

编号：BG-ZFFS24210019

## 核技术利用建设项目

浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研  
转化大楼建设工程配套核技术利用项目  
环境影响报告书  
(公示稿)

浙江大学医学院附属邵逸夫医院（浙江省邵逸夫医院）

2026年1月

环境保护部监制

## 核技术利用建设项目

# 浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研 转化大楼建设工程配套核技术利用项目 环境影响报告书

建设单位名称：浙江大学医学院附属邵逸夫医院（浙江省邵逸夫医院）

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：浙江省杭州市上城区庆春东路 3 号

邮政编码：310000

联系人：\*\*\*

电子邮箱：\*\*\*\*\*@qq.com

联系电话：\*\*\*\*\*

# 目录

1 概述 .....	1
1.1 项目名称、地点 .....	1
1.2 项目概况 .....	1
1.2.1 建设单位概况 .....	1
1.2.2 项目背景、意义 .....	2
1.2.3 本次环评内容 .....	4
1.2.4 产业政策和规划符合性 .....	6
1.2.5 周围环境概况 .....	11
1.2.6 核技术利用现状 .....	15
1.3 编制依据 .....	21
1.3.1 法律、法规和规章 .....	21
1.3.2 技术导则、标准 .....	22
1.3.3 其它文件、资料 .....	23
1.4 评价标准 .....	23
1.4.1 剂量限值和剂量约束值 .....	23
1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 .....	24
1.4.3 放射性废物控制要求 .....	32
1.4.4 其他标准 .....	34
1.5 评价范围和保护目标 .....	37
1.5.1 评价范围 .....	37
1.5.2 环境保护目标 .....	37
1.6 安全责任划分 .....	38
2 自然环境与社会环境状况 .....	44
2.1 地理位置 .....	44
2.2 自然环境状况 .....	44
2.2.1 地形地貌 .....	44
2.2.2 地震 .....	44
2.2.3 气候气象 .....	45
2.2.4 水文 .....	45
2.3 社会环境概况 .....	46
2.3.1 人口分布 .....	46
2.3.2 社会发展 .....	46
2.3.3 经济发展 .....	46
2.4 环境质量和辐射现状 .....	47
2.4.1 辐射环境质量现状监测与评价 .....	47
2.4.2 场址适宜性评价 .....	59
3 工程分析与源项 .....	61
3.1 项目规模与基本参数 .....	61
3.1.1 项目规模 .....	61
3.1.2 基本参数 .....	67
3.2 工艺设备 .....	67

3.2.1 质子放射治疗系统 .....	67
3.2.2 医用电子直线加速器 .....	80
3.2.3 后装机 .....	84
3.2.4 模拟定位 CT .....	87
3.3 辐射源项分析 .....	89
3.3.1 质子放射治疗系统 .....	89
3.3.2 直线加速器 .....	109
3.3.3 后装机 .....	111
3.3.4 模拟定位 CT .....	111
3.4 小结 .....	112
4 辐射安全与防护设施 .....	114
4.1 质子放射治疗系统 .....	114
4.1.1 场所布局与屏蔽 .....	114
4.1.2 辐射安全与防护措施 .....	133
4.1.3 放射性三废处理 .....	157
4.2 放疗中心直线加速器、后装机 .....	160
4.2.1 辐射工作场所分区 .....	160
4.2.2 机房布局与辐射屏蔽 .....	162
4.2.3 拟采取的安全防护措施 .....	166
4.2.4 通排风系统 .....	170
4.2.5 电缆等管线布设 .....	171
4.2.6 三废治理 .....	172
4.3 模拟定位 CT .....	173
4.3.1 辐射工作场所分区 .....	173
4.3.2 机房布局和辐射屏蔽 .....	174
4.3.3 拟采取的其他安全与防护措施 .....	175
4.3.4 三废治理 .....	176
4.4 服务期满后的环境保护措施 .....	176
5 辐射环境影响 .....	178
5.1 建设阶段对环境的影响 .....	178
5.2 质子放射治疗系统运行对环境的影响 .....	178
5.2.1 正常运行下的环境影响 .....	178
5.2.2 事故工况的环境影响分析 .....	215
5.3 直线加速器 .....	217
5.3.1 正常运行期间环境影响分析 .....	217
5.3.2 事故工况的环境影响分析 .....	235
5.4 后装机 .....	236
5.4.1 正常运行期间环境影响分析 .....	236
5.4.2 事故工况的环境影响分析 .....	244
5.5 模拟定位 CT 机 .....	245
5.5.1 正常运行的环境影响分析 .....	245
5.5.2 事故影响分析 .....	246
6 辐射安全管理 .....	248
6.1 机构和人员 .....	248

6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构 .....	248
6.1.2 辐射工作人员配置计划 .....	248
6.2 辐射安全管理规章制度 .....	250
6.3 辐射监测 .....	250
6.4 辐射事故应急预案 .....	254
6.5 年度评估报告 .....	256
6.6 申请者从事辐射工作能力评价 .....	256
6.6.1 辐射安全与环境保护管理 .....	257
6.6.2 辐射工作人员培训 .....	257
6.6.3 工作场所的安全防护措施 .....	257
6.6.4 个人防护用品及监测仪器 .....	258
6.6.5 规章制度 .....	258
6.6.6 辐射事故应急 .....	259
6.6.7 辐射工作能力综合评价 .....	259
6.7 环保投资一览表 .....	260
6.8 竣工环保验收一览表 .....	260
7 利益-代价分析 .....	263
7.1 利益分析 .....	263
7.2 代价分析 .....	263
7.3 实践的正当性分析 .....	264
8 结论 .....	265
8.1 项目工程概况 .....	265
8.2 实践的正当性 .....	265
8.3 选址、布局合理性分析 .....	265
8.4 辐射安全与防护措施 .....	266
8.5 辐射环境影响分析 .....	266
8.6 放射性三废排放和处理 .....	266
8.7 辐射安全管理 .....	267
8.8 总结 .....	267

# 1 概述

## 1.1 项目名称、地点

项目名称：浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程  
配套核技术利用项目

建设地点：浙江省杭州市钱塘区下沙路 368 号浙江大学医学院附属邵逸夫医院钱塘院区南区东侧预留用地

建设性质：新建

建设单位：浙江大学医学院附属邵逸夫医院（浙江省邵逸夫医院）

建设规模：拟在浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼开展核技术利用项目，主要在质子治疗中心负一层、负二层、负三层建设质子治疗机房及其附属用房，主要包括 1 间回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）、4 间质子治疗室（均为旋转治疗室），拟使用 1 套多室质子放射治疗系统（I 类射线装置，质子最高能量为 230MeV），质子治疗系统配套 X 射线管（每间质子治疗室各安装 2 个）；在负二层建设放疗中心，主要包括 4 间医用直线加速器机房、1 间后装机房和 1 间模拟定位 CT 机房，拟使用 4 台医用电子直线加速器（II 类射线装置）、1 台后装机（采用<sup>192</sup>Ir 放射源，属于 III 类放射源）、1 台模拟定位 CT（属于 III 类射线装置）。

项目总投资约 11.6826 亿元，其中环保投资约 \*\*\*\* 万元，占总投资约 \*\*%。

## 1.2 项目概况

### 1.2.1 建设单位概况

浙江大学医学院附属邵逸夫医院（浙江省邵逸夫医院，以下简称“医院”）是由香港知名实业家邵逸夫爵士捐资、浙江省人民政府配套建设，集医疗、教学和科研为一体的公立综合性三级甲等医院。是国内首家通过国际医院评审（JCI）和磁性医院认证，首家加入 MAYO CLINIC 医疗联盟的大型公立综合性医院。医院坚持“以患者为中心，以员工为主体”的管理理念，连续五年荣获“中国医疗机构最佳雇主”荣誉称号。医院不断探索与国际接轨的“邵医模式”，用“互联网+”医疗创新打造掌上邵医，为患者提供优质、安全、高效的医疗服务。

医院于 1994 年 5 月正式运营，现有庆春、钱塘、双菱、新疆阿拉尔、大运河、绍

兴、宁波（在建）七大院区，设有 49 个临床医技部门，150 个护理单元，核定床位数 4300 张，职工 8500 余人。作为浙江大学医学院第三临床医学院，首批国家临床教学培训示范中心，目前有 43 个博士学位点和 50 个硕士学位点，设有 29 个临床教研室和教研组。

### 1.2.2 项目背景、意义

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

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子放射治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子放射治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。质子放射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。

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

后装机是现代放射治疗体系中的重要组成部分，它通过将微型放射源贴近肿瘤靶区进行照射，实现了从肿瘤内部发起的精确治疗。放射治疗领域中，后装机尤其适用于腔道内及浅表肿瘤的治疗，如妇科宫颈癌、前列腺癌、乳腺癌以及皮肤癌等；其治疗优势显著，剂量分布集中，能够对肿瘤靶区施加极高剂量的同时，最大限度地保护周围正常组织和关键器官。因此，在构建完整、精准的立体放射治疗解决方案时，后装机发挥着不可替代的关键作用。

为提高浙江省医疗服务保障水平，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，医院拟在浙江

大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼开展核技术利用项目，引进质子放射治疗系统、医用电子直线加速器、后装机、模拟定位 CT 等医疗设备，满足浙江省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。

2024 年 2 月 8 日，医院正式收到国家卫生健康委国卫通〔2024〕1 号文件《关于 2023 年甲类大型医用设备配置许可结果的通告》（见附件 9），获得配置多室质子放射治疗系统的许可。2025 年 10 月 9 日，医院取得浙江省发展和改革委员会出具的《省发展改革委关于浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程项目可行性研究报告批复的函》（浙发改项字〔2025〕343 号），项目代码为 2411-330000-04-01-141306（见附件 6）。2025 年 12 月 16 日，《浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程环境影响报告表》取得杭州市生态环境局批复，批复文号为：杭环钱评批〔2025〕114 号（见附件 7）。

质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程的建设用地面积约 14301m<sup>2</sup>，总建筑规模 54007m<sup>2</sup>，其中地上建筑 27012m<sup>2</sup>，地下建筑 26995m<sup>2</sup>，拟建设 1 幢质子治疗中心暨科研转化大楼，包括质子治疗中心、门诊及科研转化大楼和地下车库及公用设施设备用房。质子治疗中心设地上三层，门诊及科研转化大楼设地上十一层，设整体连通的地下三层，主体工程各层功能布置情况如表 1.2.2-1 所示。

表 1.2.2-1 主体工程各层功能布置情况

主体工程	楼层	功能布置情况
质子治疗中心	1F	设有质子咨询门诊、接待门厅、办公区等。
	2F	放疗中心，设有放疗大厅、候诊区、治疗室、污洗、污存间、抢救间、库房等。
	3F	质子诊疗中心预留用房。
	楼顶	屋顶设备机房。
门诊及科研转化大楼	1F	设有药房、输液室、治疗室、抢救室、门诊等候区、留观病床、CT 检查室、库房、配电房、柴油发电机房、变配电间、锅炉排风机房、新风机房等。
	2F	设有肿瘤科相关门诊、候诊区、检查室、治疗室、采血室、接待及等候区、换药室、污洗室、污存间、CT 检查室、库房、新风机房等。
	3F	设有教学培训用房、办公区。
	4F	教学培训用房。
	5F	GCP 中心，设置受试者留观病床、样本储存间、体格检查室、药物储存室、治疗准备室、空调机房等。
	6F	GCP 中心，设置受试者留观病床、药物储存室、治疗准备室、样本储存间、药物储存室、空调机房、办公区等。
	7F	科研实验室。主要分为实验区和办公区。其中实验区设有 PCR 实验室和普通实验室。PCR 实验室主要包括样本接收前处理区、样本传送、试剂准备区、WGA 制备区、扩增一区、扩增二区、文库检测区、测序区、电泳区、清洁灭菌间等。普通实验室主要包括病理室、细胞室、灭菌间、实验室、仪器室、资料室、库房、

		洗消间、废液暂存室、污洗间、污存间等。办公区设置办公室、讨论室、库房、更衣室、学习室等。
8F		科研实验室。主要分为实验区和办公区，其中实验区包括实验室、仪器室、细胞室、灭菌间、洗消间、污存、冰箱间、库房等。办公区设置办公室、讨论室、更衣室、学习室等。
9F		动物实验室。主要设有动物接收、动物检疫、小鼠饲养间、大鼠饲养间、动物手术间、操作间、行为学实验室、MRI 检查室、清洗区、更衣通过区、外准备间、内准备间、洁库、库房、医废暂存间、垫料倾倒间、动物尸体暂存间、解剖间、淋浴、监控室、办公室、卫生间、垫料暂存间、饲料储存间、库房、空调机房等。
10F		动物实验室。主要设有动物接收、动物检疫、小鼠饲养间、动物手术间、操作间、辐照仪/MICRO-CT、B 超/活体成像室、更衣通过区、外准备间、内准备间、洁库、淋浴、办公、卫生间、休息室、饲料暂存间、空压机房、空调机房等。
11F		动物实验室。主要设有动物接收、动物检疫、小鼠饲养间（约 6640 笼位）、动物手术间、库房、更衣通过区、外准备间、内准备间、淋浴、纯水机房、办公、卫生间、休息室、饲料暂存、空调机房等。
屋顶		为屋顶机房。
地下层	-1F	设有地下车库、设备机房区、质子设备及结构区、热水机房、污物暂存区。
	-2F	设有放疗中心、质子中心治疗区、模拟定位区、地下机动车库、设备机房区、污水污存区等。
	-3F	设有地下机动车库、设备机房区、质子设备及结构区等。

根据医院建设规划，本项目不涉及非密封放射性物质，放射源、射线装置规划使用情况如表 1.2.2-2 所示。

表 1.2.2-2 放射源、射线装置规划使用情况

建筑物及楼层		科室	放射源、射线装置情况	备注	数量
科研转化大楼	10F	动物实验室	动物辐照仪	III类射线装置	1
			MICRO-CT		1
	2F	肿瘤门诊	CT		1
	1F	机动门诊	CT		1
地下层	-2F	放疗中心	医用电子直线加速器	II类射线装置	4
			后装机	III类放射源	1
		模拟定位区	模拟定位 CT	III类射线装置	1
	-1F~3F	质子治疗机房	质子放射治疗系统	I类射线装置	1

根据《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），项目建设内容使用 III 类射线装置的，其环境影响评价文件类别为编制环境影响登记表。考虑到模拟定位 CT 用于肿瘤精准定位，为放疗中心肿瘤治疗的一部分，故将其纳入本次评价范围。其余 III 类射线装置在购买前、确认型号及参数后，医院应及时填报环境影响登记表。

### 1.2.3 本次环评内容

本次环评为浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工

程配套核技术利用项目辐射环境影响评价，主要针对项目中涉及核技术利用活动的建设内容开展评价，具体如下：

(1) 质子放射治疗系统。拟在质子治疗中心负一层、负二层、负三层建设质子治疗机房及其配套用房，主要包括1间回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）、4间质子治疗室（均为旋转治疗室）及主控室、治疗控制室、QC质控间、服务器机房、质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间等配套用房。拟使用1套多室质子放射治疗系统（属I类射线装置，质子最高能量为230MeV）；质子治疗系统配套X射线管（最大管电压150kV，最大管电流800mA），每间质子治疗室各安装2个X射线管。

(2) 医用电子直线加速器。拟在负二层放疗中心建设4间医用直线加速器机房（以下简称“加速器机房”），并在每间机房分别安装1台医用电子直线加速器（以下简称“直线加速器”，属II类射线装置）用于放射治疗。直线加速器X射线最高能量为15MV，电子线最高能量为22MeV，每台直线加速器集成一台CBCT（管电压140kV，管电流1250mA）。

(3) 后装机。拟在负二层放疗中心建设1间后装机房，并在机房内安装1台后装机进行近距离放射治疗，拟使用1枚出厂活度为 $5.55E+11Bq$ （15Ci）的 $^{192}Ir$ 放射源，属III类放射源。

(4) 模拟定位CT。负二层放疗中心建设1间模拟定位CT机房，并在机房中安装1台模拟定位CT（属III类射线装置）用于肿瘤定位。模拟定位CT最大管电压140kV，最大管电流1250mA。

表1.2.3-1 本项目拟使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量	类别	主要参数	所在位置
1	质子放射治疗系统	1台	I类	治疗能量范围：70~230MeV； 治疗引出流强： $0.27nA@70MeV$ ， $0.47nA@230MeV$ ； 治疗头输出剂量率： $2\text{ Gy}/\text{min/L}$ ； 每间质子治疗室配备2个定位X射线管，4间治疗室共配备8个X射线管；最大管电压150kV，最大管电流800mA	质子治疗中心负一层、负二层、负三层质子治疗机房
2	直线加速器	4	II类	X射线能量6MV等中心处：X射线剂量率为 $8.40E+08\mu\text{Gy}/\text{h}$ ； X射线能量10MV等中心处：X射线剂量率为 $1.44E+09\mu\text{Gy}/\text{h}$ ； X射线能量15MV等中心处：X射线剂量率为 $6.00E+08\mu\text{Gy}/\text{h}$ ；	负二层放疗科 加速器机房 1~4

				电子线最大能量 22MeV，等中心处：X 射线剂量率为 $6.00E+08\mu\text{Gy}/\text{h}$ ；每台直线加速器均集成一台 CBCT，最大管电压 140kV，最大管电流 1250mA	
3	模拟定位 CT	1	III类	最大管电压 140kV，最大管电流 1250mA	负二层放疗科 模拟定位 CT 机房

表 1.2.3-2 本项目拟使用放射源情况

放射源名称	类别	活动种类	单枚源活度	数量	工作场所名称
$^{192}\text{Ir}$	III类	使用	$5.55E+11\text{Bq}$	1 枚	负二层放疗科后装机房

根据《关于发布<射线装置分类>的公告》（原环境保护部，国家卫生和计划生育委员会公告，公告 2017 年第 66 号），多室质子治疗系统属 I 类射线装置，直线加速器属 II 类射线装置，模拟定位 CT 属 III 类射线装置；根据《关于发布放射源分类方法的公告》（原国家环保总局公告，公告 2005 年第 62 号），后装机拟配置  $^{192}\text{Ir}$  放射源，出厂活度为  $5.55E+11\text{Bq}$ ，属 III 类放射源。

根据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国环境影响评价法》、《建设项目环境保护管理条例》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等的规定，本项目建设前应进行建设项目环境影响评价工作。根据《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），并对照“1.2 建设内容和规模”分析内容可知，本项目属于“五十五、核与辐射”中“172、核技术利用建设项目—使用 III 类放射源，使用 I 类、II 类、III 类射线装置”，本项目建设内容涉及两个以上项目类别，其环境影响评价类别应按照其中单项等级最高的确定，因此，本项目环境影响评价类别为编制环境影响报告书。

为此，浙江大学医学院附属邵逸夫医院（浙江省邵逸夫医院）委托中辐环境科技有限公司开展“浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程配套核技术利用项目”（简称“本项目”）的环评工作。在接受委托后，评价单位组织相关技术人员进行了现场勘察、资料收集和辐射环境现状的委托监测等工作，并结合项目特点，按照《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）等规定要求编制完成本环评报告书。

## 1.2.4 产业政策和规划符合性

### 1.2.4.1 产业政策符合性

本项目属于《产业结构调整指导目录（2024年本）》（中华人民共和国国家发展和改革委员会令第7号）中第一类“鼓励类”中第十三项“医药”中第四条“高端医疗器械创新发展：新型基因、蛋白和细胞诊断设备，新型医用诊断设备和试剂，高性能医学影像设备，高端放射治疗设备，急危重症生命支持设备，人工智能辅助医疗设备，移动与远程诊疗设备，高端康复辅助器具，高端植入介入产品，手术机器人等高端外科设备及耗材，生物医用材料、增材制造技术开发与应用”以及第三十七项“卫生健康”中第一条“医疗服务设施建设”。因此，本项目建设为国家鼓励类产业，符合国家现行产业政策。

本次环评为浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程配套核技术利用项目辐射环境影响评价，浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程（项目代码为2411-330000-04-01-141306）于2025年10月9日得到浙江省发展和改革委员会同意批复（浙发改项字〔2025〕343号）。

综上所述，本项目建设符合国家和地方产业政策要求。

#### 1.2.4.2 规划符合性分析

##### 1.2.4.2.1 与医疗卫生相关规划符合性

《健康中国2030规划纲要》明确提出要加强肿瘤等重大疾病的防治，提高患者生存质量和生存率。国务院常务会议上也多次提出要集中优势力量开展疑难高发癌症治疗专项重点攻关。此外，国家卫生健康委员会等部门还制定了《关于加强肿瘤规范化诊疗工作的通知》《关于推进肿瘤多学科诊疗模式的通知》等文件，要求各级医疗机构加强肿瘤诊疗能力建设，提高肿瘤诊疗水平。国家癌症中心印发《肿瘤诊疗质量提升行动计划实施方案》，提出十大重点任务，包括：建立覆盖肿瘤诊疗全周期全过程的医疗服务体系；积极推行“单病种，多学科”综合治疗模式；促进肿瘤患者检验检查合理化；持续开展抗肿瘤药物临床应用监测，建立超常预警机制；医防结合，积极推进癌症筛查与早诊早治工作；加强医疗技术临床应用能力建设与人才培养；提高姑息治疗的技术和规范水平，提升癌症中晚期患者生活质量；开展肿瘤规范化诊疗全过程管理与培训；加大科普宣教工作开展力度；建立完善肿瘤诊疗质量管理评估体系，对肿瘤诊疗质量与工作效果进行评估等。

为贯彻落实《“健康中国2030”规划纲要》《国务院关于实施健康中国行动的意见》（国发〔2019〕13号）和《健康浙江2030行动纲要》精神，浙江省人民政府出台《浙江

省人民政府关于推进健康浙江行动的实施意见》：推进重点癌症早筛查、早诊断、早治疗，有序扩大癌症筛查范围。完善死因监测和肿瘤登记报告系统，开展肿瘤全周期监测。在恶性肿瘤等相关疾病领域建设一批重大疾病诊治技术研究中心，推广癌症诊疗规范和临床路径，创新中医癌症诊疗模式，提高临床疗效，提升癌症患者生存质量等。

因此，本项目的建设与国家、浙江省医疗卫生事业相关规划是相符的。

#### 1.2.4.2.2 与土地利用规划的符合性

本项目位于浙江省杭州市钱塘区下沙路 368 号浙江大学医学院附属邵逸夫医院钱塘院区南区东侧预留用地，地块原为杭州市钱塘医院二期预留用地，现以行政划拨方式将土地无偿供应给浙江大学医学院附属邵逸夫医院，会议纪要具体见附件 9。根据“建设用地规划许可证（地字第 3301142025YG0022518 号，具体见附件 8）”，本项目用地性质为医疗卫生用地，本项目的实施符合当地国土空间规划相关要求。

#### 1.2.4.2.3 “杭州市生态环境分区管控动态更新方案” 相符性

根据《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》，要求落实“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单”约束，现分析如下：

##### （1）生态保护红线

本项目位于浙江省杭州市钱塘区下沙路 368 号浙江大学医学院附属邵逸夫医院钱塘院区南区东侧预留用地，地块原为杭州市钱塘医院二期预留用地，现以行政划拨方式将土地无偿供应给浙江大学医学院附属邵逸夫医院，根据“建设用地规划许可证（地字第 3301142025YG0022518 号）”，本项目用地性质为医疗卫生用地。

根据《杭州市国土空间总体规划（2021-2035 年）》，本项目位于城镇发展区，不涉及生态保护红线和永久基本农田。本项目所在地属于《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》（杭环发〔2024〕49 号）中规定的城镇生活重点管控单元，满足生态保护红线要求。

##### （2）环境质量底线

根据辐射环境现状检测结果可知，本项目拟建场址及周围 $\gamma$ 辐射剂量率处于当地辐射环境本底范围值内，中子剂量当量率未见异常。根据本次环评结论，本项目建成投运后辐射工作场所周围的辐射剂量率均低于标准限值要求，运行过程中产生的“三废”等污染物均得到合理处置，本项目在落实本报告提出的各项污染防治措施后，不会对周围

环境产生不良影响。因此本项目建成投运后不会对区域环境质量造成明显影响，满足区域环境质量改善目标管理要求，符合环境质量底线要求。

### （3）资源利用上线

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

### （4）生态环境准入清单

本项目为核技术利用项目，不属于工业项目。对照《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》（杭环发〔2024〕49号），本项目属于“ZH33011420001钱塘区下沙城镇生活重点管控单元”，生态环境准入清单符合性分析详见下表。

表 1.2.4-1 生态环境准入清单符合性分析一览表

生态环境准入清单要求		本项目情况	是否符合
空间布局引导	禁止新建、扩建三类工业项目，现有三类工业项目改建不得增加污染物排放总量，鼓励现有三类工业项目搬迁关闭。除工业功能区（小微园区、工业集聚点）外，原则上禁止新建其他二类工业项目。现有二类工业项目改建、扩建，不得增加管控单元污染物排放总量。严格执行畜禽养殖禁养区规定。	本项目为核技术利用项目，不属于工业项目。	是
污染物排放管控	深化城镇“污水零直排区”建设。加强噪声和臭气异味防治，强化餐饮油烟治理，严格施工扬尘监管。	本项目为核技术利用项目，本项目建成投运后辐射工作场所周围的辐射剂量率均低于标准限值要求，运行过程中产生的“三废”等污染物均得到合理处置，本项目在落实本报告提出的各项污染防治措施后，不会对周围环境产生不良影响。	是
环境风险防控	合理布局工业、商业、居住、科教等功能区块，严格控制噪声、恶臭、油烟等污染排放较大的建设项目布局。	本项目用地性质为医疗卫生用地。本项目不属于噪声、恶臭、油烟等污染排放较大的建设项目。	是
资源开发效率要求	/	/	/

综上所述，本项目不涉及生态保护红线、符合环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单的要求，本项目的建设符合“杭州市生态环境分区管控动态更新方案”要求。

## 杭州市生态环境分区管控动态更新方案图集

杭州市钱塘区环境管控单元分类图

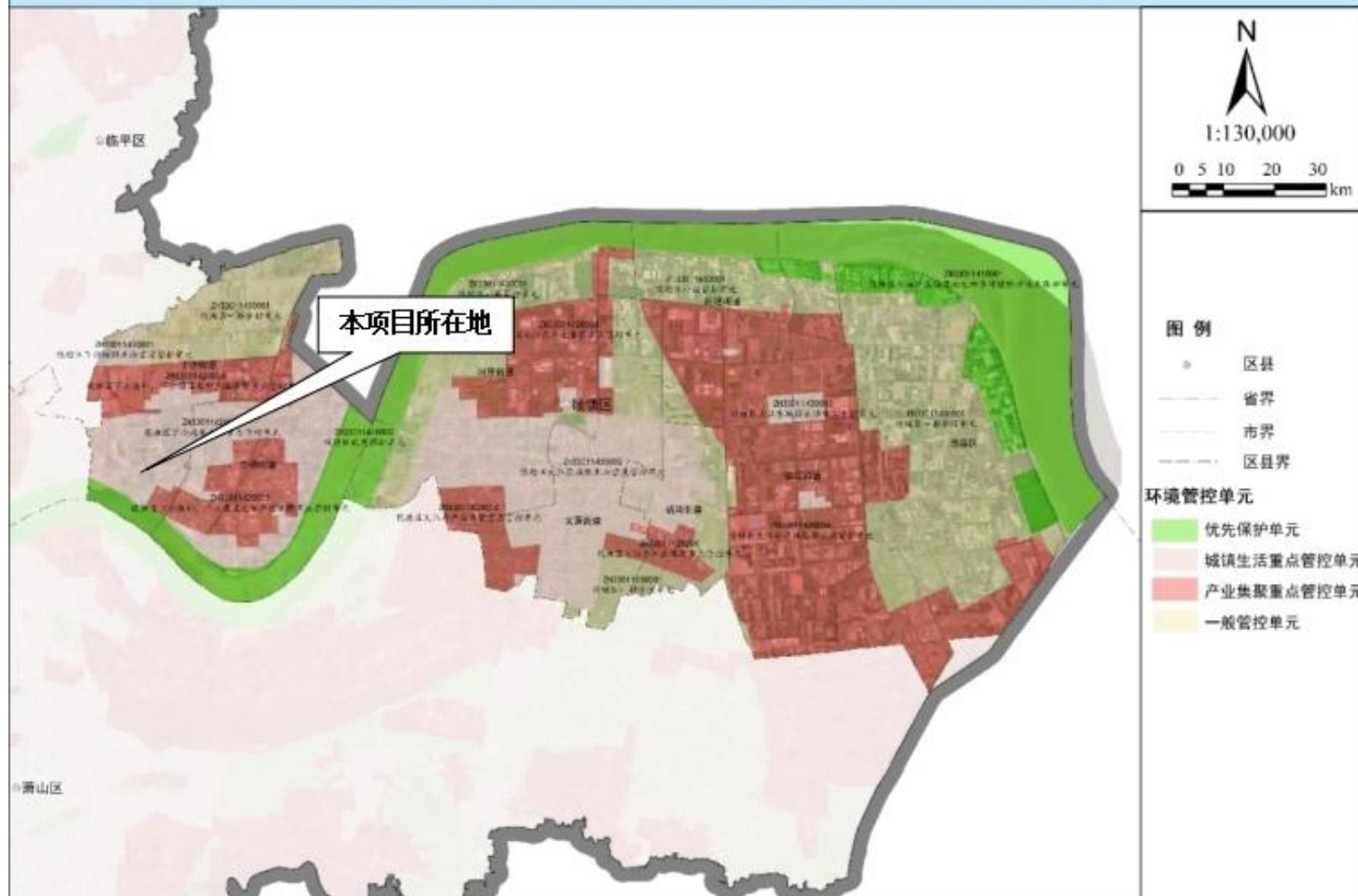


图 1.2.4-1 杭州市钱塘区环境管控单元分类图

## 1.2.5 周围环境概况

本项目位于浙江省杭州市钱塘区下沙路 368 号浙江大学医学院附属邵逸夫医院钱塘院区南区东侧预留用地。地理位置见图 1.2.5-1。

浙江大学医学院附属邵逸夫医院钱塘院区经海通街分隔成南北两区。医院南区东临幸福河，隔河为幸福南路；南侧为下沙路，隔路为杭州下沙路隧道有限公司；西侧为西格北路，隔路为杭州钱塘新区和禾医院和和达高科生命科技健康中心；北侧为海通街，隔街为医院北区、郡原蓝湖国际（住宅区）。医院北区东侧为聚雅巷，隔巷为郡原蓝湖国际（住宅区）；南侧为海通街，隔街为医院南区；西侧为七格北路，隔路为杭州市钱塘区月雅河小学；北侧为顺新街，隔街为湖景居（住宅区），医院周边环境情况见图 1.2.5-2。

医院拟在预留用地内建设 1 幢质子治疗中心暨科研转化大楼，质子治疗中心设地上三层，门诊及科研转化大楼设地上十一层，设整体连通的地下三层。本项目质子治疗机房为三层结构，拟建于质子治疗中心负一层、负二层、负三层；加速器机房、后装机房和模拟定位 CT 机房拟建于负二层放疗中心。质子治疗中心东侧为绿化和院内道路；南侧为绿化和院内道路；西侧为绿化和院内道路；北侧为共享景观交通厅。门诊及科研转化大楼东侧为院内道路和绿化；南侧为共享景观交通厅；西侧为绿化和院内道路；北侧为绿化和院内道路。

预留用地现状为绿化公园，场地上为一些绿植草木，以及少量的木椅、石凳等。项目总平面布置图见图 1.2.5-3。



图 1.2.5-1 本项目地理位置图



图 1.2.5-2 医院周边环境关系图

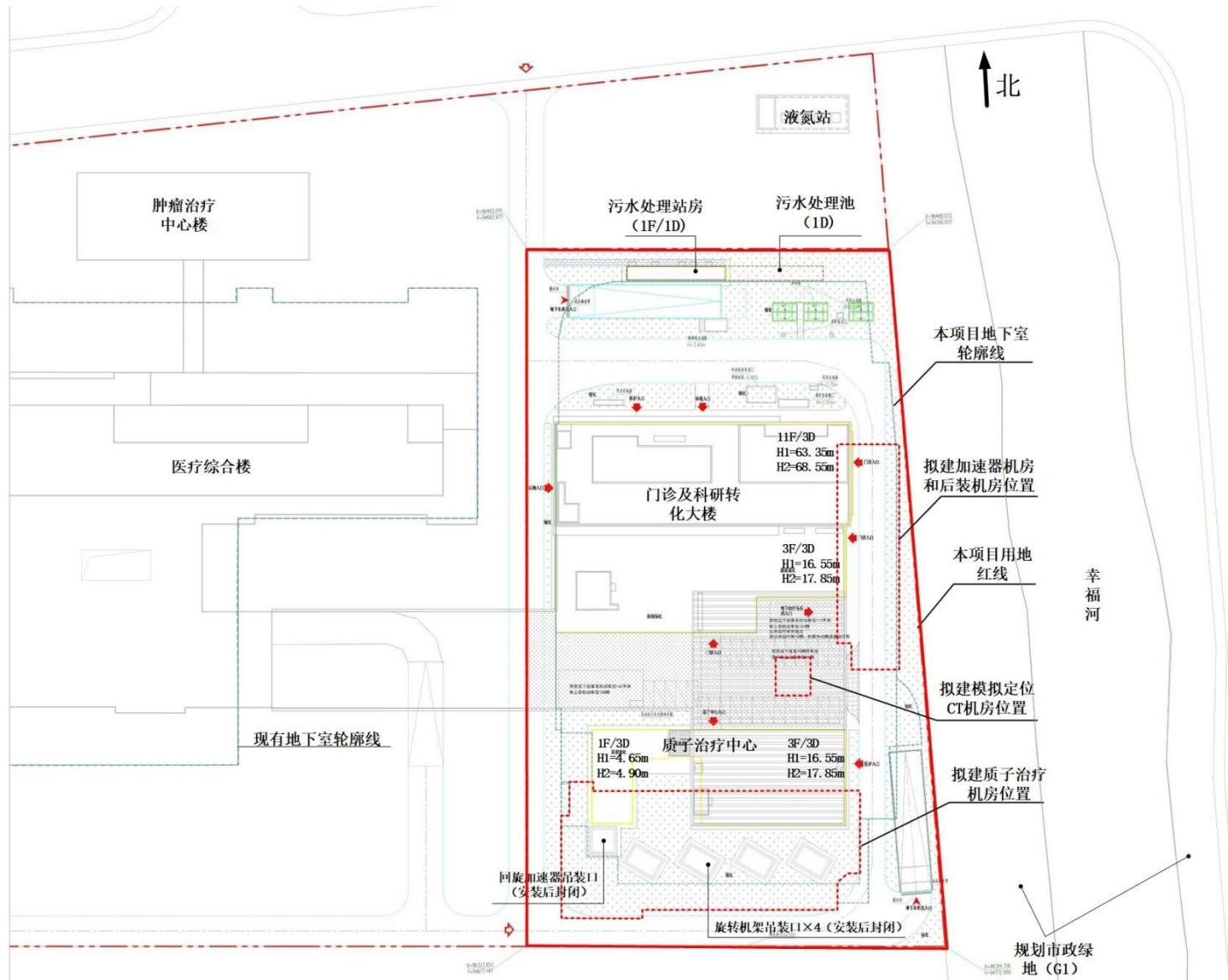


图 1.2.5-3 项目总平面布置图

## 1.2.6 核技术利用现状

医院目前持有的辐射安全许可证编号为：浙环辐证[A0041]，许可种类和范围：使用V类放射源；使用II类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所，发证日期为2025年7月21日，有效期至2027年10月13日。

医院现有核技术利用项目具体见下表。

表 1.2.6-1 现有放射源

序号	核素	类别	活度(贝可)×枚数
1	Co-57	V类	7.4E+8*1
2	Ge-68	V类	1.11E+8*3
3	Sr-90(Y-90)	V类	1.11E+9*2
4	Sr-90(Y-90)	V类	1.48E+9*1

表 1.2.6-2 现有非密封放射性物质

序号	核素名称	使用场所	日等效最大操作量 (贝可)	年最大用量 (贝可)	场所等级
1	Tl-201	1-2F 核医学科 ECT 机房 1	3.7E+6	1.92E+10	丙级
2	Ra-223		1.13E+9	3.75E+9	
3	Sm-153		3.7E+8	3.33E+11	
4	Sr-89		5.92E+7	3.55E+10	
5	Ga-67		3.7E+7	1.92E+10	乙级
6	I-131		4.44E+8	9.77E+11	
7	Tc-99m		4.63E+8	1.02E+13	
8	P-32		2.96E+7	2.66E+10	
9	Y-90		3.7E+7	6.66E+10	
10	F-18	PET-CT 机房	1.11E+7	2.78E+12	丙级
11	F-18	PET-CT 机房	7.4E+7	1.63E+12	乙级
12	P-32	大运河负一楼核 医学科	1.48E+7	1.78E+10	乙级
13	Sr-89		2.96E+7	1.78E+10	
14	Ga-67		3.7E+7	3.85E+10	
15	I-131		3.7E+8	8.14E+11	
16	Tl-201		3.7E+6	3.85E+10	
17	I-131		3.7E+5	8.14E+8	
18	Sm-153		1.55E+8	9.33E+10	
19	F-18		1.11E+7	2.44E+12	
20	Tc-99m		3.7E+7	8.14E+12	
21	I-131		2.96E+9	2.96E+12	
22	I-125		3.7E+5	7.4E+8	
23	I-125(粒子 源)	放射科	1.11E+8	2.22E+11	丙级

24	I-131	绍兴 5 号楼一楼 核医学科	1.85E+8	3.7E+11	乙级
25	Lu-177		1.00E+9	5.00E+11	
26	Ra-223		1.85E+9	1.85E+10	
27	I-131		2.66E+9	3.55E+12	
28	Tl-201		3.7E+6	3.7E+10	
29	Sm-153		1.85E+8	9.25E+10	
30	I-131		7.4E+5	3.7E+8	
31	Ga-67		3.7E+7	3.7E+10	
32	I-123		1.11E+7	1.85E+10	
33	P-32		1.48E+7	1.48E+10	
34	Tc-99m		5.55E+7	1.11E+13	
35	Ac-225		7.4E+8	1.85E+10	
36	Sr-89		2.96E+7	2.96E+10	

表 1.2.6-3 现有射线装置

序号	装置名称	规格型号	数量	技术参数	类别	使用场所
1	CT	uCT 510	1	管电压 140 kV 管电流 420mA	III类	1-1F 东侧 22 号 CT 机房
2	直线加速器	VitalBeam	1	粒子能量 20MeV	II类	1-1F 东侧放疗科直线加速器机房
3	CT	Lightspeed VCT	1	管电压 140 kV 管电流 800mA	III类	1-1F 东侧放射科 12 号机房
4	DR	Ysio	1	管电压 150 kV 管电流 800mA	III类	1-1F 放射科东侧 13 号机房
5	CT	Revolution Frontier ES	1	管电压 140kV 管电流 835mA	III类	1-1F 急诊 CT 机房
6	DR	Definium Tempo Pro	1	管电压 150kV 管电流 1000mA	III类	1-1F 急诊 DR 机房
7	DSA	Azurion 7 M20	1	管电压 125kV 管电流 1000mA	II类	1-1F 急诊 DSA1 号机房
8	DSA	Azurion 7 M20	1	管电压 125kV 管电流 1063mA	II类	1-1F 急诊 DSA2 号机房
9	碎石机	ARCADIS Varic	1	管电压 110kV 管电流 2 mA	III类	1-1F 门诊碎石机房
10	移动 DR	MobiEye 700A	1	管电压 150kV 管电流 500mA	III类	1-2F 放射科(移动)
11	CT	SOMATOM Definition As	1	管电压 140kV 管电流 666mA	III类	1-2F 放射科 11 号机房
12	乳腺机	Senographe Pristina	1	管电压 49kV 管电流 100 mA	III类	1-2F 放射科 1 号机房
13	DR	Digital Diagnost	1	管电压 150 kV 管电流 1000mA	III类	1-2F 放射科 2 号机房
14	DR	uDR 588i	1	管电压 150 kV 管电流 630 mA	III类	1-2F 放射科 3 号机房
15	DR	Digital Diagnost	1	管电压 150 kV 管	III类	1-2F 放射科 4

				电流 1000mA		号机房
16	CT	Optima CT620	1	管电压 140 kV 管电流 600 mA	III类	1-2F 放射科 7号机房
17	胃肠机	Ultimax-iDREX-UI80	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	1-2F 放射科 8号机房
18	CT	SOMATOM Definition Flash	1	管电压 140 kV 管电流 800 mA	III类	1-2F 放射科 9号机房
19	移动 DR	MUX-200D	1	管电压 133 kV 管电流 400 mA	III类	1-2F 放射科 (移动)
20	SPECT-CT	Discovery 670czt	1	管电压 140 kV 管电流 440 mA	III类	1-2F 核医学科 ECT 机房 1
21	ECT	Symbia Intevo Bold	1	管电压 130 kV 管电流 345 mA	III类	1-2F 核医学科 ECT 机房 2
22	移动 C 臂机	ARCADIS Avantic	1	管电压 125 kV 管电流 250 mA	III类	2-3F 手术室 22 号
23	移动 C 臂机	OECFluorostar CompactD	1	管电压 110 kV 管电流 20 mA	III类	
24	DSA	Integris Allura Xper FD20	1	管电压 125 kV 管电流 1250mA	II类	2-4F 复合手术室
25	CT	SOMATOM go.ALL	1	管电压 140 kV 管电流 625 mA	III类	3-1F 发热门诊
26	DR	DRX-Compass A	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	3-1F 放射科 18 号机房
27	移动 C 臂机	OEC One ASD	1	管电压 110 kV 管电流 25 mA	III类	3-3F19、21、22、23 号手术室
	移动 C 臂机	OEC ONE	1	管电压 110 kV 管电流 20 mA	III类	
	移动 C 臂机	OEC one	1	管电压 110 kV 管电流 20 mA	III类	
	移动 C 臂机	OEC ELite CFDx	1	管电压 120 kV 管电流 75 mA	III类	
29	移动 C 臂机	Ziehm Vision RFD 3D	1	管电压 120 kV 管电流 250 mA	III类	3-3F22 号手术室
30	牙科 CT	Planmeca ProMax 3D Mid	1	管电压 120 kV 管电流 16 mA	III类	3-5F 牙科 CT 机房
31	口腔 CT	ORTHOP HOS XG 3D Ceph	1	管电压 90 kV 管电流 16 mA	III类	3-5F 牙科口腔 CT 机房
32	牙科 CR	expert DC	1	管电压 65kV 管电流 7 mA	III类	3-5F 牙科中心 诊室 11
33	胃肠机	AXIOM Luminos dRF	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	3-8F 放射科 19 号机房
34	口腔 CT	Dentrix 55	1	管电压 90 kV 管电流 10 mA	III类	5-1F 牙科 CT 机房
35	DR	uDR 780i Pro	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	6-10F27 号机房
36	CT	SOMATO M Definition Edge	1	管电压 140 kV 管电流 666 mA	III类	6-10F28 号机房
37	CT	SOMATO M Force	1	管电压 150 kV 管电流 1300 mA	III类	6-10F29 号机房

38	全身骨密度仪	Lunar iDXA	1	管电压 76 kV 管电流 3 mA	III类	6-10F 骨密度室
39	DSA	Innova 2100-IQ	1	管电压 125 kV 管电流 1000 mA	II类	6-15F 心内科(导 1)
40	DSA	Integrus Allura Xper FD10	1	管电压 125 kV 管电流 1250 mA	II类	6-15F 心内科(导 2)
41	DSA	Innova IGS 520	1	管电压 125 kV 管电流 1250 mA	II类	6-15F 心内科(导 3)
42	DSA	Azurion 7 M12	1	管电压 125 kV 管电流 1000 mA	II类	6-15F 心内科(导 4)
43	DSA	Azurion 7 M12	1	管电压 125 kV 管电流 1000 mA	II类	6-15F 心内科(导 5)
44	DSA	Azurion 7 M12	1	管电压 125 kV 管电流 1000 mA	II类	6-15F 心内科(导 6)
45	DSA	Azurion 7 M12	1	管电压 125 kV 管电流 1000 mA	II类	6-15F 心内科(导 7)
46	DSA	Azurion 7M20	1	管电压 125kV 管电流 1000 mA	II类	6-15F 心内科(导 8)
47	全身骨密度仪	Lunar iDXA	1	管电压 100 kV 管电流 2.5 mA	III类	6-2F 骨密度机房
48	ERCP 专用机	ProxiDiag n ost N90	1	管电压 150 kV 管电流 714.3mA	II类	6-7F19 号机房
49	C 臂机(ERCP)	Cios Alpha	1	管电压 125 kV 管电流 120 mA	II类	6-7F20 号机房
50	C 臂机(ERCP)	Cios Spin	1	管电压 125 kV 管电流 120 mA	II类	6-7F21 号机房
51	CT	SOMATOM go.Fit	1	管电压 140 kV 管电流 825 mA	III类	6-8F37 号 CT 机房
52	DR	uDR 780iPro	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	6-8F38 号 DR 机房
53	PET-CT	uMI550	1	管电压 140 kV 管电流 420 mA	III类	PET-CT 机房
54	CT	uCT820	1	管电压 140 kV 管电流 800 mA	III类	大运河 2 号楼一层急诊中心 15 号 CT 机房
55	DR	uDR781iPro	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	大运河 2 号楼一层急诊中心 16 号 DR 机房
56	胃肠机(ERCP)	Luminos Agile Max	1	管电压 150 kV 管电流 1000 mA	II类	大运河 3 号楼二层内镜中心 12 号机房
57	DR	uDR588i	1	管电压 150 kV 管电流 630 mA	III类	大运河 3 号楼负一层 DR 机房
58	数字胃肠机	UItimax-iDREX-UI80	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	大运河 3 号楼负一层放射科 9 号机房
59	CT	uCT 768	1	管电压 140 kV 管电流 667 mA	III类	大运河 3 号楼负一层放射科 CT1 号机房

60	CT	uCT 960+	1	管电压 140 kV 管电流 800 mA	III类	大运河 3 号楼负一层放射科 CT3 号机房
61	DR	uDR 780iPro	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	大运河 3 号楼负一层放射科 DR7 号机房
62	乳腺机	Senographe Pristina	1	管电压 49 kV 管电流 100 mA	III类	大运河 3 号楼负一层放射科 乳腺 DR11 号机房
63	全身骨密度仪	Lunar Prodigy Pro	1	管电压 76 kV 管电流 3 mA	III类	大运河 3 号楼三层骨密度机房
64	口腔 CT	YOFO- PIROX-D	1	管电压 120 kV 管电流 8 mA	III类	大运河 3 号楼三层口腔科 D308 室口腔 CBCT 机房
65	牙片机	RAY98(M)	1	管电压 65kV 管电流 7 mA	III类	大运河 3 号楼三层口腔科 D309 室牙片机房
66	移动 C 臂机	OEC One ASD	2	管电压 110 kV 管电流 25 mA	III类	大运河 3 号楼四层 2 号、3 号手术室
	移动 C 臂机	OEC One ASD		管电压 110 kV 管电流 25 mA		
67	DSA	Azurion 7 M20	1	管电压 125 kV 管电流 1000mA	II类	大运河 3 号楼四层 30 号手术室
68	DSA	Azurion 7 M12	1	管电压 125 kV 管电流 1000mA	II类	大运河 3 号楼四层 31 号手术室
69	SPECT-CT	NM/CT 870 DR	1	管电压 140 kV 管电流 440 mA	III类	大运河负一楼核医学科
70	DSA	ARTISpheno Master	1	管电压 125 kV 管电流 1000mA	II类	大运河院区 3-4F 手术室 32 号机房
71	移动 DR	uDR 380i	2	管电压 150 kV 管电流 400 mA	III类	大运河院区院内移动
	移动 DR	uDR 380i		管电压 150 kV 管电流 400 mA		
72	胃肠机(ERCP)	Ultimax-i DREX- UI80	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	绍兴 1 号楼三楼内镜中心 19 号机房
73	移动 C 臂机	OEC One ASD	1	管电压 110 kV 管电流 25 mA	III类	绍兴 1 号楼四楼手术中心 19 号手术室
74	DSA	Azurion 7M20	1	管电压 125kV 管电流 1000mA	II类	绍兴 1 号楼四楼手术中心 25 号手术室
75	口腔	YOFO- PIROX-D	1	管电压 120 kV 管	III类	绍兴 1 号楼四

	CBCT 机			电流 8 mA		楼牙科中心口腔 CT 机房
76	牙片机	CS2100	1	管电压 60 kV 管电流 7 mA	III类	绍兴 1 号楼四楼牙科中心牙片机房
77	全身骨密度仪	Prodigy Pro	1	管电压 76 kV 管电流 3 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼北区骨密度室
78	胃肠机	Ultimax-i DREX- UI80	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼放射科南区 11 号机房
79	CT 机	SOMATOM Force	1	管电压 150kV 管电流 2600mA	III类	绍兴 1 号楼一楼放射科南区 1 号机房
80	CT	SOMATO M go.Top	1	管电压 140 kV 管电流 625 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼放射科南区 2 号机房
81	CT	SOMATO M go.Fit	1	管电压 140 kV 管电流 625 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼放射科南区 3 号机房
82	DR	DRX-Compass A	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼放射科南区 5 号机房
83	乳腺机	Senograph e Pristina	1	管电压 49 kV 管电流 100 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼放射科南区 8 号机房
84	DR	uDR 780i Pro	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼放射科南区 9 号机房
85	DR 机	DRX-Compass A	1	管电压 150 kV 管电流 800 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼急诊中心 27 号机房
86	CT 机	Revolution Apex Expert	1	管电压 140 kV 管电流 1300 mA	III类	绍兴 1 号楼一楼急诊中心 28 号机房
87	DSA	Azurion 7 M20	1	管电压 125 kV 管电流 1000mA	II类	绍兴 1 号楼一楼急诊中心 29 号机房
88	DSA	Azurion 7 M12	1	管电压 125kV 管电流 1000mA	II类	绍兴 1 号楼一楼介入中心导管室 6
89	CT	SOMATOM go.Fit	1	管电压 140 kV 管电流 625mA	III类	绍兴 2 号楼三楼体检中心 30 号机房
90	DR	DigiEye 680P	1	管电压 150 kV 管电流 800mA	III类	绍兴 2 号楼三楼体检中心 31 号机房
91	SPECT/CT	NM/CT 870 DR	1	管电压 140 kV 管电流 440mA	III类	绍兴 5 号楼一楼核医学 ECT1 号机房

92	移动 DR	MOBIEY E 700	2	管电压 150 kV 管 电流 500mA	III类	绍兴院区院内 移动
	移动 DR	MOBIEY E 700		管电压 150 kV 管 电流 500mA		

## 1.3 编制依据

### 1.3.1 法律、法规和规章

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(10) 《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》（2019年9月20日

生态环境部令第 9 号发布），自 2019 年 11 月 1 日起施行；

（11）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），2020 年 1 月 1 日起施行；

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

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

（14）《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发〔2015〕40 号），自 2015 年 2 月 27 日起施行。

### 1.3.2 技术导则、标准

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

（2）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

（3）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；

（4）《环境 $\gamma$ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；

（5）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）；

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

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

（8）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分： $\gamma$ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）；

（9）《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/T201.5-2015）；

（10）《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）；

（11）《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）；

（12）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

（13）《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；

（14）《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）；

（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》（GBZ2.1-2019）

及第1号修改单；

- (16) 《环境中放射性核素测量-土壤-第六部分：总 $\alpha$ 和总 $\beta$ 活度测量》(ISO18589-6: 2019)；
- (17) 《环境及生物样品中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法》(GB/T 16145-2022)；
- (18) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》(HJ1326-2023)；
- (19) 《电离辐射监测质量保证通用要求》(GB8999-2021)；
- (20) 《粒子加速器辐射防护规定》(GB5172-2025)。

### 1.3.3 其它文件、资料

- (1) 《浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程环境影响报告表》(杭州杭大环保工程有限公司, 2025年)；
- (2) 《浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程可行性研究报告》(浙江省现代建筑设计研究院有限公司, 2025年)；
- (3) NCRP. Report NO.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP,2005;
- (4) NCRP. Report NO.151. Structural shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma- Ray Radiotherapy facilities. NCRP,2005;
- (5) IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001;
- (6) IAEA Technical Reports Series NO.283. Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators.IAEC,1988;
- (7) 《恒健质子重离子装置的辐射与屏蔽设计》，吴青彪等，南方能源建设，2016年第3卷第3期；
- (8) (美) 帕特森(H.W.Patterson), (美) 托马斯(R.H.Thomas)著; 刁会昌等译. 加速器保健物理[M].北京, 原子能出版社.1983;
- (9) 医院提供的与本项目相关的其他技术资料。

## 1.4 评价标准

### 1.4.1 剂量限值和剂量约束值

#### 1.4.1.1 剂量限值

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

（1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

- 1) 审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv；
- 2) 任何一年中的有效剂量，50mSv。

（2）公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

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

#### 1.4.1.2 剂量约束值

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

因此，本项目以 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值，以 0.1mSv/a 作为公众人员的年剂量约束值。

#### 1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

##### 1.4.2.1 放射治疗场所屏蔽体外剂量控制要求

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），并参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.5-2015）中的相关规定，本项目放射治疗场所屏蔽体外剂量率控制水平应按照下述规定确定：

（1）关注区域的周剂量参考控制水平  $H_c$ ：

机房外工作人员： $H_c \leq 100\mu\text{Sv}/\text{周}$ ；

机房外非工作人员： $H_c \leq 5\mu\text{Sv}/\text{周}$ 。

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

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

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

(2) 按照关注点人员居留因子不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平

$$\dot{H}_{c,max} (\mu\text{Sv}/\text{h})$$

1) 人员居留因子  $T > 1/2$  的场所： $H_c \leq 2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

2) 人员居留因子  $T \leq 1/2$  的场所： $H_c \leq 10 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

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

另外，参考文献《恒健质子重离子装置的辐射与屏蔽设计》(吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期)，同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于  $5\text{mSv}/\text{h}$  时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本报告以“ $5\text{mSv}/\text{h}$  即  $5000\mu\text{Sv}/\text{h}$ ”作为各辐射工作场所屏蔽体外表面与土壤交界处的剂量率控制水平，后文不再赘述。本项目的居留因子根据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)选取，具体数值见下表。

**表 1.4.2-1 居留因子的选取**

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

根据上述要求计算得到本项目放射治疗场所屏蔽体外剂量率控制水平见下表。

表 1.4.2-2 质子放射治疗系统屏蔽体外剂量率控制水平

场所	楼层	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,max}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$H_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
回旋加速器机房	负二层	北	维护室	1/16	1	58.33	100	27.43	10	10.00
		北	门外缓冲间	1/8	1	58.33	100	13.71	10	10.00
		北	总控室	1	1	58.33	100	1.71	2.5	1.71
		北	服务器机房	1/16	1	58.33	5	1.37	10	1.37
		北	治疗控制室 1	1	1	58.33	100	1.71	2.5	1.71
		东	质子治疗室 1	1/2	1	58.33	100	3.43	10	3.43
		东	质子治疗室 1	1/2	1	58.33	100	3.43	10	3.43
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	负三层	北	高压细水雾机房	1/16	1	58.33	5	1.37	10	1.37
		东	质子治疗室 1	1/2	1	58.33	100	3.43	10	3.43
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	负一层	北	水冷机房	1/16	1	58.33	5	1.37	10	1.37
		东	质子治疗室 1	1/2	1	58.33	100	3.43	10	3.43
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	/ 底	土层	不可上人屋面	1/40	1	58.33	5	3.43	10	3.43
	/ 顶	封闭吊装口上方	地面绿化	1/16	1	58.33	5	1.37	10	1.37
	/ 顶	质子治疗中心一层 (主要是库房)	质子治疗中心二层 (不可上人屋面)	1/16	1	58.33	5	1.37	10	1.37
	/ 顶	质子治疗中心二层 (不可上人屋面)	—	1/40	1	58.33	5	3.43	10	3.43

场所	楼层	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\bar{H}_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\bar{H}_{c,d}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\bar{H}_{c,max}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$H_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
4间质子治疗室	/	顶	质子治疗中心一层(治疗计划办公室)	1	1	58.33	100	1.71	2.5	1.71
		顶	质子治疗中心一层(会议室)	1/16	1	58.33	5	1.37	10	1.37
	质子治疗室 1*	负二层 北	治疗控制室 1	1	1	14.58	100	6.86	2.5	2.50
		负二层 北	门外缓冲间	1/8	1	14.58	100	54.86	10	10.00
		负二层 北	QC 质控间	1/4	1	14.58	100	27.43	10	10.00
		负二层 北	治疗控制室 2	1	1	14.58	100	6.86	2.5	2.50
		负二层 东	质子治疗室 2	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		负二层 南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	负三层	负三层 北	衰变池机房和污水提升间	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		负三层 东	质子治疗室 2	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		负三层 南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	负一层	负一层 北	质子设备电源间	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		负一层 东	质子治疗室 2	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		负一层 南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
4间质子治疗室	质子治疗室 2	负二层 北	治疗控制室 2	1	1	14.58	100	6.86	2.5	2.50
		负二层 北	门外缓冲间	1/8	1	14.58	100	54.86	10	10.00
		负二层 北	模具兼男更室及女更室	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		负二层 北	治疗控制室 3	1	1	14.58	100	6.86	2.5	2.50
		负二层 东	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		负二层 南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		负二层 西	质子治疗室 1	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
	负三层	负三层 北	送风机房	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		负三层 东	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		负三层 南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		负三层 西	质子治疗室 2	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
	负一层	负一层 北	质子设备电源间	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		负一层 东	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		负一层 南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		负一层 西	质子治疗室 1	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00

场所	楼层	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\bar{H}c$ , $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\bar{H}c,d$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\bar{H}c,max$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$Hc$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
质子治疗室 3	负二层	北	治疗控制室 3	1	1	14.58	100	6.86	2.5	2.50
		北	门外缓冲间	1/8	1	14.58	100	54.86	10	10.00
		北	VIP 等候室、模具室	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		北	治疗控制室 4	1	1	14.58	100	6.86	2.5	2.50
		东	质子治疗室 4	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		东	质子治疗室 4	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		西	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
	负三层	北	弱电井、预留库房、污水提升间	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		东	质子治疗室 4	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	质子治疗室 2	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
	负一层	北	UPS 间、超纯水机房	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		东	质子治疗室 4	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	质子治疗室 2	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
质子治疗室 4	负二层	北	治疗控制室 4	1	1	14.58	100	6.86	2.5	2.50
		北	门外缓冲间	1/8	1	14.58	100	54.86	10	10.00
		北	麻醉兼抢救室、病人恢复室	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		东北	配电间	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		东北	质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		东北	科研实验用房	1	1	14.58	5	0.34	2.5	0.34
		东、东南	后区	1/16	1	14.58	100	109.71	10	10.00
		西	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		西	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	负	北	衰变池机房	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49

场所	楼层	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,max}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$H_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
质子治疗中心	三层	东	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
	负一层	北	管道穿墙处: 补水机房	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		北	补水机房	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		东	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		南	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		西	质子治疗室 3	1/2	1	14.58	100	13.71	10	10.00
	顶棚和地坪	底	土层	—	—	—	—	—	—	5000
		底	不可上人屋面	1/40	1	14.58	5	13.71	10	10.00
		顶	封闭吊装口上方	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		顶	地面绿化	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		顶	质子治疗中心一层 (主要是候诊大厅)	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49
		顶	质子治疗中心二层 (主要是化疗中心座椅治疗区)	1/2	1	14.58	5	0.69	10	0.69
		顶	质子治疗中心三层 (主要是预留用房)	1	1	14.58	5	0.34	2.5	0.34
		顶	质子治疗中心屋面设备区	1/16	1	14.58	5	5.49	10	5.49

注\*: 质子治疗室 1 运行时, 西侧回旋加速器同时出束, 故不作为关注点位。

表 1.4.2-3 直线加速器和后装机屏蔽体外剂量率控制水平

场所	方位	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间, h/周	$\dot{H}_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{周}$	$\dot{H}_{c,d}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\dot{H}_{c,max}$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$H_c$ , $\mu\text{Sv}/\text{h}$
1 号直线加速器机房	东侧	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	南侧	2 号直线加速器机房	1/2	1	6.25	100	32	10	10
	西侧	控制室	1	1	6.25	100	16	2.5	2.5
		设备间	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
		防护门外	1/8	1	6.25	5	6.4	10	6.4

	北侧	回填土	—	—	—	—	—	—	5000
	上方	排风机房/工具间/非机动车库	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
	下方	土层	—	—	—	—	—	—	5000
2号直线加速器机房	东侧	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	南侧	3号直线加速器机房	1/2	1	6.25	100	32	10	10
	西侧	控制室	1	1	6.25	100	16	2.5	2.5
		设备间	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
		防护门外	1/8	1	6.25	5	6.4	10	6.4
	北侧	1号直线加速器机房	1/2	1	6.25	100	32	10	10
	上方	非机动车库	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
	下方	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	东侧	土层	—	—	—	—	—	—	5000
3号直线加速器机房	南侧	4号直线加速器机房	1/2	1	6.25	100	32	10	10
	西侧	控制室	1	1	6.25	100	16	2.5	2.5
		设备间	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
		防护门外	1/8	1	6.25	5	6.4	10	6.4
	北侧	2号直线加速器机房	1/2	1	6.25	100	32	10	10
	上方	非机动车库	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
	下方	土层	—	—	—	—	—	—	5000
4号直线加速器机房	东侧	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	南侧	后装机房	1/2	1	6.25	100	32	10	10
	西侧	控制室	1	1	6.25	100	16	2.5	2.5
		设备间	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
		防护门外	1/8	1	6.25	5	6.4	10	6.4
	北侧	3号直线加速器机房	1/2	1	6.25	100	32	10	10

后装机房	上方	非机动车库	1/16	1	6.25	5	12.8	10	10
	下方	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	东侧	土层	—	—	—	—	—	—	5000
	南侧	控制室	1	1	12.5	100	8	2.5	2.5
		防护门外	1/8	1	12.5	5	3.2	10	3.2
	西侧	准备室	1/8	1	12.5	5	3.2	10	3.2
	北侧	4号直线加速器机房	1/2	1	12.5	100	16	10	10
	上方	非机动车库	1/16	1	12.5	5	6.4	10	6.4
	下方	土层	—	—	—	—	—	—	5000

#### 1.4.2.2 CT 机房屏蔽体外剂量率控制要求

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3.1 小节：

- a) 具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；测量时，X 射线设备连续出束时间应大于仪器响应时间；
- b) CT 机、乳腺摄影、乳腺 CBCT、口内牙片摄影、牙科全景摄影、牙科全景头颅摄影、口腔 CBCT 和全身骨密度仪机房外的周围剂量当量率应不大于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；
- c) 具有短时、高剂量率曝光的摄影程序（如 DR、CR、屏片摄影）机房外的周围剂量当量率应不大于  $25\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，当超过时应进行机房外人员的年有效剂量评估，应不大于  $0.25\text{mSv}$ 。

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

#### 1.4.3 放射性废物控制要求

##### 1.4.3.1 放射性废气控制要求

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

###### 8.4 气态废物管理要求

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

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

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

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

##### 1.4.3.2 放射性废液

本项目产生的放射性废液主要是用于冷却回旋加速器部件的回路更换下来的冷却水。本项目放射治疗机房放射性废液管理按照 HJ 1198-2021 执行，具体如下：

###### 8.3 液态废物管理要求

事故或检修状况下质子/重离子加速器的活化冷却水按照放射性废液管理要求妥善

收集贮存，暂存衰变至低于豁免水平后可作为普通废液处理，并做好存档记录。

放射性废液排放前必须进行取样测量，监测结果同时满足以下标准，方可作为一般废水排放：

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

表 1.4.3-1 放射性废液中相关核素排放限值

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

(2) 放射性废液的排放执行《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)“表2 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值(日均值)”中总α、总β的排放标准要求，具体列于下表。

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

项目	排放标准, Bq/L
总α	1
总β	10

### 1.4.3.3 放射性固体废物控制要求

本项目的放射性固体废物主要为多室质子放射治疗系统拆卸下来的活化部件、处理活化冷却水的废树脂、加速器靶及通风系统更换下来的过滤器等；电子直线加速器废靶；后装机废旧放射源。

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

#### 8.2.1 废旧放射源管理要求

废旧放射源应按法律法规要求返回放射源生产厂家或原出口方。确定无法交回生产单位或者返回原出口方的，送交有相应资质的单位收贮，并承担相关费用。

#### 8.2.2 其他固态废物管理要求

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

8.2.2.2 低水平的活化部件如质子/重离子加速器治疗头器件、磁铁等，以及处理质子/重离子加速器冷却水的废树脂，集中放置在固态废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍

超出清洁解控水平的（放射性废物豁免的活度、活度浓度见附录 B）送交有资质的单位收贮。

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

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

表 1.4.3-3 放射性固体废物中放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

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

## 1.4.4 其他标准

### 1.4.4.1 X 射线设备防护性能的技术要求

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

#### 5.4 CT 设备防护性能的专用要求

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

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

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

#### 1.4.4.2 X 射线设备机房防护设施的技术要求

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

##### 6.1 X 射线设备机房布局

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

6.1.2 X 射线设备机房（照射室）的设置应充分考虑邻室（含楼上和楼下）及周围场所的人员防护与安全。

6.1.3 每台固定使用的 X 射线设备应设有单独的机房，机房应满足使用设备的布局要求。

##### 6.4 X 射线设备工作场所防护

6.4.1 机房应设有观察窗或摄像监控装置，其设置的位置应便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

6.4.2 机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。

6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。

6.4.4 机房门外应有电离辐射警告标志；机房门上方应有醒目的工作状态指示灯，灯箱上应设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句；候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。

6.4.5 平开机房门应有自动闭门装置；推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施；工作状态指示灯能与机房门有效关联。

6.4.6 电动推拉门宜设置防夹装置。

6.4.7 受检者不应在机房内候诊；非特殊情况，检查过程中陪检者不应滞留在机房内。

6.4.8 模拟定位设备机房防护设施应满足相应设备类型的防护要求。

6.4.9 CT 装置的安放应利于操作者观察受检者。

6.4.10 机房出入门宜处于散射辐射相对低的位置。

6.5.1 每台 X 射线设备根据工作内容，现场应配备不少于表 4 (本报告为表 1.4.4-1) 基本种类要求的工作人员、受检者防护用品与辅助防护设施，其数量应满足开展工作需要，对陪检者应至少配备铅橡胶防护衣。

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

6.5.5 个人防护用品不使用时，应妥善存放，不应折叠放置，以防止断裂。

表 1.4.4-1 个人防护用品和辅助防护设施配置要求

放射检查 类型	工作人员		受检者	
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施
CT 体层扫描 (隔室)	—	—	铅橡胶性腺防护围裙 (方形)或方巾、铅橡胶颈套选配：铅橡胶帽子	—

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

表 1.4.4-2 X 射线设备机房(照射室) 使用面积、单边长度执行标准

设备类型	机房内最小有效使用面积 <sup>d</sup> m <sup>2</sup>	机房内最小单边长度 <sup>e</sup> m
CT 机 (不含头颅移动 CT)	30m <sup>2</sup>	4.5m

d 机房内有效使用面积指机房内可划出的最大矩形面积；  
e 机房内单边长度指机房内有效使用面积的最小边长。

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

表 1.4.4-3 X 射线设备机房屏蔽防护铅当量厚度要求

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

#### 1.4.4.3 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放标准

本项目 NO<sub>x</sub> 排放限值参照执行《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996) 表 2 中硝酸使用及其他有组织氮氧化物排放限值，室内 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 浓度限值参照执行《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》(GBZ2.1-2019) 中工作场所空气中化学

物质容许浓度限值，具体标准值见下表。

表 1.4.4-4 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放标准

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

## 1.5 评价范围和保护目标

### 1.5.1 评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016)“1.5 节评价范围和保护目标”中的相关规定“放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围），对于 I 类放射源或 I 类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”。

根据 HJ10.1-2016 的要求，并考虑到设备自身特点及其辐射污染源种类和大小以及同类型设备的环境影响评价，本项目质子放射治疗系统电离辐射环境影响评价范围取质子治疗机房四周实体屏蔽体向外 100m 的范围，直线加速器、模拟定位 CT 和后装机的电离辐射影响评价范围取辐射工作场所四周实体屏蔽体向外 50m 的范围，本项目电离辐射环境影响评价范围如表 1.5.1-1 和图 1.5.1-1 所示。

表 1.5.1-1 本项目电离辐射环境影响评价范围

设备名称	电离辐射环境影响评价范围	备注
多室质子放射治疗系统	机房四周实体屏蔽体向外 100m 的范围	I 类射线装置
直线加速器、模拟定位 CT	机房四周实体屏蔽体向外 50m 的范围	II、III类射线装置
后装机	机房四周实体屏蔽体向外 50m 的范围	III类放射源

### 1.5.2 环境保护目标

根据图 1.5.1-1 可知，在电离辐射东侧评价范围内主要为医院内部建筑物、规划市政绿地、幸福河、幸福南路；南侧评价范围内主要为医院内部建筑物、规划市政绿地、下沙路；西侧评价范围内主要为医院内部建筑物、停车场；北侧评价范围内主要为医院内部建筑物。因此，本项目电离辐射评价范围内无自然保护区、风景名胜和文物古迹等

需要特殊保护的环境敏感对象，无居民小区、学校等环境敏感点。评价范围内的保护目标为评价范围内的辐射工作人员和公众，公众主要包括医院其他医护人员、陪同家属以及幸福南路、下沙路流动人员，具体情况列于表 1.5.2-1。

## 1.6 安全责任划分

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

(1) 安装调试阶段：医院负责提供能够满足质子治疗系统安装、调试要求及我国法规标准要求的辐射工作场所和安全保卫工作，确保负责安装调试的设备厂家工作人员的安全。

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



图 1.5.1-1 本项目电离辐射评价范围示意图 (1)

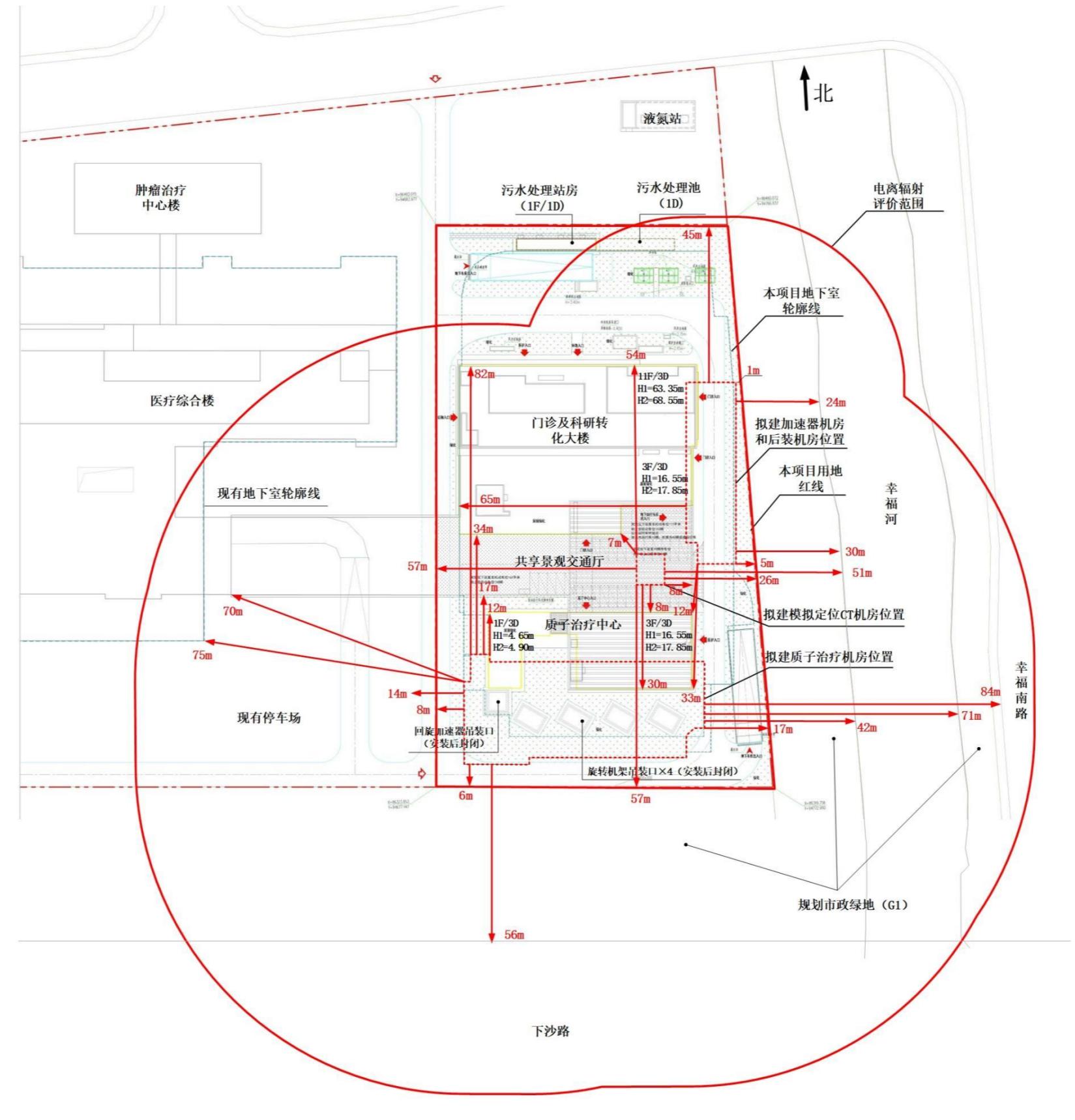


图 1.5.1-1 本项目电离辐射评价范围示意图 (2)

表 1.5.2-1 本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

辐射工作场所	方位		周围环境情况		与项目边界水平距离, m	与项目边界垂直距离, m	照射类型	规模	照射途径	评价标准
质子治疗机房	地下部分	内部	负二层	质子治疗机房内部	/	/	职业照射	34 人	瞬发辐射外照射 外照射(瞬发辐射外照射和空气浸没外照射)和吸入内照射	5mSv/a
				水冷机房、质子设备电源间、配电间、UPS 间、超纯水机房、补水机房等	0~8	/	公众照射	主要为质子设备用房, 一般无人停留		0.1mSv/a
		北侧	负一层	走廊、排风机房、新风兼送风机房、电梯、物流值班室等	5~20	/	公众照射	5 人		0.1mSv/a
				地下车库、换热机房、空压机房、配电间、电梯、风机组房、污物暂存间、危废品暂存间、热水机房、消毒机房、消防泵房、生活水箱间、工具间等	20~100	/	公众照射	200 人		0.1mSv/a
				主控室、治疗控制室、维护室、服务器机房、缓冲间、QC 质控间、治疗计划室、模具室兼更衣室、VIP 等候室、模具间、麻醉兼抢救室、病人恢复室、质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间等	0~8	/	职业照射、公众照射	50 人		职业: 5mSv/a; 公众: 0.1 mSv/a
		负二层	负二层	走廊、质子候诊大厅、放疗候诊大厅、科研实验用房、电梯、空调机房、排风机房、存储间等	5~25	/	公众照射	100 人		0.1mSv/a
				地下车库、排风机房、空调机房、污洗污存间、电梯、放疗中心(主要包括加速器机房、后装机房、模拟定位 CT 机房、MRI 机房及配套用房)	25~100	/	公众照射	100 人		0.1mSv/a
				高压细水雾机房、衰变池机房、污水提升间、送风机房、预留库房、质子空调水泵房等	0~13	/	公众照射	主要为质子设备用房, 一般无人停留		0.1mSv/a
		负三层	负三层	地下车库、电梯、质子冷冻机房、补风机房、排风机房、空调水泵房、冷冻机房、工具间、配电间、污水提升间等	13~100	/	公众照射	100 人		0.1mSv/a
				土层	0~8	/	—	—		—
		东侧	负一层	汽车坡道	8~15(往东为土层, 不再考虑)	/	公众照射	主要是流动人群	瞬发辐射外照射	0.1mSv/a
				后区	紧邻(往东为土层, 不再考虑)	/	职业照射	4 人		5mSv/a
			负三层	土层	紧邻	/	—	—		—
		南侧	负一层	土层	紧邻	/	—	—		—
			负二层	土层	紧邻	/	—	—		—
			负三层	土层	紧邻	/	—	—		—
		西侧	负一层	土层	紧邻	/	—	—		—
			负二层	土层	紧邻	/	—	—		—
			负三层	土层	紧邻	/	—	—		—
		西北侧	西北侧	土层	0~75	/	—	—	瞬发辐射外照射	—
				医疗综合楼地下室(主要是地下车库)	75~100	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		下方	土层	紧邻	/	—	—	—		—
		上方	土层	紧邻	紧邻	—	—	—		—
直线加速器机房(4间)	地下部分	内部	机房内部	/	/	职业照射	8 人	瞬发辐射外照射	5mSv/a	
		北侧	土层	紧邻	/	—	—		—	
		东侧	土层	紧邻	/	—	—		—	

