

核技术利用建设项目
山东省肿瘤防治研究院
技术创新与临床转化平台质子治疗系统项目
环境影响报告书

山东省肿瘤防治研究院

2019年8月

环境保护部监制

核技术利用建设项目
山东省肿瘤防治研究院
技术创新与临床转化平台质子治疗系统项目
环境影响报告书

建设单位名称：山东省肿瘤防治研究院

建设单位法人代表（签名或签章）：于金明

通讯地址：山东省济南市济兗路 440 号

邮政编码：250117

联系人：卢楠

电子邮箱：zlyyptxm@163.com

联系电话：0531-67626473

编制单位和编制人员情况表

建设项目名称	山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台质子治疗系统项目		
环境影响评价文件类型	环境影响报告书		
一、建设单位情况			
建设单位（签章）	山东省肿瘤防治研究院		
法定代表人或主要负责人（签字）	于金明		
主管人员及联系电话	崔毅 13698605177		
二、编制单位情况			
主持编制单位名称（签章）	中国原子能科学研究院		
社会信用代码	12100000400000309R		
法定代表人（签字）	万钢		
三、编制人员情况			
编制主持人及联系电话	伏亚萍 010-69359058		
1. 编制主持人			
姓名	职业资格证书编号	签字	
伏亚萍	HP00011567		
2. 主要编制人员			
姓名	职业资格证书编号	主要编写内容	签字
伏亚萍	HP00011567	第一、二、八章	
孟庆森	HP0005271	第三、四、五章	
许慧萍	HP00015976	第六、七章	
金潇	/	参与第一、三、四、五章	
罗欣	/	参与二、六章	
严源	/	审核	
文富平	/	审定	
四、参与编制单位和人员情况			

前言

山东肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目位于济南市槐荫区南北三号路以东、烟台路延长线以北、京台高速以西，济南国际医学科学中心核心区内，建设内容主要包括 1 座医疗综合楼和 1 座质子维护楼以及其他配套设施和环保设施。其中，涉及核技术利用的建设内容包括使用 1 套质子治疗系统（I 类）、使用 4 台医用电子直线加速器（II 类）、核医学科以及其他 III 类医用射线装置。

依据《中华人民共和国环境影响评价法》（2018 年）和《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2018 年 4 月 28 日实施），该项目属于“三十九 医院、专科医院防治院（所、站）、社区医院、卫生院（所、站）、血站、急救中心、妇幼保健院、疗养院等其他卫生机构”以及“五十 核与辐射 使用 I 类、II 射线装置”，需要编制相应类别的环境影响评价报告。目前，本项目已办理的环评手续主要有：

（1）项目建设内容中涉及院区建筑土建部分已委托北京中环博宏环境资源科技有限公司编制了《山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目环境影响报告表》，并已 2018 年 9 月 7 日获得济南市环境保护局的批复（济环报告表[2018]40 号），见附件 1。

（2）项目建设内容中涉及核医学科、医用电子直线加速器及其他 III 类射线装置部分已委托山东博瑞达环保科技有限公司编制了《核医学工作场所及医用电子加速器应用项目环境影响报告表》，并于 2019 年 6 月 27 日取得济南市生态环境局的批复（济环辐表审[2019]31 号），见附件 2。

本次环评的评价对象为技术创新与临床转化平台项目中 2#质子维护楼使用的“1 套质子治疗系统”，主要针对使用质子治疗系统期间的环境影响进行评价。

目 录

1	概述	1-1
1.1	项目名称、地点	1-1
1.2	项目概况	1-1
1.2.1	建设单位概况	1-1
1.2.2	项目背景、意义	1-2
1.2.3	本次环评内容	1-3
1.2.4	产业政策和规划符合性	1-4
1.2.5	周围环境概况	1-6
1.2.6	核技术利用现状	1-6
1.3	编制依据	1-8
1.3.1	法律、法规和规章	1-8
1.3.2	技术导则、标准	1-9
1.3.3	其它文件、资料	1-10
1.4	评价标准	1-11
1.4.1	剂量限值和剂量约束值	1-11
1.4.2	辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	1-11
1.4.3	放射性废水排放限值	1-12
1.4.4	放射性固体废物	1-13
1.5	评价范围和保护目标	1-13
1.5.1	评价范围	1-13
1.5.2	环境保护目标	1-14
2	自然环境与社会环境状况	2-1
2.1	地理位置	2-1
2.2	自然环境状况	2-2
2.2.1	地形地貌	2-2
2.2.2	气候气象	2-2

2.2.3	地质构造	2-2
2.2.4	水文地质	2-3
2.2.5	土壤与植被	2-4
2.3	社会环境概况	2-4
2.3.1	社会发展状况	2-4
2.3.2	经济发展状况	2-5
2.3.3	文化教育	2-5
2.3.4	风景名胜	2-5
2.4	辐射环境质量现状调查	2-6
2.4.1	监测内容	2-6
2.4.2	监测设备和监测方法	2-6
2.4.3	质量保证措施	2-8
2.4.4	监测结果	2-9
3	工程分析与源项	3-1
3.1	主要构筑物及平面布局	3-1
3.2	工艺设备	3-1
3.2.1	质子治疗系统概况	3-1
3.2.2	治疗流程	3-8
3.3	辐射源项分析	3-9
3.3.1	瞬时辐射源	3-10
3.3.2	中子天空反散射	3-15
3.3.3	感生放射性	3-16
3.3.4	臭氧等有害气体的产生	3-40
4	辐射安全与防护设施	4-1
4.1	辐射屏蔽	4-1
4.1.1	屏蔽体外剂量率限值	4-1
4.1.2	屏蔽设计	4-1

4.1.3	屏蔽计算	4-5
4.1.4	迷道的设计	4-30
4.2	人身安全联锁系统	4-35
4.2.1	设计准则	4-35
4.2.2	控制区划分	4-36
4.2.3	系统组成	4-37
4.3	场所辐射监测系统	4-45
4.4	通风系统	4-46
4.5	人流路线	4-49
4.6	辐射工作场所分区	4-51
4.7	放射性三废治理	4-51
4.7.1	放射性废气	4-51
4.7.2	放射性废液及处理措施	4-52
4.7.3	放射性固体废物及其处理措施	4-53
5	辐射环境影响分析	5-1
5.1	正常运行的环境影响分析	5-1
5.1.1	工作人员受照剂量估算	5-1
5.1.2	公众的受照剂量估算	5-5
5.2	事故工况下的环境影响	5-12
5.2.1	事故情景分析	5-12
5.2.2	假想事故后果分析	5-13
6	辐射安全管理	6-1
6.1	辐射安全与环境保护管理机构	6-1
6.2	辐射工作人员管理	6-2
6.3	辐射安全管理制度	6-3
6.4	辐射监测	6-3
6.4.1	工作场所监测	6-3

6.4.2	个人剂量监测	6-6
6.4.3	环境监测	6-6
6.4.4	监测设备	6-7
6.5	申请者从事辐射工作能力评价	6-7
6.5.1	辐射安全与环境保护管理	6-8
6.5.2	辐射工作人员培训	6-8
6.5.3	工作场所的安全防护措施	6-9
6.5.4	个人防护用品及监测仪器	6-9
6.5.5	规章制度	6-10
6.5.6	辐射事故应急预案	6-10
6.5.7	放射性三废治理	6-11
6.5.8	质量保证	6-11
6.5.9	辐射工作能力综合评价	6-12
6.6	环保投资及“三同时”竣工验收一览表.....	6-13
7	利益-代价分析.....	7-1
7.1	利益分析	7-1
7.2	代价分析	7-1
8	结论和承诺.....	8-1
8.1	结论	8-1
8.2	承诺与建议	8-2
8.2.1	承诺	8-2
8.2.2	建议	8-3
附件 2 《核医学工作场所及医用电子加速器应用项目环境影响报告表的批复》错		
误!未定义书签。		
附件 1 院区环评批复		
		8-3
附件 2 《核医学工作场所及医用电子加速器应用项目环境影响报告表的批复》		
		8-3

附件 3 《山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目可行性研究报告》批 复	8-3
附件 4 环境影响评价委托书	8-3
附件 5 济南市规划局项目选址意见	8-3
附件 6 辐射安全许可证	8-3
附件 7 辐射环境现状监测报告	8-3
附件 8 辐射监测仪器检定证书	错误!未定义书签。

文中图目录

图 1-1 评价范围和保护目标示意图.....	1-14	
图 3-1 院区总平面布局图.....	3-1	
图 3-2 质子维护楼地下二层平面布局示意图.....	3-3	
图 3-3 地下一层平面布局示意图.....	3-4	
图 3-4 质子维护楼地上一层平面布局示意图.....	3-5	
图 3-5 质子维护楼屋面布局示意图.....	3-6	
图 3-6 回旋加速器大厅剖面图.....	3-7	
图 3-7 第一旋转束治疗室剖面图.....	3-7	
图 3-8 第三旋转束治疗室剖面图.....	3-8	
图 3-9 固定束实验室剖面图.....	3-8	
图 3-10 质子维护楼整体剖面图.....	3-9	
图 3-11 质子维护楼整体剖面图（控制室区）.....	3-9	
图 3-12 束流输运线隧道剖面图.....	3-10	
图 3-13 PROBEAM 质子治疗系统结构组成示意图.....	3-2	
图 3-14 本项目质子治疗系统平面布局示意图.....	3-3	
图 3-15 回旋加速器示意图.....	3-4	
图 3-16 能量选择系统结构示意图.....	3-5	
图 3-17 束流传输系统示意图.....	3-6	
图 3-18 固定束实验室（左）和旋转束治疗室（右）.....	3-7	
图 3-19 固定束实验室 X 示意图射线管位置.....	3-8	
图 3-20 旋转束治疗室 X 射线管位置示意图.....	3-8	
图 3-21 束流损失点位图.....	3-11	
图 3-22 245MEV 质子轰击人体组织等效靶产生的中子辐射场.....	3-12	
图 3-23 不同能量的单个质子与不同材料的靶物质作用的中子产额.....	3-21	
图 3-24 停机时刻治疗室内剩余剂量率	图 3-25 停机 1MIN 后治疗室内剩余剂量率.....	3-34

图 3-26 停机 5MIN 后治疗室内剩余剂量率	图 3-27 停机 10MIN 后治疗室内剩余剂 量率	3-34
图 3-28 停机 30MIN 后治疗室内剩余剂量率	图 3-29 停机 1H 后治疗室内剩余剂 量率	3-35
图 3-30 回旋加速器大厅内束流损失所致周围中子剂量率分布.....		3-38
图 3-31 束流输运线上的沿程束流损失所致中子剂量率分布.....		3-38
图 3-32 旋转束治疗室向相邻治疗室工作区照射时的中子剂量率分布.....		3-39
图 4-1 墙体厚度示意图.....		4-2
图 4-2 质子治疗系统辐射工作场所各区域屋顶厚度.....		4-3
图 4-3 质子治疗系统辐射工作场所各区域屋顶厚度示意图.....		4-4
图 4-4 回旋加速器大厅周围关注点位示意图.....		4-7
图 4-5 回旋加速器大厅顶板关注点位示意图.....		4-15
图 4-6 降能器周围地沟位置示意图	图 4-7 降能器下方地板关注点示意图..	4-18
图 4-8 第一旋转束治疗室周围关注点.....		4-19
图 4-9 第一旋转束治疗室顶板周围关注点位示意图.....		4-20
图 4-10 第三旋转束治疗室周围关注点位示意图.....		4-23
图 4-11 固定束实验室周围关注点位示意图		4-25
图 4-12 固定束实验室顶板关注点.....		4-25
图 4-13 束流输运线隧道周围关注点.....		4-27
图 4-14 束流输运线顶板关注点.....		4-27
图 4-15 回旋加速器大厅迷道示意图	图 4-16 旋转束治疗室迷道示意图	4-31
图 4-17 固定束实验室迷道示意图		4-31
图 4-18 输运线隧道迷道示意图.....		4-32
图 4-19 辐射工作场所控制区及联锁门位置示意图		4-37
图 4-20 声光报警装置.....		4-40
图 4-21 质子治疗系统束流闸安装点位示意图.....		4-43
图 4-22 安全联锁设施分布点位图		4-44
图 4-23 PROBEAM 质子治疗系统辐射监测系统结构		4-45

图 4-24 质子治疗区地下一层通风系统管道布局图.....	4-47
图 4-25 束流输运线末端排风机位置示意图.....	4-48
图 4-26 质子治疗区人流路线图.....	4-50
图 4-27 放射性固体废物储藏室位置示意图.....	4-53
图 5-1 计算时关注的公众区域.....	5-7
图 6-1 在线辐射监测系统监测点位.....	6-5

文中表目录

表 1-1 山东省肿瘤防治研究院已获许可使用的放射源明细.....	1-6
表 1-2 山东省肿瘤防治研究院已获许可使用的非密封放射性工作场所明细.....	1-7
表 1-3 山东省肿瘤防治研究院已获许可使用的射线装置明细	1-7
表 1-4 质子治疗装置辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平.....	1-12
表 1-5 《污水综合排放标准》中的排放标准要求.....	1-12
表 1-6 冷却水感生放射性核素排放限值.....	1-13
表 1-7 工作场所表面污染控制水平, BQ/CM ²	1-13
表 1-8 本项目电离辐射评价范围内环境保护目标情况.....	1-14
表 2-1 监测对象和项目	2-6
表 2-2 仪器设备及性能指标	2-6
表 2-3 监测方法.....	2-7
表 2-4 本项目拟建场址及周围环境外照射剂量率监测结果	2-9
表 2-5 土壤样品中总 A、总 B 活度浓度监测结果, BQ/KG	2-10
表 2-6 地下水样中总 A、总 B 活度浓度监测结果, BQ/L.....	2-10
表 3-1 本项目拟配备的医用射线装置一览表.....	3-1
表 3-2 PROBEAM 质子治疗系统主要技术指标	3-1
表 3-3 PROBEAM 质子治疗系统束流损失参数	3-10
表 3-4 250MEV 质子与 Cu 厚靶和人体组织靶作用的中子辐射源项和在混凝土屏蔽体中的衰减长度	3-13
表 3-5 250MEV 质子与 C 靶作用的中子辐射源项和在混凝土屏蔽体中	3-13
表 3-6 250MEV 质子与铜靶作产生的中子在铁屏蔽体中的衰减长度	3-14
表 3-7 密度 3.53G/CM ³ 的磁铁矿型重混凝土的密度百分比	3-15
表 3-8 245MEV 质子与人体组织等效靶作用产生的中子源项和在重混凝土中的衰减长度	3-15
表 3-9 质子治疗系统各区域顶板厚度及其外表面 30CM 剂量率	3-16

表 3-10 空气活化产生的主要放射性核素	3-17
表 3-11 放射性核素衰变常数计算结果	3-19
表 3-12 质子治疗系统通风换气设计情况.....	3-19
表 3-13 单位体积空气中靶核的数目计算结果	3-20
表 3-14 中子注量率计算所用参数和计算结果.....	3-20
表 3-15 各靶核的活化截面取值	3-22
表 3-16 回旋加速器大厅（含输运线隧道）和治疗室内空气感生放射性核素的活度 浓度， BQ/M^3	3-22
表 3-17 停机后再通风 45MIN 回旋加速器大厅（含输运线隧道）内空气感生放射性 核素的活度浓度， BQ/M^3	3-22
表 3-18 质子治疗系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量， BQ ..	3-23
表 3-19 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数	3-24
表 3-20 冷却水系统中子注量率计算用参数和计算结果.....	3-25
表 3-21 一次循环冷却水设计参数.....	3-26
表 3-22 冷却水感生放射性计算结果	3-26
表 3-23 回旋加速器结构部件感生放射性计算结果.....	3-28
表 3-24 降能器感生放射性计算结果.....	3-29
表 3-25 准直器感生放射性计算结果.....	3-29
表 3-26 能量狭缝感生放射性计算结果.....	3-30
表 3-27 束流闸感生放射性计算结果.....	3-31
表 3-28 各区域地板厚度及其外表面剂量率水平.....	3-32
表 3-29 人体组织等效靶的组成成分.....	3-33
表 3-30 单次治疗后，治疗室内距靶（患者）表面 30CM、50CM、1M 处感生放射性 剂量率随停机时间的变化	3-35
表 3-31 旋转束治疗室连续治疗 2MIN 后，不同停机时刻由患者所致感生放射性核 素的活度浓度	3-36
表 3-32 空气感生放射性剂量率计算结果.....	3-37
表 3-33 旋转束治疗室治疗 2MIN，停机 1MIN、5MIN 和 10MIN 后，治疗室摆位区（距	

