

该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。公式（5.8）中，*f*=0.001（泄漏辐射比率，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}）。公式（5.7）的 TVL_1 和 *TVL* 为附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=34cm，*TVL*=29cm。

③预测计算结果

e 点、*f* 点的辐射剂量率预测结果见表 5-29，其中 X_e、*R* 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 5-29 2#医用直线加速器机房侧屏蔽墙外泄漏辐射剂量率核算值

参数	北墙（*e* 点）	南侧迷道墙外（*f* 点）
X（cm）		
X_e（cm）		
TVL_1（cm）		
TVL（cm）		
B		
R（m）		
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		
f		
$\dot{H}$（μSv/h）		
$\dot{H}_c$（μSv/h） 剂量率参考控制水平		
评价	满足	满足

（4）迷道外墙屏蔽设计核算（迷道外墙 *k* 点）

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

②计算模式及参数选择

本项目有用线束不向迷道内墙照射，该区考虑泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。公式（5.8）中，f=0.001（泄漏辐射比率，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}）。公式（5.7）的 TVL_1 和 TVL 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，对应 6MV 的 X 射线能量，混凝土 TVL_1=34cm，TVL=29cm。

③预测计算结果

k 点的辐射剂量率预测结果见表 5-30，o_2 至 k 的泄漏辐射的斜射角较小，通常以 0°垂直入射保守估算，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 5-30 迷道外墙泄漏辐射剂量率核算值

参数	南侧迷道外墙（k 点）
X（cm）	
X_e（cm）	
TVL_1（cm）	
TVL（cm）	
B	
R（m）	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	
f	
$\dot{H}$（μSv/h）	
剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）	
评价	满足

（4）迷道入口处辐射水平核算（g 点）

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

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

②泄漏辐射计算模式及参数选择

g 点泄漏辐射剂量核算方法同 f 点。

其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读出，g 点的辐射剂量率预测结果见表 5-31。

表 5-31 2#医用直线加速器机房迷道入口处的泄漏辐射剂量率核算值

参数	迷道入口处（g 点）
X（cm）	
X_e（cm）	
TVL_1（cm）	
TVL（cm）	
B	
R（m）	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	
f	
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	
剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）	
评价	满足

注：根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）中 4.3.2.5.1b），“核算加速器的泄漏辐射（以偏离 o 的位置 o_1 为中心）经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 g 的辐射剂量。核算结果应为 g 处的参考控制水平的一个分数（应小于 1/4）”，故本项目取 1.5μSv/h。

③散射辐射计算模式及参数选择

根据 GBZ/T 201.2-2011，入口 g 点处的散射辐射剂量率 $\dot{H}_{oig}$ 按公式（5.9）计算。

$$\dot{H}_{oig}=\frac{\alpha_{ph}\cdot(F/400)}{R_1^2}\cdot\frac{\alpha_2\cdot A}{R_2^2}\dot{H}_0 \qquad (5.9)$$

表 5-32 迷道入口处的散射辐射剂量率核算值

参数	迷道入口处（*g* 点）
α_{ph}	
F（cm²）	
α_2	
R_1（m）	
R_2（m）	
A（m²）	
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	
$\dot{H}_{oig}$（μSv/h）	

③预测计算结果

在给定防护门的铅屏蔽厚度 X（cm）时，防护门外 g 点处的辐射剂量率 $\dot{H}$（μSv/h）按公式（5.10）计算，预测结果见表 5-33。

$$\dot{H}=\dot{H}_{oig}\cdot 10^{-(X/TVL)}+\dot{H}_{og} \qquad (5.10)$$

表 5-33 迷道入口防护门外的辐射剂量率核算值

参数	机房入口防护门外（*g* 点）
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	
$\dot{H}_{oig}$（μSv/h）	
X（cm）	
TVL（cm）	
防护门外的辐射剂量率 $\dot{H}$（μSv/h）	
剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$（μSv/h）	

参数	机房入口防护门外（*g* 点）
评价	满足

（5）预测计算结果汇总及评价

综上所述，2#医用直线加速器机房墙、顶、门外理论估算结果汇总见表 5-34。

表 5-34 2#医用直线加速器机房墙、顶、门外理论估算结果汇总

参考点	剂量率估算值（μSv/h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
西墙主屏蔽（*a* 点）			满足
东墙主屏蔽（*b* 点）			满足
屋顶主屏蔽（*l* 点）			满足
西墙次屏蔽（c_1、c_2 点）			满足
东墙次屏蔽（d_1 点）			满足
东墙次屏蔽（d_2 点）			满足
屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）			满足
北墙（*e* 点）			满足
南侧迷道墙外（*f* 点）			满足
南侧迷道外墙（*k* 点）			满足
迷道入口防护门（*g* 点）			满足

由表 5-26 和表 5-34 可知，本项目 2#医用直线加速器机房主屏蔽区宽度及屏蔽防护设计能够满足《放射治疗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）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求。

5.2.4.3 人员受照剂量

参考点人员的年有效剂量由《辐射防护导论》给出的公式进行估算：

$$D_{Eff} = H \cdot t \cdot T \cdot U \quad (5.11)$$

将表 5-34 中 2#医用直线加速器机房外各典型参考点处的辐射剂量率估算值代入公式（5.11）。本项目 Halcyon 型医用直线加速器年出束运行时间约 333.3h（日接诊量最大 40 人次，周工作 5 天，每年工作 50 周，患者治疗照射时间平均按 2min 计，故年出束运行时间为 333.3h），考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，根据公式（5.11）估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，计算结果列于表 5-35。

表 5-35 2#医用直线加速器机房周围人员年有效剂量

参考点		参考点所在场所	居留因子 T*	使用因子 U	剂量率估算值（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
2#医用直线加速器机房	西墙主屏蔽（*a* 点）	1#医用直线加速器机房						满足
	东墙主屏蔽（*b* 点）	射波刀机房						满足
	屋顶主屏蔽（*l* 点）	屋顶						满足
	西墙次屏蔽（c_1、c_2 点）	1#医用直线加速器机房						满足
	东墙次屏蔽（d_1 点）	射波刀机房						满足
	东墙次屏蔽（d_2 点）	院内绿化						满足
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	屋顶						满足
	北墙（*e* 点）	院内绿化						满足
	南侧迷道墙外（*f* 点）	控制室						满足
	南侧迷道外墙（*k* 点）	设备间						满足
	迷道入口防护门（*g* 点）							满足

注：居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A。

根据表 5-35 结果分析知，该项目 Halcyon 型医用直线加速器投入运行后，

2#医用直线加速器机房外辐射工作人员年有效剂量＜0.01mSv/a，周围公众年有效剂量最大为 0.01mSv/a，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