辐射工作场所	方位		周围环境情况	与项目边界水平距离, m	与项目边界垂直距离, m	照射类型	规模	照射途径	评价标准
		南侧	后装机房	紧邻	/	职业照射	2人		职业: 5mSv/a; 公众: 0.1 mSv/a
		西侧	各机房控制室	紧邻	/	职业照射	8人		5mSv/a
			各机房设备间兼维修间、缓冲间	紧邻	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
		下方	土层	紧邻	/	—	—		—
		上方	排风机房、充电非机动车库	/	+7.45	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
	后装机房	内部	机房内部	/	/	职业照射	2人		5mSv/a
		北侧	4号直线加速器机房	紧邻	/	职业照射	2人		5mSv/a
		东侧	土层	紧邻	/	—	—		—
		南侧	控制室	紧邻	/	职业照射	2人		5mSv/a
			走廊	紧邻	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		西侧	准备室	紧邻	/	公众照射	15人/d		0.1mSv/a
		下方	土层	紧邻	/	—	—		—
		上方	地下车库	紧邻	公众照射	主要是流动人群	+6		0.1mSv/a
	质子治疗机房 (相对地面为 位置)	上方	地面绿化	/	紧邻	公众照射	主要是流动人群	外照射(瞬发辐射外照射和 空气浸没外照射)和吸入内 照射	0.1mSv/a
		北侧	质子治疗中心	0~12	/	公众照射	300人		0.1mSv/a
			共享景观交通厅	17~34	/	公众照射	300人		0.1mSv/a
			门诊及科研转化大楼	34~82	/	公众照射	100人		0.1mSv/a
			院内道路和绿化	82~100	/	公众照射	100人		0.1mSv/a
		东侧	院内道路和绿化	0~17	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			规划市政绿地	17~42	/	公众照射	主要是流动人群		5mSv/a
			幸福河	42~71	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
			规划市政绿地	71~84	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			幸福南路	84~100		公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		南侧	院内道路	0~6	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			规划市政绿地	6~56	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			下沙路	56~100	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		西侧	院内道路	0~14	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			停车场	14~100	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		西北侧	医疗综合楼	70~100	/	公众照射	300人		0.1mSv/a
	直线加速器机 房(4间)	上方	院内道路和绿化	/	+11.7	公众照射	主要是流动人群	瞬发辐射外照射	0.1mSv/a
		北侧	院内道路和绿化	0~50	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		东侧	院内道路和绿化	1~5	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			规划市政绿地	1~30	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			幸福河	24~50	/	公众照射	一般无人停留		0.1mSv/a
		南侧	院内道路和绿化	0~50	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			质子治疗中心	12~33	/	公众照射	300人		0.1mSv/a
		西侧	门诊及科研转化大楼	0~50	/	公众照射	500人		0.1mSv/a

辐射工作场所	方位		周围环境情况	与项目边界水平距离, m	与项目边界垂直距离, m	照射类型	规模	照射途径	评价标准
后装机房	地上部分	上方及四周各侧	共享景观交通厅	0~50	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		北侧	共享景观交通厅	/	+11.7	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		东侧	门诊及科研转化大楼	7~50	/	公众照射	500 人		0.1mSv/a
			院内道路和绿化	8~26	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
		南侧	规划市政绿地	26~50	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a
			质子治疗中心	8~30	/	公众照射	300 人		0.1mSv/a
			院内道路和绿化	30~50	/	公众照射	主要是流动人群		0.1mSv/a

## 2 自然环境与社会环境状况

### 2.1 地理位置

杭州市位于浙江省东北部，地处长江三角洲南翼，杭州湾西端，钱塘江下游，京杭大运河南端。东临杭州湾，南接本省绍兴、金华、湖州三市，西与安徽、江西两省毗邻，北与本省嘉兴、湖州相连，是长江三角洲重要中心城市和中国东南部交通枢纽。

钱塘区地处北纬 $30^{\circ} 14' \sim 30^{\circ} 24'$ 之间，东经 $120^{\circ} 17' \sim 120^{\circ} 37'$ 之间。北与海宁市毗邻，南与萧山区接壤，东至围垦区，西与上城区、临平区毗连。辖区南北最大距离17.2千米，东西最大距离31.3千米。

本项目地理位置图和周边关系图见图1.2.5-1和图1.2.5-2。

### 2.2 自然环境状况

#### 2.2.1 地形地貌

杭州市地貌可分为山地、丘陵、平原三部分，自西向东地貌结构的层次和区域过渡十分明显。西北部和西南部系浙中山丘陵区，东北部和东南部属浙北平原。市区南北长约33km，东西平均宽12km，呈长方形。杭州主城区地势总趋势为自西南向东北倾斜，西南部为低山丘陵地形，境内最高峰天竺山海拔413m，北部、东部及钱塘江两岸均为广阔的堆积平原，地面高程城区在7~10m，效外农田及旱地仅3~5m(黄海高程系)，整个平原河渠纵横，水网密布。

杭州市西南的低山区位于新华夏运动第三巨隆起南段之北部，以华夏系构造为骨架，其上迭加了山字形构造，新华夏系构造和东西向构造，山体系性代断块隆起，断裂以北向东和北西平原地区为上侏罗统早白垩统，陆相火山岩地层，断裂以北东向和西北两组为主，区内出露出的基岩，主要是古生低碎屑岩类，碳酸盐岩和中生代火山碎屑岩类。

钱塘区地势平坦，下沙区块为钱塘江常年冲刷沉积及围垦而成的一块平原，没有山体。江东区块为围垦区，唯有一座较小的丘陵—蜀山，位于河庄街道，海拔44.8米，山脊呈宽、窄长条状，占地面积约4万平方米。

#### 2.2.2 地震

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)，场地行政区划原隶属杭州市江

干区下沙街道，其Ⅱ类场地基本地震动峰值加速度值为0.10g，基本地震动加速度反应谱特征周期值为0.35s。根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）（2016年版），杭州市钱塘区的抗震设防烈度为7度，设计基本地震加速度为0.10g，设计地震分组为第一组。建筑场地类别为Ⅲ类，设计特征周期为0.45s。

### 2.2.3 气候气象

杭州市地处亚热带季风区，冬夏季风交替明显。年均气温15°C~17°C，全年一月份最冷，平均气温3~5°C；七月份最热，平均气温28~29°C。无霜期230~260天。年平均降水量1100~1600mm，以春雨、梅雨和台风雨为主。常年梅雨量350~550mm，约占全年的25~31%，这对各种春播作物的生长，特别是对喜温湿的早稻和茶、桑、竹、麻以及多种瓜果的生长十分有利。同时，充沛的降水也给杭州提供了一个常年葱郁、四季飘香的优美生态环境。但由于季风强度出现的时间年际变化较大，也会出现旱、涝、洪涝、高温、低温等自然灾害。

钱塘江河口受其东南季风影响，属亚热带季风区，风向季节性变化明显。冬季以偏北风为主；夏季盛行东南风；春、秋季为过渡期，风向多变。春夏以SSW为主，秋冬以NNW为主。各月大风日数最多一般出现在4月和7~8月份，最少出现在1~2月份。发雾时间为冬春两季，11月至次年1月间。多年平均雷暴40d，1月份为雷暴多发月。

本项目所处区域为东亚季风区，气候温和湿润，日光充足，雨量充沛，四季分明。杭州市近五年的主要气象要素如下：

表 2.2.2 杭州市近五年的主要气象要素情况

主要气象要素	具体情况
多年平均气温	16.5°C
多年平均气压	1011.4hPa
多年平均降水量	1419.1mm
多年平均相对湿度	77%
多年平均蒸发量	1260mm
多年平均日照时数	1783.9hr
多年平均风速	2.05m/s
常年地面主导风向	SSW
年平均雾日数	37.1d
年最多雾日	67d
年最少雾日	19d

### 2.2.4 水文

下沙片位于城区东部，南临钱塘江，西至和睦港，北接钱塘江海塘，地面高程在4.6~6.4m，比邻近的上塘河地区地面高程高出近1.0m。排涝系统相对独立，以向钱塘江排泄为主，主要排水河道有新建河、月牙河、幸福河、新华河等。

## 2.3 社会环境概况

### 2.3.1 人口分布

截至2024年末，钱塘区常住人口80.5万人，增长0.4%，常住人口城镇化率89.5%，较2023年提高0.8个百分点；年末拥有户籍住户10.22万户，户籍人口36.18万人，区域内户籍人口自然增长率7.07‰。

### 2.3.2 社会发展

2024年，钱塘区全社会研究与试验（R&D）经费支出66.72亿元，增长5.4%，占GDP比重5.25%，较上年提高0.09个百分点，投入强度居全省第二；创新指数182.6，居全省第三。新增国家级专精特新“小巨人”企业15家，省级专精特新中小企业83家，市级高新技术企业研发中心57家。全年新增PCT专利申请217件，新增发明专利授权量4058件，其中企业发明专利授权量1818件，增长27.7%。完成专利转让和许可5824件次。

2024年，钱塘区城镇新增就业31680人，新申报杭州市就业见习基地39家，新增大学生创业企业1107家。

2024年，钱塘区职工基本养老保险参保人数43.98万人，新增0.73万人；基本医疗保险参保人数72.09万人，新增1.64万人；户籍人口医疗保险参保率99%以上，困难群众医疗费用综合保障率90%，省内异地结算定点医院开通率达100%。

2024年，钱塘区竣工新校8所，新增学位9855个；完成义蓬四小等3所小学撤并转迁；“关停转升”薄弱幼儿园16所，学前教育优质资源覆盖率提高至99%。联建中国计量大学、浙江工商大学、杭州师范大学等高校附属学校7所。青少年宫新增新湾中心教学点，全年服务青少年儿童4.52万人次。

### 2.3.3 经济发展

2024年，钱塘区地区生产总值（GDP）总量1416.82亿元，按可比价计算，同比增长5.1%。分结构看，第一产业增加值13.30亿元，下降0.5%；第二产业增加值817.21

亿元,增长4.5%;第三产业增加值586.31亿元,增长6.1%。三次产业结构为0.9:57.7:41.4,分别拉动GDP增速-0.01、2.65和2.43个百分点。分季度看,一季度、上半年、前三季度、全年分别增长5.1%、5.2%、5.0%和5.1%。

## 2.4 环境质量和辐射现状

### 2.4.1 辐射环境质量现状监测与评价

为了解本项目拟建场址及周围环境的辐射环境现状,评价单位委托浙江建安检测研究院有限公司(以下简称“建安公司”)和浙江国辐环保科技有限公司(以下简称“国辐公司”)对项目拟建场址及周围环境进行了辐射环境现状调查。监测报告见附件10。

建安公司现场监测和取样时间为2025年10月15日,国辐公司取样时间为2025年11月4日和11月7日。现场监测和取样期间本项目尚未开展建设,拟建场址现状为绿化公园。

#### 2.4.1.1 监测内容

本项目涉及使用质子放射治疗系统(I类射线装置)、直线加速器(II类射线装置)、后装机(III类放射源)和模拟定位CT(III类射线装置),质子放射治疗系统运行期间的辐射场为中子和 $\gamma$ 辐射混合场,因此贯穿辐射监测内容包括 $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量当量率。

质子放射治疗系统运行期间,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下水的活化,根据后文“5.2 正常运行下的环境影响”,质子放射治疗系统运行时,地坪外表面与土层接触的边界处最大剂量率为 $3.333\mu\text{Sv}/\text{h}$ 远小于 $5000\mu\text{Sv}/\text{h}$ ,因此本项目质子放射治疗系统运行可忽略土壤和地下水的感生放射性。结合HJ61-2021表12中“不对外排放且无泄漏的,则运行期间不需监测”的要求,故本次不开展地下水取样监测。但保守起见,仍对土壤总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 、 $\gamma$ 能谱( $\gamma$ 能谱关注: ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 、 ${}^{226}\text{Ra}$ 、 ${}^{40}\text{K}$ )进行监测。

综上所述,根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征,结合HJ61-2021中对中高能加速器、低能加速器、含密封源设施、X射线机的监测要求,本次辐射环境现状调查选取的监测对象为贯穿辐射、环境空气、气溶胶、土壤和地表水,辐射环境现状监测对象和监测项目列于下表。

表 2.4.1-1 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
1	贯穿辐射	$\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量当量率
2	环境空气	$^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$
3	气溶胶	总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 、 $\gamma$ 能谱 ( $\gamma$ 能谱关注: $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ )
4	地表水	总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 、 $\gamma$ 能谱 ( $\gamma$ 能谱关注: $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ )
5	土壤	总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 、 $\gamma$ 能谱 ( $\gamma$ 能谱关注: $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ )

### 2.4.1.2 监测/取样点位

$\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量当量率的监测点位见图 2.4.1-1, 监测点位描述列于表 2.4.1-2。由监测点位可知, 在项目拟建场址、场址周围环境以及场址周边均设置了监测点位, 能够反映拟建场址及邻近环境的辐射环境背景水平。因此, 监测点位布设是合理的。

表 2.4.1-2  $\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量当量率监测布点 (见图 2.4.1-1)

监测点编号	监测点位名称	监测项目	监测频次	备注
1#	项目所在地块点位 1	$\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量当量率	1 次	道路
2#	项目所在地块点位 2		1 次	道路
3#	项目所在地块点位 3		1 次	道路
4#	项目所在地块点位 4		1 次	道路
5#	项目所在地块点位 5		1 次	道路
6#	项目所在地块点位 6		1 次	道路
7#	项目所在地块点位 7 (拟建质子治疗机房内部点位)		1 次	道路
8#	项目所在地块点位 8 (拟建质子治疗机房内部点位)		1 次	道路
9#	拟建质子治疗机房北侧		1 次	道路
10#	拟建质子治疗机房东侧		1 次	道路
11#	拟建质子治疗机房南侧		1 次	道路
12#	拟建质子治疗机房西侧		1 次	道路
13#	项目所在地块北侧点位: 绿化带		1 次	道路
14#	项目所在地块东侧点位 1: 绿化带		1 次	道路
15#	项目所在地块东侧点位 2: 绿化带		1 次	道路
16#	项目所在地块南侧点位: 停车场		1 次	道路
17#	项目所在地块西侧点位 1: 院内道路		1 次	道路
18#	项目所在地块西侧点位 2: 绿化带		1 次	道路
19#	海通街		1 次	道路
20#	肿瘤治疗中心楼出入口		1 次	道路
21#	医疗综合楼出入口		1 次	道路

22#	医院南区出入口		1 次	道路
23#	库房/物业用房出入口		1 次	道路
24#	下沙路		1 次	道路
25#	绿化带		1 次	道路
26#	幸福南路		1 次	道路
27#	浙江省计量科学研究院南区		1 次	道路
28#	郡原蓝湖国际（住宅区）		1 次	道路

土壤、空气/气溶胶、地表水取样点位见图 2.4.1-2，监测点位描述列于表 2.4.1-3。

由监测点位可知，土壤取样点位共 5 个，主要对拟建质子治疗机房四周及周边水体（幸福河）底泥进行了监测，取土壤样品时，根据现场条件，每个点位取土样约 1kg，取样时去除石头、树枝等杂质；空气/气溶胶取样点位共 2 个，杭州市常年主导风向为 SSW，主要在拟建质子治疗机房上下风向各布设一个点位；地表水取样点位位于幸福河，主要在拟建质子治疗机房相邻的幸福河河段布设一个点位。

表 2.4.1-3 土壤、空气/气溶胶、地表水取样布点（见图 2.4.1-2）

序号	取样点	监测项目
1#	拟建质子治疗机房主体建筑上风向	空气/气溶胶
2#	拟建质子治疗机房主体建筑下风向	
3#	拟建质子治疗机房北侧	土壤
4#	拟建质子治疗机房东侧	
5#	拟建质子治疗机房南侧	
6#	拟建质子治疗机房西侧	
7#	幸福河底泥	
8#	幸福河	地表水

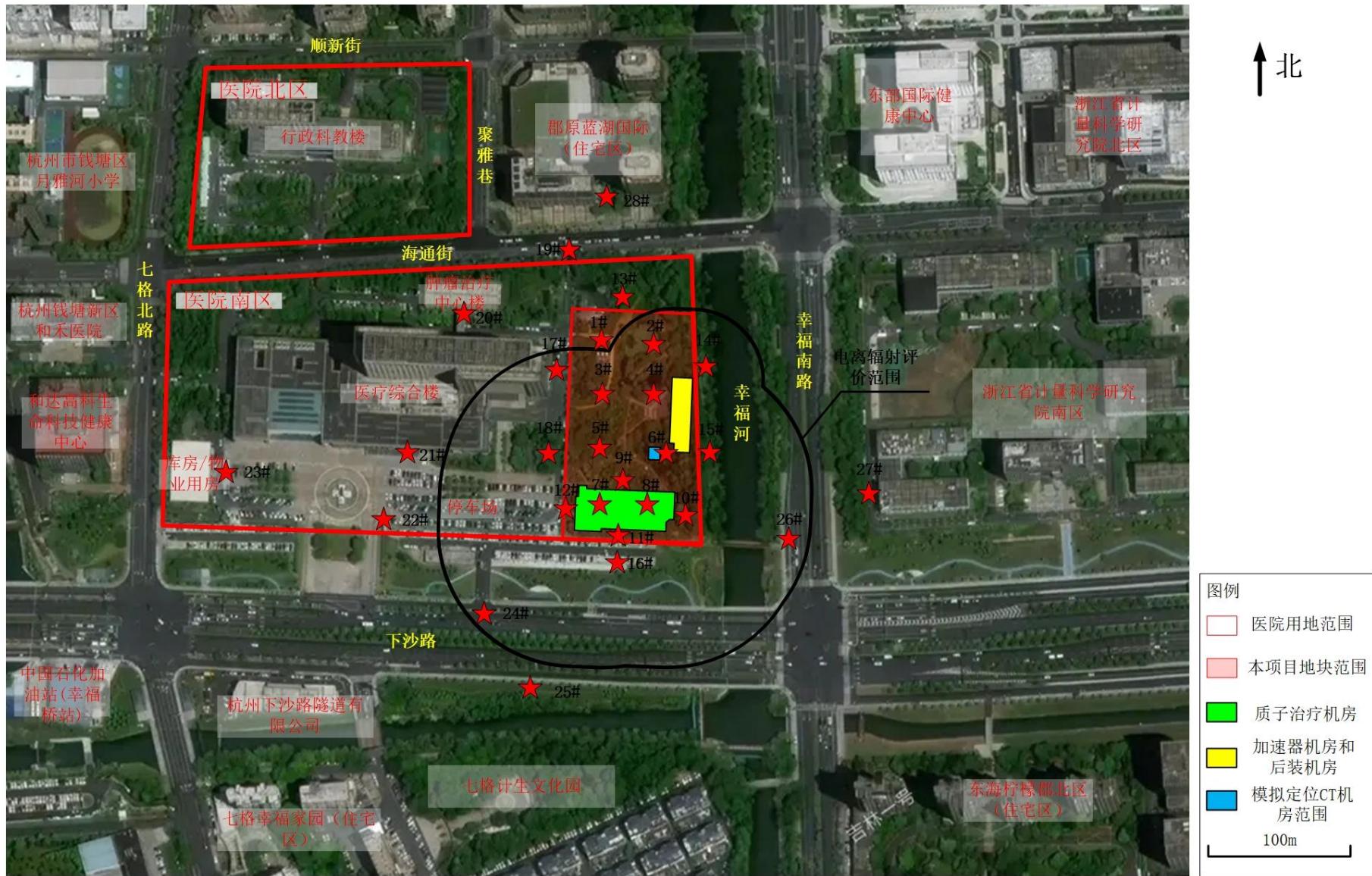


图 2.4.1-1 本项目拟建场址及其周围环境 $\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量率监测点位图



图 2.4.1-2 本项目土壤、空气/气溶胶、地表水取样点位图

### 2.4.1.3 监测设备和监测方法

#### 2.4.1.3.1 监测设备

本次监测使用的仪器设备及性能指标详见下表。现场监测为 2025 年 10 月 15 日，取样时间为 2025 年 10 月 15 日、2025 年 11 月 4 日~11 月 10 日。监测、分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

表 2.4.1-4 仪器设备及性能指标

仪器名称	仪器型号	检定有效期	主要技术性能指标
X、γ辐射剂量当量率仪	FH40G-L10+FHZ672E-10	2025 年 03 月 13 日~ 2026 年 03 月 12 日	能量范围：30keV~4.4MeV； 量程：10nSv/h~100mSv/h（主机）、1nSv/h~100μSv/h（探头）
中子剂量当量率仪	LB134	2025 年 09 月 11 日~ 2026 年 09 月 10 日	能量范围：热中子~20MeV； 量程：30 nSv/h~100 mSv/h
高纯锗γ能谱仪	GEM-S8530	至 2027 年 2 月 26 日	能量分辨率：1.63keV ( <sup>60</sup> Co 点源 1.33MeV) 本底计数率：1.904cps
低本底α/β测量仪	MPC9604	至 2027 年 2 月 26 日	相对效率：α源 ( <sup>241</sup> Am) ≥65%，β源 ( <sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y) ≥65% 本底计数率：α<0.08cpm， β<0.50cpm
低本底液闪谱仪	Quantulus GCT 6220	至 2027 年 2 月 26 日	计数效率： <sup>3</sup> H：21.3%， <sup>14</sup> C：58.5% 本底计数率： <sup>3</sup> H：0.761min <sup>-1</sup> ， <sup>14</sup> C：2.289min <sup>-1</sup>

#### 2.4.1.3.2 监测方法

- (1) 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157-2021)；
- (2) 《空气中<sup>14</sup>C的取样与测定方法》(EJ/T1008-1996)；
- (3) 《水中氚的分析方法》(HJ1126-2020)；
- (4) 《环境空气 气溶胶中γ放射性核素的测定 滤膜压片/γ能谱法》(HJ1149-2020)；
- (5) 《水质 总α放射性的测定 厚源法》(HJ 898-2017)；
- (6) 《水质 总β放射性的测定 厚源法》(HJ 899-2017)；
- (7) 《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021)；
- (8) 环境中放射性核素测量土壤-第六部分：总α和总β活度测量 ISO 18589-6:2019；
- (9) 《环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法》(GB/T16145-2022)；
- (10) 《高纯锗γ能谱分析通用方法》(GB/T11713-2015)；

#### 2.4.1.4 质量保证措施

- (1) 合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性。
- (2) 监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗。
- (3) 监测仪器每年定期经计量部门检定或校准，检定或校准合格后方可使用。
- (4) 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常。
- (5) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录，严格执行质量保证程序。
- (6) 监测报告严格实行三级审核制度，经过校核、审核，最后由授权签字人审定。

#### 2.4.1.5 监测结果

##### 2.4.1.5.1 贯穿辐射

本项目拟建场址及周围环境 $\gamma$ 辐射剂量率监测结果见下表。

表 2.4.1-5 本项目 $\gamma$ 辐射剂量率监测结果

监测点编号	监测位置	监测结果 (nGy/h)	备注
1#	项目所在地块点位 1	71.7±1	道路
2#	项目所在地块点位 2	62.6±1	道路
3#	项目所在地块点位 3	75.6±1	道路
4#	项目所在地块点位 4	67.1±3	道路
5#	项目所在地块点位 5	61.6±1	道路
6#	项目所在地块点位 6	62.7±1	道路
7#	项目所在地块点位 7 (拟建质子治疗机房内部点位)	68.8±1	道路
8#	项目所在地块点位 8 (拟建质子治疗机房内部点位)	68.9±2	道路
9#	拟建质子治疗机房北侧	62.5±1	道路
10#	拟建质子治疗机房东侧	100±5	道路
11#	拟建质子治疗机房南侧	82.5±2	道路
12#	拟建质子治疗机房西侧	105±6	道路
13#	项目所在地块北侧点位：绿化带	87.6±3	道路
14#	项目所在地块东侧点位 1：绿化带	75.7±1	道路

监测点编号	监测位置	监测结果 (nGy/h)	备注
15#	项目所在地块东侧点位 2: 绿化带	72.1±2	道路
16#	项目所在地块南侧点位: 停车场	55.7±1	道路
17#	项目所在地块西侧点位 1: 院内道路	62.1±1	道路
18#	项目所在地块西侧点位 2: 绿化带	80.7±1	道路
19#	海通街	77.5±1	道路
20#	肿瘤治疗中心楼出入口	163±5	道路
21#	医疗综合楼出入口	100±4	道路
22#	医院南区出入口	91.7±5	道路
23#	库房/物业用房出入口	97.1±4	道路
24#	下沙路	71.8±1	道路
25#	绿化带	75.4±2	道路
26#	幸福南路	95.8±5	道路
27#	浙江省计量科学研究院南区	78.8±2	道路
28#	郡原蓝湖国际 (住宅区)	91.2±5	道路

注: 1、测量时探头距离地面约 1m;

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

3、环境  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率=仪器读数平均值  $\times$  仪器校准因子  $k_1 \times$  仪器检验源效率因子  $k_2 \div$  空气比释动能和周围剂量当量的换算系数-建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子  $k_3 \times$  测量点宇宙射线响应值  $D_c$ , 校准因子  $k_1$  为 1.14, 仪器使用  $^{137}\text{Cs}$  进行校准, 效率因子  $k_2$  取 1, 换算系数为 1.20Sv/Gy,  $k_3$  楼房取 0.8、平房取 0.9、原野和道路取 1, 测量点宇宙射线的响应值为 12.3nGy/h (监测地址: 宁波东钱湖湖心水面, 监测时间: 2024 年 9 月 11 日)。

本项目拟建场址及周围环境中子周围剂量当量率监测结果见下表。

表 2.4.1-6 本项目中子剂量当量率监测结果

监测点编号	监测位置	监测结果 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
1#	项目所在地块点位 1	<0.06
2#	项目所在地块点位 2	<0.06
3#	项目所在地块点位 3	<0.06
4#	项目所在地块点位 4	<0.06
5#	项目所在地块点位 5	<0.06
6#	项目所在地块点位 6	<0.06
7#	项目所在地块点位 7 (拟建质子治疗机房内部点位)	<0.06

监测点编号	监测位置	监测结果 ( $\mu\text{Sv/h}$ )
8#	项目所在地块点位 8 (拟建质子治疗机房内部点位)	<0.06
9#	拟建质子治疗机房北侧	<0.06
10#	拟建质子治疗机房东侧	<0.06
11#	拟建质子治疗机房南侧	<0.06
12#	拟建质子治疗机房西侧	<0.06
13#	项目所在地块北侧点位：绿化带	<0.06
14#	项目所在地块东侧点位 1：绿化带	<0.06
15#	项目所在地块东侧点位 2：绿化带	<0.06
16#	项目所在地块南侧点位：停车场	<0.06
17#	项目所在地块西侧点位 1：院内道路	<0.06
18#	项目所在地块西侧点位 2：绿化带	<0.06
19#	海通街	<0.06
20#	肿瘤治疗中心楼出入口	<0.06
21#	医疗综合楼出入口	<0.06
22#	医院南区出入口	<0.06
23#	库房/物业用房出入口	<0.06
24#	下沙路	<0.06
25#	绿化带	<0.06
26#	幸福南路	<0.06
27#	浙江省计量科学研究院南区	<0.06
28#	郡原蓝湖国际（住宅区）	<0.06

注：1、测量时探头距离地面约 1m；

2、每个监测点测量 10 个数据取平均值。

由监测结果可知，本项目拟建场址及周围 $\gamma$ 辐射剂量率水平在  $55.7\sim163\text{nGy/h}$  即  $5.57\times10^{-8}\sim16.3\times10^{-8}\text{Gy/h}$ ，以上 $\gamma$ 辐射剂量率均已扣除宇宙射线响应值。根据《浙江环境天然贯穿辐射水平调查研究》可知，杭州地区室内 $\gamma$ 辐射剂量率在  $5.6\times10^{-8}\text{Gy/h}\sim44.3\times10^{-8}\text{Gy/h}$  之间，道路 $\gamma$ 辐射剂量率在  $2.8\times10^{-8}\text{Gy/h}\sim22.0\times10^{-8}\text{Gy/h}$  之间，可见本项目所在区域的 $\gamma$ 辐射水平处于当地本底水平范围之内，未见异常。

由监测结果可知，本项目拟建场址及周围中子剂量当量率均低于仪器探测下限

0.06 $\mu$ Sv/h，未见异常。

#### 2.4.1.5.2 环境空气/气溶胶

本项目环境空气样品中核素分析测量结果见下表。

表 2.4.1-7 本项目环境空气中<sup>3</sup>H 监测结果

采样地点	<sup>3</sup> H(Bq/L)	<sup>3</sup> H(mBq/m <sup>3</sup> )
拟建质子治疗机房主体建筑上风向	<1.00	<10.7
拟建质子治疗机房主体建筑下风向	<1.00	<12.1

表 2.4.1-7 本项目环境空气中碳-14 监测结果

采样地点	<sup>14</sup> C(Bq/g·碳)	<sup>14</sup> C(Bq/L)
拟建质子治疗机房主体建筑上风向	0.207	$2.7 \times 10^{-5}$
拟建质子治疗机房主体建筑下风向	0.216	$2.9 \times 10^{-5}$

本项目气溶胶样品中核素分析测量结果见下表。

采样地点	总 $\alpha$ (mBq/m <sup>3</sup> )	总 $\beta$ (mBq/m <sup>3</sup> )	<sup>7</sup> Be (mBq/ q/m <sup>3</sup> )	<sup>22</sup> Na ( $\mu$ Bq/ m <sup>3</sup> )	<sup>54</sup> Mn ( $\mu$ Bq/ m <sup>3</sup> )	<sup>238</sup> U ( $\mu$ Bq/ m <sup>3</sup> )	<sup>232</sup> Th ( $\mu$ Bq/ m <sup>3</sup> )	<sup>226</sup> Ra ( $\mu$ Bq/ m <sup>3</sup> )	<sup>40</sup> K ( $\mu$ Bq/ m <sup>3</sup> )	<sup>7</sup> Be 参考 日期
拟建质子治疗机房主体建筑上风向	0.15	1.42	1.79	<5.38	<4.51	<53.3	<13.3	<5.58	248	2025 .11.4
拟建质子治疗机房主体建筑下风向	0.04	1.07	1.84	<5.34	<4.48	<53.0	<13.2	<5.55	246	2025 .11.7

由监测结果可知，本项目拟建质子治疗机房主体建筑上风向和下风向监测点位环境中<sup>3</sup>H 活度浓度均小于 1Bq/L（水中氚），<sup>3</sup>H 活度浓度均小于 12.1mBq/m<sup>3</sup>（气氚）；气溶胶中总 $\alpha$ 活度浓度在 0.04mBq/m<sup>3</sup>~0.15mBq/m<sup>3</sup>范围内，总 $\beta$ 活度浓度在 1.07mBq/m<sup>3</sup>~1.42mBq/m<sup>3</sup>范围内，放射性核素<sup>7</sup>Be 活度浓度在 1.79mBq/m<sup>3</sup>~1.84mBq/m<sup>3</sup>范围内，放射性核素<sup>22</sup>Na 活度浓度均小于 5.38 $\mu$ Bq/m<sup>3</sup>，放射性核素<sup>54</sup>Mn 活度浓度均小于 4.51 $\mu$ Bq/m<sup>3</sup>，放射性核素<sup>238</sup>U 活度浓度均小于 53.3 $\mu$ Bq/m<sup>3</sup>，放射性核素<sup>232</sup>Th 活度浓度均小于 13.3 $\mu$ Bq/m<sup>3</sup>，放射性核素<sup>226</sup>Ra 活度浓度均小于 5.58 $\mu$ Bq/m<sup>3</sup>，放射性核素<sup>40</sup>K 活度浓度在 246 $\mu$ Bq/m<sup>3</sup>~248 $\mu$ Bq/m<sup>3</sup>。

#### 2.4.1.5.3 土壤

本项目土壤样品中总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 的活度浓度以及核素分析测量结果见下表。

表 2.4.1-8 本项目土壤样品中总  $\alpha$ 、总  $\beta$  的活度浓度以及核素分析结果

采样地点	监测项目	监测结果 (Bq/kg)
拟建质子治疗机房东侧	总 $\alpha$	565
	总 $\beta$	708
	$^{40}\text{K}$	$503\pm49$ ( $k=2$ )
	$^{226}\text{Ra}$	$29.5\pm2.9$ ( $k=2$ )
	$^{232}\text{Th}$	$42.3\pm4.1$ ( $k=2$ )
	$^{238}\text{U}$	$39.9\pm3.9$ ( $k=2$ )
	$^7\text{Be}$	$<DL$ ( $DL = 7.7 \times 10^{-1}$ )
	$^{22}\text{Na}$	$<DL$ ( $DL = 5.3 \times 10^{-2}$ )
	$^{54}\text{Mn}$	$<DL$ ( $DL = 8.3 \times 10^{-2}$ )
拟建质子治疗机房南侧	总 $\alpha$	520
	总 $\beta$	822
	$^{40}\text{K}$	$516\pm50$ ( $k=2$ )
	$^{226}\text{Ra}$	$28.3\pm2.8$ ( $k=2$ )
	$^{232}\text{Th}$	$43.6\pm4.3$ ( $k=2$ )
	$^{238}\text{U}$	$41.0\pm4.0$ ( $k=2$ )
	$^7\text{Be}$	$<DL$ ( $DL = 7.4 \times 10^{-1}$ )
	$^{22}\text{Na}$	$<DL$ ( $DL = 5.0 \times 10^{-2}$ )
	$^{54}\text{Mn}$	$<DL$ ( $DL = 7.9 \times 10^{-2}$ )
拟建质子治疗机房西侧	总 $\alpha$	422
	总 $\beta$	841
	$^{40}\text{K}$	$463\pm4.5$ ( $k=2$ )
	$^{226}\text{Ra}$	$26.8\pm2.6$ ( $k=2$ )
	$^{232}\text{Th}$	$41.9\pm4.1$ ( $k=2$ )
	$^{238}\text{U}$	$24.5\pm2.4$ ( $k=2$ )
	$^7\text{Be}$	$<DL$ ( $DL = 7.9 \times 10^{-1}$ )
	$^{22}\text{Na}$	$<DL$ ( $DL = 5.4 \times 10^{-2}$ )
	$^{54}\text{Mn}$	$<DL$ ( $DL = 8.5 \times 10^{-2}$ )
拟建质子治疗机房北侧	总 $\alpha$	346
	总 $\beta$	874
	$^{40}\text{K}$	$404\pm40$ ( $k=2$ )

幸福河底泥	$^{226}\text{Ra}$	$23.0\pm2.3$ ( $k=2$ )
	$^{232}\text{Th}$	$42.0\pm4.1$ ( $k=2$ )
	$^{238}\text{U}$	$37.5\pm3.7$ ( $k=2$ )
	$^7\text{Be}$	$<DL$ ( $DL=9.2\times10^{-1}$ )
	$^{22}\text{Na}$	$<DL$ ( $DL=6.3\times10^{-2}$ )
	$^{54}\text{Mn}$	$<DL$ ( $DL=9.9\times10^{-2}$ )
	总 $\alpha$	614
	总 $\beta$	927
	$^{40}\text{K}$	$447\pm44$ ( $k=2$ )

注:  $DL$  为样品中当前核素的最小可探测活度。

由监测结果可知, 各监测点位土壤中总 $\alpha$ 活度浓度在  $346\text{Bq/kg}\sim565\text{Bq/kg}$  范围内, 总 $\beta$ 活度浓度在  $708\text{Bq/kg}\sim874\text{Bq/kg}$  范围内, 放射性核素  $^{40}\text{K}$  活度浓度在  $404\sim516\text{Bq/kg}$  之间, 放射性核素  $^{226}\text{Ra}$  活度浓度在  $23\sim29.5\text{Bq/kg}$  之间, 放射性核素  $^{232}\text{Th}$  活度浓度在  $38.1\sim43.6\text{Bq/kg}$  之间, 放射性核素  $^{238}\text{U}$  活度浓度在  $24.5\sim41\text{Bq/kg}$  之间, 放射性核素  $^7\text{Be}$  活度浓度均小于  $7.8\times10^{-1}\text{Bq/kg}$ , 放射性核素  $^{22}\text{Na}$  活度浓度均小于  $5.3\times10^{-2}\text{Bq/kg}$ , 放射性核素  $^{54}\text{Mn}$  活度浓度均小于  $8.3\times10^{-2}\text{Bq/kg}$ 。

#### 2.4.1.5.4 地表水

拟建场址地表水样品中总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 的活度浓度以及核素分析测量结果见下表。

表 2.4.1-9 地表水中总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 的活度浓度以及核素分析结果

采样地点	监测项目	监测结果 (Bq/L)
幸福河	总 $\alpha$	$<DL$ ( $DL=0.030$ )
	总 $\beta$	0.139
	$^{40}\text{K}$	$<DL$ ( $DL=1.24$ )

	$^{226}\text{Ra}$	$<DL$ ( $DL = 1.64 \times 10^{-1}$ )
	$^{232}\text{Th}$	$<DL$ ( $DL = 1.73 \times 10^{-1}$ )
	$^{238}\text{U}$	$<DL$ ( $DL = 1.27$ )
	$^7\text{Be}$	$<DL$ ( $DL = 1.41 \times 10^{-1}$ )
	$^{22}\text{Na}$	$<DL$ ( $DL = 3.5 \times 10^{-2}$ )
	$^{54}\text{Mn}$	$<DL$ ( $DL = 2.19 \times 10^{-2}$ )

注：DL 为样品中当前核素的最小可探测活度。

由监测结果可知，幸福河监测点位中总 $\alpha$ 活度浓度小于  $0.030\text{Bq/L}$ ，总 $\beta$ 活度浓度为  $0.139\text{Bq/L}$ ，放射性核素  $^{40}\text{K}$  活度浓度均小于  $1.24\text{Bq/L}$ ，放射性核素  $^{226}\text{Ra}$  活度浓度均小于  $1.64 \times 10^{-1}\text{Bq/L}$ ，放射性核素  $^{232}\text{Th}$  活度浓度均小于  $1.73 \times 10^{-1}\text{Bq/L}$ ，放射性核素  $^{238}\text{U}$  活度浓度均小于  $1.27\text{Bq/L}$ ，放射性核素  $^7\text{Be}$  活度浓度均小于  $1.41 \times 10^{-1}\text{Bq/kg}$ ，放射性核素  $^{22}\text{Na}$  活度浓度均小于  $3.5 \times 10^{-2}\text{Bq/kg}$ ，放射性核素  $^{54}\text{Mn}$  活度浓度均小于  $2.19 \times 10^{-2}\text{Bq/kg}$ 。

## 2.4.2 场址适宜性评价

本项目位于浙江省杭州市钱塘区下沙路 368 号浙江大学医学院附属邵逸夫医院钱塘院区南区东侧预留用地，用地性质为医疗卫生用地。本项目质子治疗机房为三层结构，拟建于质子治疗中心负一层、负二层、负三层，加速器机房、后装机房拟建于负二层放疗中心，以上治疗机房集中设置，避开了儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，相邻也无人员流动性大的商业活动区域；模拟定位 CT 机房拟建于负二层放疗中心，与放射治疗机房相近。项目选址满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）5.1.1 和 5.1.2 中有关选址的要求，也符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）X 射线设备机房设置要求。

根据辐射环境现状检测结果可知，本项目拟建场址及周围 $\gamma$ 辐射剂量率处于当地辐射环境本底范围值内，中子剂量当量率未见异常，环境电离辐射水平均处于当地天然本底辐射水平波动范围内。

根据图 1.5.1-1 可知，在电离辐射东侧评价范围内主要为医院内部建筑物、规划市政绿地、幸福河、幸福南路；南侧评价范围内主要为医院内部建筑物、规划市政绿地、下沙路；西侧评价范围内主要为医院内部建筑物、停车场；北侧评价范围内主要为医院

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

因此，评价范围内的保护目标为评价范围内的辐射工作人员和公众，公众主要包括医院其他医护人员、陪同家属以及幸福南路、下沙路流动人员。根据后文计算，本项目辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平，能够满足相应剂量约束值的要求。

综上所述，拟建场址无不利于项目建设的环境制约性因素，适宜开展所申请的核技术利用活动。

### 3 工程分析与源项

#### 3.1 项目规模与基本参数

##### 3.1.1 项目规模

本次环评为浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程配套核技术利用项目辐射环境影响评价，主要针对项目中涉及核技术利用活动的建设内容开展评价，具体如下：

(1) 质子放射治疗系统。拟在质子治疗中心负一层、负二层、负三层建设质子治疗机房及其配套用房，主要包括 1 间回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）、4 间质子治疗室（均为旋转治疗室）及主控室、治疗控制室、QC 质控间、服务器机房、质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间等配套用房。拟使用 1 套多室质子放射治疗系统（属 I 类射线装置，质子最高能量为 230MeV）；质子治疗系统配套 X 射线管（最大管电压 150kV，最大管电流 800mA），每间质子治疗室各安装 2 个 X 射线管。

质子治疗机房及其配套用房各层情况如下：

①质子治疗中心负三层：回旋加速器基坑、4 间机架室支座基坑和拽线室以及高压细水雾机房、衰变池机房、污水提升间、送风机房、弱电井、预留库房、质子空调水泵房等配套用房。

②质子治疗中心负二层：该层为质子治疗层，主要包括 1 间回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）、4 间治疗室（均为旋转治疗室）及主控室、治疗控制室、QC 质控间、服务器机房、质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间等配套用房。

③质子治疗中心负一层：回旋加速器机房上空、4 间质子治疗室上空以及水冷机房、质子设备电源间、配电间、UPS 间、超纯水机房、补水机房等配套用房。

(2) 医用电子直线加速器。拟在负二层放疗中心建设 4 间医用直线加速器机房（以下简称“加速器机房”），并在每间机房分别安装 1 台医用电子直线加速器（以下简称“直线加速器”，属II类射线装置）用于放射治疗。直线加速器 X 射线最高能量为 15MV，电子线最高能量为 22MeV，每台直线加速器集成一台 CBCT（管电压 140kV，管电流 1250mA）。

(3) 后装机。拟在负二层放疗中心建设 1 间后装机房，并在机房内安装 1 台后装

机进行近距离放射治疗，拟使用 1 枚出厂活度为  $5.55E+11\text{Bq}$  ( $15\text{Ci}$ ) 的  $^{192}\text{Ir}$  放射源，属III类放射源。

(4) 模拟定位 CT。负二层放疗中心建设 1 间模拟定位 CT 机房，并在机房中安装 1 台模拟定位 CT（属III类射线装置）用于肿瘤定位。模拟定位 CT 最大管电压  $140\text{kV}$ ，最大管电流  $1250\text{mA}$ 。

本项目地下层负三层~负一层平面布置图分别见图 3.1.1-1~图 3.1.1-3，质子治疗中心地面一层平面布置图见图 3.1.1-4。

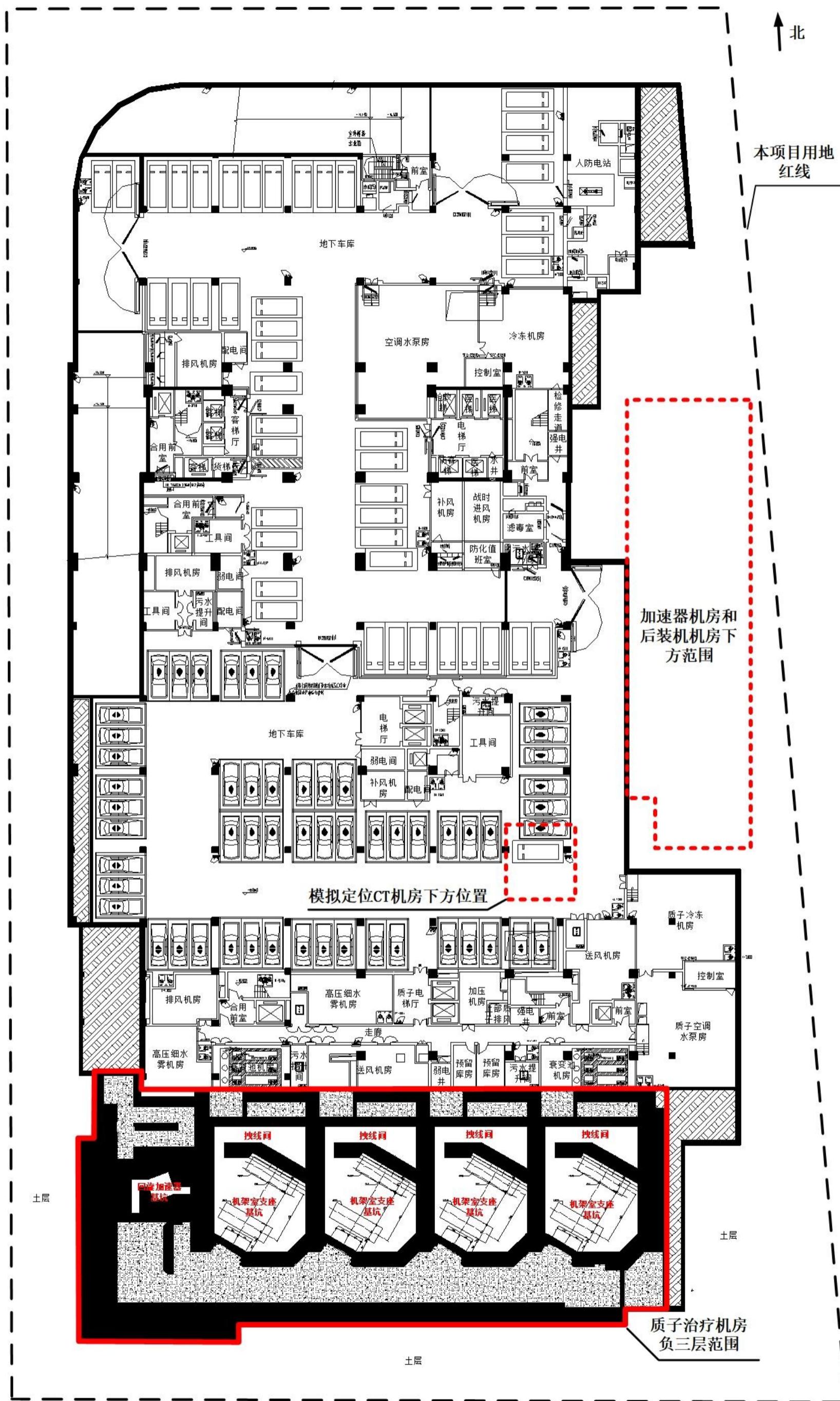


图 3.1.1-1 本项目地下层负三层平面布局图

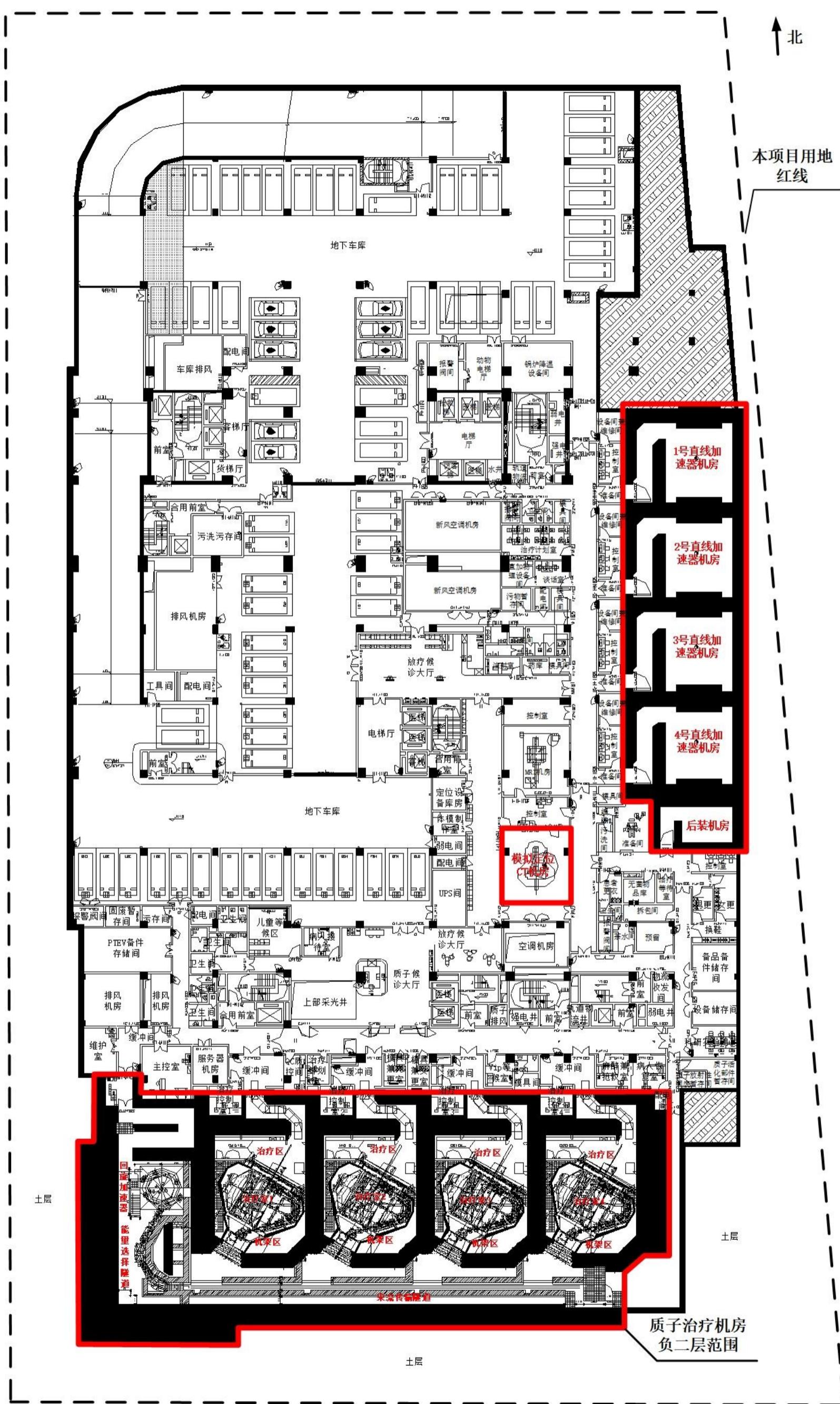


图 3.1.1-2 本项目地下层负二层平面布局图

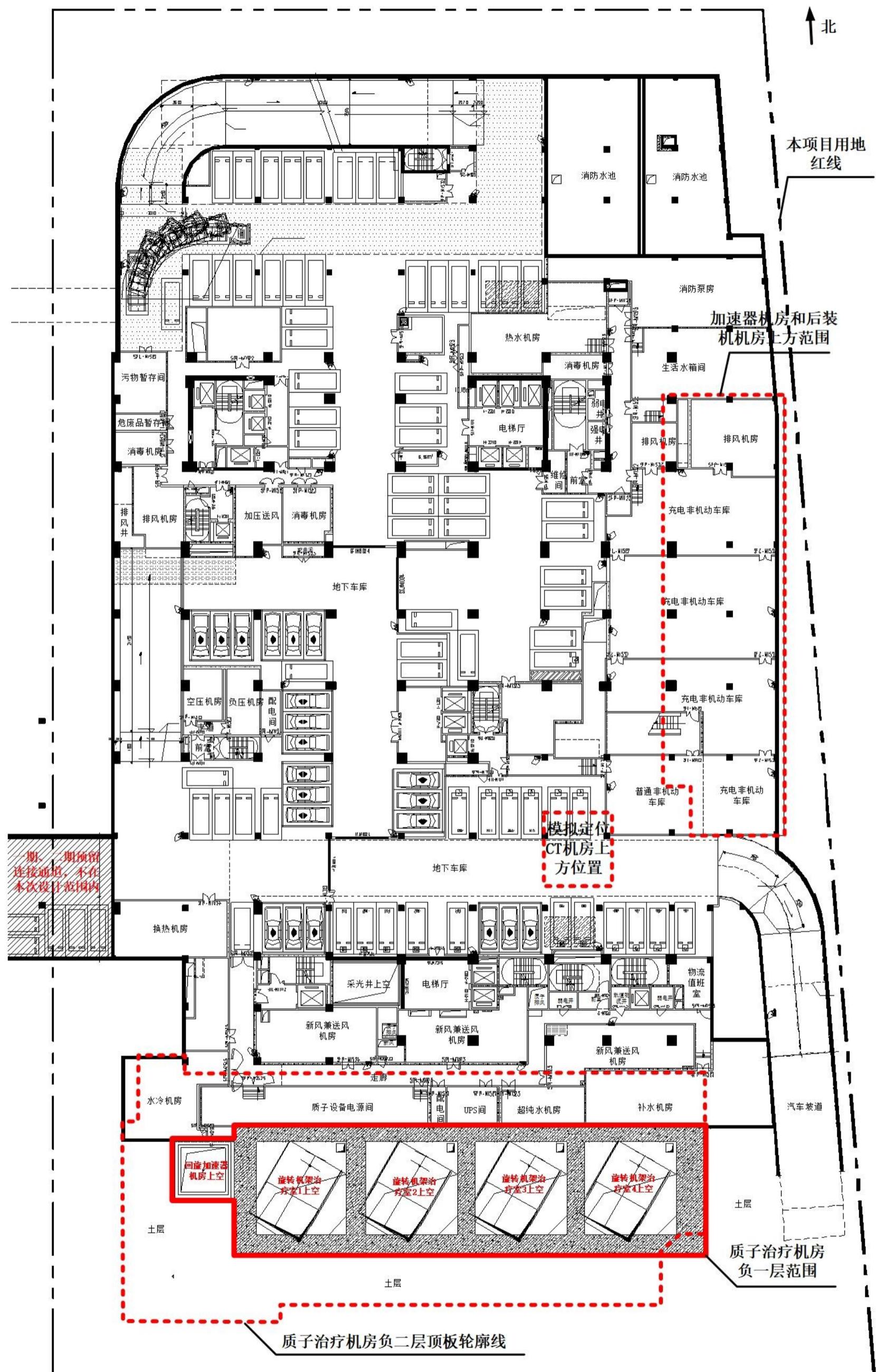


图 3.1.1-3 本项目地下层负一层平面布局图

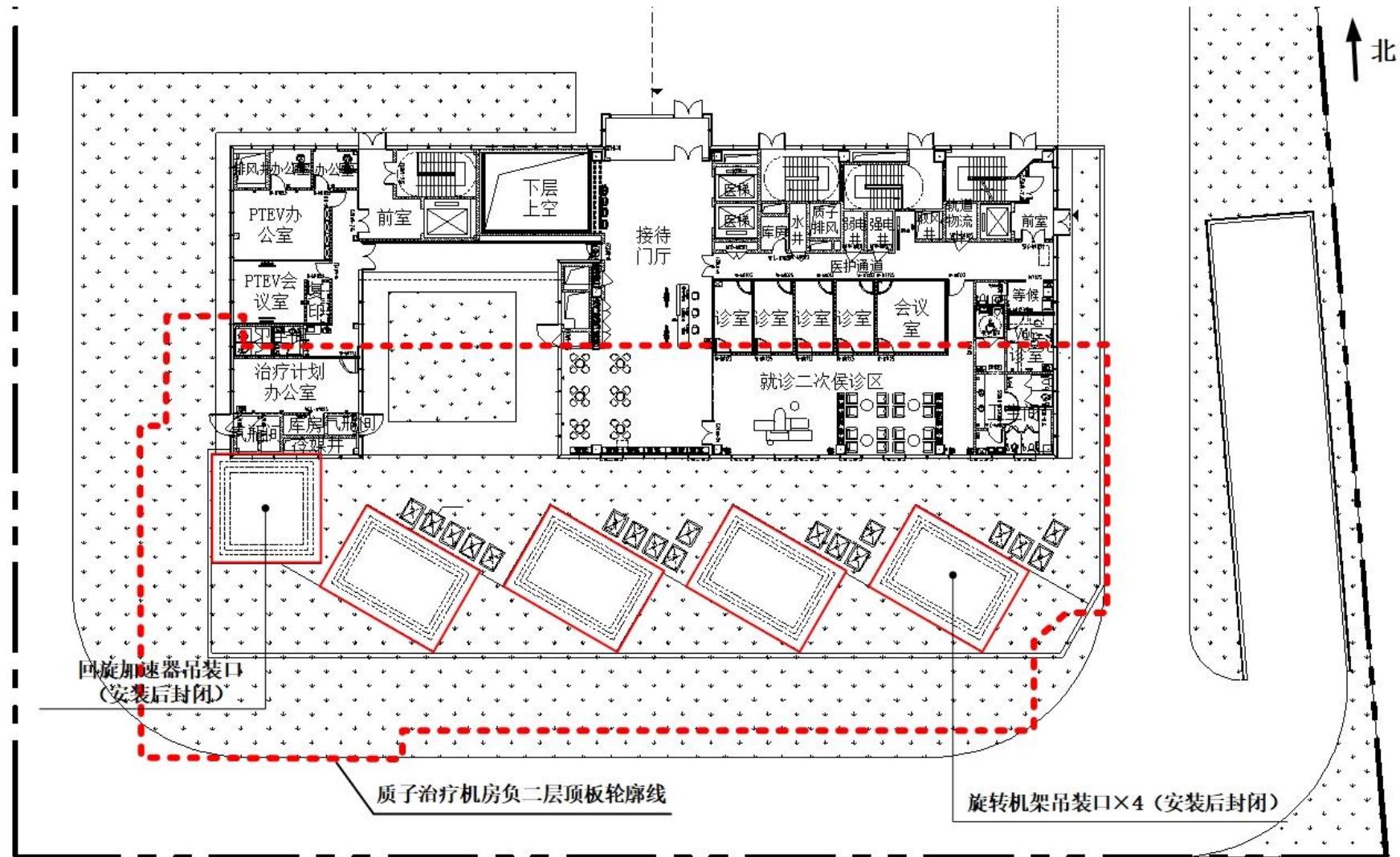


图 3.1.1-4 本项目质子治疗中心地面一层平面布局图

### 3.1.2 基本参数

本项目拟配备的医用射线装置主要参数列于表 3.1.2-1，拟使用放射源的基本情况列于表 3.1.2-2。

表 3.1.2-1 本项目拟使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量	类别	主要参数	所在位置
1	多室质子放射治疗系统	1 台	I 类	治疗能量范围: 70~230MeV; 治疗引出流强: 0.27nA@70MeV, 0.47nA@230MeV; 治疗头输出剂量率: 2 Gy/min/L; 每间质子治疗室配备 2 个定位 X 射线管, 4 间治疗室共配备 8 个 X 射线管: 最大管电压 150kV, 最大管电流 800mA	质子治疗中心负一层、负二层、负三层质子治疗机房
2	直线加速器	4	II 类	X 射线能量 6MV 等中心处: X 射线剂量率为 8.40E+08μGy/h; X 射线能量 10MV 等中心处: X 射线剂量率为 1.44E+09μGy/h; X 射线能量 15MV 等中心处: X 射线剂量率为 6.00E+08μGy/h; 电子线最大能量 22MeV, 等中心处: X 射线剂量率为 6.00E+08μGy/h; 每台直线加速器均集成一台 CBCT, 最大管电压 140kV, 最大管电流 1250mA	负二层放疗科加速器机房 1~4
3	模拟定位 CT	1	III类	最大管电压 140kV, 最大管电流 1250mA	负二层放疗科模拟定位 CT 机房

表 3.1.2-2 本项目拟使用放射源情况

放射源名称	类别	活动种类	单枚源活度	数量	工作场所名称
<sup>192</sup> Ir	III类	使用	5.55E+11Bq	1 枚	负二层放疗科后装机房

## 3.2 工艺设备

### 3.2.1 质子放射治疗系统

#### 3.2.1.1 主要技术参数及结构布局

质子放射治疗系统主要由回旋加速器、能量选择系统、束流输运系统和治疗系统组成。质子在回旋加速器中加速到 230MeV 后引出, 引出流强约为 300nA, 引入能量选择系统。通过调节能量选择系统中降能器的厚度, 可根据实际治疗肿瘤的深度和厚度, 在输出端得到 70~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。束流输运系统用于将能量选择

器引出的质子输运到各治疗室内。本项目质子放射治疗系统共配置 4 个旋转机架治疗室，从西到东分别为治疗室 1~4。主要技术参数见表 3.2.1.1-1，装置结构组成示意图见图 3.2.1.1-1，平面布局示意图见图 3.2.1.1-2。

表 3.2.1.1-1 质子放射治疗系统主要技术参数

指标	数值/方案
加速器主体	质子回旋加速器
加速器最大引出能量	230MeV
加速器最大引出流强	300nA
加速器引出电荷量	≤300nC/s(加速器出口)
治疗能量范围	70~230MeV
治疗流强	0.27nA@70MeV, 0.47nA@230MeV
加速器射频频率	106MHz
照射野	30cm×40cm
源皮距	100cm
治疗头输出剂量率	2Gy/min/L
束斑直径	4~9mm
束斑定位精度	1mm
治疗模式	笔形束模式 (PencilBeamScanning, PBS)
治疗终端	4 间旋转机架治疗室
治疗定位系统	每间治疗室配备两个定位 X 射线管; X 射线管：管电压 150kV，管电流 500mA。

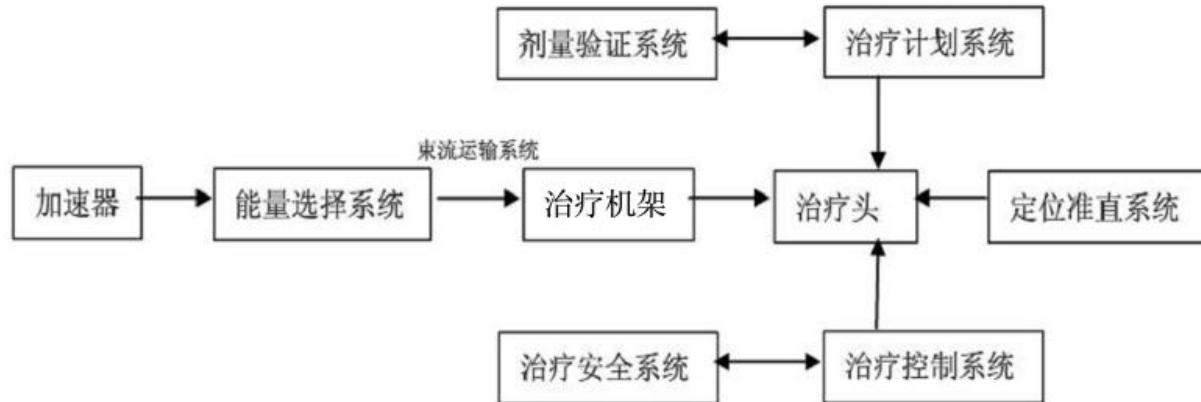


图 3.2.1.1-1 质子放射治疗系统装置结构组成示意图

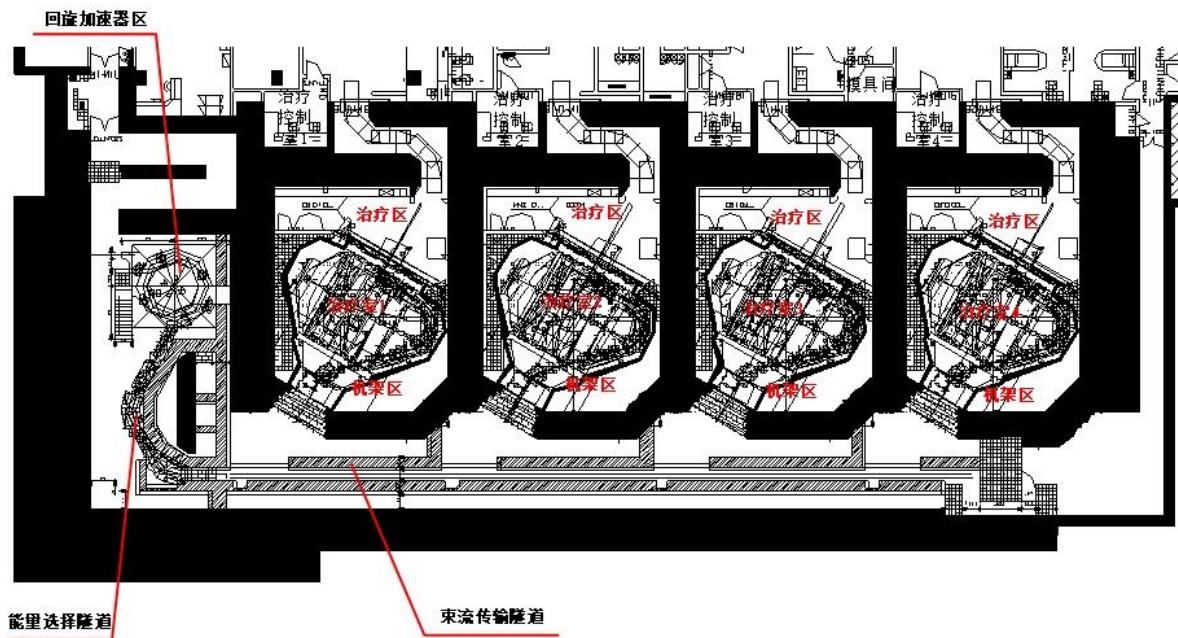


图 3.2.1.1-2 质子放射治疗系统平面布局示意图

### 3.2.1.2 装置组成及工作原理

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

#### 3.2.1.2.1 回旋加速器

回旋加速器是质子放射治疗系统的核心，其结构示意图见图 3.2.1.2-1，实物参考图见图 3.2.1.2-2。在回旋加速器内将氢气进行游离，成为氢离子，即一个带正电的质子。氢离子通过一个由高频电场供电的间隙，每次通过间隙得到高频能量进而实现加速。为把质子限制在一个有限的空间进行加速，在质子运动的垂直平面上加一个固定磁场，使质子在该磁场中做螺旋圆周运动。质子初始流强约为  $750\text{nA}$ ，初始能量约为  $50\text{keV}$ 。多次通过高频间隙后，能量逐渐变高，直至加速到最高  $230\text{MeV}$  时，再利用磁和电偏转将质子束从加速器引出。质子放射治疗系统正常运行期间，回旋加速器每天 24 小时始终处于开机运行状态，仅在检修保养期间才会停机，且仅在治疗期间才会产生质子束流。

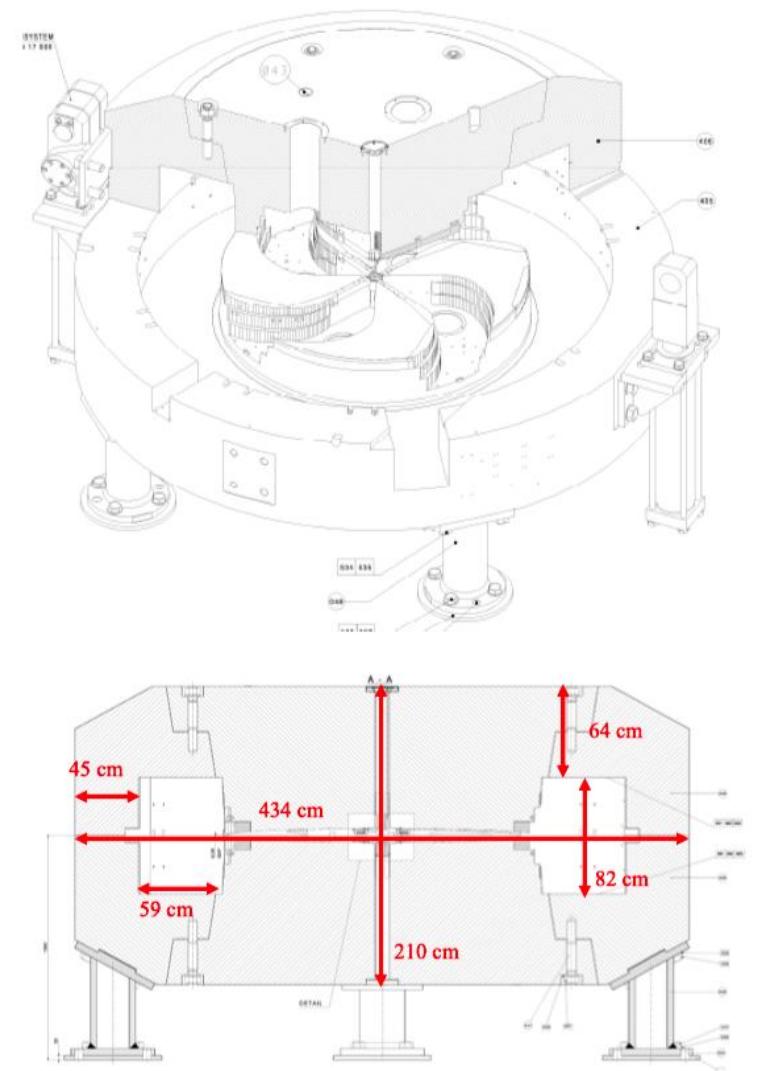


图 3.2.1.2-1 质子放射治疗系统回旋加速器结构示意图



图 3.2.1.2-2 质子放射治疗系统回旋加速器实物参考图

### 3.2.1.2.2 能量选择系统

质子治疗时要根据肿瘤深度和厚度选用不同能量的质子，由于回旋加速器引出的质子能量是固定的，因此需在回旋加速器和治疗室之间设置一个能量选择系统，该系统由降能器、准直器与离子光学用的各种磁铁和测量元件组成，其结构示意图见图 3.2.1.2-3，实物参考图见图 3.2.1.2-4。

#### (1) 降能器

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

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

#### (2) 准直器

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

#### (3) 发散狭缝

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

#### (4) 动量狭缝

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

### 3.2.1.2.3 束流运输系统

束流运输系统用于将加速器产生的质子束流输送到患者治疗部位附近。沿束流运输线管道放置四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备，四级磁铁用于对质子束流进行聚焦，偏转磁铁用于改变束流的方向，导向磁铁用于纠正质子束流在系统安装时产生的偏离。质子放射治疗系统束流运输系统实物参考图见图 3.2.1.2-5。

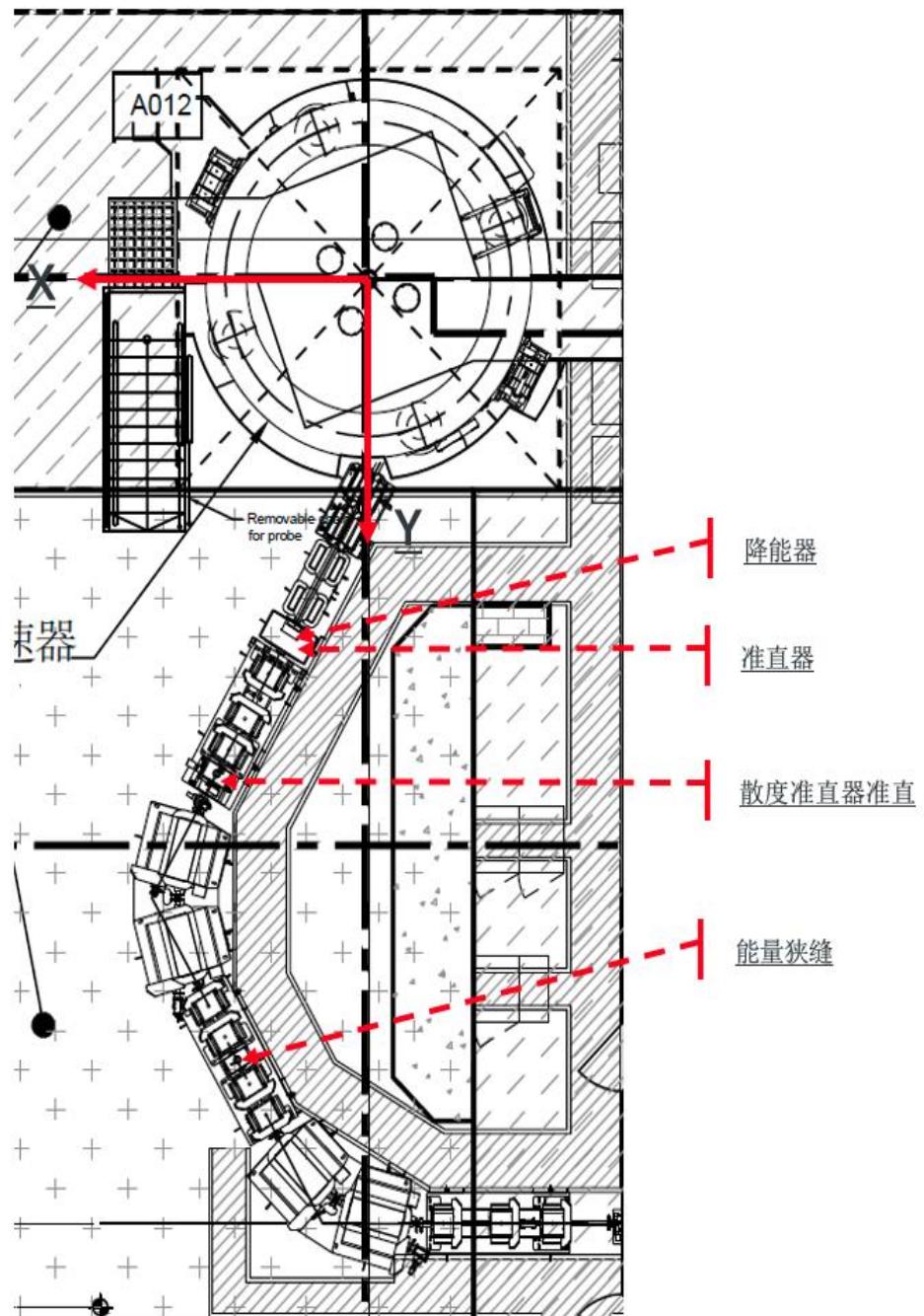


图 3.2.1.2-3 质子放射治疗系统能量选择系统结构示意图



图 3.2.1.2-4 质子放射治疗系统能量选择系统实物参考图

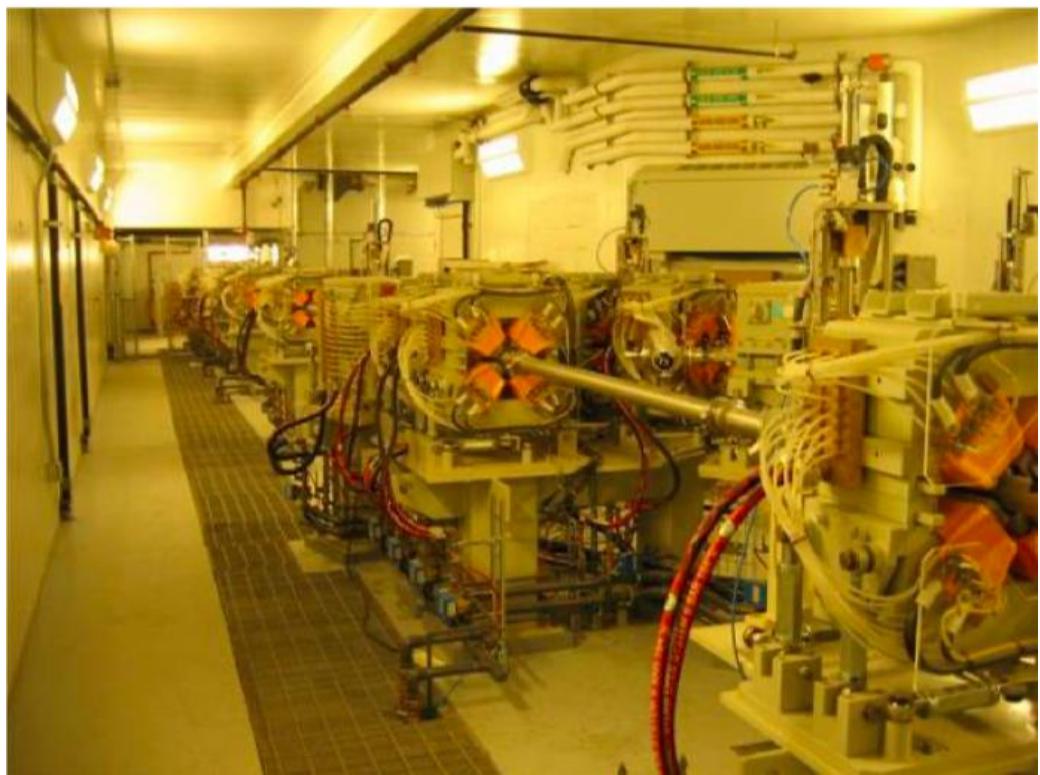


图 3.2.1.2-5 质子放射治疗系统束流输运系统实物参考图

#### 3.2.1.2.4 治疗室终端

质子放射治疗系统的治疗室终端为 4 间旋转机架治疗室，从西到东分别为 1~4 号治疗室，是治疗患者的场所。旋转机架治疗室内含有旋转机架及旋转治疗头。旋转机架能够环绕卧姿患者进行转动，可实现  $360^{\circ}$  旋转。每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一个治疗室提供束流。

##### (1) 机架治疗室

机架治疗室通过机架使质子束流依照同中心旋转，以进行多野不同入射角的照射。在旋转中心的治疗床能进行上下、前后、左右的调节，还能作前后水平和左右水平方向的倾斜，以方便精确地重复患者治疗的体位。旋转机架和机架治疗室实物参考图见图 3.2.1.2-6。

旋转机架是一个巨大的、能够同中心旋转的钢结构，该机架上装有质子束偏转磁铁和聚焦磁铁、真空系统和射线监测器，旋转机架直径约 11 米，重量达 100 吨，可进行  $\pm 185^{\circ}$  旋转，转速可由 0.5 rpm 至 1 rpm。机架半径的精度小于 1 毫米。



图 3.2.1.2-6 质子放射治疗系统旋转机架和机架治疗室实物参考图

### (2) 治疗头

治疗头位于束流运输系统的最末端，根据不同需求和治疗计划，使用不同的治疗模式，准确地将质子束照射到目标肿瘤中。鉴于肿瘤的多样性，需要不同的治疗模式去治疗每个患者，治疗头的设计也会根据不同的治疗模式有所差别。厂家针对散射和扫描治疗模式生产了通用治疗头和专用于笔形束扫描的治疗头，模拟图见图 3.2.1.2-7。本项目质子放射治疗系统使用的均为笔形束扫描治疗头。