离患者 50cm 处) 的剂量率	3-39
表 4-1 本项目质子治疗系统工作场所屏蔽体外剂量率限值.....	4-1
表 4-2 回旋加速器大厅周围关注点及设计的剂量率限值	4-6
表 4-3 回旋加速器大厅关注点 1 屏蔽计算参数.....	4-8
表 4-4 回旋加速器大厅屏蔽计算结果.....	4-8
表 4-5 回旋加速器大厅关注点 2 屏蔽计算参数.....	4-8
表 4-6 回旋加速器大厅关注点 2 屏蔽计算结果.....	4-8
表 4-7 回旋加速器大厅关注点 3 屏蔽计算参数.....	4-9
表 4-8 回旋加速器大厅关注点 3 屏蔽计算结果.....	4-9
表 4-9 回旋加速器大厅关注点 4 屏蔽计算参数.....	4-10
表 4-10 回旋加速器大厅关注点 4 屏蔽计算结果.....	4-10
表 4-11 回旋加速器大厅关注点 5 屏蔽计算参数.....	4-11
表 4-12 回旋加速器大厅关注点 5 屏蔽计算结果.....	4-11
表 4-13 回旋加速器大厅关注点 6 屏蔽计算参数.....	4-12
表 4-14 回旋加速器大厅关注点 6 屏蔽计算结果.....	4-12
表 4-15 回旋加速器大厅关注点 7 屏蔽计算参数.....	4-12
表 4-16 回旋加速器大厅关注点 7 屏蔽计算结果.....	4-13
表 4-17 回旋加速器大厅关注点 8 的剂量率计算参数.....	4-13
表 4-18 回旋加速器大厅关注点 8 的剂量率计算结果	4-14
表 4-19 回旋加速器大厅关注点 9 的剂量率计算参数.....	4-14
表 4-20 回旋加速器大厅关注点 9 的剂量率计算结果.....	4-14
表 4-21 回旋加速器大厅顶板各关注点及其剂量率限值.....	4-15
表 4-22 回旋加速器大厅顶板处各关注点剂量率计算参数.....	4-16
表 4-23 回旋加速器大厅顶板关注点剂量率计算结果.....	4-16
表 4-24 降能器下方地板关注点计算参数.....	4-18
表 4-25 降能器下方地板关注点计算结果.....	4-18
表 4-26 第一旋转束治疗室周围各关注点及其剂量率限值.....	4-19
表 4-27 第一旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算参数.....	4-20

表 4-28 第一旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算结果	4-21
表 4-29 第一旋转束治疗室各关注点的距离因子及其设计的剂量率限值.....	4-22
表 4-30 第三旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算参数.....	4-23
表 4-31 第三旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算结果	4-23
表 4-32 固定束实验室各关注点的距离因子及其设计的剂量率限值.....	4-24
表 4-33 固定束实验室周围各关注点剂量率计算参数.....	4-26
表 4-34 固定束实验室周围各关注点剂量率计算结果	4-26
表 4-35 束流输运线隧道周围关注点及其剂量率限值.....	4-27
表 4-36 束流输运线隧道周围各关注点剂量率计算参数.....	4-28
表 4-37 束流输运线隧道周围各关注点剂量率计算结果	4-28
表 4-38 质子治疗区各区域屏蔽体外剂量率计算结果汇总.....	4-28
表 4-39 回旋加速器大厅迷道计算结果.....	4-33
表 4-40 高能输运线隧道迷道计算参数和计算结果.....	4-33
表 4-41 固定束实验室迷道的计算参数和计算结果.....	4-34
表 4-42 旋转束治疗室迷道计算参数和计算结果.....	4-34
表 4-43 各区域迷道口剂量率计算结果.....	4-35
表 4-44 辐射工作场所控制区划分.....	4-36
表 4-45 质子治疗区通风系统设计参数.....	4-46
表 4-46 冷却水感生放射性核素排放限值.....	4-52
表 5-1 加速器控制室内工作人员受照剂量估算结果.....	5-2
表 5-2 治疗室控制室的工作人员受照剂量估算结果.....	5-2
表 5-3 每间治疗室内所有摆位人员的年工作量.....	5-3
表 5-4 每间治疗室内每名摆位人员的工作量.....	5-3
表 5-5 患者治疗前摆位期间，摆位人员所在区域的剂量率.....	5-3
表 5-6 每间治疗室每位摆位人员由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量 ...	5-4
表 5-7 每间治疗室每位摆位人员年总受照剂量.....	5-4
表 5-8 工作人员受照剂量汇总.....	5-5
表 5-9 公众所在区域瞬时剂量率计算参数.....	5-8

表 5-10 公众所在区域瞬时剂量率计算结果	5-8
表 5-11 公众所受瞬时辐射照射剂量计算结果.....	5-8
表 5-12 最近距离居民小区处地面空气浓度计算结果.....	5-10
表 5-13 剂量转换因子	5-10
表 5-14 空气浸没外照射剂量计算结果.....	5-11
表 5-15 吸入内照射剂量计算结果.....	5-11
表 5-16 公众受照剂量汇总, mSv/A.....	5-12
表 5-17 质子治疗装置使用期间可能发生的各类事故分析.....	5-12
表 6-1 辐射安全与环境保护管理小组人员.....	6-1
表 6-2 工作人员类别及配置情况.....	6-2
表 6-3 环境介质取样监测计划.....	6-7
表 6-4 辐射监测设备清单	6-7
表 6-5 与环保部第 3 号令的对照.....	6-12
表 6-6 本项目拟采取的环境保护措施及环保投资一览表.....	6-13
表 6-7 环保竣工验收项目一览表	6-14

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台质子治疗系统项目

建设地点：项目位于济南市槐荫区南北三号路以东、烟台路延长线以北、京台高速以西，济南国际医学科学中心核心区内。

建设性质：扩建

建设单位：山东省肿瘤防治研究院

项目投资：项目总投资为 147000 万元，其中环保投资约 400 万元，占总投资的 0.27%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

山东省肿瘤防治研究院始建于 1958 年，位于济南市槐荫区济兗路 440 号，隶属于山东省医学科学院，是集医疗、科研、教学、预防为一体并跨省区服务的省级肿瘤防治研究中心；是中国工程院院士单位、肿瘤科国家临床重点专科建设单位、国家药物临床试验机构、山东大学附属省肿瘤医院、山东省一类科研院所、“泰山学者”岗位、山东省十大临床医学中心之一；是省内首批通过三甲复审的专科医院、首批省重点专病专科医院。医院事业单位法人证书见附件 3。

医院占地面积 405 亩，建筑面积 16.2 万平方米，固定资产 7.5 亿元，在职职工总数 1890 人，编著床位 1950 张，年门诊量 15 万余人次，收治病人约 6.8 万人次。拥有中国工程院院士 1 人，中央联系的高级专家、中央保健会诊专家、享受国家政府津贴、教育部长江学者和“万人计划”专家等 10 余人，泰山学者攀登计划、

泰山学者岗位特聘专家、泰山学者青年专家、省有突出贡献的中青年专家等 18 人。

医院设有肿瘤放射治疗科、肿瘤外科、肿瘤内科、妇瘤科四大学科、19 个专业 40 个病区、20 多个医技科室和基础研究室，形成了以手术、放疗、化疗、中医药、生物治疗、介入、微创等多种技术相互配合的综合治疗优势。医院现拥有一批重点专科，其中，以于金明院士为学科带头人的放射肿瘤学为国家临床重点专科，普外科、妇科、医学检验科为山东省临床重点专科，肿瘤放射治疗学、乳腺肿瘤学为山东省医药卫生重点学科。2006 年以来，全省累计完成临床筛查 40 余万例，累计覆盖人口 350 万，平均早诊率达 75%，显著提高了患者的治愈率和生存质量。

1.2.2 项目背景、意义

癌症是严重危害人类健康的重大慢性疾病，在我国已居居民死因第一位。我省每年新发癌症病例约 25 万人，病亡 17 万人。当前我国癌症治疗水平与美国等国家相比还有很大差距。

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

质子治疗装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备，目前我国多地都在筹建质子治疗中心。作为经济、人口大省，山东省在高端医疗资源方面存在不足，缺乏优质专科医院。无论是从满足省内广大人民群众健康保障需要，还是从提高山东省高端医疗技术水平的角度，都应尽快提升肿瘤的治疗水平。根据《山东省“十三五”卫生与健康规划》，山东省将建设济南国际医学科学中心，发展高端医疗服务。“山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目”位于济南国际医学科学中心范围内，该项目以引进肿瘤质子治疗项目为主体，旨在建立国际

化、高端肿瘤质子治疗平台，为山东省、全国以及东北亚肿瘤患者提供国际化、高水平的医疗服务，满足高端患者的临床需求。项目可研报告已于 2019 年 1 月 30 日取得山东省发改委的批复。（见附件 4）

项目将建设专科医院、肿瘤防控中心、抗癌药物临床研究中心等综合医疗功能区，建成后将成为济南国际医学科学中心内重要的肿瘤优质专科资源，将大大提升技术创新与临床转化能力，提高医院对各类肿瘤重大疾病的诊疗和防治水平，提高全省对肿瘤疾病的研究和治疗能力，对推动全省的医疗卫生健康事业发展具有积极作用，对提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

1.2.3 本次环评内容

“山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化项目”选址位于山东省济南市槐荫区南北三号路以东、烟台路延长线以北、京台高速以西，总建筑面积 87950m²，总用地面积为 37417m²，主要建设医疗综合楼、质子维护楼以及其他配套设施和环保设施。项目建成后新增床位 300 张，预计门诊量为 60 人/d。

该项目院区土建部分环评报告《山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目环境影响报告表》已于 2018 年 9 月 7 日获得济南市环境保护局的批复（济环报告表[2018]40 号，见附件 1）。本次环评对象是质子维护楼使用的 1 套质子治疗系统（I 类射线装置），主要针对质子治疗系统使用过程中产生的环境影响进行评价。

本项目使用 Varian 公司生产的 ProBeam 质子治疗系统，质子最高能量为 250MeV，包括一台超导回旋质子加速器、3 间旋转束治疗室和 1 间固定束实验室（科研用）。

根据《射线装置分类》的规定，能量大于 100 兆电子伏的医用加速器的管理类别均属于 I 类射线装置。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2018 年）以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（环境保护部 第 3 号令）的规定，本项目环境影响评价文件类别确定为编制环境影响报告书。因此，中国原子能科学研究院受建设单位的委托，负责本项目的环评工作（委托书见附件

5)。

1.2.4 产业政策和规划符合性

1.2.4.1 产业政策符合性

本项目属于《产业结构调整指导目录（2019 年本，征求意见稿）中“鼓励类”中第十三条第 5 项——高端放射治疗设备建设的范畴。因此，本项目建设符合国家产业政策。

1.2.4.2 规划符合性分析

1.2.4.2.1 与济南市城市总体规划符合性

根据《济南市城市总体规划》（2011-2020），济南市中心城空间结构为“一城两区”。“一城”为主城区，“两区”为西部城区和东部城区，以经十路为城市发展轴向东西两翼拓展。本项目位于主城区的腊山新区，范围为二环西路以西、京福高速公路两侧，规划形成以济南西客站为依托，以文化会展、商业商务等公共服务功能为主导的现代化新区。在日照路和兴福路之间建设新区核心区，布局商业商务、文化会展等用地；京福高速公路以西地区布局物流、科研等用地，完善生活居住配套服务；沿小清河南侧和腊山周边，结合自然地理环境，布局生活居住用地。本项目位于京福高速公路以西，以肿瘤疾病医疗、研究为主，符合“京福高速公路以西地区布局物流、科研等用地”的规划要求。

规划中指出：“规划建设疾病控制中心，加强疾病预防控制工作，提高应对突发公共卫生事件的能力。建设一批具有先进医疗技术水平的现代化专科医院卫生中心和综合医院，完善以社区卫生服务为基础的基层医疗卫生服务网络。”拟建项目的质子治疗是当今世界上最高端的放疗技术，项目建设可提升肿瘤的治疗水平，因此符合济南市城市总体规划要求。

1.2.4.2.2 与土地利用规划的符合性

拟建项目位于济南市槐荫区京台高速以西，烟台路延长线以北，项目北侧为齐鲁医科大学项目。根据济南市槐荫区土地利用总体规划局部图（2016-2020年），项目区为建设用地，因此拟建项目符合规划要求。

根据济南市规划局《关于山东省肿瘤防治研究山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目规划选址意见的复函》（济规直二管函[2018]47号，见附件6），同意本项目在槐荫区南北三号路东侧，烟台路延长线北侧选址安排，规划用地性质为医疗卫生，用地面积约3.7公顷。

根据济南市国土资源局槐荫分局《关于山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目用地的审查意见》（济槐国土资发[2018]51号），拟同意该项目用地。

1.2.4.2.3 与济南国际医学科学中心规划的符合性

2017年市政府工作报告中指出，要毫不动摇推进五项重点工作，第一项为强力推进项目建设，其中“加快济南国际医学科学中心建设，高水平完成占地35平方公里的片区规划，加快村庄整合，推动山东第一医科大学主校区、肿瘤专科中心等一批项目开工建设，积极申报国家医疗健康产业综合试验区，努力把济南打造成国际性的医学高地，为全民健康提供优质的医疗务资源。”

济南国际医学科学中心规划范围为：东至腊山河西路、京台高速公路，西至津浦铁路、济西编组站，南至小清河、槐荫区与市中区界，北至黄河、G35高速公路，面积约35平方公里。以医疗服务为核心，重点打造“医、教、研、产、养”五大产业集群共生共荣的医疗健康产业生态圈，以及配套完善的城市服务支撑体系。其中，京台高速以西、济西编组站以东、经十西路以北、小清河以南，面积约10平方公里用地是医学硅谷组团。

拟建项目位于济南国际医学科学中心医学硅谷组团内，符合济南国际医学科学中心规划草案要求。

综上所述，本项目建设符合相关规划政策。

1.2.5 周围环境概况

本项目建设地点位于济南市槐荫区南北三号路以东、烟台路延长线以北、京台高速以西，项目位于济南国际医学中心核心区内，东邻京台高速，南邻烟台路延长线，地理位置见附图 1。

项目院区总平面布置图见附图 2。质子维护楼位于院区东侧区域，其北侧为院区道路和绿化用地，隔路空地为济南国际医学中心医疗用地（规划）；南侧为绿化用地和 5#医疗健康技术推广中心，隔路空地为某军区置换用地（规划）；西侧是 1#医疗综合楼，隔路空地为济南国际医学中心医疗用地（规划）；东侧是规划的南北一号路，隔路为槐荫区城市管理中心；质子维护楼周边关系见 11- 。

1.2.6 核技术利用现状

山东省肿瘤防治研究院已于 2018 年 11 月 16 日取得山东生态环境厅颁发的辐射安全许可证（鲁环辐证[01066]，见附件 7），有效期至 2023 年 11 月 15 日。许可的种类和范围为：使用 I 类、III 类、V 类放射源，使用 II 类、III 类射线装置，乙级非密封放射性物质工作场所。已获许可使用的放射源、射线装置和非密封放射性物质的使用情况列于表 1-1~表 1-3。

表 1-1 山东省肿瘤防治研究院已获许可使用的放射源明细

序号	核素	类别	活度(Bq)×枚	活动种类
1	Co-57	V 类	1.11E+7*1	使用
2	Na-22	V 类	3.7E+6*1	使用
3	Ge-68	V 类	4E+8*2	使用
4	Na-22	V 类	3.7E+5*6	使用
5	Ge-68	V 类	6E+7*1	使用
6	Cs-137	V 类	5.55E+6*1	使用
7	Gd-153	V 类	3.7E+6*6	使用

8	Ir-192	Ⅲ类	3.7E+11*1	使用
9	Ir-192	Ⅲ类	3.7E+11*2	使用
10	C0-60	I类	6.66E+12*25	使用

表 1-2 山东省肿瘤防治研究院已获许可使用的非密封放射性工作场所明细

序号	工作场所名称	工作场所等级	核素名称	日等效最大操作量(Bq)	年最大操作量(Bq)	活动种类
1	PET-CT 中心	乙级	C-11	1.11E+8	9.6E+11	使用
2	PET-CT 中心	乙级	F-18	1.11E+8	8.74E+12	使用
3	放疗区	丙级	I-125 (粒子源)	4.44E+6	2.22E+11	使用
4	影像科	丙级	I-125 (粒子源)	4.44E+6	2.22E+11	使用
5	介入科	丙级	I-125 (粒子源)	8.88E+6	4.44E+11	使用
6	核医学科	乙级	I-125	7.992E+6	6.808E+11	使用
7	核医学科	乙级	I-131	1.184E+9	1.070E+12	使用
8	核医学科	乙级	Sr-89	2.96E+7	3.552E+10	使用
9	核医学科	乙级	Tc-99m	3.64E+7	8.74E+12	使用