5.2.5 后装机（Ⅲ类放射源）



图 5-29 后装治疗机房估算点位示意图

根据建设单位提供的资料，医院拟于质子中心的地上一层西北角新建 1 座后

装治疗机房，将位于连云港市海州区振华东路 6 号高新区院区肿瘤放疗中心一层后装治疗机房内的 KL-HDR-C 型后装机搬迁至此，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 3.70E+11Bq，用于腔内、组织间等肿瘤的放射治疗。

5.2.5.1 场所辐射水平

本项目后装机治疗时，假设放射源全部被输送至施源器，则辐射环境影响预测时保守将其视为点源来预测计算机房治疗室屏蔽防护能力。辐射屏蔽防护及估算点位示意图见图 5-29（预测点位取墙体或者防护门外 30cm 处）。

（1）墙体及顶部辐射防护设计核算

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

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \qquad (5.14)$$

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

f—对有用线束为 1；

R—辐射源至关注点的距离，m；

B—辐射屏蔽透射因子。

$$\dot{H}_0 = A \cdot K_\gamma \qquad (5.15)$$

式中：A—放射源的活度，MBq；

K_γ—放射源的空气比释动能率常数，在屏蔽计算中以周围剂量当量作为空气比释动能的近似，此时，K_γ的单位记为μSv/（h·MBq），查自（GBZ/T 201.3-2014）附录 C；

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \qquad 公式（5.7）$$

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta \qquad 公式（5.6）$$

表 5-36 后装治疗机房辐射屏蔽防护效果预测结果

参数		东墙（*a* 点）	东墙（*b* 点）	南墙（*c* 点）	西墙（*d* 点）	北墙（*e* 点）	顶部（*l* 点）	防护门*（*g* 点）
屏蔽厚度 X（mm）								
等效厚度 X_e（mm）								
TVL_1（mm）	砼							
	铅							
TVL（mm）	砼							
	铅							
B								
A（MBq）								
K_r（μSv/h·MBq）								
R（m）								
f								
$\dot{H}_0$（μSv/h）								
$\dot{H}$（μSv/h）								
控制剂量率（μSv/h）								
评价		满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

注：此处为直接透过迷道内墙和防护门的剂量估算。

（2）迷道防护门辐射防护设计核算

本项目后装治疗机房入口设有直迷道，迷道口用 10mmPb 防护当量的防护门屏蔽散射至迷道入口处的散射线。

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

$$H_s = \frac{A \cdot K_\gamma \cdot S_w \cdot \alpha_w}{R_1^2 \cdot R_2^2} \quad (5.16)$$

式中：A—放射源的活度，MBq；本项目 ^{192}Ir 放射源活度 A 为 3.70E+05MBq；

K_γ—放射源的空气比释动能率常数，在屏蔽计算中以周围剂量当量作为空气比释动能的近似，此时，K_γ的单位记为μSv/（h·MBq），查自（GBZ/T 201.3-2014）附录 C；

S_w—迷道内口墙的散射面积，其为辐射源和机房入口共同可视见的墙区面积，m^2；

a_w—散射体的散射因子，本项目取 3.39×10^{-2}；（取值参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）表 C.4，保守取 0.25MeV 的 45°入射辐射和 0°反散射的散射因子）。

R_1—辐射源至散射体中心点的距离，m；

R_2—散射体中心点至计算点的距离，m。

表 5-37 后装治疗机房入口 *g* 点处辐射剂量率计算结果

参数	取值
A 放射源活度（MBq）	
K_γ空气比释动能率常数（μSv/（h·MBq））	
S_w（m^2）	
a_w（散射体的散射因子）	
R_1（m）	
R_2（m）	
$\dot{H}$ 预测值（μSv/h）	

根据公式（5.16）计算得机房入口前的散射辐射剂量率为 17.03μSv/h，后装治疗机房迷道设有铅当量为 10mm 的防护门，保守取 ^{192}Ir 产生的γ射线经过散射后至迷道入口 g 处的能量约为 0.2MeV，铅中的 TVL 值为 5.0mm，因此，经过机房入

口防护门的屏蔽，*g* 点处的辐射剂量率为 0.170μSv/h。叠加直接透过迷道内墙和防护门的剂量（5.51E-05μSv/h），合计 *g* 点处的辐射剂量率为 0.170μSv/h。

（3）预测计算结果汇总及评价

综上所述，后装治疗机房外各关注点处的辐射剂量率预测结果见表 5-38。

表 5-38 后装治疗机房外关注点处辐射剂量率理论估算结果汇总

参考点	剂量率估算值（μSv/h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
东墙（*a* 点）			满足
东墙（*b* 点）			满足
南墙（*c* 点）			满足
西墙（*d* 点）			满足
北墙（*e* 点）			满足
顶部（*l* 点）			满足
迷道入口防护门（*g* 点）			满足

根据表 5-38 结果分析知，该后装机投入运行后，后装治疗机房外辐射剂量率均小于各关注点的剂量率参考控制水平，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求。

5.2.5.2 人员受照剂量

参考点人员的年有效剂量由《辐射防护导论》给出的公式进行估算：

$$D_{Eff} = H \cdot t \cdot T \cdot U \qquad (5.11)$$

将表 5-38 中后装治疗机房外各典型参考点处的辐射剂量率估算值代入公式（5.11）。本项目后装机周治疗时间约为 10h，年运行时间约 500h，根据各参考点处年受照时间，并考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，根据公式（5.11）估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，计算结果列于表 5-39。

表 5-39 后装治疗机房周围人员年有效剂量

参考点		参考点所在场所	居留因子 T^*	使用因子 U	剂量率估算值（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
后装治疗机房	东墙（a 点）	1#医用直线加速器机房						满足
	东墙（b 点）	设备间						满足
	南墙（c 点）	控制室						满足
	西墙（d 点）	柴油发电机房						满足
	北墙（e 点）	变配电间						满足
	屋顶（l 点）	屋顶						满足
	迷道入口防护门（g 点）							满足

注：居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A。

在进行放射治疗前，工作人员需进入机房对患者进行摆位，此时放射源处于贮存状态，工作人员进行摆位及取消摆位时距离设备约 1m，根据《后装γ源近距离治疗质量控制检测规范》（WS 262-2017）中的相关要求：距离贮源器表面 100cm 处的球面上，任何一点因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 5μSv/h，平均每位患者摆位及取消摆位分别为 1min，年门诊量最大 2000 人次，则辐射工作人员摆位过程中年有效剂量为 0.33mSv/a。根据表 5-39 理论计算结果，控制室辐射工作人员年剂量估算值＜0.01mSv/a，叠加后，后装治疗项目辐射工作人员年有效剂量为＜0.34mSv/a；根据表 5-39 结果分析知，本项目后装机运行后周围公众年有效剂量为 0.01mSv/a，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

5.2.6 Ⅲ类射线装置

根据建设单位提供的资料，医院拟于质子中心的地上一层南部新建 1 座 CT 模拟定位机房，将位于连云港市海州区振华东路 6 号高新区院区肿瘤放疗中心一层 CT 模拟机房内的 SOMATOM Confidence 型 CT 模拟定位机搬迁至此，主要参