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



左图：通用治疗头

右图：笔形束扫描专用治疗头

图 3.2.1.2-7 质子放射治疗系统治疗头模拟图

### (3) 治疗定位系统

每间治疗室内均设有一套治疗定位系统，用于患者治疗前的定位。治疗定位系统由

X 光球管、接收器和高压发生器组成。由高压发生器提供高压电源到球管上，球管发出 X 射线到接收器上形成图像，最后在治疗控制系统内进行图像处理，使其满足放疗中图像使用的要求。

每间机架治疗室设有 Tube-A 和 Tube-B 2 套 X 射线管和 2 套彼此正交的数字影像平板探测器系统。其中 Tube-B 是束流射野方向，Tube-A 垂直于 Tube-B，此正交平面外，旋转机架上的 Tube-A 可提供锥形束 CT（CBCT 功能）。可根据需要进行 180° 半扫描和 360° 全扫描，可选扫描条件为小型扫描视野（23cm）与大型扫描视野（50cm）。用于图像引导的 X 射线管最大管电压 150kV，最大管电流 500mA。

X 射线管在治疗室内的安装位置如图 3.2.1.2-8 所示。临床治疗期间，技师在治疗室外的治疗控制室内操作图像引导系统，进行治疗前的位置验证。

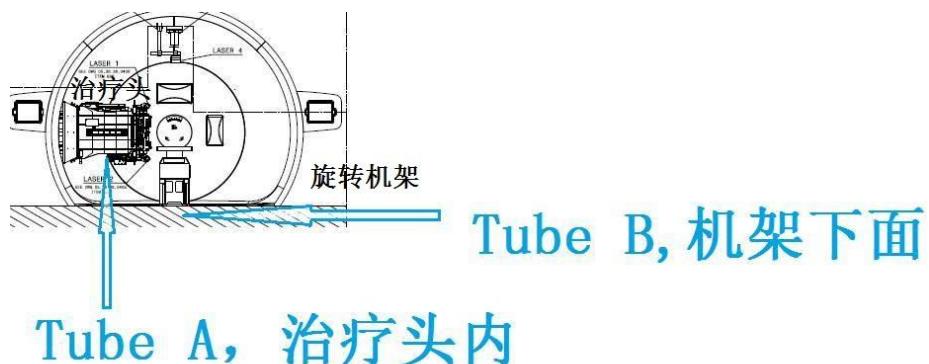


图 3.2.1.2-8 质子放射治疗系统机架治疗室内 X 射线管安装位置示意图

### 3.2.1.3 工作流程及产污环节分析

质子放射治疗系统的治疗流程和产污环节如下。

#### (1) 制定治疗预案

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

#### (2) 治疗前模拟定位

对于首次预约质子治疗的患者，需要利用模拟定位 CT 对其进行治疗前的模拟定位，采集患者数据并确定初始等中心，主要的辐射源项为模拟定位 CT 出束产生的 X 射线。该环节在负二层放疗中心模拟定位 CT 机房内进行，主要由 CT 技师进行操作。

#### (3) 制定治疗计划

物理师利用治疗计划系统制定治疗计划，确定治疗参数，如照射次数、照射方向、

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

#### （4）QA（质量保证）

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

#### （5）治疗计划验证

每名患者的治疗计划在正式使用前，为确保治疗安全，都需进行一次治疗前的计划验证，即利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行人体仿真模体（一般为等效水模体）模拟治疗，再实测其治疗参数，再和治疗计划中规定的治疗参数进行比较，若差值在允许容差内，则允许正式用于患者治疗。一次治疗计划验证的过程与一次正式的治疗过程基本一致。由物理师完成所有操作，包括在治疗室内的摆位等操作和在治疗控制室内控制出束，一次时间约为 20min。该环节主要的辐射污染源为质子、中子、 $\gamma$ 瞬发辐射、感生放射性气体、活化结构部件、活化冷却水、人体仿真模体感生放射性。

#### （6）治疗前精确摆位

计划验证通过并获得批准执行后，患者可进入治疗室内准备治疗。治疗技师根据治疗计划指导患者在治疗室内进行摆位，并在治疗控制室控制 X 射线管出束开展精确的位置验证，该环节由治疗技师进行全程操作。治疗前摆位约需 5min，精确位置验证约需 5min，整个摆位过程约需 10min。该环节主要的辐射污染源是 X 射线管出束期间产生的 X 射线。

#### （7）质子放射治疗系统出束照射治疗

摆位验证完成后，治疗技师在控制室内确定所有的安全联锁建立后，启动质子束流进行出束治疗，每个患者治疗出束时间约为 5min。该环节主要的辐射污染源为质子、

中子、 $\gamma$ 瞬发辐射、感生放射性气体、活化结构部件、活化冷却水、患者感生放射性。

#### (8) 治疗结束后解除摆位

患者治疗结束后停机 5min，治疗技师从治疗控制室进入治疗室内，对患者解除摆位并协助其离开机房，为下一个患者治疗做准备。该环节在治疗室内进行，由治疗技师全程操作，时间约为 1min。照射治疗环节产生的患者感生放射性、感生放射性气体以及活化结构部会持续对本环节辐射工作人员产生影响，影响对象为与其近距离接触的治疗技师。

质子放射治疗系统工作流程污染物产生环节及主要污染因子见图 3.2.1.3-1。

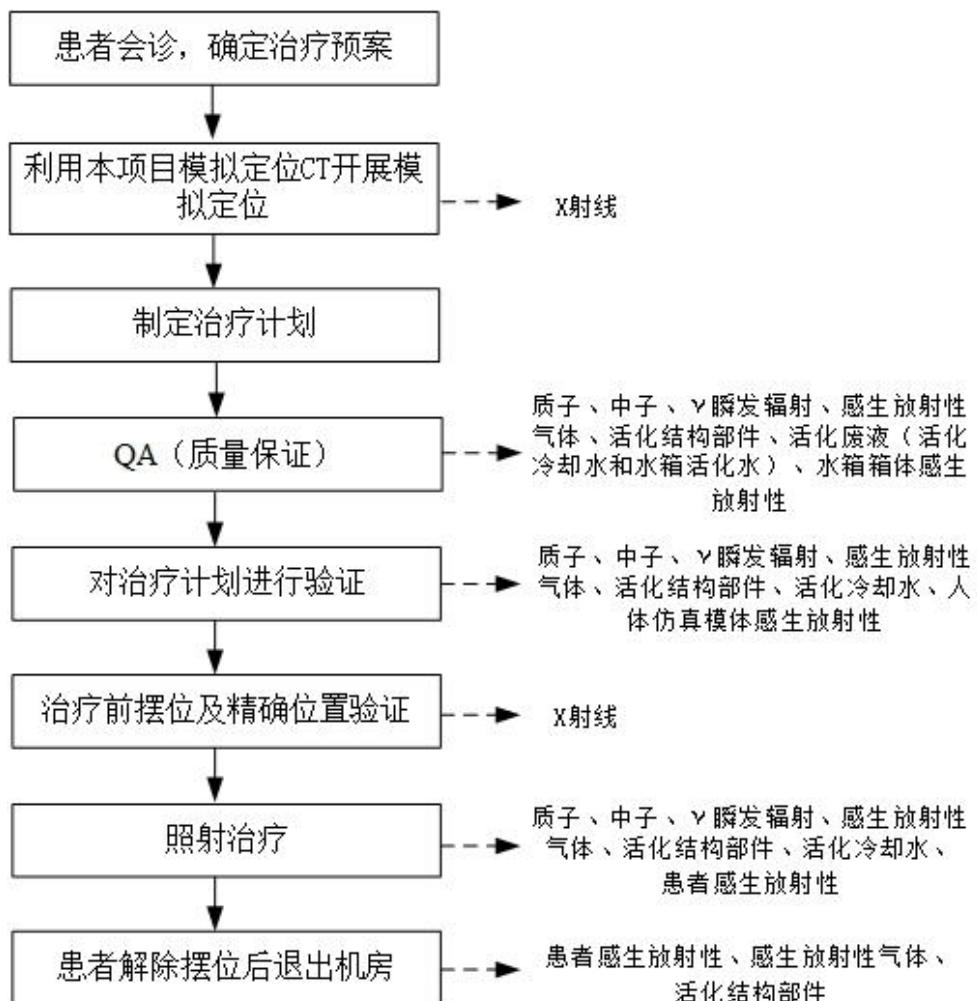


图 3.2.1.3-1 质子放射治疗系统工作流程及主要产污环节图

#### 3.2.1.4 工作负荷及人员配置

##### 3.2.1.4.1 工作负荷

质子放射治疗系统的年使用规划及出束时间见下表。

表 3.2.1.4-1 质子放射治疗系统的年使用规划

序号	内容	单位	质子治疗室 1	质子治疗室 2	质子治疗室 3	质子治疗室 4
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3	3	3	3
2	每室每天治疗时间	h/d/室	10	10	10	10
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	30	30	30	30
4	每室每年治疗天数	d/a/室	250	250	250	250
5	每人平均治疗次数	次/人	30	30	30	30
6	每室每年治疗人数	人/a/室	250	250	250	250
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	7500	7500	7500	7500
8	每人次治疗平均出束时间	min/人次	5	5	5	5
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	2.5	2.5	2.5	2.5
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	625	625	625	625
11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	83.33	83.33	83.33	83.33
12	每室每年治疗计划验证出束时间	h/a/室	20.83	20.83	20.83	20.83
13	每室每年治疗+QA+计划验证出束时间	h/a/室	729.17	729.17	729.17	729.17
14	每室每周治疗+QA+计划验证出束时间	h/w/室	14.58	14.58	14.58	14.58
15	年总出束时间	h/a		2916.67		

### 3.2.1.4.2 人员配置

本项目质子治疗依托医院现有放疗科 22 名辐射工作人员，主要调配 10 名医生、4 名物理师、8 名治疗技师，并对外新聘 12 名辐射工作人员（4 名物理师、8 名治疗技师）。除了辐射工作人员外，本项目质子治疗依托医院现有 2 名护士，主要在质子候诊大厅进行患者引导，不涉及辐射工作。

除上述医院人员外，质子设备厂家常驻 4 名维修工程师负责质子放射治疗系统运行期间日常的维护保养、故障维修，不作为医院人员进行管理，其辐射培训、个人剂量监测和职业健康管理均由厂家负责，但考虑到维修工程师为本项目辐射工作人员，故保留其受照剂量估算等内容。

本项目质子治疗拟配备的辐射工作人员如下表所示。

表 3.2.1.4-2 质子治疗辐射工作人员配置情况

岗位类别	人数	工作内容	工作地点	年受照时间
医生	10 人, 轮班工作	诊断、放射治疗方案的确定、治疗效果评定	办公室和诊室	不涉及辐射工作
		突发状况应急处理	治疗室	小于 20h/人
治疗技师	单个治疗室安排 2 人为一个班次, 一天安排 2 个班次轮岗, 共 16 人	治疗前摆位	治疗室	312.5h/人 (2 名治疗技师共同完成一次工作, 每次治疗前摆位所需时间为 5min, 单间治疗室每年治疗次数为 7500 人次)
		治疗后解除摆位并协助其离开机房		31.25h/人 (1 名治疗技师完成一次工作, 治疗后对患者解除摆位并协助其离开机房所需时间为 1min, 单间治疗室每年治疗次数为 7500 人次)
		操作质子放射治疗系统出束	治疗控制室	312.5h/人 (2 名治疗技师共同完成一次工作, 单间治疗室每年治疗次数为 7500 人次, 每次治疗出束 5min)
		操作 X 射线管出束		31.25h/人 (2 名治疗技师共同完成一次工作, 单间治疗室每年治疗次数为 7500 人次, 每次 X 射线管的出束时间不超过 30s)
物理师	8 人, 轮班工作	治疗前的计划验证	治疗控制室	20.83h/人 (患者治疗前的计划验证次数年合计为 1000 次, 2 名物理师共同完成一次工作, 每次计划验证出束 5min)
			治疗室	25h/人 (患者治疗前的计划验证次数年合计为 1000 次, 2 名物理师共同完成一次工作, 每次摆位 6min)
		QA (质量保证)	控制室	83.33h/人 (QA 每年出束 83.33h, 2 名物理师共同完成一次工作)
			搬运水箱	5.21h/人 (每次搬运 5min, 一年合计 20.83h, 2 名物理师共同完成一次工作)
护士	2 人, 轮班工作	患者引导	质子候诊大厅	不涉及辐射工作, 小于 2000h/人
维修工程师	2 人为一个班次, 一天安排 2 个班次轮岗, 共 4 人	设备日常维护保养、故障维修	回旋加速器机房	小于 50h/人
			治疗室	小于 200h/人
		监视回旋加速器运行状态	主控室、维护室	不涉及辐射工作, 小于 2000h/人

### 3.2.1.5 人员和物流路径规划

本项目工作场所分别设置相对独立的人员和物流通道。人流和物流路径规划见图

4.1.1.1-2，具体路线设置描述如下：

### （一）辐射工作人员路径

治疗医生的工作地点主要在办公室和诊室内，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内部，人员路径集中在质子治疗层，主要是从质子候诊大厅进入走廊，通过缓冲间后进入对应治疗室。工作结束后，按原路离开。

治疗技师、物理师的工作地点主要在治疗室、治疗控制室，人员路径集中在质子治疗层，主要是从质子候诊大厅进入走廊，通过缓冲间后进入治疗控制室或治疗室。工作结束后，按原路离开。

维修工程师的工作地点主要在主控室、维护室、加速器机房、治疗室，人员路径集中在质子治疗层，主要是从质子候诊大厅进入走廊，直接进入主控室、维护室，或通过缓冲间后进入加速器机房或治疗室。工作结束后，按原路离开。

### （二）患者路径

患者路径集中在质子治疗机房治疗层，主要是从质子候诊大厅进入走廊，通过缓冲间后进入对应治疗室。治疗结束后，按原路离开。

### （三）物流路径

设备在安装阶段，1间回旋加速器机房和4间质子治疗室顶棚墙体均预留了设备吊装口，待设备进入后，再用密度高于 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 的混凝土预制板进行覆盖。

本项目质子治疗系统产生的放射性固废为含感生放射性的结构部件、冷却水废离子树脂、加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等。治疗室内的放射性固废经防护门离开治疗室，通过缓冲间、走廊转移到同楼层的质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间内暂存，回旋加速器机房内的放射性固废经后区转移到同楼层的质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间内暂存。

## 3.2.2 医用电子直线加速器

### 3.2.2.1 装置组成和参数

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

本项目拟使用的电子直线加速器主要技术参数列于表 3.2.2.1-1，典型直线加速器外

部结构见图 3.2.2.1-2。

表 3.2.2.1-1 本项目拟使用电子直线加速器的主要技术参数

项目	参数
型号	待定
数量(台)	4
射线装置类别	II类
最大X射线能量及等中心处剂量率	6MV, 8.40E+08μGy/h
	10MV, 1.44E+09μGy/h
	15MV, 6.00E+08μGy/h
电子线最大能量及等中心处剂量率	22MeV, 6.00E+08μGy/h
主射线最大出束角度	28°
X射线泄漏率	0.1%
源轴距 SAD	100cm
最大照射野	40cm×40cm
机架旋转角度	±180°
CBCT	最大管电压 140kV, 最大管电流 1250mA

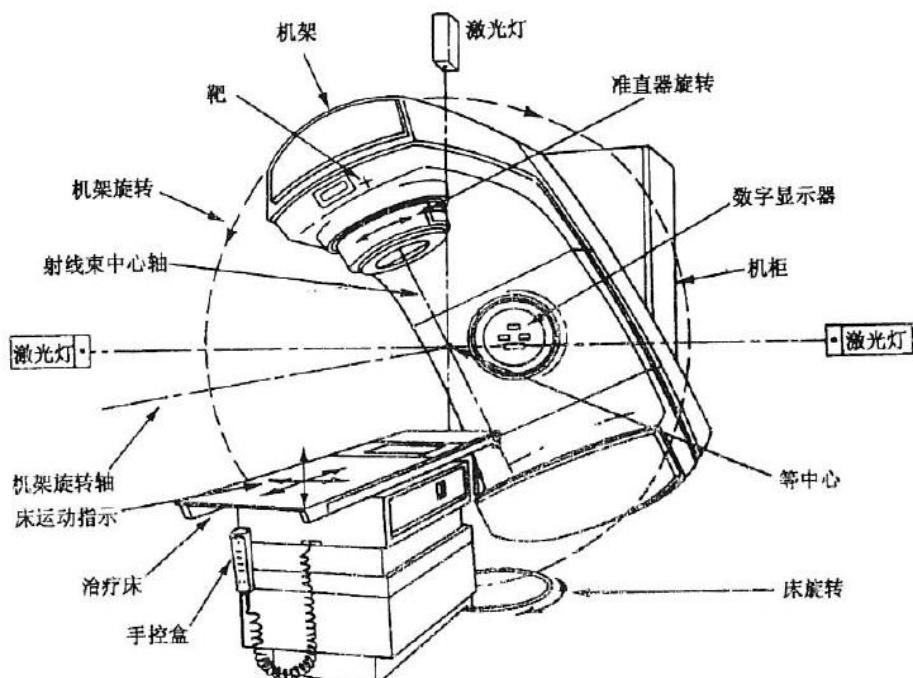


图 3.2.2.1-1 典型直线加速器外部结构图

### 3.2.2.2 工作原理

医用电子直线加速器是将电子枪产生的电子经加速管加速后形成高能电子线的装置。电子枪产生的电子线由微波加速波导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子线由电子窗口射出，经调制、准直后射向患者病灶；或电子线靶物质相互作用产生轫致辐射 X

射线束，经一次准直器和滤线器形成剂量均匀的 X 射线束，再经监测电离室和二次准直器限束，到达患者病灶实现治疗目的。直线加速器有电子线和 X 射线两种治疗模式，治疗模式结构示意见图 3.2.2.2-2。

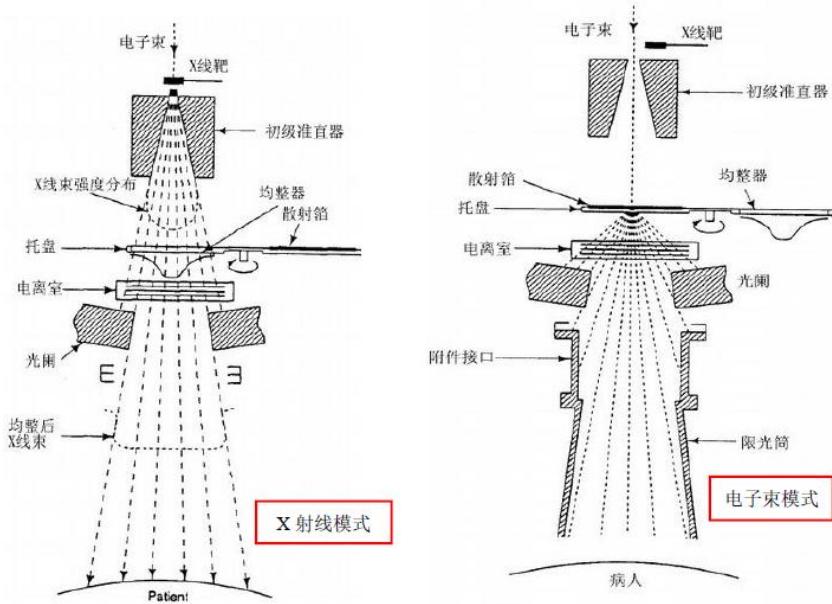


图 3.2.2.2-2 X 射线和电子线治疗模式结构示意图

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

### 3.2.2.3 CBCT

本项目直线加速器集成一台 CBCT 影像引导设备，使用锥形束 X 射线进行信息采集的计算机层成像技术。它与传统多排探测器 CT 最显著的区别是使用二维数字平板探测器，在一次旋转中产生三维容积图像。CBCT 由影像板和球管等硬件及控制软件组成，球管产生 kV 级 X 射线，X 射线穿过物体和人体投影到影像板成像。

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

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

### 3.2.2.4 工作流程及产污环节分析

治疗前先确认治疗方案，包括确定照射时间和剂量，定位患者照射部位，调整照射角度和视野，再开机进行治疗。在加速器治疗过程中，除患者外其他人员均不在治疗室内，医护人员通过视频监控系统观察患者情况。操作流程如下：

- ①根据医生指导意见，需要接受治疗的患者提前预约登记，以确定治疗时间；
- ②预约患者首先在 CT 上进行肿瘤定位，确定肿瘤的具体位置和形状；
- ③物理师通过医生给出的治疗剂量，通过治疗计划系统（TPS）制定治疗计划；
- ④肿瘤患者在技师协助下躺上治疗床，进行摆位，根据 TPS 确定照射位置和面积；
- ⑤CBCT 采集图像进行位置验证；
- ⑥根据放疗计划，实施照射；
- ⑦照射结束后，患者离开机房。

工艺流程及产污环节如下图所示。

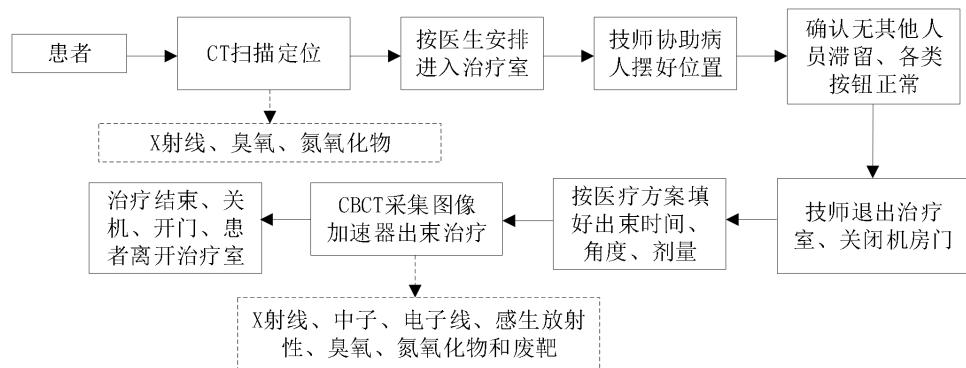


图 3.2.2.4-1 加速器放疗流程及产污环节示意图

正常工况时，直线加速器治疗污染源项主要为开机状态下产生的 X 射线、电子线、中子和感生放射性物质，同时会产生少量臭氧及氮氧化物。另外，在直线加速器靶件损坏或报废退役时，会有活化废靶产生。

### 3.2.2.5 工作负荷

每台直线加速器每年最多工作 50 周，每周工作 5 天。每台直线加速器计划每天最多治疗 50 人次，平均每名患者治疗照射时间为 1.5min，则每台设备的周治疗出束时间

最多为 6.25h，年治疗出束时间最多为 312.5h。

### 3.2.2.6 工作人员配备

放疗科直线加速器拟配备的工作人员如下表所示。

表 3.2.2.5-1 直线加速器辐射工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医生办公室、抢救室	4 人	每天一班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、直加机房内、直加控制室	4 人	每天一班，每班 8h
技师	摆位、解除摆位等	直加机房及其控制室、技师办公室	8 人	每天一班，每班 8h

### 3.2.2.7 人员路径规划

本项目工作场所人员路径规划图见图 4.2.1-1，具体路线设置描述如下：

#### (一) 辐射工作人员路径

医护人员经准备间进入相应直线加速器控制室，操作设备出束；由机房西侧防护门进入相应直线加速器机房，对患者进行摆位，完成工作后原路返回控制室。

#### (二) 患者路径

患者在放疗科候诊大厅等待叫号，根据叫号进入相应准备间，由机房西侧防护门进入相应直线加速器机房进行治疗，治疗结束后原路返回。

### 3.2.3 后装机

#### 3.2.3.1 后装机基本情况

本项目后装机采用  $^{192}\text{Ir}$  核素为放射源，设计装源活度为  $5.55 \times 10^{11}\text{Bq}$ 。 $^{192}\text{I}$  放射源的性能参数见下表。

表 3.2.3.1-1 放射源  $^{192}\text{Ir}$  的性能参数

核素	活度 (Bq)	状态	半衰期	$\gamma$ 射线能量均值	空气比释动能率常数 $K_r$	源距地面高度
$^{192}\text{Ir}$	$5.55 \times 10^{11}$	固态	74.0d	0.37MeV	$0.111\mu\text{Sv}/(\text{h}\cdot\text{MBq})$	1.0m

#### 3.2.3.2 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病人需要治疗的部位正确地放置施源器，然后采用遥控程序控制，将贮源器内放射源输入施源器内实施治疗的技术。本项目后装治疗属近距离放疗，治疗时依照临床要求，使 $\gamma$ 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，后装治疗具有放射源强度小、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、直肠癌及宫颈癌等。

### 3.2.3.3 设备组成

后装机为计算机控制的遥控后装系统，包括后装主机、3D 近距离治疗计划系统和各种施源器。后装主机部分包括后装治疗机和控制台，后装治疗机安装在治疗室内，控制台电脑安放在控制室内，遥控操作。配备彩色闭路电视监视系统和对讲机系统，监视系统包含“推、拉、摇、移”功能的云台、摄像头、监视器和控制面板；对讲机系统，用于治疗师和病人之间的通话；系统自带独立的射线监测装置，并在治疗室内及控制台处装有声光显示。

贮源器是贮存后装治疗用放射源的容器，包括供运输（或暂存）放射治疗源用的运输贮源器和供后装机配套用的工作贮源器，工作贮源器位于后装机机体中央，一般采用钨合金屏蔽材料，保证贮源器没有伽玛射线泄漏的直接路径。运输（或紧急/维修）贮源器用于放射源的运输、在放射源不能进入后装机的贮源器，或在维修后装机驱动机械部分时，临时存放放射源，运输贮源器由设备供货厂家提供并同放射源一起更换。

施源器是预先放入人体腔、管道或组织间，供放射源驻留或运动，并实施治疗的特殊容器；通道是在后装机中专供密封放射源或其组件在其中运动的轨迹，此通道与贮源器和施源器相连接。典型后装机和施源器外形图如下图所示。



图 3.2.3.3-1 典型后装机和施源器外形图

### 3.2.3.4 治疗流程

本项目后装治疗机使用 1 枚  $^{192}\text{Ir}$  放射源，新源的活度大约 555GBq(15Ci)，其直径  $<1.0\text{mm}$ ，长度  $<4.6\text{mm}$ ，用激光焊接于弹性驱动线缆上，从分度盘至最远的位置为 1500mm。治疗过程施源方式为遥控，通过视频系统可清晰观察后装机及放射源的情况，系统配有后装机放射源位置模拟尺、放射源位置检查尺和 GAFCHROMIC 胶片条，后装机放射源位置模拟尺用于测量施源器内部长度和在透视片中显示驻留位置；放射源位置检查尺专用于测量和验证放射源的位置（末端位置）。放射源验证系统用于测量后装机放射源的强度。

具体操作流程为：

①患者经医生诊断、治疗正当性判断后，确定需要治疗的患者进行预约登记，告知辐射危害；

②预约患者首先在模拟定位机上进行肿瘤定位，确定肿瘤的具体位置和形状（该环节在负二层放疗中心模拟定位 CT 机房内进行，主要由 CT 技师进行操作）；

③治疗前，在准备室根据患者患处情况放置施源器，随后患者进入治疗室，接上与放射源相连的导管，然后借助后装机将源送到需要照射的部位。确认除患者外无人滞留后，技师离开机房并关好门。

④放射源的输送由技师在控制室遥控操作，先驱动假源探路，正常后缩回假源，再驱动真源按计划执行治疗，放射源步进到位精度为毫米级。

⑤达到治疗时间后，技师通过遥控控制源返回贮源器内，系统装有联锁装置，在治疗室的门未关闭或按下紧急按钮时，源不会送出或将已送出的源撤回，确认源安全返回贮源器内，方可通过操作台控制打开迷路防护门。

⑥打开治疗室防护门，患者离开治疗室。

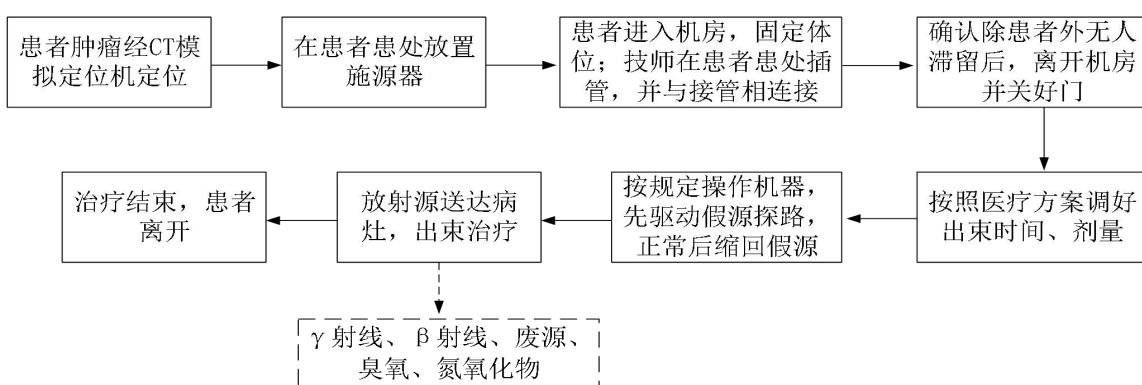


图 3.2.3.4-1 后装机近距离治疗工作流程及产污环节示意图

因此，后装机正常工况下，污染源项主要为开机状态下产生的 $\gamma$ 射线、 $\beta$ 射线、废源，同时产生少量臭氧和氮氧化物。

### 3.2.3.5 工作负荷

根据医院提供资料，后装机每天最大工作量为 15 人次，每周工作 5 天，参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 3 部分： $\gamma$ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）中附录 F.1 的“示例条件与基本参数”：平均每位患者的治疗照射时间为 6min，则周照射时间为 7.5h，年照射时间为 375h。

### 3.2.3.6 工作人员配备

放疗科后装机拟配备的工作人员如下表所示。

表 3.2.3.6-1 后装机辐射工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医生办公室、抢救室	1 人	每天一班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、后装机房内、后装机控制室	1 人	每天一班，每班 8h
技师	摆位、解除摆位等	后装机房及其控制室、技师办公室	2 人	每天一班，每班 8h

### 3.2.3.7 人员路径规划

本项目工作场所人员路径规划图见图 4.2.1-1，具体路线设置描述如下：

#### （一）辐射工作人员路径

医护人员经走廊进入后装机房控制室，操作放射源送达病灶；由机房南侧防护门进入后装机房，对患者进行摆位，完成工作后原路返回控制室室。

#### （二）患者路径

患者在放疗科候诊大厅等待叫号，根据叫号通过缓冲间进入准备间，做好准备工作后由后装机房南侧防护门进入后装机房进行治疗，治疗结束后原路返回。

### 3.2.4 模拟定位 CT

#### 3.2.4.1 设备组成

模拟定位 CT 机主要由 X 射线发生装置、金属影像增强器、数据图像处理器、床体系统等组成。X 射线发生装置由 X 射线球管和高压电源组成。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，装在聚焦杯中。当灯通电加热时，电子

即“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚焦成束，直接向嵌在金属阳极中的靶体射击。高电压加在 X 射线管的两极之间，使电子在射到靶体之前被加速达到很高的速度。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成，高速电子轰击靶体产生 X 射线。

### 3.2.4.2 工作原理

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

模拟定位 CT 不仅可以像诊断性 CT 一样为治疗计划系统提供高质量的横断面 CT 影像资料，还可以帮助临床医生精确勾画出肿瘤靶区及危险器官的轮廓，进而帮助计算机计划系统进行组织不均匀性校正，提高剂量计算的准确性。现代的模拟定位 CT 综合了部分影像系统、计划设计系统和传统 X 射线模拟机的功能，常选用大孔径、高速扫描的螺旋 CT。由于扫描速度快，扫描层厚薄，重建的 CT 图像质量较高。临床医师可以及时发现异常病变，判断肿瘤性质，并进而确定治疗方式，布局方法及处方剂量。

### 3.2.4.3 操作流程及产污环节分析

本项目 CT 模拟定位机具体操作流程如下，工艺流程及产污环节见下图。

- ①患者经医生诊断、治疗正当性判断后，确定需要肿瘤定位的患者进行预约登记，告知辐射危害；
- ②患者在技师的指导下正确摆位；
- ③技师进行隔室操作，利用 CT 模拟定位机进行肿瘤定位；
- ④检查结束，打开治疗室防护门，患者离开检查室。

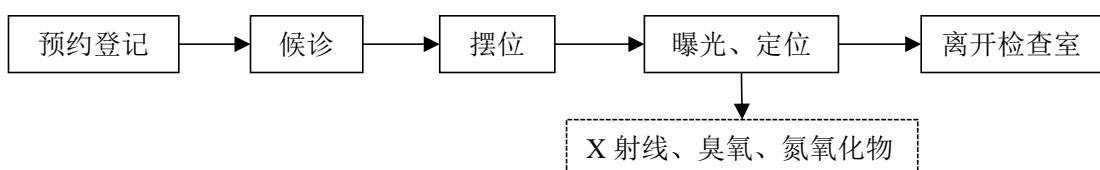


图 3.2.4.3-1 模拟定位 CT 工艺流程及产污环节图

因此，模拟定位 CT 正常工况下，污染源项主要为开机状态下产生的 X 射线、臭

氧、氮氧化物。

#### 3.2.4.4 工作负荷

本项目每年最多工作 50 周，每周工作 5 天。该设备计划最多诊断 100 人次/天，设备单次曝光时间不超过 20s，则设备年出束时间为 139h。

#### 3.2.4.5 工作人员配备

放疗科模拟定位 CT 拟配备的工作人员如下表所示。

表 3.2.4.5-1 模拟定位 CT 辐射工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
技师	摆位、解除摆位等	模拟定位 CT 机房及其控制室、技师办公室	2 人	每天一班，每班 8h

#### 3.2.4.6 人员路径规划

本项目工作场所人员路径规划图见图 4.2.1-1，具体路线设置描述如下：

##### （一）辐射工作人员路径

医护人员经走廊进入模拟定位 CT 机房控制室，操作设备出束；从控制室进入 CT 模拟定位机房，对患者进行摆位，完成工作后原路返回控制室

##### （二）患者路径

患者在放疗科候诊大厅等待叫号，由机房西侧防护门进入模拟定位 CT 机房，检查结束后原路返回。

### 3.3 辐射源项分析

#### 3.3.1 质子放射治疗系统

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

##### 3.3.1.1 瞬发辐射源

### 3.3.1.1.1瞬发辐射场分析

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

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

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

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

### 3.3.1.1.2各环节束流损失分析

根据建设单位提供的资料，本项目质子放射治疗系统各束流损失点的束流损失情况如下。

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

表 3.3.1.1-1 质子放射治疗系统束损参数表 1

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

患者	70	0.27	人体组织	100.0	0.27	集中损失
----	----	------	------	-------	------	------

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

表 3.3.1.1-2 质子放射治疗系统束损参数表 2

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

本次评价在辐射屏蔽计算时, 将综合考虑以上(1)、(2)两种情况。

### 3.3.1.1.3 辐射场源项估算

#### 3.3.1.1.3.1 FLUKA 程序

FLUKA 程序是由 20 世纪 60 年代由欧洲核子研究中心 (CERN) 主导开发的, 是用于计算粒子输运和与物质相互作用的通用工具。主要应用于质子和电子加速器及靶站的设计、量热学、辐射活化、辐射剂量学、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理、高能物理模拟、放射治疗等领域。

FLUKA 可以高准确度模拟约 60 种不同粒子的相互作用和物质传播, 包括 100 eV 到 1 keV 甚至数千 TeV 的光子和电子, 任何能量的中微子, 能量高达 20 TeV (通过 FLUKA 与 DPM JET 代码链接可达 10 PeV) 的夸克, 以及所有相应的反粒子, 低至热能的质子和重离子。该程序还可以传输偏振光子 (例如同步辐射) 和光学光子, 可以在线进行不稳定残留核发出的辐射的时间演变和跟踪。FLUKA 还可以处理非常复杂的几何图形, 能正确跟踪带电粒子, 还提供各种可视化和调试工具。

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

综上所述, 本报告在对辐射场源项进行估算时, 主要采用 FLUKA 程序, 通过该程序模拟质子与不同材质的靶体作用的中子能谱分布。

#### 3.3.1.1.3.2 中子能谱

根据对质子放射治疗系统瞬时辐射场的分析结果, 其瞬发辐射场起决定性作用的是

中子。中子产额、能谱和角分布与质子的能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。FLUKA 程序模拟的 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的辐射场如图 3.3.1.1-1 和图 3.3.1.1-2 所示。由结果可以看出高能质子核反应产生的瞬发中子有几个主要特点：

- (1) 从角分布看，前向的中子产额较高。随着出射角增加，谱峰向低能端移动；
- (2) 从能谱看，几乎各个方向都有一部分高能中子，尤其是前方，其能量最高可与质子束的能量相当；
- (3) 打铁靶与打水靶能谱的显著区别为：打水靶没有明显的蒸发中子峰，这是因为水中只有 H、O 两种元素，产生的中子主要来源于质子及次级中子与 O-16 的直接散裂反应和级联过程，不像铁靶那样容易形成复合核。

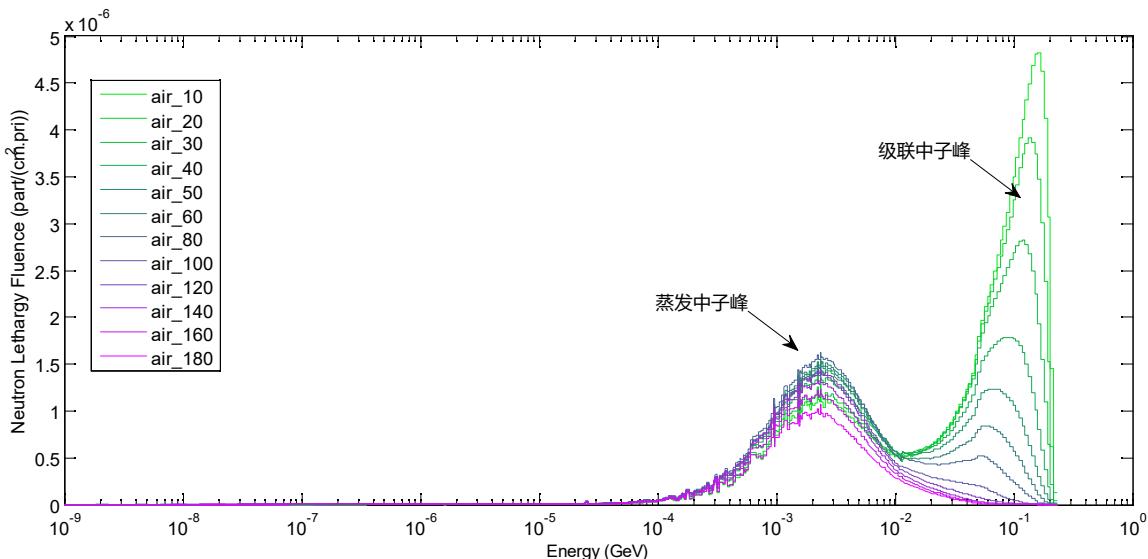


图 3.3.1.1-1 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布

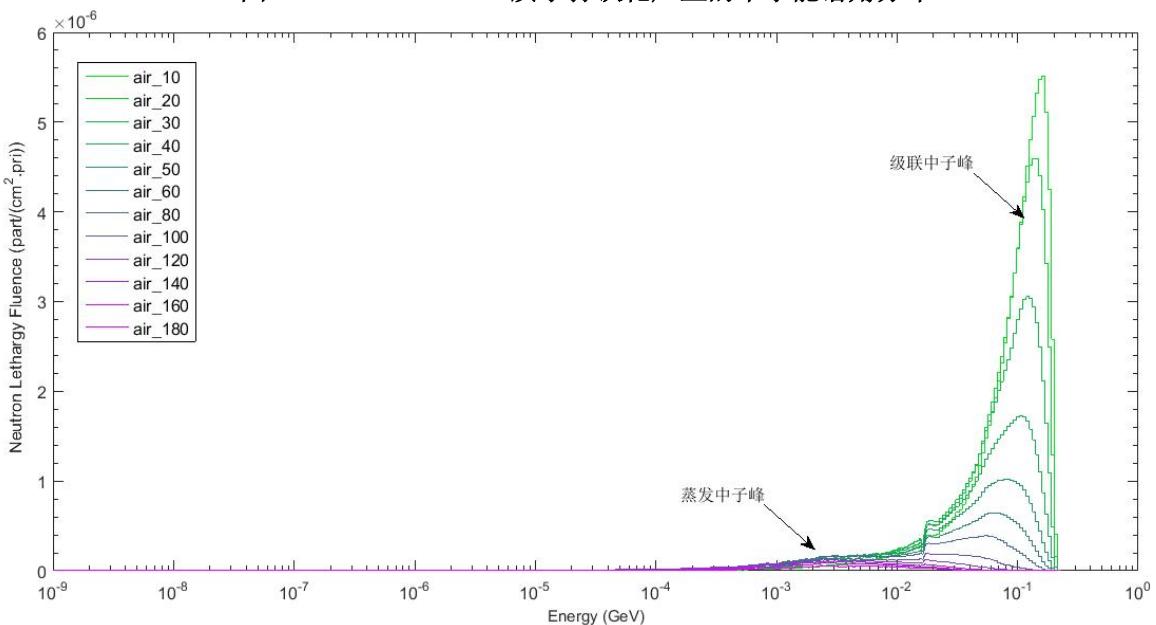


图 3.3.1.2 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布

### 3.3.1.1.3.3光子能谱

利用 FLUKA 程序模拟了 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的光子能谱,如图 3.3.1.1-3 和图 3.3.1.1-4 所示。从角分布来看,光子几乎是各向同性的。无论是打铁靶和水靶,产生的光子最大能量约为 100MV,但是其数量很少,绝大部分光子能量分布于 1~10MV。

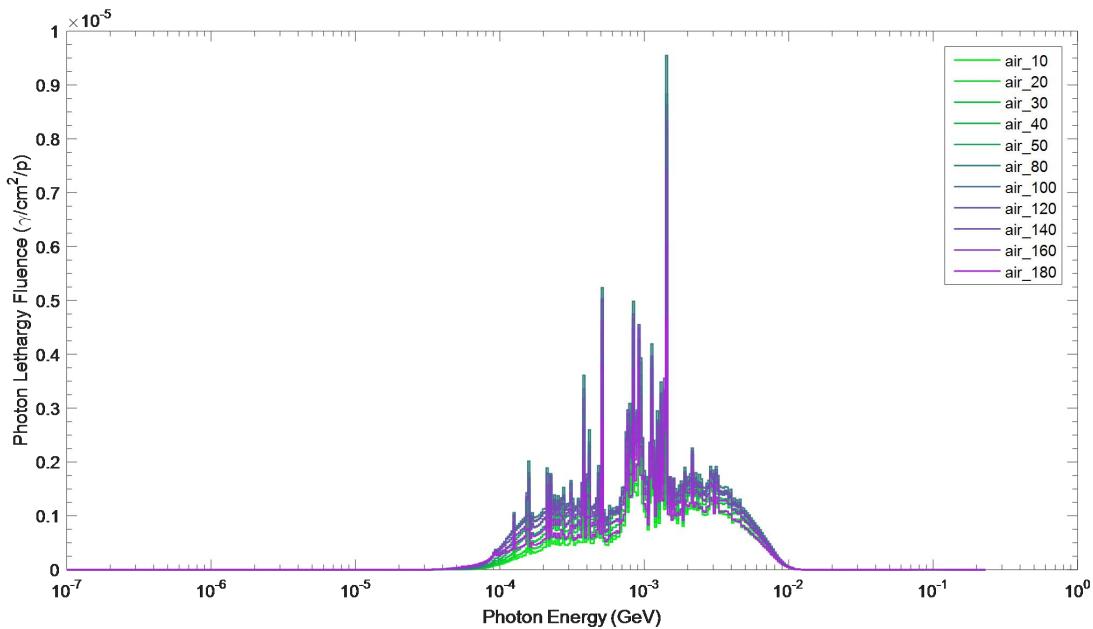


图 3.3.1.1-3 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

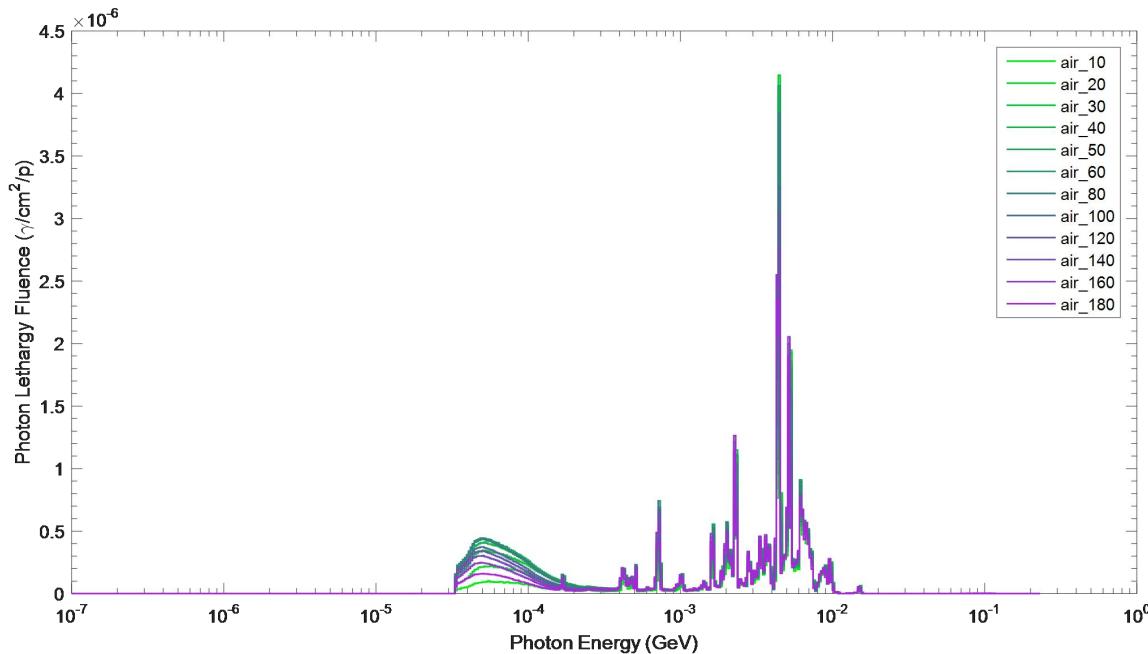


图 3.3.1.1-4 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

### 3.3.1.2 天空反散射

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

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

表 3.3.1.2-1 质子放射治疗系统各区域顶板外表面 30cm 剂量率

关注点	区域描述	剂量率计算结果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
A24	回旋加速器机房顶棚：不可上人屋面	0.114	3.43
A25	回旋加速器机房顶棚以上：封闭吊装口上方	0.041	1.37
A26	回旋加速器机房顶棚以上：地面绿化	0.006	1.37
F2	治疗室顶棚：不可上人屋面	0.462	10.00
F3	治疗室顶棚以上：封闭吊装口上方	0.178	5.49
F4	治疗室顶棚以上：地面绿化	0.209	5.49

根据上表可知，质子放射治疗系统运行时，质子治疗机房顶棚最大剂量率满足屏蔽体外剂量率控制水平要求，均小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，天空反散射造成的辐射影响将会更小。

### 3.3.1.3 感生放射性

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

质子放射治疗系统产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响对象是对停机后，需要进入质子治疗机房内工作的辐射工作人员，这种情况下，工作人员会受到质子放射治疗系统周边空气、冷却水、结构部件、模体的感生放射性影响。

对于地下水和土壤，粒子加速器常常不被认为是环境的潜在污染物。实际上，与反应堆相比，加速器产生放射性的能力是相当弱的。如果通过合适的地基厚度将进入到土壤或地下水中的粒子通量降到很低的水平，则加速器对土壤和地下水的活化可以降到可以忽略的水平。据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》(吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期)，同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设

计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于  $5\text{mSv/h}$  时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。根据后文“5.2 正常运行下的环境影响”，质子放射治疗系统运行时，地坪外表面与土层接触的边界处最大剂量率为  $3.333\mu\text{Sv/h}$  远小于  $5000\mu\text{Sv/h}$ ，因此本项目质子放射治疗系统运行可忽略土壤和地下水的感生放射性，故不对其进行分析评价。

此外，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）和文献《质子加速器治疗系统感生放射性辐射剂量研究》（宋钢，2013年，山东大学硕士学位论文）对治疗室内患者的感生放射性的计算和测量结果，当质子能量较高（ $230\text{MeV}$ ）时，单次短时治疗结束后质子治疗机房内感生放射性水平较高，停机  $1\text{min}$  后距离治疗中心  $30\text{cm}$  处剂量率水平可达  $200\mu\text{Sv/h}$ ，停机  $5\text{min}$  后剩余剂量率可衰减为停机  $1\text{min}$  后的  $1/4$ 。考虑到每次治疗任务结束后，短时间可能进入质子治疗机房的治疗技师对治疗结束后的患者进行解除摆位操作时可能受到照射，本报告对质子治疗机房内患者的感生放射性进行了分析计算。

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

### 3.3.1.3.1 感生放射性气体

质子放射治疗系统运行期间产生的次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、 $(\gamma, n)$  反应和高能中子散裂反应等产生  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$  等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素  $^3\text{H}$  和  $^7\text{Be}$ ，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$  四种核素，具体见下表。

表 3.3.1.3-1 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量份额	产生机制	活化反应截面 $\sigma^2, \text{mb}$
$^{11}\text{C}$	20.39min	N	$7.55 \times 10^{-1}$	$(\gamma, T)$	0.7
		N	$7.55 \times 10^{-1}$	散裂反应	10
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	$(\gamma, an)$	0.7
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	散裂反应	5
$^{13}\text{N}$	9.96min	N	$7.55 \times 10^{-1}$	散裂反应	10
		N	$7.55 \times 10^{-1}$	$(\gamma, n)$ 反应	9
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	散裂反应	9
$^{15}\text{O}$	2.04min	O	$2.3 \times 10^{-1}$	散裂反应	40
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	$(\gamma, n)$ 反应	17
$^{41}\text{Ar}$	1.83h	Ar	$1.3 \times 10^{-2}$	热中子俘获	610

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告

### 3.3.1.3.1.1 感生放射性气体静态饱和浓度

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

表 3.3.1.3-2 各区域感生放射性气体静态饱和活度和活度浓度（1）

核素	回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）					
	停机时刻		停机 0.5h		停机 1h	
	静态饱和活度, Bq	静态饱和活度浓度, Bq/m³	静态饱和活度, Bq	静态饱和活度浓度, Bq/m³	静态饱和活度, Bq	静态饱和活度浓度, Bq/m³
<sup>11</sup> C	1.36E+07	1.08E+04	4.89E+06	3.90E+03	1.76E+06	1.40E+03
<sup>13</sup> N	1.27E+07	1.01E+04	1.58E+06	1.26E+03	1.96E+05	1.56E+02
<sup>15</sup> O	1.05E+07	8.37E+03	3.87E+02	3.09E-01	1.43E-02	1.14E-05
<sup>41</sup> Ar	3.08E+06	2.46E+03	2.54E+06	2.03E+03	2.10E+06	1.67E+03

表 3.3.1.3-2 各区域感生放射性气体静态饱和活度和活度浓度（2）

核素	各治疗室					
	停机时刻		停机 10min		停机 10min	
	静态饱和活度, Bq	静态饱和活度浓度, Bq/m³	静态饱和活度, Bq	静态饱和活度浓度, Bq/m³	静态饱和活度, Bq	静态饱和活度浓度, Bq/m³
<sup>11</sup> C	3.80E+04	2.66E+01	2.70E+04	1.89E+01	1.92E+04	1.34E+01
<sup>13</sup> N	5.97E+04	4.17E+01	2.98E+04	2.08E+01	1.48E+04	1.03E+01
<sup>15</sup> O	2.75E+04	1.92E+01	9.16E+02	6.41E-01	3.05E+01	2.13E-02
<sup>41</sup> Ar	2.01E+04	1.41E+01	1.88E+04	1.31E+01	1.77E+04	1.24E+01

### 3.3.1.3.1.2 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度

质子放射治疗系统运行期间，加速器室和执行治疗任务的治疗室均保持通排风系统开启状态。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻各场所内空气感生放射性动态饱和浓度可由下式计算。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} C_{sat} \quad (\text{式 3.3.1.3-1})$$

式中，

$C_t$  为考虑通风的情况下，装置运行 t 时间后，停机时刻房间内空气中感生放射性动态浓度，Bq/m³；

$C_{sat}$  为不考虑通风的情况下，装置运行 t 时间，停机时刻房间内空气中感生放射性

的饱和浓度,  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ;

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

$r_I$ 为正常运行时房间内的换气次数,  $\text{s}^{-1}$ 。

### (一) 各参数的取值

#### (1) $\lambda$

$\lambda$ 计算结果如下表所示。

表 3.3.1.3-3 放射性核素衰变常数计算结果

放射性核素	$T_{1/2}$ , $\text{s}$	$\lambda$ , $\text{s}^{-1}$
$^{11}\text{C}$	1.22E+03	5.68E-04
$^{13}\text{N}$	6.00E+02	1.16E-03
$^{15}\text{O}$	1.26E+02	5.50E-03
$^{41}\text{Ar}$	6.48E+03	1.07E-04

#### (2) $r_I$

根据建设单位提供的资料, 质子治疗机房各区域的通风换气设计情况如下表所示。

具体通风系统设计情况见“4.1.2.3 通排风系统”的描述。

表 3.3.1.3-4 质子放射治疗系统各区域通排风系统设计情况

区域名称	体积 ( $\text{m}^3$ )	新风量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	排风量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	换气次数 (次/h)
回旋加速器机房(含能量选择隧道和束流传输隧道)	1254	——	500 (日常)	不低于 0.25 次/h, 折合 6.94E-05 次/s
		7500	9000 (维修期间人员进入)	不低于 6 次/h, 折合 1.67E-03 次/s
后区	224	——	100 (日常)	不低于 0.25 次/h, 折合 6.94E-05 次/s
		——	500 (维修期间人员进入)	不低于 2 次/h, 折合 5.56E-04 次/s
单间治疗室治疗区	162	600	800	不低于 4 次/h, 折合 1.11E-03 次/s
单间治疗室机架区	1268	4000	5200	不低于 4 次/h, 折合 1.11E-03 次/s
单间治疗室治疗区+机架区	1430	4600	6000	不低于 4 次/h, 折合 1.11E-03 次/s

### (二) 计算结果

利用公式 3.3.1.3-1 可计算得出考虑通风的情况下, 质子治疗机房内感生放射性气体的动态饱和浓度。具体结果如下表所示。

表 3.3.1.3-5 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度计算结果

核素	动态饱和浓度, Bq/m <sup>3</sup>	
	回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）	各治疗室
<sup>11</sup> C	9.66E+03	8.99E+00
<sup>13</sup> N	9.55E+03	2.13E+01
<sup>15</sup> O	8.27E+03	1.60E+01
<sup>41</sup> Ar	1.49E+03	1.23E+00

### 3.3.1.3.1.3 排入环境的空气感生放射性核素量

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”，质子放射治疗系统运行期间和停机通风期间向周围环境排放的感生放射性气体总活度可由下式计算。

$$Q_t = \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} (1 - e^{-(\lambda+r_1)t}) R_t dt = \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t \int_0^t (1 - e^{-(\lambda+r_1)t}) dt = \\ \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t \left( t - \frac{1}{\lambda+r_1} + \frac{e^{-(\lambda+r_1)t}}{\lambda+r_1} \right) \quad (\text{式 3.3.1.3-2})$$

$$Q_{t_c} = \int_0^{t_c} C_{t_c} R_{t_c} dt = \int_0^{t_c} C_t e^{-(\lambda+r_2)t_c} R_{t_c} dt = C_t R_{t_c} \int_0^{t_c} e^{-(\lambda+r_2)t_c} dt \\ = C_t R_{t_c} \frac{1 - e^{-(\lambda+r_2)t_c}}{\lambda + r_2} \quad (\text{式 3.3.1.3-3})$$

式中， $Q_t$  和  $Q_{t_c}$  分别为质子放射治疗系统运行  $t$  时间和停机排放  $t_c$  时间向周围环境排放的感生放射性气体的总活度，Bq；回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）在治疗时间内一直保持低风速排风，每年运行通风时间取 2916.67h，各治疗室每年运行通风时间取 729.17h，本项目治疗时间 10 小时/天，则各治疗室每年停机通风时间保守取 1770.83h。

$R_t$  和  $R_{t_c}$  分别为质子放射治疗系统正常运行和停机通风状态下的通风速率，cm<sup>3</sup>/s；

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

表 3.3.1.3-6 质子放射治疗系统运行和停机期间每年排入环境的感生放射性气体总量和排放速率

场所	核素	年排放量, Bq	年平均排放速率, Bq/s
回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）	<sup>11</sup> C	1.26E+10	1.20E+03
	<sup>13</sup> N	1.31E+10	1.25E+03
	<sup>15</sup> O	1.19E+10	1.13E+03
	<sup>41</sup> Ar	1.32E+09	1.25E+02
	总计	3.89E+10	3.71E+03
各治疗室	<sup>11</sup> C	3.51E+07	1.34E+01

	<sup>13</sup> N	8.78E+07	3.35E+01
	<sup>15</sup> O	6.91E+07	2.63E+01
	<sup>41</sup> Ar	3.28E+06	1.25E+00
	总计	1.95E+08	7.44E+01
回旋加速器 机房（含能 量选择隧道 和束流传输 隧道）+4 间 治疗室	<sup>11</sup> C	1.27E+10	1.25E+03
	<sup>13</sup> N	3.51E+08	1.39E+03
	<sup>15</sup> O	2.76E+08	1.24E+03
	<sup>41</sup> Ar	1.31E+07	1.30E+02
	总计	1.33E+10	4.00E+03

### 3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

冷却水中的感生放射性核素是加速器运行过程中放射性废液的主要来源，加速器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。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯），高能中子与冷却水中的<sup>16</sup>O发生散裂反应，主要产生<sup>3</sup>H、<sup>7</sup>Be、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O等放射性核素，各放射性核素的参数见下表。其中，<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O的半衰期很短，装置停机后，这些核素将迅速衰变，浓度也会很快降低。因此，冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的<sup>3</sup>H和<sup>7</sup>Be。

表 3.3.1.3-7 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

核素	半衰期 T <sub>1/2</sub>	衰变常数, s <sup>-1</sup>	生成核反应	反应截面, mb
<sup>3</sup> H	12.3a	1.78E-09	(n, sp)	33
<sup>7</sup> Be	53.1d	1.51E-07	(n, sp)	9.3
<sup>11</sup> C	20.4min	5.67E-04	(n, sp)	10
<sup>13</sup> N	9.97min	1.16E-03	(n, sp)	5
<sup>15</sup> O	2.04min	5.67E-03	(n, sp)	28

注：反应截面数据取自 IAEA 技术报告系列 NO.283 号报告。

本项目质子治疗系统共有三套相互独立的冷却水系统：1号系统为回旋加速器主盘管冷却环路（1.45m<sup>3</sup>），2号系统为真空泵冷却环路（0.73m<sup>3</sup>），3号系统为能量选择器和束流输运线冷却环路（3.5m<sup>3</sup>），单次检修排放的冷却水总量约 5.68 m<sup>3</sup>。

本报告利用 FLUKA 程序对回旋加速器冷却回路中的感生放射性进行了模拟计算，计算时使用的参数如下：

- (1) 质子束损能量为 230MeV，连续运行时间为 6000h；
- (2) 计算模型如下图所示，其中束流管道厚 0.4cm，长 10cm；磁铁厚 15cm，长 10cm；冷却水厚 3cm，长 10cm。

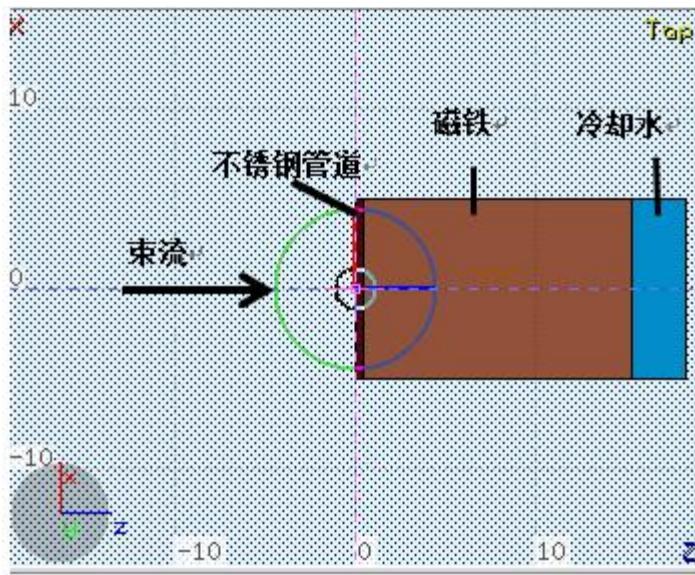


图 3.3.1.3-1 冷却水活化计算模型示意图

计算结果列于下表。

表 3.3.1.3-8 冷却水感生放射性计算结果

核素	饱和活度, Bq	饱和浓度, Bq/L	单次排放限值 1 ALI <sub>min</sub> , Bq	豁免活度, Bq
<sup>3</sup> H	6.83E+08	1.20E+05	1.11E+09	1E+09
<sup>7</sup> Be	1.92E+08	3.38E+04	3.85E+08	1E+07
总计	8.75E+08	1.54E+05	—	—

由上表可知，本项目质子放射治疗系统活化冷却水中 <sup>3</sup>H、<sup>7</sup>Be 的饱和活度分别为 6.83E+08Bq、1.92E+08Bq，<sup>3</sup>H、<sup>7</sup>Be 的饱和浓度分别为 1.20E+05Bq/L、3.38E+04Bq/L，均低于其单次排放限值 1 ALI<sub>min</sub> 和豁免活度。

### 3.3.1.3.3 结构部件的感生放射性

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

根据质子放射治疗系统的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序，计算了质子放射治疗系统连续运行 3000h，停机 4 小时后，主要束流损失部位的感生放射性饱和活度。

各主要束流损失结构部件感生放射性饱和活度的计算结果列于下表。由计算结果可

知, 停机后感生放射性主要来自  $^{48}\text{V}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Co}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$  等半衰期在月级别的中长寿命放射性核素。

表 3.3.13-9 回旋加速器(铁)的感生放射性计算结果

介质	材料	活化核素	半衰期	连续运行 100 天停机 4h 后活度 (Bq)	豁免活度 (Bq)
加速器磁铁	Fe	$^3\text{H}$	12.32y	1.74E+07	1E+09
		$^7\text{Be}$	53.22d	8.43E+06	1E+07
		$^{33}\text{P}$	25.35d	4.80E+05	1E+08
		$^{32}\text{P}$	14.268d	3.65E+05	1E+05
		$^{35}\text{S}$	0.78s	5.99E+05	1E+08
		$^{37}\text{Ar}$	35.011d	4.26E+06	1E+08
		$^{42}\text{K}$	12.355h	1.31E+07	1E+09
		$^{43}\text{K}$	2203h	5.60E+06	1E+06
		$^{45}\text{Ca}$	162.61d	1.30E+07	1E+07
		$^{47}\text{Ca}$	4.536d	5.02E+05	1E+06
		$^{46}\text{Sc}$	83.74d	1.86E+08	1E+06
		$^{47}\text{Sc}$	3.3492d	1.65E+08	1E+06
		$^{44}\text{Sc}$	3.97h	1.14E+08	/
		$^{48}\text{Sc}$	43.71h	5.43E+07	1E+05
		$^{43}\text{Sc}$	3.89h	1.76E+07	/
		$^{49}\text{Sc}$	0.956h	3.06E+05	/
		$^{45}\text{Ti}$	3.08h	7.53E+07	/
		$^{48}\text{V}$	15.974d	2.00E+09	1E+05
		$^{49}\text{V}$	330d	1.01E+09	/
		$^{47}\text{V}$	0.543h	1.35E+06	/
		$^{51}\text{Cr}$	27.704d	1.31E+10	1E+07
		$^{48}\text{Cr}$	21.56h	4.39E+07	/
		$^{49}\text{Cr}$	42.3min	1.92E+07	/
		$^{54}\text{Mn}$	321.20d	1.02E+10	1E+06
		$^{56}\text{Mn}$	2.5789h	6.67E+09	1E+05
		$^{52}\text{Mn}$	5.591d	2.86E+09	1E+05
		$^{51}\text{Mn}$	0.770h	3.09E+07	1E+05
		$^{55}\text{Fe}$	2.744y	1.24E+10	1E+06
		$^{59}\text{Fe}$	44.490d	3.43E+09	1E+06
		$^{52}\text{Fe}$	8.275h	1.91E+08	1E+06
		$^{56}\text{Co}$	77.236d	4.68E+08	1E+05
		$^{55}\text{Co}$	17.53h	2.58E+07	1E+06
		$^{57}\text{Co}$	271.74d	4.80E+06	1E+06
		$^{58}\text{Co}$	70.86d	2.00E+06	1E+06

介质	材料	活化核素	半衰期	连续运行 100 天停机 4h 后活度 (Bq)	豁免活度 (Bq)
注：豁免活度引自《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》GBZ 18871-2002 的表 A.1，“/”表示 GB 18871-2002 中无相关数值。半衰期引自 GBZ 18871-2002 的表 B.3，下表同理。					

表 3.3.1.3-10 束流闸 (Ni) 的感生放射性计算结果

介质	材料	活化核素	半衰期	连续运行 100 天停机 4h 后活度 (Bq)	豁免活度 (Bq)
束流闸	Ni	<sup>3</sup> H	12.3a	2.17E+07	1E+09
		<sup>7</sup> Be	53.3d	6.33E+07	1E+07
		<sup>37</sup> Ar	35.011d	1.72E+07	1E+08
		<sup>42</sup> K	1.4h	8.58E+06	1E+06
		<sup>43</sup> K	22.6h	2.00E+06	1E+06
		<sup>45</sup> Ca	163d	4.64E+06	1E+07
		<sup>44</sup> Sc	3.93h	1.97E+08	/
		<sup>46</sup> Sc	83.8h	8.85E+07	1E+06
		<sup>43</sup> Sc	3.89h	5.21E+07	/
		<sup>47</sup> Sc	3.35d	4.25E+07	1E+06
		<sup>48</sup> Sc	1.82d	9.67E+06	1E+05
		<sup>45</sup> Ti	3.08h	1.82E+08	/
		<sup>48</sup> V	16.2d	2.77E+09	1E+05
		<sup>49</sup> V	330d	8.51E+08	/
		<sup>47</sup> V	0.543h	3.70E+06	/
		<sup>51</sup> Cr	27.7d	7.82E+09	1E+07
		<sup>48</sup> Cr	23.0h	1.68E+08	/
		<sup>49</sup> Cr	0.702h	3.46E+07	/
		<sup>52</sup> Mn	5.59d	3.19E+09	1E+05
		<sup>54</sup> Mn	312d	1.23E+09	1E+06
		<sup>51</sup> Mn	0.770h	7.31E+07	1E+05
		<sup>56</sup> Mn	2.58h	5.96E+07	1E+05
		<sup>55</sup> Fe	2.70a	1.95E+09	1E+06
		<sup>52</sup> Fe	8.28h	6.40E+08	1E+06
		<sup>59</sup> Fe	44.5d	4.26E+07	1E+06
		<sup>58</sup> Co	70.8d	1.58E+10	1E+06
		<sup>56</sup> Co	78.7d	1.50E+10	1E+05
		<sup>57</sup> Co	271d	1.12E+10	1E+06
		<sup>55</sup> Co	17.5h	4.91E+09	1E+06
		<sup>61</sup> Co	1.65h	8.73E+07	1E+06
		<sup>60</sup> Co	5.27a	4.83E+07	1E+05
		<sup>57</sup> Ni	1.50d	1.41E+10	/
		<sup>56</sup> Ni	6.10d	2.18E+09	/
		<sup>65</sup> Ni	96.0a	1.91E+06	1E+06

介质	材料	活化核素	半衰期	连续运行 100 天停机 4h 后活度 (Bq)	豁免活度 (Bq)
		<sup>61</sup> Cu	3.41h	9.54E+07	/
		<sup>64</sup> Cu	12.7h	2.60E+07	1E+06

表 3.3.13-11 束流管(不锈钢)的感生放射性核素

介质	材料	活化核素	半衰期	连续运行 100 天停机 4h 后活度 (Bq)	豁免活度 (Bq)
束流管	不锈钢	<sup>3</sup> H	12.3a	2.95E+04	1E+09
		<sup>7</sup> Be	53.3d	4.98E+04	1E+07
		<sup>28</sup> Mg	20.9h	9.28E+01	/
		<sup>28</sup> Al	/	9.29E+01	/
		<sup>31</sup> Si	2.62h	7.61E+02	1E+06
		<sup>32</sup> P	14.3d	1.43E+04	1E+05
		<sup>33</sup> P	25.4d	7.33E+03	1E+08
		<sup>35</sup> S	87.4d	1.20E+04	1E+08
		<sup>38</sup> Cl	0.620h	1.33E+02	1E+05
		<sup>39</sup> Cl	0.927h	1.15E+02	/
		<sup>37</sup> Ar	/	8.99E+04	1E+08
		<sup>41</sup> Ar	/	1.63E+03	1E+09
		<sup>39</sup> Ar	/	1.03E+02	/
		<sup>42</sup> K	12.4h	8.42E+04	1E+06
		<sup>43</sup> K	22.6h	2.89E+04	1E+06
		<sup>45</sup> Ca	163d	4.50E+04	1E+07
		<sup>47</sup> Ca	4.53d	1.55E+03	1E+06
		<sup>44</sup> Sc	3.93h	8.83E+05	/
		<sup>46</sup> Sc	83.8d	5.72E+05	1E+06
		<sup>47</sup> Sc	3.35d	3.56E+05	1E+06
		<sup>43</sup> Sc	3.89h	1.94E+05	/
		<sup>48</sup> Sc	1.82d	7.55E+04	1E+05
		<sup>49</sup> Sc	0.956h	3.50E+02	/
		<sup>45</sup> Ti	3.08h	5.68E+05	/
		<sup>44</sup> Ti	47.3a	1.18E+03	/
		<sup>48</sup> V	16.2d	6.84E+06	1E+05
		<sup>49</sup> V	330d	2.17E+06	/
		<sup>47</sup> V	0.543h	8.26E+03	/
		<sup>51</sup> Cr	27.7d	1.57E+07	1E+07
		<sup>48</sup> Cr	23.0h	2.53E+05	/
		<sup>49</sup> Cr	0.702h	6.24E+04	/
		<sup>52</sup> Mn	5.59h	3.39E+06	1E+05
		<sup>54</sup> Mn	312d	2.09E+06	1E+06

介质	材料	活化核素	半衰期	连续运行 100 天停机 4h 后活度 (Bq)	豁免活度 (Bq)
		<sup>56</sup> Mn	2.58h	1.52E+05	1E+05
		<sup>51</sup> Mn	0.770h	6.90E+04	1E+05
		<sup>55</sup> Fe	2.70a	1.58E+06	1E+06
		<sup>52</sup> Fe	8.28h	3.90E+05	1E+06
		<sup>59</sup> Fe	44.5d	3.50E+03	1E+06
		<sup>56</sup> Co	87.7d	1.97E+06	1E+05
		<sup>55</sup> Co	17.5h	8.14E+05	1E+06
		<sup>57</sup> Co	271d	6.33E+05	1E+06
		<sup>58</sup> Co	70.8d	4.14E+05	1E+06
		<sup>61</sup> Co	1.65h	4.90E+03	1E+06
		<sup>60</sup> Co	5.27a	1.53E+03	1E+05
		<sup>57</sup> Ni	1.50d	9.54E+05	/
		<sup>56</sup> Ni	6.10d	1.55E+05	/
		<sup>65</sup> Ni	2.52h	1.97E+02	1E+08
		<sup>63</sup> Ni	96.0a	8.75E+01	1E+08
		<sup>61</sup> Cu	3.41h	5.62E+03	/
		<sup>64</sup> Cu	12.7h	1.56E+03	1E+06

### 3.3.1.3.4 土壤和地下水的感生放射性

根据后文“5.2 正常运行下的环境影响”，质子放射治疗系统运行时，地坪外表面与土层接触的边界处最大剂量率为  $3.333\mu\text{Sv/h}$  远小于  $5000\mu\text{Sv/h}$ ，本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

### 3.3.1.3.5 治疗室内患者的感生放射性

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

### 3.3.1.3.5.1 计算条件

治疗室内患者感生放射性的计算条件如下：

- (1) 能量：230MeV，束流：0.47nA，连续照射 5min。
- (2) 人体组织等效靶的组成成分采用文献《Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling》(Pacific Northwest National Laboratory, 2011) 中推荐的 ICRP 标准软组织成分，列于下表。

表 3.3.1.3-12 人体组织等效靶的组成成分

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

### 3.3.1.3.5.2 单次治疗后治疗室内剩余剂量率

结合实际治疗情况，以最保守的治疗条件 230MeV/0.47nA 的束流连续治疗 5min，假设患者不移动，采用 FLUKA 程序计算了停机 1min、2min、5min、10min 时刻治疗室内剩余剂量率分布。计算结果列于下表。

表 3.3.1.3-13 患者感生放射性剂量率随停机时间的变化,  $\mu\text{Sv/h}$

停机时间段	距靶(患者) 50cm 处	距靶(患者) 100cm 处
1min	3.66E+01	9.90E+00
2min	2.67E+01	7.23E+00
5min	1.20E+01	3.24E+00
10min	4.95E+00	1.34E+00

由计算结果可知，以 230MeV/0.47nA 连续治疗 5min，治疗结束 1min 后，若患者不移动，治疗室内距患者 50cm 处的剂量率最高可达  $36.6\mu\text{Sv/h}$ ，距患者 100cm 处的剂量率最高可达  $9.9\mu\text{Sv/h}$ ；停机 10min 后，距患者 50cm 处剂量率降至  $4.95\mu\text{Sv/h}$ ，距患者 100cm 处剂量率降至  $1.34\mu\text{Sv/h}$ 。

### 3.3.1.3.6 模体的感生放射性

本项目涉及模体主要有两种，第一种模体是人体仿真模体，计划验证中利用治疗计

划方案中规定的设备运行参数对装置进行人体仿真模体(一般为等效水模体)模拟治疗。由于一次治疗计划验证的过程与一次正式的治疗过程基本一致,且计划验证采用的人体仿真模体与患者组成配比相似,故人体仿真模体的感生放射性参考“3.3.1.3.5 治疗室内患者的感生放射性”。

第二种模体是 QA (质量保证) 期间,每日利用模体(一般为三维水箱)对质子放疗治疗系统进行剂量学部分的检测。三维水箱容积约为  $0.1\text{m}^3$ , 内部为去离子水。三维水箱内部的去离子水和外部箱体在与粒子直接的相互作用下会产生感生放射性,主要产生 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{13}\text{N}$ 、 ${}^{15}\text{O}$  等放射性核素,各放射性核素的参数见表 3.3.1.3-7。 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{13}\text{N}$ 、 ${}^{15}\text{O}$  的半衰期很短,装置停机后,这些核素将迅速衰变,浓度也会很快降低,因此感生放射性主要考虑半衰期较长的 ${}^3\text{H}$  和  ${}^7\text{Be}$ 。本项目利用 FLUKA 程序计算了三维水箱内部的去离子水和外部箱体的感生放射性,计算时所用参数如下:

- (1) 束流参数: 能量为  $230\text{MeV}$ , 束流损失为  $0.47\text{nA}$ ;
- (2) 水箱尺寸和材质: 尺寸为  $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 400\text{mm}$ , 箱体内部为去离子水, 外部材料为 PMMA (有机玻璃)。
- (3) 保守取水箱在年检质控期间连续照射的时间为  $6\text{h}$ 。

三维水箱经质子放疗治疗系统连续照射  $6\text{h}$  后, 箱体和内部活化水中各核素感生放射性活度列于表 3.3.1.3-14 和表 3.3.1.3-15, 箱体不同距离处剂量率随时间的变化结果列于表 3.3.1.3-16。

表 3.3.1.3-14 去离子水感生放射性计算结果 (1)

核素	饱和活度, $\text{Bq}$				单次排放限值 $1\text{ALI}_{\min}$ , $\text{Bq}$	豁免活度, $\text{Bq}$
	停机 1min	停机 5min	停机 10min 后	停机 30min		
${}^3\text{H}$	4.28E+01	4.28E+01	4.28E+01	4.28E+01	1.11E+09	1E+09
${}^7\text{Be}$	8.97E+02	8.97E+02	8.96E+02	8.96E+02	3.85E+08	1E+07
总计	9.40E+02	9.40E+02	9.39E+02	9.39E+02	—	—

表 3.3.1.3-14 去离子水感生放射性计算结果 (2)

核素	饱和浓度, $\text{Bq/L}$			
	停机 1min	停机 5min	停机 10min 后	停机 30min
${}^3\text{H}$	4.28E-01	4.28E-01	4.28E-01	4.28E-01
${}^7\text{Be}$	8.97E+00	8.97E+00	8.96E+00	8.96E+00
总计	9.40E+00	9.40E+00	9.39E+00	9.39E+00

由上表可知,停机 10min 后,三维水箱中活化水 ${}^3\text{H}$  和  ${}^7\text{Be}$  的感生放射性活度基本

维持在  $9.39E+02$ Bq。三维水箱容积约为  $0.1m^3$ , 由此可计算得出三维水箱活化水的感生放射性浓度约为  $9.39E+00$ Bq/L, 远低于其单次排放限值  $1 ALI_{min}$  和豁免活度。

表 3.3.1.3-15 箱体感生放射性计算结果

核素	饱和活度, Bq				豁免活度, Bq
	停机 1min	停机 5min	停机 10min 后	停机 30min	
$^{3}H$	$4.30E+01$	$4.30E+01$	$4.30E+01$	$4.30E+01$	$1E+09$
$^{7}Be$	$8.95E+02$	$8.95E+02$	$8.95E+02$	$8.95E+02$	$1E+07$
总计	$9.38E+02$	$9.38E+02$	$9.38E+02$	$9.38E+02$	—