表 1-3 山东省肿瘤防治研究院已获许可使用的射线装置明细

序号	射线装置名称	类别	数量	活动种类
1	医用直线加速器	Ⅱ类	3	使用
2	医用回旋加速器	Ⅱ类	1	使用
3	PET-CT	Ⅲ类	2	使用
4	C 型臂 X 光机	Ⅲ类	1	使用
5	DR	Ⅲ类	1	使用
6	C 型臂 X 光机	Ⅲ类	1	使用
7	骨密度仪	Ⅲ类	1	使用
8	C 型臂 X 光机	Ⅲ类	1	使用
9	CT	Ⅲ类	1	使用
10	C 型臂 X 光机	Ⅲ类	1	使用
11	后装治疗机	Ⅲ类	3	使用
12	模拟定位机	Ⅲ类	1	使用
13	医用直线加速器	Ⅱ类	11	使用
14	CT	Ⅲ类	2	使用
15	数字胃肠 X 光机	Ⅲ类	2	使用

16	乳腺 X 光机	III类	2	使用
17	DR	III类	2	使用
18	CT	III类	3	使用
19	DSA	II类	2	使用
20	SPECT-CT	III类	2	使用
21	乳腺伽玛相机	III类	1	使用
22	乳腺伽玛相机	III类	1	使用
23	骨密度仪	III类	1	使用
24	Gamma Pod 乳腺放射治疗系统	III类	1	使用

医院已根据《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》对院内已运行的辐射工作场所组织进行了竣工环境保护验收，主要验收内容包括 2 台 ^{192}Ir 后装治疗机、PET-CT 中心、核医学工作场所、回旋加速器中心、9 台医用电子加速器、2 台 DSA 及 18 台 III 类射线装置。对于未进行竣工环保验收的辐射工作场所，医院应在各辐射场所投入运行后尽快组织环保竣工验收。

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》（2015 年 1 月 1 日施行）；
- (2) 《中华人民共和国环境影响评价法》（2018 年 12 月 29 日施行）；
- (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（2003 年 10 月 1 日）；
- (4) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（中华人民共和国国务院令 第 449 号，2014 年 7 月 29 日修正版）；
- (5) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2017 年第二次修正版）；
- (6) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令 第 18 号，2011 年 5 月 1 日施行）；

(7) 《射线装置分类》（环境保护部 国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号）；

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

(9) 《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评[2017]4 号）；

(10) 《环境影响评价公众参与办法》（生态环境部令 第 4 号，2019 年 1 月 1 日施行）；

(11) 关于修改《建设项目环境影响评价分类管理名录》部分内容的决定（生态环境部令 第 1 号，2018 年 4 月 28 日起施行）；

(12) 《产业结构调整指导目录（2019 年本，征求意见稿）。

(13) 《山东省环境保护条例》（山东省第十三届人民代表大会常务委员会第七次会议通过，2019 年 1 月 1 日施行）；

(14) 《山东省辐射污染防治条例》（山东省人民代表大会常务委员会公告 第 37 号，2014 年 5 月 1 日施行）；

(15) 《山东省辐射环境管理办法》（山东省人民政府令第 153 号，2003 年 4 月 1 日施行）；

(16) 《山东省核事故应急管理暂行办法》（山东省人民政府令第 254 号，2012 年 10 月 1 日施行）；

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) 《环境影响评价技术导则 总纲》（HJ2.1-2016）；

(3) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

- (4) 《辐射环境监测技术规范》（HJ/T61-2001）；
- (5) 《电离辐射工作场所监测的一般规定》（EJ 381-1989）；
- (6) 《X、 γ 外照射个人监测规定》（EJ 1153-2004）；
- (7) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）；
- (8) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.5-2015）；
- (9) 《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）；
- (10) 《医用 X 射线 CT 机房的辐射屏蔽规范》（GBZ/T180-2006）；
- (11) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；
- (12) 《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ133-2009）；
- (13) 《污水综合排放标准》（GB8978-1996）。

1.3.3 其它文件、资料

- (1) 《山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目可行性研究报告》（2018 年）；
- (2) 《山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台项目环境影响报告表》；
- (3) 山东省肿瘤防治研究院环境影响评价委托书；
- (4) 《质子治疗系统辐射防护设计报告》；
- (5) NCRP NO.144 号技术报告；
- (6) NCRP NO.151 号技术报告；
- (7) IAEA NO.19 号技术报告。

(8) 业主单位提供的与本项目相关的管理制度和技术资料;

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:

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) 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:

年有效剂量, 1mSv。

1.4.1.2 剂量约束值

(1) 工作人员剂量约束值

根据本项目特点和环境影响评价结论,本项目辐射工作人员的剂量约束值取
剂量限值的 1/4, 为 5mSv/a。

(2) 公众剂量约束值

结合本项目的特点,对公众中有关关键人群组的成员,本项目取剂量限值的
1/10 即 0.10mSv/a 作为公众剂量约束值。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

参照《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.5-2015）中的相关规定以及《质子治疗系统辐射防护设计报告》中的相关内容，本项目各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平见表 1-4。

表 1-4 质子治疗装置辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

工作场所	功能区域	位置描述（居留因子）	剂量率限值
质子维护楼	机房墙和入口门外	居留因 $T \geq 1/2$	$2.5 \mu\text{Sv/h}$
		居留因子 $T < 1/2$	$10 \mu\text{Sv/h}$
	机房顶	居留因 $T \geq 1/2$	$2.5 \mu\text{Sv/h}$
		居留因子 $T < 1/2$	$10 \mu\text{Sv/h}$

1.4.3 放射性废水排放限值

本项目产生的放射性废水主要是活化的一次冷却水，冷却水在排放前必须进行取样测量，满足国家相关规定的排放标准《污水综合排放标准》（GB8978-1996）第一类污染物最高允许排放浓度标准要求（列于表 1-5），并经审管部门批准后，方可排入医院污水管。

表 1-5 《污水综合排放标准》中的排放标准要求

污染物	最高允许排放浓度，Bq/L
总 α	1
总 β	10

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中相关规定，满足下列条件的低放废液方可直接排入流量大于 10 倍排放量的普通下水道

- （1）每月排放的总活度不超过 $10\text{ALI}_{\text{min}}$ ；
- （2）每次排放的活度不超过 1ALI_{min} ，并且每次排放后不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

根据 GB18871-2002 中的方法，计算了冷却水中 ^3H 和 ^7Be 的单次排放限值 1ALI_{min} 和单月排放限值 $10\text{ALI}_{\text{min}}$ ，列于表 1-6。

表 1-6 冷却水感生放射性核素排放限值

核素	单次排放限值 1ALI_{min} (Bq)	单月排放限值 $10\text{ALI}_{\text{min}}$ (Bq)
^3H	1.11E+09	1.11E+10
^7Be	4.65E+08	4.65E+09

1.4.4 放射性固体废物

依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 B 中 B2.2 的规定“工作场所中的某些设备与用品(如手套、工作服等)，经去污使其污染水平降低到表 B11(下表 1-7)中所列设备类的控制水平的五分之一以下时，经审管部门或审管部门授权的部门确认同意后，可当作普通物品使用。”

表 1-7 工作场所表面污染控制水平， Bq/cm^2

表面类型		α 放射性物质	β 放射性物质
		其他	
工作台、设备、墙壁、地面	控制区*	4×10	4×10
	监督区	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4×10^{-1}	4
	监督区		
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-2}	4×10^{-1}

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)的要求以及本项目的特点，确定本项目评价范围取质子维护楼建筑地上部分墙体边界向外 500 范围内的区域，如图 1-1 所示。



图 1-1 评价范围和保护目标示意图

1.5.2 环境保护目标

本项目电离辐射评价范围内无自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象，评价范围内除西南侧已建成的“锦绣西城”居民小区以及东侧“槐荫区城市管理中心”外，其余均为在建或空地，具体情况列于表 1-8。

表 1-8 本项目电离辐射评价范围内环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	周围场所	照射类别	最近距离, m
质子维护楼	北侧	济南国际医学中心内医疗用地（规划）	公众	60

	西侧	济南国际医学中心内医疗用地（规划）	公众	200
	西南侧	锦绣西城居民小区	公众	270
	南侧	军区置换用地（规划）	公众	160
	东侧	槐荫区城市管理中心	公众	260

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

济南市位于北纬 36°40′，东经 117°00′，南依泰山，北跨黄河，地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上，地势南高北低。

槐荫区位于济南市西部，北与德州市齐河县隔黄河相望，南邻市中区，东邻槐荫区和市中区，西邻长清区，面积 151.48 平方公里。

本项目位于济南市槐荫区，东邻京台高速，南邻烟台路延长线。地理位置优越，交通便利。项目地理位置图见附图 1。项目周边关系见 11- 。



11- 项目周边关系示意图

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

槐荫区地处鲁中山区与鲁北平原的过渡地带，有堆积平原与剥蚀丘陵两个地貌类型。其中堆积平原分坡积洪积、冲积洪积和冲积三个亚类。坡积洪积平原，分布于大杨庄、段店以南，地面标高约 35~50 米，地形坡度为 10%左右。冲积洪积平原，分布于大杨庄、段店以北，小清河以南，地面标高约 25~45 米，地形坡度为 4%左右。冲积平原，分布于黄河与小清河之间，主要由粉砂、亚粘土、亚砂土组成，地形平坦，地面标高约 24~26 米。项目场区位于冲积洪积平原。

2.2.2 气候气象

项目区域属北温带半湿润大陆性季风气候，四季分明：春季干旱多风，夏季火热多雨，秋季凉爽宜人，冬季寒冷干燥且少雨雪。

据济南市气象局近年气象资料，项目区域年平均气温 14.2℃，极端最高气温 42.5℃，极端最低气温-18.9℃。7 月份最热，平均气温为 27.4℃，1 月份最冷，平均气温为-1.4℃；年平均日照时数为 2444 小时；年平均无霜期 251 天；年平均降水量为 685mm，7、8 月份最多，历年最大降水量 822mm，历年最大日降雨量 222.8mm；年平均相对湿度 65.4%；年平均风速 2.7m/s；常年主导风向为 SSW 风，夏季主导风向为 SSW 风，冬季主导风向为 ENE 风。

2.2.3 地质构造

槐荫区地层分为奥陶系、石炭系、二迭系、第三系和第四系。

奥陶系中统主要由青灰色灰岩、豹皮状灰岩组成，夹有少量白云质灰岩与泥灰岩、角砾状泥灰岩；石炭系中统，由浅灰色石灰岩、灰色粉砂岩及杂色粘土岩组成，偶夹一层不稳定的煤；二迭系，下统以粉砂细砂岩为主，上统以粘土岩、泥岩、粉砂岩为主；第三系主要由长石砂岩、砾岩、粘土岩、砂岩组成；第四

系，为松散的堆积物，几乎覆盖全区。底层为砂砾石层或砂砾石夹粘性土，表层为淤泥质粘性土。

2.2.4 水文地质

2.2.4.1 地表水

项目所在区域属于小清河水系，附近发育的河流有小清河和腊山河。

(1) 小清河

小清河流域位于山东省鲁北平原南部，东临弥河、靠玉符河、依泰沂山脉、北以黄河为界。流域面积为 10336 平方公里，约占山东省总面积的 1/15。小清河主干流位于流域最北部的低洼地带，自济南睦里庄起经济南、淄博、滨州、东营、潍坊 5 个市，18 个县、市、区，至潍坊寿光市羊角沟入莱洲湾，全长 237km。在历史上小清河是山东省重要的排水河道，具有灌溉、防洪、排涝、航运、供水、养殖等多种功能，但是随着经济的发展，特别是小清河沿岸工业的发展，使小清河的水质遭受到了非常严重的污染。目前，小清河水资源匮乏、水体严重污染、灌溉、航运萎缩，河道功能低下。小清河年均常水位 21.2 米（绝对标高），最大洪峰水位 26.57 米（绝对标高），年均秒流量为 10.25 立方米，最大洪峰秒流量为 105.3 立方米。小清河济南市区段的范围从睦里庄至辛丰庄，全长约为 70.5km，沿途经睦里庄、马鞍山、五柳闸、还乡店、大码头、鸭旺口、辛丰庄，北靠黄河南依胶济铁路，是济南市工业废水和生活废水的纳污河。

本项目距离北侧小清河约 3.1km。

(2) 腊山河

腊山河源于南部的腊山，南北向发育在西客站片区中部穿过，是小清河入济南市区之前最大的一条支流，自腊山分洪道至小清河口长 5.4km，汇水面积 27.1km²。腊山河自南向北流向，河道顺直，以自然土坡为主；引水闸至经十路河段底宽 7~10 米，上口宽 15~20 米；经十路至小清河交汇段底宽 10~15 米，上口宽 20~30 米。雨季为南部山区泄洪，现为城镇污水排放通道，大部分河道存

在淤积，河道水质较差。途径七贤镇，在吴家堡以西入小清河，防洪除涝 40 立方米/秒，是区域的主要防洪除涝骨干河道。

2.2.4.2 地下水

本项目所在地地下水为第四系孔隙潜水、闪长岩风化裂隙水，地下水环境受岩性地质

2.2.5 土壤与植被

项目区周边多为村庄和农田，项目区所在地植被类型属平原栽培植被区，其优势植物群落以农作物为代表种。该地区人为活动的影响强度较大，无珍稀濒危植物物种的分布。

原有的自然生态系统已不复存在，人类的强烈干扰使其向城市生态特征转化。本地区植被属草甸植被类型，生境单一，人类农耕活动历史悠久，植物种类较少。项目区内及周围的动物主要是北方常见的物种，动物：如麻雀、喜鹊、螳螂、蝗虫、田鼠等。根据现状调查及分析可知，该区域生物多样性较差，生物物种单一。

2.3 社会环境概况

2.3.1 社会发展状况

槐荫区位于济南市区西部，北与德州市齐河县隔黄河相望，南与济南市市中区相邻，东与济南市天桥区、市中区接壤，西邻济南市长清区，是济南中心城区之一。至 2017 年底，辖区土地面积 151.61 平方公里，下辖振兴街、五里沟、青年公园、南辛庄、中大槐树、道德街、营市街、西市场、张庄路、段店北路、匡山、美里湖、兴福、玉清湖、腊山、吴家堡 16 个街道，辖有 87 个居民委员会、92 个村民委员会，户籍人口 41.5 万人，男女性别比为 106.1:100，人口出生率 10.3‰，死亡率 7.9‰，人口自然增长率 2.4‰。

2.3.2 经济发展状况

2017年槐荫区实现工业增加值83.4亿元，比上年增长19.5%。中车山东、重汽特种车等骨干企业主要经济指标均实现30%以上增速。全区规模以上工业企业达到54家，规模以上工业增加值同比增长10.1%，增速创3年来最好水平；实现主营业务收入175.6亿元，比上年增长8.7%；实现利税22.8亿元，利润14.7亿元，分别比上年增长9.5%、3.3%。实现高新技术产业产值90.5亿元，占规模以上工业总产值比重达到57.6%。新材料、数控机床、工业打印机、机器人等高新技术产业成长壮大，行业龙头作用显现。九阳、山东天岳入选山东省首批制造业单项冠军企业，山东天岳与荷兰施泰克集团合作的轨道交通牵引项目实现了产业链拓展新突破。德迈国际信息产业园签约入驻企业30多家，工业打印机特色小镇初具规模。

2.3.3 文化教育

全区有各级各类中小学65所(省级规范化学校19所，市级规范化学校9所)，在校生58433人，毕业生10377人。义务教育阶段学校共64所，其中小学47所(含民办小学1所)，初中12所，九年一贯制学校4所，特殊教育学校1所。中等职业学校1所。幼儿园111所，在园幼儿22827人。全区小学、初中在校生巩固率分别为100%、99%，残疾儿童入学效率100%。全区有文化馆1处，公共图书馆1处，综合文化站16个，农家书屋93个。新建区图书馆分馆6处，基层图书流动点40处。累计128个村(社区)级综合性文化中心基本达标。

2.3.4 风景名胜

槐荫区历史悠久，旅游资源丰富而独具特色。全区现有周恩来同志1946年视察北平军事调处部济南执行小组纪念地、古城遗址、峨嵋山古建筑群、申家庄钟楼、演马庄遗址、祝阿古城遗址、大悲寺、五里牌坊等历史文物，同时还有峨眉山和匡山公园等风景名胜。根据济南市市域历史文化遗产保护规划，项目评价范围内无已探明的受保护文物古迹和重要人文景观分布。