数为：最大管电压为 140kV，最大管电流为 800mA。

5.2.6.1 场所辐射水平

本项目按额定管电压 140kV 核算 CT 模拟定位机房各屏蔽部位屏蔽材料的等效铅当量厚度。本项目 CT 模拟定位机房辐射防护设计及其等效铅当量见表 5-40。

表 5-40 CT 模拟定位机房辐射防护设计及其等效铅当量一览表

参数		设计厚度 1)	铅当量 2)	屏蔽要求	评价
CT 模拟定位机房	四侧墙体			CT 机房屏蔽防护铅当量厚度要求：有用线束方向、非有用线束方向铅当量 2.5mm。	满足
	防护门				满足
	观察窗				满足
	顶部				满足
	面积	54.14m^2，最小单边长度为 7.20m		CT 机房内最小有效新建面积不小于 30m^2，单边长度不小于 4.5m。	满足

注：1、混凝土密度为 2.35g/cm^3，铅板密度为 11.3g/cm^3，实心砖密度为 1.65g/cm^3；

2、混凝土参照 GBZ 130-2020 中表 C.5 及表 C.6 中等效铅当量厚度数值采用插值法求得，由于标准中未给出实心砖的等效铅当量厚度相关值，本项目参考《辐射防护手册（第三分册）》表 3.3 中相关参数使用插值法及经验求得。

由表 5-40 可知，本项目 CT 模拟定位机房的屏蔽防护铅当量和使用面积、单边长度均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中相关要求，故其机房周围剂量当量率不大于 2.5μSv/h。

5.2.6.2 人员受照剂量

每名患者在进行射波刀、医用直线加速器或后装机首次治疗前，需要利用 CT 模拟定位机对其进行治疗前的模拟定位。本项目每年使用射波刀、医用直线加速器和后装机进行治疗的患者总人数约为 29500 人。

每次模拟定位过程中，CT 模拟定位机平均出束时间为 15s，每年进行模拟定位次数取 30000 次，则出束时间按 125h/a 计，根据公式（5.11）估算 CT 模拟

定位机房周围辐射工作人员和公众的年有效剂量，计算结果见表 5-41。

表 5-41 CT 模拟定位机房周围人员年有效剂量

参考点所在场所	居留因子 T^*	使用因子 U	年受照时间（h）	剂量率估算值（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	保护对象（mSv/a）	结论
控制室	1	1	125	＜2.5	＜0.31	5	满足
走廊、多媒体会议室	1/5	1			＜0.06	0.1	满足

注：居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A。

医院拟为 CT 模拟定位机项目配备 2 名技师轮班操作，根据表 5-41 结果分析知，CT 模拟定位机房外辐射工作人员的年有效剂量＜0.16mSv/a，周围公众的年有效剂量＜0.06mSv/a，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

5.2.7 辐射剂量叠加分析

5.2.7.1 辐射工作人员辐射剂量叠加

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

本项目质子中心地上一层放疗机房（射波刀机房、2 座医用直线加速器机房和后装治疗机房）相邻布设，共用屏蔽墙体，故辐射工作人员进入治疗室协助患者进行摆位过程中及位于机房南侧控制室或设备间时，均可能受到相邻机房内设备出束状态下对其的辐射影响。

以 1#医用直线加速器机房辐射工作人员为例，人员位于控制室或设备间时，可能受到 Vital Beam 型医用直线加速器和后装机出源状态下对其的辐射影响（＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a）；人员进入治疗室协助患者进行摆位过程中，可能受到 Halcyon 型医用直线加速器和后装机出源状态下对其的辐射影响（＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a），叠加相应辐射影响后，1#医用直线加速器机房的辐射工作人员的年有效剂量＜0.04mSv/a。以此类推，射波刀机房的辐射工作人员

的年有效剂量＜0.03mSv/a（＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a），2#医用直线加速器机房的辐射工作人员的年有效剂量＜0.04mSv/a（＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a），后装治疗机房的辐射工作人员的年有效剂量＜0.37mSv/a（＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a+＜0.01mSv/a+＜0.34mSv/a）。

医院拟为射波刀、医用直线加速器、后装机项目配备 2 名医师、8 名技师、2 名物理师和 8 名护士共 20 名辐射工作人员，该项目相关辐射工作由 20 人分 2 班共同承担，则辐射工作人员的年有效剂量＜0.24mSv/a，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv）。

5.2.7.2 公众辐射剂量叠加

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

本项目质子治疗机房西侧与射波刀机房东侧走廊处公众可能受到质子治疗系统和射波刀同时出束时造成的叠加辐射影响，根据表 5-2 及表 5-15 计算结果，该处公众年有效剂量＜0.06mSv/a（0.05mSv/a+＜0.01mSv/a）；本项目 1#、2#医用直线加速器机房南侧准备区处公众可能受到 2 台医用直线加速器同时出束时造成的叠加辐射影响，根据表 5-25 及表 5-35 计算结果，该处公众年有效剂量最大约为 0.04mSv/a（0.03mSv/a+0.01mSv/a），均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

仅考虑距离对射线的衰减作用，本项目评价范围内环境保护目标处辐射剂量率及公众年受照剂量见表 5-42 至表 5-43。

表 5-42 评价范围内环境保护目标处辐射剂量率理论估算结果

环境保护目标	机房名称	计算模式	距离 R（m）	所致剂量率估算值（μSv/h）
制剂楼（规划址）公众	质子治疗机房			
	射波刀机房			

环境保护目标	机房名称	计算模式	距离 R（m）	所致剂量率估算值（μSv/h）
	2#医用直线加速器机房			
	1#医用直线加速器机房			
	后装治疗机房			
	CT 模拟定位机房			
南侧停车场公众	质子治疗机房			
	CT 模拟定位机房			
感染门诊楼公众	后装治疗机房			
	1#医用直线加速器机房			
	2#医用直线加速器机房			
	射波刀机房			
	质子治疗机房			

表 5-43 评价范围内环境保护目标处公众年有效剂量

环境保护目标	机房名称	所致剂量率估算值（μSv/h）	出束时间（h/a）	居留因子 T	使用因子 U	人员可达处年有效剂量（mSv/a）
制剂楼（规划址）公众	质子治疗机房					
	射波刀机房					
	2#医用直线加速器机房					
	1#医用直线加速器机房					
	后装治疗机房					
	CT 模拟定位机房					
南侧停车场公众	质子治疗机房					
	CT 模拟定位机房					

感染门诊楼公众	后装治疗机房	
	1#医用直线加速器机房	
	2#医用直线加速器机房	
	射波刀机房	
	质子治疗机房	

由表 5-43 计算结果可知，本项目评价范围内环境保护目标处公众年受照剂量最大为 0.03mSv/a，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