由上表可知, 三维水箱箱体的感生放射性活度仅为  $9.38E+02$ Bq, 核素活度远低于其豁免活度。

表 3.3.1.3-16 连续照射 6h 后三维水箱不同距离处剂量率随时间的变化,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$

停机时间	距水箱 50cm 处	距水箱 100cm 处
1min	85	26.4
5min	46.9	12.1
10min	28.3	7.4
30min	12.7	3.3

由上表可知, 连续照射 6h 后水箱表面剂量率水平较高, 停机 30min 后, 水箱表面剂量率大幅度降低。

本次模拟选取水箱在年检质控期间连续照射的时间为 6h, 而实际 QA 期间三维水箱受到束流连续照射的时间远低于 6h, 三维水箱表面剂量率及水箱内活化水感生放射性浓度也会远低于上述所列表格的相关数值。

综上所述, 水箱内活化水不作为放射性废液管理, 且在 QA 完成后, 辐射工作人员有必要利用辐射监测仪测得水箱表面 30cm 处剂量率不高于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 再进入治疗室开展后续工作。

### 3.3.1.4 臭氧等有害气体

#### 3.3.1.4.1 计算公式

在光子作用下, 空气中的氧气可吸收辐射能量, 发生辐射分解, 生成氧原子, 氧原子与空气中的  $O_2$  结合生成  $O_3$ ,  $O_3$  再与空气中的 NO 结合生成  $NO_2$ 。根据 NCRP NO.144 报告, 场所内的  $O_3$  和  $NO_2$  饱和浓度可利用下式计算。

$$N_{sat} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + R} \quad (\text{式 3.3.1.4-1})$$

$$C = N \frac{M}{N_A} \quad (\text{式 3.3.1.4-2})$$

式中，

$C$  为场所内  $O_3$  和  $NO_2$  饱和浓度,  $g/m^3$ ;

$N$  为房间内单位体积的气体分子个数,  $\text{个}/m^3$ ;

$g$  为空气中单位光子能量沉积形成的气体分子数,  $eV^{-1}$ ;

$\alpha$  为气体分子的化学分解速率,  $s^{-1}$ ;

$\kappa$  为单位光子能量沉积形成的分子数目,  $eV^{-1} \cdot m^3$ ;

$R$  为房间换气次数,  $s^{-1}$ ;

$M$  为气体的摩尔质量,  $g/mol$ ;

$N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $6.022 \times 10^{23} mol^{-1}$ ;

$I$  为空空气中单位体积单位时间的光子能量沉积,  $eV/m^3 \cdot s$ , 根据《辐射防护基础》(李星洪等, 原子能出版社) P39 页公式 (2.19),  $I$  可由下式计算:

$$I = 6.25 \times 10^{18} K \rho = 6.25 \times 10^{18} \varphi \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right) E \rho \quad (\text{式 3.3.1.4-3})$$

式中,

$K$  为光子在空气中的比释动能率,  $J/kg \cdot s$ ;

$\varphi$  为光子注量率,  $p/m^2 \cdot s$ ;

$\rho$  为空气的密度,  $kg/m^3$ ;

$\mu_{en}/\rho$  为光子在空气中的质能吸收系数,  $m^2/kg$ ;

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

### 3.3.1.4.2 各参数取值

各参数取值和来源列于下表。

表 3.3.1.4-1 计算参数取值

参数	取值	来源
$g$	$O_3: 0.103 eV^{-1}; NO_2: 0.048 eV^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P358
$\alpha$	$2.3 \times 10^{-4} s^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P359
$\kappa$	$5.0 \times 10^{-24} eV^{-1} \cdot m^3$	《Advanced Photon Source: Radiological Design Considerations》(APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July 1991)
$R$	回旋加速器机房: $6.94 \times 10^{-5} s^{-1}$ 治疗室: $1.11 \times 10^{-3} s^{-1}$	表 3.3.1.3-4
$M$	$M(O_3)=48 g/mol$ $M(NO_2)=46 g/mol$	—
$N_A$	$6.022 \times 10^{23} mol^{-1}$	—
$\varphi$	$7.96 \times 10^7 p/m^2 \cdot s$	采用距靶点 1m 处的光子注量率作为机房内平均光子注量率进行

		保守计算
$\rho$	1.29kg/m <sup>3</sup>	——
$\mu_{en}/\rho$	2.966E-03 m <sup>2</sup> /kg	《辐射防护基础》P45 页表 2-2, 保守取 0.05MeV 光子在空气中的质能吸收系数
E	10MeV=1.6×10 <sup>-12</sup> J	本报告“3.3.1.1.3.3 光子能谱”分析, 绝大部分光子能量分布于 1~10MV

### 3.3.1.4.3 计算结果

质子治疗机房内  $O_3$ 、 $NO_2$  的产生量和饱和浓度计算结果列于下表。

表 3.3.1.4-2 质子治疗机房内  $O_3$  和  $NO_2$  饱和浓度

场所名称	分子数产生量, m <sup>-3</sup>		饱和浓度, mg/m <sup>3</sup>	
	$O_3$	$NO_2$	$O_3$	$NO_2$
回旋加速器机房 (含能量选择隧道 和束流传输隧道)	1.05E+15	4.88E+14	8.35E-05	3.73E-05
各治疗室	2.34E+14	1.09E+14	1.86E-05	8..33E-06

由计算结果可知, 质子治疗机房内  $O_3$  和  $NO_2$  饱和浓度远低于表 1.4.4-4 中所列工作场所  $O_3$  和  $NO_2$  的最大容许浓度限值。

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, 并未提到质子加速器臭氧对环境的影响问题。另参考《高等电离辐射防护教程》(夏益华, 哈尔滨工程大学出版社) P10 公式 2.17, 带电粒子辐射能量损失率即韧致辐射产生率与粒子质量的平方成反比, 故粒子质量越大, 其韧致辐射产生率越小。对质子放射治疗系统而言, 其辐射场主要为中子辐射, 光子产额很小, 且质子的质量比电子的质量高 3 个量级, 其韧致辐射产额也比电子加速器韧致辐射产额低的多。

综上所述, 从公式计算和文献资料两个方面综合考虑, 本项目质子放射治疗系统运行时所致  $O_3$  和  $NO_2$  的产生量和浓度均很小, 可以不考虑其作为环境污染因子。

### 3.3.1.5 X 射线管

质子治疗系统配套 X 射线管 (最大管电压 150kV, 最大管电流 800mA), 每间质子治疗室各安装 2 个 X 射线管。本项目使用 X 射线管期间, 主要的放射性污染是 X 射线, 仅在开机并处于出束状态时才会发出 X 射线。X 射线贯穿机房的屏蔽体进入外环境中, 将对工作人员和机房周围人员造成辐射影响。

此外, X 射线与空气作用会产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。

### 3.3.2 直线加速器

### (1) X 射线

直线加速器运行时，从电子枪发出来的电子束，在直线加速管内经加速电压加速，轰击到靶上，产生 X 射线用于治疗。本项目直线加速器 X 射线最大能量为 15MV。由于 X 射线贯穿能力强，将对周围环境造成一定的辐射污染，包含以下几种 X 射线辐射：

#### ①有用线束

当直线加速器光阑完全打开时，从辐射头靶射出的 X 射线为一个半角 14° 的锥形线束，其能量为 15MV。有用线束是唯一用于治疗目的的射线。

#### ②泄漏辐射

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

#### ③散射辐射

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

除此之外，直线加速器集成一台 CBCT，开机状态下会产生 X 射线。

### (2) 电子线

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，本项目直线加速器产生的电子线最高能量为 22MeV，高能电子线随机器的开关而产生和消失。

### (3) 中子

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

### (4) 感生放射性

当加速器能量在 10MV 以上时，会产生光核反应，从而产生感生放射性。它主要包括两个方面：①加速器结构材料等（主要为加速器靶）的感生放射性；②气态感生放射性核素。

### (5) 废靶

加速器正常运行时，无废靶产生。如果冷却水循环系统出现故障，可能造成靶体散

热不畅导致靶被打穿的情况，产生废靶。此外，加速器报废退役时，会有废靶产生。因此在直线加速器靶件损坏或报废退役时，会有活化废靶产生。

#### （6）臭氧和氮氧化物

加速器在运行过程中，X射线作用于空气以及次级辐射等因素，会产生少量臭氧及氮氧化物。

综上所述，本项目医用电子直线加速器运行时产生的污染因子主要为X射线、中子、电子线、感生放射性、少量臭氧和氮氧化物以及活化废靶。

### 3.3.3 后装机

#### （1） $\gamma$ 射线

$^{192}\text{Ir}$  放射源为密封源，其衰变类型为 $\gamma$ 衰变、 $\beta$ 衰变及电子俘获，衰变过程会发出 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线。其中 $\beta$ 射线穿透能力很弱，设备的外包装可以完全屏蔽，使 $\beta$ 射线不能释放到环境中； $\gamma$ 射线穿透能力较强，有可能对环境产生辐射影响。

#### （2）废源

$^{192}\text{Ir}$  的半衰期为 74 天，当其衰变至其活度不能满足放射治疗需要时，将更换放射源，从而产生废  $^{192}\text{Ir}$  放射源。医院预计约 120 天更换一次源，一年产生 3 枚废源。

#### （3）固体废物

后装机配套使用 UPS 电源，该 UPS 电源采用铅蓄电池供电。根据《国家危险废物名录》（2021 年版），废铅蓄电池属于危险废物（废物代码：900-052-31），其更换周期约 5 年/次，更换下的 UPS 电源交由有资质单位处置。

#### （4）臭氧和氮氧化物

后装机运行过程 $\gamma$ 射线与空气作用引起空气中氧分解生成自由基，产生臭氧和氮氧化物。

### 3.3.4 模拟定位 CT

#### （1）X射线

由 X 射线装置的工作原理可知，X 射线随机器的开、关而产生和消失。医院使用的 X 射线装置在非诊断状态下不产生射线，只有在开机并处于出束状态时才会发出 X 射线。因此，在开机期间，污染因子主要为 X 射线。

## (2) 臭氧和氮氧化物

本项目模拟定位 CT 运行时，X 射线作用于空气以及次级辐射等因素，会产生少量臭氧及氮氧化物。

## 3.4 小结

综上所述，本项目主要的辐射污染因子列于下表。

表 3.4-1 本项目主要的辐射污染因子

装置名称	主要辐射污染因子	产生情况	处理方式及去向
质子放射治疗系统	质子	最高能量 230MeV	机房屏蔽体防护
	中子	最高能量 230MeV	机房屏蔽体防护
	光子	最高能量 100MeV, 但对应光子数量很少，绝大部分光子分布在 1~10MeV	机房屏蔽体防护
	感生放射性气体	主要为 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 和 $^{41}\text{Ar}$ 等短半衰期核素	经机房通排风系统引至质子治疗中心屋顶排出
	活化冷却水	主要核素为 $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$	暂存于衰变池内，排放前取样监测，满足排放标准后排入医院污水管网。
	放射性固体废物	主要核素为 $^{48}\text{V}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Co}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ ，多数核素的饱和活度均低于其豁免活度	暂存于质子活化部件暂存间、质子放射性固废暂存间。待废物暂存量达到一定量，由医院委托有资质单位进行集中测量分析，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 A 中解控要求的（具体见本报告的表 1-11），不属于放射性废物，医院按一般固体废物处理或回收利用；不满足解控要求的，属于放射性废物，医院不能自行处理，需委托有资质单位处理。
	患者感生放射性	质子束照射人体产生，随停机时间的增加快速下降，停机 10min 后，患者体表 100cm 处剂量率低于 $1.34\mu\text{Sv}/\text{h}$	自然衰变，患者照射结束后，停机等待一定时间后再进入机房内工作。
	配备 X 射线管产生的 X 射线	最大管电压 150kV，最大管电流 800mA	机房屏蔽体防护

	配备 X 射线管产生的臭氧、氮氧化物	少量	经机房通排风系统引至质子治疗中心屋顶排出
直线加速器	X 射线及中子	最大能量 15MV	机房屏蔽体防护
	电子线	最大能量 22MeV	机房屏蔽体防护
	活化废靶	废加速器靶	满足解控标准，按一般废物处理，不满足解控标准的委托有资质单位处理。
	气态感生放射性	主要核素为 $^{41}\text{Ar}$	机房通风系统排入环境
后装机	废源	初始活度 $5.55\text{E}+11\text{Bq}$ ( $15\text{Ci}$ )	由源供应单位回收，购源前签订废旧源回收协议
模拟定位 CT	X 射线	最大管电压 140kV，最大管电流 1250mA	机房屏蔽体防护

## 4 辐射安全与防护设施

### 4.1 质子放射治疗系统

#### 4.1.1 场所布局与屏蔽

##### 4.1.1.1 场所布局

###### 4.1.1.1.1 辐射工作场所分区

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

**控制区：**在正常工作情况下控制正常照射或防止污染扩散，以及在一定程度上预防或限制潜在照射，要求或可能要求专门防护手段和安全措施的限定区域。在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平指示。运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可证）和实体屏蔽（包括门锁和门-机联锁装置）限制进出控制区，并定期审查控制区的实际状况，确认是否需要改变该区的防护手段或安全措施，或是更改该区的边界。

**监督区：**未被确定为控制区，正常情况下不需要采取专门防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。在监督区入口处的合适位置设立表明监督区的标牌；并定期审查该区的条件，确认是否需要采取防护措施和做出安全规定，或是否需要更改监督区的边界。

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

##### （1）控制区

负一层：回旋加速器机房上空、4间质子治疗室上空；

负二层：回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）、4间治疗室、质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间；

负三层：回旋加速器基坑、4间机架室支座基坑和拽线室、2间衰变池机房。

##### （2）监督区

负一层：水冷机房、质子设备电源间、配电间、UPS 间、超纯水机房、补水机房；

负二层：维护室、主控室、4间治疗控制室、5间缓冲间、QC 质控间、服务器机房、

治疗计划室、模具兼男更室、模具兼女更室、VIP 等候室、模具间、麻醉兼抢救室、病人恢复室、配电间、后区；

负三层：高压细水雾机房、2 间污水提升间、送风机房、弱电井、2 间预留库房、质子空调水泵房。

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

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

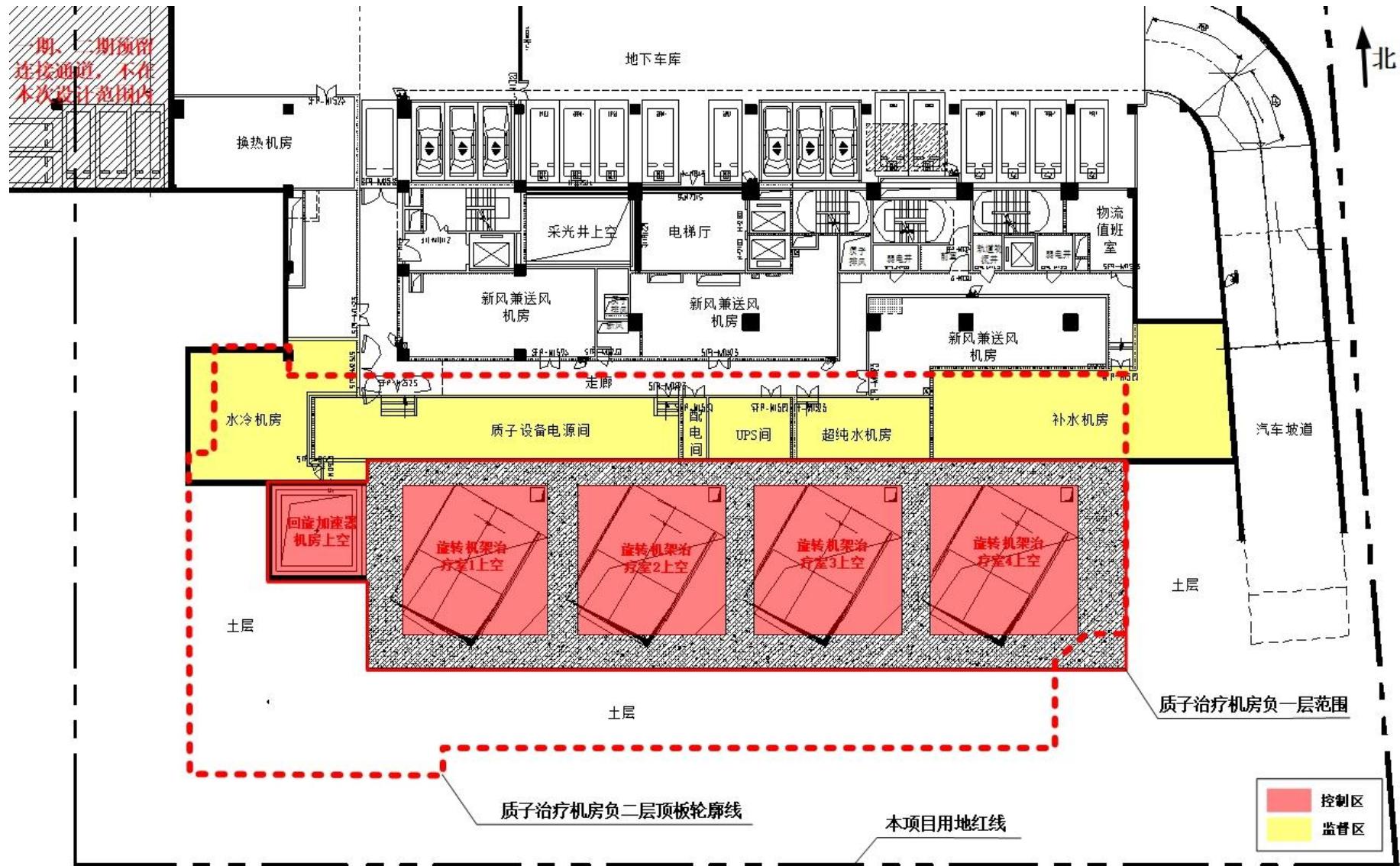
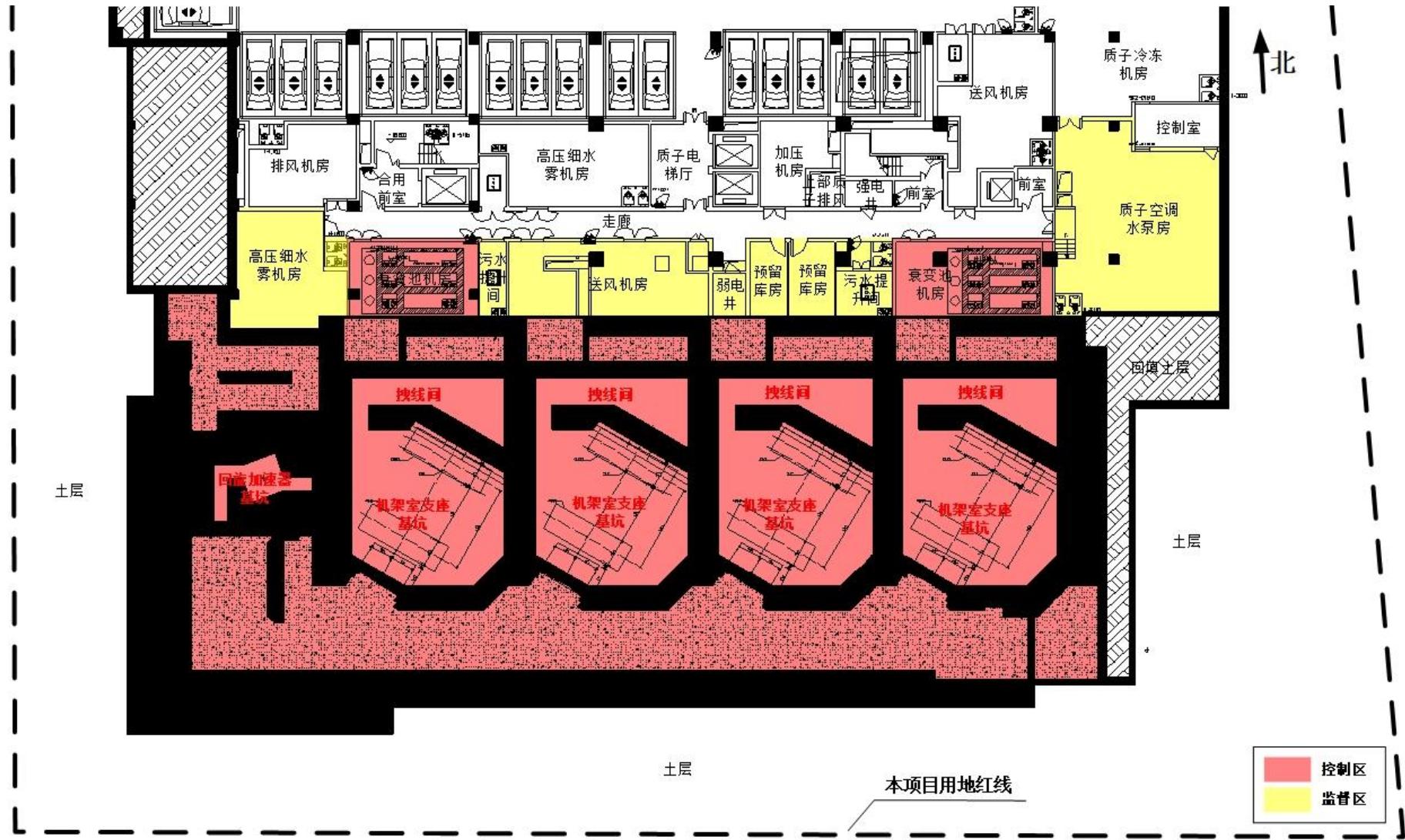


图 4.1.1.1-1 质子放射治疗系统负一层辐射工作场所分区图



图 4.1.1.1-2 质子放射治疗系统负二层辐射工作场所分区图



#### 4.1.1.1.2 布局合理性分析

本项目质子治疗机房及其配套用房拟在质子治疗中心地下层南侧单独设置，避开了人员密集区域。质子治疗机房为三层结构，负二层为治疗层。主控室和治疗控制室均设于负二层，与质子治疗机房分离。质子治疗机房负二层北侧均设有“L”形迷道，主射线方向不朝向迷道，各层迷道口采用聚乙烯防护门。

质子治疗中心负三层平面布局见图 4.1.1.1-3，主要布置回旋加速器基坑、4 间机架室支座基坑和拽线室以及高压细水雾机房、衰变池机房、污水提升间、送风机房、弱电井、预留库房、质子空调水泵房等配套用房。

质子治疗中心负二层平面布局见图 4.1.1.1-2，主要布置回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）、4 间治疗室（均为旋转治疗室）及主控室、治疗控制室、QC 质控间、服务器机房、质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间等配套用房。

质子治疗中心负一层平面布局见图 4.1.1.1-1，主要布置回旋加速器机房上空、4 间质子治疗室上空以及质子设备电源间、配电间、UPS 间、超纯水机房、补水机房等配套用房。

质子治疗机房下方为土层，质子治疗机房上方为负一层质子设备电源间、配电间、UPS 间、超纯水机房、补水机房及地面绿化。

紧邻质子治疗机房屏蔽墙体的区域中除主控室和治疗控制室外，无办公室等人员常居留场所。正常工况下，辐射工作人员于负二层治疗层开展工作，主要在治疗控制室内操作质子出束以及操作 X 射线管进行精确的位置验证。

本项目设置了相对独立的质子治疗区，并设置了物理隔离和相对独立的人流路线，与其他各医疗单元之间分隔明确，不会相互穿插和干扰，周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域或人员流动性大的商业活动区域。辐射工作场所的进出口处均设置门禁管理，防止无关人员进入，便于场所的防护管理与安全控制。整个质子治疗区域功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关要求，因此，该区域布局是合理的。

#### 4.1.1.2 辐射屏蔽

##### 4.1.1.2.1 设计标准

质子放射治疗系统工作场所辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

###### （1）年剂量约束值

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

## (2) 屏蔽体外剂量率控制水平

质子治疗机房屏蔽体外各关注点处的剂量率应不高于表 1.4.2-2 中给出的剂量率控制水平。

### 4.1.1.2.2 屏蔽设计

质子放射治疗系统机房辐射屏蔽设计如图 4.1.1.2-1 至~图 4.1.1.2-7 所示, 辐射屏蔽主材料均为普通混凝土(密度不低于  $2.35\text{g/cm}^3$ )。质子治疗机房辐射屏蔽设计及周围环境分布情况见下表。

表 4.1.1.2-1 质子放射治疗系统辐射工作场所屏蔽设计及周围环境情况

场所名称	楼层	位置	墙体屏蔽厚度和材料	周围环境	
回旋加速器机房中 加速器区、能量选 择隧道	负一层	东墙	2500mm 混凝土	治疗室 1 上空	
	负二层		1710mm~2750mm 混凝土	治疗室 1 及治疗控制室 1	
	负三层		1710mm~2750mm 混凝土	治疗室 1 旋转机架基坑和拽线间	
	负一层	南墙	350mm 混凝土	土层	
	负二层		混凝土块，南北长度 5170mm~6240mm，东西长度 535mm~1070mm	回旋加速器机房中束流传输隧道	
	负三层		从内到外：加速器基坑南墙 1045mm~4060mm 混凝土，混凝土块（同负二层），4500mm 混凝土，混凝土墙之间浇筑素混凝土。总体厚度合计为 14900~17915mm	土层	
	负一层	西墙	350mm 混凝土	土层	
	负二层		1100mm~4500mm 混凝土	土层	
	负三层		1100mm~6120mm 混凝土	土层	
	负一层	北墙	350mm 混凝土	水冷机房、质子设备电源间	
	负二层		迷道从内到外：1410mm/920mm/1230mm 混凝土	维护室、缓冲间、主控室	
	负三层		从内到外：加速器基坑北墙 1449mm~3220mm 混凝土，1410mm, 920mm, 1230mm 混凝土，混凝土墙之间浇筑素混凝土。总体厚度合计为 8669~12410mm	高压细水雾机房	
	负二层	门	入口门：普通门	缓冲间	
			迷道中部防护门：10cm 含硼聚乙烯	/	
	顶棚		吊装口上方：2460mm 混凝土预制板	隔不上人屋面为地面绿化	
			迷道上方：2680mm~2930mm 混凝土	水冷机房、质子设备电源间	
	地坪		加速器区下方：4170~6380mm 混凝土	土层	
			迷道下方：6330mm 混凝土		
回旋加速器机房中 束流传输隧道	负二层	东墙	自西向东：1220mm*1850mm 混凝土混凝土块、2440mm*3675mm 混凝土混凝土块、1220mm*1850mm 混凝土混凝土块	后区	

治疗室 1		南墙	2100mm~4500m 混凝土	土层
		西墙	4500mm 厚混凝土	土层
	北墙	混凝土块, 南北长度 5170mm~6240mm, 东西长度 535mm~1070mm		回旋加速器机房中加速器区、能量选择隧道
		1680mm 混凝土		治疗室 1-4
	负二层	门	普通门	后区
	顶棚		3690mm 混凝土+5500mm 覆土层	地面绿化
	地坪		5630~6380mm 混凝土	土层
	负一层	东墙	2150mm 混凝土	治疗室 2 上空
	负二层		1600mm~2150mm 混凝土	治疗室 2 及治疗控制室 2
	负三层		旋转机架基坑: 2150mm 混凝土	治疗室 2 旋转机架基坑
	拽线间: 2150mm 混凝土		治疗室 2 拽线间	
	负一层	南墙	2440mm 混凝土	土层
	负二层		1680mm 混凝土	回旋加速器机房中束流传输隧道
	负三层		旋转机架基坑从内到外: 750mm 混凝土~1680mm 混凝土, 2600mm 混凝土~4500mm 混凝土, 混凝土墙之间区域浇筑素混凝土	土层
	拽线间: 1500mm~1775mm 混凝土		治疗室 1 旋转机架基坑	
	负一层	西墙	2500mm 混凝土	回旋加速器机房上空
	负二层		1710mm~2750mm 混凝土	回旋加速器机房
	负三层		旋转机架基坑: 1710mm~2750mm 混凝土	回旋加速器基坑
	拽线间: 2260mm 混凝土		回旋加速器机房回填素混凝土	
	负一层	北墙	1900mm 混凝土	质子设备电源间
	负二层		迷道从内到外: 2000mm~2400mm 混凝土/1500mm 混凝土	治疗控制室 1、缓冲间、QC 质控间
	负三层		旋转机架基坑: 1500mm~1775mm 混凝土	治疗室 1 拽线间
	拽线间: 1110mm 混凝土+1680mm 素混凝土+1500mm 混凝土		衰变池间和污水提升间	

	负二层	门	普通门	缓冲间
	顶棚		吊装口上方: 2440mm 混凝土	隔不上人屋面为地面绿化
			迷道上方: 2150mm~2700mm 混凝土	质子设备电源间
			其余区域: 2440mm 混凝土+1490mm 覆土层	地面绿化
	地坪		2500mm 混凝土	土层
治疗室 2	负一层	东墙	2150mm 混凝土	治疗室 3 上空
	负二层		1600mm~2150mm 混凝土	治疗室 3 及治疗控制室 3
	负三层		旋转机架基坑: 2150mm 混凝土	治疗室 3 旋转机架基坑
			拽线间: 2150mm 混凝土	治疗室 3 拽线间
	负一层	南墙	2440mm 混凝土	土层
	负二层		1680mm 混凝土	回旋加速器机房中束流传输隧道
	负三层		旋转机架基坑从内到外: 750mm 混凝土~1680mm 混凝土, 2600mm 混凝土, 混凝土墙之间区域浇筑素混凝土	土层
			拽线间: 1500mm~1775mm 混凝土	治疗室 1 旋转机架基坑
	负一层	西墙	2150mm 混凝土	治疗室 1 上空
	负二层		1600mm~2150mm 混凝土	治疗室 1
	负三层		旋转机架基坑: 2150mm 混凝土	治疗室 1 旋转机架基坑
			拽线间: 2150mm 混凝土	治疗室 1 拽线间
	负一层	北墙	1900mm 混凝土	质子设备电源间和配电间
	负二层		迷道从内到外: 2000mm~2400mm 混凝土/1500mm 混凝土	治疗控制室 2、缓冲间、模具兼更衣室
	负三层		旋转机架基坑: 1500mm~1775mm 混凝土	治疗室 2 拽线间
			拽线间: 1110mm 混凝土+1680mm 素混凝土+1500mm 混凝土	送风机房
	负二层	门	普通门	缓冲间
	顶棚		吊装口上方: 2440mm 混凝土	隔不上人屋面为地面绿化
			迷道上方: 2150mm~2700mm 混凝土	质子设备电源间和配电间
			其余区域: 2440mm 混凝土+1490mm 覆土层	地面绿化

	地坪		2500mm 混凝土	土层
治疗室 3	负一层	东墙	2150mm 混凝土	治疗室 4 上空
			1600mm~2150mm 混凝土	治疗室 4 及治疗控制室 4
			旋转机架基坑: 2150mm 混凝土	治疗室 4 旋转机架基坑
			拽线间: 2150mm 混凝土	治疗室 4 拽线间
	负一层	南墙	2440mm 混凝土	土层
			1680mm 混凝土	回旋加速器机房中束流传输隧道
			旋转机架基坑从内到外: 750mm 混凝土~1680mm 混凝土, 2600mm 混凝土, 混凝土墙之间区域浇筑素混凝土	土层
			拽线间: 1500mm~1775mm 混凝土	治疗室 1 旋转机架基坑
	负一层	西墙	2150mm 混凝土	治疗室 2 上空
			1600mm~2150mm 混凝土	治疗室 2
			旋转机架基坑: 2150mm 混凝土	治疗室 2 旋转机架基坑
			拽线间: 2150mm 混凝土	治疗室 2 拽线间
	负一层	北墙	1900mm 混凝土	UPS 机房和超纯水机房
			迷道从内到外: 2000mm~2400mm 混凝土/1500mm 混凝土	治疗控制室 3、缓冲间、VIP 等候间、模 具间
			旋转机架基坑: 1500mm~1775mm 混凝土	治疗室 3 拽线间
			拽线间: 1110mm 混凝土+1680mm 素混凝土+1500mm 混凝土	预留库房、污水提升间
	负二层	门	普通门	缓冲间
	顶棚		吊装口上方: 2440mm 混凝土	隔不上人屋面为地面绿化
			迷道上方: 2150mm~2700mm 混凝土	UPS 机房和超纯水机房
			其余区域: 2440mm 混凝土+1490mm 覆土层	地面绿化
	地坪		2500mm 混凝土	土层
治疗室 4	负一层	东墙	3500mm 混凝土	土层
	负二层		2100mm~3500mm 混凝土	后区、配电间

	负三层		旋转机架基坑从内到外：3500mm 混凝土，500mm 混凝土，混凝土墙之间区域为覆土层	土层
			拽线间：2100mm~3500mm 混凝土，500mm 混凝土，混凝土墙之间区域为覆土层	土层
	负一层	南墙	2440mm 混凝土	土层
	负二层		1680mm 混凝土	回旋加速器机房中束流传输隧道
	负三层		旋转机架基坑从内到外：750mm 混凝土~2100mm 混凝土，520mm 混凝土-2100mm 混凝土，混凝土墙之间区域浇筑素混凝土	土层
			拽线间：1500mm~1775mm 混凝土	治疗室 1 旋转机架基坑
	负一层	西墙	2150mm 混凝土	治疗室 3 上空
	负二层		1600mm~2150mm 混凝土	治疗室 3
	负三层		旋转机架基坑从内到外：3500mm 混凝土，500mm 混凝土，混凝土墙之间区域为覆土层	治疗室 3 旋转机架基坑
			拽线间：2100mm~3500mm 混凝土，500mm 混凝土，混凝土墙之间区域为覆土层	治疗室 3 拽线间
	负一层	北墙	1900mm 混凝土	补水机房
	负二层		迷道从内到外：2000mm~2400mm 混凝土/1500mm 混凝土	治疗控制室 4、缓冲间、麻醉兼抢救室、术后恢复室
	负三层		旋转机架基坑：1500mm~1775mm 混凝土	治疗室 4 拽线间
			拽线间：1110mm 混凝土+1680mm 素混凝土+1500mm 混凝土	衰变池间和质子空调水泵房
	负二层	门	普通门	缓冲间
		顶棚	吊装口上方：2440mm 混凝土	隔不上人屋面为地面绿化
			迷道上方：2150mm~2700mm 混凝土	补水机房
			其余区域：2440mm 混凝土+1490mm 覆土层	地面绿化
	地坪		2500mm 混凝土	土层

注：混凝土密度不小于 2.35g/cm<sup>3</sup>。

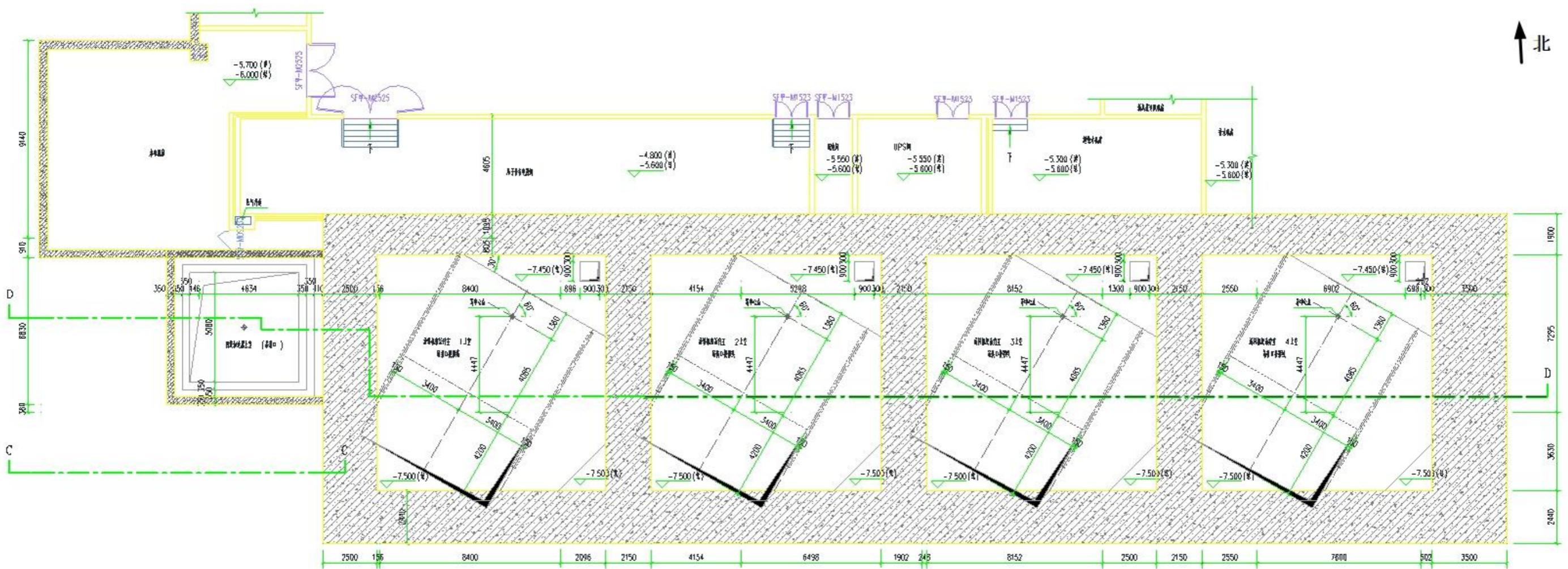


图 4.1.1.2-1 质子治疗机房辐射屏蔽设计示意图（负一层平面）

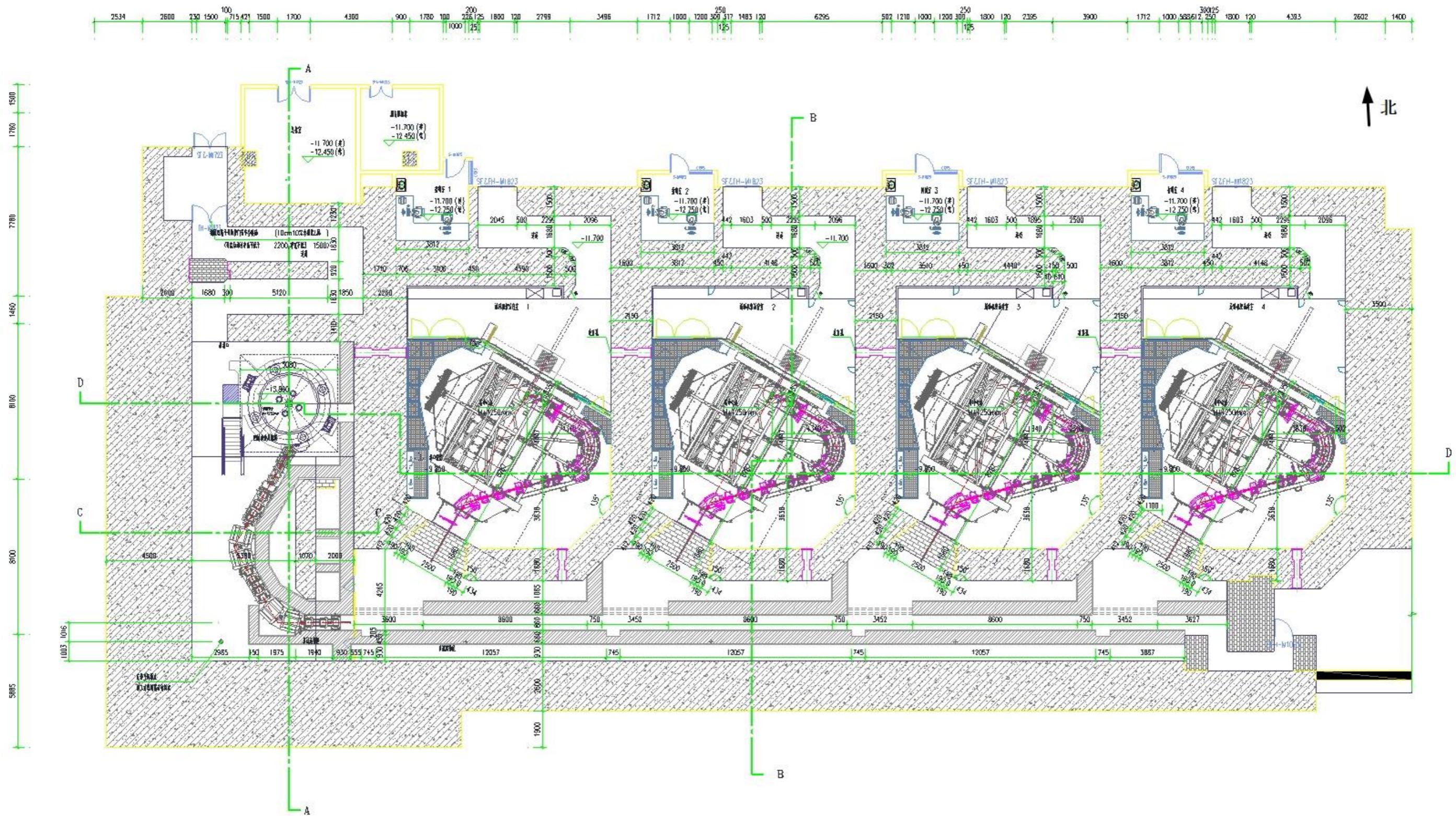


图 4.1.1.2-2 质子治疗机房辐射屏蔽设计示意图（负二层平面）

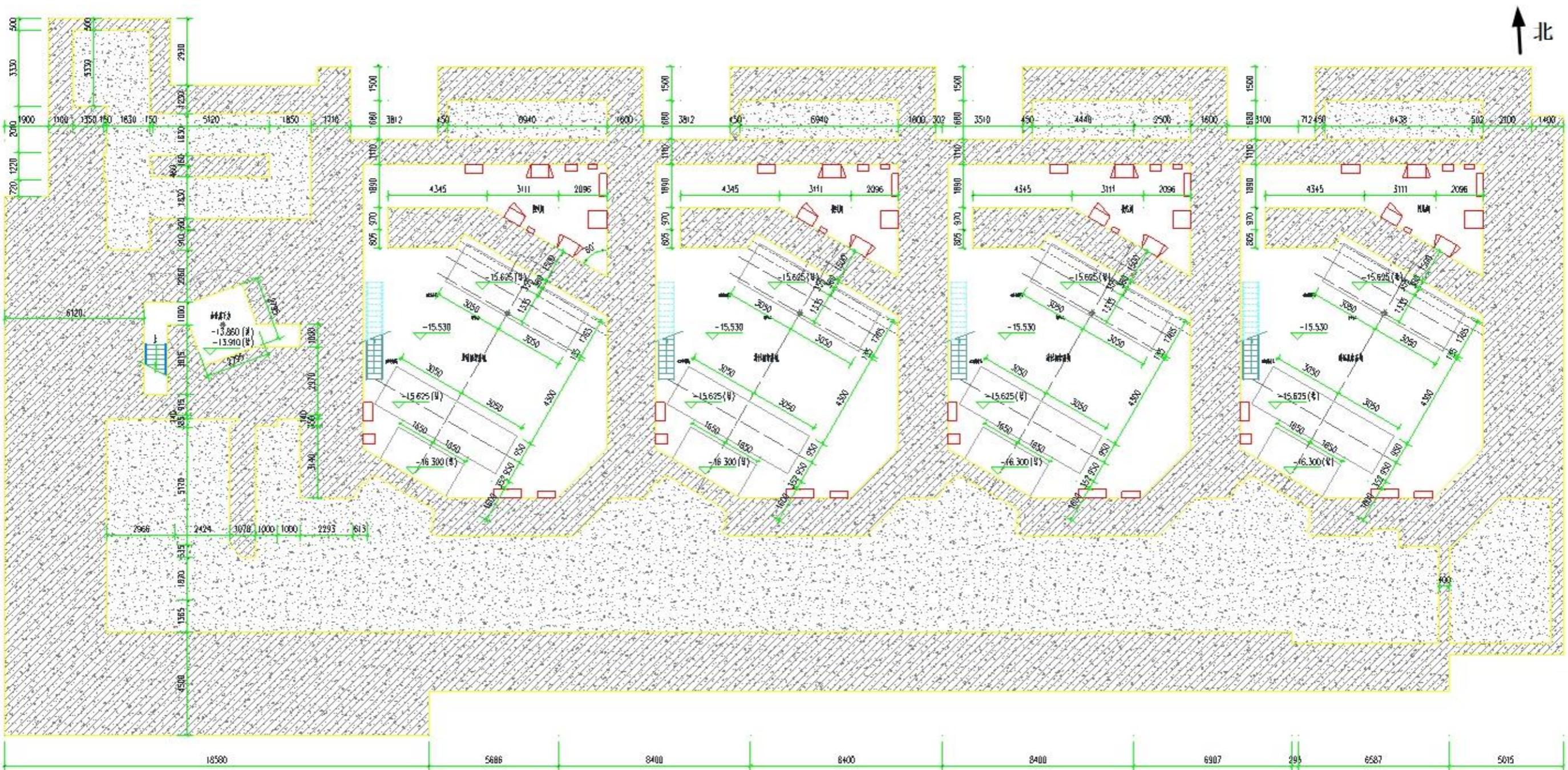


图 4.1.1.2-3 质子治疗机房辐射屏蔽设计示意图（负三层平面）

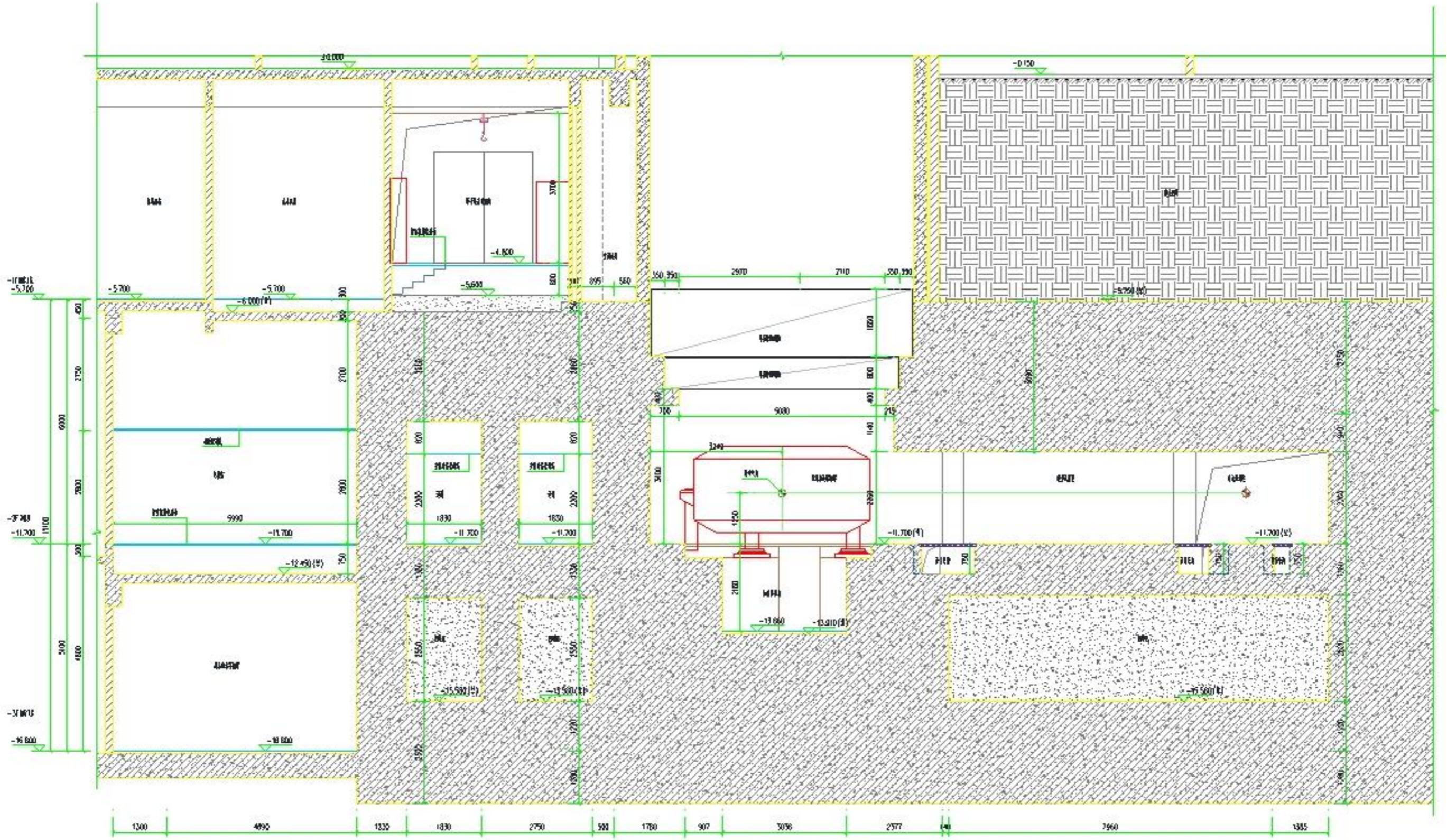
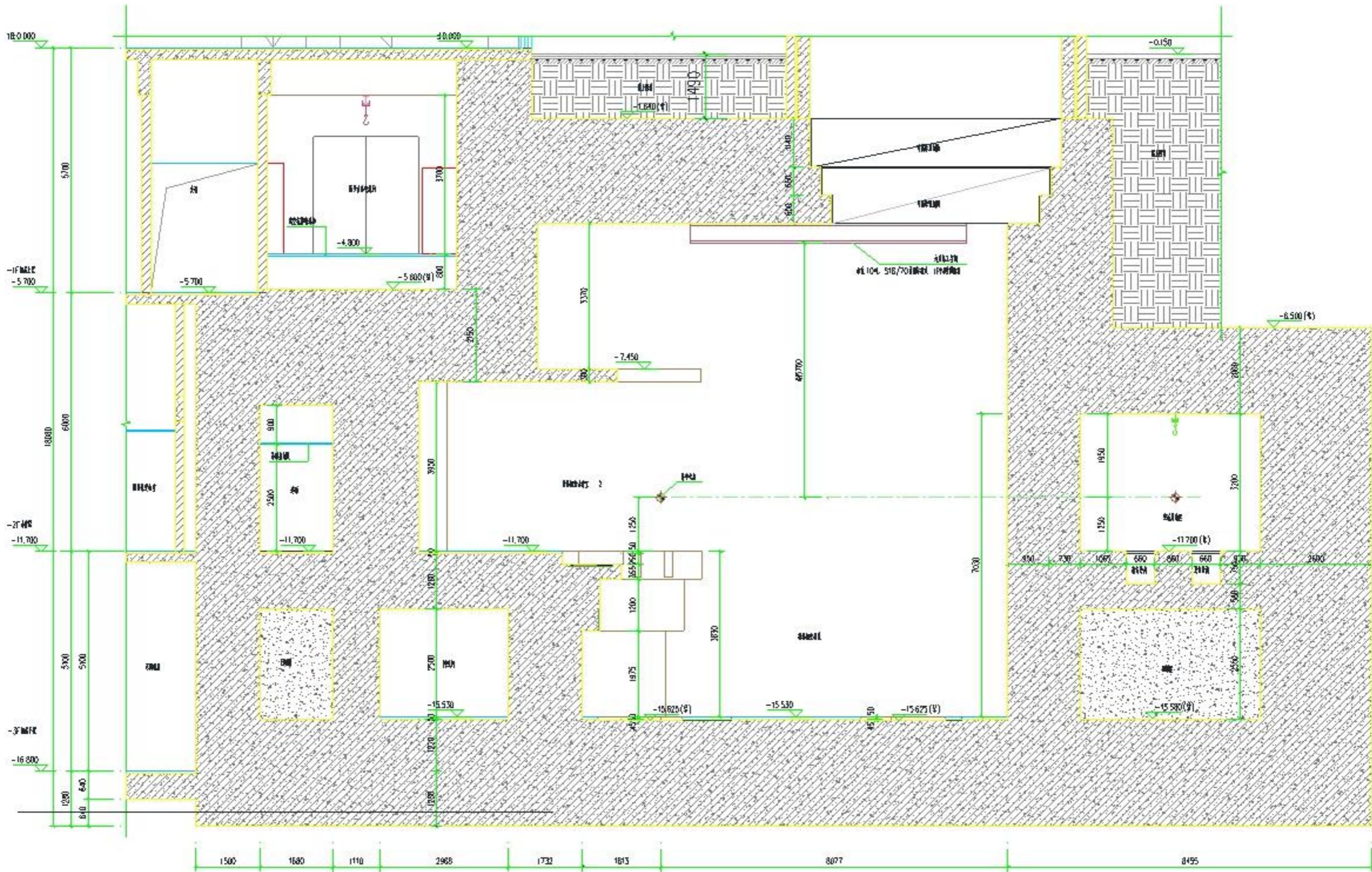


图 4.1.1.2-4 质子治疗机房辐射屏蔽设计示意图 (A-A 剖面)



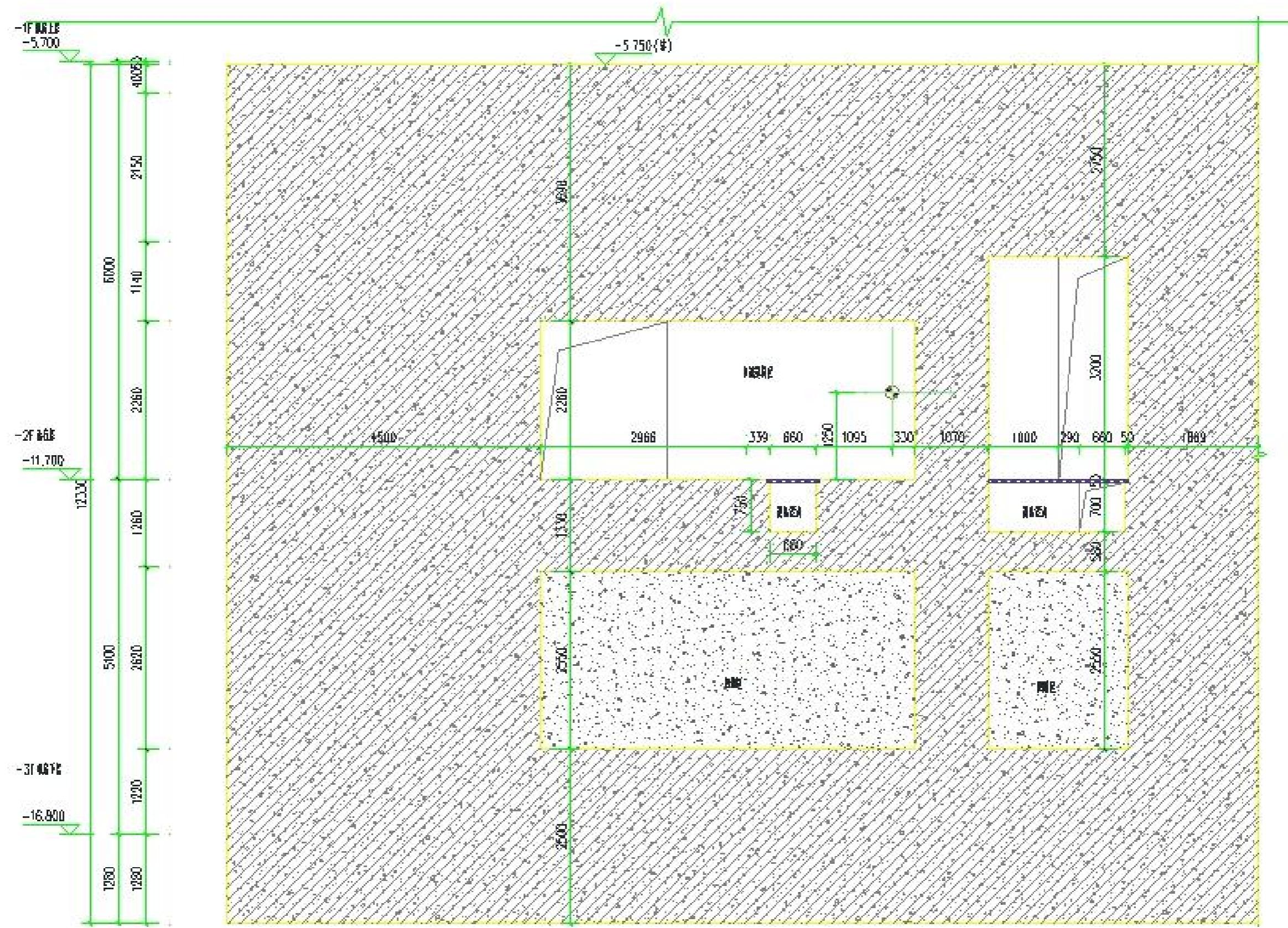


图 4.1.1.2-6 质子治疗机房辐射屏蔽设计示意图 (C-C 剖面)

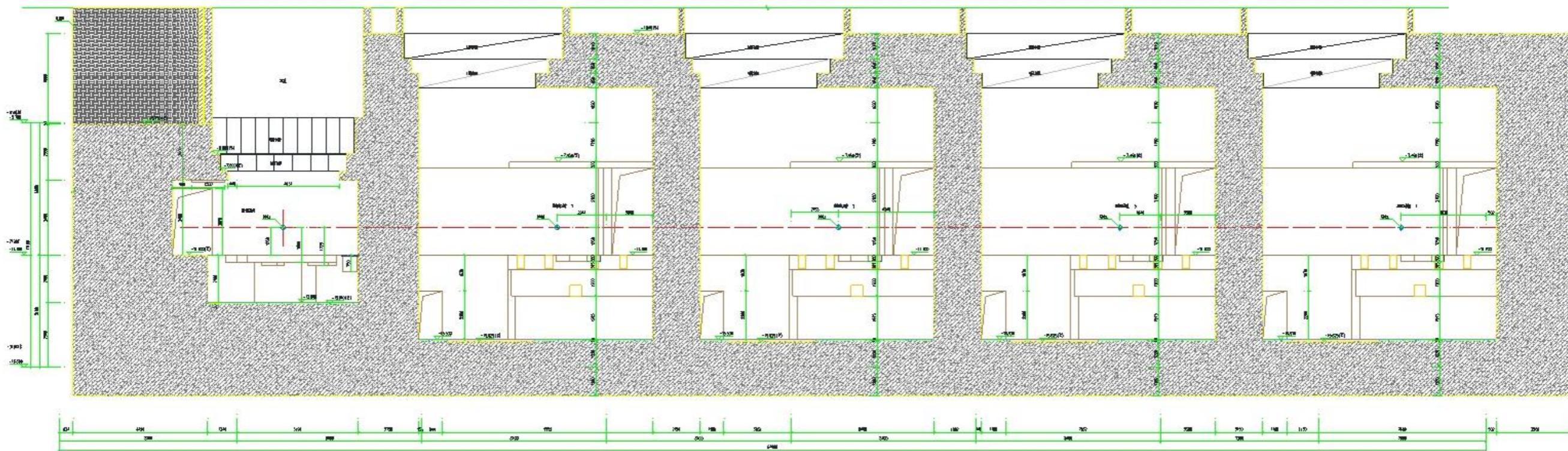


图 4.1.1.2-7 质子治疗机房辐射屏蔽设计示意图 (D-D 剖面)

## 4.1.2 辐射安全与防护措施

### 4.1.2.1 人身安全联锁系统

#### 4.1.2.1.1 设计原则

质子放射治疗系统的辐射安全控制措施分布于质子治疗机房的回旋加速器机房、质子治疗室1/2/3/4、主控室、治疗控制室、机房门外等各个关键节点，是多种辐射安全装置或系统按照一定原则相互联锁或独立运行，以期保证辐射工作人员和相关公众的人身安全。设计原则具体如下：

- (1) 纵深防御：充分考虑并合理设置联锁设施实现对人身辐射安全的多重冗余保护且各重保护措施之间具有相互独立性，不但重要场所进行多重“冗余”设计，整个系统也为“冗余”，一般采用四重冗余安全措施；
- (2) 硬件最可靠：重要的位置把最大的信赖寄托在“硬件”上；
- (3) 最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是设备最初始的运行功能（如离子源的高压等），更好的保证区域内的辐射安全；
- (4) 失效保护设计：关键联锁部件及联锁系统失效时，相应联锁控制区域仍处于安全状态；
- (5) 自锁：联锁系统主要环节有自锁功能，即一旦联锁从该处实施切断，现场辐射安全人员必须到现场检查，确保不安全因素已排出后再手动进行“复位”。
- (6) 冗余设计及独立性：实现在同一位置、为同一目的而使用若干种联锁手段，采用冗余设计的多套联锁设施相互独立，不会因为一套系统的失效而影响到其他系统的安全性。

#### 4.1.2.1.2 人身安全联锁系统的结构和功能

质子放射治疗系统人身安全联锁系统的主要功能是保护进入机房内部的人员免受辐射危害。系统的设计考虑了整个系统的使用流程、工作流程及操作状态，且由于其与控制系统之间唯一的交互即为接收并发送状态信息，使得人身安全联锁系统独立于其他控制系统运行，能最大限度得降低在各种情况下的风险。

人身安全联锁系统采用可编程控制技术、门禁控制技术及自动门技术、集散式控制技术、计算机网络与通讯技术、探测与数据处理技术、设备自诊断与自恢复技术等，对质子治疗的各联锁部件进行实时监测，并将信号输入安全联锁系统，只有在联锁条件全

部满足的情况下，才允许束流的产生和加速。

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

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

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

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

TSS 由一系列叫做安全冗余控制单元 (SRCU) 的独立控制单元组成，每个 SRCU 保证一个指定区域的人员安全：其中，控制加速器区的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCU0 (由主控室操控)，治疗室的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCUX (X 为治疗室号，以 4 个治疗室为例，X 从 1 到 4)。各区域的硬安全联锁信号都接入各自的 SRCU，形成一个软安全联锁系统。SRCU 既是硬安全联锁系统的一个冗余安全系统，以备硬安全联锁失效时起到安全联锁作用，又能对所有硬安全联锁信号状态进行监测和显示。

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

#### 4.1.2.1.3 人身安全联锁系统组成

人身安全联锁系统主要由 PLC、出入管理设备、紧急开出门按钮、急停开关、清场

搜索按钮、声光报警灯等组成。PLC 可以收到各个联锁装置的状态情况，并与主控室 PLC 进行通信，得知哪些主要设备在工作，治疗室内是否有束流供给且出现与安全逻辑相冲突的事件，安全 PC 就触发一系列保护动作包括停止束流和发出警报。

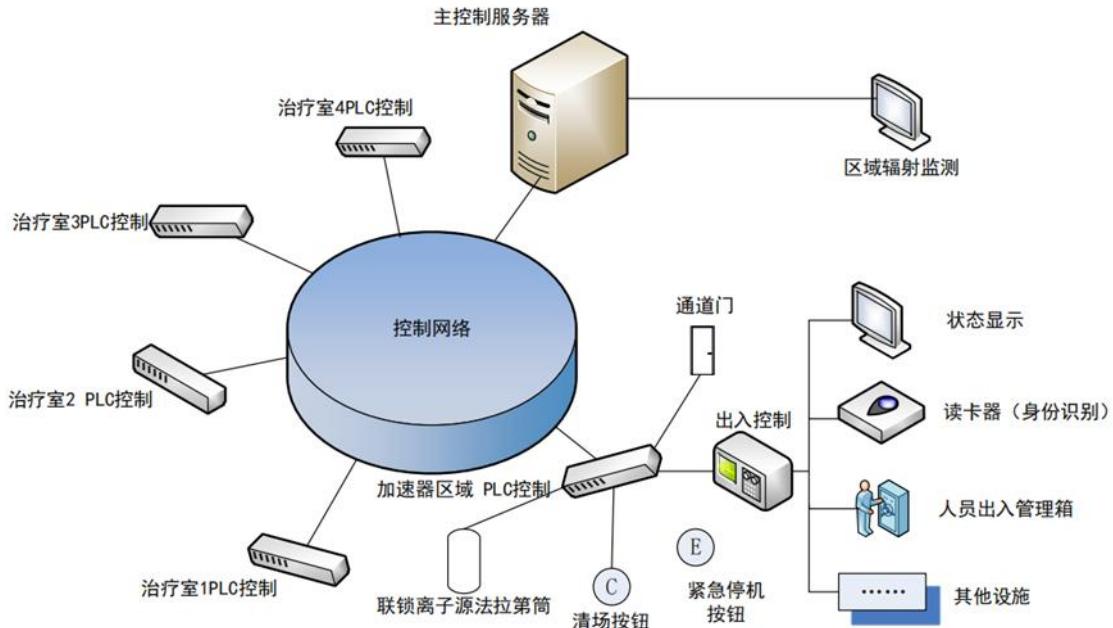


图 4.1.2.1-1 人身安全联锁系统结构示意图

#### 4.1.2.1.3.1 PLC 逻辑控制

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将加速器束流闸、通道门、区域剂量及紧急停机按钮等设施或信号进行联锁，规定了人身安全联锁各子系统的联锁逻辑关系，并在联锁动作发生时执行这些联锁关系，以此来保障加速器的安全运行及工作人员的人身安全。各个子 PLC 逻辑控制系统能够独立运行，对各安全联锁设施进行最底层的操作且具有最高优先权。当一个子系统发生问题时，不影响其他子系统。

#### 4.1.2.1.3.2 钥匙控制

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

主控钥匙转换开关有“ON”和“OFF”两种转换状态，用于控制束流的开启和停止。

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

医院严格限制主控钥匙的使用权限，设立保管责任人和使用钥匙人员名单，本项目辐射工作人员需经责任人确认后才能使用钥匙。

#### 4.1.2.1.3.3 人员出入管理设备

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

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

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

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



图 4.1.2.1-2 回旋加速器机房门口人员出入管理箱 (示意图, 红色代表全部就位)

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



图 4.1.2.1-3 控制室台的医生控制盒 (示意图)

#### 4.1.2.1.3.4 门机联锁

在回旋加速器机房和 4 间治疗室的门设置门-机联锁, 门未完全关闭时不能出束, 出束状态下开门, 则立即停止出束。具体如下:

- (1) 门禁卡: 人员进入回旋加速器机房和治疗室内需刷门禁卡。
- (2) 门限位开关: 回旋加速器机房和治疗室入口及室内机架门上均安装有门限位开关。当加速器正常运行期间, 各防护门不能从外面打开, 防止人员误入。在加速器出束前, 门位置开关参与实现清场功能, 清场人员需要依次按下清场按钮并且关闭门; 在

加速器出束过程中，门限位开关可以实现急停断束功能，即如果在出束过程中监测到门被打开，就会触发切断装置出束。

#### 4.1.2.1.3.5 清场搜索按钮

清场搜索是在开机前执行一套特定的安全搜索程序完成清场和建立联锁，联锁完成信号作为开机的必要前提条件之一，从而确保在开机前无人员滞留在里面。清场搜索按钮分布于回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）和各治疗室内部四周沿途一定距离、一定高度的墙壁上。

搜索按钮带有指示灯，当前等待按下的搜索按钮的指示灯会一直闪烁，当被按下时，指示灯会变成常亮。每个搜索子区设搜索时间窗限制和搜索顺序，超出搜索时间或违反搜索顺序需重新进行清场。清场搜索共分为回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）以及4间治疗室共计5个区域，每个区域的清场搜索系统是相互独立的。其中回旋加速器机房又分为束流传输隧道区（子区1）和加速器区（子区2）共2个子区；每间治疗室分为机架基坑区（子区1）和治疗区（子区2）和共2个子区。每个子区也是相互独立的。

每天首次治疗开始前，由当天现场负责的工作人员在规定的时间按照规定的路线，对质子治疗区清场搜索。通常的清场搜索顺序为：回旋加速器机房（子区1→子区2），治疗室1~4（子区1→子区2）。工作人员确定该被搜索区域无除治疗室内患者以外的人员停留后按下“清场搜索按钮”，当清场搜索按钮被按下后时，该区的声光报警装置发出声、光报警信号，提醒人员离开该区域。通常回旋加速器机房在每次开机前进行一次清场搜索；各治疗室则在每次治疗前进行一次清场搜索。任一子区的清场状态被破坏（如门打开或清场搜索按钮未按下），都需要对该子区重新进行清场。

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

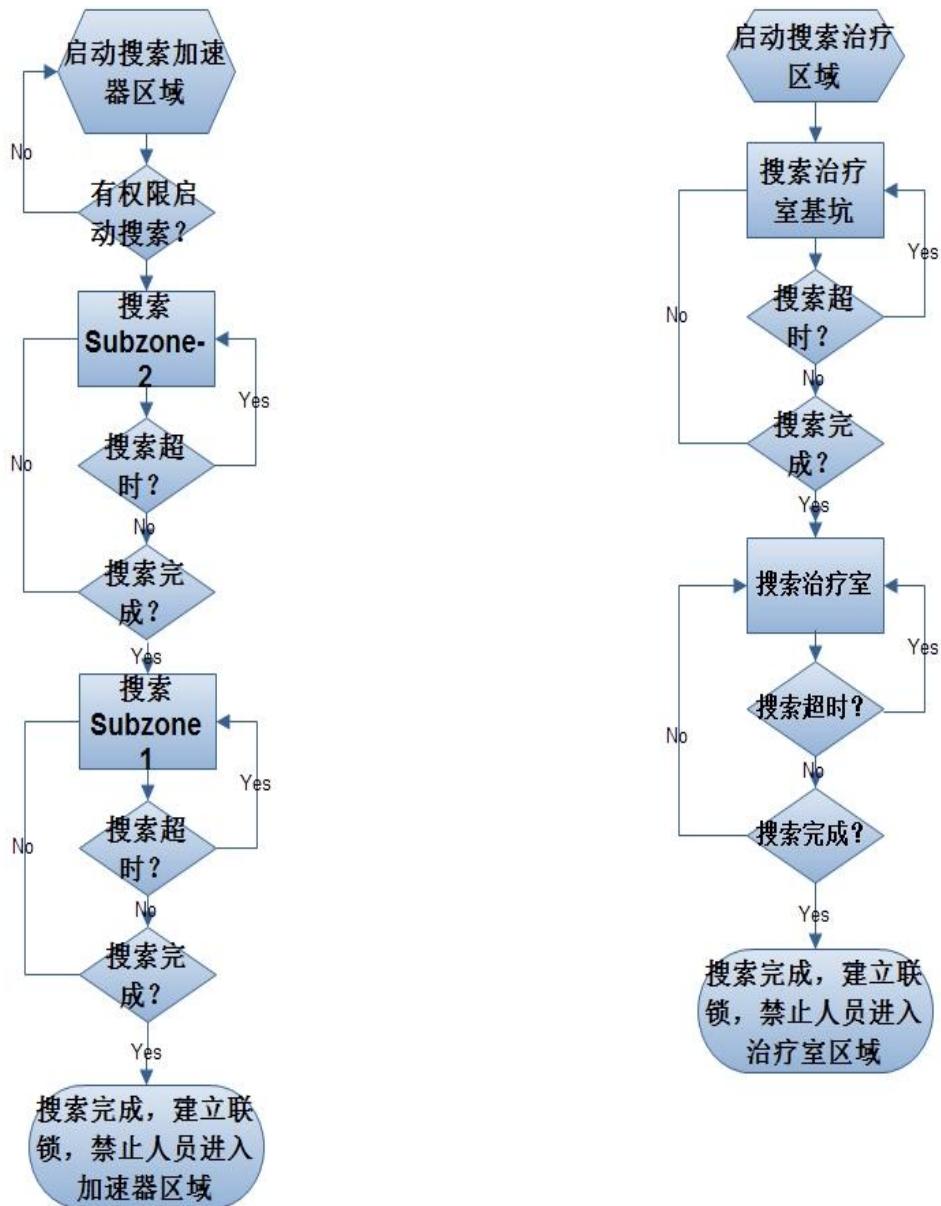


图 4.1.2.1-4 清场搜索逻辑示意图

#### 4.1.2.1.3.6 紧急停机按钮

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

#### 4.1.2.1.3.7 束流监控装置

##### (1) 束流闸

质子放射治疗系统在由能量选择系统引出至各治疗室的分支束线上设有束流闸，束流闸按照“失效保护”的原则设计，其材质为铝或铜。只有当安全联锁逻辑中所有条件都成立时，束流闸方可打开，束流方可进入下游区域。安全联锁逻辑中任意条件被破坏，束流闸均不能打开。以回旋加速器机房和2间治疗室为例，束流闸安装位置示意图见下图。

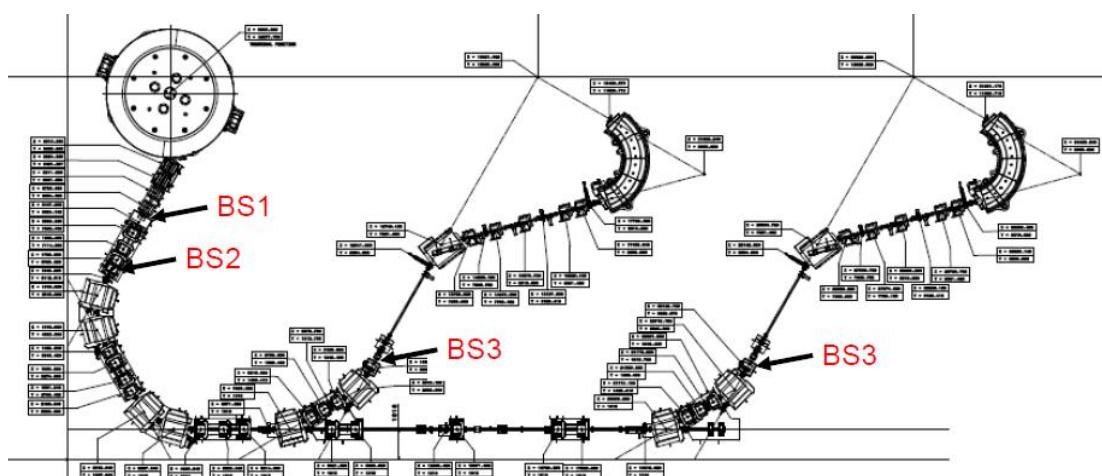


图 4.1.2.1-5 束流闸安装位置示意图（以回旋加速器机房和2间治疗室为例）

##### (2) 束流监测

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

##### (3) 束流安全设备

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

架、射线终端可移动喷嘴。

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

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

#### 4.1.2.1.3.8 紧急开门

在回旋加速器机房和各治疗室控制区内各防护门将设置红外感应装置，能够防止人员夹伤，防护门的内侧设有紧急开门开关，人员在防护门内侧按下开门开关，加速器立即停止出束，防护门即可手动打开。紧急开门开关分布情况见图 4.65。

#### 4.1.2.1.3.9 工作状态指示灯

回旋加速器机房入口、回旋加速器区、束流传输隧道迷道入口和尽头处以及各治疗室入口处，拟安装束流（工作）状态指示灯。根据不同区域的束流（工作）状态，质子放射治疗系统三种类型的束流（工作）状态指示灯，具体如图 4.59 至图 4.61 所示。



图 4.1.2.1-6 束流闸回旋加速器区域束流（工作）状态指示灯示意图  
(区域 1、2 分别指束流传输隧道区、回旋加速器区)



图 4.1.2.1-7 治疗室束流（工作）状态指示灯示意图

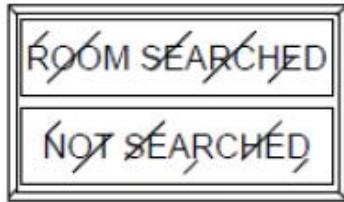


图 4.1.2.1-8 治疗室状态指示灯示意图

#### 4.1.2.1.3.10 剂量联锁（剂量探头）和声光报警

在回旋加速器机房内部、迷道、主控室以及治疗室治疗区、迷道、治疗治疗室内设置剂量探头（包括 X、 $\gamma$  剂量率以及中子量探头）和声光报警器。辐射剂量率测量结果实时显示在相应的控制室内，当剂量率高于预设阈值时立即报警，并切断束流，加速器停止出束。

#### 4.1.2.1.3.11 摄像头和对讲装置

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

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

综上所述，各安全联锁设备数量汇总见下表。

表 4.1.2.1-1 质子放射治疗系统安全联锁设备数量表

区域		设备名称	设备数量，个
负二层	加速器大厅（含能选系统及束流输运线）	联锁门	5
		紧急开门按钮	3
		紧急停机按钮	12
		清场搜索按钮	3
		声音报警	2

		警示灯	3
		束流状态指示灯	6
		γ 探测器及中子探测器	各 3 台
主控室		紧急停机按钮	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
治疗室 1/2/3/4		联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	6
		清场搜索按钮	1
		声音报警	1
		束流状态指示灯	2
		γ 探测器及中子探测器	各 2 台
治疗控制室 1/2/3/4		紧急停机按钮	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
负三层	治疗室 1/2/3/4	紧急停机按钮	3
		清场搜索按钮	2
		声音报警	1