2.4 辐射环境质量现状调查

已委托有资质单位对本项目拟建场址（以下简称“拟建场址”）及周围环境进行了辐射环境质量现状调查。监测报告见附件 8。

2.4.1 监测内容

辐射环境质量现状监测对象和监测项目列于表 2-1。

表 2-1 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
1	外照射剂量率	γ 辐射剂量率
		中子周围剂量当量率
3	土壤	总 α 、总 β 活度浓度
4	地下水	总 α 、总 β 活度浓度

2.4.2 监测设备和监测方法

2.4.2.1 监测设备

本次监测使用仪器设备详见表 2-2。

表 2-2 仪器设备及性能指标

仪器名称	型号	主要技术性能指标
便携式 α - γ 剂量率仪	FH40G-X+ FHZ672 E-10	测量范围：10nGy/h~100 μ Gy/h； 能量范围：48keV~6MeV； 相对响应之差：< \pm 15%。
中子周围剂量当量（率） 仪	LB123+LB64 11	测量范围：50 nSv/h~100 mSv/h； 能量响应：热中子~ 20 MeV。

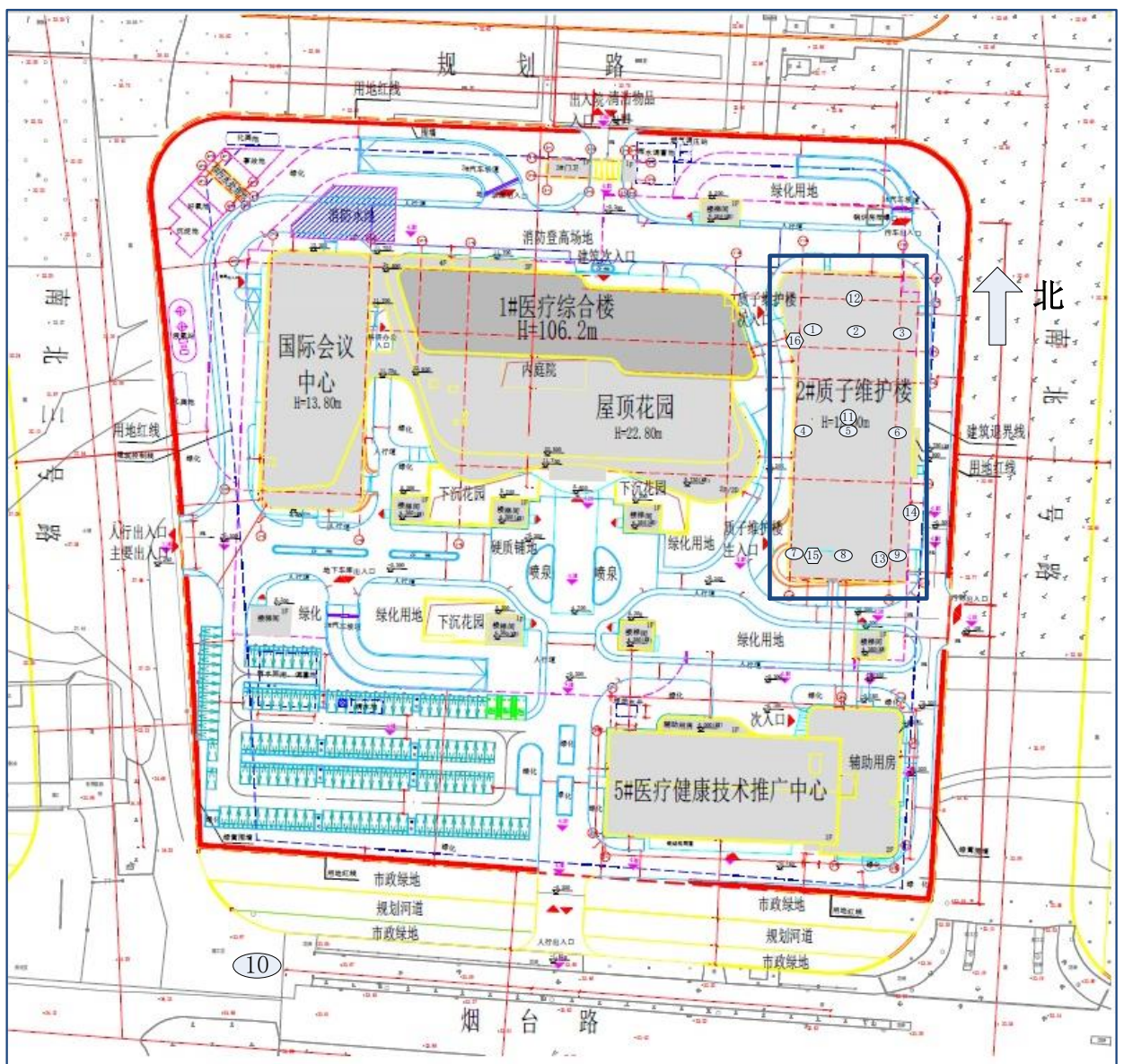
仪器名称	型号	主要技术性能指标
四路低本底 α β 测量仪	BH1227	单位面积本底计数率： α 道 $\leq 0.0075\text{min}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ； β 道 $\leq 0.11\text{min}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 。 重复性： α 道 $\leq 1.2\%$ ； β 道 $\leq 2.9\%$ 。 串道比： β 对 α 道 $\leq 0.2\%$ ； α 对 β 道 $\leq 2.1\%$ 。 效率： α 道 $\geq 67\%$ ； β 道 $\geq 56\%$ 。

2.4.2.2 监测方法

监测方法见下表 2-3，监测点位见图。

表 2-3 监测方法

序号	监测对象	监测方法
1	γ 辐射剂量率	采用网格均匀布点的方式布设 γ 辐射剂量率监测点位，共计 10 个监测点位。采用便携式监测仪表，以定点测量方式进行。每个监测点位测量 10 次，每次间隔 5 秒钟，监测结果取平均值。
2	中子剂量当量率	采用网格均匀布点的方式布设，共计 10 个监测点位。采用中子剂量当量率仪，以定点测量的方式进行。
3	土壤	分别在指定的点位采集土壤，除去石块、草根的杂物，将采集到的样品现场混合后取 1kg。土壤样品送实验室预处理后采用低本底 α 、 β 测量仪进行总 α 、总 β 活度浓度测量。
4	地下水	分别在指定的点位采集上清水样，取样量不小于 1L，送实验室预处理后采用四路低本底 α 、 β 测量仪进行总 α 、总 β 活度浓度测量。



图例：① γ 辐射剂量率、中子周围剂量当量率监测点
 ⑪ 土样取样点
 ⑮ 水样取样点

图 监测点位图

2.4.3 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，检定合格后方可使用；
- (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；
- (6) 监测报告严格实行三级审核制度，经过校验、审核，最后由技术总负责审定。

2.4.4 监测结果

2.4.4.1 外照射剂量率

本项目拟建场址及周围环境外照射剂量率的监测结果见下表 2-4。

表 2-4 本项目拟建场址及周围环境外照射剂量率监测结果

序号	监测位置	γ 辐射剂量率, nGy/h	中子剂量当量率, μ Sv/h
1	拟建场址北偏西侧	78.0±0.9	<LLD
2	拟建场址北侧	79.2±0.9	<LLD
3	拟建场址北偏东侧	78.2±1.2	<LLD
4	拟建场址西侧	78.1±2.0	<LLD
5	拟建场址中部	79.1±1.0	<LLD
6	拟建场址东侧	77.8±1.3	<LLD
7	拟建场址西偏南侧	78.8±1.0	<LLD
8	拟建场址南侧	77.9±0.9	<LLD
9	拟建场址东偏南侧	77.0±0.8	<LLD
10	锦绣西城小区北侧道路	57.4±0.9	<LLD

注：1. 测量值未扣除宇宙射线响应。

2. LLD=0.05 μ Sv/h

由上表可知，本项目拟建场址及周围环境 γ 剂量率水平在（57.4~79.2）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率小于监测仪表探测限。根据《山东省环境天然贯穿辐射水平调查研究》（李洪昌等，辐射防护，第 11 卷 1 期，1991 年 1 月），山东省室外 γ 辐射剂量率（含宇宙射线）范围为（40.1~233.9）nGy/h，本项目拟建场址及周围环境 γ 辐射剂量率水平处于山东省室外 γ 辐射剂量率本底范围内，属于环

境正常水平。

2.4.4.2 土壤

拟建场址土壤样品中总 α 、总 β 的活度浓度分析测量结果见下表 2-5。

表 2-5 土壤样品中总 α 、总 β 活度浓度监测结果, Bq/kg

序号	取样点	总 α 活度浓度	总 β 活度浓度
1	场址东南地表	(7.27±1.37) E+02	(1.27±0.05) E+03
2	场址中间地下 5m	(4.72±1.17) E+02	(7.62±0.42) E+02
3	场址北部地下 12m	(5.40±1.33) E+02	(1.13±0.06) E+03
4	场址东南地下 17m	(6.37±1.31) E+02	(1.24±0.06) E+03

拟建场址土壤中总 α 活度浓度为 (4.72~7.27) E+02Bq/kg, 总 β 活度浓度为 (0.76~1.27) E+03Bq/kg。

2.4.4.3 地下水

拟建场址地下水样中总 α 、总 β 的活度浓度分析测量结果见下表 2-6。

表 2-6 地下水样中总 α 、总 β 活度浓度监测结果, Bq/L

序号	取样点	总 α 活度浓度	总 β 活度浓度
1	场址南部地下 6m	(8.62±4.24) E-02	(7.05±1.30) E-02
2	场址北部地下 17m	(1.47±0.41) E-01	(4.53±1.50) E-02

拟建场址地下水中总 α 活度浓度为 (0.86~1.47) E-01 Bq/L, 总 β 活度浓度为 (4.53~7.05) E-02Bq/L。

2.4.4.4 小结

对本项目拟建场址及周围环境辐射环境质量现状调查结果表明, 拟建场址辐射环境现状水平未见异常。

3 工程分析与源项

3.1 主要构筑物及平面布局

本项目主要的构筑物是院区内的 2#质子维护楼，位于院区东北侧，如图 3-1 所示。占地面积为 1743m²，建筑面积为 1160m²，是一栋地下二层、地上一层的建筑，地面以上建筑高度为 12m。

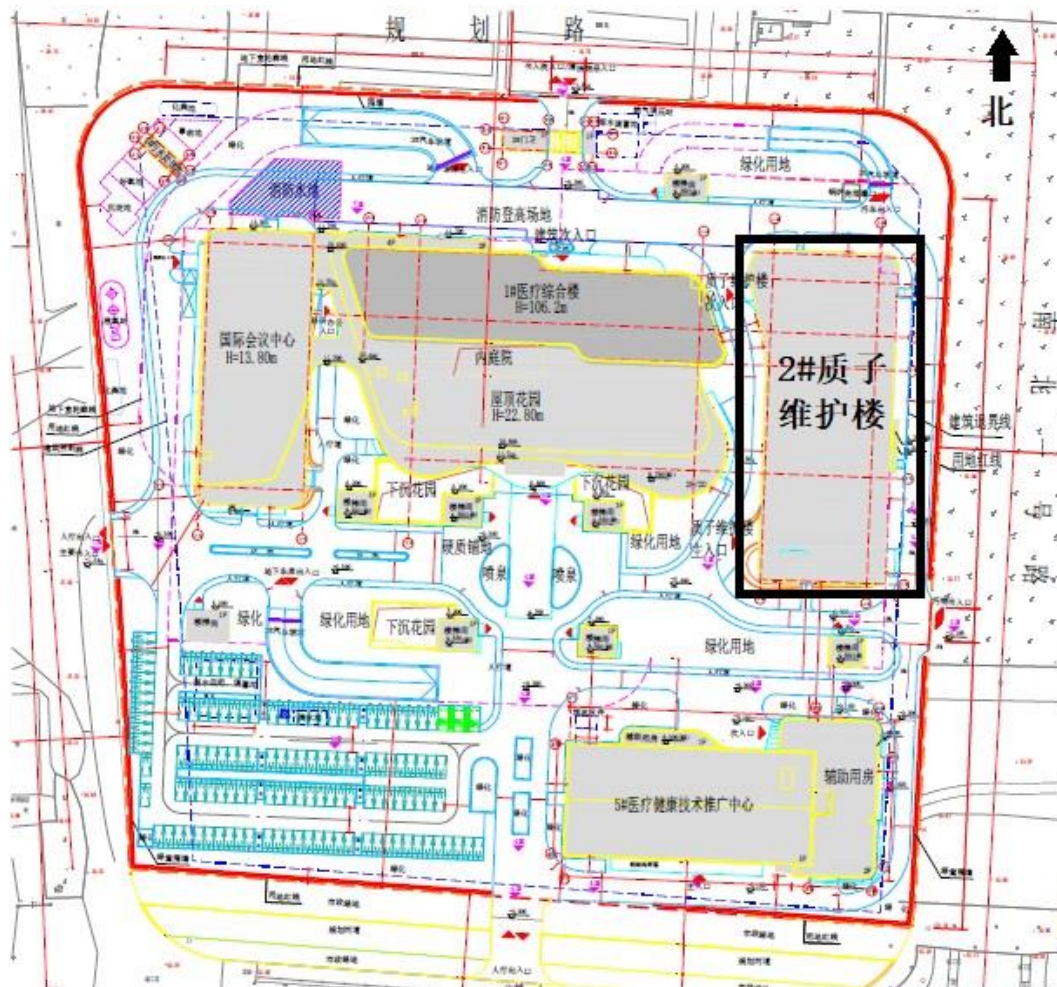


图 3-1 院区总平面布局图

质子维护楼位于院区东侧区域，其北侧为院区道路和绿化用地，隔路空地为济南国际医学中心医疗用地（规划）；南侧为绿化用地和 5#医疗健康技术推广中心，隔路空地为某军区置换用地（规划）；西侧是 1#医疗综合楼，隔路空

地为济南国际医学中心医疗用地（规划）；东侧是规划的南北一号路，隔路为槐荫区城市管理中心。各层平面、剖面布局示意图见图 3-2~图 3-12。详细的建筑设计图纸见附图 3~附图 6。

质子维护楼地下二层主要为回旋加速器的基坑、旋转束治疗室的机架区；

质子维护楼地下一层与 1#医疗综合楼的地下一层相连，主要有回旋加速器大厅、束流线隧道、3 个旋转束治疗室、固定束实验室、加速器主控室、各治疗室的控制室、医生办公室、候诊区、更衣室、空调机房、水冷机房等。