5.3 事故影响分析

根据《射线装置分类》，本项目拟配备的质子治疗系统为 I 类射线装置，事故时短时间照射可以使受到照射的人员产生严重放射性损伤，其安全与防护要求高；本项目拟配备的射波刀、医用直线加速器为 II 类射线装置，后装机内配备的 ^{192}Ir 为III类放射源，事故时可以使受到照射的人员产生较严重放射损伤，其安全与防护要求较高；本项目拟配备的 CT 模拟定位机为III类射线装置，事故时一般不会使受到照射的人员产生放射损伤，其安全与防护要求相对简单。医院在开展放射治疗和诊断过程中，如果安全管理或防护不当，可能对人员产生误照射。

5.3.1 质子治疗系统

5.3.1.1 主要事故风险

根据质子治疗系统的特点，质子治疗过程中可能发生的辐射事故主要有：

（1）人员误入事故：质子治疗系统运行出束时，可能发生人员误入控制区的事故。质子治疗系统维护保养开机时，也可能有人员误入的事故发生。

（2）人员超剂量照射事故：由于元器件、空气等活化，质子治疗机房内会产生较高辐射剂量的区域。机房内有技师对患者进行摆位等操作活动，或者维修

维护时有人员滞留在机房内，此时控制室内人员误操作，设备出束可能造成人员超剂量照射事故。

（3）冷却水泄漏事故：质子治疗系统的冷却水系统为封闭式循环系统，在运行期间，冷却水被活化。在运行或检修拆装过程中由于设备故障或操作失误可能会发生活化冷却水泄漏的事故。

人员在系统运行出束时误入控制区内，短时间的照射可以使受到照射的人员产生放射损伤，严重时可能导致人员伤亡。由于质子治疗机房屏蔽结构保持完好，人员误入事故、人员超剂量照射事故对周围环境和人员不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

冷却水系统设置了水量检测仪器，发生泄漏引起系统水量减少时，系统报警。报警监测系统可提醒维护人员及时处理报警点的各种问题，防止由跑冒滴漏形成的大漏水，不会造成人员辐射事故；质子治疗机房的角落处设置了地漏，机房地面形成一定坡度，在冷却水泄漏时能依靠重力自行流入地漏，并汇入应急池中。应急池用于收集这些区域的事故排水，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

质子治疗系统的维护保养由设备生产单位负责，在医院内维护保养过程发生的辐射事故，由设备生产单位组织实施本单位的事故应急，但医院作为辐射安全许可证的持证单位，根据辐射事故具体情况，对辐射事故进行应急响应。

5.3.1.2 事故后果分析

质子治疗系统运行期间可能发生的最严重事故为工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工作期间，或患者家属等进入机房内未撤离，此时质子治疗系统开机出束时造成人员误照。

本项目使用的质子治疗系统在出束时，距产生质子的靶点 1m 处的最大输出剂量率为 2Gy/min。本项目质子治疗机房内墙体和设备表面均设置有急停按钮，只要按下此按钮就可以使设备停止出束，保守假设人员距离靶点 1m，按下急停按钮的反应时间（即人员受照时间）保守取 1min，事故期间工作人员主要受泄漏辐射照射，则由此可计算得出发生该类事故期间，人员最大受照剂量约为

0.002Gy。

根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ 104-2017）和《辐射防护导论》中不同照射剂量对人体损伤的估计，发生人员误照射事故时，考虑最不利的情况下，将导致受照人员受到轻微放射性损伤。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定，该类事故属于一般辐射事故。但是随着时间的推移，若人员滞留时间较长，也会发生较大辐射事故。

5.3.1.3 事故预防措施

（1）质子治疗系统的安全联锁和安全控制系统必须满足独立性、多重性和冗余性的要求，以防止该类事故的发生。本项目在安全系统设计时，采用多重安全联锁，包括门机联锁、急停开关、钥匙开关、巡检开关、开门开关、剂量联锁、光电联锁等，满足纵深防御的设计要求，能够有效防止人员误入事故的发生。

为了防止各项安全联锁失效，医院每次开机治疗前和设备生产单位维护维修工作开展前，必须确认上述安全联锁设施的有效性并随身佩带有效的个人剂量报警仪。

（2）医院需严格控制辐射工作人员受照剂量，例如规定治疗工作开始前开展清场巡检工作，设备停机后进入机房的必要等待时间（等待时间由质子治疗系统程序规定和控制）、机房内摆位等工作开展时与易活化部件保持一定距离，机房内其他工作制定详细操作规程等措施，尽量避免超剂量照射事故的发生。工作人员进入机房内必须随身佩带有效的个人剂量报警仪，关注进入控制区内人员的剂量，定期检查个人剂量检测记录。

维修保养工况下，设备生产单位的辐射工作人员需要紧急进入辐射水平较高的机房内，进入前需根据机房内固定式监测系统的监测数据，初步估算机房内工作点的剂量率水平，制定可行的工作方案，对人员工作时间进行管控，采取轮流工作，尽量缩短工作时间的方式，减少受照剂量。在进入机房时，人员佩带好可以累计受照剂量的个人剂量报警仪，设置合理的单次活动受照剂量阈值，严格控

制人员受照剂量不超过年剂量约束值。

（3）定期检查冷却水系统运行情况，确认漏水检测与报警系统的有效性。制定检修操作程序，加强安全文化教育，严格遵守操作程序，防止误操作造成的泄漏事故。

5.3.2 射波刀、医用直线加速器（II类射线装置）

5.3.2.1 主要事故风险

根据射波刀、医用直线加速器的特点，放射治疗过程中可能发生的辐射事故主要有：

（1）人员误入事故：射波刀、医用直线加速器运行出束时，门机联锁失效，人员误入机房受到意外照射。

（2）人员超剂量照射事故：辐射工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工作期间，或患者家属等进入机房内未撤离，此时设备开机出束可能造成人员超剂量照射事故。

（3）人员误操作：辐射工作人员不了解设备的基本性能和结构，缺乏操作经验和辐射安全防护知识，安全观念淡薄；治疗计划错误（治疗过量或欠量照射）；违反操作规程和有关规定导致错误操作；设备维（检）修后未进行质量控制检测，设备性能指标发生变化，均可能在诊疗过程中使患者受到较大剂量的照射。

人员在射波刀、医用直线加速器运行出束时误入控制区内，短时间的照射可以使受到照射的人员产生放射损伤。由于射波刀、医用直线加速器机房屏蔽结构保持完好，人员误入事故、人员超剂量照射、人员误操作等辐射事故对周围环境和人员不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

5.3.2.2 事故后果分析

射波刀、医用直线加速器运行期间可能发生的最严重事故为工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工作期间，或患者家属等进入机房内未撤离，此时射波刀、医用直线加速器开机出束时造成人员误照。