#### 4.1.2.1.4 安全联锁逻辑

质子放射治疗系统安全联锁系统逻辑图见图 4.1.2.1-11，系统允许开机的逻辑图见图 4.1.2.1-12。

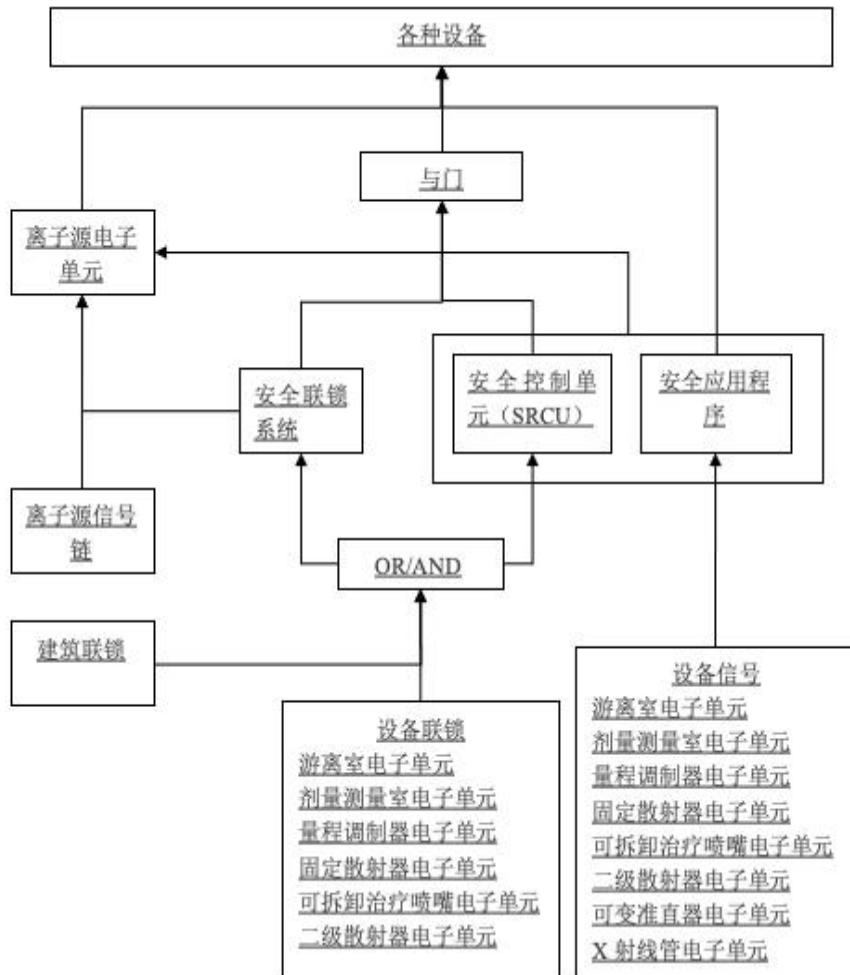


图 4.1.2.1-11 质子放射治疗系统安全联锁逻辑图

允许开机出束的逻辑如下：

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

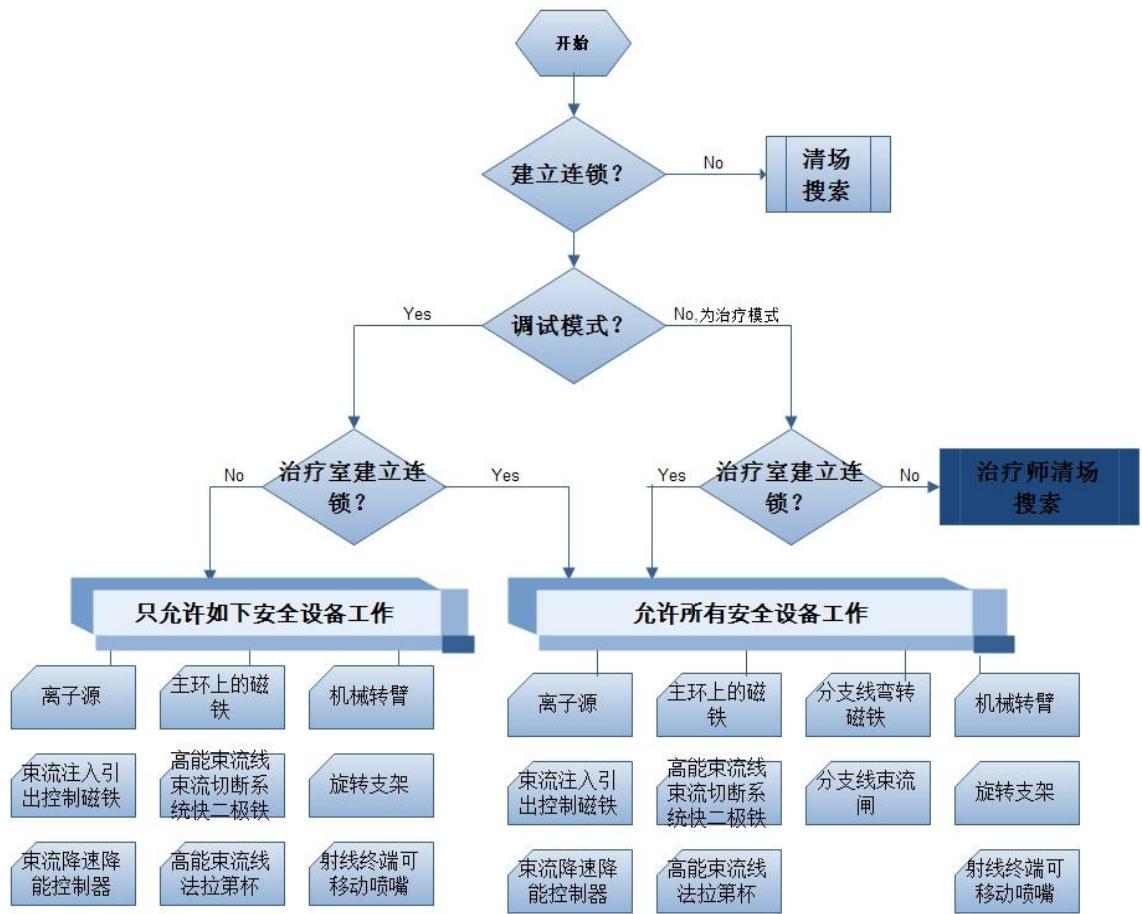


图 4.1.2.1-12 质子放射治疗系统允许开机的逻辑图

#### 4.1.2.1.5 工作流程

##### 4.1.2.1.5.1 进入回旋加速器机房和治疗室的流程

###### 一、进入回旋加速器机房的流程

本项目医院相关辐射工作人员不会进入回旋加速器机房，只有加速器系统的维修工程师方可进入。工程师进入回旋加速器区的流程如下：

- (1) 当工程师需要进入回旋加速器机房工作时，由回旋加速器机房负责人按照加速器正常操作程序停止该区域的束流。
- (2) 由专门的辐射防护人员在回旋加速器机房主控室内将主控钥匙旋转至“OFF”状态，并拔下该钥匙，交给该名工程师。
- (3) 欲进入人员将主控钥匙随身携带，通过刷门禁卡进行人员身份识别后，通过随身携带的剂量率报警仪，在区域入口处进行剂量率水平确认后，进入加速器大厅内。
- (4) 工程师在工作结束后，进行“清场搜索”并确认回旋加速器机房内无人停留后，在规定的时间内通过关门按钮关闭门离开，完成清场搜索程序。

(5) 工程师离开回旋加速器机房并确认出入口的门关闭后，回到回旋加速器机房主控室内将主控钥匙插回并旋转至“ON”状态，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。

## 二、进入治疗室流程

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

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

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

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

### 4.1.2.1.5.2 维修修护流程

质子放射治疗系统的维护维修工作由厂家工程师负责，医院不参与维护维修工作。维修维护阶段的安全联锁设计与质子设备开机启动前的安全联锁检查流程相同。在维修维护阶段，设备切换到维修模式，工程师拔走回旋加速器机房主控室钥匙，设备无法出束。若出现故障，可由系统自动或工作人员手动触发安全联锁。根据离子源信号与安全联锁系统所有的建筑联锁、设备联锁、设备信号、安全控制单元、安全应用程序相连，任何联锁均可直接触发离子源控制单元，离子源被切断，设备无法出束。维修完毕后按照启动流程，重新进行清场搜索，搜索完所有区域，再将系统切换到正常模式，方可重新治疗。

质子放射治疗系统维修的主要内容如下：

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

(2) 工程师到现场进行维修服务时，首先与操作人员进行现场沟通，了解故障现

场，初步判断故障类型和原因；

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

（4）工程师针对故障种类和出现故障的区域，制定维修方案：

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

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

a. 对于回旋加速器机房，当不需要打开加速器上、下盖进行检修时，加速器停机通风至少 1h 后，且根据实时剂量率监测数据判断大厅内辐射剂量率水平低于  $100\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，方可进入加速器大厅内部进行工作；当需要打开加速器上、下盖进行检修时，或其他涉及辐射水平较高区域的工作，如准直器维修，动量、能量限制器的维修，电离室更换，降能器维修和更换等，应确保加速器停机冷却 24 小时，停机后至少通风 1h 后，利用便携式 X/ $\gamma$  剂量率仪对加速器内部设备表面的剂量率水平进行监测，确保其低于  $1\text{mSv}/\text{h}$  后方可进入工作。若监测结果高于  $1\text{mSv}/\text{h}$ ，则对热点区域采用加盖铅块等措施，直至热点区域周围剂量率低于  $1\text{mSv}/\text{h}$  后，方可进入工作。

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

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

（5）维修完成后的临床调试验证

a. 对于软件、电路板、水冷系统、空气管路等的故障维修，维修完成后，工程师在

控制室内开机，切断高压出束，检查机器无报错信息后，交付医院使用；

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

#### 4.1.2.2 场所辐射监测系统

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

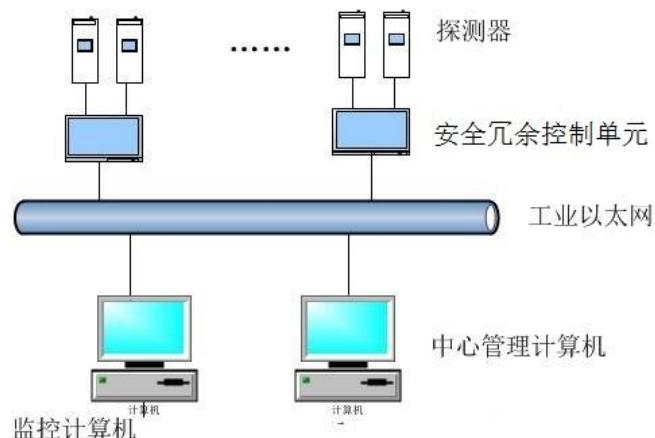


图 4.1.2.1-13 质子放射治疗系统辐射监测系统结构

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

#### 4.1.2.3 通排风系统

本项目回旋加速器机房和 4 间治疗室均设计了通排风系统。各区域通排风管道的布

局如图 4.1.2.1-19 至图 4.1.2.1-18 所示，通排风的设计参数见表 4.1.2.3-1。

#### (1) 回旋加速器机房

新风：新风量为  $7500\text{m}^3/\text{h}$ ，新风管经机房负二层门洞上方混凝土墙，直穿进入迷道，在迷道内多次转弯进入回旋加速器区，新风口位于回旋加速器区内西侧和北侧。

根据表 5.2.1.1-2 可知，回旋加速器机房门外剂量率为  $0.032\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，管道穿墙处（A2 点位：管道穿墙处）剂量率为  $0.030\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，均满足剂量率控制水平  $0.69\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，因此本次穿墙方式对机房屏蔽体影响很小。

排风：主要在机房负二层束流传输隧道设置排风口，排风管经后区、走廊引至排风井。回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）合计容积约  $1254\text{m}^3$ ，一般情况下机房不进入，日常排风量为  $500\text{m}^3/\text{h}$ 、换气次数不低于 0.25 次/h；维修期间，人员进入机房期间，机房排风量为  $900\text{m}^3/\text{h}$ 、换气次数不低于 6 次/h，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中“换气次数不少于 4 次/h”的要求。

#### (2) 治疗室

新风：每个治疗室均分为治疗区和机架区，新风量合计为  $4600\text{m}^3/\text{h}$ 。治疗区新风管经机房负二层门洞上方混凝土墙，直穿进入迷道，在迷道内多次转弯进入治疗区，新风口位于治疗区内东侧；机架区新风管经机房负一层北侧以“z”型穿过混凝土墙进入机架区，新风口位于机架区内北侧。新风管穿墙方式示意图见图 4.1.2.1-18。

根据表 5.2.1.1-3 可知，治疗室机房门外剂量率为  $0.645\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，管道穿墙处（C2 点位：管道穿墙处）剂量率为  $0.636\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，均满足剂量率控制水平  $2.74\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，因此本次穿墙方式对机房屏蔽体影响很小。

排风：每个治疗室均分为治疗区和机架区，排风量合计为  $6000\text{m}^3/\text{h}$ 。治疗区排风管经机房负二层门洞上方混凝土墙，直穿进入迷道，在迷道内多次转弯进入治疗区，设置 1 个排风口位于迷道东北角，并向南延伸出一只排风立管最终接至负三层，负三层设置 2 个排风口位于机架区内东侧。

每个治疗室治疗区和机架区合计容积约  $1430\text{m}^3$ ，换气次数不低于 4 次/h，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中“换气次数不少于 4 次/h”的要求。排风管穿墙方式示意图见图 4.1.2.1-19。

#### (4) 排气口

治疗室 1 和治疗室 2 的排风管引至上部排风井，治疗室 3、治疗室 4 和回旋加速器机房的排风管引至质子排风井，经排风风机引至质子治疗中心屋顶，排风风机出口设置

高效过滤器+活性炭吸附装置，排放高度不低于 21m。两个排气口分别位于质子治疗中心屋顶中部和西南侧，如图 4.1.2.1-17 所示，周围主要为设备区，非人员长居留场所，符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中“排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置”要求。

根据“5.2.1.3.2 感生放射性气体排放造成的辐射剂量”分析内容，感生放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射，本项目感生放射性气体导致公众年有效剂量最大为 1.58E-03mSv（具体见表 5.2.1.3-7），低于 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值，对周围环境影响很小。因此，排气口的位置设置是合理的。

表 4.1.2.3-1 质子放射治疗系统通排风系统设计参数

区域名称	体积 ( $\text{m}^3$ )	新风量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	排风量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	换气次数 (次/h)
回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）	1254	——	500（日常）	不低于 0.25
		7500	9000（维修期间人员进入）	不低于 6
后区	224	——	100（日常）	不低于 0.25
		——	500（维修期间人员进入）	不低于 2
单间治疗室治疗区	162	600	800	不低于 4
单间治疗室机架区	1268	4000	5200	不低于 4
单间治疗室治疗区+机架区	1430	4600	6000	不低于 4

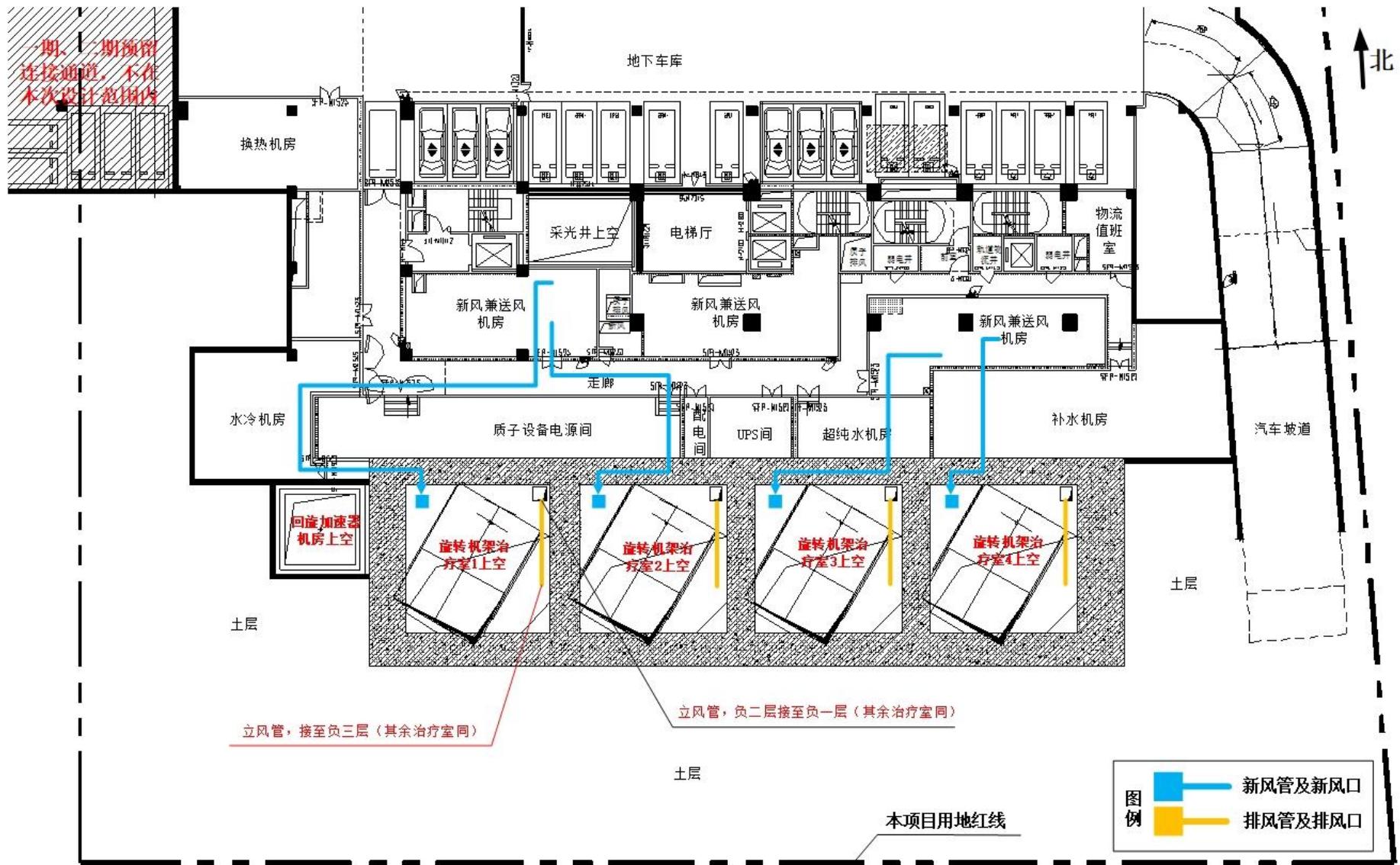


图 4.1.2.1-14 质子放射治疗系统通排风管道平面走向示意图（负一层）



图 4.1.2.1-15 质子放射治疗系统通排风管道平面走向示意图 (负二层)

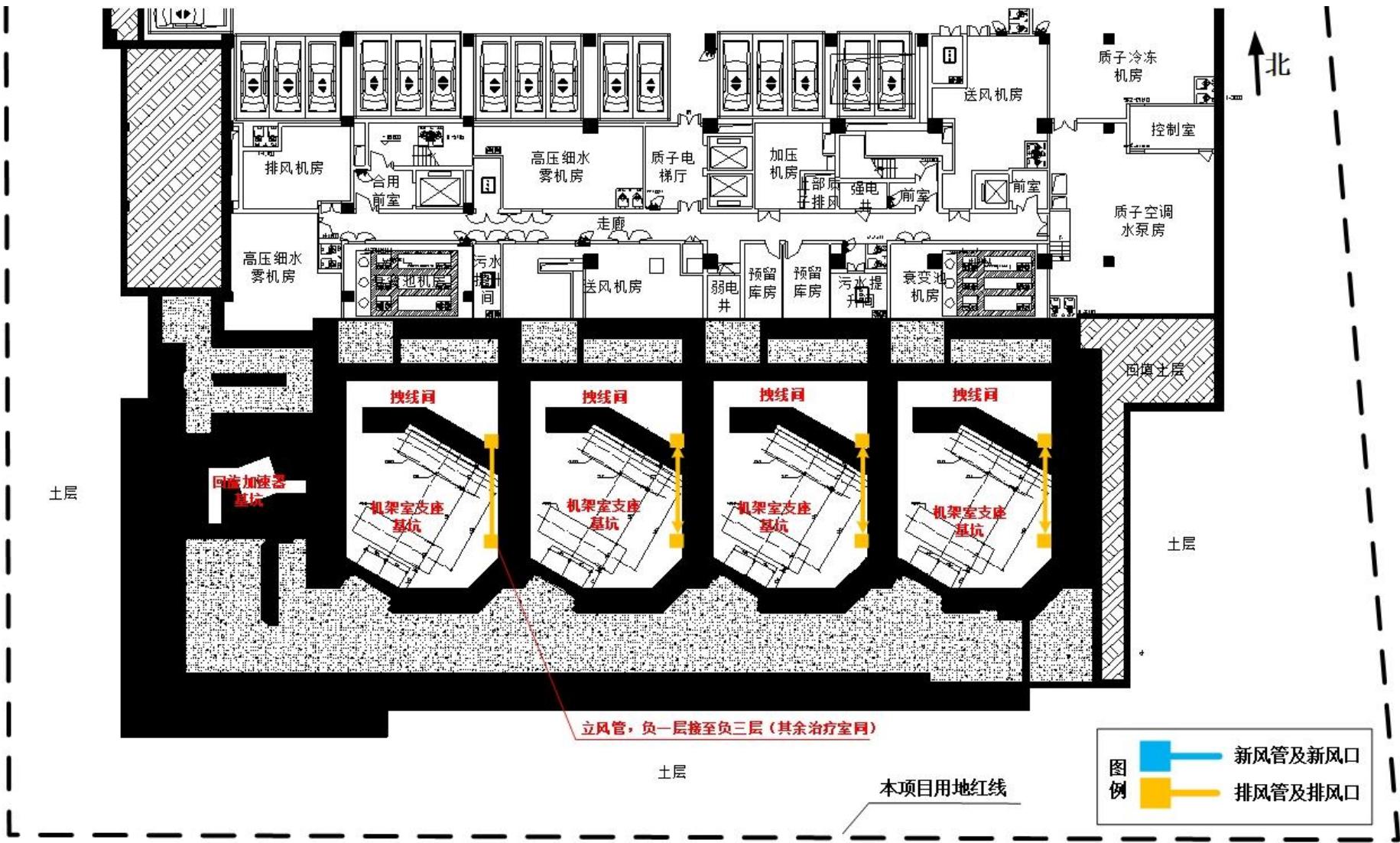


图 4.1.2.1-16 质子放射治疗系统通排风管道平面走向示意图 (负三层)

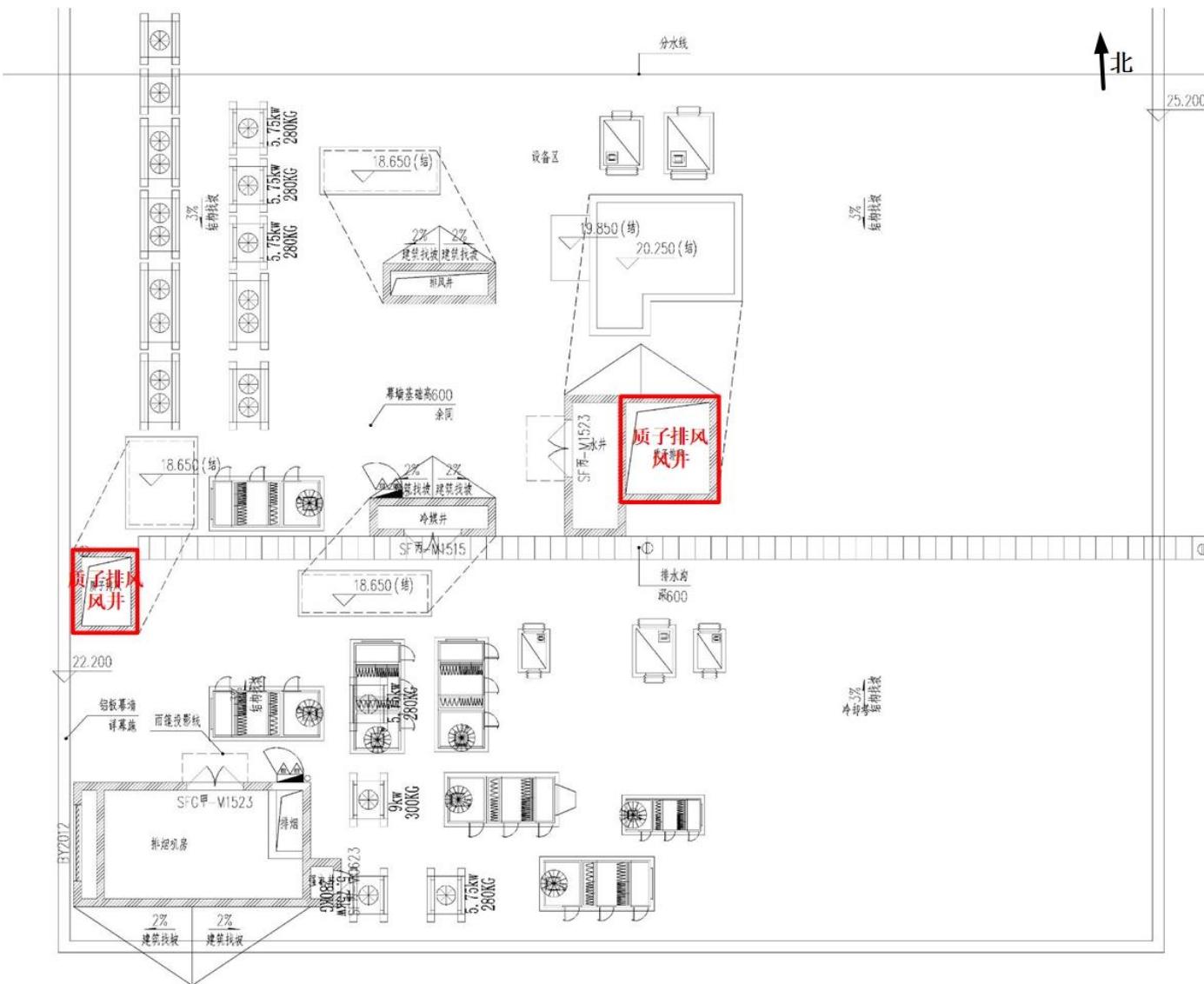


图 4.1.2.1-17 质子放射治疗系统排风口所在位置（四层屋顶）

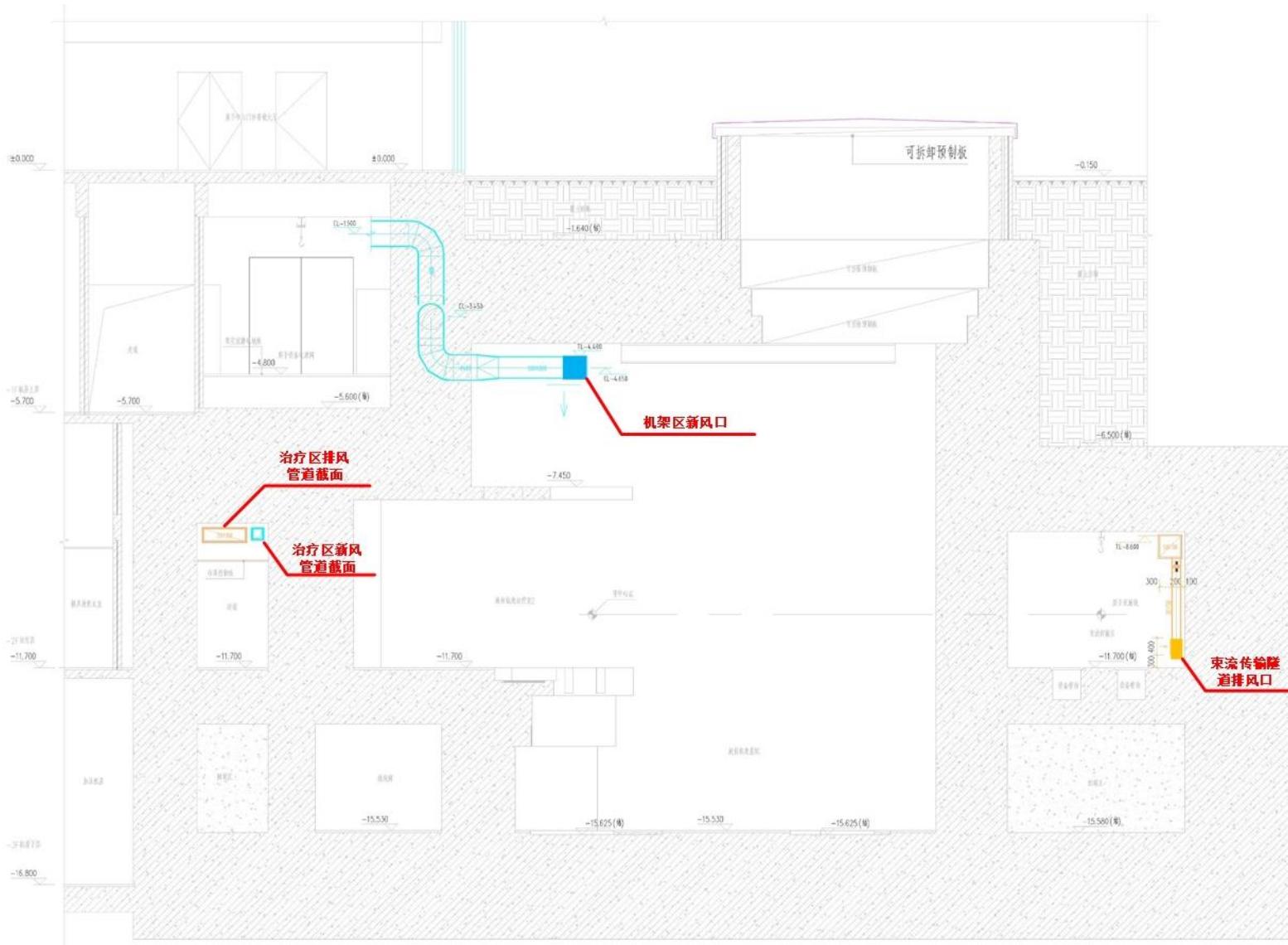


图 4.1.2.1-18 质子放射治疗系统通排风管道剖面走向示意图（治疗室剖面）

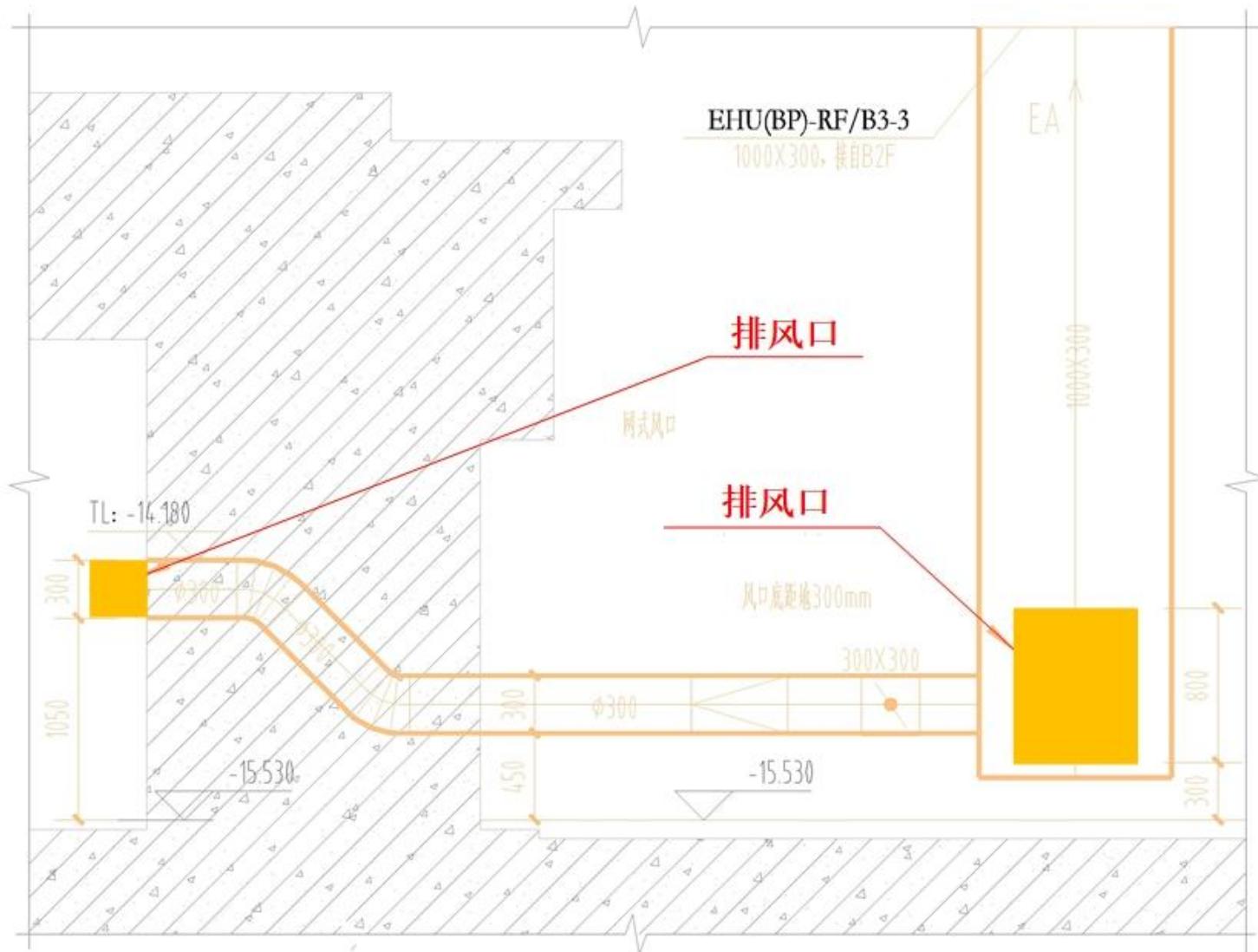


图 4.1.2.1-19 质子放射治疗系统通排风管道剖面走向示意图（治疗室负一层排风管道剖面）

### 4.1.3 放射性三废处理

#### 4.1.3.1 放射性废气来源及处理措施

##### (1) 来源

根据“3.3.1.3.1 感生放射性气体”分析内容，质子放射治疗系统运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为<sup>11</sup>C( $T_{1/2}[^{11}\text{C}] = 20.39\text{min}$ )、<sup>13</sup>N( $T_{1/2}[^{13}\text{N}] = 9.965\text{min}$ )、<sup>15</sup>O( $T_{1/2}[^{15}\text{O}] = 2.037\text{min}$ ) 和<sup>41</sup>Ar( $T_{1/2}[^{41}\text{Ar}] = 1.8\text{h}$ )。各核素年产生量见表 3.3.1.3-2。

##### (2) 处理措施

质子放射治疗系统运行产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。本项目设有通排风系统，根据“4.1.2.3 通排风系统”可知，回旋加速器机房和 4 间治疗室的排风管引至质子排风井，经排风风机引至质子治疗中心屋顶，排风风机出口设置高效过滤器+活性炭吸附装置，排放高度不低于 21m。两个排气口分别位于质子治疗中心屋顶中部和西南侧。

根据“5.2.1.3.2 感生放射性气体排放造成的辐射剂量”分析内容，感生放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射，本项目感生放射性气体导致公众年有效剂量最大为 1.58E-03mSv(具体见表 5.2.1.3-7)，低于 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值，对周围环境影响很小。

#### 4.1.3.2 放射性废液来源及处理措施

##### (1) 来源

本项目产生的放射性废液主要是被活化的冷却水。质子放射治疗系统所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于<sup>16</sup>O 散裂反应可能形成的放射性核素见表 3.3.1.3-7。除<sup>7</sup>Be、<sup>3</sup>H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。根据表 3.3.1.3-8 的计算结果本项目质子放射治疗系统活化冷却水中<sup>3</sup>H、<sup>7</sup>Be 的饱和活度分别为 6.83E+08Bq、1.92E+08Bq，<sup>3</sup>H、<sup>7</sup>Be 的饱和活度分别为 1.20E+05Bq/L、3.38E+04Bq/L，均低于其单次排放限值 1 ALI<sub>min</sub> 和豁免活度。

##### (2) 处理措施

质子放射治疗系统运行期间，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修时才会排放。回旋加速器机房(含能量选择隧道和束流传输隧道)及治疗室内均设有地漏，通过地漏自流进入集水坑，由污水提升泵提升至质子治疗中心负三层设置的 2 个

衰变池。单个衰变池有效容积为  $6\text{m}^3$ ，合计  $12\text{m}^3$ ，用于暂存活化冷却水。根据质子放射治疗系统厂商提供的信息，质子放射治疗系统中可能产生活化冷却水的总量为  $5.68\text{m}^3$ ，每年因检修将回路中的冷却水排放的次数最多为一次，排放的冷却水体积小于衰变池的容积，因此质子治疗中心负三层衰变池的设置能够满足活化冷却水的暂存要求。

暂存池上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，活化冷却水中主要核素  ${}^3\text{H}$  和  ${}^7\text{Be}$  满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的相关规定（豁免活度浓度： ${}^3\text{H } 1.0\text{E+06Bq/g}$ ,  ${}^7\text{Be } 1.0\text{E+03Bq/g}$ ; 豁免活度： ${}^3\text{H } 1.0\text{E+09Bq}$ ,  ${}^7\text{Be } 1.0\text{E+07Bq}$ ; 单次排放限值  $1\text{ALI}_{\min}$ :  ${}^3\text{H } 1.11\text{E+09Bq}$ ,  ${}^7\text{Be } 3.85\text{E+08Bq}$ ），且总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）中表 2 的相关要求（总 $\alpha$ :  $1\text{Bq/L}$ , 总 $\beta$ :  $10\text{Bq/L}$ ），方可作为一般废水排放。衰变池设有管道与医院污水管网相连，且配备手动启动的排水泵，需要排放时手动开启排水泵，通过管道将冷却水排入医院污水管网。每次排放需记录存档，记录废水来源、排放量、活度浓度监测结果、排放去向等信息。

综上所述，质子放射治疗系统正常运行时不会产生放射性废液，检修或发生泄漏的情况下可能产生冷却水，本项目产生的放射性废液活度低于排放限值，且采取了有效的废液收集和暂存措施。因此，放射性废液对环境的影响很小。

#### 4.1.3.3 放射性固体废物来源及处理措施

##### (1) 来源

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

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

表 4.1.3.3-1 活化结构部件主要感生放射性核素及其半衰期

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

## (2) 处理措施

在质子治疗中心负二层东北角设置单独的质子活化部件暂存间、质子放射性固废暂存间（位置具体见下图），东、南两侧为土层，西侧为通道，北侧为科研实验用房。

质子活化部件暂存间、质子放射性固废暂存间内拟设若干废物柜/废物箱（具体数量根据医院运行期间实际产生的放射性固体废物量确定），防护门外拟设置电离辐射警告标志和中文标签。2间废物间作为控制区管理，拟设置标牌标明控制区，同时设门禁系统或门锁，门禁卡或钥匙由专人负责保管。

医院拟对质子治疗系统产生的放射性固体废物分类收集和包装，结构部件的放射性活度浓度一般高于豁免水平，需要对拆卸下来的部件加强管理，进行辐射水平监测、登记，暂存在固体废物暂存桶中，经铅屏蔽容器转运至负二层质子活化部件暂存间，其他低活度浓度的放射性固体废物转运至负二层质子放射性固废暂存间。待废物暂存量达到一定量，由医院委托有资质单位进行集中测量分析：

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

(1) 可回收利用的部件，由设备厂家回收后复用。

(2) 不能回收利用的部件，经审管部门认可后，解控后按一般固体废物处理。

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

医院应建立放射性固体废物台账，对每次放射性固体废物的贮存和处置情况进行记录并存档，具体记录内容包括固体废物名称、废物量、剂量率监测结果、是否满足解控要求、最终处置情况等。

## 4.2 放疗中心直线加速器、后装机

### 4.2.1 辐射工作场所分区

本项目放疗中心 4 间直线加速器机房和 1 间后装机房辐射工作场所按控制区、监督区进行管理。两区划分情况见表 4.2.1-1、图 4.2.1-1 所示。

表 4.2.1-1 直线加速器机房和后装机房辐射工作场所分区表

辐射工作场所	控制区	监督区
直线加速器机房（4 间）	机房内部	控制室、设备间、准备室、模具室
后装机房（1 间）	机房内部	控制室、准备间、防护门外 1m 处

控制区通过实体屏蔽措施、警告标志等进行控制管理，在直线加速器、后装机使用时，除工作人员和患者外，禁止其他无关人员进入；监督区通过电离辐射警告标志提醒人员尽量避开该区域，并委托具有相关资质的单位定期对监督区周围剂量当量率进行监测。如果发现异常，医院应立即进行整改，整改完成后方可继续使用。

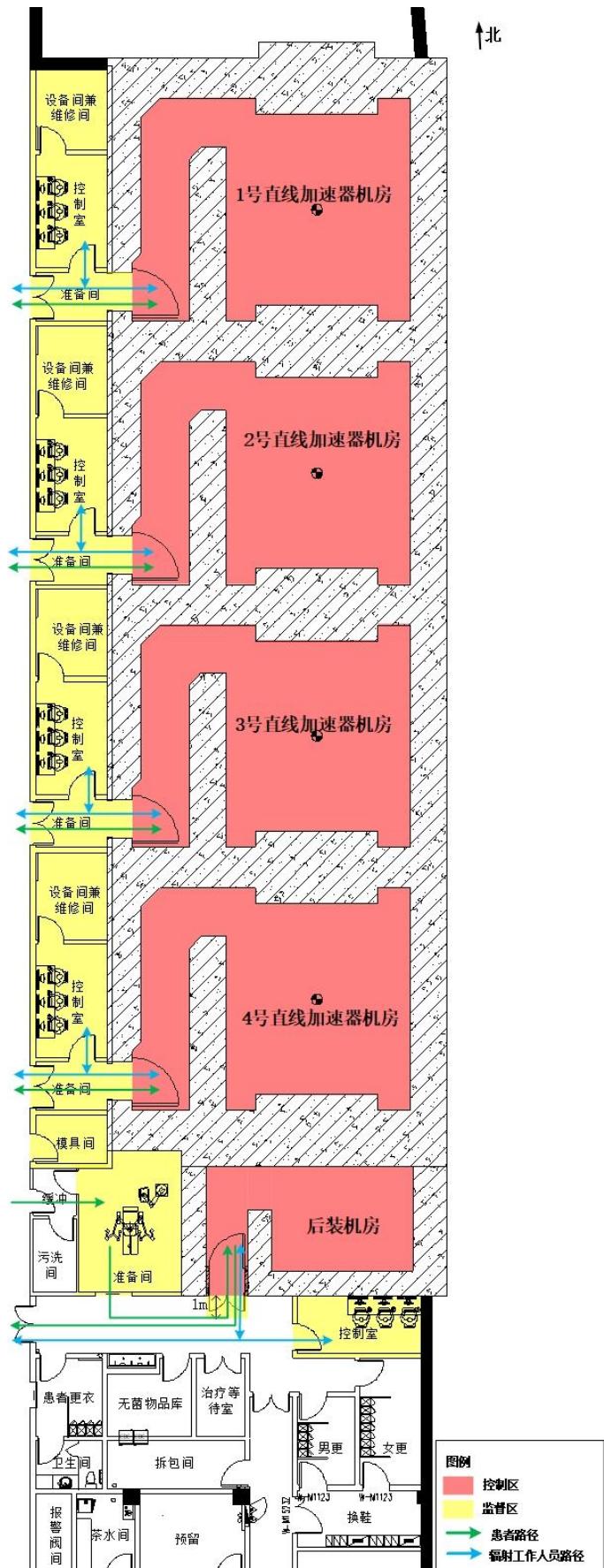


图 4.2.1-1 辐射工作场所两区划分图

## 4.2.2 机房布局与辐射屏蔽

### 4.2.2.1 布局合理性分析

4间直线加速器机房和1间后装机房位于负二层集中设置，机房上方主要为排风机房、工具间、非机动车库等，下方为土层，周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域或人员流动性大的商业活动区域。本项目放疗科4间直线加速器机房和1间后装机房均由治疗室、迷道、防护门组成。各机房与各种控制室等辅助用房分开设置，直线加速器机房控制室均位于机房西侧，后装机房控制室位于机房南侧；直线加速器机房设有L型迷道，后装机房设有直迷路，迷路口设有防护门。本项目放疗科4间直线加速器机房和1间后装机房位置相对封闭且独立，降低了公众受到照射的可能性，周围无明显环境制约因素。放疗机房集中布置，便于医院进行统一管理，各组成部分功能分区明确，既能有机联系，又不相互干扰；各机房布局符合《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中“治疗设备控制室应与治疗机房分开设置”、“放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需要”、“其他治疗机房均应设置迷路”等规定。

综合上述，放疗中心功能布局紧凑、动线合理、辐射屏蔽防护满足相关要求，总体布局是合理的。

### 4.2.2.2 机房辐射屏蔽设计

本项目放疗科4间直线加速器机房、1间后装机房四侧墙体、顶棚及地坪均拟采用标准混凝土( $\rho \geq 2.35 \text{ g/cm}^3$ )浇注而成。本项目直线加速器机房和后装机房的辐射屏蔽设计方案见表 4.2.2-1、图 4-24~图 4-26。

表 4.2.2-1 放疗科机房的屏蔽设计一览表

机房名称	部位	设计参数	
		尺寸	
1~4号直线加速器机房	机房几何尺寸	机房南北长 7.95m，东西宽 7.7m（不含迷路），迷路内入口宽 2m，迷路外入口（门洞）宽 1.6m，迷路长 9.25m，迷路宽度 2m，加速器机房治疗室面积为 88.7m <sup>2</sup> （含迷道），顶高 4.3m。	
	屏蔽墙	厚度	宽度
	东墙	1500mm 混凝土	/
	南墙	主屏蔽墙 3000mm 混凝土 副屏蔽墙 1700mm 混凝土（1~3号）	5100mm /

		2350mm 混凝土 (4 号)	
西墙	迷路内墙	1500mm 混凝土	3700mm
	迷路外墙	1400mm 混凝土	/
北墙	主屏蔽墙	3000mm 混凝土	5100mm (其中 1 号 北侧在填埋土层的 宽度为 4800mm)
	副屏蔽墙	1700mm 混凝土	/
顶棚	主屏蔽墙	3100mm 混凝土	5100mm
	副屏蔽墙	1700mm 混凝土	/
	机房防护门	20mm 铅+180mm 含硼聚乙烯板	
后装机房	机房几何尺寸	机房东西长 5.9m, 南北宽 4.35m (不含迷路), 迷路内入口宽 1.8m, 迷路外入口 (门洞) 宽 1.5m, 迷路长 5.35m, 迷路宽度 1.7m, 加速器机房治疗室面积为 36.5m <sup>2</sup> (含迷道), 顶高 6.8m。	
	东墙	1400mm 混凝土	
	南墙	1000mm 混凝土	
	西墙	迷路内墙	1000mm 混凝土
		迷路外墙	1000mm 混凝土
	北墙	2350~3000mm 混凝土	
	顶棚	600mm 混凝土	
	机房防护门	15mm 铅板	

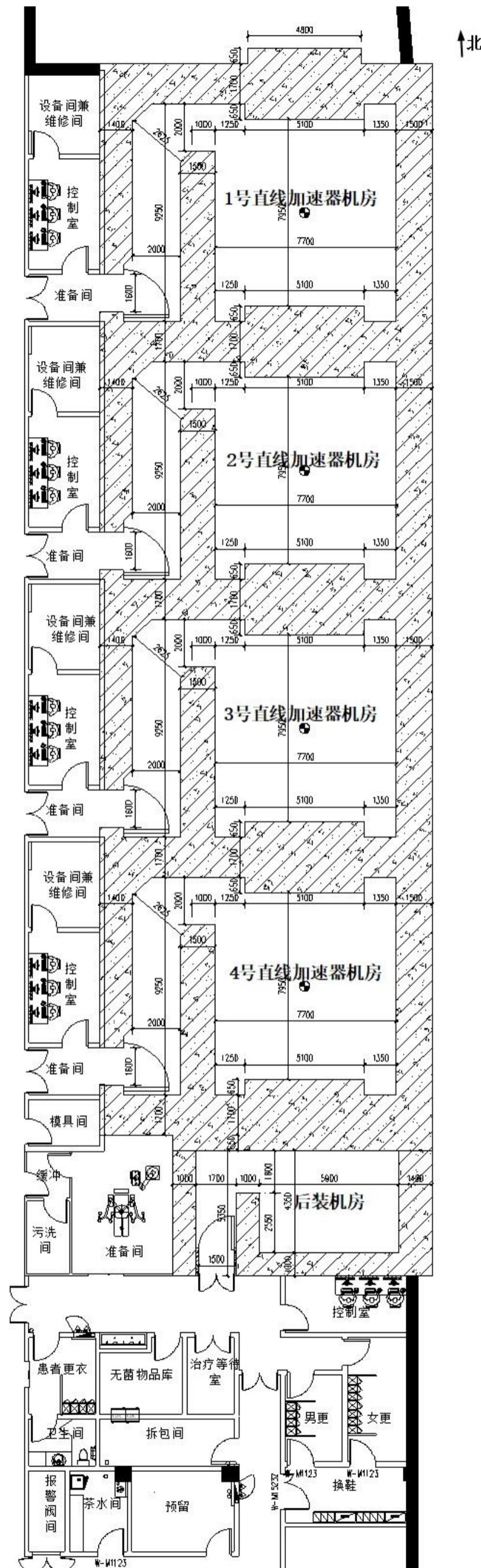


图 4.2.2-1 放疗科各机房辐射屏蔽尺寸平面图 (单位: mm)

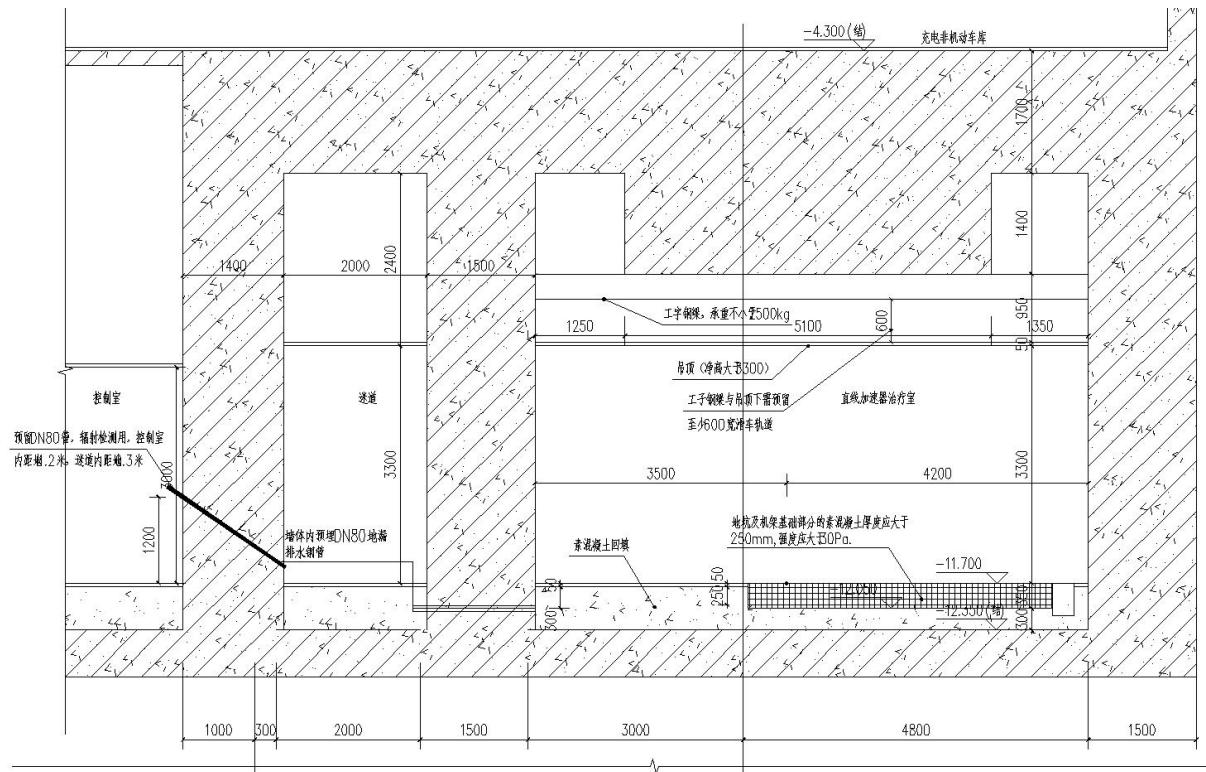


图 4.2.2-2 直线加速器机房辐射屏蔽尺寸剖面图 (单位: mm)

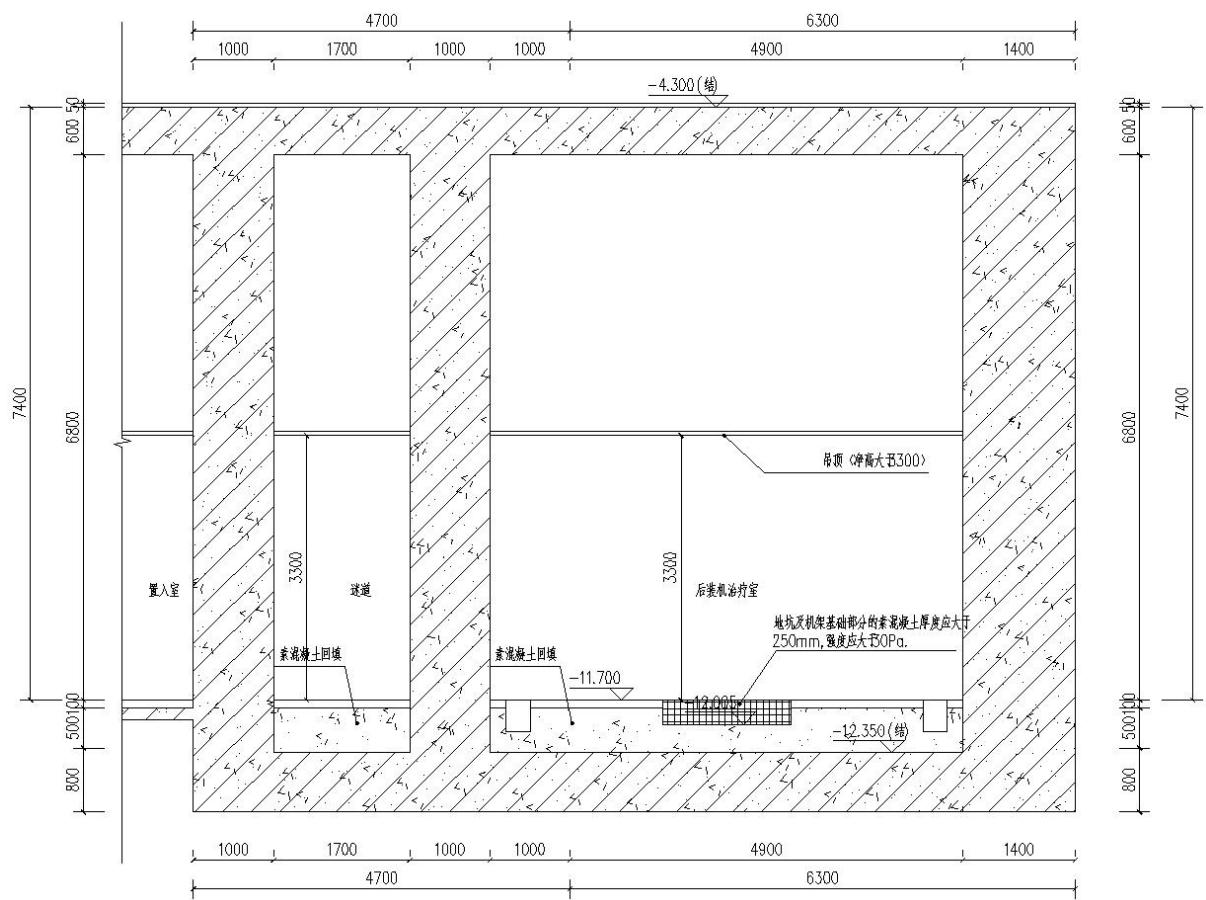


图 4.2.2-3 后装机房辐射屏蔽尺寸剖面图 (单位: mm)

### 4.2.3 拟采取的安全防护措施

#### 4.2.3.1 直线加速器

##### (1) 设备固有安全性

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

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

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

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

④红色急停开关。当发现异常后，按下急停开关，机器将自动切断射波刀、加速器、TOMO 主电源。

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

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

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

表 4.2.3-1 直线加速器硬件联锁一览表

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

##### (2) 机房辐射防护设施设计

①固定式辐射剂量监测仪（带有报警功能）：每间直线加速器机房迷道内入口处设置带有异常情况下报警功能的固定式辐射剂量监测仪，其显示单元装在控制室内。对监

测点进行实时剂量率监测和报警。实时剂量率、累积剂量监测值同时显示在主机面板上，实时剂量率、累积剂量的“报警阈值”可通过面板上的按键进行修改。仪器有声光报警，以警示现场工作人员，确保工作人员安全。

②每间直线加速器机房均设置门机安全联锁和门灯联锁，防护门上方设有工作状态指示灯与设备关联，防护门未完全关闭时不能出束照射，出束状态下防护门打开，设备立即停止出束。设备启动时工作状态指示灯亮起。防护门为电动移门，防护门与墙搭接处应尽可能减小缝隙漏泄辐射，防护门宽于门洞的部分应大于“门-墙”间隙的十倍。防护门设红外防挤压装置，防止人员被夹伤。

③急停开关：直线加速器设备自带急停开关。医院拟在每间直线加速器机房内四侧墙体、防护门内侧和控制台处设置急停开关，急停开关为红色按钮式开关，设在工作人员易于接触的地方（距离地面1.2m高处），且相互串联，每个急停开关独立工作，按下任意开关可使设备停止出束，以避免机房内人员尚未完全撤离或误入的情况下受到误照射。急停开关按下后，只有人工就地复位并通过控制台才能重新启动设备；急停开关应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且易于触发。

④电离辐射警告标志和工作状态指示灯：在每间直线加速器机房防护门上及墙体醒目位置设置电离辐射警告标志和中文警示说明，控制区和监督区设相应标识。防护门上方设工作状态指示灯，以显示设备工作状态。

⑤紧急开门装置：每间直线加速器机房防护门内侧，人员易接触的位置装有紧急开门按钮，在事故状态下工作人员逃逸至迷道内可通过该按钮开启防护门，实现紧急逃离。

⑥视频监视系统、双向交流对讲系统：每间直线加速器机房的治疗室和控制室之间均安装有视频监控3个（迷道1个，南、北墙体各1个）、双向交流对讲装置1套，控制室内能通过视频监视治疗室内患者的治疗情况，并通过对讲系统与室内人员联系，以便于医生在控制室观察患者在治疗室的状况、及时处理意外情况。视频监控数量和位置能实时、全方位观察治疗室及迷道内状况，可以保障治疗室内及迷道不留视频监控死角，因此视频监控布局数量及位置可行。

#### 4.2.3.2 后装机

##### （1）设备固有安全性

①后装治疗设备的控制系统，必须能准确地控制照射条件，有放射源起动、传输、驻留及返回工作贮源器的源位显示与治疗日期、通道、照射总时间及倒计数时间的显示。

②后装治疗设备控制系统有安全锁等多重保护和联锁装置。必须能防止由于计时器控制、放射源传输系统失效，源通道或控制程序错误以及放射源连接脱落等电气、机械发生故障或发生误操作的条件下造成对患者的误照射。严禁在去掉保护与联锁控制装置的条件下运行。

③实施治疗期间，当发生停电、卡源或意外中断照射时，放射源必须能自动返回工作贮源器。必须同时显示和记录已照射的时间和剂量，直到下一次照射开始，同时发出声光报警信号。当自动回源装置功能失效时，必须有手动回源措施进行应急处理。

④在控制台上，必须能通过 $\gamma$ 射线监测仪器显示放射源由工作贮源器内输出和返回贮存位置的状态。控制照射时间的计时误差必须小于1%。

⑤必须在生产厂家给出的放射源最大安全传输次数内，不发生放射源脱落、卡源等故障。放射治疗机随机文件中必须给出放射源从贮源器到施源器的最大传输时间。

## （2）机房辐射防护设施设计

①固定式辐射剂量监测仪（带有报警功能）：后装机房迷道内入口处设置带有异常情况下报警功能的固定式辐射剂量监测仪，其显示单元装在控制室内。对监测点进行实时剂量率监测和报警。实时剂量率、累积剂量监测值同时显示在主机面板上，实时剂量率、累积剂量的“报警阈值”可通过面板上的按键进行修改。仪器有声光报警，以警示现场工作人员，确保工作人员安全。

②设置门源联锁和门灯联锁，防护门上方设有工作状态指示灯与设备出源关联，防护门未完全关闭时不能出源照射，出源状态下防护门打开，源自动回到后装机安全位置。后装机设有断电自动回源措施。后装机出源时工作状态指示灯亮起。防护门为电动移门，防护门与墙搭接处尽可能减小缝隙漏泄辐射，防护门宽于门洞的部分应大于“门-墙”间隙的十倍。防护门设红外防挤压装置，防止人员被夹伤。

③紧急回源按钮：后装机设备自带紧急回源按钮。医院拟在后装机房内四侧墙体、防护门内侧和控制台处设置紧急回源按钮，紧急回源按钮为红色按钮式开关，设在工作人员易于接触的地方（距离地面1.2m高处），且相互串联，每个紧急回源按钮独立工作，按下任意开关可使设备自动回源，以避免机房内人员尚未完全撤离或误入的情况下受到误照射。紧急回源按钮按下后，只有人工就地复位并通过控制台才能重新启动设备；紧急回源按钮应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且易于触发。

④电离辐射警告标志和工作状态指示灯：在后装机房防护门上及墙体醒目位置设置电离辐射警告标志和中文警示说明，控制区和监督区设相应标识。防护门上方设工作状态指示灯，以显示后装机工作状态。后装治疗机使用的<sup>192</sup>Ir密封放射源符合《密封放射源及密封γ放射源容器的卫生防护标准》（GBZ114-2006），放射源安装在铅、钨防护材质的机头储源室内，源容器外表面张贴电离辐射标志和中文警示说明。

⑤紧急开门装置：后装机房防护门内侧，人员易接触的位置装有紧急开门按钮，在事故状态下工作人员逃逸至迷道内可通过该按钮开启防护门，实现紧急逃离。

⑥视频监控、双向交流对讲系统：后装机房的治疗室和控制室之间安装有视频监控3个（迷道1个、东、西墙体各1个）、双向交流对讲装置1套，控制室内能通过视频监视治疗室内患者的治疗情况，并通过对讲系统与室内人员联系，以便于医生在控制室观察患者在治疗室的状况、及时处理意外情况。视频监控数量和位置能实时、全方位观察治疗室及迷道内状况，可以保障治疗室内及迷道不留视频监控死角，因此视频监控布局数量及位置可行。后装机房防护门采取双人双“锁”管理，放射源工作场所视频监控系统接入医院安保系统。

⑦后装机房入口采用迷路设计，治疗室内设置放射源迅速返回贮源器的应急开关与放射源监测器。

⑧后装机房内配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具。

放疗科机房安全装置布设位置图见下图。

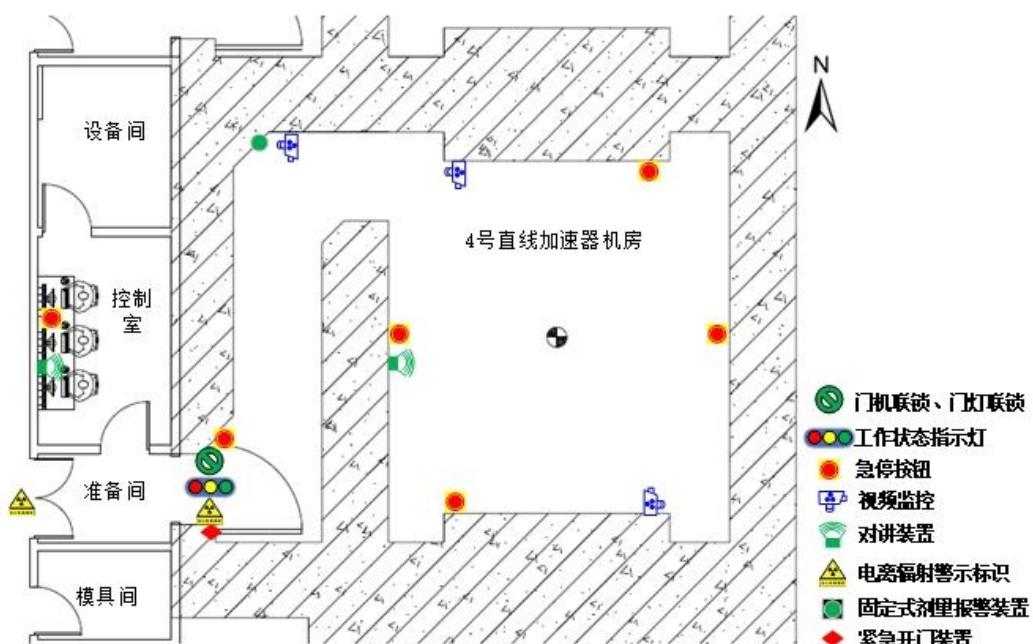


图 4.2.3-1 直线加速器机房辐射安全与防护设施点位示例图



图 4.2.3-2 后装机房辐射安全与防护设施点位示例图

#### 4.2.4 通排风系统

放疗科 5 间机房防护门上方的墙体均预留通风管道进出口，通风管道穿墙方式示意  
图见图 4.2.4-1，送风管道与排风管道穿墙方式均采用“Z”型曲路，避免了直穿，能有  
效控制通风管道孔的辐射泄漏。拟在机房内南侧装饰天花板设置送风口，在机房北侧墙  
角处设置排风口，风管底部（排风口）离地 30cm，风管沿墙体内壁向上沿天花板顶部  
经迷路，最终防护门上方预留风管接入放疗科机房西侧排风井。送风口与排风口呈“上  
进下出，对角设置”设置，利于密度相对大的臭氧排出。

本项目 4 间直线加速器机房的排风量均为  $3400\text{m}^3/\text{h}$ ，4 间直线加速器机房设计相  
同，机房有效面积约  $88.7\text{m}^2$ ，净高 4.3m，体积为  $382\text{m}^3$ ，换气次数约为 9 次/h；后装机  
房的排风量为  $2200\text{m}^3/\text{h}$ ，机房有效面积  $36.5\text{m}^2$ ，净高 6.8m，体积为  $249\text{m}^3$ ，换气次数  
约为 8.8 次/h。

放疗科机房总排风管道最终接入放疗科机房西侧排风井。排风井通至塔楼楼顶，排  
放口高出所在建筑屋脊，并且排放口风管端口进行了防雨、防鸟、防虫设计，废气最终  
排至大气环境。放疗科新风管道和排风管道布设见下图。

因此，本项目放疗科 5 间机房均符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-  
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，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。”的要求。

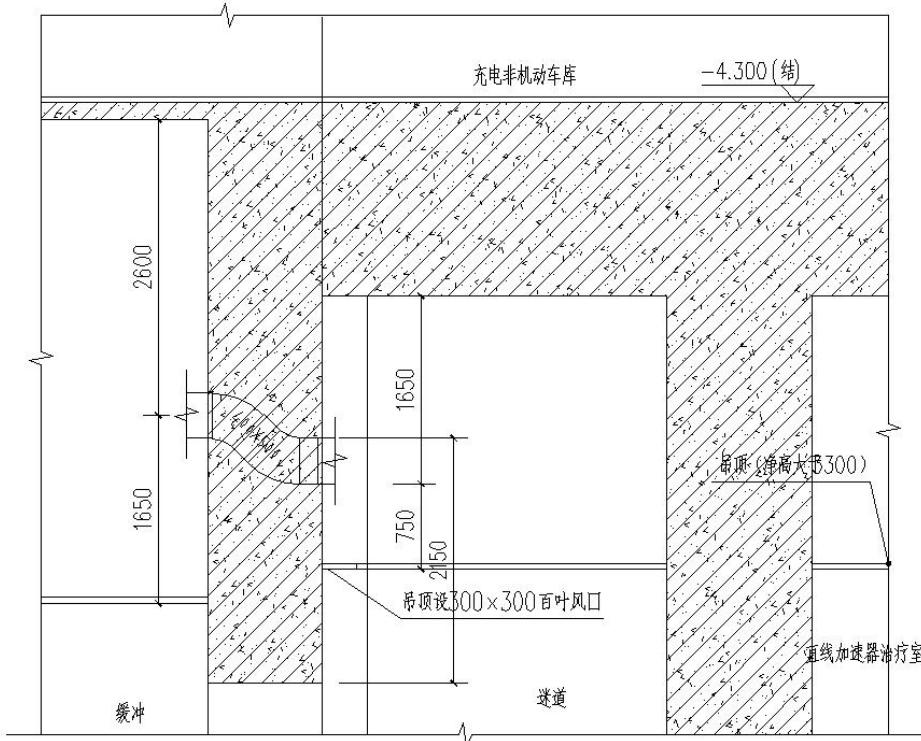


图 4.2.4-1 放疗科机房通风管道穿墙示意图

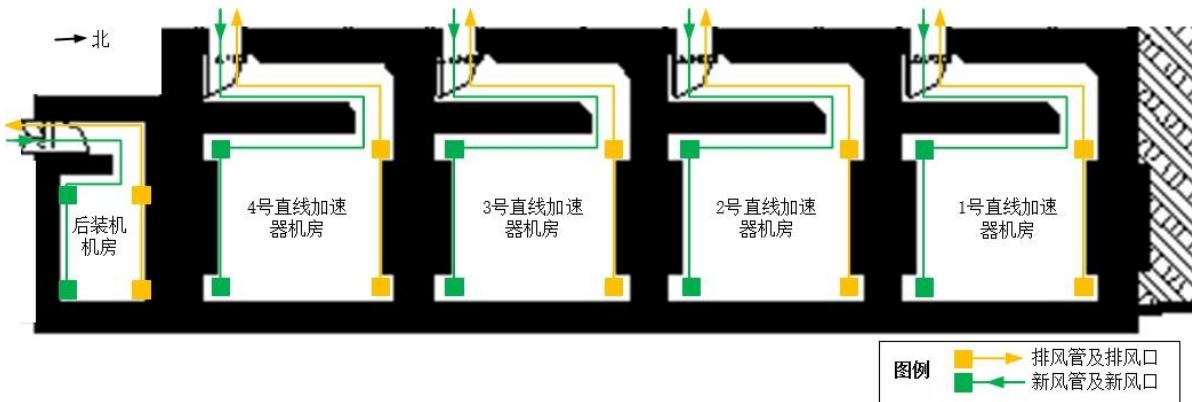


图 4.2.4-2 放疗科机房新风、排风管道走向示意图

#### 4.2.5 电缆等管线布设

直线加速器机房和后装机房与设备间之间的各种电缆管线，室内部分以地沟形式在地坪以下布设，电缆沟盖板采用钢板覆盖。直线加速器机房穿墙部分均位于西侧迷路外墙，穿墙管道呈“L”型穿墙，下沉后穿越屏蔽墙到达设备间。后装机房穿墙部分均位于南侧迷路外墙，穿墙管道呈“L”型穿墙，下沉后穿越屏蔽墙到达控制室。通过多次折返的电缆沟设计和下沉地面穿越屏蔽墙的设计，增加了泄漏射线的散射次数和衰减，从而保证不减弱屏蔽墙体的屏蔽效果。其他所有电、水、气管、物理测试管线布设走向必须符合辐射屏蔽防护要求，在北侧迷路穿越墙体，如在防护墙体部位设置开关箱等嵌

入式电气设备，要在箱体后补充相应的屏蔽防护措施。电缆沟穿墙示意图见下图。

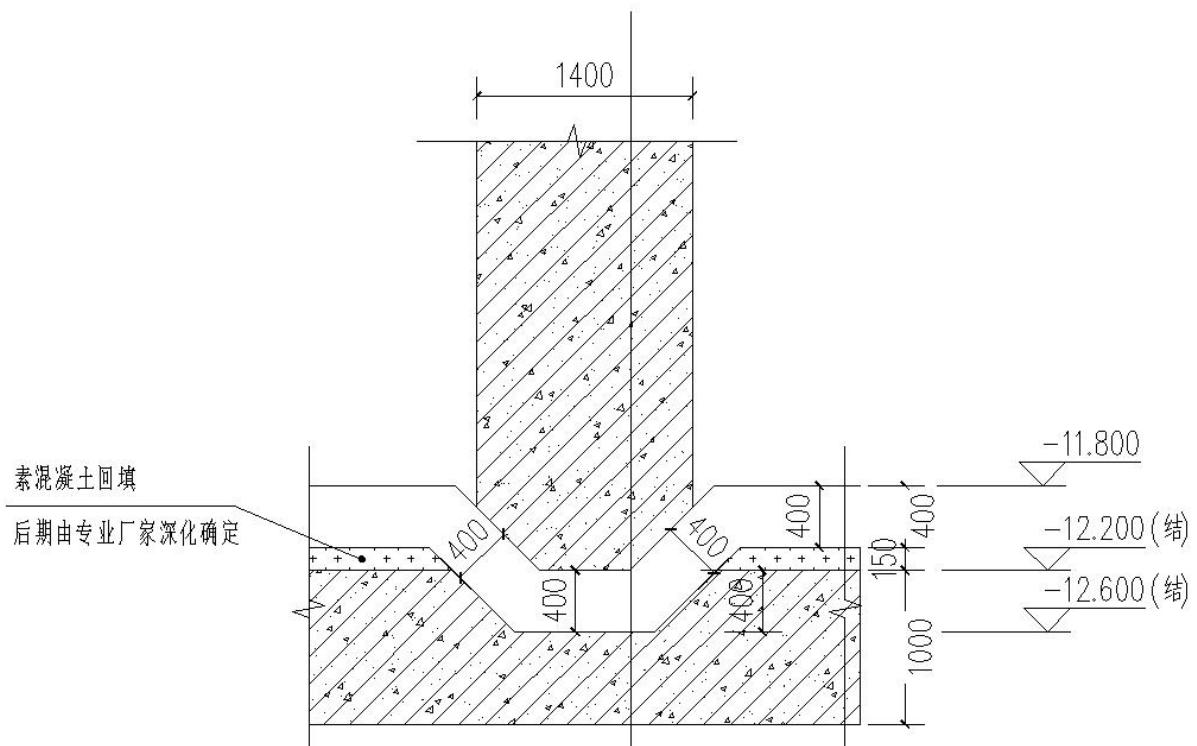


图 4.2.5-1 放疗科加速器机房电缆沟的铺设及穿墙示意图

#### 4.2.6 三废治理

##### (1) 废气

直线加速器和后装机运行时，射线均会与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物等有害气体。本项目放疗科机房均设有强制排风系统，各机房内设置送风口和排风口，送风口与排风口呈“上进下出，对角设置”设置。放疗科机房内换气次数均不小于 4 次/h。产生的废气经由排风井内单独密闭管道排至医技楼楼顶，并高出屋脊排放。臭氧常温下可自行分解为氧气，另外考虑到会被环境空气的对流、扩散作用稀释，对环境影响很小。

直线加速器机房感生放射性气体产生量较少，且产生的气态感生放射性核素主要为<sup>15</sup>O 和<sup>13</sup>N，其半衰期分别为 2.0min 和 10.0min，一般在正常通风情况下，感生放射性气体不会对辐射工作人员和患者造成危害。

##### (2) 固体废物

直线加速器正常运行时，无废靶产生。如果冷却水循环系统出现故障，可能造成靶体散热不畅导致靶被打穿的情况，产生废靶。此外直线加速器报废时，会有废靶产生。

对于更换下来的废靶由厂家回收，最终交由具有放射性废物收贮资质的单位收贮。

后装机更换的废<sup>192</sup>Ir 放射源应当按照废旧放射源返回合同规定，将废旧放射源交回生产单位或者返回原出口方。

后装机配套使用 UPS 电源，该 UPS 电源采用铅蓄电池供电，根据《国家危险废物名录》（2021 年版），废铅蓄电池属于危险废物（废物代码：900-052-31），其更换周期约 5 年/次，更换下的 UPS 电源交由有资质单位处置。

## 4.3 模拟定位 CT

### 4.3.1 辐射工作场所分区

本项目放疗中心模拟定位 CT 机房辐射工作场所按控制区、监督区进行管理。其中模拟定位 CT 机房为控制区，机房控制室及防护门外 1m 处为监督区，如图 4.3.1-1 所示。