质子维护楼地上一层主要为质子治疗系统电源室、服务器室、维护办公室、医生办公室、会议室、门厅。屋顶上方设有新风机房、排风机房、送风机房、工具间。

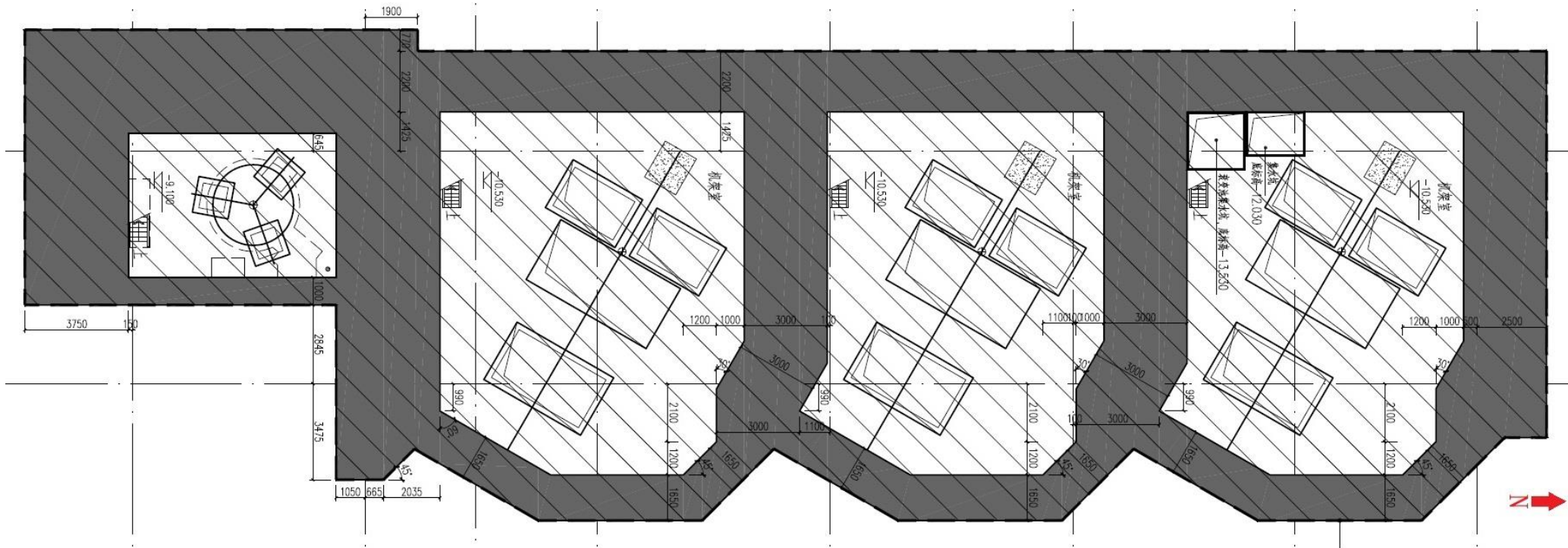


图 3-2 质子维护楼地下二层平面布局示意图

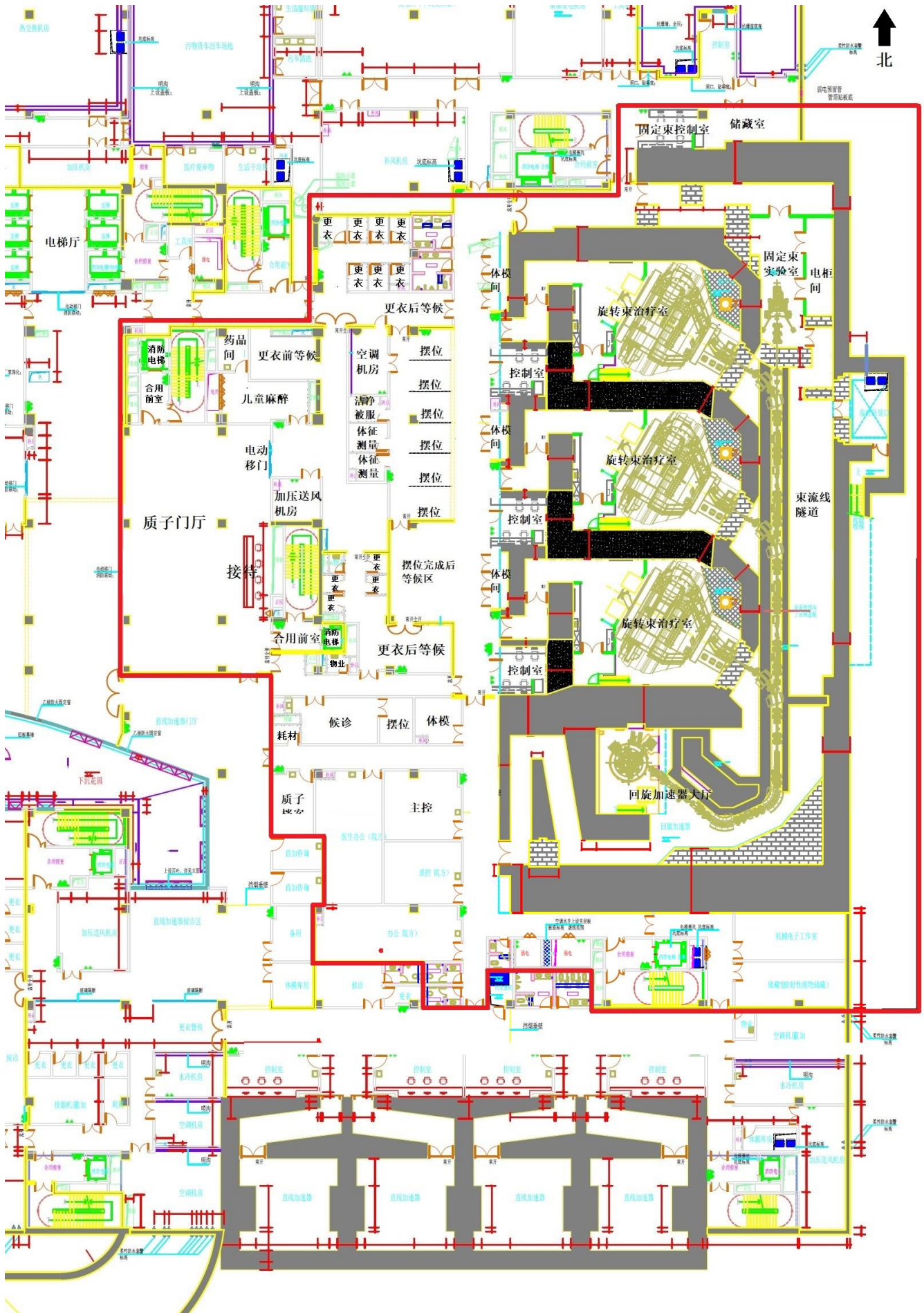


图 3-3 地下一层平面布局示意图

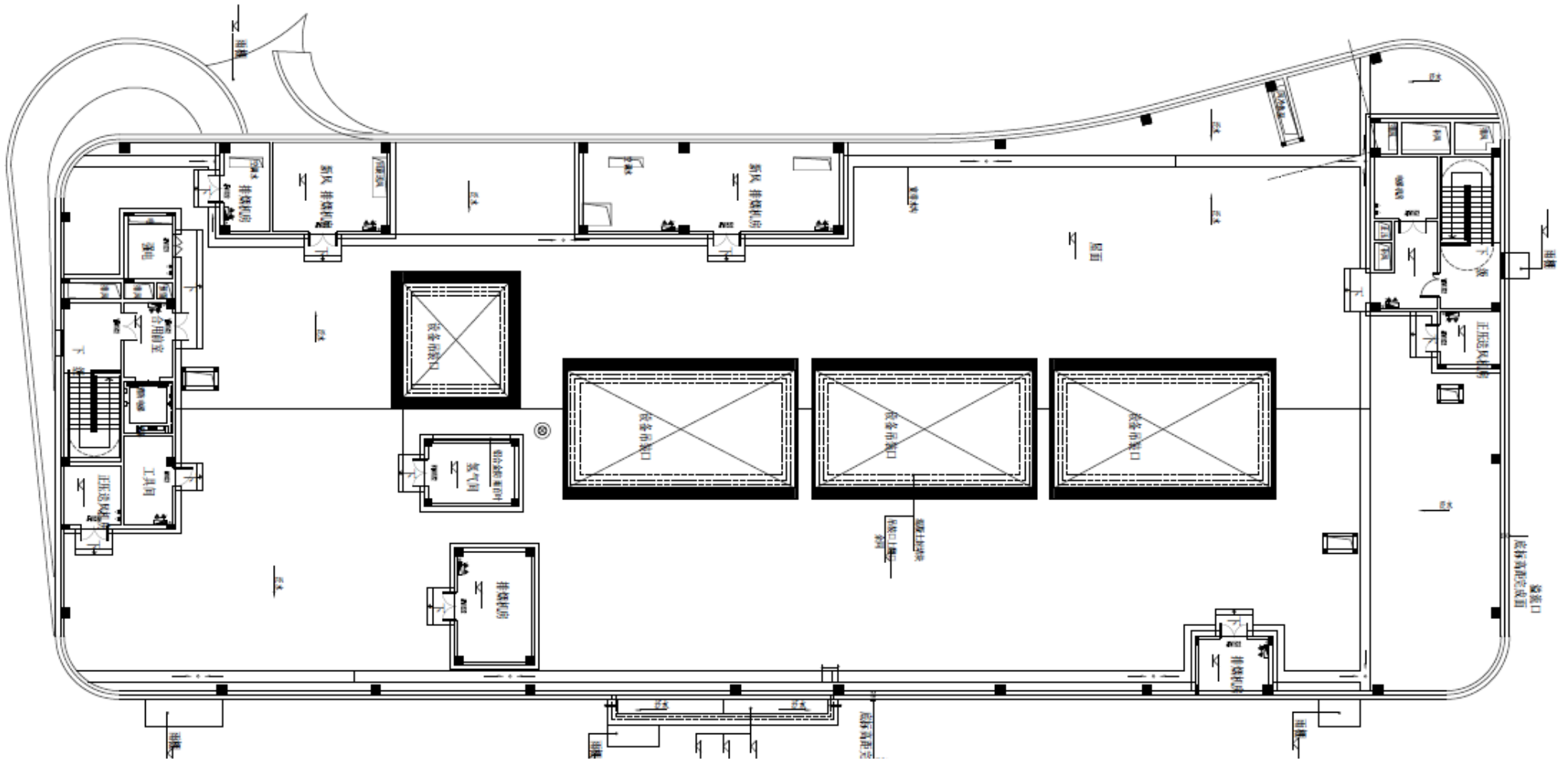


图 3-5 质子维护楼屋面布局示意图

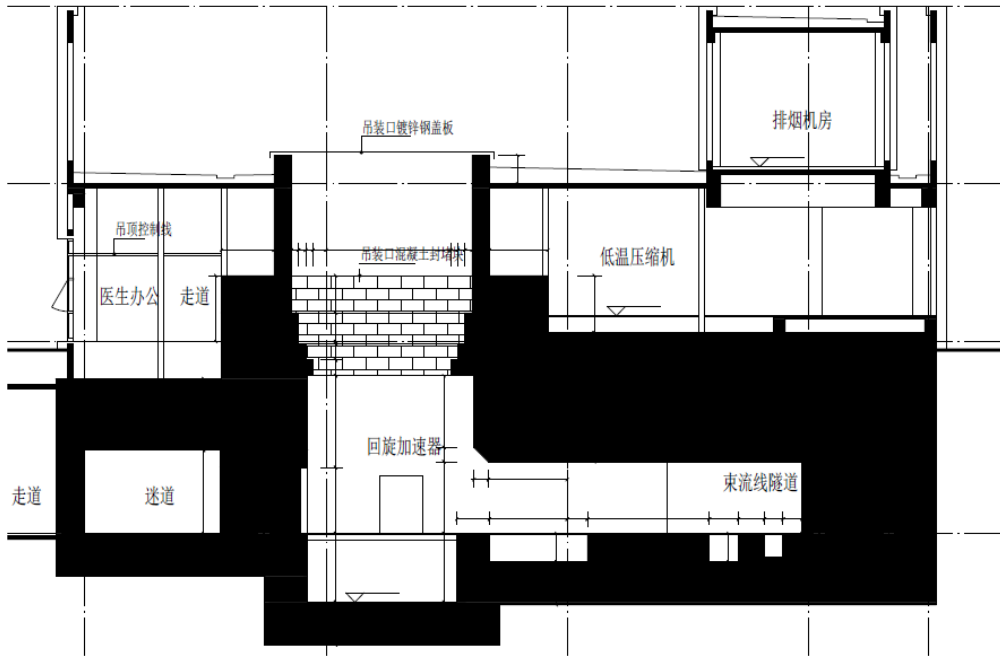


图 3-6 回旋加速器大厅剖面图

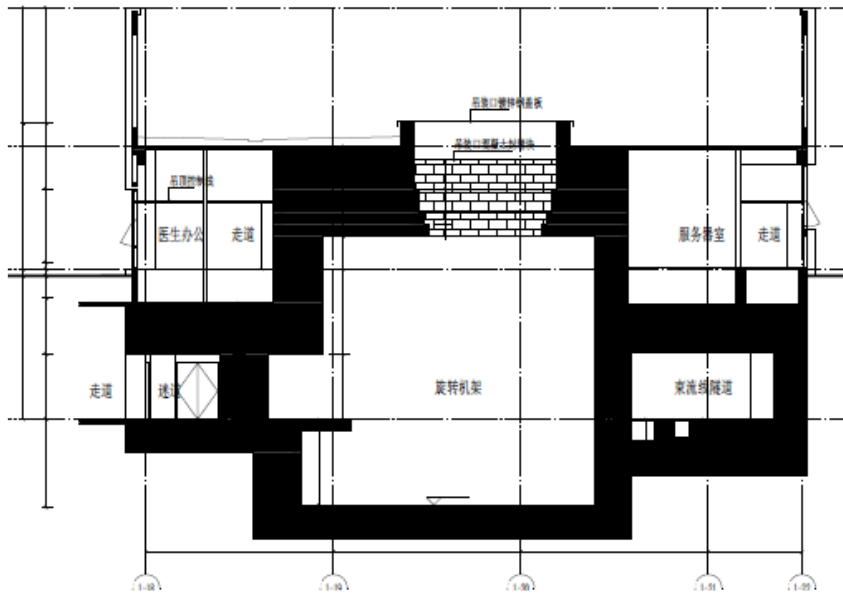


图 3-7 第一旋转束治疗室剖面图

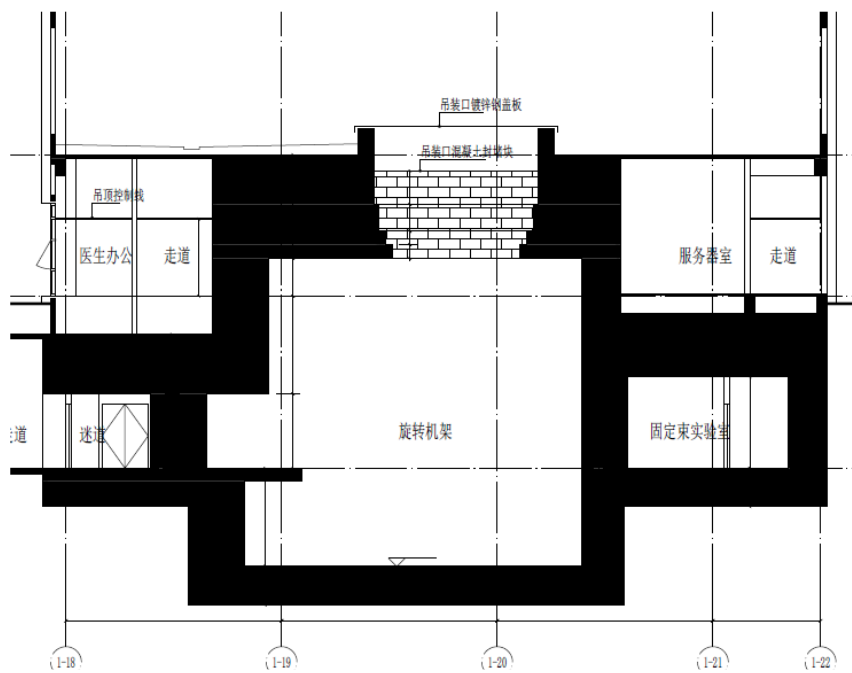


图 3-8 第三旋转束治疗室剖面图

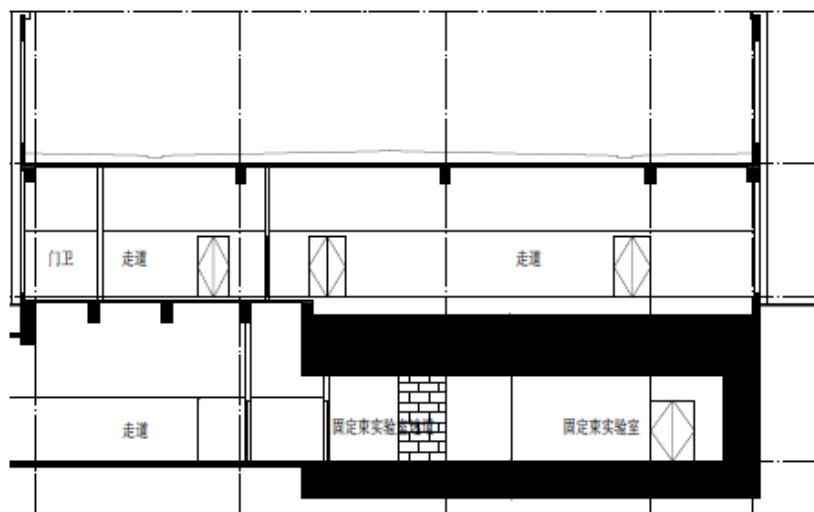


图 3-9 固定束实验室剖面图

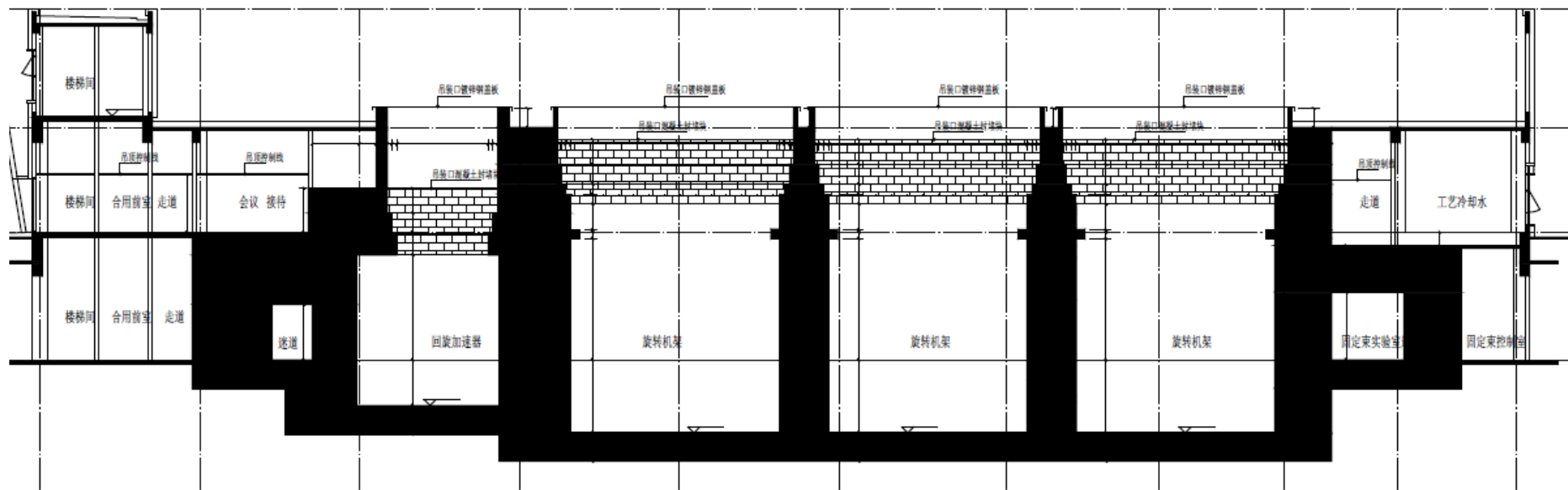


图 3-10 质子维护楼整体剖面图

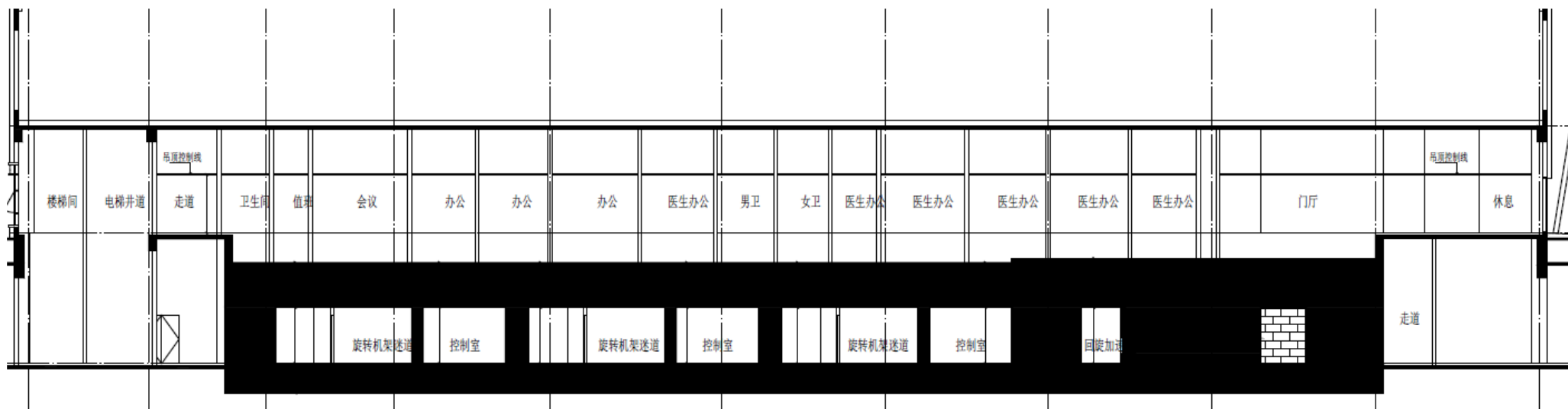


图 3-11 质子维护楼整体剖面图（控制室区）

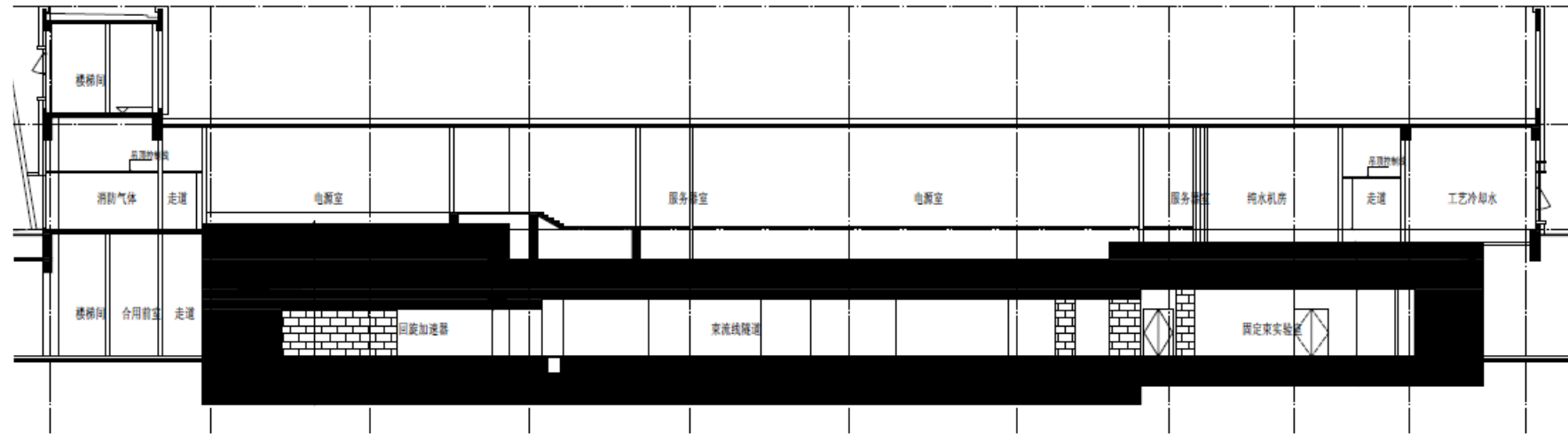


图 3-12 束流输运线隧道剖面图

3.2 工艺设备

本项目拟配备的医用射线装置见表 3-1。

表 3-1 本项目拟配备的医用射线装置一览表

序号	射线装置名称	规格型号	主要参数 (能量/管电压, 管电流)	生产厂家	数量	类别	所在位置
1	质子治疗系统	ProBeam	70~250MeV	Varian Medical System Particle Therapy GmbH	1	I	质子维护楼
2	定位用 X 射线管	待定	管电压: 150kV; 管电流: 320mA	Varian Medical System Particle Therapy GmbH	16	II	质子维护楼

3.2.1 质子治疗系统概况

3.2.1.1 装置组成

本项目拟配备一套由 Varian 生产的 ProBeam 质子治疗系统, 该系统主要技术指标见表 3-2。该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 250MeV 后引出, 引出流强最高可达 800nA, 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, 可根据实际治疗时肿瘤的深度和厚度, 在输出端得到 70~250MeV 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传输到各治疗室内。装置结构组成示意图如图 3-13 所示。

本项目共配置 4 个治疗室, 包括 3 个旋转束治疗室和 1 个固定束实验室。质子治疗系统平面布局示意图如图 3-14 所示。