本项目使用的射波刀、医用直线加速器在出束时，距产生 X 射线的靶点 1m 处的最大输出剂量率为 1000cGy/min。本项目射波刀、医用直线加速器机房内各侧墙体均设置有急停按钮，只要按下此按钮就可以使设备停止出束，保守假设人员距离靶点 1m，按下急停按钮的反应时间（即人员受照时间）保守取 1min，事故期间工作人员主要受泄漏辐射照射，则由此可计算得出发生该类事故期间，人员最大受照剂量约为 0.01Gy。

根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ 104-2017）和《辐射防护导论》中不同照射剂量对人体损伤的估计，发生人员误照射事故时，考虑最不利的情况下，将导致受照人员受到轻微放射性损伤。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定，该类事故属于一般辐射事故。但是随着时间的推移，若人员滞留时间较长，也会发生较大辐射事故。

5.3.2.3 事故预防措施

（1）射波刀、医用直线加速器机房均设有门机联锁装置，机房内和迷道内均设有闭路电视监控系统，可有效防止该类事故的发生。此外，辐射工作人员进入机房内工作时，随身佩带有效的个人剂量报警仪。一旦出现误入情况，报警仪会发出报警信号提醒工作人员立即撤出。

（2）医护人员或维修人员进入机房，要保持机房防护门开启，由于有门机联锁系统，射线装置无法启动。此外，为防止陪护人员或其他人员误留机房而受到误照射，每次设备出束前，辐射工作人员必须在撤离前清点人员，按程序对机房进行全视角搜寻，确认无误后，方可出束。

（3）辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。

（4）做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

（5）医院在采购设备时应充分考虑生产厂家的售后产品技术支持，提高产

品可靠性。在维护和维修时，不可擅自解除联锁系统。

5.3.3 后装机（III类放射源）

5.3.3.1 主要事故风险

根据后装机的特点，放射治疗过程中可能发生的辐射事故主要有：

（1）人员误入事故：后装机出源治疗时，门机联锁失效，人员误入机房受到意外照射。

（2）人员超剂量照射事故：辐射工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工作期间，或患者家属等进入机房内未撤离，此时后装机出源可能造成人员超剂量照射事故；后装机实施治疗期间因电气故障、机械故障，自动回源装置及手动回源应急措施均失效的情况下，源体不能回归安全位，工作人员须进入治疗机房迅速将患者转移出机房，会对患者及进入机房的辐射工作人员造成意外超剂量照射。

（3）人员误操作：辐射工作人员不了解设备的基本性能和结构，缺乏操作经验和辐射安全防护知识，安全观念淡薄；治疗计划错误（治疗过量或欠量照射）；违反操作规程和有关规定导致错误操作；设备维（检）修后未进行质量控制检测，设备性能指标发生变化，均可能在诊疗过程中使患者受到较大剂量的照射。

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

人员在后装机出源时误入控制区内，短时间的照射可以使受到照射的人员产生放射损伤。由于后装治疗机房屏蔽结构保持完好，人员误入事故、人员超剂量照射、人员误操作等辐射事故对周围环境和人员不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

5.3.3.2 事故后果分析

后装治疗机内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，最大装源活度为 3.70E+11Bq。后装治疗机运行期间可能发生的最严重事故为工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工

作期间，或患者家属等进入机房内未撤离，此时后装治疗机开机出源时造成人员误照。

本项目后装治疗机房内各侧墙体和设备上均设置有急停按钮，只要按下此按钮就可以使设备紧急回源，保守假设人员距离靶点 1m，按下急停按钮的反应时间至后装治疗机回源时间（即人员受照时间）保守取 2min，则事故期间由此可计算得出发生该类事故期间，人员最大受照剂量约为 0.001Gy。

根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ 104-2017）和《辐射防护导论》中不同照射剂量对人体损伤的估计，发生人员误照射事故时，考虑最不利的情况下，将导致受照人员受到轻微放射性损伤。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定，该类事故属于一般辐射事故。但是随着时间的推移，若人员滞留时间较长，也会发生较大辐射事故。若 ^{192}Ir 放射源丢失、被盗、失控，则属于较大辐射事故。

5.3.3.3 事故预防措施

（1）后装治疗机房设有门机联锁装置，机房内和迷道内均设有闭路电视监控系统，可有效防止该类事故的发生。此外，辐射工作人员进入机房内工作时，随身佩带有效的个人剂量报警仪。一旦出现误入情况，报警仪会发出报警信号提醒工作人员立即撤出。

（2）医护人员或维修人员进入机房，要保持机房防护门开启，由于有门机联锁系统，后装机无法出源。此外，为防止陪护人员或其他人员误留机房而受到误照射，每次设备出源前，辐射工作人员必须在撤离前清点人员，按程序对机房进行全视角搜寻，确认无误后，方可出束。

（3）辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。

（4）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）后装机应设紧急回源装置，发生事故时放射源回收至装置内，对发生

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

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

5.3.4 III类射线装置

5.3.4.1 事故影响分析

根据CT模拟定位机的特点，放射诊断过程中可能发生的辐射事故主要有：

（1）人员误入事故：CT模拟定位机出束诊断时，门机联锁失效，人员误入机房受到意外照射。

（2）人员误照射：辐射工作人员或患者家属在防护门关闭前尚未撤离机房，CT模拟定位机运行可能产生误照射。

（3）滥用X射线对患者进行诊断，造成患者受到不必要的照射。

5.3.4.2 事故后果分析

CT模拟定位机运行期间可能发生的最严重事故为检修维护时工作人员误操作和人员误入造成有关人员被误照。本项目CT模拟定位机可能发生的事故为一般辐射事故，但是随着时间的推移，若果人员滞留时间较长，也会发生较大辐射事故。

5.3.4.3 事故预防措施

（1）按操作规程定期对各个联锁装置进行检查，发现故障及时清除，严禁在工作状态指示灯失效的情况下违规操作。

（2）撤离机房时清点人数，必须按程序对机房进行全视角搜寻，对滞留机房内的无关人员强行劝离。有外来人员进入时，辐射工作人员应根据情况，采取急停或相应措施，防止人员受到误照射。

（3）辐射工作人员必须加强辐射安全与防护知识培训，提高防护技能，避免犯常识性错误；严格遵守操作规程和规章制度；管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。

（4）医院做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

6 辐射安全管理

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，生产、使用和销售Ⅰ类射线装置的单位申请辐射安全许可证，应有专门的辐射安全和防护管理机构或者专职/兼职辐射安全管理人员，并配备必要的防护用品和监测仪器。

连云港市第一人民医院现持有江苏省生态环境厅核发的辐射安全许可证，已开展核技术利用项目，许可种类和范围为“使用III类、Ⅴ类放射源；使用Ⅱ类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所”。

6.1机构与人员

连云港市第一人民医院作为辐射安全许可证的持证单位，已建立辐射安全与环境保护管理工作领导小组。该机构作为医院辐射安全工作的最高管理机构，主要成员为医院分管领导、医院职能部门、涉及核技术利用工作的专业科室的负责人和工作人员等。