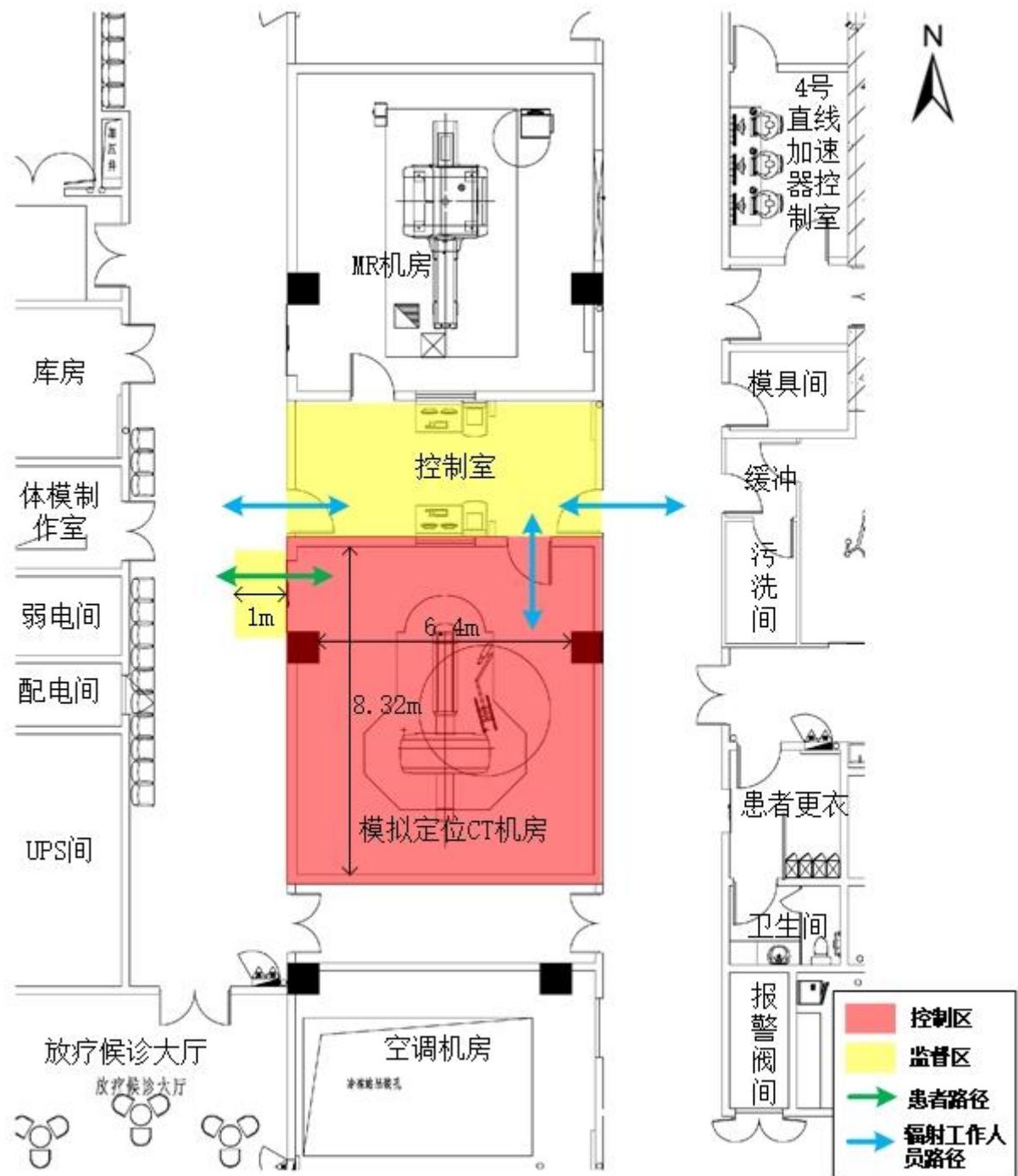


图 4.3.1-1 模拟定位 CT 辐射工作场所分区图

#### 4.3.2 机房布局和辐射屏蔽

模拟定位 CT 机房具体屏蔽设计和机房周围环境分布情况列于表 4.3.2-1，机房尺寸和面积与标准要求对照情况列于表 4.3.2-2。

表 4.3.2-1 模拟定位 CT 机房屏蔽设计和周围环境分布情况

机房名称	机房尺寸和面 积	位置	屏蔽设计	铅当量, mm	周围环境
负二层放 疗科模拟 定位 CT 机房	8.32m×6.4m (长×宽), 面积 53.2m <sup>2</sup>	北墙	240mm 实心砖+1mmPb 硫酸钡防护涂料	3	控制室
		南墙	240mm 实心砖+1mmPb 硫酸钡防护涂料	3	走廊
		东墙	240mm 实心砖+1mmPb 硫酸钡防护涂料	3	走廊
		西墙	240mm 实心砖+1mmPb 硫酸钡防护涂料	3	走廊
		防护门	4mmPb 铅板	4	走廊
		观察窗	4mmPb 铅玻璃	4	控制室
		顶棚	150mm 混凝土+1.5mmPb 硫酸钡防护涂料	3	停车场
		底板	150mm 混凝土+1.5mmPb 硫酸钡防护涂料	3	停车场

注: ①混凝土密度不小于  $2.35\text{g/cm}^3$ , 折算铅当量参考《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020) 中附录 C 中式(C.1)、式(C.2)及表 C.2, 得 150mm 混凝土 (140kV CT) 折算为 1.5mmPb; ②由于《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020) 附录 C 中未提供实心砖在 140kV 的拟合参数, 无法进行等效铅当量厚度的计算, 故参考《放射防护实用手册》(主编赵兰才、张丹枫) 表 6.14, 实心砖密度取  $1.65\text{g/cm}^3$  核算等效屏蔽厚度, 240mm 实心砖折算为 2.0mmPb 铅当量。

表 4.3.2-2 机房尺寸和面积建设要求对标

机房名称	机房设计		标准要求		是否满足要 求
	最小单边 长度, m	有效使用 面积, m <sup>2</sup>	最小单边 长度, m	有效使用面 积, m <sup>2</sup>	
负二层放疗科模拟定位 CT 机房	6.4	53.2	4.5	$\geq 30$	是

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

### 4.3.3 拟采取的其他安全与防护措施

①机房内布局要合理, 避免有用线束直接照射门、窗和管线口位置; 本项目模拟定位 CT 机房尺寸和屏蔽情况详见表 4.3.2-1、表 4.3.2-2, 其防护能力符合相关标准要求。

②控制室上张贴相应的各项规章制度、操作规程。

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

④所有辐射工作人员必须配备个人剂量计。

⑤机房拟采用动力通风装置进行通风，排放口均设置于机房吊顶，保证机房内有良好的通风。设备管线等均拟以地沟穿过墙体，地沟上盖钢板。

⑥在满足诊断要求的前提下，在每次使用射线装置进行诊断之前，根据诊断要求和病人实际情况制定最优化的诊断方案，选择合理可行尽量低的射线照射参数，以及尽量短的曝光时间，减少工作人员和相关公众的受照时间，也避免病人受到额外剂量的照射。

⑦机房应配备相应的防护用品与辅助防护设施，其配置要求需按照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）的要求进行配制。

**表 4.3.3-1 个人防护用品和辅助防护设施配置要求**

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

#### 4.3.4 三废治理

模拟定位 CT 运行时，射线均会与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物等有害气体。本项目模拟定位 CT 机房拟采用动力通风装置进行通风，新风口和排风口均设置于机房吊顶，保证机房内有良好的通风。模拟定位 CT 运行时产生的少量臭氧和氮氧化物经排风系统引至楼顶排放。臭氧常温下可自行分解为氧气，另外考虑到会被环境空气的对流、扩散作用稀释，对环境影响很小。

### 4.4 服务期满后的环境保护措施

本项目涉及 I 类射线装置（质子放射治疗系统）、II类射线装置（直线加速器，15MV）和III类射线装置（模拟定位 CT）的使用，其中质子放射治疗系统服务期满不再使用后，医院应对辐射工作场所进行监测，若存在放射性污染，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（中华人民共和国生态环境部令第 16 号）中“五十五、核与辐射”中“173、核技术利用项目退役—使用I类、II类射线装置（X 射线装置和粒子能量不高于 10 兆电子伏的电子加速器除外）存在污染的”，应编制项目退役环境影响报告表，并取得生态环境主管部门审批后才能正式按照方案实施退役活动。

在退役过程中应首先进行污染源项调查，编制相应的退役方案、制定退役目标，首先安全、妥善处理放射性废物，对无法达到解控水平的设施、设备应组织开展去污处理工作，对无法去污的需进行集中收集衰变或交由资质单位处理，确保放射性废物得到安

全、妥善处理。医院应做好退役实施期间的辐射安全防护等工作，实施退役的工作人员应作为辐射工作人员进行管理，并做好个人防护。退役工作完成后，医院应按照国家相关规定，委托有资质的技术机构，对去污处理后拟退役的场所进行终态验收监测，组织自主竣工环保验收，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

模拟定位 CT 报废时，医院应对射线装置内的高压射线管进行拆解，进行去功能化，并报颁发辐射安全许可证的生态环境部门核销。

## 5 辐射环境影响

### 5.1 建设阶段对环境的影响

《浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程环境影响报告表》于 2025 年 12 月 16 日取得杭州市生态环境局批复，批复文号为：杭环钱评批（2025）114 号（见附件 4）。本项目主体土建工程施工期影响详见《浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程环境影响报告表》有关章节，本次评价不再分析。

### 5.2 质子放射治疗系统运行对环境的影响

#### 5.2.1 正常运行下的环境影响

##### 5.2.1.1 屏蔽体外剂量率计算

###### 5.2.1.1.1 计算时使用的源项和模型

本报告采用目前国内外通用的 FLUKA 程序计算质子放射治疗系统辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平，FLUKA 程序相关介绍具体见前文“3.3.1.1.3.1FLUKA 程序”。通过分析表 3.3.1.1-1 和表 3.3.1.1-2 给出的束流损失参数可知，本项目质子治疗系统束流主要损失在以下几个位置：①回旋加速器 D 型盒；②回旋加速器引出口；③降能器；④准直器；⑤散度准直器；⑥能量狭缝；⑦治疗头；⑧患者。

对于回旋加速器机房而言，最恶劣的情况是降能器降能到 70MeV 的情况，对于任一治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况。在屏蔽计算过程中，各个束流损失点位的最大损失情况需结合以上两种情况综合考虑，参数选取情况见下表。

表 5.2.1.1-1 屏蔽计算时考虑的束流损失源项

场所名称	束流损失点	质子能量 (MeV)	损失流强 (nA)	合计损失 流强 (nA)	靶材料
回旋加速器机房 (降能至 70MeV)	回旋加速器 D 型盒	230	9.8	48.87	Cu
	回旋加速器引出口	230	19.6		Cu/Fe/Al
	降能器	70	5.8		Cu+Be+Al
	准直器	70	12.0		Ta
	散度准直器	70	0.7		Ni
	能量狭缝	70	0.7		Ni

场所名称	束流损失点	质子能量 (MeV)	损失流强 (nA)	合计损失 流强 (nA)	靶材料
	治疗头	70	0	11.75	Cu+Zn
	患者	70	0.27		人体组织
质子治疗室 1/2/3/4 (230MeV)	回旋加速器 D 型盒	230	2.35	11.75	Cu
	回旋加速器引出口	230	4.70		Cu/Fe/Al
	降能器	230	0		Cu+Be+Al
	准直器	230	1.14		Ta
	散度准直器	230	1.54		Ni
	能量狭缝	230	1.54		Ni
	治疗头	230	0		Cu+Zn
	患者	230	0.47		人体组织

质子治疗机房屏蔽体厚度见表 4.1.1.2-1，建立的计算模型见图图 5.2.1.1-1 至图 5.2.1.1-5。计算过程中，将治疗终端的患者等效为直径 30cm、长度 35cm 的水模体（根据《2014 年国民体质监测公报》，我国 0~44 岁男性平均腰围约为 87.3cm，简化成圆柱体时直径约为 30cm；230Mev 质子束在水中的射程约为 33cm，长度保守按 35cm 考虑），放置于等中心点处；治疗头对侧束流阻挡器为 32cm（束流方向）×120cm×120cm 的高密度聚乙烯，机架配重为 80cm（束流方向）×95cm×240cm 的钢；屏蔽体材料采用普通混凝土，密度为 2.35g/cm<sup>3</sup>。

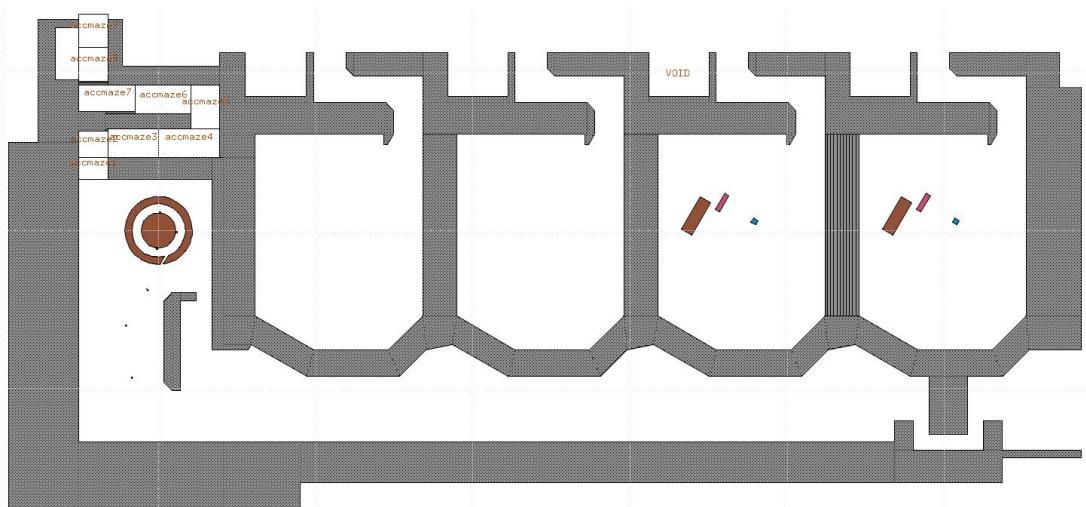


图 5.2.1.1-1 计算用模型俯视 (X-Z) 图

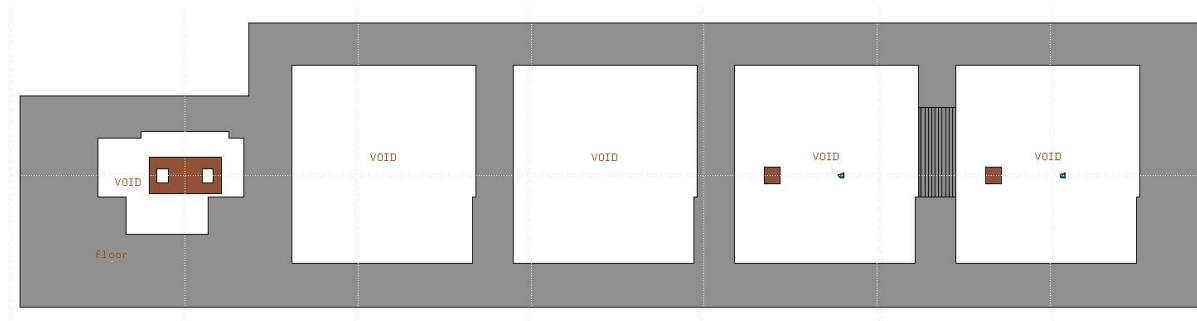


图 5.2.1.1-2 计算用模型剖面 (Y-Z) 图

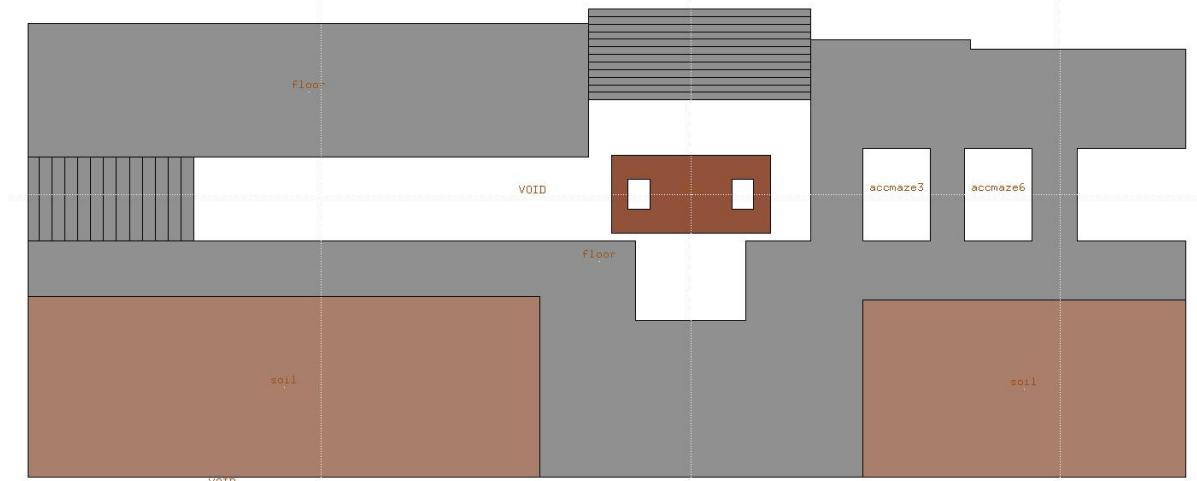


图 5.2.1.1-3 计算用模型剖面 (回旋加速器机房 X-Y) 图

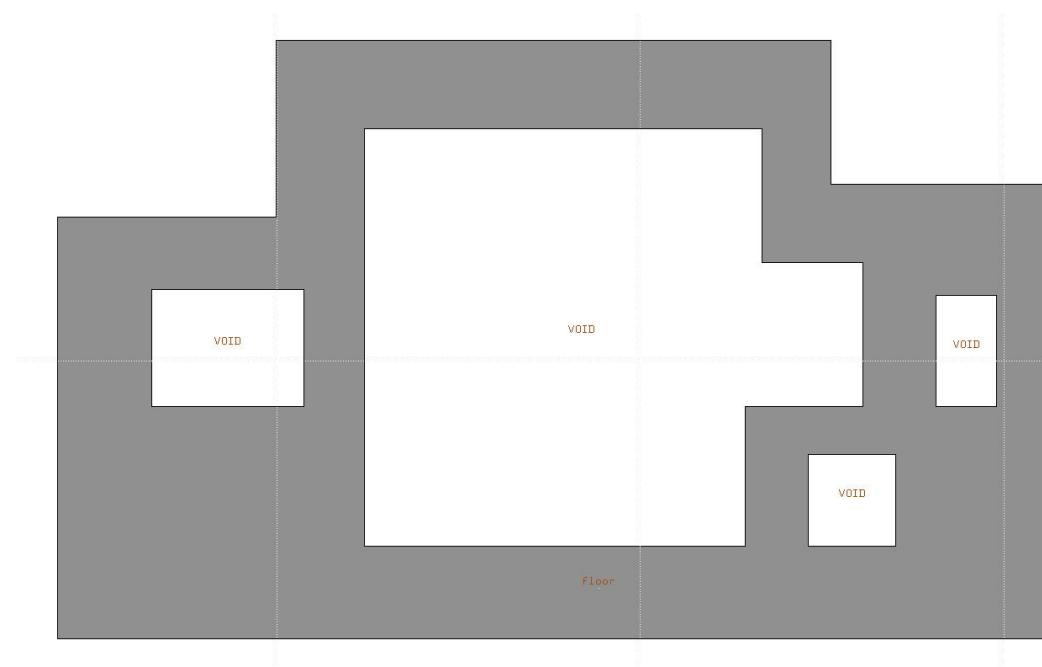


图 5.2.1.1-4 计算用模型剖面 (治疗室 X-Y) 图

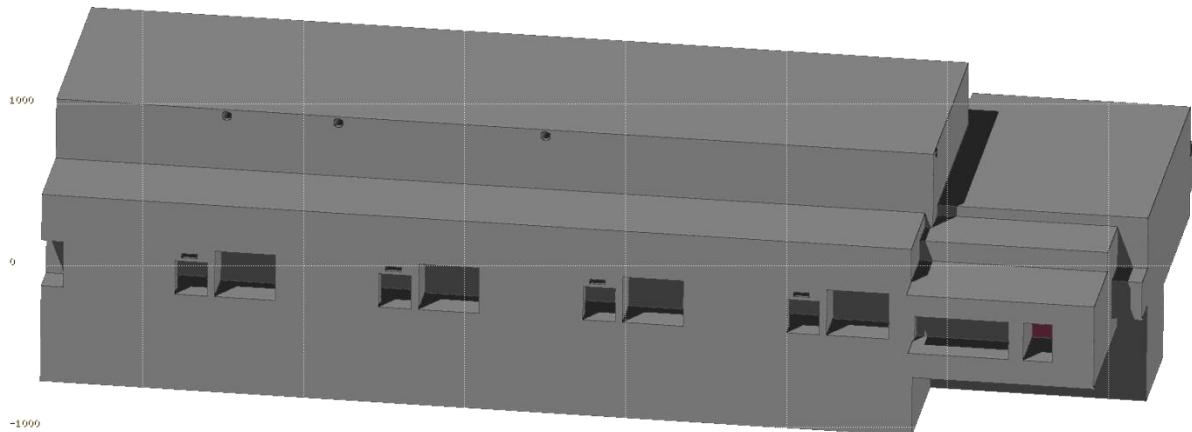


图 5.2.1.1-5 计算用模型 3D 图

#### 5.2.1.1.2计算结果

本项目质子放射治疗系统开展治疗时，此时回旋加速器机房和任一治疗室同时工作，本项目治疗室均为旋转治疗室，束流随着机架可完成  $360^{\circ}$  旋转，其出束方向为东-西垂直周向，不朝向迷道。考虑到束流方向垂直于墙或者最接近垂直于墙时，束流穿透屏蔽墙体的厚度最小。因此，本项目选取束流方向为垂直向上、垂直向下、水平向东和水平向西等 4 个方向进行分析评价。

4 间治疗室屏蔽设计方案基本一致，其中治疗室 1 东墙和治疗室 4 西墙采用更厚的混凝土墙体，其余防护均保持一致。由于每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一个治疗室提供束流，本次评价选取代表性情况开展模拟计算，不对每个治疗室进行重复性模拟。模拟情况具体见下述分析，计算结果考虑了中子剂量率和  $\gamma$  剂量率之和。

##### 5.2.1.1.2.1回旋加速器机房

回旋加速器机房和治疗室 1 同时工作，考虑最恶劣的情况即回旋加速器机房降能器降能到 70MeV 的情况以及治疗室 1 束流水平向西，此时回旋加速器机房束流损失最大并且受到治疗室 1 的辐射影响。经模拟计算，回旋加速器机房四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布如图 5.2.1.1-6 至图 5.2.1.1-8 所示。

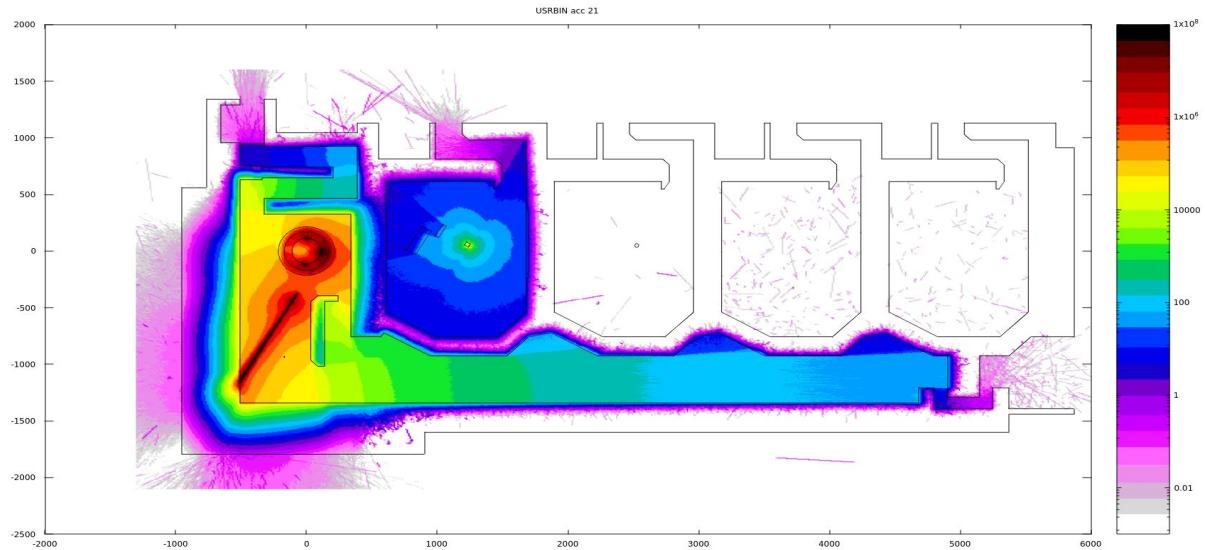


图 5.2.1.1-6 回旋加速器机房的剂量率分布 (X-Z)

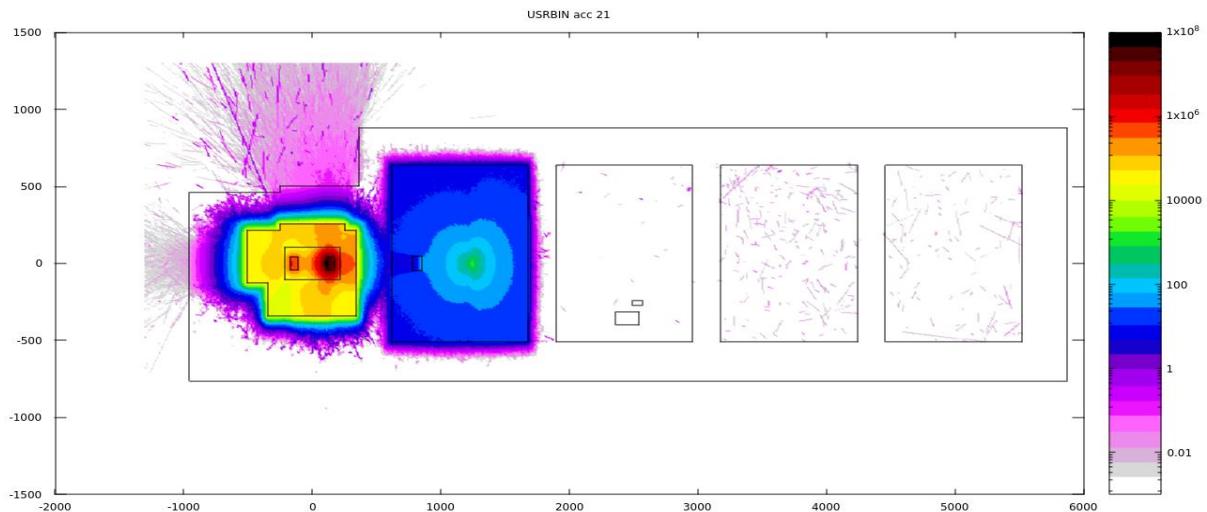


图 5.2.1.1-7 回旋加速器机房的剂量率分布 (Y-Z)

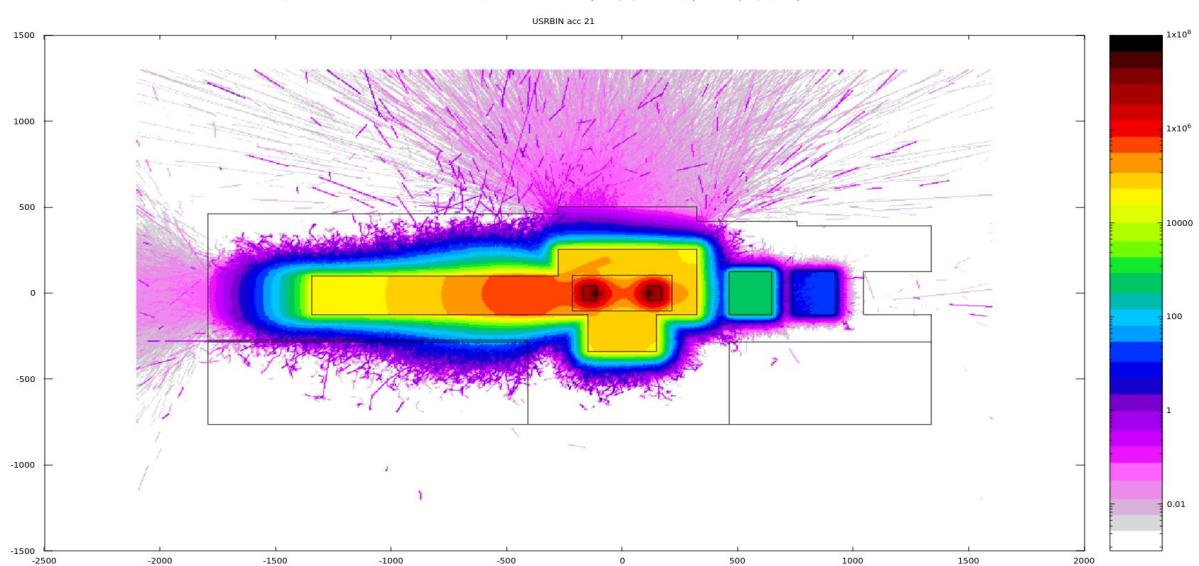


图 5.2.1.1-8 回旋加速器机房的剂量率分布 (X-Y)

根据模拟结果分析（图 5.2.1.1-6 至图 5.2.1.1-8）并结合表 5.2.1.1 可知，在考虑最恶劣的情况即回旋加速器机房降能器降能到 70MeV 的情况，回旋加速器机房运行时产生的辐射对治疗室 1 大部分关注点（如北墙外、东墙外、顶棚、地坪的关注点）的剂量贡献几乎可以忽略不计，对治疗室 2/3/4 外所有关注点的剂量贡献几乎可以忽略不计。

因此，后续在对治疗室 2/3/4 的模拟计算时，可以不考虑回旋加速器机房的影响。但考虑到治疗室 2 束流方向为水平向西时，治疗室 1 会同时受到回旋加速器机房和治疗室 2 的辐射影响，故该束流方向下考虑回旋加速器机房和治疗室 2 同时运行。

### 5.2.1.1.2.2 治疗室 2 束流方向水平向西

回旋加速器机房和治疗室 2 同时工作，考虑最恶劣的情况即治疗室 2 束流能量为 230MeV 的情况，束流从旋转治疗头到患者，选取束流方向为水平向西，此时治疗室 1 同时受到回旋加速器机房和治疗室 2 的辐射影响，治疗室 3 受到治疗室 2 的辐射影响。

经模拟计算，治疗室 2 束流方向水平向西时，四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布如图 5.2.1.1-9 至图 5.2.1.1-11 所示。

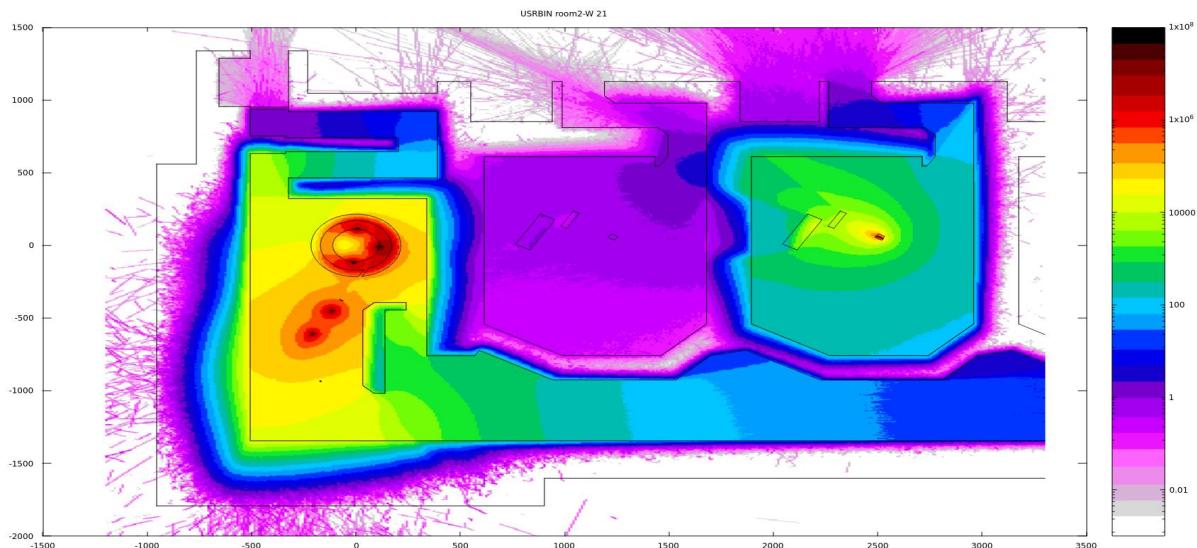


图 5.2.1.1-9 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Z)

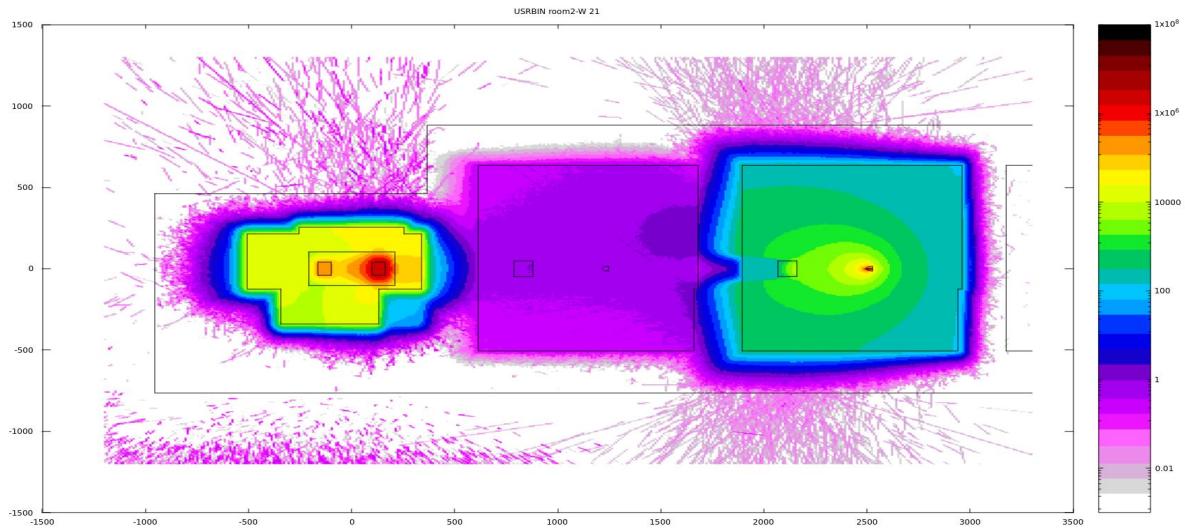


图 5.2.1.1-10 治疗室 2 的剂量率分布 (Y-Z)

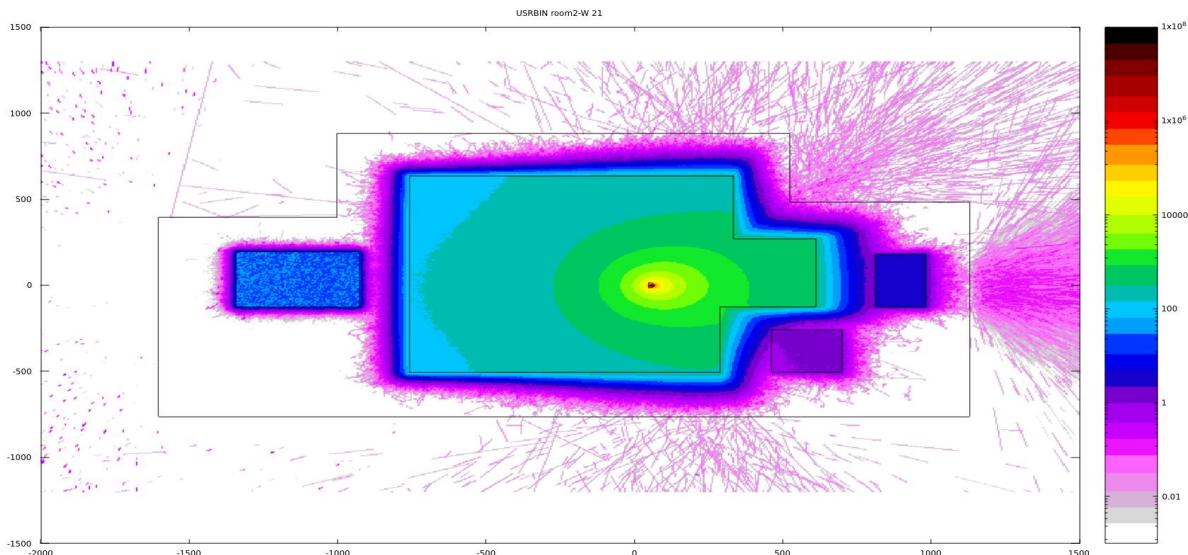


图 5.2.1.1-11 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Y)

### 5.2.1.1.2.3 治疗室 2 束流方向水平向东

对于任一治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况。考虑治疗室 2 束流能量为 230MeV 的情况，束流从旋转治疗头到患者，选取束流方向为水平向东，此时相邻治疗室 1 和治疗室 3 同时受到治疗室 2 的辐射影响。

经模拟计算，治疗室 2 束流方向水平向东时，四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布如图 5.2.1.1-12 至图 5.2.1.1-14 所示。

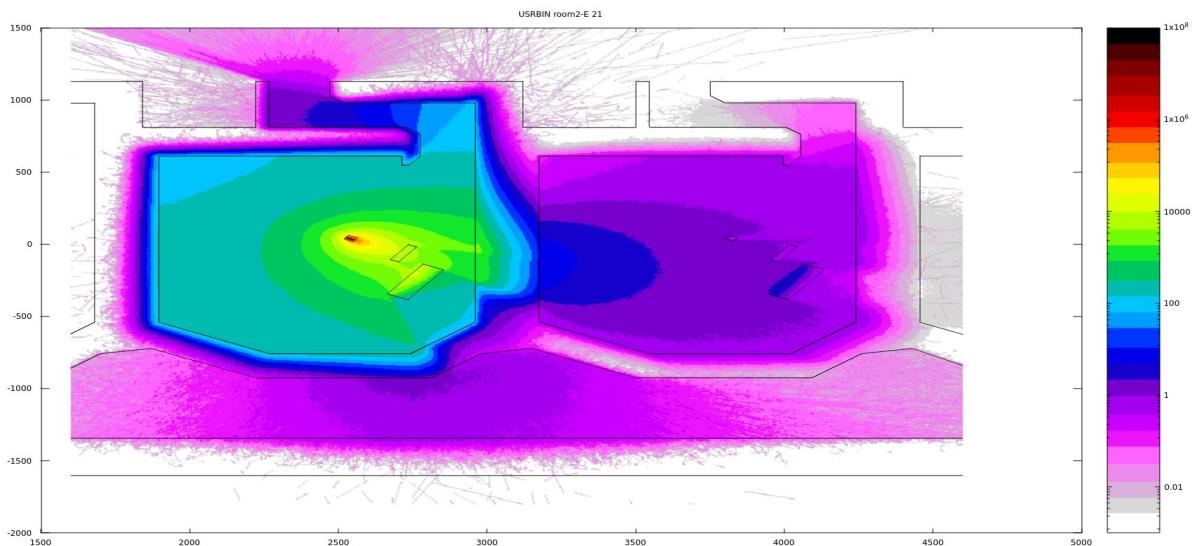


图 5.2.1.1-12 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Z)

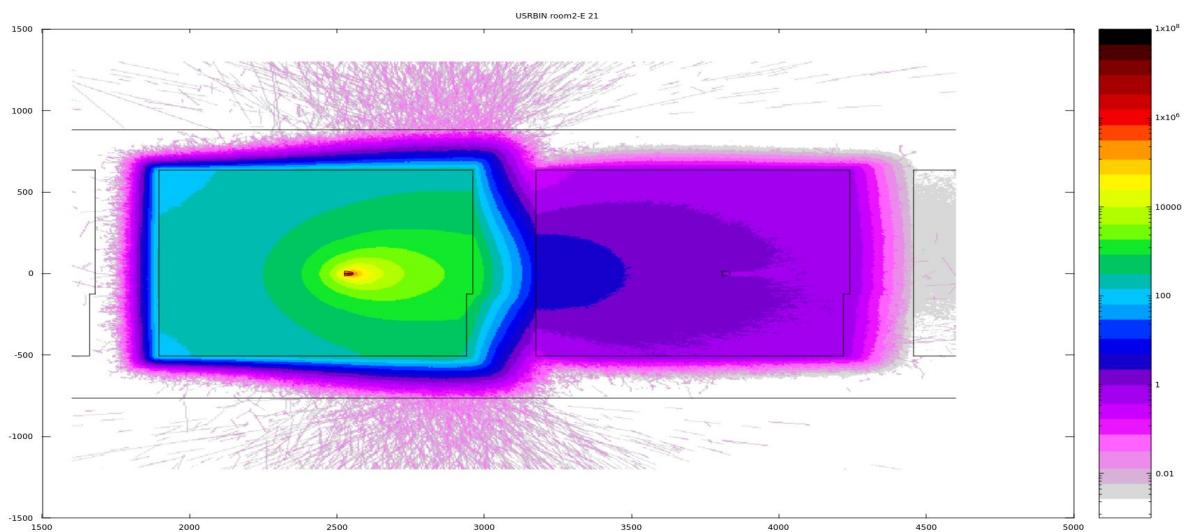


图 5.2.1.1-13 治疗室 2 的剂量率分布 (Y-Z)

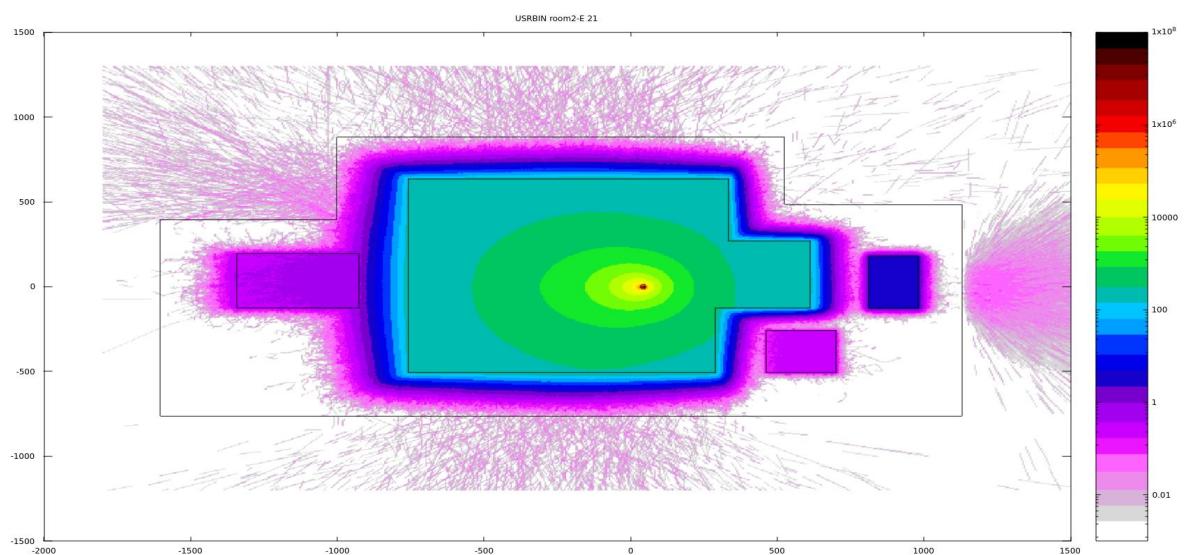


图 5.2.1.1-14 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Y)

#### 5.2.1.1.2.4 治疗室 2 束流方向垂直向上

对于任一治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况。考虑治疗室 2 束流能量为 230MeV 的情况，束流从旋转治疗头到患者，选取束流方向为垂直向上，此时相邻治疗室 1 和治疗室 3 同时受到治疗室 2 的辐射影响。

经模拟计算，治疗室 2 束流方向垂直向上时，四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布如图 5.2.1.1-15 至图 5.2.1.1-17 所示。

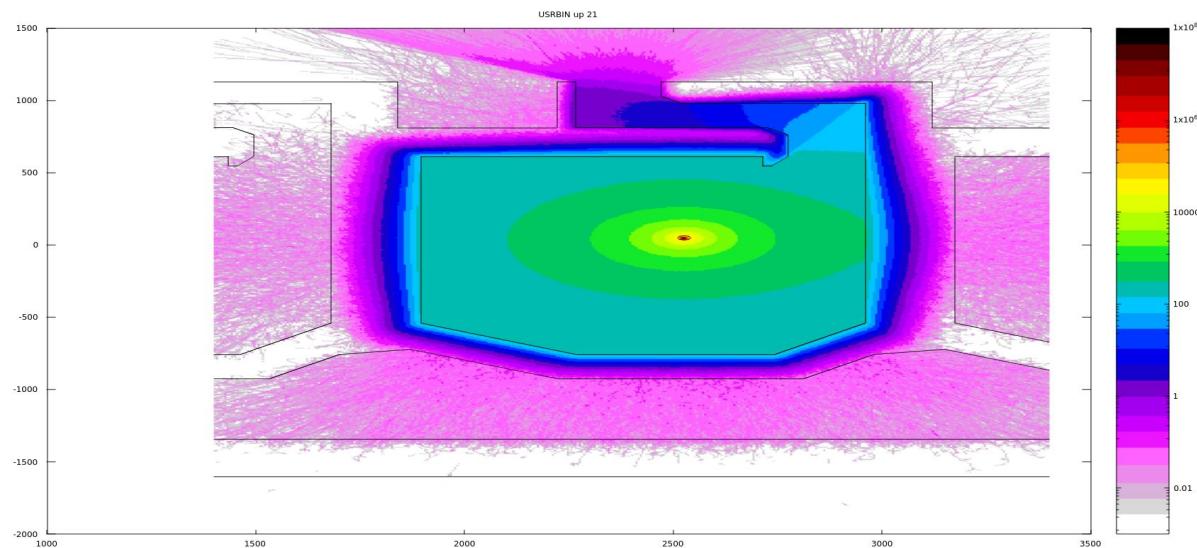


图 5.2.1.1-15 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Z)

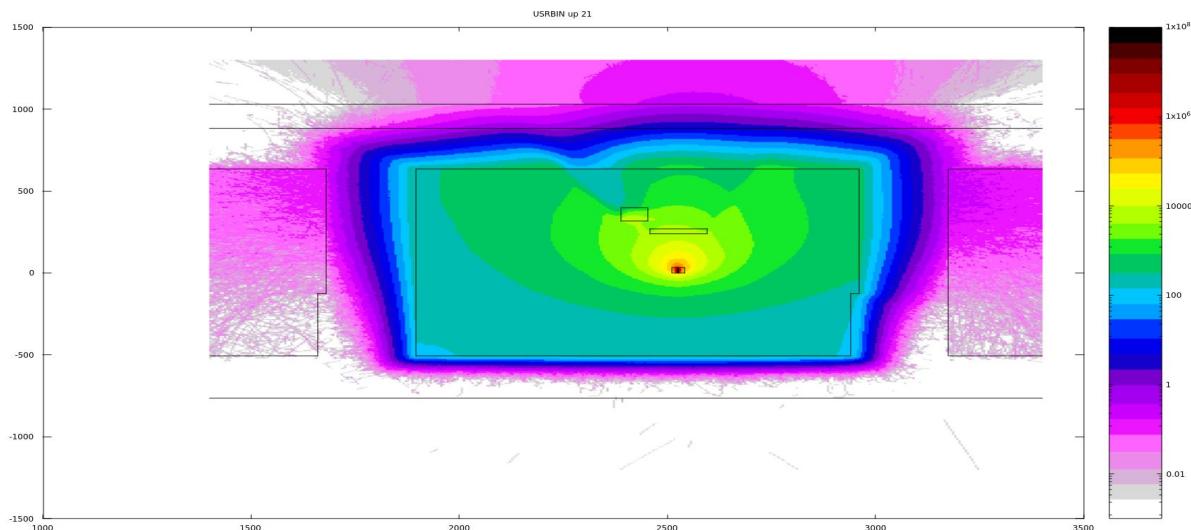


图 5.2.1.1-16 治疗室 2 的剂量率分布 (Y-Z)

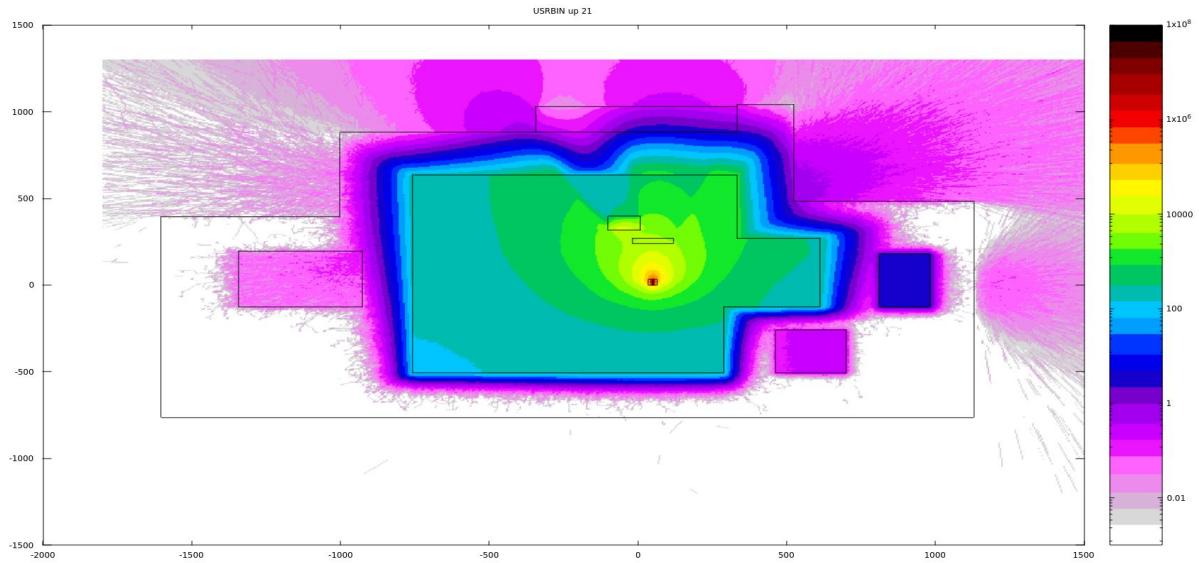


图 5.2.1.1-17 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Y)

#### 5.2.1.1.2.5 治疗室 2 束流方向垂直向下

对于任一治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况。考虑治疗室 2 束流能量为 230MeV 的情况，束流从旋转治疗头到患者，选取束流方向为垂直向下，此时相邻治疗室 1 和治疗室 3 同时受到治疗室 2 的辐射影响。

经模拟计算，治疗室 2 束流方向垂直向下时，四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布如图 5.2.1.1-18 至图 5.2.1.1-20 所示。

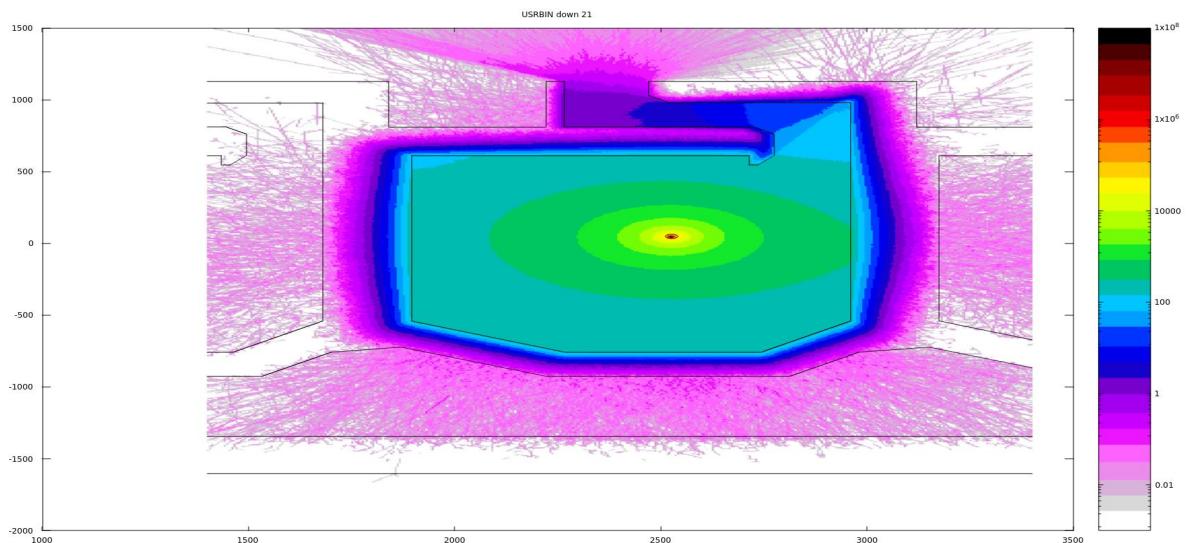


图 5.2.1.1-18 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Z)

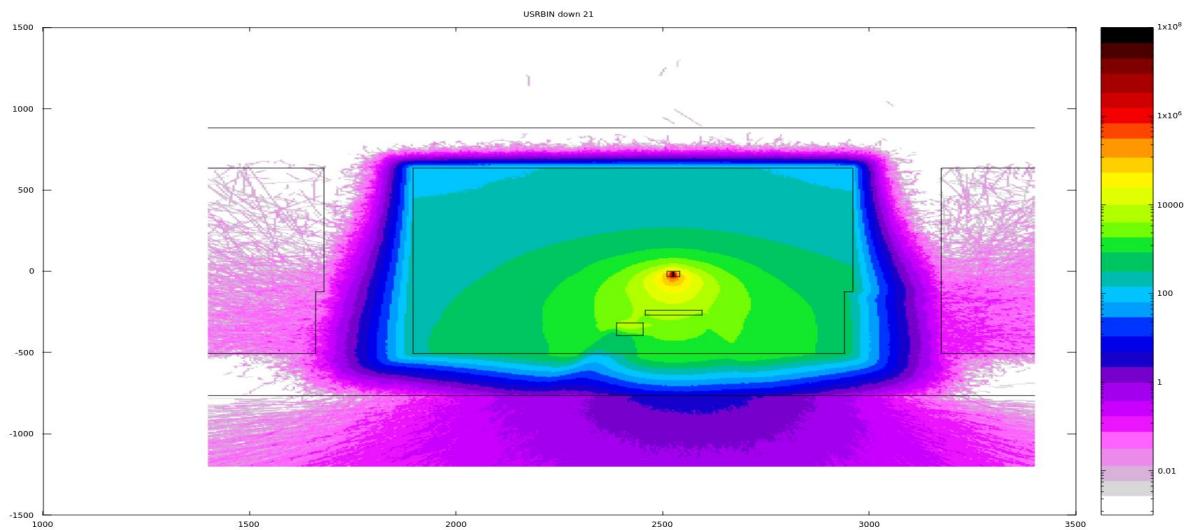


图 5.2.1.1-19 治疗室 2 的剂量率分布 (Y-Z)

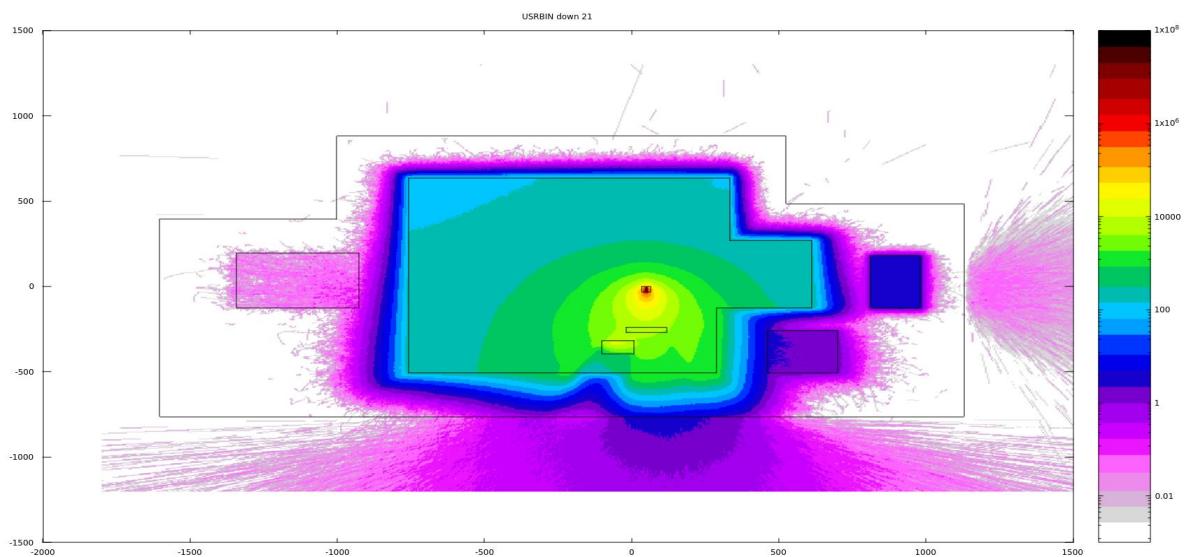


图 5.2.1.1-20 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Y)

根据上述模拟计算，可明确治疗室 2 在垂直向上、垂直向下、水平向东和水平向西等 4 个束流方向下，机房四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布情况。考虑到下述原因：①4 间治疗室四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方对应关注点情况基本一致，其中治疗室 1 东墙外为回旋加速器机房（控制区不作为关注点考虑），治疗室 4 西墙和南墙外为后区，其余各侧关注点情况均保持一致（东侧和西侧均为相邻治疗室，南侧均为束流传输隧道，北侧均为治疗控制室等辅助用房，顶棚上方为地面绿化，地坪下方为土层）；②4 间治疗室屏蔽设计方案基本一致，其中治疗室 1 东墙和治疗室 4 西墙采用更厚的混凝土墙体，其余防护均保持一致；③由于每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一个治疗室提供束流。本次评价额外对治疗室 4 水平向东和水平向西这 2 个束流方向进行模拟计算，不再对其他治疗室进行重复性模拟，模拟情况具体

见下述分析。

### 5.2.1.1.2.6 治疗室 4 束流方向水平向西

对于任一治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况。考虑治疗室 4 束流能量为 230MeV 的情况，束流从旋转治疗头到患者，选取束流方向为水平向西，此时相邻治疗室 3 受到治疗室 4 的辐射影响。

经模拟计算，治疗室 4 束流方向水平向西时，四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布如图 5.2.1.1-21 至图 5.2.1.1-23 所示。

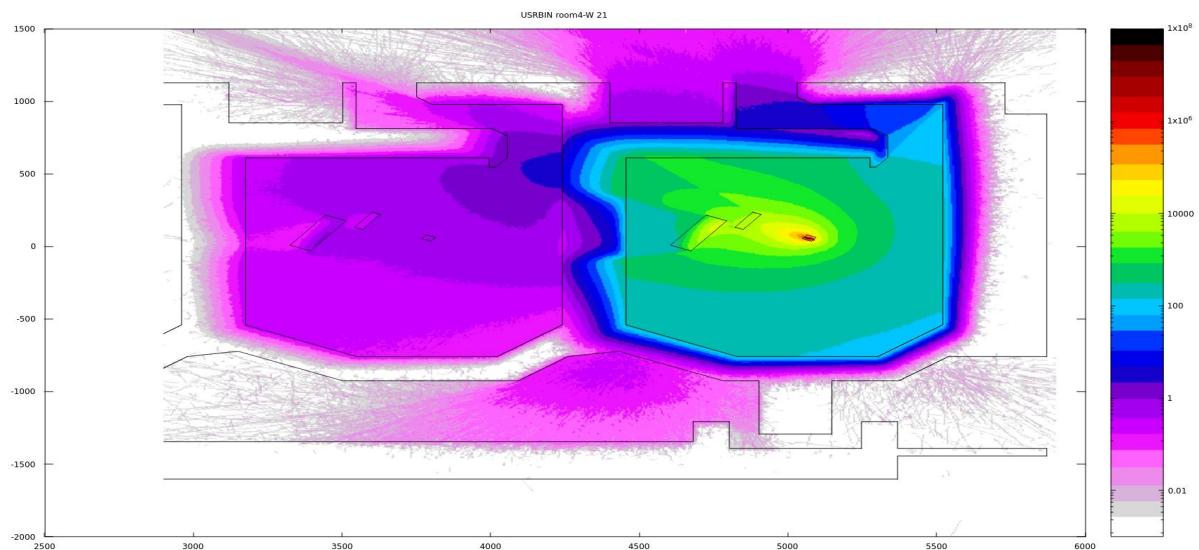


图 5.2.1.1-21 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Z)

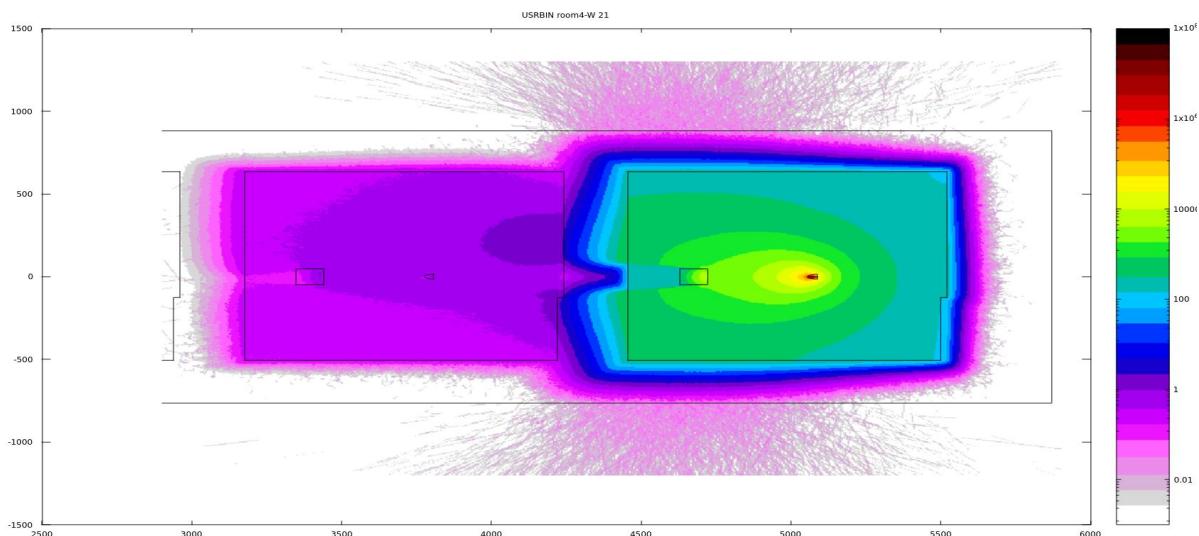


图 5.2.1.1-22 治疗室 2 的剂量率分布 (Y-Z)

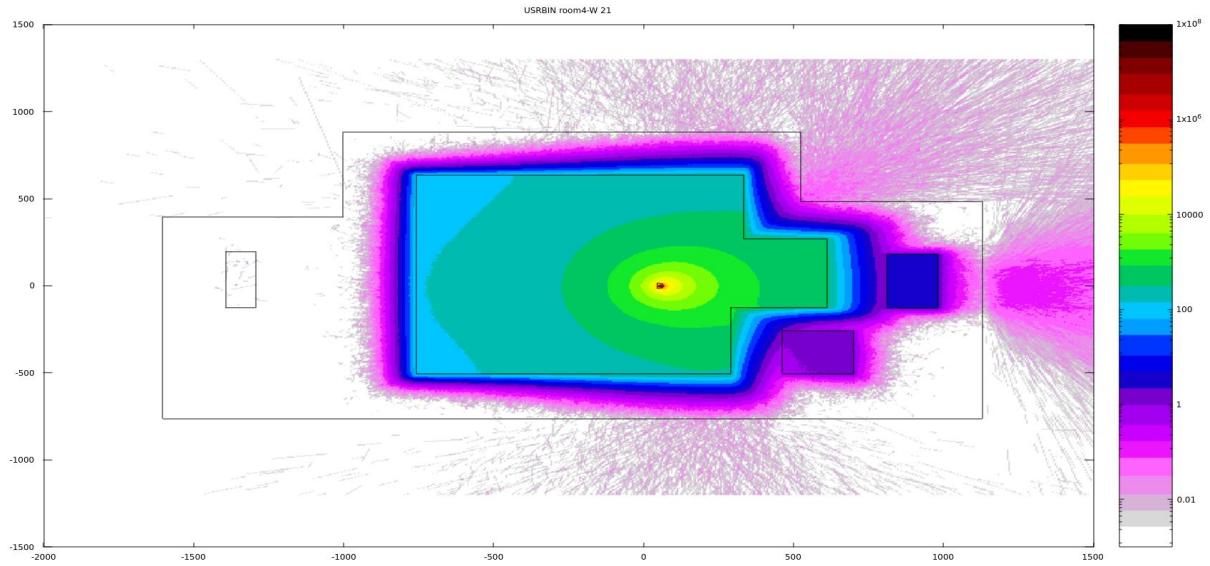


图 5.2.1.1-23 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Y)

#### 5.2.1.1.2.7 治疗室 4 束流方向水平向东

对于任一治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况。考虑治疗室 4 束流能量为 230MeV 的情况，束流从旋转治疗头到患者，选取束流方向为水平向东，此时相邻治疗室 3 受到治疗室 4 的辐射影响。

经模拟计算，治疗室 2 束流方向水平向东时，四侧墙体外侧、顶棚上方、地坪下方的剂量率分布如图 5.2.1.1-24 至图 5.2.1.1-26 所示。

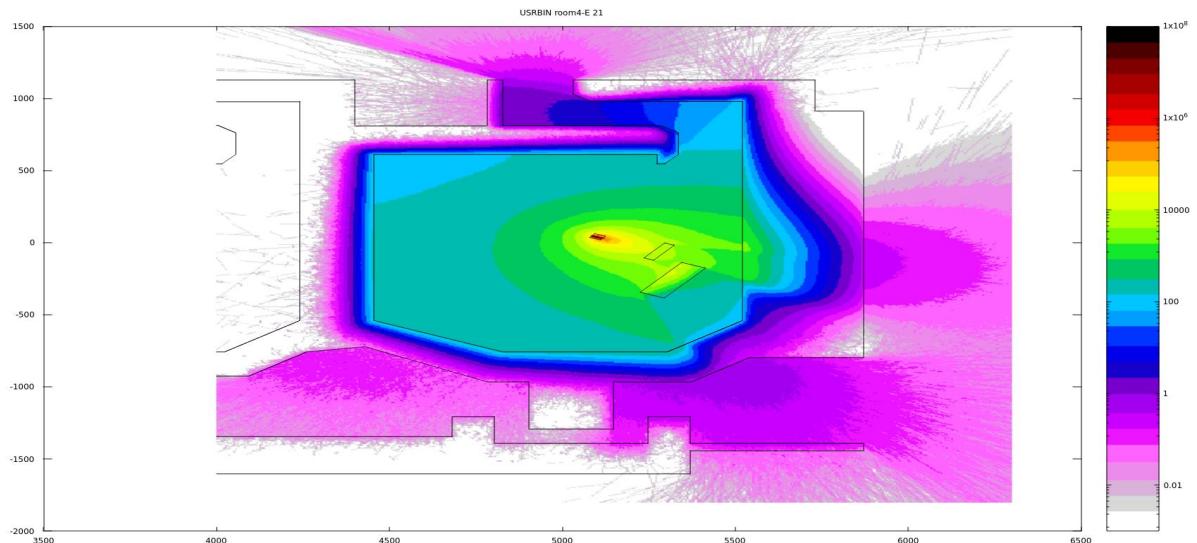


图 5.2.1.1-24 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Z)

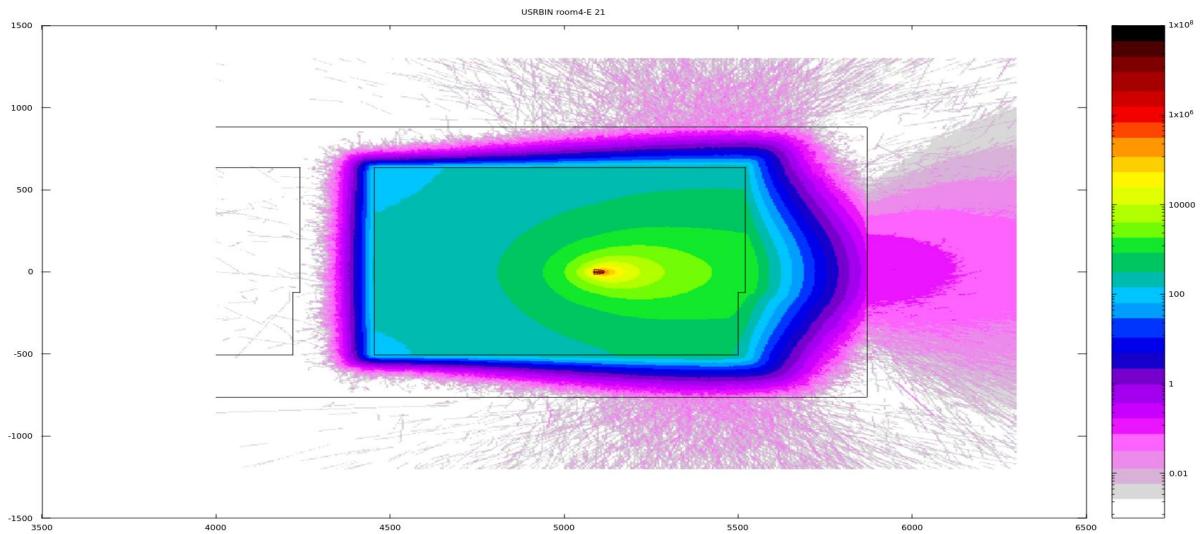


图 5.2.1.1-25 治疗室 2 的剂量率分布 (Y-Z)

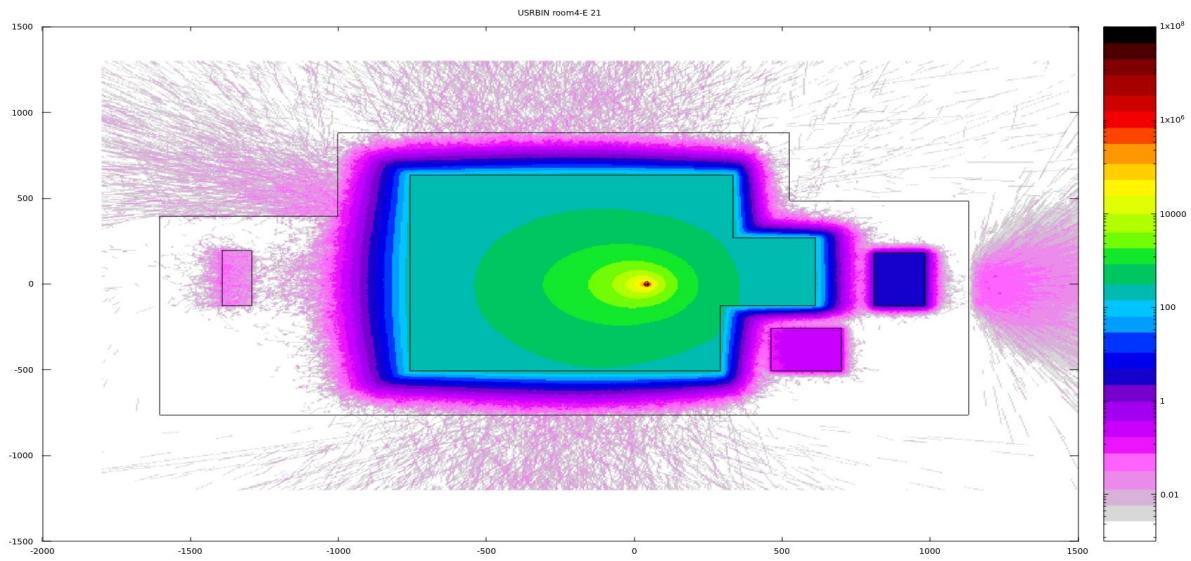


图 5.2.1.1-26 治疗室 2 的剂量率分布 (X-Y)

### 5.2.1.1.3 机房屏蔽体外剂量率计算小结

本项目屏蔽计算的关注点主要包括质子放射治疗系统运行时，回旋加速器和任一治疗室四周屏蔽墙外 30 cm 处、各屏蔽门外 30 cm 处、地坪下方 30 cm 处、顶棚上方 30 cm 处及管道穿墙处，关注点位置如图 5.2.1.1-27~图 5.2.1.1-31 所示，各关注点处的剂量率和剂量率控制水平列于下表。

表 5.2.1.1-2 回旋加速器机房屏蔽体外关注点及其剂量率控制水平

场所	楼层	方位	关注点	周围环境	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
回旋加速器 机房	负二层	北	A1	维护室	<0.001	10.00
		北	A2	门外缓冲间	0.032	10.00
				管道穿墙处: 门外缓冲间	0.030	10.00
		北	A3	总控室	0.058	1.71
		北	A4	服务器机房	0.027	1.37
		北	A5	治疗控制室 1	<0.001	1.71
		东	A6	质子治疗室 1	此时质子治疗室 1 正在出束治 疗, 作为控制区不读数(下 同)	3.43
		东	A7	质子治疗室 1		3.43
		南	A8	土层	<0.001	5000
		南	A9	土层	0.327	5000
		西	A10	土层	0.067	5000
		西	A11	土层	<0.001	5000
	负三层	北	A12	高压细水雾机房	<0.001	1.37
		东	A13	质子治疗室 1	/	3.43
		南	A14	土层	<0.001	5000
		南	A15	土层	0.023	5000
		西	A16	土层	0.011	5000
		西	A17	土层	<0.001	5000
	负一层	北	A18	水冷机房	<0.001	1.37
		东	A19	质子治疗室 1	/	3.43
		南	A20	土层	0.082	5000
		西	A21	土层	0.075	5000

场所	楼层	方位	关注点	周围环境	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
剖面		底	A22	土层	<0.001	5000
		底	A23	土层	<0.001	5000
		顶	A24	不可上人屋面	0.114	3.43
		顶	A25	封闭吊装口上方	0.041	1.37
		顶	A26	地面绿化	0.006	1.37
		顶	A27	质子治疗中心一层(主要是库房)	0.023	1.37
		顶	A28	质子治疗中心二层(不可上人屋面)	0.008	3.43
		顶	A29	质子治疗中心一层(治疗计划办公室)	0.001	1.71
		顶	A30	质子治疗中心一层(会议室)	<0.001	1.37

表 5.2.1.1-3 质子治疗室 2 屏蔽体外关注点及其剂量率控制水平

场所	楼层	方 位	关注 点	周围环境	各束流方向下的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$					剂量率控制 水平, $\mu\text{Sv/h}$
					垂直向上	垂直向下	水平向东	水平向西	最大值	
质子治疗室 2	负二层	北	C1	治疗控制室 2	0.044	0.042	0.01	0.871	0.871	2.50
		北	C2	门外缓冲间	0.329	0.331	0.376	0.645	0.645	10.00
				管道穿墙处: 门外缓冲间	0.318	0.332	0.376	0.636	0.636	10.00
		北	C3	模具兼男更室及女更室	0.025	0.021	0.015	0.016	0.025	5.49
		北	C4	治疗控制室 3	0.009	0.008	0.002	0.002	0.009	2.50
		东	C5	质子治疗室 3	0.021	0.021	0.203	0.001	0.203	10.00
		东	C6	质子治疗室 3	0.052	0.05	7.723	<0.001	7.723	10.00
		南	C7	土层	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.001	5000
		西	C8	质子治疗室 1	0.008	0.009	<0.001	3.27	3.27	10.00

场所	楼层	方 位	关注 点	周围环境	各束流方向下的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$					剂量率控制 水平, $\mu\text{Sv/h}$
					垂直向上	垂直向下	水平向东	水平向西	最大值	
质子治疗室剖面	负三层	西	C9	质子治疗室 1	0.041	0.039	0.001	0.488	0.488	10.00
		西	C10	质子治疗室 1 工作人员操作位	束流水平向西时, 剂量率最大为 0.854					/
		北	C11	送风机房	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	5.49
		东	C12	质子治疗室 3	0.003	0.223	1.259	<0.001	1.259	10.00
		南	C13	土层	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	5000
	负一层	西	C14	质子治疗室 2	0.004	0.111	<0.001	1.69	1.69	10.00
		北	C15	质子设备电源间	0.706	<0.001	0.003	0.316	0.706	5.49
		北	C16	管道穿墙处: 质子设备电源间	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	5.49
		东	C17	质子治疗室 3	0.231	0.004	0.602	<0.001	0.602	10.00
		南	C18	土层	0.03	<0.001	0.078	<0.001	0.078	5000
		西	C19	质子治疗室 1	0.129	0.003	<0.001	0.946	0.946	10.00
	质子治疗中心	底	F1	土层	<0.001	3.333	0.007	0.007	3.333	5000
		底	F2	不可上人屋面	0.462	<0.001	0.01	0.009	0.462	10.00
		顶	F3	封闭吊装口上方	0.178	<0.001	0.009	0.011	0.178	5.49
		顶	F4	地面绿化	0.209	<0.001	0.009	0.008	0.209	5.49
		顶	F5	质子治疗中心一层 (主要是候诊大厅)	0.028	<0.001	0.001	0.001	0.028	5.49
		顶	F6	质子治疗中心二层 (主要是化疗中心座椅治疗区)	0.04	<0.001	0.003	0.003	0.04	0.69
		顶	F7	质子治疗中心三层 (主要是预留用房)	2.43E-02*	<0.001	<0.001	<0.001	2.43E-02	0.34
		顶	F8	质子治疗中心屋面设备区	1.51E-02*	<0.001	<0.001	<0.001	1.51E-02	5.49

注\*: F7 和 F7 剂量率根据 F6 点位的模拟结果  $0.04\mu\text{Sv/h}$  与距离平方成反比的关系导出, 非实际模拟结果。

表 5.2.1.1-4 质子治疗室 4 屏蔽体外关注点及其剂量率控制水平

场所	楼层	方位	关注点	周围环境	各束流方向下的剂量率, $\mu\text{Sv}/\text{h}$		剂量率控制水平, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	
					水平向东	水平向西		
质子治疗室 4	负二层	北	E1	治疗控制室 4	0.01	0.791	2.50	
		北	E2	门外缓冲间	0.388	0.628	10.00	
				管道穿墙处: 门外缓冲间	0.374	0.611	10.00	
		北	E3	麻醉兼抢救室、病人恢复室	0.014	0.019	5.49	
		东北	E4	配电间	<0.001	<0.001	5.49	
		东北	E5	质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间	<0.001	0.002	5.49	
		东北	E6	科研实验用房	<0.001	<0.001	0.34	
		东	E7	后区	0.238	<0.001	10.00	
		东	E8	后区	0.699	0.006	10.00	
	负一层	负三层	东	E9	后区	0.493	<0.001	10.00
		西	E10	质子治疗室 3	<0.001	3.325	10.00	
		西	E11	质子治疗室 3	<0.001	0.435	10.00	
		南	E12	土层	<0.001	<0.001	5000	
		北	E13	衰变池机房	<0.001	<0.001	5.49	
		东	E14	土层	0.035	<0.001	5000	
		南	E15	土层	<0.001	<0.001	5000	
		西	E16	质子治疗室 3	<0.001	1.617	10.00	
		北	E17	管道穿墙处: 补水机房	<0.001	<0.001	5.49	
		北	E18	补水机房	0.002	0.052	5.49	
		东	E19	土层	0.016	<0.001	5000	
		南	E20	土层	0.027	<0.001	5000	
		西	E21	质子治疗室 3	<0.001	0.831	10.00	