表 3-2 ProBeam 质子治疗系统主要技术指标

指标	数值/方案
加速器主体	质子回旋加速器
引出能量	250 MeV
治疗能量范围	70MeV~250 MeV
流强范围	4.4nA~800nA

输出剂量率 (全射程内平均)	2 Gy/min for 1L
照射野范围	30cm×40cm
治疗深度	4cm~30cm
加速器射频频率	72MHz
加速器射频能量	115kW
定位用 X 射线管管电压	150kV
定位用 X 射线管管电流	320mA
机架旋转范围	380° (±190°)
治疗室	3 个旋转束治疗室+1 个固定束实验室
预计使用寿命	20 年
正常运行时间比	96% ~ 98%

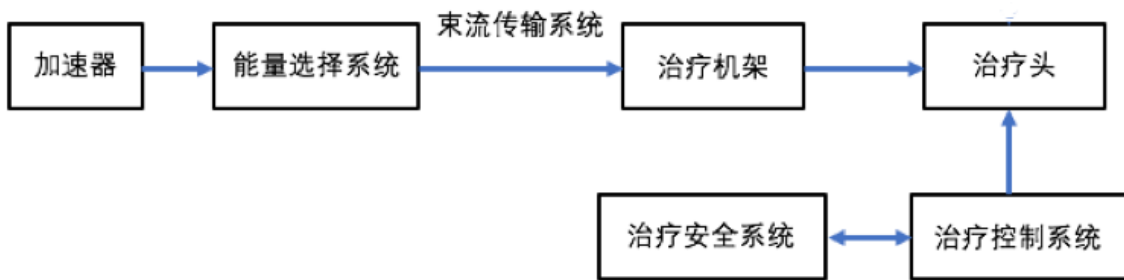


图 3-13 ProBeam 质子治疗系统结构组成示意图

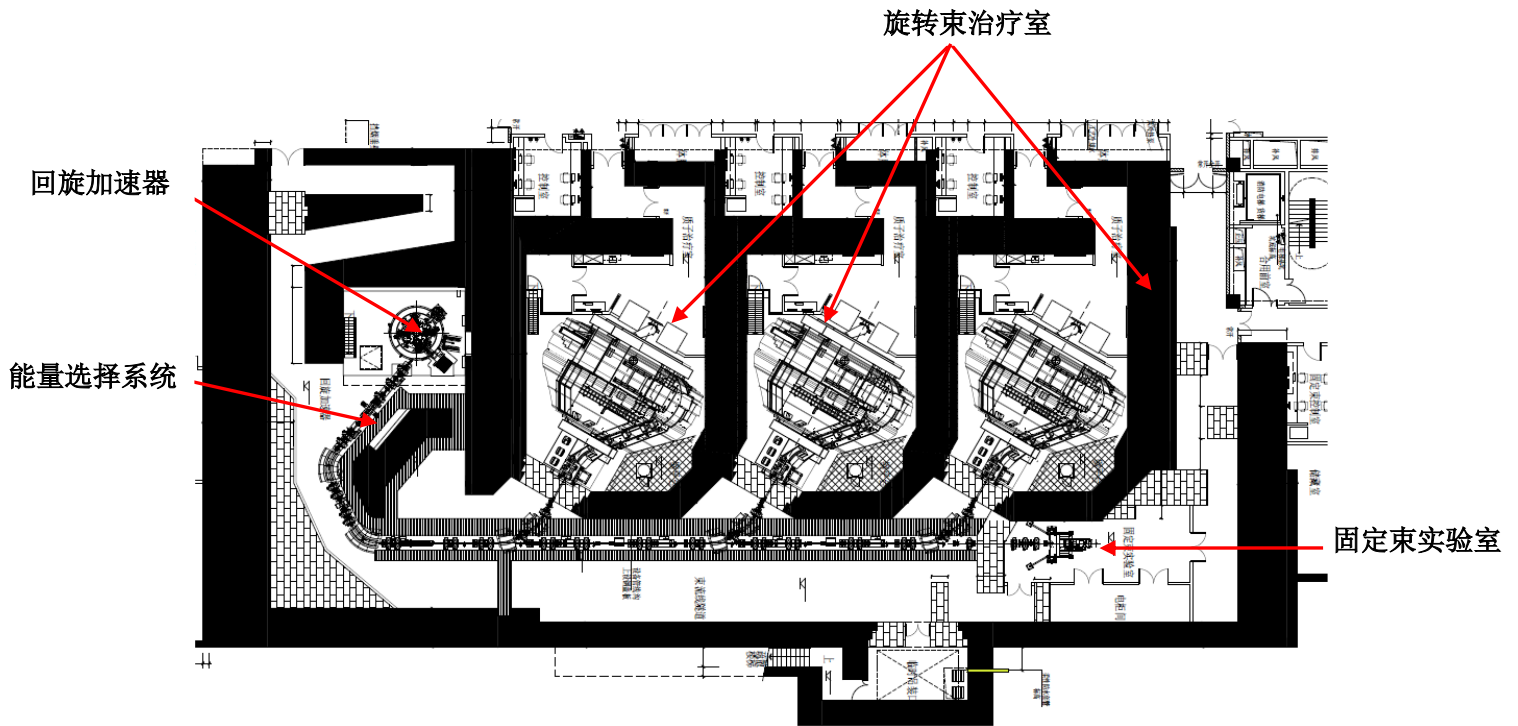


图 3-14 本项目质子治疗系统平面布局示意图

3.2.1.2 工作原理

质子治疗系统中质子由回旋加速器-能量选择器-束流输运线，最后达到治疗终端，经历质子加速、注入、能量选择、引出和治疗。各部分详细的工作原理如下。

3.2.1.2.1 回旋加速器

回旋加速器是质子治疗系统的核心，主要包括级盖、轭铁、超导线圈、射频 D 形盒、凸起 / 凹槽组件、线圈低温恒温器等部件，如图 3-15 所示。位于加速器中央的阴极源作为质子源。加速段由动态电磁环境模拟器和磁轭形成的四个共振器组成。在两个实心磁极中间安装有两个 D 形真空盒，盒内抽真空。质子在 D 形盒内旋转，每次通过 D 形真空盒间隙时，因间隙上的高频电压而获得加速，能量增加，旋转半径也随之增加。当质子多次通过高频间隙，能量不断增加，一直加速到最高能量 250MeV 时也对应旋转到最外面一圈。利用静电导偏转电极使加速器的质子发生偏转，并在聚焦棒的作用下，通过引出通道将质子束流引出。回旋加速器的引出效率大约为 80%。

ProBeam 的加速器是配备了超导线圈的等时回旋加速器，也称为超导回旋加速器。与常规回旋加速器相比，超导回旋加速器有以下优势：设计紧凑，重量更轻；束流引出效率高，能提供高剂量率；高度线性、高度可重复性的设备功能；功耗较小。其能量可将剂量释放到深部肿瘤，在不使用射程转换器的情况下拥有最大的治疗深度 30 厘米。

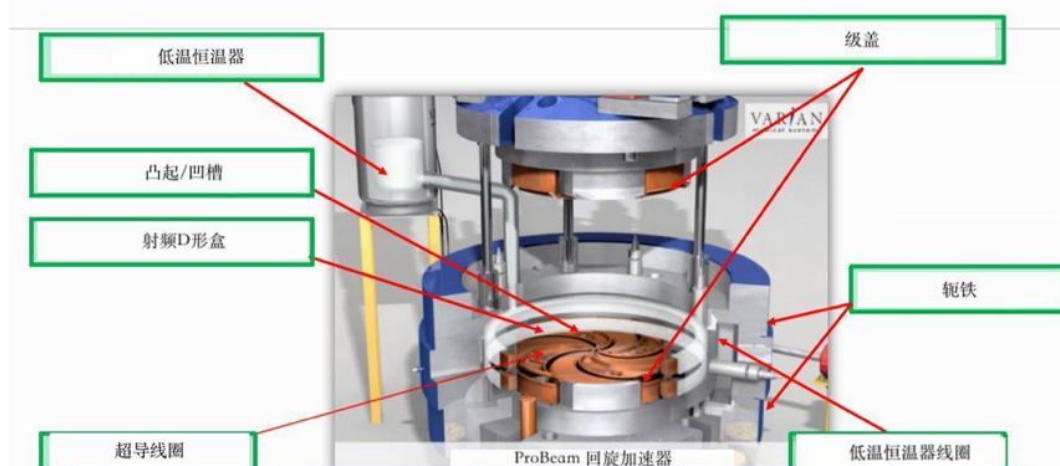


图 3-15 回旋加速器示意图

3.2.1.2.2 能量选择系统

质子治疗时要根据肿瘤本身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，该系统由偏转磁极、能量狭缝、散度孔径、降能器等部件构成，如图 3-16 所示。

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 250MeV 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 70~250MeV 之间连续可调的不同能量的质子束流。