辐射安全与环境保护管理工作领导小组的主要职责如下：

（1）严格落实《中华人民共和国职业病防治法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护管理方法》《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等有关法律法规，接受、配合各级环保和卫生部门的监督和指导。

（2）负责医院放射性同位素、射线装置的安全和防护工作实施统一监督管理。

（3）制定并实施辐射防护管理各项规章制度，督促辐射工作人员认真执行各项安全防护制度。

（4）定期组织对辐射工作场所及周围环境进行防护检测和检查。

（5）开展个人剂量监测，定期组织本单位辐射工作人员接受辐射防护法规、专业技术的知识培训及职业健康体检。

（6）负责放射性废物管理工作。

（7）制定医院辐射安全应急预案并落实各项措施，负责事故现场应急响应。

本项目建成后，医院拟将新增的质子治疗系统纳入整个医院的辐射安全管理工作中，由放疗科负责质子中心内相关射线装置和放射源的辐射安全管理工作，其主要职责是：

（1）贯彻落实国家有关辐射安全法律法规及标准，建立质子治疗系统操作规程，完善已建立的其他射线装置和放射源的操作规程；

（2）场所辐射安全设施的运行和维护，辐射安全措施的落实；

（3）场所辐射环境监测与评价；

（4）质子治疗机房内放射性废物的处置及活化物暂存间的辐射安全管理；

（5）辐射工作人员健康管理；

（6）参与辐射事故应急处置，以及其他与辐射安全相关的教育培训工作。

辐射防护负责人的主要职责如下：

（1）负责辐射、安全及环境相关法律法规的追踪；

（2）提出对相关法规在医院内部实施的方案；

（3）就辐射、安全及环境相关报批事项的对外联络，包括许可证申请与更新；

（4）负责个人剂量及场所监控记录的收集与管理；

（5）负责射线装置台账统一管理；

（6）组织年度安全演练及事故应急处理；

（7）组织编写并提交年度评估报告；

（8）组织发放和回收个人剂量计。

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，最少在岗人数 1 名。”医院拟为本项目新增的质子治疗系统配备 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，同时作为辐射安全专职管理人员。

本项目的辐射工作人员主要为辐射防护负责人、从事放射治疗或诊断的医生、物理师、技师等，拟新聘用或在现有辐射工作人员中调用，不兼职其他辐射工作，计划的编配情况如表 6-1。

表 6-1 本项目辐射工作人员计划编配情况

岗位类别		人数（人）
辐射防护负责人（注册核安全工程师）		
质子治疗系统	医师	
	技师	
	物理师	
	护士	
射波刀、医用直线加速器、后装机	医师	
	技师	
	物理师	
	护士	
CT 模拟定位机	技师	
总计		

本项目运行后，连云港市第一人民医院为保障医院工作人员与公众的健康和安全，保护环境，结合本项目质子治疗系统的运行特点，医院拟完善现有的辐射安全与环境保护管理机构，补充相应的辐射安全管理规章制度。连云港市第一人民医院承诺在申请辐射安全许可证前，配备相应岗位和数量的辐射工作人员，并承诺项目投入运行前在核安全关键岗位配备相应资格的注册核安全工程师。

6.2辐射安全管理规章制度

为保障项目运行辐射安全，保护工作人员、公众和环境，根据项目特点，连云港市第一人民医院现有的辐射安全管理规章制度主要包括：

（1）《辐射防护和安全保卫制度》，给出辐射防护原则、辐射安全组织体系及职责、个人剂量管理、环境辐射水平控制原则和措施、辐射监测要求和计划、辐射工作人员职业健康管理、教育和培训等总体要求。

（2）《操作规程》，规定了现有医用直线加速器、后装机以及CT模拟定位机等其他射线装置、放射源的操作规定。

（3）《岗位职责》，明确放射源、射线装置使用工作人员、台帐管理人员及辐射安全管理人员的岗位责任。

（4）《设备检修维护制度》，规定射线装置开机、运行、维修和维护等阶段 的辐射安全管理要求和实施措施。明确放射源、射线装置和辐射监测设备维修计划、维修的记录和在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施，并做好记录。确保射线检测装置、安全措施、剂量报警仪等仪器设备保持良好工作状态。

（5）《放射源、射线装置台账登记与档案管理》，规定对放射源、射线装置建立使用台账，对放射源、射线装置进行登记和跟踪记录。

（6）《放射工作人员上岗培训制度》，明确培训对象、内容、周期、方式以及考核的办法等内容，并强调对培训档案的管理，做到有据可查。

（7）《放射工作人员职业健康管理制度》，明确辐射工作人员定期参加职业健康体检的周期，并为其建立辐射工作人员职业健康监护档案。

（8）《放射辐射监测方案》，明确辐射工作场所日常辐射环境监测的目的、布点、 频次、监测设备要求和结果记录及报送等内容。

（9）《放射工作人员个人剂量监测制度》，明确工作人员个人剂量监测和

档案管理方面的要求。

连云港市第一人民医院每年编写放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告，包括射线装置台账、辐射安全和防护设施的运行与维护、辐射安全和防护制度及措施的建立和落实、事故和应急以及档案管理等方面的内容，每年 1 月 31 日前将年度评估报告上传至全国核技术利用辐射安全申报系统。

根据医院《2022 年度安全和防护状况年度评估报告》显示，2022 年度医院未发生辐射事故，医院辐射安全和防护设施运行良好，定期开展了维护工作，定期检查防护情况，发现的隐患及时处理；医院已制定和完善了相应辐射安全和防护制度及措施，各项制度和措施得到了落实。

连云港市第一人民医院将在现有辐射安全管理制度的基础上，根据质子治疗系统、射波刀的操作和安全设施特点，完善辐射安全管理制度，健全与质子治疗系统、射波刀操作有关的操作规程、岗位职责、安全保卫、设备台账、人员培训、辐射环境监测等制度。医院应补充完善《放射性废物管理规定》，包括放射性废水排放、固体废物解控和外运处置的要求，以最终满足法律法规的要求。连云港市第一人民医院承诺在申请辐射安全许可证前建立和完善辐射安全管理制度并发布生效。

6.3 辐射监测

本项目辐射监测包括环境监测和个人剂量监测。环境监测采用固定式剂量监测报警装置监测和巡测相结合的方式进行；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 环境监测

本项目环境监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，每年至少进行一次，监测数据记录存档，具体环境监测计划见表 6-2。