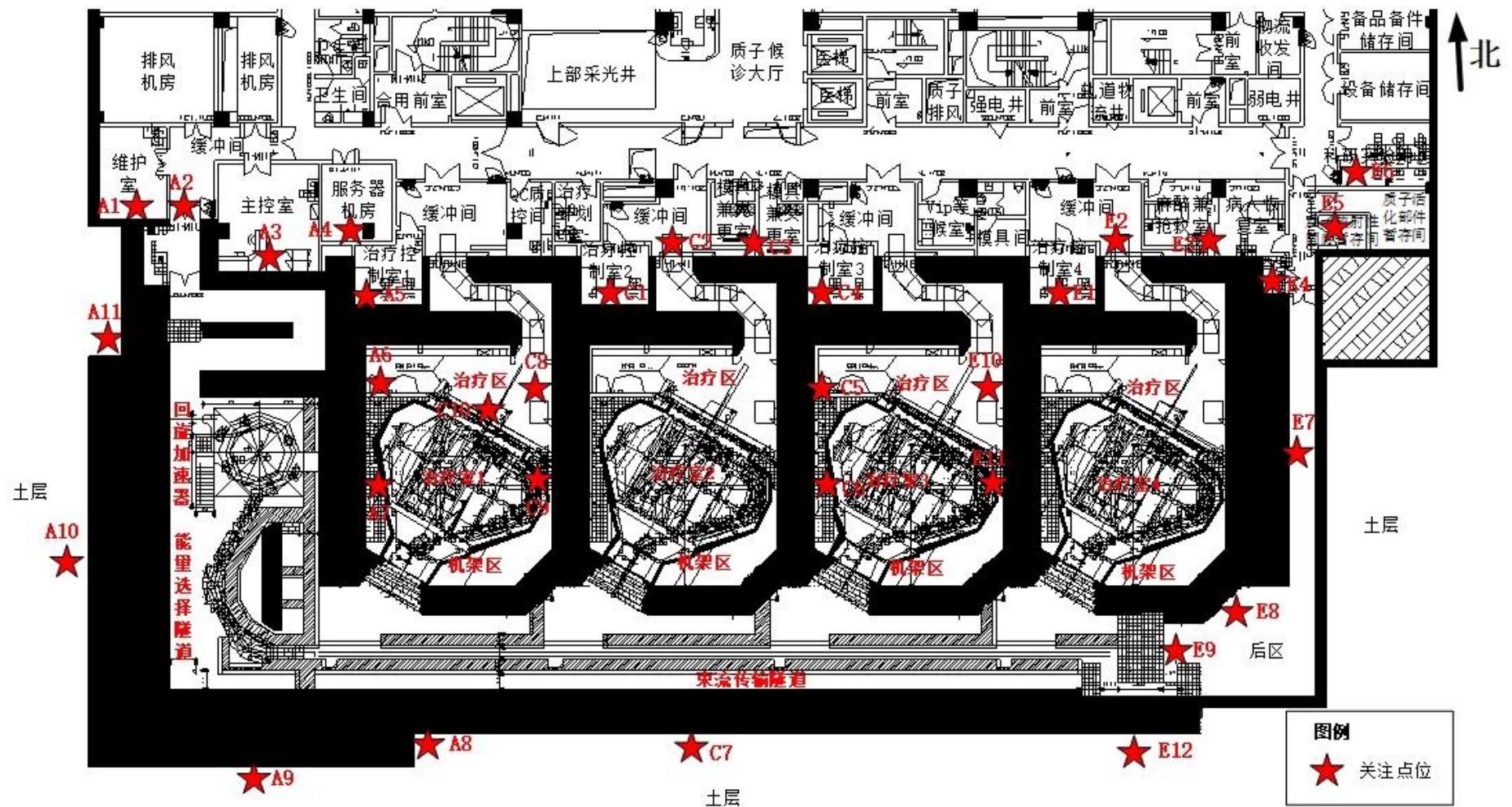


图 5.2.1.1-27 质子治疗机房负二层关注点分布示意图

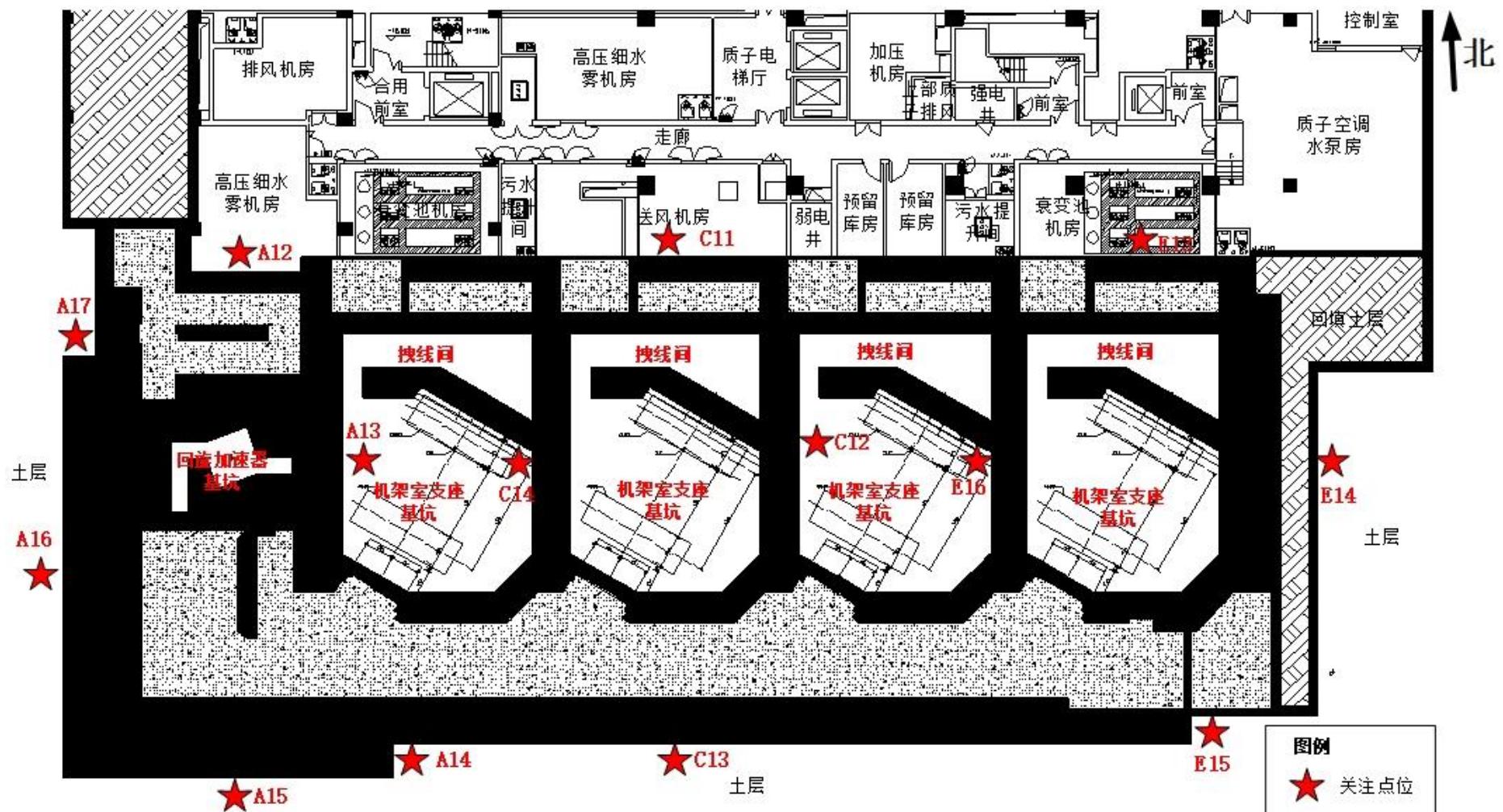


图 5.2.1.1-28 质子治疗机房负三层关注点分布示意图

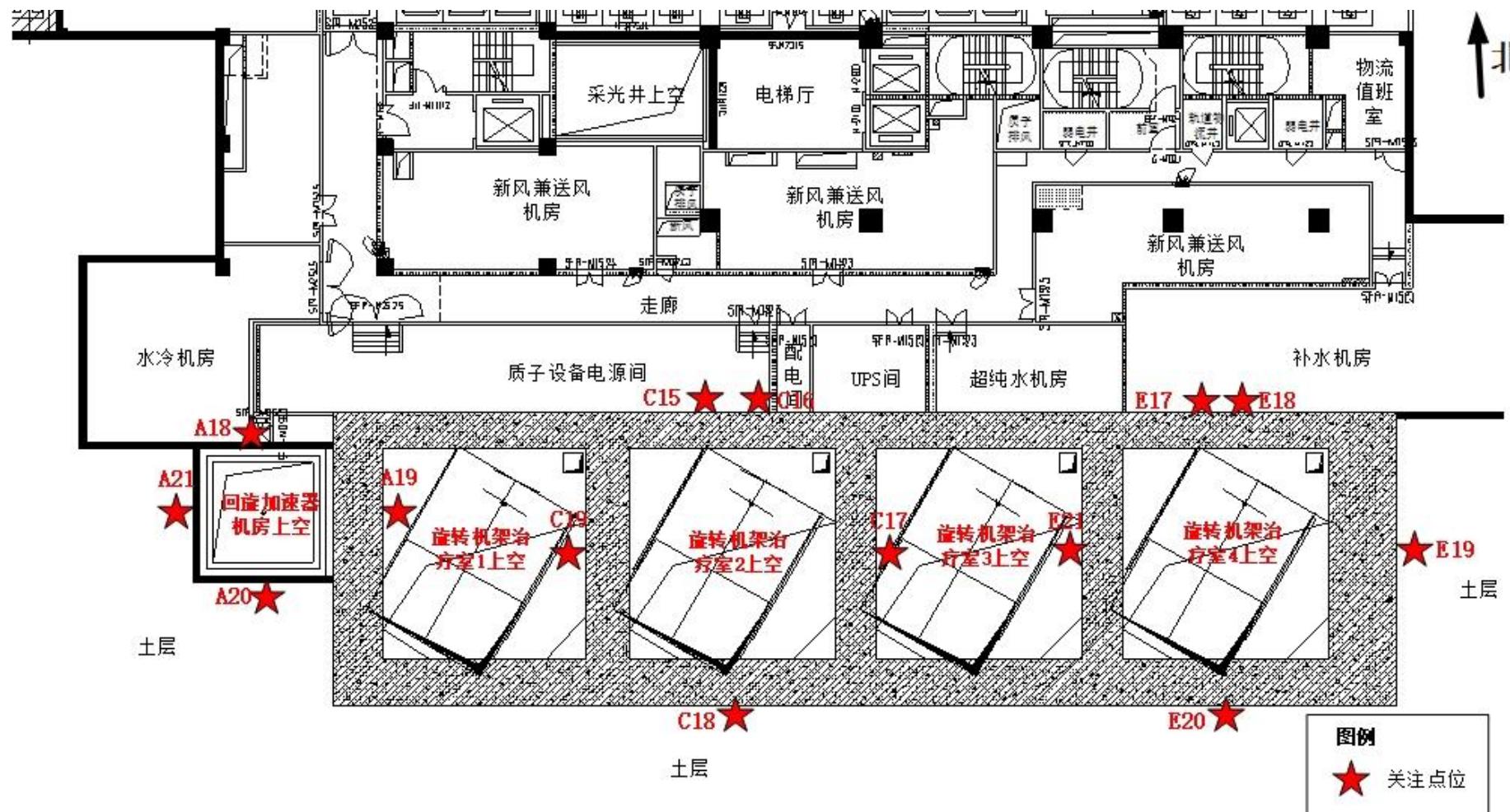


图 5.2.1.1-29 质子治疗机房负一层关注点分布示意图

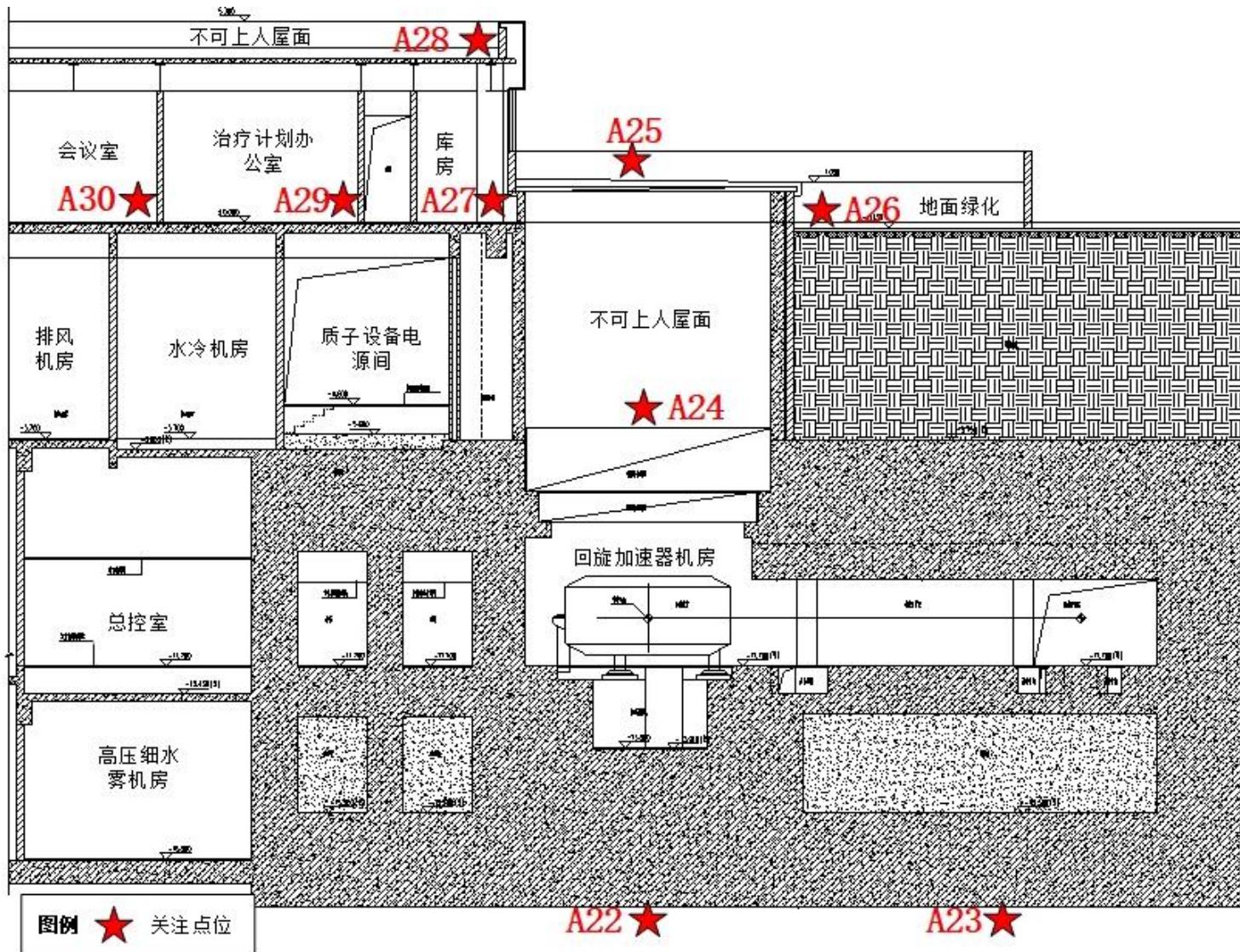


图 5.2.1.1-30 回旋加速器机房剖面关注点分布示意图

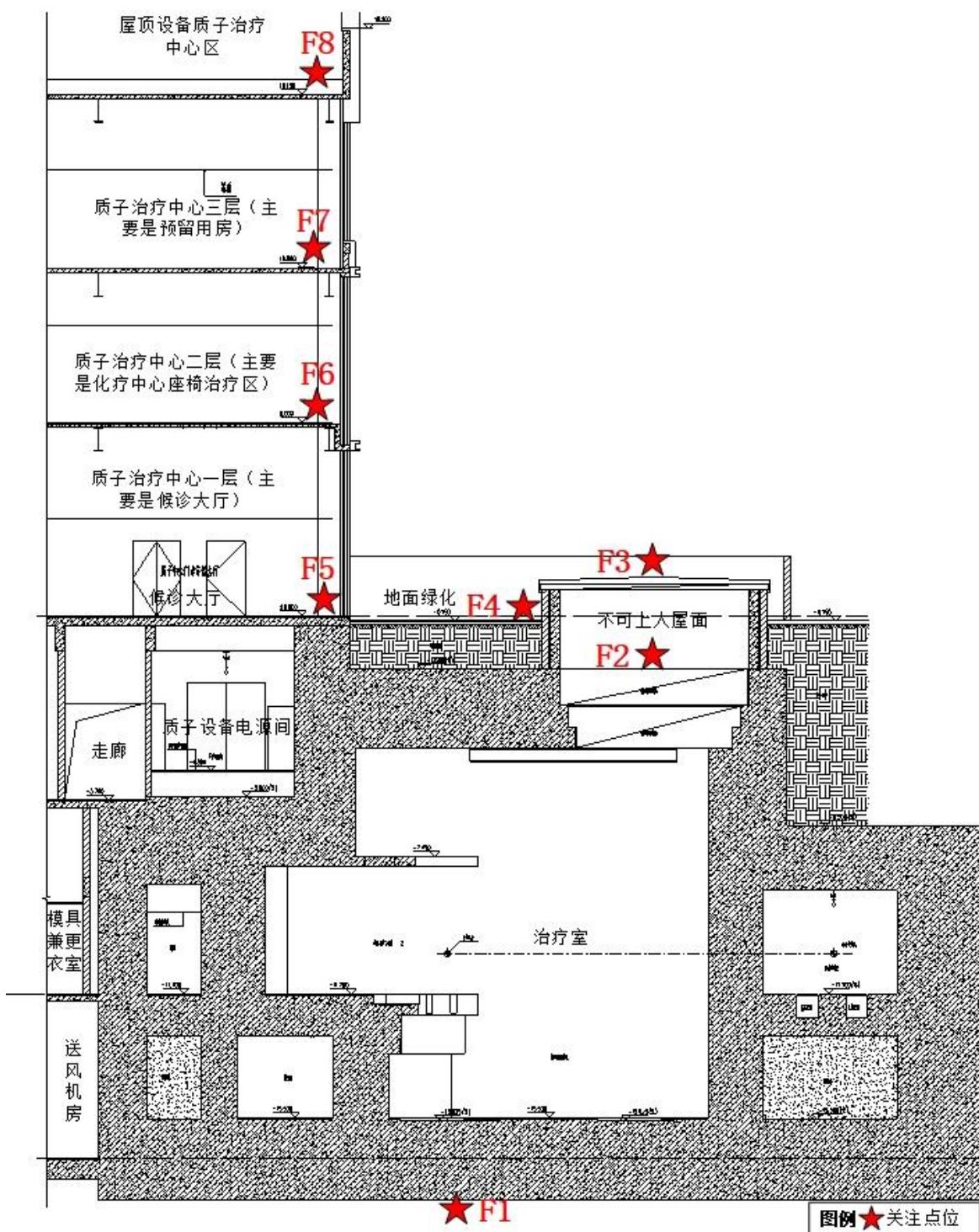


图 5.2.1.1-31 治疗室剖面关注点位分布示意图

### 5.2.1.2 工作人员受照剂量估算

本项目质子放射治疗系统的工作人员主要包括医生、物理师、治疗技师、护士、维修工程师，如表 3.2.1.4-2。质子放射治疗系统正常运行期间，人员的有效剂量参考方杰主编的《辐射防护导论》中的公式计算，计算公式如下：

$$D_{Eff} = Dr \times t \times T \times U \quad (\text{式 5.2.1.2-1})$$

式中：

$D_{Eff}$ —辐射外照射人均年有效剂量，mSv；

$Dr$ —辐射剂量率，mSv/h；

$T$ —居留因子；

$t$ —工作时间，h。

#### 5.2.1.2.1 医生

医生的工作地点主要在办公室和诊室内，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内部，每名医生在治疗室内部的工作时间不会超过 20h/年。

保守以医生在患者治疗结束 1min 内进入质子治疗机房内部，医生在治疗室内接触的是受到照射的患者，该过程中医生所在区域的瞬时剂量率主要来自患者自身感生放射性剂量率，以及相邻治疗室出束治疗情况下的瞬时剂量率。根据表 3.3.1.3-13，质子放射治疗系统停机 1min 后，质子治疗机房内患者 50cm 处的剂量率为  $36.6\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；根据表 5.2.1.1-3，C10 点位（质子治疗室 1 工作人员操作位）的剂量率最大值为  $0.854\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，作为相邻治疗室治疗期间对治疗医生的叠加剂量率。居留因子均取 1，每名医生所受的年有效剂量估算结果如下表所示。

表 5.2.1.2-1 每名治疗医生所受的年有效剂量估算结果

工作区域	辐射来源	剂量率, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	年受照时间, h	年有效剂量, mSv/a	
治疗室	患者感生放射性	36.6	20	7.32E-01	7.49E-01
	相邻治疗室瞬发辐射	0.854		1.71E-02	

#### 5.2.1.2.2 治疗技师

根据质子放射治疗系统的治疗流程，治疗技师的工作内容主要包括在治疗前的模拟定位，在治疗室指导患者治疗前摆位，在治疗控制室内操作 X 射线管进行精确的位置验证，在治疗控制室内操作质子放射治疗系统出束，治疗结束后在治疗室对患者解除摆

位并协助其离开机房。其受照途径主要考虑外照射(瞬发辐射外照射和空气浸没外照射)和吸入内照射。

其中治疗前的模拟定位环节在负二层放疗中心模拟定位 CT 机房内进行，主要由相关 CT 技师进行操作，具体见后文模拟定位 CT 人员受照剂量计算。

#### 5.2.1.2.2.1 在治疗室内摆位/解除摆位

治疗室内的患者摆位分为两种，即治疗前摆位和治疗后解除摆位。根据表 3.2.1.4-1，单间治疗室每年治疗次数为 7500 人次，则 4 间治疗室每年总治疗次数为 30000 人次。每次治疗前摆位所需时间为 5min，治疗后对患者解除摆位并协助其离开机房所需时间为 1min，因此单间治疗室治疗前摆位年所需时间为 625h，治疗后对患者解除摆位并协助其离开机房年所需时间为 125h。每次患者治疗前摆位由 2 名治疗技师共同完成，治疗后对患者解除摆位由 1 名治疗技师完成，本项目单间治疗室配备 4 名治疗技师轮班，每名治疗技师参与患者治疗前摆位年所需时间为 312.5h，治疗后对患者解除摆位并协助其离开机房年所需时间为 31.25h。

##### (1) 治疗前摆位

患者每次治疗前，治疗技师在治疗室内接触的是未受到照射的患者，该过程中治疗技师所在区域的瞬时剂量率主要来自相邻治疗室出束治疗情况下的瞬时剂量率。根据表 5.2.1.1-3，C10 点位（质子治疗室 1 工作人员操作位）的剂量率最大值为  $0.854\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，作为相邻治疗室治疗期间对治疗技师的叠加剂量率。居留因子均取 1，每名治疗技师所受的年有效剂量估算结果如下表所示。

表 5.2.1.2-2 每名治疗技师所受的年有效剂量估算结果

工作区域	辐射来源	剂量率, $\mu\text{Sv}/\text{h}$	年受照时间, h	年有效剂量, mSv/a
治疗室	相邻治疗室瞬发辐射	0.854	312.5	2.67E-01

##### (2) 治疗后解除摆位

患者每次治疗结束后，治疗技师在治疗室接触的是受到照射的患者，该过程中治疗技师所在区域的瞬时剂量率主要来自患者自身感生放射性剂量率，以及相邻治疗室出束治疗情况下的瞬时剂量率。根据表 3.3.1.3-13，质子放射治疗系统停机 5min 后，质子治疗机房内患者 50cm 处的剂量率为  $12\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；根据表 5.2.1.1-3，C10 点位（质子治疗室 1 工作人员操作位）的剂量率最大值为  $0.854\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，作为相邻治疗室治疗期间对治疗技师的叠加剂量率。居留因子均取 1，每名治疗技师所受的年有效剂量估算结果如下表所示。

表 5.2.1.2-3 每名治疗技师所受的年有效剂量估算结果

工作区域	辐射来源	剂量率, μSv/h	年受照时间, h	年有效剂量, mSv/a	
治疗室	患者感生放射性	12	31.25	3.75E-01	4.02E-01
	相邻治疗室瞬发辐射	0.854		2.67E-02	

### 5.2.1.2.2.2 治疗控制室内工作期间

治疗技师主要在治疗控制室内操作 X 射线管进行精确的位置验证以及操作质子放射治疗系统出束。根据表 3.2.1.4-1, 单间治疗室每年治疗次数为 7500 人次, 则 4 间治疗室每年总治疗次数为 30000 人次。治疗技师使用 X 射线管进行精确位置验证的单次工作时间约为 5min, 其中 X 射线管单次出束时间不超过 30s, 则单间治疗室精确位置验证年工作时间为 625h, 其中 X 射线管年出束时间为 62.5h。质子放射治疗系统每人次治疗出束时间为 5min, 则单间治疗室总治疗出束时间为 625h。

治疗控制室内的工作由 2 名治疗技师共同完成, 本项目单间治疗室配备 4 名治疗技师轮班, 每名治疗技师进行精确位置验证年所需时间为 312.5h, 其中操作 X 射线管年所需时间为 31.25h, 治疗出束时间年所需时间为 312.5h。

质子放射治疗系统、X 射线管出束期间, 治疗技师在治疗控制室内工作。考虑到质子治疗机房各屏蔽墙体的厚度远远高于 X 射线管的要求, 且 X 射线管的总出束时间较短, 因此 X 射线管出束期间对治疗控制室治疗技师的受照剂量可忽略。本次计算主要考虑质子放射治疗系统出束期间对治疗控制室治疗技师的受照剂量, 以及相邻治疗室治疗期间对治疗技师的叠加受照剂量。

根据表 5.2.1.1-3 和表 5.2.1.1-4, 查得 C1 点位 (治疗控制室 2) 的剂量率最大, 读数为  $0.871\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 作为治疗技师在质子放射治疗系统出束期间在治疗控制室受到的剂量率。根据表 5.2.1.1-3, C4 点位 (治疗控制室 3) 的剂量率最大值为  $0.009\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 作为相邻治疗室治疗期间对治疗技师的的叠加剂量率。居留因子均取 1, 每名治疗技师所受的年有效剂量估算结果如下表所示。

表 5.2.1.2-4 每名治疗技师所受的年有效剂量估算结果

工作区域	辐射来源	剂量率, μSv/h	年受照时间, h	年有效剂量, mSv/a	
治疗控制室	操作质子放射治疗系统	0.871	312.5	2.72E-01	2.75E-01
	相邻治疗室瞬发辐射	0.009	312.5	2.81E-03	

### 5.2.1.2.2.3 吸入内照射

治疗技师在治疗室内摆位/解除摆位过程中，除了受到外照射（瞬发辐射外照射和空气浸没外照射），还会由于吸入感生放射性气体受到内照射，吸入内照射剂量可由下式计算。

$$H_{h,i} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \quad (\text{式 5.2.1.2-2})$$

式中：

$H_{h,i}$  为年吸入内照射年有效剂量，Sv/a；

$T$  为年受照时间，h/a；由前文可知，每名技师在治疗室内的年总工作时间为 312.5h (治疗前摆位) + 31.25h (解除摆位并协助离开机房) = 343.75h；

$u$  为正常情况下的呼吸率，m<sup>3</sup>/h，成人的呼吸率取值 1.2m<sup>3</sup>/h；

$C_{a,i}$  为工作场所内部空气感生放射性核素的浓度，Bq/m<sup>3</sup>；以表 3.3.1.3-2 中治疗室停机 10min 静态饱和活度浓度计算机房内动态空气饱和浓度。

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

表 5.2.1.2-5 吸入内照射剂量转换因子

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

根据式 5.2.1.2-2，可计算得出每名治疗技师在治疗室内摆位/解除摆位过程因吸入内照射所受的年有效剂量，估算结果如下表所示。

表 5.2.1.2-6 每名治疗技师在机房内工作期间所受感生放射性气体吸入内照射剂量

核素	$C_{a,i}$ , Bq/m <sup>3</sup>	T, h/a	$u$ , m <sup>3</sup> /h	$g_{h,i}$ , Sv/Bq	$H_{h,i}$ , mSv/a	
<sup>11</sup> C	6.39E+00	343.75	1.2	1.80E-11	4.74E-05	4.74E-05
<sup>13</sup> N	1.06E+01	343.75	1.2	——	——	
<sup>15</sup> O	5.33E-01	343.75	1.2	——	——	
<sup>41</sup> Ar	1.15E+00	343.75	1.2	——	——	

### 5.2.1.2.2.4 小结

综上所述，每位治疗技师工作期间所受的年有效剂量计算结果列于下表。

表 5.2.1.2-6 每位治疗技师工作期间所受的年有效剂量计算结果

来源	年有效剂量，mSv/a	
外照射（瞬发辐射外照射 和空气浸没外照射）	治疗前摆位	2.67E-01
	治疗后解除摆位	4.02E-01

	治疗控制室内工作期间	2.75E-01
空气吸入内照射	在治疗室内摆位/解除摆位	4.74E-05
	总计	9.44E-01

### 5.2.1.2.3物理师

每名患者的治疗计划在正式使用前，为确保治疗安全，都需进行一次治疗前的计划验证，主要是利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行人体仿真模体（一般为等效水模体）模拟治疗。每天治疗患者前，质子放射治疗系统要开展 QA（质量保证），分为状态检测和稳定性检测，一般选用质子放射治疗系统临床常用能量区进行检测。检测类别一般分为设备防护安全、剂量学部分、机械部分，检测周期分为日检、月检、半年检和年检，不同检测项目对应不同检测周期，具体要求见《医用质子重离子放射治疗设备质量控制检测标准》（WS 816-2023）附录 B 和 C，本报告不详细描述。

物理师受照剂量主要来自其在治疗计划验证和 QA（质量保证）工作期间。

#### （1）治疗计划验证

根据表 3.2.1.4-1，本项目质子放射治疗系统每年治疗人数为 1000 人，因此患者治疗前的计划验证次数年合计为 1000 次。本项目共配备 8 名物理师轮班工作，假设每次工作由 2 名物理师共同完成，每名物理师每年进行治疗计划验证的次数保守按 250 次计。由于一次治疗计划验证的过程与一次正式的治疗过程基本一致，且计划验证采用的人体仿真模体与患者组成配比相似，故物理师在每次治疗计划验证期间的受照剂量保守与每次治疗期间技师的受照剂量取值一致。由表 5.2.1.2-6 可知每名治疗技师在“在治疗室内摆位/解除摆位”期间因外照射和空气吸入内照射的受照剂量约为 6.69E-01mSv/年，每名治疗技师参与患者治疗人次不超过 3750 次，可推知每名治疗技师在患者单次治疗期间的受照剂量约为 1.78E-04mSv/次。居留因子均取 1，每名物理师所受的年有效剂量估算结果如下表所示。

表 5.2.1.2-7 每名物理师进行治疗计划验证期间的年有效剂量计算结果

工作区域	辐射来源	单次工作受照剂量，mSv/次	年工作次数	年有效剂量，mSv/a
治疗室	在治疗室内摆位/解除摆位	1.78E-04	250	4.46E-02

每次计划验证的出束时间为 5min，因此每名物理师开展患者计划验证的年出束时间为 20.83h。参考治疗技师“5.2.1.2.2 治疗控制室内工作期间”分析，对物理师在治疗控制室的年有效剂量进行计算。

表 5.2.1.2-8 每名物理师进行治疗计划验证期间的年有效剂量计算结果

工作区域	辐射来源	剂量率, μSv/h	年受照时 间, h	年有效剂量, mSv/a	
治疗控制室	操作质子放 射治疗系统	0.871	20.83	1.81E-02	1.83E-02
	相邻治疗室 瞬发辐射	0.009	20.83	1.87E-04	

因此，每名物理师每年进行治疗计划验证期间的年有效剂量为  $4.46\text{E}-02+1.83\text{E}-02=6.29\text{E}-02\text{mSv}$ 。

## (2) QA (质量保证)

QA (质量保证) 期间，物理师的工作地点包括治疗室和治疗控制室。根据表 3.2.1.4-1，质子放射治疗系统在单间治疗室 QA 期间每天出束 20min。本项目共配备 8 名物理师轮班工作，假设每次工作由 2 名物理师共同完成，则每名物理师 QA 期间在治疗控制室的年工作时间按 83.33h 计。参考治疗技师“5.2.1.2.2.2 治疗控制室内工作期间”分析，对物理师在治疗控制室的年有效剂量进行计算。

表 5.2.1.2-9 每名物理师 QA (质量保证) 工作期间在治疗控制室年有效剂量计算结果

工作区域	辐射来源	剂量率, μSv/h	年受照时 间, h	年有效剂量, mSv/a	
治疗控制室	操作质子放 射治疗系统	0.871	83.33	7.26E-02	7.33E-02
	相邻治疗室 瞬发辐射	0.009	83.33	7.50E-04	

QA 期间，物理师在治疗室内接触的是受到照射的三维水箱，该过程中物理师所在区域的瞬时剂量率主要来自治疗室内活化水箱、相邻治疗室出束情况下的瞬时剂量率。除了外照射，物理师由于吸入感生放射性气体受到内照射。

QA 检测周期分为日检、月检、半年检和年检，不同检测项目对应不同检测周期，每日 QA 均要用到三维水箱进行质子放射治疗系统剂量学部分的检测。QA 完成后，物理师有必要利用辐射监测仪测得质检设备表面 30cm 处剂量率不高于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，再进入治疗室开展后续工作，包括三维水箱的搬运。在此期间水箱表面 30cm 处剂量率按  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$  保守估计，每年搬运水箱的时间按 5.21h 计（2 名物理师一起搬运，每次搬运约 5min，一年合计 20.83h，8 名物理师轮流）。根据表 5.2.1.1-3，C10 点位（质子治疗室 1 工作人员操作位）的剂量率最大值为  $0.854\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，作为相邻治疗室治疗期间对物理师的叠加剂量率。吸入内照射计算方法同治疗技师“5.2.1.2.2.3 吸入内照射”，照射时间取 5.21h。

则由此可计算得出每名物理师在治疗室 QA 工作期间所受的年有效剂量，估算结果

如下表所示。

**表 5.2.1.2-10 每名物理师在治疗室 QA 工作期间所受的年有效剂量**

工作区域	辐射来源	剂量率, μSv/h	年受照时 间, h	年有效剂量, mSv/a	
治疗室	相邻治疗室瞬发辐 射	0.854	5.21	4.45E-03	1.75E-02
	活化水箱	2.5	5.21	1.30E-02	
	吸入内照射			7.19E-07	

因此，每名物理师每年进行 QA（质量保证）期间的年有效剂量为  $7.33E-02\text{mSv}+1.75E-02\text{mSv}=9.08E-02\text{mSv}$ 。

### (3) 小结

综上所述，每位物理师工作期间所受的年有效剂量计算结果列于下表。

**表 5.2.1.2-11 每名物理师工作期间所受的年有效剂量计算结果**

治疗计划验证, mSv/a	QA（质量保证）, mSv/a	年有效剂量, mSv/a
6.28E-02	9.08E-02	1.54E-01

## 5.2.1.2.4 护士

根据质子治疗流程，护士主要在等候区/导诊台对患者进行引导，不涉及辐射操作。

## 5.2.1.2.5 维修工程师

维修工程师的主要工作内容为质子治疗区的日常基础维护保养，根据医院提供的资料，每名维修工程师每年在治疗室内的工作时间不超过 200h，其余时间均于主控室和维修室内。特殊情况下，维修工程师需进入回旋加速器机房进行抢修等工作，年操作时间不超过 50h。

根据表 5.2.1.1-2，回旋加速器运行时，A1 点位（维护室）和 A3（总控室）的剂量率最大值分别为  $<0.001\mu\text{Sv}/\text{h}$  和  $0.058\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；根据表 5.2.1.1-3，C10 点位（质子治疗室 1 工作人员操作位）的剂量率最大值为  $0.854\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，作为相邻治疗室治疗期间对维修工程师的叠加剂量率；维修工程师在回旋加速器机房进行抢修等工作时，剂量率参考患者的感生放射性，根据表 3.3.1.3-13，质子放射治疗系统停机 10min 后，质子治疗机房内患者 100cm 处的剂量率为  $1.3\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

**表 5.2.1.2-12 每名维修工程师工作期间所受的年有效剂量计算结果**

工作区域	辐射来源	剂量率, μSv/h	年受照时 间, h	年有效剂量, mSv/a	
治疗室	相邻治疗室瞬	0.854	200	1.71E-01	3.54E-01

	发辐射				
回旋加速器机房	参考患者的感生放射性	1.3	50	6.50E-02	
主控室	治疗室瞬发辐射	0.058	2000	1.16E-01	
维修室	治疗室瞬发辐射	0.001	2000	2.00E-03	

#### 5.2.1.2.6 工作人员受照剂量汇总

本项目质子放射治疗系统工作人员的最大年受照剂量汇总如下表所示。由结果可知，治疗技师年有效剂量最大为 9.44E-01mSv，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5.2.1.2-12 质子放射治疗系统辐射工作人员受照剂量汇总

人员类别	年有效剂量, mSv/a
医生	7.49E-01
治疗技师	9.44E-01
物理师	1.54E-01
维修工程师	3.54E-01

#### 5.2.1.3 公众受照剂量估算

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

##### 5.2.1.3.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象为质子治疗机房屏蔽体外的公众。质子治疗机房屏蔽体外的公众主要为质子治疗机房四周屏蔽墙外 30 cm 处、各屏蔽门外 30 cm 处、顶棚上方 30 cm 处及管道穿墙处的公众，关注点位置如图 5.2.1.1-27~图 5.2.1.1-31 所示，各关注点处的剂量率列于表 5.2.1.1-2 至表 5.2.1.1-4。

根据表 3.2.1.4-1，质子治疗机房每年总出束时间为 2916.67h。由此可计算得出质子治疗机房屏蔽体外的公众所受的年有效剂量，估算结果如下表所示。

表 5.2.1.3-1 质子治疗机房屏蔽体外的公众所受的年有效剂量计算结果

场所	楼层	方位	周围环境	关注点	剂量率, μSv/h	居留 因子	年受照时 间, h	年有效剂 量, mSv/a			
回旋加速器机房	负二层	北	维护室	A1	<0.001	职业照射, 此处不考虑					
		北	门外缓冲间	A2	0.032						
			管道穿墙处: 门外缓冲间		0.030						
		北	服务器机房	A4	0.027	1/16	2916.67	4.92E-03			
		北	治疗控制室 1	A5	<0.001	/	职业照射, 此处不考虑	1.82E-04			
		东	质子治疗室 1	A6	/						
		东	质子治疗室 1	A7							
		南	土层	A8	<0.001	/					
		南	土层	A9	0.327	/					
		西	土层	A10	0.067	/					
		西	土层	A11	<0.001	/					
	负三层	北	高压细水雾机房	A12	<0.001	1/16	2916.67	1.82E-04			
		东	质子治疗室 1	A13	/	职业照射, 此处不考虑					
		南	土层	A14	<0.001	/					
		南	土层	A15	0.023	/					
		西	土层	A16	0.011	/					
		西	土层	A17	<0.001	/					
	负一层	北	水冷机房	A18	<0.001	1/16	2916.67	1.82E-04			
		东	质子治疗室 1	A19	/	职业照射, 此处不考虑					
		南	土层	A20	0.082	/					
		西	土层	A21	0.075	/					
	剖面	底	土层	A22	<0.001	/					
		底	土层	A23	<0.001	/					
		顶	不可上人屋面	A24	0.114	/					
		顶	封闭吊装口上方	A25	0.041	1/16	2916.67	7.47E-03			
		顶	地面绿化	A26	0.006	1/16	2916.67	1.09E-03			
		顶	质子治疗中心一层 (主要是库房)	A27	0.023	1/16	2916.67	4.19E-03			
		顶	质子治疗中心二层 (不可上人屋面)	A28	0.008	/					
		顶	质子治疗中心一层 (治疗计划办公室)	A29	0.001	1	2916.67	2.92E-03			
		顶	质子治疗中心一层 (会议室)	A30	<0.001	1/16	2916.67	1.82E-04			
4间质子治	负二层	北	治疗控制室 1-4	C1	0.871	职业照射, 此处不考虑					
		北	缓冲间	C2	0.645	职业照射, 此处不考虑					
		北	QC 质控间、治疗计划室、模具室兼更衣室、模具间	C3	0.025	职业照射, 此处不考虑					

场所	楼层	方位	周围环境	关注点	剂量率, μSv/h	居留因子	年受照时间, h	年有效剂量, mSv/a
疗 室		北	VIP 等候室、麻醉兼抢救室室、病人恢复室	E3	0.019	1/16	2000	2.38E-03
		东北	配电间	E4	<0.001	1/16	2000	1.25E-04
		东北	质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间	E5	0.002	1/16	2000	2.50E-04
		东北	科研实验用房	E6	<0.001	1	2000	2.00E-03
		东	后区	E8	0.699	职业照射, 此处不考虑		
		南	土层	C7	0.001	/		
		西	回旋加速器机房内部、治疗室内部	E10	3.325	职业照射, 此处不考虑		
		北	衰变池机房、污水提升间、质子空调水泵房、送风机房、预留库房等	C11	<0.001	1/16	2000	2.00E-03
负 三 层		东	土层	E14	0.035	/		
		南	土层	C13	<0.001	/		
		西	回旋加速器机房内部、治疗室内部	C14	1.69	职业照射, 此处不考虑		
		北	质子设备电源间、配电间、UPS 间、超纯水机房、补水机房等	C15	0.706	1/16	2000	8.83E-02
负 一 层		东	土层	E19	0.016	/		
		南	土层	C18	0.078	/		
		西	回旋加速器机房内部、治疗室内部	C19	0.946	职业照射, 此处不考虑		
		底	土层	F1	3.333	/		
剖 面		底	不可上人屋面	F2	0.462	/		
		顶	封闭吊装口上方	F3	0.178	1/16	2000	2.23E-02
		顶	地面绿化	F4	0.209	1/16	2000	2.61E-02
		顶	质子治疗中心一层 (主要是候诊大厅)	F5	0.028	1/16	2000	3.50E-03
		顶	质子治疗中心二层 (主要是化疗中心座椅治疗区)	F6	0.04	1/2	2000	4.00E-02
		顶	质子治疗中心三层 (主要是预留用房)	F7	2.43E-02	1	2000	4.86E-02
		顶	质子治疗中心屋面设备区	F8	1.51E-02	1/16	2000	1.89E-03
		北	共享景观交通厅	C1	0.871	1/16	2000	9.71E-03
质 子	北	门诊及科研转化大楼	C1	0.871	1	2000	5.50E-02	

场所	楼层	方位	周围环境	关注点	剂量率, μSv/h	居留因子	年受照时间, h	年有效剂量, mSv/a
治疗中心外部部*	东		幸福南路	E8	0.699	1/16	2000	4.62E-04
	南		下沙路	A8	0.327	1/16	2000	6.92E-04
	西		停车场	A21	0.075	1/16	2000	1.15E-04
	西北		医疗综合楼	A21	0.075	1	2000	1.61E-04

注\*: 质子治疗中心外部公众的年剂量估算值考虑距离的衰减, 其中共享景观交通厅、门诊及科研转化大楼、幸福南路、下沙路、停车场、医疗综合楼与质子治疗机房距离分别为 17m、34m、84m、56m、14m、70m, 源与机房表面的距离分别为北: 8m, 东: 8m, 南: 16.5m, 西: 9.5m。以共享景观交通厅为例: 共享景观交通厅距机房北侧的距离为 17m, 则共享景观交通厅的年剂量估算值为  $(8)^2 \times 0.871 \div (8+17)^2 \times 2000 \times 1/16 \div 1000 = 2.59E-04 mSv$

### 5.2.1.3.2 感生放射性气体排放造成的辐射剂量

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

表 5.2.1.3-2 质子重离子机房放射性排风口参数

排放高度, m	最靠近关注点的建筑物的最大截面积 $A_b$ , m <sup>2</sup>	临近最高建筑物高度 $H_b$ , m
21	4307.8 (北侧门诊及科研转化大楼: 68m*63.35m)	99.9 (西北侧医疗综合楼)

#### 5.2.1.3.2.1 空气浸没外照射

由上表可知, 质子治疗机房排风口高度  $H < 2.5H_b$  (临近最高建筑物高度) :

(1) 与排风口近距离范围内的公众,  $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$  ( $x \leq 164m$ )

根据 IAEA NO.19 号报告, 当  $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$  时, 关注点处地面空气浓度可由式 5.2.1.3-4 计算:

$$c_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (\text{式 5.2.1.3-4})$$

式中,

$C_{a,i}$  为距离排风口  $x$  米处核素  $i$  的地面空气浓度, Bq/m<sup>3</sup>;

$Q_i$  为放射性核素  $i$  的年均排放率, Bq/s, 见表 3.3.1.3-6;

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

$u_a$  为释放高度上年平均风速, m/s, 取值 2.2m/s;

$K$  为经验常数, m, 取值  $K=1\text{m}$ ;

(2) 与排气口距离  $x > 2.5\sqrt{A_b}$  ( $x > 164\text{m}$ )

根据 IAEA NO.19 号报告, 当  $x > 2.5\sqrt{A_b}$  时, 关注点处地面空气浓度可由式 5.2.1.3-

5 计算:

$$c_{a,i} = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \quad (\text{式 5.2.1.3-5})$$

式中:

$B$  为在下风距离  $x$  处的高斯扩散因子,  $1/\text{m}^2$ ; 由式 5.2.1.3-6 计算, 该公式是在大气稳定度 D 条件下。

$\sigma_z$  为垂直扩散参数, m,

$$B = \frac{16}{\sqrt{2\pi^3}} \frac{1}{x \sum z}, \quad \sum z = (\sigma_z^2 + A_b / \pi)^{0.5}, \quad \sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \quad (\text{式 5.2.1.3-6})$$

下风向距排气口不同距离处空气浓度计算结果列于下表。

表 5.2.1.3-3 下风向距排气口不同距离处空气浓度计算结果,  $\text{Bq}/\text{m}^3$

核素	与排气口距离			
	距离 164m	200m	300m	400m
$^{11}\text{C}$	4.52E-01	3.75E-02	2.41E-02	1.73E-02
$^{13}\text{N}$	5.02E-01	4.15E-02	2.67E-02	1.92E-02
$^{15}\text{O}$	4.49E-01	3.72E-02	2.39E-02	1.72E-02
$^{41}\text{Ar}$	4.72E-02	3.91E-03	2.51E-03	1.81E-03

空气浸没外照射剂量可由式 5.2.1.3-7 计算:

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \quad (\text{式 5.2.1.3-7})$$

式中:

$H_A$  为空气浸没照射所致年受照剂量,  $\text{Sv}/\text{a}$ ;

$t$  为年受照时间,  $\text{s}/\text{a}$ ; 按一年治疗时间 250 天计;

$S_f$  为建筑物屏蔽因子, 本报告取 1;

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

$T$  为居留因子, 本报告取 1。

表 5.2.1.3-4 剂量转换因子

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

空气浸没外照射剂量计算结果列于下表。

表 5.2.1.3-5 空气浸没外照射剂量计算结果, mSv/a

核素	与排气口距离			
	距离 164m	200m	300m	400m
<sup>11</sup> C	4.78E-04	3.96E-05	2.54E-05	1.83E-05
<sup>13</sup> N	5.31E-04	4.40E-05	2.83E-05	2.03E-05
<sup>15</sup> O	4.76E-04	3.94E-05	2.53E-05	1.82E-05
<sup>41</sup> Ar	6.63E-05	5.49E-06	3.53E-06	2.54E-06
合计	1.55E-03	1.28E-04	8.25E-05	5.94E-05

### 5.2.1.3.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由下式计算:

$$H_{hi} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{hi} \cdot T \quad (\text{式 5.2.1.3-8})$$

式中:

$H_{hi}$  为年吸入内照射待积有效剂量, Sv/a;

t 为年受照时间, h/a; 按一年治疗时间 250 天计;

u 为公众个人正常情况下的呼吸率, m<sup>3</sup>/h, 成人: 1.2m<sup>3</sup>/h ;

$g_{hi}$  为吸入放射性核素 i 产生的待积有效剂量转换因子, Sv/Bq, 见表 5.2.1.3-4, 取值来自 IAEA NO.19;

T 为居留因子, 本报告取 1。

吸入内照射剂量计算结果列于下表。

表 5.2.1.3-6 吸入内照射剂量计算结果, mSv/a

核素	与排气口距离			
	距离 164m	200m	300m	400m
<sup>11</sup> C	2.93E-05	2.43E-06	1.56E-06	1.12E-06
<sup>13</sup> N	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<sup>15</sup> O	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<sup>41</sup> Ar	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

合计	2.93E-05	2.43E-06	1.56E-06	1.12E-06
----	----------	----------	----------	----------

### 5.2.1.3.2.3 总受照剂量

感生放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射，将上述计算结果列于下表。

表 5.2.1.3-7 空气浸没外照射和吸入内照射导致公众年有效剂量计算结果, mSv/a

关注情况	与排气口距离			
	距离 164m	200m	300m	400m
空气浸没外照射	1.55E-03	1.28E-04	8.25E-05	5.94E-05
吸入内照射	2.93E-05	2.43E-06	1.56E-06	1.12E-06
合计	1.58E-03	1.31E-04	8.41E-05	6.05E-05

### 5.2.1.3.2.4 公众受照剂量汇总

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

瞬发辐射外照射所致关注点公众年有效剂量引用表 5.2.1.3-1 中相关数据，其中质子治疗中心地下层内部（医院内部工作人员、公众成员）选取地下层内部最大数据，即质子治疗室负一层北墙处（质子设备电源间、配电间、UPS 间、超纯水机房、补水机房等）公众的年有效剂量 8.83E-02mSv；质子治疗中心地上层内部（医院内部工作人员、公众成员）选取地上层内部最大数据，即质子治疗中心三层处（主要是预留用房）公众的年有效剂量 4.86E-02mSv；质子治疗中心外部公众主要考虑北侧共享景观交通厅（医院内部工作人员、公众成员）、北侧门诊及科研转化大楼（医院内部工作人员、公众成员）、东侧幸福南路（医院外部公众成员）、南侧下沙路（医院外部公众成员）、西侧医院停车场（医院内部工作人员、公众成员）、西北侧医疗综合楼（医院内部工作人员、公众成员）。

空气浸没外照射和吸入内照射导致公众年有效剂量引用表 5.2.1.3-7 中相关数据。

表 5.2.1.3-7 公众年有效剂量汇总, mSv/a

关注点	年有效剂量, mSv/a		总计, mSv/a
	瞬发辐射外 照射	空气浸没外照射 和吸入内照射	
质子治疗 中心内部	地下层（医院内部工作人员、公众 成员）	8.83E-02	——
	地上层内部（医院内部工作人员、 公众成员）	4.86E-02	1.58E-03
质子治疗 中心外部	共享景观交通厅（医院内部工作 人员、公众成员）	9.71E-03	1.58E-03
	门诊及科研转化大楼（医院内部 工作人员、公众成员）	5.50E-02	1.58E-03

	幸福南路（医院外部公众成员）	4.62E-04	1.58E-03	2.04E-03
	下沙路（医院外部公众成员）	6.92E-04	1.58E-03	2.27E-03
	停车场（医院内部工作人员、公众成员）	1.15E-04	1.58E-03	1.70E-03
	医疗综合楼（医院内部工作人员、公众成员）	1.61E-04	1.58E-03	1.74E-03

由计算结果可知，本项目公众年有效剂量最大值为 8.83E-02mSv/a。因此本项目正常运行期间，本项目运行所致公众年有效剂量最大值低于 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

### 5.2.2 事故工况的环境影响分析

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

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

#### 5.2.2.1 人员误照射事故

##### 5.2.2.1.1 事故后果分析

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

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

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

表 5.2.2.1-1 不同照射量对人体损伤的估计

剂量, Gy	类型	初期症状和损伤程度
<0.25		不明显和不易察觉的病变
0.25~0.5	——	可恢复的机能变化，可能有血液学的变化
		机能变化、血液变化，但不伴有临床迹象

1~2	骨髓型急性放射病	轻度	乏力、不适、食欲减退
2~4		中度	头昏、乏力、食欲减退、恶心、呕吐、白细胞短暂上升后下降
4~6		重度	多次呕吐、可有腹泻、白细胞明显下降
6~10		极重度	多次呕吐、腹泻、休克、白细胞急剧下降
10~50	肠型急性放射病	频繁呕吐、腹泻严重、腹疼、血红蛋白升高	
>50	脑型急性放射病	频繁呕吐、腹泻、休克、共济失调、肌张力增高、震颤、抽搐、昏睡、定向和判断力减退	

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

由于各辐射工作场所屏蔽结构保持完好，因此该类事故对周围环境不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

#### 5.2.2.1.2 事故防范措施

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

此外，为防止人员误照射事故的发生，可采取以下措施加强防范：

- (1) 为防止各项安全联锁硬件设施失效，定期检查并确认安全联锁设施的有效性。
- (2) 开机出束前，撤离治疗机房时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和程序对机房各区域进行清场。出束期间一旦发现有人员滞留在机房内，就近按下急停按钮。工作人员进入治疗机房内部工作时应随身佩戴有效的剂量报警仪，以便随时了解机房内的辐射水平并在辐射水平超出阈值时发出报警信号。
- (3) 放射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。
- (4) 做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

#### 5.2.2.2 冷却水泄露事故

### 5.2.2.2.1 事故后果分析

冷取水管路上安装有泄漏测量传感器，一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水。根据“3.3.1.3.2 节”的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员造成辐射影响。

因此，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

### 5.2.2.2 事故防范措施

定期检查冷却水系统运行情况，确认泄漏测量系统的有效性。制定检修操作程序，加强安全文化教育，严格遵守操作程序，防止误操作造成的冷却水泄漏事故。

## 5.3 直线加速器

### 5.3.1 正常运行期间环境影响分析

#### 5.3.1.1 电子直线加速器技术参数及计算参数

本项目直线加速器有电子线和 X 射线两种治疗模式，因电子线的穿透能力远弱于 X 射线，所以一般情况下，机房屏蔽设计满足屏蔽 X 射线防护要求时即可满足屏蔽电子线的防护需要。

本项目直线加速器尚未确定具体型号，考虑 3 种 X 射线能量档位，分别为 6MV、10MV、15MV，三个档位对应的 X 射线最高输出剂量率分别为 840Gy/h、1440Gy/h 和 600Gy/h。10MV 档位对应的能量与最大剂量率均大于 6MV 档位，因此 10MV 档位对周围环境的影响大于 6MV 档位，机房的辐射屏蔽防护在满足 10MV 档位防护要求的基础上，便能满足 6MV 档位的屏蔽防护要求。

综上所述，本项目在理论预测分析时，以 10MV、15MV 档位对应的能量和剂量率保守进行理论预测分析，不对 6MV 档位进行额外的分析。

另外，本项目直线加速器最大 X 射线能量为 15MV，需考虑对中子的屏蔽。

本项目加速器集成一台 CBCT（最大管电压 140kV，最大管电流 1250mA）用于影像引导定位，CBCT 和加速器不会同时出束，加速器机房防护条件在满足加速器屏蔽要求的情况下，机房屏蔽体完全可以满足对 CBCT 开机产生 X 射线的防护，对辐射环境影响较小，因此以下主要对加速器使用 X 射线治疗过程中的环境影响进行分析。

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) 附录 B 相关内容, 可知 X 射线在混凝土中的  $TVL_1$  和  $TVL$  以及患者受照面积  $400\text{cm}^2$  的散射因子  $\alpha_{ph}$ 。

**表 5.3.1-1 混凝土对 10MV 和 15MV 的 X 射线 TVL 值**

直线加速器 X 射线能量	10MV	15MV
有用线束在混凝土 $TVL_1$	41cm	44cm
有用线束在混凝土 $TVL$	37cm	41cm
90°泄漏辐射在混凝土 $TVL_1$	35cm	36cm
90°泄漏辐射在混凝土 $TVL$	31cm	33cm
患者散射辐射 (散射角 30°) 在混凝土中 $TVL$	28cm	31cm

注: 混凝土密度为  $2.35\text{g/cm}^3$ ;

**表 5.3.1-2 10MV 和 18MV 下患者受照面积  $400\text{cm}^2$  的散射因子  $\alpha_{ph}$**

散射角	散射因子 $\alpha_{ph}$	
	10MV	18MV
30°	3.18E-03	2.53E-03

注: 本项目医用电子加速器最大 X 射线能量为 15MV, 由于《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) 表 B.2 中未提供散射角为 30° 时, 15MV 下的散射因子  $\alpha_{ph}$ , 故本项保守按 10MV 考虑。

0.5MV 时混凝土对 45° 入射辐射的散射因子 ( $\alpha_2$ ) 为 2.2E-02。

### 5.3.1.2 工作负荷

根据医院提供资料, 本项目拟新建 4 间直线加速器机房, 分别安装 1 台电子直线加速器, 投入使用后, 每台直线加速器每年最多工作 50 周, 每周工作 5 天。每台设备计划最多治疗 50 人次/天, 平均每名患者治疗照射时间为 1.5min, 每台设备的周治疗出束时间最多为 6.25h, 年治疗出束时间最多为 312.5h。

### 5.3.1.3 关注点选取

因本项目 4 间直线加速器机房布局相同, 机房四周、顶棚、防护门及迷道宽度等辐射屏蔽设计技术参数均相同; 4 间直线加速器机房南北并列, 东侧均为土层, 南侧为后装机房, 西侧均为控制室、设备间、准备室, 北侧为回填土层, 上方为排风机房、工具间、非机动车库等, 无地下层。本项目直线加速器机房内设有 L 型迷路, 主射线不向迷路照射, 迷路出口设置防护门。机房主屏蔽墙为南、北墙和顶棚。因此以 4 号直线加速器机房为代表, 计算其周围剂量率, 其余机房周围剂量率参考 4 号直线加速器机房。

不同点位的居留因子参照《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021) 中附

表 A.1。关注点情况见表 5.3.1-3、图 5.3.1-1 和图 5.3.1-2。

表 5.3.1-3 医用电子直线加速器机房关注点情况

机房名称	关注点	点位描述	辐射类型	居留因子	路径/距离(m)	
4号直线 加速器机 房	a	西墙主屏蔽区外 30cm (后装机房)	有用线束	1/2	o <sub>1</sub> -o-a 8.275	
	c <sub>1</sub>	西墙次屏蔽区外 30cm (后装机房)	泄漏	1/2	o-c <sub>1</sub> 8.286	
			散射		o <sub>1</sub> -o-c <sub>1</sub> 8.286	
	c <sub>2</sub>	准备间	泄漏	1/8	o-c <sub>2</sub> 10.926	
			散射		o <sub>1</sub> -o-c <sub>2</sub> 10.926	
	b	东墙主屏蔽区外 30cm (3号直线加速器机房)	有用线束	1/2	o <sub>2</sub> -o-b 8.275	
	d	3号直线加速器机房迷道	泄漏	1/2	o-d 9.815	
			散射		o <sub>2</sub> -o-d 9.815	
	f	迷路外墙外 30cm (控制室)	泄漏	1	o-f 9	
	k	迷路外墙外 30cm (设备间)	泄漏	1/16	o <sub>1</sub> -k 9.788	
	g	防护门外 30cm (准备室)	泄漏	1/8	o <sub>2</sub> -g 9.359	
			散射		o <sub>2</sub> -o-B 7.657	
					B-P 7.777	
					P-g 1.7	
	l	顶棚主屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	有用线束	1/16	o <sub>3</sub> -l 7.4	
	m	顶棚次屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	泄漏	1/16	o-m 8.296	
			散射		o <sub>3</sub> -o-m 8.296	

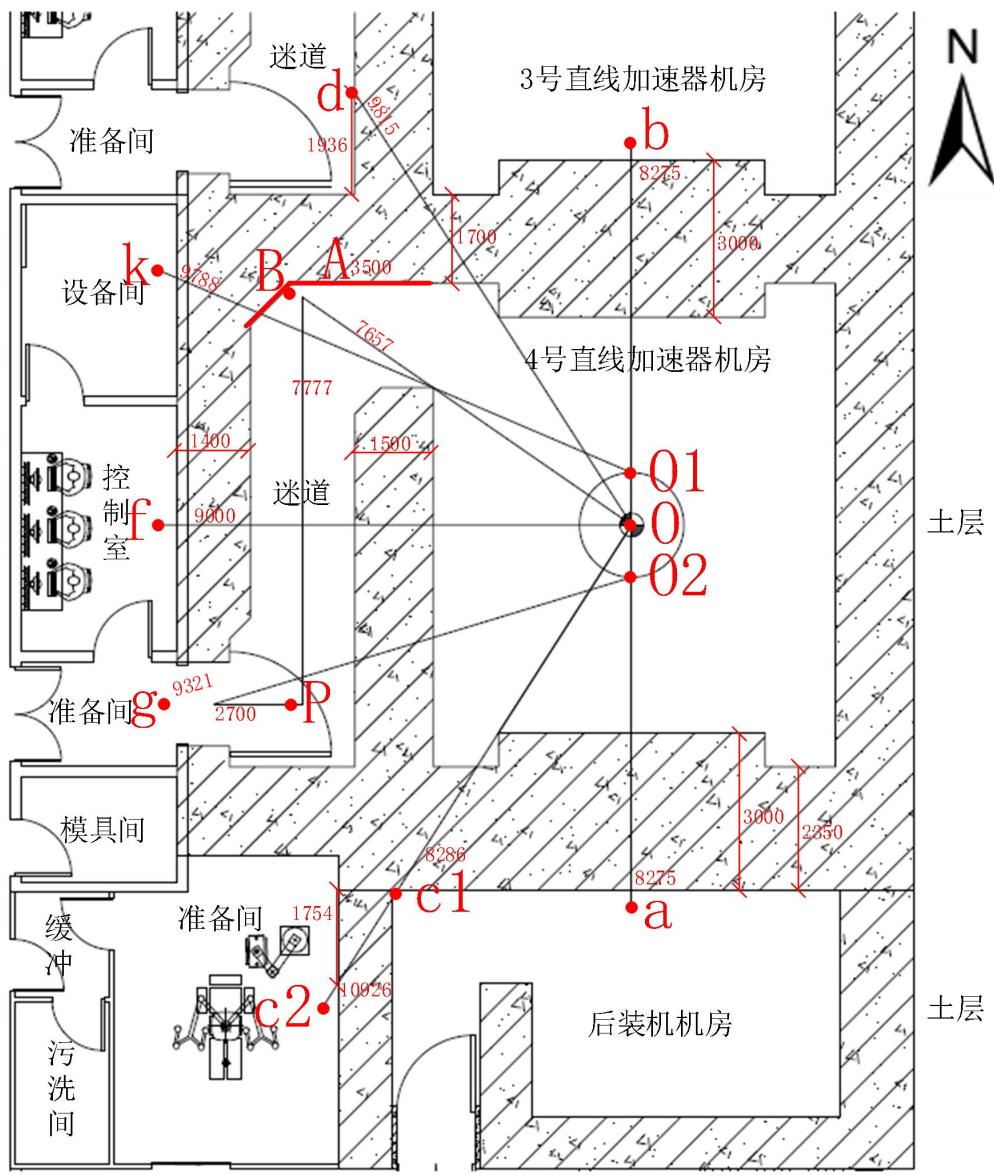


图 5.3.1-1 加速器机房平面布置图

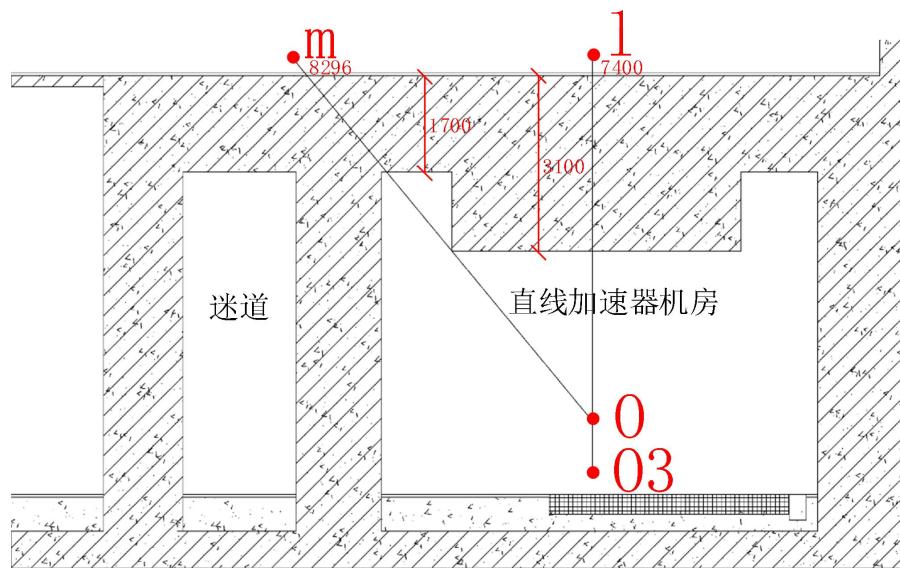


图 5.2.1-2 加速器机房剖面图

### 5.3.1.4 关注点导出剂量率参考控制水平

由《放射治疗放射防护要求》(GBZ 121-2020),关注点的导出剂量率控制水平为:

$$\dot{H}_c \leq H_e / (t \times U \times T) \quad (\text{式 5.2.1-1})$$

式中:

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

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

$t$ ——设备周最大累积照射的小时数,  $\text{h}$ ;

$U$ ——治疗设备向关注点位置的方向照射的使用因子, 本项目取 1;

$T$ ——人员在相应关注点位置的居留因子。

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021) 6.1.4 中的相关要求:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

各关注点导出剂量率参考控制水平见下表。

表 5.3.1-4 导出剂量率参考控制水平计算结果

机房名称	关注点	点位描述	居留因子(T)	周治疗照射时间(t)	$H_e$	$\dot{H}_{c,d}$	$\dot{H}_{c,max}$	$\dot{H}_c$
4号直线加速器机房	a	南墙主屏蔽区外30cm(后装机房)	1/2	6.25	100	32	10	10
	c <sub>1</sub>	南墙次屏蔽区外30cm(后装机房)	1/2	6.25	100	32	10	10
	c <sub>2</sub>	准备间	1/8	6.25	5	6.4	10	6.4
	b	北墙主屏蔽区外30cm(3号直线加速器机房)	1/2	6.25	100	32	10	10
	d	3号直线加速器机房迷道	1/2	6.25	100	32	10	10
	f	迷路外墙外30cm(控制室)	1	6.25	100	16	2.5	2.5
	k	迷路外墙外30cm(设备间)	1/16	6.25	5	12.8	10	10
	g	防护门外30cm(准备室)	1/8	6.25	5	6.4	10	6.4
	l	顶棚主屏蔽区上方30cm处(非机动车库)	1/16	6.25	5	12.8	10	10
	m	顶棚次屏蔽区上方30cm处(非机动车库)	1/16	6.25	5	12.8	10	10

### 5.3.1.5 辐射影响预测

#### 5.3.1.5.1 有用线束主屏蔽区宽度核算

有用线束防护区宽度核算的计算见下式。

$$Y_p = 2[(a + SAD) \times \tan\theta + 0.3] \dots \dots \dots \text{(式 5.2.1-2)}$$

式中：

$Y_p$ —机房有用射线束主屏蔽区的宽度，m；

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

$SAD$ —源轴距，m，对于本项目医用电子直线加速器  $SAD$  为 100cm；

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

有用线束主屏蔽区宽度核算结果见下表。

表 5.3.1-5 有用线束主屏蔽区宽度核算

机房名称	主屏蔽墙位置	a (m)	计算值 (m)	设计值 (m)	评价结果
4号直线加速器机房	南墙主屏蔽墙宽度(内凸)	4.625	3.40	5.1	满足
	北墙主屏蔽墙宽度(外凸)	6.975	4.57	5.1	满足
	顶棚主屏蔽墙宽度(内凸)	4.4	3.29	5.1	满足

### 5.3.1.5.2 关注点的剂量率计算公式

#### (1) 有效防护材料屏蔽厚度

当 X 射线束以  $\theta$  角斜入射厚度为  $X$  (cm) 的屏蔽物质时, 射线束在斜射路径上的防护材料有效屏蔽厚度  $X_e$  (cm) 见下式。

$$X_e = X \cdot \sec \theta \dots \text{ (式 5.3.1-3)}$$

式中:

$\theta$ —斜射角, 即入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角。

#### (2) 屏壁厚度与屏蔽透射因子的相应关系

对于给定的屏蔽物质的厚度  $X$  (cm), 按下式计算有效屏蔽厚度  $X_e$  (cm), 相应的辐射屏蔽透射因子  $B$  见下式:

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \dots \text{ (式 5.3.1-4)}$$

式中:

$B$ —透射因子, 无量纲;

$TVL_1$ —第一个什值层厚度, cm;

$TVL$ —平衡什值层厚度, cm。

#### (3) 有用线束和泄漏辐射剂量率估算

对于给定防护材料厚度时, 屏蔽体外关注点的剂量率  $H$  ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) 计算见下式。

$$H = \frac{H_{of}}{R^2} \cdot B \quad \text{(式 5.3.1-5)}$$

式中:

$H_{of}$ —有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的常用最高剂量率,  $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ;

$R$ —辐射源点(靶点)至关注点的距离, m;

$f$ —对有用线束为 1; 对泄漏辐射为泄漏辐射比率, 取 0.001。

#### (4) 散射辐射剂量率估算

对于与主屏蔽区直接相连的次屏蔽区，除了考虑有用线束的泄漏辐射外，还需考虑有用线束水平或向顶部照射时，人体散射辐射穿过次屏蔽区后的剂量影响。散射辐射主要考虑患者一次散射辐射的剂量率。

患者体表的散射辐射在防护实体外关注点的剂量率  $\dot{H}$  ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) 的计算见下式。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_o \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^2} \cdot B \dots \text{(式 5.3.1-6)}$$

式中：

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

$R_s$ —患者（位于等中心点）至关注点的距离，m；

$\alpha_{ph}$ —患者  $400\text{cm}^2$  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  $400\text{cm}^2$  面积上的散射因子；

$F$ —治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积， $\text{cm}^2$ 。

#### (5) 加速器 ( $\leq 10\text{MV}$ ) 机房的迷路散射辐射屏蔽与剂量估算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T 201.2-2011) 5.2.6，机房迷路散射辐射屏蔽与剂量估算如下：

##### ① 入口 g 处的散射辐射剂量率

入口 g 处的散射辐射剂量率  $\dot{H}_g$  按下式计算：

$$\dot{H}_g = \frac{\alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_1^2} \cdot \frac{\alpha_2 \cdot A}{R_2^2} \cdot \dot{H}_o \dots \text{(式 5.3.1-7)}$$

式中：

$\dot{H}_g$ —g 处的散射辐射剂量率， $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

$\alpha_{ph}$ —患者  $400\text{cm}^2$  面积上的散射因子，通常取  $45^\circ$  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， $\text{cm}^2$ ；

$\alpha_2$ —砼墙入射的患者散射辐射的散射因子，通常取 i 处的入射角为  $45^\circ$ ，散射角为  $0^\circ$ ；

$A$ —i 处（本项目为 B）的散射面积， $\text{m}^2$ ；

$R_1$ —“o-i”（本项目为 o-B）之间的距离，m；

$R_2$ —“i-g”（本项目为 B-P+P-g）之间的距离，m；

$\dot{H}_o$ —有用线束中心轴上距靶 1m 处的常用最高剂量率， $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ 。

##### ② 泄漏辐射在 g 点处的辐射剂量率

泄漏辐射经迷路内墙屏蔽后至  $g$  点辐射剂量率  $\dot{H}_{Og}$ ，根据式 5.3.1-4 和式 5.3.1-5 计算。

### ③防护门外的辐射剂量率

当给定防护门屏蔽厚度  $X$  时，防护门 30cm 处的辐射剂量率  $\dot{H}$  ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) 根据下式计算：

$$\dot{H} = \dot{H}_g \cdot 10^{-\left(\frac{X}{TVL}\right)} + \dot{H}_{Og} \dots \dots \dots \quad (\text{式 5.3.1-8})$$

式中：

$TVL$ —取 0.5cm (铅)，即 5mm；

$X$ —治疗机房防护门铅防护材料厚度，mm。

## (6) 加速器 ( $>10\text{MV}$ ) 机房的迷路散射辐射

### ①总中子注量 $\Phi_i$

迷路中的中子散射路径为“O-i-g”（本项目中子散射路径为“o-B-P-g”）。 $i$  点是从等中心点与迷路内墙端的连线和迷路长轴中心线之间的交点。在  $i$  点的总中子注量  $\Phi_i$  按下式计算：

$$\Phi_i = \frac{Q_n}{4\pi d_i^2} + \frac{5.4Q_n}{2\pi S} + \frac{1.26Q_n}{2\pi S} \dots \dots \dots \quad (\text{式 5.3.1-9})$$

式中：

$\Phi_i$ —等中心处 1Gy 治疗照射时  $i$  处的总中子注量，( $\text{中子数}/\text{m}^2$ ) /Gy；

$Q_n$ —等中心处每 1Gy 治疗照射时加速器机头发射出的总中子数，根据 NCRPNO.151 表 B.9 (P172~173)，本项目型号未定，因此保守取 7.6E+11；

$d_i$ —等中心 O 至  $i$  的距离，m；本项目为 O 至 B 的距离

$S$ —治疗机房的总内表面积 ( $\text{m}^2$ )，包括四壁墙、顶面和底面，不包括迷路内各面积。

### ②机房入口处中子俘获 $\gamma$ 射线剂量率 ( $\dot{H}_\gamma$ )

机房内及迷路内的中子与屏蔽物质作用时产生中子俘获  $\gamma$  射线，机房入口门外 30cm ( $g$  点) 处无防护门时的中子俘获  $\gamma$  射线的剂量率  $\dot{H}_\gamma$  按下式计算：

$$\dot{H}_\gamma = 6.9 \times 10^{-16} \cdot \Phi_i \cdot 10^{d_2/TVL} \cdot \dot{H}_0 \dots \dots \dots \quad (\text{式 5.3.1-10})$$

式中：

$6.9 \times 10^{-16}$ —该方法中的经验因子， $\text{Sv}/(\text{中子数}/\text{m}^2)$ ；

$d_2$ — $i$  点至机房入口  $g$  点的距离，m；本项目为 B-p-g 距离；

*TVD*—将 $\gamma$ 辐射剂量减至其十分之一的距离（称为什值距离），对于15MV电子直线加速器为3.9m；

$\dot{H}_o$ —等中心点处治疗X射线剂量率（ $\mu\text{Gy/h}$ ），依据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）的4.8.3，屏蔽计算中可视为 $\mu\text{Sv/h}$ 。

### ③机房入口的中子剂量率（ $\dot{H}_n$ ）

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

$$\dot{H}_n = 2.4 \times 10^{-15} \cdot \Phi_i \cdot \sqrt{\frac{S_0}{S_l}} \cdot [1.64 \times 10^{-(d_2/1.9)} + 10^{-(d_2/T_n)}] \cdot \dot{H}_o \dots \quad (\text{式 5.3.1-11})$$

式中：

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

$S_0$ —迷路内口的面积， $S_0 = 2.2 \times 4.5 = 9.9 \text{ m}^2$ ；

$S_l$ —迷路横截面积， $S_l = 2.2 \times 4.5 = 9.9 \text{ m}^2$ ；

$d_2$ —i点到迷路入口（g）的距离，m；

$T_n$ —迷路中能量相对高的中子剂量组分式方括号中的第二项衰减至十分之一行径的距离（m），称为什值距离。 $T_n$ 是一个经验值，与迷路横截面积有关， $T_n$ 按下式计算：

$$T_n = 2.06 \sqrt{S_l} \dots \quad (\text{式 5.3.1-12})$$

### ④防护门外散射辐射剂量率计算

迷路入口防护门屏蔽设计时，通常使用中子和中子俘获 $\gamma$ 射线屏蔽后有相同的辐射剂量率，对于中子俘获 $\gamma$ 射线，以铅屏蔽；对于中子，以含硼（5%）聚乙烯屏蔽，对于已经定防护门屏蔽厚度 $X_\gamma$ 和 $X_n$ 时，防护门外的辐射剂量率按下式计算：

$$\dot{H} = \dot{H}_\gamma \cdot 10^{-(X_\gamma/TVL_\gamma)} + \dot{H}_n \cdot 10^{-(X_n/TVL_n)} + \dot{H}_{Og} \cdot B_{Og} \dots \quad (\text{式 5.3.1-13})$$

式中：

$\dot{H}$ 、 $\dot{H}_\gamma$ 、 $\dot{H}_n$ 、 $\dot{H}_{Og}$ 意义同前文；

$X_\gamma$ —防护门铅屏蔽厚度，mm；

$X_n$ —防护门含硼（5%）聚乙烯屏蔽厚度，mm；

$B_{Og}$ —防护门对 $\dot{H}_{Og}$ 的屏蔽透射因子， $\dot{H}_{Og}$ 相对防护门入口处的总剂量率较小，可以忽略 $\dot{H}_{Og} \cdot B_{Og}$ 项；