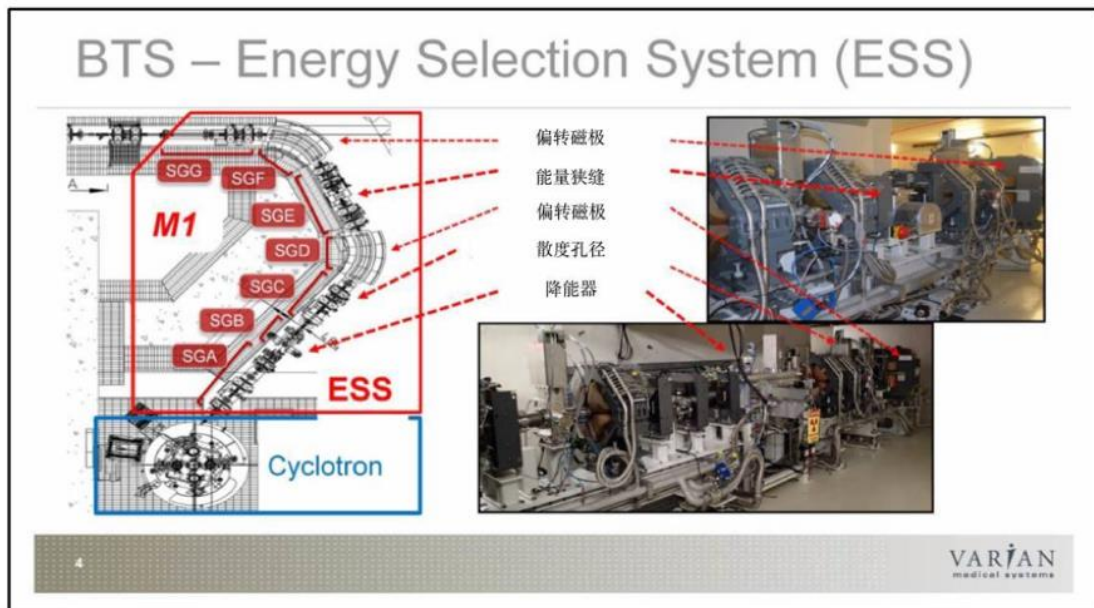


图 3-16 能量选择系统结构示意图

3.2.1.2.3 束流运输系统

束流传输系统主要包括束流闸、偏转磁极、转换磁极等部件，用于将加速器产生的质子束流聚集成型的同时将其引导输送到患者治疗部位附近。沿束流传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。束流传输系统如图 3-17 所示。

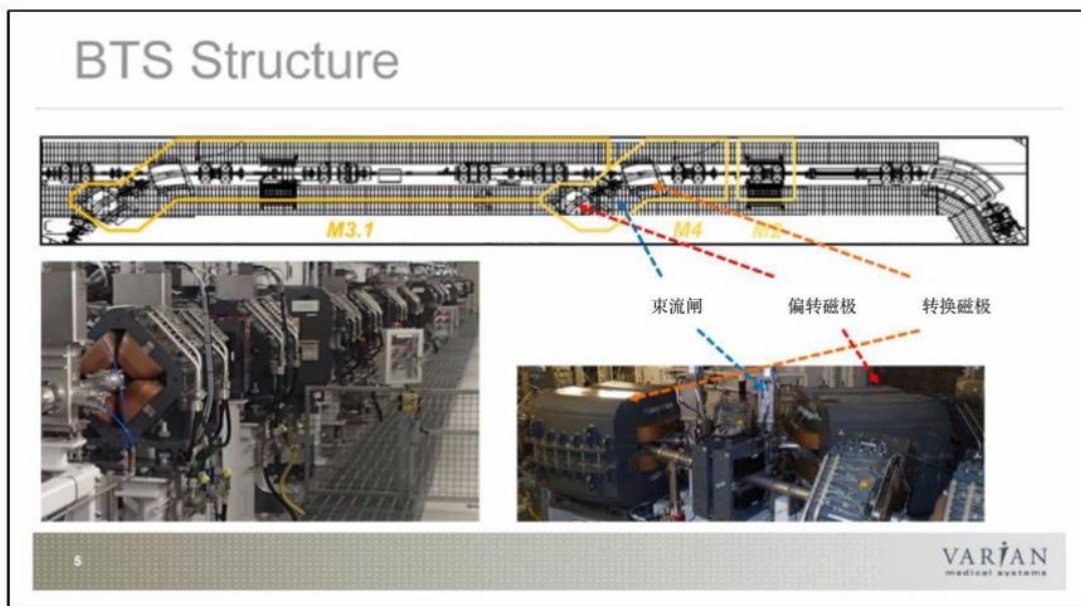


图 3-17 束流传输系统示意图

3.2.1.2.4 治疗室终端

质子治疗室终端为治疗病人的场所，包括机架、治疗头、X 光源、平板、治疗台、凹室、室内监控、操作手柄等部件，有固定束实验室和旋转束治疗室两种类型，如图 3-18。旋转机架治疗室内含有 380° 旋转机架。ProBeam 旋转机架是一个包含束流传输系统末端及扫描治疗头的钢结构。旋转机架能够环绕卧姿患者进行转动，按照所需角度投照射束，可实现 380° ($\pm 190^\circ$) 旋转。固定束实验室内不含旋转机架。

能量选择系统的降能器前方设有 1 个束流闸，称作中央束流闸，材料为石墨，用于阻挡从回旋加速器引出的束流。此外，每间治疗室前的束流运输线上均设有 1 个束流闸，称作局部束流闸，材料为钨，距离等中心点约 12m，其作用是阻挡束流提供冗余的安全措施。所有的束流闸均由安全联锁系统控制。

当治疗室没有治疗任务时，降能器的中央束流闸关闭，阻断束流进入治疗室。当需要治疗时，治疗控制系统即打开中央束流闸和有治疗任务的治疗室的局部束流闸，允许束流通过。其余治疗室前方的局部束流闸均处于关闭状态，同时高能束线向其余治疗室供束的偏转磁铁被联锁控制，无法加电工作。由此可保证

每个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。



图 3-18 固定束实验室（左）和旋转束治疗室（右）

3.2.1.2.5 治疗定位核查系统

每间治疗室内均设有一套治疗定位核查系统，用于病人治疗前的定位。治疗定位核查系统由定位用 X 射线管、接收器 and 高压发生器组成。每个 X 射线管的管电压为 150kV，最大管电流为 320mA。由高压发生器提供高压电源到 X 射线管上，X 射线管发出 X 射线到接收器上形成图像，最后在治疗控制系统内进行图像处理，使其满足放疗中图像使用的要求。每间治疗室设有 2 个 X 射线管，用于从不同角度对病人进行定位。固定束实验室的 X 射线管安装在治疗床的上方和下方，如图 3-19 所示；旋转束治疗室的 X 射线管安装在旋转机架上，可随机架同时转动，如图 3-20 所示。

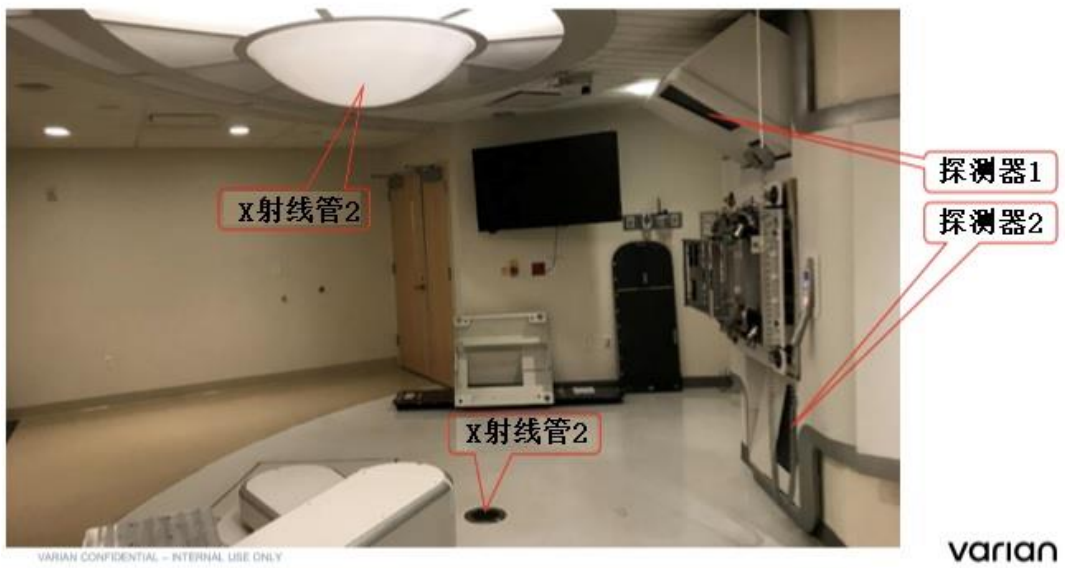


图 3-19 固定束实验室 X 示意图射线管位置



图 3-20 旋转束治疗室 X 射线管位置示意图

3.2.2 治疗流程

质子治疗系统治疗流程如下：

- (1) 患者诊断、模拟定位，获取用于治疗的医学影像。

(2) 制定治疗计划。医生在患者医学影像图中进行肿瘤轮廓勾画、区域分割等操作。物理师据此制定治疗计划和各种治疗参数，如照射次数、照射方向、照射剂量等。利用治疗计划系统软件对治疗计划进行进一步优化，生成治疗数据和文件，最终得出一个完整的治疗计划方案。治疗数据和文件通过肿瘤信息系统（OIS）生成用于照射的束流参数文件，保存在数据库内。

(3) 质量认证（QA）。治疗计划方案制定完成后，在正式进行治疗前，必须再进行方案的质量认证。

(4) 患者照射。操作人员对患者身份进行验证后，治疗计划系统和 ACS 系统根据病人 ID 调取束流参数文件并核验其正确性。病人摆位，操作人员定位图像验证后，开始照射，同时治疗计划系统记录病人实际照射剂量数据。照射完成后，治疗计划系统保存实际照射剂量数据文件。

3.3 辐射源项分析

质子治疗系统运行过程中产生的辐射场，主要为回旋加速器运行时产生的“瞬发辐射场”和加速器停机后依然存在的“残余辐射场”。瞬发辐射是加速器运行时损失的粒子束流与加速器部件和屏蔽体等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但会随着加速器的停机而完全消失；残余放射性主要来自与加速器结构部件、设备冷却水、舱室内空气等被主束或次级粒子轰击产生的活化产物，在加速器停机后依然存在。

质子治疗系统在开机运行状态下，除患者外无人员在治疗室等控制区内部停留，工作人员在控制室内进行控制操作。设备对环境的辐射影响途径主要是次级中子贯穿辐射外照射影响，以及排入环境的气载感生放射性核素的辐射影响。

质子治疗系统在停机状态下，工作人员因检查、检修而进入加速器大厅或摆位技术人员进入治疗室内进行摆位等工作时，可能受到感生放射性辐射危害。此外，回旋加速器机房、治疗室等场所的空气被电离后会产生臭氧、氮氧化物等有害气体。

3.3.1 瞬时辐射源

3.3.1.1 瞬时辐射场分析

对于质子治疗系统，在质子束流形成、加速、能量选择、传输和引出等过程中，都会发生束流的损失。损失的质子撞击在加速器的结构部件，如磁铁、降能器、准直器、夹缝、束流闸等物质上，会与部件材料中的原子核发生核反应，即高能质子入射到原子核内与核内的核子发生级联碰撞、交换能量、打出能量很高的高能中子，在激发核退激过程中又会释放出能量较低的蒸发中子，并伴随 γ 射线的发射。

质子治疗系统运行时产生的其他粒子（电子、 γ 等）不论是产生量还是穿透能力皆小于中子，对屏蔽体外剂量当量的贡献与中子相比可忽略。因此，其瞬发辐射场起决定性作用的是次级中子，包括由核内级联产生的高能中子和复合核退激出射出的蒸发中子两部分。高能中子的能量可达到被加速的质子能量，即 250MeV，其穿透能力也很强。因此，对质子加速器治疗系统瞬发辐射场起决定性作用的是高能中子。

3.3.1.2 各环节束流损失分析

根据质子治疗系统的辐射防护设计资料，ProBeam 质子治疗系统主要的束流损失点位分布在回旋加速器、能量选择系统的降能器、准直器、能量狭缝和治疗室终端，如表 3-3 所示。同时，为便于后续进行辐射屏蔽复核计算，将回旋加速器处的环形均匀束流损失平均分配后集中到四个磁铁叶片上，如图 3-21 所示。

表 3-3 Probeam 质子治疗系统束流损失参数

束流损失点		质子能量, MeV	特征流强, nA	靶材料	最大损失流强, nA	损失方式
回旋加速器	回旋加速器内部	250	10~800	Cu 或 Fe	200	环形均匀损失
能量选择系统	降能器	250	10~800	C	800	集中损失
	准直器	70~245	<240	Cu	240	集中损失
	能量狭缝	70~245	<10	Cu	10	集中损失

束流输运线	束流管道	70~245	0.09	不锈钢	0.09	连续损失
旋转束治疗室	病人	70~245	3	人体组织	3	集中损失
固定束实验室	体模	70~245	3	水	3	集中损失

注：回旋加速器部分的束流损失是环形均匀损失，为便于后续进行辐射屏蔽复核计算，保守将其视为集中损失在加速器的四个磁铁叶片上。

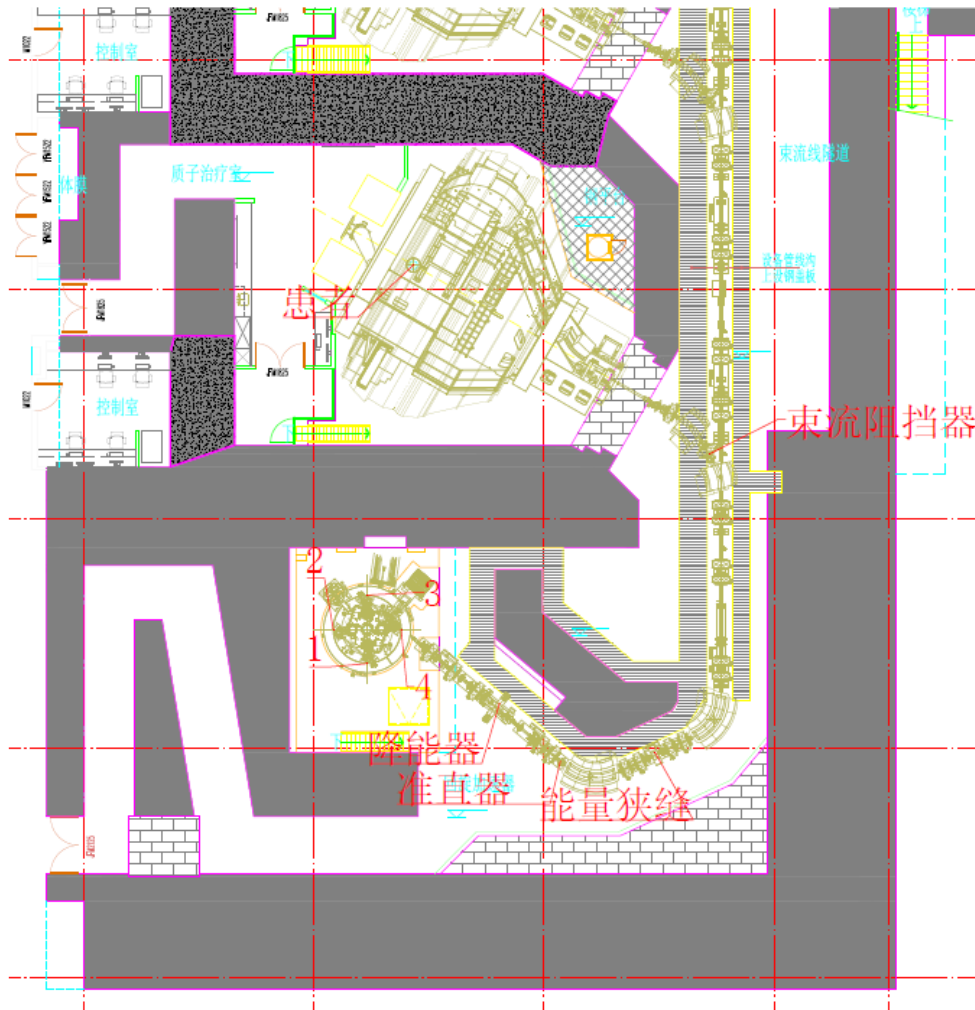


图 3-21 束流损失点位图

3.3.1.3 中子辐射场源项估算

根据对质子治疗系统瞬时辐射场的分析结果，其瞬发辐射场起决定性作用的是高能中子。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。图 3-22 给出了 245MeV 质子轰击人体组织等效靶产生的辐射场，可以看出高能质子核反应产生的瞬发中子有两个主要特点：

(1) 从角分布看，前向的中子产额较高，其中 $0^\circ \sim 30^\circ$ 方向中子产额相差不大， $60^\circ \sim 90^\circ$ 方向中子产额相对变化较大。