表 6-2 本项目环境监测计划

监测对象		监测项目	监测点位	监测频次	监测方式
质子治疗机房		X-γ辐射剂量率和中子剂量率	机房四周及顶部墙体外、防护门缝隙和中央、操作位、通风口外、电缆口外	不少于 1 次/季	自行监测
				1～2 次/年	委托有资质单位监测
			迷道内口、控制室内（固定式剂量监测报警装置）	连续	自行监测
射波刀机房、医用直线加速器机房、后装治疗机房		X-γ辐射剂量率	机房四周及顶部墙体外、防护门缝隙和中央、操作位、通风口外、电缆口外	不少于 1 次/季	自行监测
				1～2 次/年	委托有资质单位监测
			迷道内口（固定式剂量监测报警装置）	连续	自行监测
CT 模拟定位机房			机房四周及顶部墙体外、防护门缝隙和中央、操作位、电缆口外	不少于 1 次/季	自行监测
				1～2 次/年	委托有资质单位监
质子治疗机房冷却水		总β、H-3、Be-7	冷却水池、应急水池	排放前	委托有资质单位监测
环境介质取样	土壤	γ核素	机房周围 1~2 个点	1 次/年	委托取样监测
	环境中放射性核素水平	空气中氚、空气中γ核素	医院内排放口附近	1 次/年	委托取样监测

6.3.2 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主、个人剂量报警仪为辅的方式进行。质子治疗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。

个人剂量计用于对放射性工作人员和相关医护人员的常规个人剂量监测，医院为每名放射性工作人员配备了个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

个人剂量报警仪用于工作人员在治疗机房等控制区内部工作时使用，个人剂量报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。医院为进入控制区内工作的人员建立档案，每次在控制区内的工作结束后，由辐射安全专职管理人员负责回收个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，统一汇总在该工作人员个人剂量档案中。

医院安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。个人剂量档案应终生保存。

此外，医院对辐射工作人员进行健康体检，两次体检的时间间隔不超过 2 年。建立个人健康档案，档案中详细记录历次体检报告结果及其评价处理意见，并妥善长期保存。

6.3.3 监测设备

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式 X-γ 剂量监测报警装置、固定式中子剂量监测报警装置、便携式 X-γ 辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见表 6-3。

表 6-3 辐射监测设备清单

序号	仪器名称	数量	总计
1	固定式 X-γ剂量监测报警装置		5 套
2	固定式中子剂量监测报警装置		1 套
3	便携式 X-γ辐射巡测仪		1 台
4	便携式中子辐射巡测仪		1 台
5	个人剂量报警仪		11 台

序号	仪器名称	数量	总计
6	个人剂量计		/

建设单位按计划建成/配备相应的监测仪器后，能够满足相关要求。

连云港市第一人民医院已根据监测计划，明确监测项目，定期（不少于 1 次/季）使用辐射监测仪器对项目周围辐射环境进行自检，并保留自检记录，每年委托有资质的单位定期对项目周围环境 X-γ辐射剂量率进行监测，监测结果上报生态环境行政主管部门。

连云港市第一人民医院已为现有辐射工作人员配备个人剂量计，组织辐射工作人员进行个人剂量监测（1 次/季）和职业健康体检（1 次/2 年），辐射安全与环境保护管理工作领导小组全医院辐射工作人员个人剂量的收发和管理以及职业健康监护、个人剂量监测档案的存放保管。

2022 年度医院已委托南京瑞森辐射技术有限公司开展了辐射工作场所的辐射安全与防护年度监测，监测结果均符合国家相关标准要求；已委托南京瑞森辐射技术有限公司完成了辐射工作人员的个人剂量监测，所有辐射工作人员监测结果均符合国家相关标准要求。

6.4辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）要求，使用Ⅱ类以上（含Ⅱ类）射线装置的辐射工作单位应建立完善的辐射事故应急方案或具有针对性与操作性的应急措施。连云港市第一人民医院已设置了辐射事件应急处理机构，并按照现有Ⅱ类、Ⅲ类射线装置和Ⅲ类放射源的特点，制定了《辐射事故应急预案》，开展相应的应急响应和应急准备工作。医院制定的《辐射事故应急方案》主要包括：

（1）总则

为了加强射线装置和放射源的安全防护和监督管理，促进核技术利用项目的安全应用，有效预防并及时控制和消除潜在的辐射事故，规范突发辐射事故的应急处置工作，提高应对辐射事故的应急能力，保障人员健康，维护环境安全，按

照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，结合医院实际情况，制定本方案。

（2）辐射事故应急处理机构与职责

医院已成立辐射事故应急处理领导小组，以医院法定代表人、分管领导为组长，各辐射相关科室负责人为副组长，相关科室辐射工作人员为小组成员，其主要职责为：负责针对辐射事故的危害程度，发布预警等级，组织实施辐射事故应急预案，并将事故情况上报相关部门。

（3）辐射事故应急处理程序

①当发生辐射事故时，当事人应立即通知同工作场所的工作人员离开，并及时上报；

②辐射事故应急处理领导小组召集专业人员，根据具体情况迅速制定事故处理方案；

③辐射事故应急必须在组长的领导下，在有经验的工作人员和防护人员的参与下进行。未取得防护检测人员的允许，不得进入事故场所；

④各类辐射事故处理以后，必须组织有关人员进行讨论，分析事故发生原因，从中吸取经验教训，采取措施防止类似事故重复发生。凡发生事故，应向上级主管部门报告。

医院现有的《辐射事故应急预案》结合自身特点给出了辐射事故应急响应组织、事故分级和响应措施等内容，总体符合相关法律和法规的要求。医院开展核技术利用项目至今，未发生辐射事故。考虑目前医院没有质子治疗系统运行经验，该预案在后续工作中应按照质子治疗系统的操作特点进一步完善和优化，将质子治疗系统纳入医院辐射应急管理体系中，明确开发区院区应急响应时的负责人，细化应急物资的准备、定期开展应急人员的培训和演习等内容，并与省、市辐射应急方案做好衔接。连云港市第一人民医院承诺在申请辐射安全许可证前修订现有的《辐射事故应急预案》，完善其中的质子治疗系统应急响应执行程序。

医院应定期对辐射工作场所辐射安全措施进行检查、维护，发现问题及时维

修；每次工作前均应检查相应辐射安全装置的有效性，定期对工作场所进行检测。医院还应在平时工作中加强工作人员的辐射防护知识的培训，尽可能避免辐射事故的发生。

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

7 利益-代价简要分析

7.1利益分析

随着我国社会经济的迅速发展，人民生活水平有了很大提高，医疗卫生条件得到进一步改善。然而，肿瘤（特别是恶性肿瘤）依然是国民健康水平进一步提高的主要障碍。据统计，2015 年全国估计新发恶性肿瘤病例约 392.9 万例，死亡约 233.8 万人，且近 10 多年来，恶性肿瘤发病率每年保持约 3.9%的增幅，死亡率每年保持 2.5%的增幅。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。

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，将满足连云港市及周边地区肿瘤患者高端治疗的迫切需求，通过引进质子治疗装置，满足连云港市及周边地区的恶性肿瘤精准高端治疗的需求，提升癌症治疗水平。