$TVL_\gamma$ —中子俘获 $\gamma$ 射线铅屏蔽中的什值层，cm，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）附录 C，查得  $TVL_{\gamma}=31\text{mm}$ ；

$TVL_n$ —中子在含硼（5%）聚乙烯屏蔽中的什值层，cm，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）附录 C，查得  $TVL_n=45\text{mm}$ ；

### 5.3.1.5.3 预测结果分析

#### （1）机房外各关注点辐射剂量率估算

本项目直线加速器机房外有用线束、泄漏及散射辐射剂量率估算结果见下表。

表 5.3.1-6 有用线束主屏蔽外关注点辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	Xe (cm)	TVL <sub>1</sub> (cm)	TVL (cm)	f	R (m)	$\dot{H}(\mu\text{Sv}/\text{h})$
a 点	6.00E+08 (15MV)	300	44	41	1	8.725	4.49E-01
	1.44E+09 (10MV)	300	41	37	1	8.725	1.89E-01
b 点	6.00E+08 (15MV)	300	44	41	1	8.725	4.49E-01
	1.44E+09 (10MV)	300	41	37	1	8.725	1.89E-01
l 点	6.00E+08 (15MV)	310	44	41	1	7.4	3.56E-01
	1.44E+09 (10MV)	310	41	37	1	7.4	1.41E-01

注：1. 本表中 Xe 有效屏蔽厚度公式计算得出，下表同；

2. 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）放射治疗机房的相关要求，对于关注点 c<sub>1</sub>、c<sub>2</sub>、d、g、m、通常以 30°斜射角考虑，a、b、l、f、k 通常以 0°垂直入射保守估算，下表同。

表 5.3.1-7 侧屏蔽墙关注点辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	Xe (cm)	TVL <sub>1</sub> (cm)	TVL (cm)	f	R (m)	$\dot{H}(\mu\text{Sv}/\text{h})$
f 点	6.00E+08 (15MV)	290	36	33	0.001	9	1.49E-05
	1.44E+09 (10MV)	290	35	31	0.001	9	1.06E-05
k 点	6.00E+08 (15MV)	150	36	33	0.001	9.788	2.20E-01
	1.44E+09 (10MV)	150	35	31	0.001	9.788	2.93E-01

表 5.3.1-8 次屏蔽墙外及迷道外墙关注点散射辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	Xe (cm)	TVL (cm)	$\alpha_{ph}$	F(cm <sup>2</sup> )	R (m)	$\dot{H}_{散}(\mu\text{Sv}/\text{h})$
-----	---	---------	----------	---------------	---------------------	-------	--------------------------------------

c <sub>1</sub> 点	6.00E+08 (15MV)	271.35	31	3.18E-03	1600	8.286	1.96E-04
	1.44E+09 (10MV)	271.35	28	3.18E-03	1600	8.286	5.43E-05
c <sub>2</sub> 点	6.00E+08 (15MV)	473.89	31	3.18E-03	1600	10.926	3.30E-11
	1.44E+09 (10MV)	473.89	28	3.18E-03	1600	10.926	1.83E-12
d 点	6.00E+08 (15MV)	419.85	31	3.18E-03	1600	9.815	2.27E-09
	1.44E+09 (10MV)	419.85	28	3.18E-03	1600	9.815	1.93E-10
m 点	6.00E+08 (15MV)	196.30	31	3.18E-03	1600	8.296	5.16E-02
	1.44E+09 (10MV)	196.30	28	3.18E-03	1600	8.296	2.60E-02

表 5.3.1-9 次屏蔽墙外及迷道外墙关注点泄漏辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	Xe (cm)	TVL <sub>1</sub> (cm)	TVL (cm)	f	R (m)	$\dot{H}_{\text{漏}}(\mu\text{Sv}/\text{h})$
c <sub>1</sub> 点	6.00E+08 (15MV)	271.35	36	33	0.001	8.286	6.45E-05
	1.44E+09 (10MV)	271.35	35	31	0.001	8.286	4.98E-05
c <sub>2</sub> 点	6.00E+08 (15MV)	473.89	36	33	0.001	10.926	2.70E-11
	1.44E+09 (10MV)	473.89	35	31	0.001	10.926	8.39E-12
d 点	6.00E+08 (15MV)	419.85	36	33	0.001	9.815	1.45E-09
	1.44E+09 (10MV)	419.85	35	31	0.001	9.815	5.76E-10
m 点	6.00E+08 (15MV)	196.30	36	33	0.001	8.296	1.21E-02
	1.44E+09 (10MV)	196.30	35	31	0.001	8.296	1.31E-02

## (2) 机房外防护门外关注点 (g 点) 辐射剂量率估算

### ① 10MV

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

### A、泄漏辐射

防护门外泄漏辐射剂量率计算参数及结果见下表。

表 5.3.1-10 泄漏辐射经迷道内墙屏蔽后在迷道外口处的辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	Xe (cm)	TVL <sub>1</sub> (cm)	TVL (cm)	f	R (m)	$\dot{H}_{og}(\mu\text{Sv}/\text{h})$
g 点	1.44E+09 (10MV)	173.21	35	31	0.001	8.359	7.17E-02

### B、入口处的散射辐射剂量率 $\dot{H}_g$

表 5.3.1-11 关注点 g 点处的散射辐射剂量率计算参数及结果 (10MV)

关注点	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	$\alpha_{ph}$	$\alpha_2$	A(m <sup>2</sup> )	F(cm <sup>2</sup> )	R <sub>1</sub> (m)	R <sub>2</sub> (m)	$\dot{H}_g(\mu\text{Sv}/\text{h})$
g 点	1.44E+09 (10MV)	$1.35 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-2}$	15.05	1600	7.657	9.477	488.94

### C、防护门外辐射剂量率计算

表 5.3.1-12 防护门外的辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_g(\mu\text{Sv}/\text{h})$	X(mm)	TVL(mm)	$\dot{H}_{og}(\mu\text{Sv}/\text{h})$	$\dot{H}(\mu\text{Sv}/\text{h})$
g 点	488.94	20	5	7.17E-02	1.21E-01

综上所述，防护门外的辐射剂量率  $\dot{H}$  为 1.21E-01  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

### ②15MV

根据 GBZ/T201.2-2011 第 4.3.2.6 要求，对于 >10MV 的加速器机房，迷路入口处应估算中子辐射在迷路内产生的散射中子及中子俘获  $\gamma$  射线在迷路入口 g 点位置的辐射剂量。此外，还需要估算加速器的泄漏辐射经过迷路内墙屏蔽后在 g 处的辐射剂量。

### A、泄漏辐射

防护门外泄漏辐射剂量率计算参数及结果见下表。

表 5.3.1-13 泄漏辐射经迷道内墙屏蔽后在迷道外口处的辐射剂量率计算参数及结果

关注点	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	Xe (cm)	TVL <sub>1</sub> (cm)	TVL (cm)	f	R (m)	$\dot{H}_{og}(\mu\text{Sv}/\text{h})$
g 点	6.00E+08 (10MV)	173.21	36	33	0.001	8.359	5.97E-02

### B、散射辐射

各参数选取及估算结果见下表。

表 5.3.1-14 总中子注量

参数	$Q_n$ (中子数/Gy)	$d_I$ (m)	S (m <sup>2</sup> )	$\Phi_B$ ((中子数/m <sup>2</sup> )/Gy)
总中子注量	7.6E+11	7.657	257.16	4.16E+09

机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的中子俘获  $\gamma$  射线的剂量率  $\dot{H}_\gamma$  估算结果见下表。

表 5.2.1-15 机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的中子俘获  $\gamma$  射线的剂量率估算

$\Phi_B$ ((中子数/m <sup>2</sup> )/Gy)	$\dot{H}_o(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h})$	$d_2$ (m)	TVD (m)	$\dot{H}_\gamma(\mu\text{Sv}/\text{h})$
-------------------------------------	---	-----------	---------	---

4.16E+09	6.0E+08	9.477	3.9	6.40
----------	---------	-------	-----	------

什值距离  $T_n$  和机房内的中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的剂量率  $\dot{H}_n$  估算结果见下表。

表 5.3.1-16 中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm (g 点) 处无防护门时的剂量率

$\Phi_B$ ((中子数 /m <sup>2</sup> )/Gy)	$\dot{H}_o$ ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ )	$S_0$ (m <sup>2</sup> )	$S_I$ (m <sup>2</sup> )	$d_2$ (m)	$T_n$	$\dot{H}_n$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
4.16E+09	6.0E+08	9.9	9.9	9.477	6.48	2.07E+02

本项目加速器机房防护门拟采取 20mm 铅+180mm 含硼聚乙烯板，防护门外 30cm (g 点) 处的散射辐射剂量率  $\dot{H}$  估算结果见下表。

表 5.3.1-17 机房入口门外 30cm (g 点) 处的散射辐射剂量率估算

$\dot{H}_\gamma$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	$X_\gamma$ (mm)	$TVL_\gamma$ (mm)	$\dot{H}_n$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	$X_n$ (mm)	$TVL_n$ (mm)	$\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
6.40	20	31	2.07E+02	180	45	1.47

### 5.3.1.5.4 计算小结

本项目直线加速器机房外各关注点辐射剂量率估算结果汇总分析见下表。

表 5.3.1-18 辐射剂量率估算结果汇总分析 (10MV)

关注点		剂量率估算结果 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )			剂量率参考控制水平 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	符合情况
		有用线束/泄漏	散射辐射	合计		
a	南墙主屏蔽区外 30cm (后装机房)	1.89E-01	/	1.89E-01	10	符合
c <sub>1</sub>	南墙次屏蔽区外 30cm (后装机房)	4.98E-05	5.43E-05	1.04E-04	10	符合
c <sub>2</sub>	准备间	8.39E-12	1.83E-12	1.02E-11	6.4	符合
b	北墙主屏蔽区外 30cm (3 号直线加速器机房)	1.89E-01	/	1.89E-01	10	符合
d	3 号直线加速器机房迷道	5.76E-10	1.93E-10	7.68E-10	10	符合
f	迷路外墙外 30cm (控制室)	1.06E-05	/	1.06E-05	2.5	符合
k	迷路外墙外 30cm (设备间)	2.93E-01	/	2.93E-01	10	符合
g	防护门外 30cm (准备室)	7.17E-02	1.21E-01	1.92E-01	6.4	符合
l	顶棚主屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	1.41E-01	/	1.41E-01	10	符合
m	顶棚次屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	1.31E-02	2.60E-02	3.91E-02	10	符合

	库)				
--	----	--	--	--	--

表 5.2.1-19 辐射剂量率估算结果汇总分析 (15MV)

关注点		剂量率估算结果 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )			剂量率参考控制水平 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	符合情况
		有用线束/ 泄漏	散射辐射	合计		
a	南墙主屏蔽区外 30cm (后装机房)	4.49E-01	/	4.49E-01	10	符合
c <sub>1</sub>	南墙次屏蔽区外 30cm (后装机房)	6.45E-05	1.96E-04	2.61E-04	10	符合
c <sub>2</sub>	准备间	2.70E-11	3.30E-11	6.01E-11	6.4	符合
b	北墙主屏蔽区外 30cm (3 号直线加速器机房)	4.49E-01	/	4.49E-01	10	符合
d	3 号直线加速器机房 迷道	1.45E-09	2.27E-09	3.72E-09	10	符合
f	迷路外墙外 30cm (控 制室)	1.49E-05	/	1.49E-05	2.5	符合
k	迷路外墙外 30cm (设 备间)	2.20E-01	/	2.20E-01	10	符合
g	防护门外 30cm (准 备室)	5.97E-02	1.47	1.53	6.4	符合
l	顶棚主屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车 库)	3.56E-01	/	3.56E-01	10	符合
m	顶棚次屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车 库)	1.21E-02	5.16E-02	6.37E-02	10	符合

根据上述计算, 直线加速器 (10MV 和 15MV) 机房外各关注点辐射剂量率估算结果汇总分析见下表。

表 5.3.1-20 辐射剂量率估算结果汇总分析 (10MV 和 15MV)

关注点		剂量率估算结果 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )			剂量率参考控制水平 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	符合情况
		10MV	15MV	取较大值		
a	南墙主屏蔽区外 30cm (后装机房)	1.89E-01	4.49E-01	4.49E-01	10.00	符合
c <sub>1</sub>	南墙次屏蔽区外 30cm (后装机房)	1.04E-04	2.61E-04	2.61E-04	10.00	符合
c <sub>2</sub>	准备间	1.02E-11	6.01E-11	6.01E-11	10.00	符合
b	北墙主屏蔽区外 30cm (3 号直线加速器机房)	1.89E-01	4.49E-01	4.49E-01	2.50	符合
d	3 号直线加速器机房迷道	7.68E-10	3.72E-09	3.72E-09	10.00	符合
f	迷路外墙外 30cm (控制 室)	1.06E-05	1.49E-05	1.49E-05	8.00	符合

k	迷路外墙外 30cm (设备间)	2.93E-01	2.20E-01	2.93E-01	10.00	符合
g	防护门外 30cm (准备室)	1.92E-01	1.53	1.53	10.00	符合
l	顶棚主屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	1.41E-01	3.56E-01	3.56E-01	10.00	符合
m	顶棚次屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	3.91E-02	6.37E-02	6.37E-02	10.00	符合

综上所述，经以上理论预测分析，本项目加速器在 10MV、15MV 档位对应的能量和剂量率运行时，加速器机房各屏蔽体外表面 30cm 处辐射剂量率均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）相应的剂量率参考控制水平。

### 5.3.1.6 职业人员和周围公众年有效剂量估算

根据式 5.2.1.2-1，本项目居留因子的选取见表 1.4.2-1。本项目职业人员和周围公众年有效剂量估算见下表。

表 5.3.1-21 放疗科职业人员和周围公众年有效剂量估算

机房	关注点		预测剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	居留 因子	t(h/a)	年有效 剂量 ( $\text{mSv}$ )	剂量约束 值( $\text{mSv}/\text{a}$ )	人员 类别
1号直线加速器机房	a	南墙主屏蔽区外 30cm (2号直线加速器机房)	4.49E-01	1/2	312.5	7.02E-02	5.0	职业
	f	迷路外墙外 30cm (控制室)	1.49E-05	1	312.5	4.66E-06	5.0	职业
	k	迷路外墙外 30cm (设备间)	2.93E-01	1/16	312.5	5.72E-03	0.1	公众
	g	防护门外 30cm (准备室)	1.53	1/8	312.5	5.98E-02	0.1	公众
	l	顶棚主屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	3.56E-01	1/16	312.5	6.95E-03	0.1	公众
2号直线加速器机房	a	南墙主屏蔽区外 30cm (3号直线加速器机房)	4.49E-01	1/2	312.5	7.02E-02	5.0	职业
	b	北墙主屏蔽区外 30cm (1号直线加速器机房)	4.49E-01	1/2	312.5	7.02E-02	5.0	职业
	f	迷路外墙外 30cm (控制室)	1.49E-05	1	312.5	4.66E-06	5.0	职业
	k	迷路外墙外 30cm (设备间)	2.93E-01	1/16	312.5	5.72E-03	0.1	公众
	g	防护门外 30cm (准备室)	1.53	1/8	312.5	5.98E-02	0.1	公众
	l	顶棚主屏蔽区上方 30cm 处 (非机动车库)	3.56E-01	1/16	312.5	6.95E-03	0.1	公众

		动车库)						
3号直线加速器机房	a	南墙主屏蔽区外30cm (4号直线加速器机房)	4.49E-01	1/2	312.5	7.02E-02	5.0	职业
	b	北墙主屏蔽区外30cm (3号直线加速器机房)	4.49E-01	1/2	312.5	7.02E-02	5.0	职业
	f	迷路外墙外30cm (控制室)	1.49E-05	1	312.5	4.66E-06	5.0	职业
	k	迷路外墙外30cm (设备间)	2.93E-01	1/16	312.5	5.72E-03	0.1	公众
	g	防护门外30cm (准备室)	1.53	1/8	312.5	5.98E-02	0.1	公众
	l	顶棚主屏蔽区上方30cm处 (非机动车库)	3.56E-01	1/16	312.5	6.95E-03	0.1	公众
4号直线加速器机房	a	南墙主屏蔽区外30cm (后装机房)	4.49E-01	1/2	312.5	7.02E-02	5.0	职业
	c <sub>2</sub>	准备间	6.01E-11	1/8	312.5	2.35E-12	0.1	公众
	b	北墙主屏蔽区外30cm (3号直线加速器机房)	4.49E-01	1/2	312.5	7.02E-02	5.0	职业
	f	迷路外墙外30cm (控制室)	1.49E-05	1	312.5	4.66E-06	5.0	职业
	k	迷路外墙外30cm (设备间)	2.93E-01	1/16	312.5	5.72E-03	0.1	公众
	g	防护门外30cm (准备室)	1.53	1/8	312.5	5.98E-02	0.1	公众
	l	顶棚主屏蔽区上方30cm处 (非机动车库)	3.56E-01	1/16	312.5	6.95E-03	0.1	公众

注：使用因子保守均取1；同一场所以取关注点剂量率最大值进行计算，如4号直线加速器机房南侧后装机房区域取关注点a和关注点c<sub>1</sub>中较大值进行人员受照剂量计算，其余区域同理。

### ①辐射工作人员影响

由上表可知，加速器机房工作人员在控制室进行设备操作时的年有效剂量最大值为4.66E-06mSv。

另外，辐射工作人员在加速器机房内摆位时可能受到其余机房的辐射影响，因此需要考虑叠加其余机房的辐射影响，根据表5.2.1-22，直线加速器机房摆位人员受其余加速器辐射影响的年有效剂量为7.02E-02mSv（后装机房影响小于加速器机房，均以加速器机房数据叠加）。

由于患者较多，辐射工作人员一般在医用电子直线加速器停机后2min左右就进入

治疗室内，此时大部分感生放射性核素未能充分衰变，故还需考虑感生放射性对工作人员的影响，本项目按照平均每位患者摆位时间为 30s 考虑，则年总摆位（单台直线加速器）时间为 104.2h，本项目每间直线加速器机房配置 2 名技师，则单名技师的年摆位时间保守按 52.1h 考虑，保守采用《医用电子直线加速器质量控制检测规范》（WS674-2020）标准规定限值最大值（距离外壳表面 1m 处 $\leq 20\mu\text{Sv}/\text{h}$ ）进行估算，则本项目辐射工作人员在摆位时受到的感生放射性年有效剂量最大为 1.04mSv。

综上所述，则加速器机房工作人员年有效剂量最大值为  $4.66\text{E-}06\text{mSv}+7.02\text{E-}02*2\text{mSv}+1.04\text{mSv}=1.18\text{mSv}$ 。满足辐射工作人员年有效剂量约束值不超过 5mSv 的要求。

## ②公众人员影响

由上表可知，本项目直线加速器运行时，公众年有效剂量最大值为 5.98E-02mSv。

另外，根据平面布局可知，4 号直线加速器机房南侧准备室为后装机配套用房，其位于后装机房西侧，因此需要考虑叠加后装机房的辐射影响。根据表 5.2.1-22，准备间公众受加速器辐射影响的年有效剂量为 2.35E-12mSv，根据表 5.3.1-6，准备间公众受后装机辐射影响的年有效剂量为 1.32E-11mSv，叠加后准备间公众年有效剂量为 1.56E-11mSv。

对于机房 50 米范围内其他公众，由于剂量率与距离平方成反比以及评价范围内建筑墙体屏蔽，随着距离的增加，直线加速器机房实体屏蔽物边界外 50m 范围内公众年有效剂量更小。

以上数据是以机房实体屏蔽体外 30cm 处根据最大使用剂量的剂量率值进行估算，在实际的放疗工作中，工作人员一般都不会近距离停驻在治疗室实体屏蔽体附近，而且很少使用最大剂量，因此以上是偏保守的估算结果，实际情况中职业人员和公众受照累计剂量均低于以上估算值。

### 5.3.1.7 电子线和感生放射性影响分析

根据《辐射防护手册》第三分册 4.1.5 加速器的辐射源（P95），“能量为 E (MeV) 的单能电子线，在物质中的最大射程（单位为  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）约为能量（单位为 MeV）的 0.6 倍”。本项目医用电子直线加速器以电子档工作时最大电子线能量为 22MeV，射程为  $22\times 0.6=13.2\text{g/cm}^2$ ，可以估算出 22MeV 的电子在密度为  $2.35\text{g/cm}^3$  的混凝土中的深度约为 5.6cm，而本项目屏蔽体厚度最小为 1400mm 混凝土（迷路外墙），对电子线能被完全屏蔽。因此，可不考虑电子线对屏蔽墙外的辐射影响。

医院应对加速器机房加强通风排气，并采取人员延时进入机房，以降低活化空气的感生放射性水平，减少人员受照剂量。

### 5.3.1.8 三废环境影响分析

本项目医用电子直线加速器正常运行过程中无放射性废气、废液和固体废物产生，在直线加速器靶件损坏或报废退役时，会有活化废靶产生。

#### ①臭氧和氮氧化物

本项目加速器机房设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，新风口排风口呈现上进下排，对角设置。每个机房内拟设置2个新风口和2个排风口，放疗科直线加速器机房产生的废气经排风系统一并引至楼顶，最终高出楼顶排放，排气口不朝向门、窗或人流量较大的过道等位置。臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，对周围环境影响较小。

#### ②废靶

在直线加速器靶件损坏或报废退役时，会有活化废靶产生。废靶由设备厂家回收最终送交有资质的单位回收处置，医院不暂存，因而正常情况下不会对环境造成明显影响。

### 5.3.2 事故工况的环境影响分析

#### 5.3.2.1 可能发生的辐射事故

本项目直线加速器的安装、检修由设备厂家负责，医院只负责日常安全使用及管理。由于机房的屏蔽措施以及设备固有的安全联锁装置，设备在正常使用的情况下发生事故的概率极小，可能发生的辐射事故主要包括：

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

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

本项目直线加速器属于II类射线装置，当设备关机时不会产生辐射影响，不存在影响辐射环境质量的事故，只有当设备开机时才会产生辐射影响。

#### 5.3.2.2 辐射事故预防措施

一旦发现有人误入直线加速器机房，工作人员应立即利用最近的急停开关切断设备

电源，启动医院辐射事故应急预案。为防止直线加速器辐射事故发生，应采取多种防范措施：

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

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

③剂量控制联锁：安装有剂量监测系统，当吸收剂量未达到预选值时，照射终止。

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

⑤有控制超剂量的联锁装置，当剂量超过预选值时，可自动终止照射。

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

⑦有全部安全联锁设施检查装置，能保证所有安全联锁系统保持良好的运行状态。

⑧有门机安全联锁，机房门关闭后设备才能开机，被打开时会自动关机。

⑨有时间控制联锁，当预选照射时间已定时，定时器能独立地使照射停止。

⑩控制台和治疗室内均安有急停开关。

⑪机房门外设置有声音警示作用的工作状态指示灯和电离辐射警告标志。

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

## 5.4 后装机

### 5.4.1 正常运行期间环境影响分析

#### 5.4.1.1 后装机房设计情况

本项目后装机房位于负二层放疗科，与4间直线加速器机房南北并列。根据院方提供的资料，后装机房四侧墙体、顶棚拟采用标准混凝土（ $\rho=2.35\text{g/cm}^3$ ）浇筑而成，防护门拟采用铅板制作。

表 5.4.1-1 后装机房设计空间几何尺寸

后装机房	机房几何尺寸	机房东西长 5.9m，东西宽 4.35m（不含迷路），迷路内入口宽 1.8m，迷路外入口（门洞）宽 1.5m，迷路长 5.35m，迷路宽度 1.7m，加速器机房治疗室面积为 36.5m <sup>2</sup> （含迷道），顶高 6.8m。
	东墙	1400mm 混凝土
	南墙	1000mm 混凝土
西墙	迷路内墙	1000mm 混凝土
	迷路外墙	1000mm 混凝土
	北墙	2350~3000mm 混凝土（与 4 号加速器机房共用墙体）
	顶棚	600mm 混凝土
	机房防护门	15mm 铅板

#### 5.4.1.2 工作负荷

后装治疗机预计最大工作量情况：20 人（次）/天，100 人（次）/每周，5000 人（次）/年。新装源（活度  $5.55 \times 10^{11}$ Bq）时，每人次照射治疗 5-10min（平均约 6min）。<sup>192</sup>Ir 放射源半衰期较短（74.0d），通常 4 个月左右更换一次放射源，换源前经过约 2 个半衰期，剂量率降低 4 倍，故每人次治疗时间相应延长，大概需要 30-40min。

为了便于估算，本评价以新装源活度计算屏蔽体周围的附加剂量率，出束治疗时间折合为新装源的治疗时间，即周治疗照射时间约为 10h，年累积治疗照射时间约 500h。核素 <sup>192</sup>Ir 的技术参数如下表所示。

表 5.4.1-1 核素 <sup>192</sup>Ir 的技术参数

核素	活度（Bq）	γ射线能量均值	空气比释动能率常数 $K_r$ μSv/(h·MBq)
<sup>192</sup> Ir	$5.55 \times 10^{11}$	0.37MeV	0.111

#### 5.4.1.3 关注点选取

后装机 γ 辐射强度可认为是各向同性照射，后装机房应考虑放射源发射的 γ 射线初级辐射对墙和顶棚的直接照射及其散射辐射在机房入口处的照射。以机房外 30cm 处作为评价关注点，由于后装机可能的使用位置是不固定的，在治疗机房内一定范围内使用。因此，为保守计算，假定使用区域为距离各墙体内壁 0.5m 的矩形区域内（详见图 11.2.2-1 中的矩形区域）。根据后装机房的平面布置图，得出放射源到各关注点的距离 R。关注点选取详见下图。

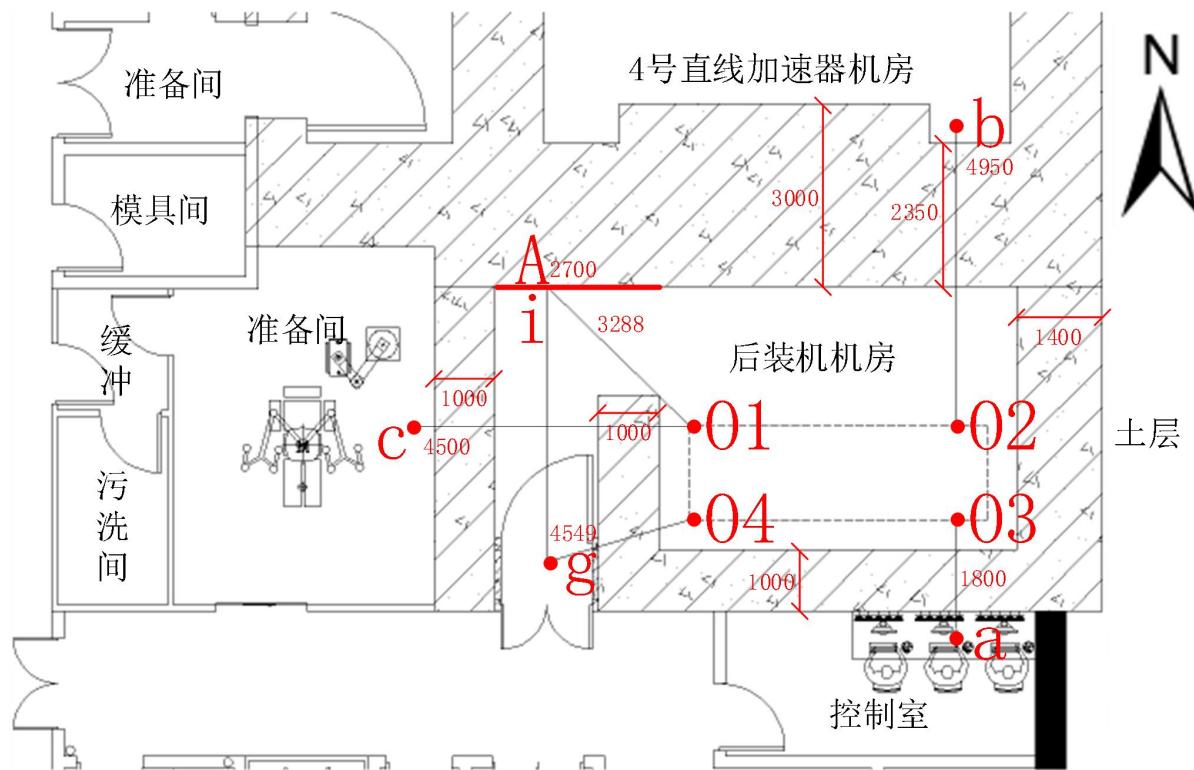


图 5.4.1-1 后装机房平面关注点位图

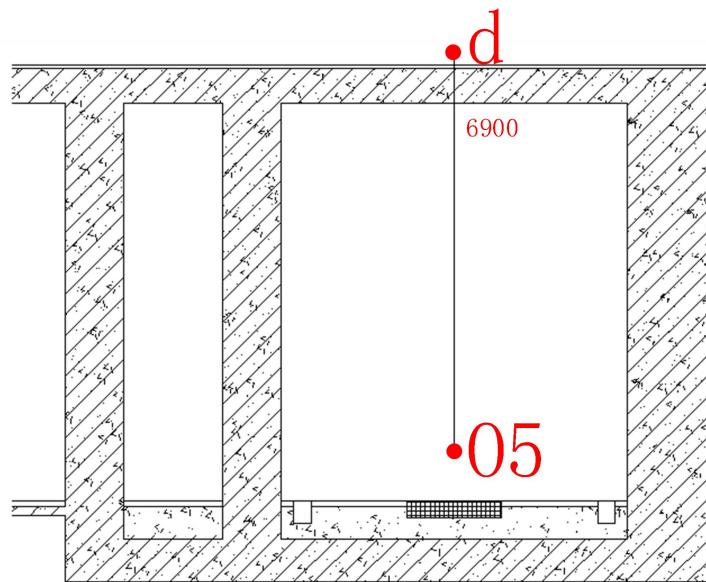


图 5.4.1-2 后装机房剖面关注点位图

#### 5.4.1.4 关注点导出剂量率参考控制水平

关注点导出剂量率参考控制水平计算公式同 5.3.1.4 小节，各关注点导出剂量率参考控制水平见下表。

表 5.4.1-2 导出剂量率参考控制水平计算结果

机房名称	关注点	点位描述	居留因子 (T)	周治疗照射时间 (t)	$H_e$	$\dot{H}_{c,d}$	$\dot{H}_{c,max}$	$\dot{H}_c$
------	-----	------	----------	-------------	-------	-----------------	-------------------	-------------

后装机房	a	南墙主屏蔽区外 30cm (控制室)	1	10	100	10	2.5	2.5
	b	北墙主屏蔽区外 30cm (4号直线加速器机房)	1/2	10	100	20	10	10
	c	迷路外墙外 30cm (准备室)	1/8	10	5	4	10	4
	g	防护门外 30cm	1/8	10	5	4	10	4
	d	顶棚上方 30cm 处 (非机动车库)	1/16	10	5	8	10	8

#### 5.4.1.5 辐射影响预测

##### (1) 初级射线的影响预测

根据拟建后装机的技术参数和治疗机房的设计方案，参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第3部分： $\gamma$ 射线源放射治疗机房》(GBZ/T201.3-2014)中使用的什值层( $TVL$ )计算方法，预测后装机最大装载放射源活度时，治疗机房外各关注点的辐射剂量率水平。

首先根据公式5.4.1-1计算当X射线束以 $\theta$ 角斜射入厚度为 $X$ (cm)的屏蔽物质时，射线束在斜射路径上的有效屏蔽厚度 $X_e$ (cm)。

$$X_e = X \sec \theta \dots \dots \dots \text{(式 5.4.1-1)}$$

式中：

$X$ ——屏蔽物质厚度；

$X_e$ ——有效屏蔽厚度；

$\theta$ ——斜射角，即入射线与物质平面的法线的夹角。

按式5.4.1-2估算屏蔽物质的屏蔽透射因子B，再按式5.3.1-3计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率 $\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )。

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \dots \dots \dots \text{(式 5.4.1-2)}$$

式中：

B——辐射屏蔽透射因子；

$TVL_1$ ——辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度；

$TVL$ ——辐射在屏蔽物质中的平衡什值层厚度；

参照GBZ/T201.3-2014附录C表C.1， $^{192}\text{Ir}$ 产生的 $\gamma$ 射线在密度为 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 的标准混凝土中的什值层厚度， $TVL=TVL_1=152\text{mm}$ ；在密度为 $11.34\text{g}/\text{cm}^3$ 的铅中的什值层厚度，

$\text{TVL}_1 = \text{TVL} = 1.6\text{cm.}$

$$\dot{H} = \frac{H_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \quad \dots \dots \dots \text{(式 5.4.1-3)}$$

式中：

$\dot{H}_o$ ——活度为 A 的放射源在距其 1m 处的剂量率,  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ;

$f$ ——对有用线束为 1;

R——辐射源点(靶点)至关注点的距离, m;

B——屏蔽物质的屏蔽透射因子。

其中  $\dot{H}_0$  按公式 5.4.1-4 计算。

式中：

A: 放射源的活度, 单位为 MBq; 本项目为  $5.55 \times 10^5$  MBq。

$K_r$ : 放射源的空气比释动能率常数, 单位为 $\mu\text{Sv}/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ , 根据 GBZ/T201.3-2014

附录 C 表 C.1 取 0.111。

根据公式 5.4.1-4 可计算  $\dot{H}_o = 5.55 \times 10^5 \times 0.111 = 6.16 \times 10^4 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

再使用公式 5.4.1-1~3 计算出治疗机房各关注点的辐射剂量率水平，计算因子和结果见下表。

表 5.4.1-3 后装机关注点初级辐射剂量率的预测结果

关注点	点位描述	辐射类型	屏蔽墙混凝土有效厚度 Xe (mm)	距离 R (m)	TVL <sub>1</sub> /TVL (mm)	预测值 $\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
a	南墙主屏蔽区外 30cm (控制室)	初级	1000	1.8	152	5.01E-03
b	北墙主屏蔽区外 30cm (4号直线加速器机房)	初级	2350	4.95	152	8.71E-13
c	迷路外墙外 30cm (准备室)	初级	2000	4.5	152	2.11E-10
g	防护门外 30cm	初级	1000	4.549	152	7.85E-04
d	顶棚上方 30cm 处 (非机动车车库)	初级	600	6.9	152	1.46E-01

注：本表中  $X_C$  有效屏蔽厚度均按照 0.1% 为 0' 考虑。

## (2) 散射辐射的影响预测

治疗机房入口处的辐射主要来自经述道多次反射的散射辐射。根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第3部分： $\gamma$ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）中对后装治疗

机房入口处散射辐射屏蔽计算方法，入口处的散射辐射剂量率 $\dot{H}_g$ 采用下式计算，计算参数和结果见表 5.4.1-4。

$$\dot{H} = \frac{A \cdot K_r \cdot S_w \cdot \alpha_w}{R_1^2 \cdot R_2^2} \dots \dots \dots \text{(式 5.4.1-5)}$$

式中：

$A$ ——放射源的活度，单位：MBq；

$K_r$ ——放射源的空气比释动能率常数，单位为 $\mu\text{Sv}/(\text{h.MBq})$ ，根据 GBZ/T201.3-2014 附录 C 表 C.1 本次取 0.111。

$S_w$ ——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，单位： $\text{m}^2$ ；

$\alpha_w$ ——散射体的散射因子；

$R_1$ ——辐射源至散射体中心点的距离，单位：m；

$R_2$ ——散射体中心点至计算点的距离，单位：m；

表 5.4.1-4 关注点 g 点处未经防护门屏蔽的散射辐射剂量率预测结果

参数	$A$ (MBq)	$K_r$ $\mu\text{Sv}/(\text{h.MBq})$	$S_w$ ( $\text{m}^2$ )	$\alpha_w$	$R_1$ (m)	$R_2$ (m)	$\dot{H}_g$ $\mu\text{Sv}/\text{h}$
数值	$5.55 \times 10^5$	0.111	18.36	$3.39 \times 10^{-2}$	3.288	4.549	1.71E+02

经迷道壁散射后迷道口的散射辐射能量约 0.2MeV，铅中的 TVL 为 5mm。该后装机房的房防护门为 15mm 铅当量，经防护门屏蔽后迷道口的辐射剂量率利用公式 5.4.1-6 计算。

$$\dot{H} = \dot{H}_g \cdot 10^{-\left(\frac{X}{TVL}\right)} + \dot{H}_{og} \dots \dots \dots \text{(式 5.4.1-6)}$$

式中：

$\dot{H}_g$ ——防护门入口处的 g 处的散射辐射剂量率，由表 5.3.1-4 可知， $1.71 \times 10^2 \mu\text{Sv}/\text{h}$ ；

$X$ ——防护门铅板厚度，mm；本项目为 15mm；

$TVL$ ——铅板的什值层，mm；取 5mm；

$\dot{H}_{og}$ ——图 11.2.2.2-1 中 04 位置穿越迷路内墙的泄漏辐射在 g 处的辐射剂量率，由表 5.3.1-3 可知， $\dot{H}_{og}$  为  $7.85 \times 10^{-4} \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

经计算，经防护门屏蔽后，防护门外的辐射剂量率可降至  $1.72 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

### (3) 计算小结

后装机房外的剂量率预测结果与周围剂量当量率参考控制水平比较如表 5.4.1-5 所示。

**表 5.4.1-5 剂量率预测结果与周围剂量当量率控制要求比较**

关注点	点位描述	辐射剂量率预测结果 $H$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	周围剂量当量率控制要求 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	是否满足控制要求
a	南墙主屏蔽区外 30cm (控制室)	5.01E-03	2.5	满足
b	北墙主屏蔽区外 30cm (4 号直线加速器机房)	8.71E-13	10	满足
c	迷路外墙外 30cm (准备室)	2.11E-10	4	满足
g	防护门外 30cm	1.72E-01	4	满足
d	顶棚上方 30cm 处 (非机动车库)	1.46E-01	8	满足

综上所述，经以上理论预测分析，本项目后装机治疗室各屏蔽体外表面 30cm 处辐射剂量率均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021) 相应的剂量率参考控制水平。

#### 5.4.1.6 职业人员和周围公众年有效剂量估算

根据式 5.2.1.2-1，本项目居留因子的选取见表 1.4.2-1。本项目职业人员和周围公众年有效剂量估算见下表。

**表 5.4.1-6 放疗科职业人员和周围公众年有效剂量估算**

机房	关注点		预测剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	居留因子	t (h/a)	年有效剂量 (mSv)	剂量约束值 (mSv/a)	人员类别
后装机房	a	南墙主屏蔽区外 30cm (控制室)	5.01E-03	1	500	2.51E-03	5.0	职业
	b	北墙主屏蔽区外 30cm (4 号直线加速器机房)	8.71E-13	1/2	500	2.18E-13	5.0	职业
	c	迷路外墙外 30cm (准备室)	2.11E-10	1/8	500	1.32E-11	0.1	公众
	g	防护门外 30cm	1.72E-01	1/8	500	1.08E-02	0.1	公众
	d	顶棚上方 30cm 处 (非机动车库)	1.46E-01	1/16	500	4.56E-03	0.1	公众

##### ①辐射工作人员影响

由上表可知，后装机房工作人员在控制室进行设备操作时的年有效剂量最大值为 2.51E-03mSv。

由于辐射工作人员需要进入后装机治疗室内协助患者进行摆位，在摆位过程中会受到放射源的照射。辐射工作人员进入治疗室之前，必须确保放射源处于后装机的工作储

源器中，并佩戴个人剂量报警仪进入机房。辐射工作人员协助患者摆位时在治疗室内的停留时间按 2min 计，与工作储源器的平均距离按 1m 考虑。根据厂家提供的资料，工作贮源器内装载最大容许活度即  $5.55 \times 10^{11} \text{Bq}$  时，距离贮源器表面 1m 处的球面上，任何一点的泄漏辐射的空气比释动能率不大于  $5\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。以该剂量率值作为辐射工作人员摆位工作的最大辐射剂量率，则辐射工作人员全年摆位过程所受的个人剂量为  $5\mu\text{Gy}/\text{h} \times 2\text{min} \times 1/60 \div 1000 \times 20 \text{ 人}/\text{天} \times 250 \text{ 天}/\text{a} = 0.84\text{mSv}/\text{a}$ 。本项目后装机房配置 2 名技师，则单名技师摆位过程所受的个人剂量为  $0.42\text{mSv}/\text{a}$ 。摆位过程对辐射工作人员的影响较大，辐射工作人员应熟悉摆位流程，在满足治疗质量要求的前提下，尽量减少治疗室内停留时间。

另外，辐射工作人员在后装机房内摆位时可能受到其余机房的辐射影响，因此需要考虑叠加其余机房的辐射影响，根据表 5.3.1-21，后装机房摆位人员受其余加速器辐射影响的年有效剂量为  $7.02\text{E}-02\text{mSv}$ 。

综上所述，则加速器机房工作人员年有效剂量最大值为  $2.51\text{E}-03\text{mSv} + 7.02\text{E}-02\text{mSv} + 0.42\text{mSv} = 0.49\text{mSv}$ 。满足辐射工作人员年有效剂量约束值不超过  $5\text{mSv}$  的要求。

## ②公众人员影响

由上表可知，本项目后装机运行时，公众年有效剂量最大值为  $1.08\text{E}-02\text{mSv}$ 。

另外，根据平面布局可知，4 号直线加速器机房南侧准备室为后装机配套用房，其位于后装机房西侧，因此需要考虑叠加后装机房的辐射影响。根据表 5.3.1-21，准备间公众受加速器辐射影响的年有效剂量为  $2.35\text{E}-12\text{mSv}$ ，根据表 5.4.1-6，准备间公众受后装机辐射影响的年有效剂量为  $1.32\text{E}-11\text{mSv}$ ，叠加后准备间公众年有效剂量为  $1.56\text{E}-11\text{mSv}$ 。

对于机房 50 米范围内其他公众，由于剂量率与距离平方成反比以及评价范围内建筑墙体屏蔽，随着距离的增加，直线加速器机房实体屏蔽物边界外 50m 范围内公众年有效剂量更小。

以上数据是以机房实体屏蔽体外 30cm 处根据最大使用剂量的剂量率值进行估算，在实际的放疗工作中，工作人员一般都不会近距离停驻在治疗室实体屏蔽体附近，而且很少使用最大剂量，因此以上是偏保守的估算结果，实际情况中职业人员和公众受照累计剂量均低于以上估算值。

### 5.4.1.7 三废环境影响分析

### ①放射性固体废物

本项目废<sup>192</sup>Ir 放射源按照废旧放射源返回合同规定，交回生产单位或者返回原出口方，对周边环境无影响。

### ②废气

本项目后装机房设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，新风口排风口呈现上进下排，对角设置。每个机房内拟设置2个新风口和2个排风口，放疗科后装机房产生的废气经排风系统一并引至楼顶，最终高出楼顶排放，排气口不朝向门、窗或人流量较大的过道等位置。臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，对周围环境影响较小。

### ③固体废物

后装机配套使用 UPS 电源，该 UPS 电源采用铅蓄电池供电，根据《国家危险废物名录》（2025 年版），废铅蓄电池属于危险废物（废物代码：900-052-31），其更换周期约 5 年/次，更换下的 UPS 电源交由有资质单位处置。

## 5.4.2 事故工况的环境影响分析

### 5.4.2.1 可能发生的辐射事故

①放射源密封壳破损，源活性物质泄漏；

②治疗过程中，发生卡源事故；

③安全联锁装置失效，人员误入治疗室而受到额外照射，还可能发生放射源阻丝、源位异常等故障；

④设备检修时，工作人员误将治疗机的屏蔽装置打开或者卸下放射源，对维修人员产生额外照射。

⑤工作人员操作不当或设备故障，在设备安装、更换放射源时，放射源由设备或容器中滑落出来，造成安装或操作人员受到额外照射。

### 5.4.2.2 辐射事故预防措施

①治疗过程如果发生卡源事故，首先尝试自动回源，如自动回源失败，工作人员立即进入治疗室将病人推出治疗床，并封锁现场。同时打电话给厂家，由厂家安排专业人员来现场进行处理。

②一旦发生放射源丢失、被盗，发现人员应立即上报给医院辐射安全管理领导小组，管理小组及时报警（拨打 110），并上报当地生态环境、卫生部门，同时全力配

合调查。

③本项目后装机治疗室配置了一系列防护措施，如有智能化控制台、有条件显示联锁、剂量控制联锁、门机安全联锁、视频监控、对讲装置、紧急停机开关等。机房的设计也满足防火、防水、防盗、防丢失和防破坏以及防射线泄漏。

## 5.5 模拟定位 CT 机

### 5.5.1 正常运行的环境影响分析

#### 5.5.1.1 辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平

本项目所使用的模拟定位 CT 型号未定，所使用的 CT 额定管电压均为 140kV，由于 CT 自身带有屏蔽系统，机房周围主要受泄漏辐射影响，根据《医用电气设备 第 1-3 部分：基本安全和基本性能的通用要求 并列标准：诊断 X 射线设备的辐射防护》（GB9706.103-2020）中“12.4 加载状态下的泄漏辐射 X 射线管组件和 X 射线源组件在加载状态下的泄漏辐射，当其在相当于基准加载条件下以标称 X 射线管电压运行时，距焦点 1m 处，1h 内在任一 100cm<sup>2</sup> 区域（主要线性尺寸不大于 20cm）的空气比释动能不应超过 1.0mGy。”屏蔽计算时，参考 GBZ/T201.1-2007， $\mu\text{Gy}/\text{h}$  与  $\mu\text{Sv}/\text{h}$  的转化因子取 1。

本项目模拟定位 CT 机房的各屏蔽体的有效屏蔽厚度均不低于 3mmPb，根据《放射诊断放射防护要求》附录 C 的 C.1.2 中式 C.1 计算得屏蔽透射因子最大为 1.28E-04，距离屏蔽体外最近关注点的距离取 4.3m，剂量换算系数 Sv/Gy 取 1，则 CT 设备运行所致的辐射剂量率为 6.92E-03 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）规定的 2.5 $\mu\text{Sv}/\text{h}$  控制剂量率要求。

#### 5.5.1.2 人员受照剂量估算

本项目模拟定位 CT 机投入使用后，预计每天诊断患者最多为 100 人次，设备每次曝光时间不超过 20 秒，每周工作 5 天，每年工作 250 天，则设备年出束时间为 138.9h。本项目模拟定位 CT 共有 2 名技师轮岗操作，则单个技师在控制室年受照时间约为 69.4h。

根据式 5.2.1.2-1，本项目居留因子的选取见表 1.4.2-1。本项目职业人员和周围公众

年有效剂量估算见下表。

表 5.5.1-1 职业人员和周围公众年有效剂量估算

保护目标	辐射剂量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	居留因子	年工作时间 h	年有效剂量 (mSv)	剂量约束值 (mSv/a)	人员类别
东侧走廊	6.92E-03	1/4	138.9	2.40E-04	0.1	公众
南侧走廊	6.92E-03	1/4	138.9	2.40E-04	0.1	公众
西侧走廊	6.92E-03	1/4	138.9	2.40E-04	0.1	公众
北侧控制室	6.92E-03	1	69.4	4.80E-04	5	职业人员
上方停车场	6.92E-03	1/16	138.9	6.01E-05	0.1	公众
下方停车场	6.92E-03	1/16	138.9	6.01E-05	0.1	公众

由上表可知,本项目模拟定位 CT 运行时,辐射工作人员年有效剂量为 4.80E-04mSv,能够满足本项目职业人员年有效剂量不超过 5mSv 的剂量约束值要求。

模拟定位 CT 机房周围公众年有效剂量最大值为 2.40E-04mSv,能够满足本项目公众年有效剂量不超过 0.1mSv 的剂量约束值要求。对于机房 50 米范围内其他公众,由于剂量率与距离平方成反比以及评价范围内建筑墙体屏蔽,随着距离的增加,模拟定位 CT 机房实体屏蔽物边界外 50m 范围内公众年有效剂量更小。

### 5.5.1.3 臭氧及氮氧化物影响分析

本项目模拟定位 CT 机房拟采用动力通风装置进行通风,新风口和排风口均设置于机房吊顶,保证机房内有良好的通风。模拟定位 CT 运行时产生的少量臭氧和氮氧化物经排风系统引至楼顶,最终高出楼顶排放。臭氧和氮氧化物排入大气环境后,经自然分解,可达标排放,对周围环境影响较小。

## 5.5.2 事故影响分析

### 5.5.2.1 可能发生的辐射事故

①工作人员或病人家属在防护门关闭前尚未撤离机房,模拟定位 CT 机运行可能产生误照射。

②安全装置发生故障状况下,人员误入正在运行的 CT 模拟定位机机房内。

③滥用 X 射线对患者进行诊断、治疗,造成病员受到不必要的照射。

### 5.5.2.2 辐射事故预防措施

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,严禁在警示灯失

效的情况下违规操作。

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

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

④医院做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

## 6 辐射安全管理

### 6.1 机构和人员

#### 6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构

《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条规定：使用I类、II类、III类放射源，使用I类、II类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少有1名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

医院目前已成立专门的放射安全与防护委员会，委员会设1名主席，4名副主席，2名秘书，3名专管员，44名成员（由放射科、放疗科、核医学科、心内科、手术室、基建科、质量管理办公室、保卫科主任及业务骨干担任），具体见附件13。本项目建成后，由该委员会负责本项目相关的辐射安全和管理工作。

医院放射安全与防护委员会的主要职责如下：

- (1) 负责建立和完善医院放射性同位素及射线装置的管理和防护，放射性同位素的转让许可审批和安全使用、保管，放射性废物、废水的处理等工作制度。
- (2) 负责对新建、改扩建、拆迁有关放射、防护工程进行前期可行性研究并报批卫生部门、环保部门和药监部门。
- (3) 定期实施工作环境和相关工作人员的放射防护监测，监管、布置和检查放射性同位素与射线装置等放射防护管理工作的落实情况并完成年度评估报告。
- (4) 组织放射诊疗工作人员接受专业技术、放射防护知识及有关规定的培训、健康检查及个人剂量检测。
- (5) 负责各级行政部门的检查接待工作和各项问题的整改及落实。
- (6) 组织及落实全院放射防护用品统一检测，周期为每年一次。
- (7) 放射安全与防护委员会会议为定期会议，每季度召开一次。
- (8) 各院区每季度安排一次放射安全与防护巡查。

综上所述，医院放射安全与防护委员会的基本组成涵盖放射性同位素和射线装置的管理与使用等相关部门，明确了组成人员及相关职责，故医院放射安全与防护委员会的配备能够满足辐射管理工作的要求。

#### 6.1.2 辐射工作人员配置计划

医院放疗科现有辐射工作人员 60 名，主要为 27 名治疗医生、11 名物理师、22 名治疗技师。本项目质子治疗依托医院现有放疗科 22 名辐射工作人员，主要调配 10 名医生、4 名物理师、8 名治疗技师，并对外新聘 12 名辐射工作人员（4 名物理师、8 名治疗技师）。物理师、治疗技师只从事本项目质子放疗工作；治疗医生除从事本项目质子放疗工作外，还会继续从事放疗科现有的光子束放疗工作，主要包括：采集专科病史和专科体格检查，为肿瘤患者制定治疗方案，参与患者放疗体位制作，负责勾画放疗靶区及正常组织勾画，提交放疗计划要求，审核放疗计划，患者放疗体位验证以及治疗期间的患者管理及随访等工作，并及时记录各种病历文书。

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40 号）的规定，“销售（含建造）、使用Ⅰ类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。”本项目拟配备 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，同时作为辐射安全专职管理人员。辐射防护负责人新增工作人员，医院应按要求每两年进行在岗期间职业健康体检，并建立职业健康档案；组织其参加全国核技术利用辐射防护与安全培训平台（<http://fushe.mee.gov.cn/>）的辐射防护与安全培训并考核合格，考核合格后，方可上岗，并按时接受再培训；佩戴个人剂量计，建立剂量健康档案并存档保存，个人剂量计三个月送检一次。

除上述医院人员外，迈胜常驻 2 名维修工程师负责质子放射治疗系统运行期间日常的维护保养、故障维修，不作为医院人员进行管理。

表 6.1.2-1 本项目辐射工作人员计划配置情况（医院）

设备	岗位类别	人数 (人)	新增	现有调配
质子放射治疗系统	辐射防护负责人（注册核安全工程师）	1	1	0
	治疗医生	10	0	10
	治疗技师	16	8	8
	物理师	8	4	4
直线加速器	医生	4	0	4
	物理师	4	4	0
	技师	8	8	0
后装机	医生	1	0	1
	物理师	1	1	0
	技师	2	2	0

模拟定位 CT	技师	2	2	0
---------	----	---	---	---

**表 6.1.2-1 本项目辐射工作人员计划配置情况（质子设备厂家）**

岗位类别	人数（人）	新增/现有调配	是否与厂家其他工作交叉
维修工程师	4	现有调配	否

## 6.2 辐射安全管理规章制度

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

为加强辐射安全管理，医院在不断总结完善近年来核技术利用工作经验的基础上，制定了包括《辐射防护安全管理制度》（包含放射工作人员培训计划，放射工作场所的监测等相关内容）、《操作规程》、《职责制度》、《放射事故与核事故应急处理预案》等制度，并严格按照规章制度执行，至今未出现辐射事故。

在本项目建成运行前，医院还应制定质子放射治疗系统操作规程和放射性废物处理制度，并完善放疗设备的维护、维修和保养制度、放射安全事件应急预案等规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。

## 6.3 辐射监测

本项目辐射监测总体包括工作场所监测、个人剂量监测和环境监测。工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测主要以巡测的方式进行；个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主、个人剂量报警仪为辅的方式进行。

### 6.3.1.1 工作场所监测

本项目工作场所监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，采用安装固定式监测仪表和便携式监测仪表相结合的方式，监测数据均记录存档。按照 HJ 1198-2021 的相关要求，具体辐射工作场所监测计划列于表 6.3.1-1。

### 6.3.1.2 环境监测

参照《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）表 9、表 11、表 12 的相关规定，并

结合本项目主要辐射源项特点及实际情况，本项目环境监测计划列于表 6.3.1-2。

其中，在院区内质子治疗机房顶板上方附近设 1 个固定式监测点位，该监测点设固定式中子、 $\gamma$ 探测器各 1 个，用于对环境中子、 $\gamma$ 辐射水平进行实时监测。监测数据通过有线或无线通讯设备实时传输至终端数据处理中心。

表 6.3.1-1 本项目辐射工作场所监测计划表

辐射工作场所	监测类别	监测方式	监测项目	监测点位	监测频次
质子治疗机房	自行监测	固定式仪表监测	X、 $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量率	质子治疗机房各层迷道入口处设 1 个点位，控制室内设 1 个点位	实时
		便携式仪表监测		质子治疗机房四周和顶棚屏蔽墙体外、防护门外、放射性废物间、活化水间、监督区边界及周围需要关注的区域	1 次/季度
	委托监测	便携式仪表巡测			1 次/年
每间直线加速器机房	自行监测	固定式仪表监测	X、 $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量率	每间加速器机房迷道内口处设 1 个点位	实时
		便携式仪表监测		机房防护门外、四面墙体外、顶棚上方、控制室操作位及周围需要关注的监督区	1 次/季度
	委托监测	便携式仪表巡测			1 次/年
后装机房	自行监测	固定式仪表监测	X、 $\gamma$ 辐射剂量率	后装机房迷道内口处设 1 个点位	实时
		便携式仪表监测		机房防护门处、四面墙体外、顶棚上方、控制室操作位及周围需要关注的监督区	1 次/季度
	委托监测	便携式仪表巡测			1 次/年
模拟定位 CT 机房	自行监测	便携式仪表监测	X、 $\gamma$ 辐射剂量率	防护门外、门缝、控制室、各侧屏蔽墙外 30cm 处、顶棚上方 100cm 处，楼下距地 170cm 处及周围需要关注的监督区	1 次/季度
	委托监测	便携式仪表巡测			1 次/年

表 6.3.1-2 本项目环境监测计划

辐射工作场所	监测对象	采样(监测)布点	监测项目	监测频次
质子治疗机房	外照射	院区内设置 1 个环境固定辐射监测点位，位于质子治疗机房顶板上方	$\gamma$ 辐射空气吸收剂量率 中子剂量当量率	实时
		加速器主体建筑墙外 30cm 开展巡测，选择主体建筑墙外、楼顶及院区相应的关注点开展定点监测		1 次/年
	土壤	医院院区四周，院区外敏感点	$^{7}\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、总 $\beta$	1 次/年
	地表水	医院院区周边河流	$^{3}\text{H}$ 、 $^{7}\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、总 $\beta$	1 次/年

辐射工作场所	监测对象	采样（监测）布点	监测项目	监测频次
	循环冷却水	衰变池	$^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、总 $\beta$	1 次/年（排放前）
	固体废物外表面	质子放射性固废暂存间、质子活化部件暂存间	$\gamma$ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
			感生放射性核素、 $\gamma$ 能谱	收集及送贮时
每间直线加速器机房	外照射	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	$\gamma$ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
后装机房	外照射	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	$\gamma$ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
模拟定位 CT 机房	外照射	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	$\gamma$ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年

### 6.3.1.3 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。质子治疗机房和加速器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- $\gamma$  和中子的功能。

医院为辐射工作人员配备了个人剂量计，并委托江西省地质局实验测试大队进行个人剂量监测，个人剂量计三个月送检一次。安排专人负责个人剂量监测，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

个人剂量报警仪用于工作人员在机房内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

### 6.3.1.4 监测设备

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式 X- $\gamma$  探测器、固定式中子探测器、便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- $\gamma$  辐射巡测仪、便携式表面污染检测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见下表。

表 6.3.1-3 本项目拟配备的辐射监测设备清单

序号	仪器名称	数量，台	总计，台	备注
1	固定式 X- $\gamma$ 探测器	质子治疗区域：10 台 直线加速器区域：4 台 环境固定辐射监测点位：1 台	15	新增
2	固定式中子探测器	质子治疗区域：10 台 环境固定辐射监测点位：1 台	11	新增
3	便携式 X- $\gamma$ 辐射巡测仪	质子治疗区域：1 台 放疗中心：1 台	2	新增
4	便携式中子辐射巡测仪	质子治疗区域：1 台	1	新增
5	直读式个人剂量报警仪	质子治疗区域：6 台 直线加速器：2 台/间，共 8 台	14	新增，需具有监测 X- $\gamma$ 和中子的功能
6	个人剂量计	1 支/人	—	

## 6.4 辐射事故应急预案

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）要求，使用 II 类以上（含 II 类）射线装置的辐射工作单位应建立完善

的辐射事故应急方案或具有针对性与操作性的应急措施。

医院应在本项目建成运行前，成立辐射事故应急处理小组，由项目辐射安全相关负责人担任组长。按照上述要求制定可行的《辐射事故应急预案》，具体内容包括应急处理原则、辐射事故分级、应急响应程序、应急报告电话等。且根据辐射源项的更新不断完善应急预案，定期进行辐射事故应急演练，并做好演练记录。

重点应做好以下几个方面的工作：

(1) 成立辐射事故应急小组，并由项目辐射安全相关负责人担任组长，负责辐射事故应急处置工作的组织、指挥和协调。

### (2) 信息上报

一旦发生辐射事故，现场工作人员应立即停止装置出束或工作同时报告医院辐射事故应急小组，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，且向双流区、成都市生态环境局报告。对于造成或可能造成人员超剂量照射的，还应向双流区、成都市公安局和卫生行政主管部门报告。报告联系电话如下：

环境保护举报热线电话：12369；

成都市生态环境局：028-61885200；

成都市卫生健康委员会电话：028-61881910；

双流区卫生健康委员会电话：028-85822918。

### (3) 辐射事故应急处置措施

发生辐射事故后，应采取以下应急处置措施：

1) 针对射线装置/放射源使用期间的辐射事故，事故发生时刻应立即按下急停开关或直接断电停机，撤出机房内人员；针对放射性同位素使用期间的辐射事故，事故发生时应确定现场的辐射强度和污染区域，并标出禁入控制范围，将可能受到污染的衣物留在污染区内，对被污染的人员采取一定的去污措施后离开污染区；

2) 尽快将可能受到辐射伤害的人员送到指定医院进行救治；

3) 对于需要进入机房内部进行应急操作的情况，工作人员应穿戴防护用品，并佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪；

4) 应尽可能记录现场有关情况，对工作人员可能受到的事故照射剂量，可针对事故实际情况进行评估，并对工作人员进行健康检查和跟踪，按照国家有关放射卫生防护标准和规范以及相关程序，评估事故对工作人员健康的影响；

5) 对可能受到污染的辐射事故现场实施连续监测，并保护好现场；

6) 事故处理后必须组织有关人员进行讨论，分析事故发生的原因，从中吸取经验和教训，必须采取措施防止类似事故再次发生。

#### (4) 应急培训和演练

定期进行应急培训，熟悉各类辐射事故应急响应程序、辐射防护的基本知识、应急救援的操作技能、人员和场所去污的基本知识和操作技能、辐射监测仪表的性能和操作。

定期进行辐射事故应急演练，对每一次演练应认真进行评价和总结。应以模拟辐射事故应急响应的形式进行应急演练，并设计不同情景的假想辐射事故进行演练，还应对应急响应中各项具体操作技能进行练习。

#### (5) 应急装备保障

应配备一定的应急设施设备，主要包括通讯设备、交通工具、辐射监测设备、辐射防护用品、救援器材和工具等。

通过采取上述措施，加强医院辐射事故应急能力建设，确保一旦发生辐射事故，能立即启动辐射事故应急预案，并采取相应的应急措施。

## 6.5 年度评估报告

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环保部第 18 号令）第十二条的规定，医院应对其放射性同位素和射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向生态环境主管部门提交上一年度的评估报告。评估报告主要包括以下内容：

- (1) 辐射安全和防护设施的运行与维护情况；
- (2) 辐射安全和防护制度及措施的制定与落实情况；
- (3) 辐射工作人员变动及接受辐射安全与防护考核情况；
- (4) 放射性同位素、射线装置等台账；
- (5) 场所辐射环境监测和个人剂量监测情况及监测数据；
- (6) 辐射事故及应急响应情况；
- (7) 核技术利用项目新建、改建、扩建和退役情况；
- (8) 存在的安全隐患及其整改情况；
- (9) 其他有关法律、法规规定的落实情况。

## 6.6 申请者从事辐射工作能力评价

### 6.6.1 辐射安全与环境保护管理

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应当设置专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少安排 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

同时，根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40 号）的规定，使用 I 类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。

医院拟设置辐射安全与环境保护管理小组，组长由分管安全的医院领导担任，全面负责辐射防护和安全管理的领导工作；小组成员由医务处、质子治疗科室、核医学科、放疗科等涉及核技术利用工作的科室领导和工作人员组成，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。

一名注册核安全工程师尚未落实到位。目前，医院已制定相关工作计划，确保在取证前配备齐全具有相应资质的专业人员。

医院按此要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。

### 6.6.2 辐射工作人员培训

根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。

医院制定了辐射工作人员培训计划，新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，必须通过生态环境部培训平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

在严格落实人员培训计划后，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

### 6.6.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者射线装置使用场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用质子放射治疗系统、电子直线加速器等医用射线装置以及核医学等用于放射诊疗，经预测分析评价，各区域的辐射屏蔽设计均能确保屏蔽体外剂量率水平满足相关标准的要求。各机房设计了完备的安全联锁系统，通过门-机联锁、门-灯联锁、紧急停机、声光报警、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止工作人员和公众意外照射。本项目的辐射防护设计方案满足辐射防护与安全的要求。

建设单位应按照辐射防护设计方案进行施工建设，并确保经验收合格后投入使用。在此基础上，各射线装置机房、核医学工作场所能满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

#### 6.6.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目拟为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过3个月。并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。并配备个人剂量报警仪，用于工作人员在治疗机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目拟在质子治疗机房、直线加速器机房、回旋加速器机房、热室等区域内设固定式监测仪表，能够对工作场所内的辐射水平进行实时在线监测。此外，拟配备便携式X- $\gamma$ 辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式表面污染检测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

医院按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

#### 6.6.5 规章制度

为加强辐射安全管理，医院在不断总结完善近年来核技术利用工作经验的基础上，制定了包括《辐射防护安全管理制度》（包含放射工作人员培训计划，放射工作场所的监测等相关内容）、《操作规程》、《职责制度》、《放射事故与核事故应急处理预案》等制度，并严格按照规章制度执行，至今未出现辐射事故。

在本项目建成运行前，医院还应制定质子放射治疗系统操作规程和放射性废物处理制度，并完善放疗设备的维护、维修和保养制度、放射安全事件应急预案等规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。

## 6.6.6 辐射事故应急

医院已制定有《放射事故与核事故应急处理预案》（见附件 7），医院每年均定期开展辐射事故应急演练，并对演练结果进行总结，及时对放射事件应急处理预案进行完善和修订。经医院核实，自辐射活动开展以来，未发生过辐射事故。

医院应根据本项目的建设内容和特点对现有的《放射安全事件应急预案》进行补充、完善，在本项目建成运行前，制定好可行、符合要求的应急预案。

## 6.6.7 辐射工作能力综合评价

对照根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》最新修订要求，对医院从事申请活动种类（使用 I 类、II 类、III 类射线装置以及放射性同位素）的能力进行综合分析与评价，结果见下表。

表 6.6.7-1 建设单位从事辐射活动能力的评价

序号	应具备条件	评价结果
1	使用 I 类、II 类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	医院已成立专门的放射防护委员会，为满足本项目使用 I 类射线装置的需求，还应调整放射防护委员会成员，并配备 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人。
	依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	至少应有 1 名注册核安全工程师，方可满足要求。
2	新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。	医院拟从事辐射工作的人员上岗前需参加并通过辐射安全与防护考核，考核合格后，方可满足要求。
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	设计满足要求。
4	放射性同位素与射线装置使用场所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施	设计满足要求。
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。	设计满足要求。
6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	医院制定了包括《辐射防护安全管理制度》（包含放射工作人员培训计划，放射工作场所的监测等相关内容）、《操作规程》、《职责制度》、《放射事故与核事故应急处理预案》等制度，并严格按照规章制度执行，至今未出现辐射事故。 在本项目建成运行前，医院还应制定质子放射治疗系统操作规程和放射性废物处理制度，并完善放疗设备的维护、维修和保养

		制度、放射安全事件应急预案等规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。
7	有完善的辐射事故应急措施。	医院应根据本项目的建设内容和特点对现有的《放射安全事件应急预案》进行补充、完善，在本项目建成运行前，制定好可行、符合要求的应急预案。
8	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	设计满足要求。

## 6.7 环保投资一览表

本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表见下表。

**表 6.7-1 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表**

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资（万元）
1	辐射安全管理	有放射防护委员会，设专人负责，制度上墙	依托原有
2	人员考核	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核	
3	监测仪器和防护用品	固定式区域 $\gamma$ 监测仪、固定式中子区域监测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- $\gamma$ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪	
		工作服、口罩、手套等	
4	辐射防护设施工程（辐射屏蔽墙体和放射性三废处理设施）		
5	环境影响评价、竣工环保验收		
	总计		

## 6.8 竣工环保验收一览表

本项目建成后，医院应按规定组织自主验收，编制验收监测报告表。本项目的竣工环保验收内容及要求列于见下表。

表 6.8-1 本项目竣工环保验收一览表

序号	验收内容	验收要求	
1	环保资料	本项目审批后的环境影响报告书、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。	
2	辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。	
3	人员要求	1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名； 2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
5	电离辐射	屏蔽体外剂量率	1. 质子放射治疗系统辐射工作场所四周实体屏蔽墙、入口门外、机房顶：剂量率水平不高于表 1.4.2-2 中的数值； 2. 直线加速器机房和后装机房四周屏蔽墙、机房顶和防护门外剂量率水平不高于表 1.4.2-2 中的数值； 3 模拟 CT 机房四周屏蔽墙、机房顶和防护门外剂量率水平不高于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。
6	辐射防护与安全措施	质子放射治疗系统	1. 辐射工作场所分区： 控制区：加速器机房、4 间治疗室； 监督区：上述控制区四周屏蔽体外相邻场所； 2. 人身安全联锁系统：由 PLC、出入管理设备、紧急开出门按钮、急停开关、清场按钮、声光报警灯、视频监控和对讲装置等组成，且所有安全设备均能正常投入使用； 3. 通风系统：加速器大厅、束流输运线、各治疗室均设有送风、排风管道，治疗室换气次数不低于 4 次/小时； 4. 场所辐射监测系统：加速器大厅及主控室、各治疗室及其控制室均设置固定式辐射监测点，每个点位设一台 $\gamma$ 探测器和 1 台中子探测器。
		直线加速器	1. 辐射工作场所分区： 控制区：加速器机房（含迷道）；监督区：加速器机房屏蔽体外四周场所及控制室； 2. 安全设备及系统：设置钥匙控制、门机联锁、视频监控及对讲系统、急停按钮、工作状态指示灯等； 3. 通风系统：机房内采用空调机送风、排风机排风，上送下排，呈对角线布置的方式，换气次数不少于 4 次/h； 4. 场所辐射监测：每间加速器机房设 1 台固定式 $\gamma$ 辐射监测仪。
		CT 机	1. 辐射工作场所分区：CT 机房为控制区，机房四周场所及控制室为监督区； 2. 安全设备及系统：机房门外设有电离辐射警告标志，机房门上方设有醒目的工作状态指示灯，灯箱上设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，工作状态指示灯能与机房门有效关联等。

				3.通风系统：设有机械通风系统，保持良好的通风。
6	放射性三废处理设施	质子装置	废气	质子治疗机房设通排风系统，经排风风机引至质子治疗中心屋顶，排风风机出口设置高效过滤器+活性炭吸附装置，排放高度不低于21m。
			废水	质子治疗中心负三层设置的2个衰变池（有效容积均为6m <sup>3</sup> ），总有效容积为12m <sup>3</sup> ，若出现设备维修或发生冷却水泄漏事故，可能被活化的冷却水（即用于冷却回旋加速器部件的回路中的冷却水）排入集水井。
			固体废物	在质子治疗中心负二层东北角设置单独的质子活化部件暂存间、质子放射性固废暂存间，仅用于暂存质子放射治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固体废物。
7	辐射监测	工作场所监测		制定工作场所监测计划，包括自行监测和委托监测，并按计划的频次开展监测。
		环境监测		制定环境辐射监测计划，包括自行监测和委托监测，并按计划的频次开展监测。
		个人剂量监测		每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过三个月，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。
		监测设备		1.固定式X-γ探测器：22台； 2.固定式中子探测器：11台； 3.便携式X-γ辐射巡测仪：3台； 4.便携中子辐射巡检仪：1台； 5.便携式表面污染监测仪：2台； 6.直读式个人剂量报警仪：24台； 7.个人剂量计：1支/人。

## 7 利益-代价分析

### 7.1 利益分析

随着我国社会经济的迅速发展，人民生活水平有了很大提高，医疗卫生条件得到进一步改善。然而，肿瘤（特别是恶性肿瘤）依然是国民健康水平进一步提高的主要障碍。根据国家癌症中心最新癌症统计数据，2016年我国恶性肿瘤新发病例约406.4万人，死亡约241.4万人，我国恶性肿瘤负担日益加重，城乡差异较大，地区分布不均衡，癌症防控形势严峻。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子放射治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。质子治疗装置已成为当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。

本项目的建设将具有较好的社会效益和经济效益，具体如下：

(1) 本项目建成后，将有力的提升杭州市乃至浙江省的医疗水平，给区域内外肿瘤患者提供更高质量的放疗服务和更便捷的就医环境，对提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

(2) 本项目的建设，对促进社会基础设施建设有重要而深远的意义，对推动区域医疗卫生健康事业的发展具有积极作用，从而提高社会效益。

(3) 本项目的经济效益主要来自项目运行后的财政收入。收入来源主要为医疗收入、药品收入、其他收入、财政差额拨款等。财务分析计算结果表明，本项目具有较好的经济效益。

### 7.2 代价分析

#### (1) 社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面：质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程的建设用地面积约 $14301m^2$ ，总建筑规模 $54007m^2$ ，项目引进质子放射治疗系统、医用电子直线加速器、后装机、模拟定位CT等医疗设备，满足杭州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。

能源方面，项目运行期间需用水、电等能源。

### (2) 经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等方面的成本。

### (3) 环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，辐射工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性气体进入大气环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，项目运行期间对环境的影响均低于国家标准中规定的限值。

## 7.3 实践的正当性分析

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中“4.3.1 实践的正当性 4.3.1.1 对于一项实践，只有在考虑了社会、经济和其他有关因素之后，其对受照个人或社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时，该实践才是正当的。”

质子治疗肿瘤技术具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应和更加精准的宽度方向控制，比传统放疗技术具有更为理想的肿瘤局控率和较少的副作用，在国际上被誉为 21 世纪最理想的放疗手段之一。质子治疗装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。本项目拟使用的质子放射治疗系统设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽可能降低对工作人员和公众的辐射影响。

医用电子直线加速器和后装机是现代放射治疗体系中的重要组成部分，其中医用电子直线加速器术前放疗可抑制癌细胞活力，减少移植，术后放疗可作为肿瘤切除不彻底的补救措施等；后装机尤其适用于腔道内及浅表肿瘤的治疗，如妇科宫颈癌、前列腺癌、乳腺癌以及皮肤癌等。

经分析评价，本项目对辐射工作人员和公众的辐射影响满足国家相关标准要求。本项目对患者和社会所带来的利益（主要是患者的健康有利）大于可能引起的辐射危害。通过对本项目的利益和代价的简要分析，考虑经济、社会、环境各方面的因素，利益大于代价，项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）规定的“实践的正当性”，说明本项目满足正当性要求。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于广大患者。因此，本项目的实施是正当的。

## **8 结论**

### **8.1 项目工程概况**

浙江大学医学院附属邵逸夫医院（浙江省邵逸夫医院）拟在浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼开展核技术利用项目，主要在质子治疗中心负一层、负二层、负三层建设质子治疗机房及其附属用房，主要包括 1 间回旋加速器机房（含能量选择隧道和束流传输隧道）、4 间质子治疗室（均为旋转治疗室），拟使用 1 套多室质子放射治疗系统（I 类射线装置，质子最高能量为 230MeV），质子治疗系统配套 X 射线管（每间质子治疗室各安装 2 个）；在负二层建设放疗中心，主要包括 4 间医用直线加速器机房、1 间后装机房和 1 间模拟定位 CT 机房，拟使用 4 台医用电子直线加速器（II 类射线装置）、1 台后装机（采用  $^{192}\text{Ir}$  放射源，属于 III 类放射源）、1 台模拟定位 CT（属于 III 类射线装置）。项目总投资约 11.6826 亿元，其中环保投资约\*\*万元，占总投资约\*\*%。

本项目运行期间的辐射源项主要是使用各类医用射线装置时产生的“瞬发辐射”和装置停机后依然存在的“感生放射性”，以及运行期间产生的放射性三废。

### **8.2 实践的正当性**

质子治疗肿瘤技术具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应和更加精准的宽度方向控制，比传统放疗技术具有更为理想的肿瘤局控率和较少的副作用，在国际上被誉为 21 世纪最理想的放疗手段之一。除了质子放射治疗系统，医用电子直线加速器、后装机和模拟定位 CT 也是医院放射治疗体系中的重要组成部分。

本项目拟使用的射线装置均设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响很小，满足国家相关标准要求。本项目对患者和社会所带来的利益（主要是患者的健康有利）是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术利用实施活动是正当的。

### **8.3 选址、布局合理性分析**

本项目拟建于医院院区内，与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的质子治疗、放射治疗、模拟定位场所，并拟设置物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目布局满足肿瘤放疗的功能需要，便于辐射工作场所的防护管理和安全控制，

以及放射性污染的防治。从辐射防护与环境保护的角度，项目的选址可行，平面布局合理。

## 8.4 辐射安全与防护措施

(1) 辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。

(2) 辐射安全联锁系统：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等，可有效防止工作人员和公众受到意外照射。

(3) 辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算各辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平。

(4) 通风系统：各辐射工作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。

(5) 工作场所辐射监测系统：放射治疗机房内均设有固定式场所辐射监测仪表，对工作场所内剂量率水平进行实时监测和显示，确保工作人员和公众的安全。

## 8.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，辐射工作人员和公众的年最大有效剂量为均低于本次评价确定的  $5\text{mSv/a}$  的职业照射剂量约束值和  $0.1\text{mSv/a}$  的公众照射剂量约束值。

## 8.6 放射性三废排放和处理

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自质子放射治疗系统。

质子治疗机房内设置了独立的通排风系统，其运行期间产生的放射性气体经场所内排风管道引至建筑屋面排放。质子治疗机房可能产生放射性废液的场所，均设计衰变池，放射性废液经专用管道排入衰变池内，确保其在得到处置前能够安全暂存。经暂存衰变，满足排放要求后排入医院污水管网。

质子治疗机房设计了固体废物暂存容器/场所，确保放射性固体废物在得到处置前能够安全暂存。暂存一定时间后，满足解控标准的，解控后按一般固体废物/医疗废物/危险废物处理或由设备生产商回收，不满足解控要求的委托有资质单位收贮，或由设备生产商回收。

## 8.7 辐射安全管理

医院设置专门的辐射安全管理机构；目前正按照人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面内容建立一系列辐射安全管理制度及辐射事故应急预案；制定辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗；配置一名注册核安全工程师；目前制定的辐射环境及工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

## 8.8 总结

综上所述，建设单位拟开展的“浙江大学医学院附属邵逸夫医院质子治疗中心暨科研转化大楼建设工程配套核技术利用项目”在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和环境的影响符合环境保护的要求，该项目对环境的影响是可以接受的。建设单位在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，故从辐射防护和环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。