（2）射波刀可对全身任何部位（包括前列腺、肺部、脑部、脊柱、肝脏、胰腺和肾脏）的恶性与非恶性肿瘤进行非侵入性治疗，可为患有手术无法或较难切除的肿瘤的患者，或者正在寻求除手术以外的其它选择的患者提供一个无痛、非手术的治疗选择；医用直线加速器可用于头颈、胸腔、腹腔、盆腔、四肢等部位的原发或继发肿瘤，以及手术后残留的术后或手术前的术前治疗等；后装治疗机是近距离放射治疗，被广泛应用于宫颈癌、前列腺癌、乳腺癌和皮肤癌的治疗，也同样适用于许多其他部位的肿瘤治疗。可为医院提供多种肿瘤治疗手段，对广大患者提高治愈率、改善生活质量等方面有重大帮助。

（3）提高连云港市在医疗临床研究和应用方面的科技实力，带动连云港市整体医疗水平的提升。

（4）推动连云港市医疗卫生健康事业发展，对提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

7.2代价分析

7.2.1 经济代价

本项目由连云港经济技术开发区政府投资工程服务中心投资建设，项目建成后的运营单位为连云港市第一人民医院。

7.2.2 社会和环境代价

本项目建设用地不涉及居民拆迁，项目建设和运行对社会影响较小。

本项目总用地面积约 10320m^2，总建筑面积约 5500m^2，主要建设内容为新建一栋地上主体 2 层，局部地下 1 层的单体建筑。项目总投资约为　　万元，其中环保投资约为　　万元，占总投资的　　。环保投资主要用于质子中心各机房屏蔽结构建设，废气、废水、噪声和固体废物的处置。经预测，本项目对环境的影响满足国家标准要求，对环境的影响是可接受的。项目建成后，本项目的社会和环境代价较小，可以接受。

7.2.3 资源代价

本项目用地为连云港市第一人民医院开发区院区北侧预留地块，该地块用地性质为医疗卫生用地，已取得建设用地规划许可证。项目建成后在周围进行适当绿化，恢复部分绿化资源。

7.3正当性分析

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

8 结论与建议

8.1项目工程概况

连云港市第一人民医院拟在连云港市经济技术开发区环湖路西侧、连云港市第一人民医院开发区院区北侧新建质子中心项目，本项目总用地面积约10320m^2，总建筑面积约5500m^2，质子中心是一栋地上主体2层，局部地下1层的单体建筑。主要建设质子治疗系统、射波刀、医用直线加速器、后装机、CT模拟定位机等机房以及相关辅助用房和办公用房。项目总投资约为　　万元，其中环保投资约为　　万元，占总投资的　　。

项目拟使用1套质子治疗系统、1台X线立体定向放射治疗系统、2台医用直线加速器、1台后装机（内含1枚^{192}Ir放射源）等装置开展放射治疗，使用1台CT模拟定位机进行模拟定位。项目运行期间的辐射污染源主要是使用各类医用射线装置或放射源时产生的“瞬发辐射”和停机后依然存在的“感生放射性”，以及运行期间产生放射性三废。

8.2辐射安全与防护

（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：射线装置机房均设计了安全、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、声光报警器，以及工作状态指示灯、视频监控以及放射性警告标志和中文警示说明，可有效防止工作人员和公众受到意外照射。

（3）辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算各辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平。

（4）通风系统：各射线装置、放射源使用场所均设有通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计均能满足相关标准要求，确保工作场

所内部和排放到环境中的污染物浓度能够满足相关标准要求。

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自质子治疗系统、后装机。

质子治疗系统在运行时活化空气产生的放射性核素通过质子中心顶部的排放口排入大气环境，废气经过一定距离的稀释扩散和衰减，对公众受照剂量贡献值很小。

质子治疗系统冷去水循环使用，根据水质控制要求，每年排放 1 次。活化冷却水在地下一层冷却水暂存池内存放，排放前进行检测，低于豁免水平后可作为普通废水排放接至医院污水管网。排放前委托有资质的单位进行检测，冷却水排放执行《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）中对医疗机构废水排放的限值要求：总β不超过 10Bq/L。

质子治疗系统运行产生的废活化元器件、废冷却水过滤滤芯及离子交换树脂等固体废物，在地下一层活化物暂存间内暂存，经检测满足相关标准限值后，按非放射性废物处理，对于经衰变后仍超出清洁解控水平的放射性固体废物，医院送交有资质的单位收贮。解控后的废树脂属于危险废物，医院定期委托具有危废处置资质的单位处置。

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

8.3 环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，在做好个人防护措施和安全措施的情况下，项目对辐射工作人员及周围的公众产生的年有效剂量均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员和公众受照剂量限值要求以及本项目的目标管理值要求（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

射波刀机房、医用直线加速器机房、后装治疗机房、CT 模拟模拟机房内的空气在 X 射线、γ 射线作用下分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，射波刀机房、医用直线加速器机房、后装治疗机房拟设计有机械通风装置，进风口

拟设在机房上部，排风口拟设在机房下部，进风口与排风口位置拟对角设置，通风换气次数不少于 4 次/h。机房内产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体通过通风系统排至室外，臭氧在常温下约 50 分钟可自行分解为氧气，对周围环境影响较小；工作人员和部分患者产生的生活污水，由医院污水处理系统统一处理；工作人员产生的生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

8.4辐射安全管理

医院已设置专门的辐射安全管理机构；目前正在按照人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面内容完善一系列的辐射安全管理制度；制定辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗；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。

8.5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，期间均未收到反馈社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈意见。

8.6建议和承诺

（1）关于辐射安全管理的承诺

医院加强对辐射工作场所控制区、监督区的管控，不参与辐射工作的人员和除患者以外的人员不能进入辐射工作场所。辐射工作人员除了佩带个人剂量计、个人剂量报警仪外，定期进行辐射安全培训，参与医院的辐射应急演习。

（2）关于建立和完善辐射安全管理机构和辐射规章制度的承诺

连云港市第一人民医院已设立辐射安全与环境保护管理机构，指定专人专职负责辐射安全与环境保护管理工作，并以医院内部文件形式明确其管理职责。医院承诺在申请辐射安全许可证之前，完善辐射规章制度，包括与质子治疗系统有

关的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、设备使用登记制度、人员培训计划、辐射环境和个人剂量监测方案、辐射应急预案等，将本项目相关射线装置和放射源纳入整个医院的辐射安全管理工作。

（3）关于核安全关键岗位设置的承诺

医院承诺根据国家核安全法规的要求，项目投入运行前使本单位核安全关键岗位的人数达到相关规定要求，配备相应的注册核安全工程师。

（4）关于投入使用前开展委托监测并取得相应许可的承诺

医院承诺取得相应的辐射安全许可后，委托有资质的单位开展辐射环境检测以及设备性能检测，经检测满足相关国家标准、竣工环保验收合格后正式投入使用。

综上所述，连云港市第一人民医院拟建设的“连云港市第一人民医院质子中心项目”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和周围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。连云港市第一人民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，故从环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。