(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。

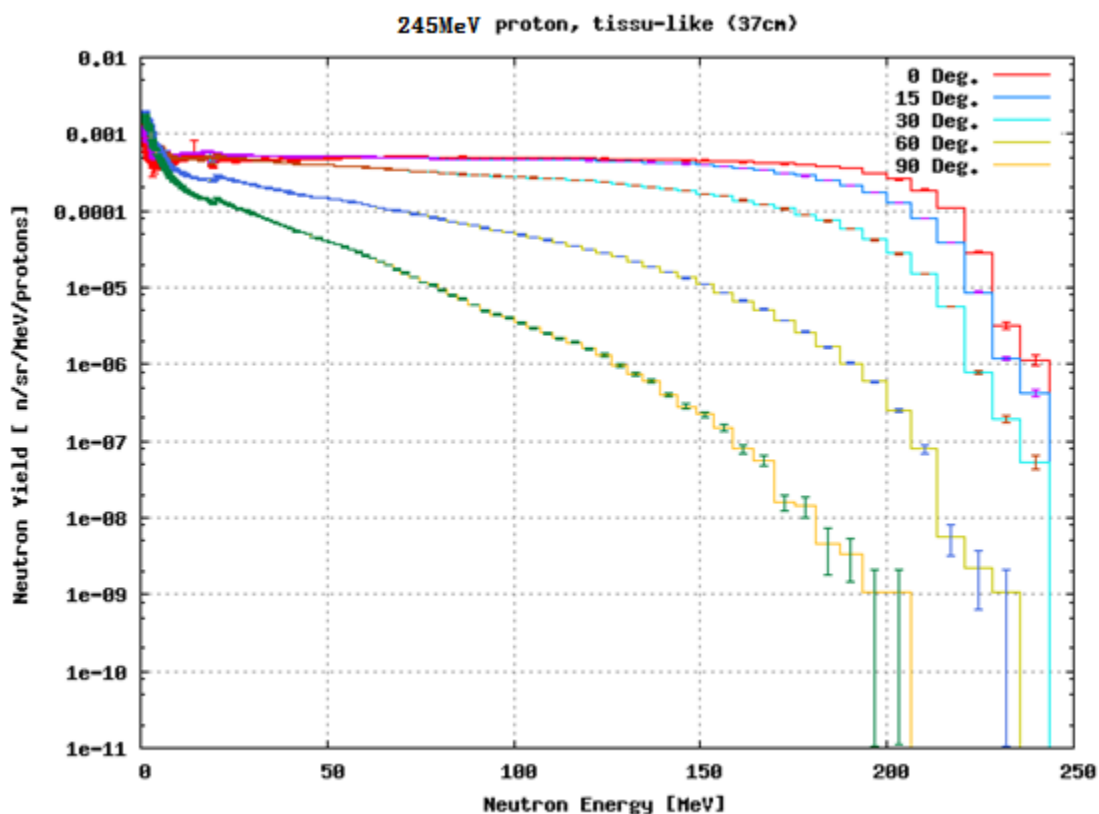


图 3-22 245MeV 质子轰击人体组织等效靶产生的中子辐射场

根据 Probeam 质子治疗系统束流损失参数，本次评价给出不同能量质子与不同靶材料作用产生的中子辐射源项。

3.3.1.3.1 250MeV 质子与铜靶和碳靶作用的中子辐射源项和在混凝土屏蔽体中的衰减长度

① 《放射性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》中附录 E.2 给出了当屏蔽体为混凝土时，250MeV 质子与 Cu 厚靶作用产生的中子

辐射源项，本次评价拟采用该附录所列的值进行保守计算，如表 3-4 所示。

② 考虑到降能器材料为碳，本次评价利用 FLUKA 程序模拟了 250MeV 质子与碳靶（直径 10cm，厚度 30cm 圆柱碳靶）作用产生的中子场，并计算了中子在混凝土中的衰减长度，列于表 3-4。

表 3-4 250MeV 质子与 Cu 厚靶和人体组织靶作用的中子辐射源项和在混凝土屏蔽体中的衰减长度

出射中子与入射质子之间的夹角 θ	Cu 靶		人体组织	
	H(θ), Sv·m ²	$\lambda_{\text{混凝土}}(\theta)$, g/cm ²	H(θ), Sv·m ²	$\lambda_{\text{混凝土}}(\theta)$, g/cm ²
0~10	7.0E-15	110.0	3.90E-15	95
10~20	5.6E-15	108.0	3.60E-15	93
20~30	4.7E-15	106.0	2.50E-15	92
30~40	3.5E-15	100.0	1.80E-15	83
40~50	2.5E-15	97.0	9.30E-16	80
50~60	1.8E-15	91.0	7.10E-16	75
60~70	1.1E-15	82.0	6.00E-16	67
70~80	7.1E-16	72.0	5.10E-16	59
80~90	5.7E-16	63.0	3.00E-16	52

表 3-5 250MeV 质子与 C 靶作用的中子辐射源项和在混凝土屏蔽体中的衰减长度

出射中子与入射质子之间的夹角 θ	C 靶	
	H(θ), Sv·m ²	$\lambda_{\text{混凝土}}(\theta)$, g/cm ²
0°~15°	2.33E-15	118.45
15°~30°	1.87E-15	114.78
30°~45°	1.49E-15	106.03
45°~60°	1.33E-15	94.55
60°~75°	1.14E-15	84.51
75°~90°	9.11E-16	76.49
90°~105°	7.17E-16	69.96
105°~120°	6.19E-16	64.33
120°~135°	5.17E-16	60.68
135°~150°	4.56E-16	58.23
150°~165°	4.17E-16	56.77

165°~180°	3.81E-16	56.52
-----------	----------	-------

3.3.1.3.2 250MeV 质子与 Cu 厚靶作用产生的中子在铁屏蔽体中的衰减长度

本次评价考虑了回旋加速器的磁轭约 40cm 厚铁的自屏蔽作用。文献《Shielding Analysis of Proton Therapy Accelerators: A Demonstration Using Monte Carlo-Generated Source Terms and Attenuation Lengths》，给出了屏蔽体为 Fe 时，250MeV 质子与铁靶（靶的尺寸大于质子射程又不考虑吸收）作用产生的中子在铁屏蔽体中的衰减长度，具体见表 3-6。本次评价采用该表中所列的数据进行保守计算。

表 3-6 250MeV 质子与铜靶作用产生的中子在铁屏蔽体中的衰减长度

出射中子与入射质子之间的夹角 θ	$\lambda_{\text{铁}}(\theta)$, g/cm ²
0~10	177
10~20	172
20~30	168
30~40	160
40~50	153
50~60	150
60~70	145
70~80	141
80~90	139

3.3.1.3.3 245MeV 质子与人体组织等效靶作用产生的中子源项及其在密度 3.53g/cm³ 的磁铁矿型重混凝土屏蔽体中的衰减长度

考虑到本项目相邻旋转束治疗室的隔墙以及旋转束治疗室迷道内墙的墙体采用密度 3.53g/cm³ 的磁铁矿型重混凝土（以下简称重混凝土）作为屏蔽体，密度百分比列于表 3-7。本次评价采用 FLUKA 程序模拟了旋转束治疗室内 245MeV 质子与人体组织等效靶作用后产生的中子场，并计算了中子在重混凝土屏蔽体内的衰减长度。考虑到成年人体内水分约占体重的 60%~70%，计算时将治疗室内患者近

似为一个圆柱体水靶，直径 10cm，厚度 38cm。计算结果列于下表 3-8。

表 3-7 密度 3.53g/cm³ 的磁铁矿型重混凝土的密度百分比

密度: 3.53 g/cm ³					
H	O	Si	Ca	Ma	Al
0.011	1.168	0.091	0.251	0.033	0.083
S	Fe	Ti	Cr	Mn	V
0.005	1.676	0.192	0.006	0.007	0.011

表 3-8 245MeV 质子与人体组织等效靶作用产生的中子源项和在重混凝土中的衰减长度

出射中子与入射质子之间的夹角 θ	$H(\theta)$, Sv·m ²	$\lambda_{\text{混凝土}}(\theta)$, g/cm ²
0°~15°	1.75E-15	126.84
15°~30°	1.43E-15	123.19
30°~45°	1.13E-15	117.83
45°~60°	9.47E-16	111.01
60°~75°	7.61E-16	103.84
75°~90°	5.89E-16	97.03
90°~105°	4.42E-16	90.88
105°~120°	3.33E-16	85.65
120°~135°	2.54E-16	81.32
135°~150°	1.94E-16	78.21
150°~165°	1.56E-16	75.07
165°~180°	1.41E-16	72.03

3.3.2 中子天空反散射

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。天空散射几乎完全由中子引起。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。

质子治疗系统产生的中子，经过较厚的加速器大厅顶板、各治疗室顶板的阻

挡厚，中子的能量和强度都将有很大程度的减小。本项目质子治疗系统各区域顶板厚度及顶板屏蔽体外剂量率列于表 3-9。

除关注点 U10（束流输运线隧道上方）外，各区域经顶板混凝土屏蔽体的阻挡后，顶板外表面 30cm 处剂量率水平均低于 2.5 μ Sv/h，顶板属于厚屏蔽体，可不考虑天空反散射的影响。关注点 U10 为束流输运线顶板上方的服务器室，根据“4.1.3.2.1 节”的计算结果，该区域的瞬时剂量率主要来自旋转束治疗室侧墙的透射，由束流线隧道顶板透射所致的瞬时剂量率仅为 3.17E-08Sv/h。因此，该区域的剂量率并非是由于束流线隧道顶板厚度不够所致，其天空反散射也可不予考虑。

表 3-9 质子治疗系统各区域顶板厚度及其外表面 30cm 剂量率

关注点	区域描述	剂量率计算结果, μ Sv/h	剂量率限值, μ Sv/h
U1	回旋加速器上方	3.08E-07	2.5
U2	迷道上方, 医生办公室	2.42E-09	2.5
U3	低温压缩机房	7.22E-07	10
U4	走道	2.86E-10	2.5
U5	会议、接待室	1.68E-06	2.5
U6	第一旋转束治疗室屋顶, 空地	2.48E-07	2.5
U7	回旋加速器上方屋顶, 空地	3.76E-09	2.5
U8	第二旋转束治疗室屋顶, 空地	2.83E-08	2.5
U9	走廊	1.10E-06	2.5
U10	服务器室	5.40E-06	10
U11	纯水机房	3.68E-08	2.5
U12	走道	3.63E-08	2.5
U13	服务器室	9.34E-10	10
U14	电源室	1.18E-11	2.5
U15	走道	5.50E-10	2.5
U16	服务器室	3.17E-08	10

3.3.3 感生放射性

质子治疗系统的感生放射性主要是质子束流与加速器部件相互作用产生的感生放射性和质子束流损失产生的次级中子引起的感生放射性。感生放射性强度取

决于加速离子的能量、种类、流强、加速器运行时间、被照材料性质等因素。

质子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加速器停机后，需要进入加速器大厅进行检查、维护维修操作的工作人员以及进入治疗室内对患者进行摆位或解除摆位等操作的摆位人员。本次评价主要对质子治疗系统空气、冷却水、结构部件、土壤和地下水的感生放射性进行分析计算。

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

3.3.3.1 空气的感生放射性

加速器运行期间有次级中子出射的场所，中子与空气中的N、O、H等通过热中子俘获、(n, 2n)、(γ , n)反应和散裂反应等产生³H、⁷Be、¹³N、¹⁵O和⁴¹Ar等放射性核素，考虑到³H和⁷Be的半衰期较长，其产额有限且环境影响较小，空气感生放射性计算中主要考虑¹¹C、¹³N、¹⁵O和⁴¹Ar四种核素，具体见表3-10。

表 3-10 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	放射性核素	半衰期
¹¹ C	20.39min	¹³ N	10min
¹⁵ O	2.1min	⁴¹ Ar	1.8h

质子治疗系统会产生空气感生放射性的场所主要有回旋加速器大厅、束流输运线隧道、旋转束治疗室和固定束实验室，计算时将回旋加速器大厅和束流输运线隧道作为一个区域考虑，考虑了该区域内所有束流损失点，最终结果取该区域内所有束流损失产生的感生放射性气体之和。

3.3.3.1.1 空气感生放射性饱和浓度

3.3.3.1.1.1 计算方法

质子治疗系统运行期间，回旋加速器大厅、输运线隧道以及执行治疗任务的治疗室均保持通风系统开启状态。在考虑通风的情况下，加速器连续运行 t 时间后，停机时刻以及加速器运行 t 时间，再停机通风 t_c 时间后，房间内空气活化产生的感生放射性核素活度可由下面的公式计算得到：

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) \quad (3-1)$$

$$C_{t_c} = C_t \cdot e^{-(\lambda + r_2)t_c} \quad (3-2)$$

$$N = \frac{\rho}{M} \times f \times \theta \times N_A \quad (3-3)$$

由于空气中感生放射性核素的半衰期相对于加速器的运行时间较短，核素的浓度很容易达到饱和，因此，可将式 3-1 简化为计算饱和浓度，用饱和浓度评价也是偏安全的。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi \quad (3-4)$$

式中，

C_t 为加速器运行 t 时间后，停机时刻房间内空气中感生放射性核素的活度浓度， Bq/cm^3 ；

C_{t_c} 为加速器运行 t 时间，停机通风 t_c 时间后，房间内空气中感生放射性核素的活度浓度， Bq/cm^3 ；

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

r_1 为正常运行时房间内的换气次数， s^{-1} ；

r_2 为停机通风时房间内的换气次数， s^{-1} ；

N 为单位体积空气中靶核的数目, 个/cm³;

σ 为靶核的活化截面, cm²;

ϕ 为中子注量率, n/cm²·s;

ρ 为空气的密度, g/cm³;

M 为靶核的原子质量, g;

f 为母核在空气中的质量份额;

θ 为母核的同位素丰度;

N_A 为阿伏伽德罗常数, 6.023E+23。

3.3.3.1.1.2 各参数的取值

(1) λ

λ 计算结果如表 3-11 所示。

表 3-11 放射性核素衰变常数计算结果

放射性核素	T1/2, s	λ , s ⁻¹
¹¹ C	1.22E+03	5.66E-04
¹³ N	6.00E+02	1.16E-03
¹⁵ O	1.26E+02	5.50E-03
⁴¹ Ar	6.48E+03	1.07E-04

(2) r

根据业主单位提供的资料, 质子治疗系统各区域的通风换气设计情况如表 3-12 所示。

表 3-12 质子治疗系统通风换气设计情况

区域名称	通风方式	气流走向	体积, m ³	排风量, m ³ /h	换气次数
回旋加速器大厅+束流输运线隧道	空调机送风+排风机排风	顶送风顶排风	1510	14000	9
旋转束治疗室	空调机送风+排风机排风	顶送风顶排风	120	500	16

固定束实验室	空调机送风+排风机排风	顶送风顶排风	120	2000	4
--------	-------------	--------	-----	------	---

(3) N

N 的计算结果如表 3-13 所示。

表 3-13 单位体积空气中靶核的数目计算结果

核素	M, g	f	ρ , g/cm ³	θ , %	N_A	N, 个/cm ³
¹¹ C	12	1.50E-04	1.21E-03	99.759	6.023E+23	9.05E+15
¹³ N	14	7.80E-01	1.21E-03	99.625	6.023E+23	4.03E+19
¹⁵ O	16	2.12E-01	1.21E-03	99.759	6.023E+23	9.59E+18
⁴¹ Ar	40	4.60E-03	1.21E-03	99.60	6.023E+23	8.31E+16

(4) ϕ

保守考虑，本次评价采用距靶点 1m 处时 0° 方向的中子注量率作为平均中子注量率进行保守计算。利用式 3-4 计算中子注量率 ϕ ，为保守考虑，本次评价在计算中子注量率时，忽略回旋加速器自身铁屏蔽层对中子的屏蔽作用。计算中所用到的参数和计算结果如表 3-14 错误!未找到引用源。所示。

$$\phi = \frac{Y}{4\pi r^2} e^{-R/\mu} \quad (3-4)$$

式中，

Y 为中子产额，n/s；NCRP NO.144 报告 P79 图 3.21（如本报告图 3-23 所示）给出了不同能量的单个质子与铜靶作用时的总中子产额，本次评价以总中子产额作为 0° 方向的中子产额。

r 为与辐射源点的距离，cm；

R 为屏蔽层的质量厚度，g/cm²；

μ 为中子在屏蔽材料中的平均衰减长度，g/cm²。

表 3-14 中子注量率计算所用参数和计算结果

位置	束流损失, p/s	单个质子打靶的中子产额, n/p	总中子产额, n/s	中子注量率, n/cm ² ·s
----	-----------	------------------	------------	-----------------------------

回旋加速器	1.25E+12	1	1.25E+12	9.95E+06
降能器	5.00E+12	0.3	1.50E+12	1.19E+07
准直器	1.50E+12	1	1.50E+12	1.19E+07
能量狭缝	6.25E+10	1	6.25E+10	4.98E+05
束流管道	5.63E+08	1	5.63E+08	4.48E+03
病人	1.88E+10	0.2	3.75E+09	2.99E+04
体模	1.88E+10	0.2	3.75E+09	2.99E+04

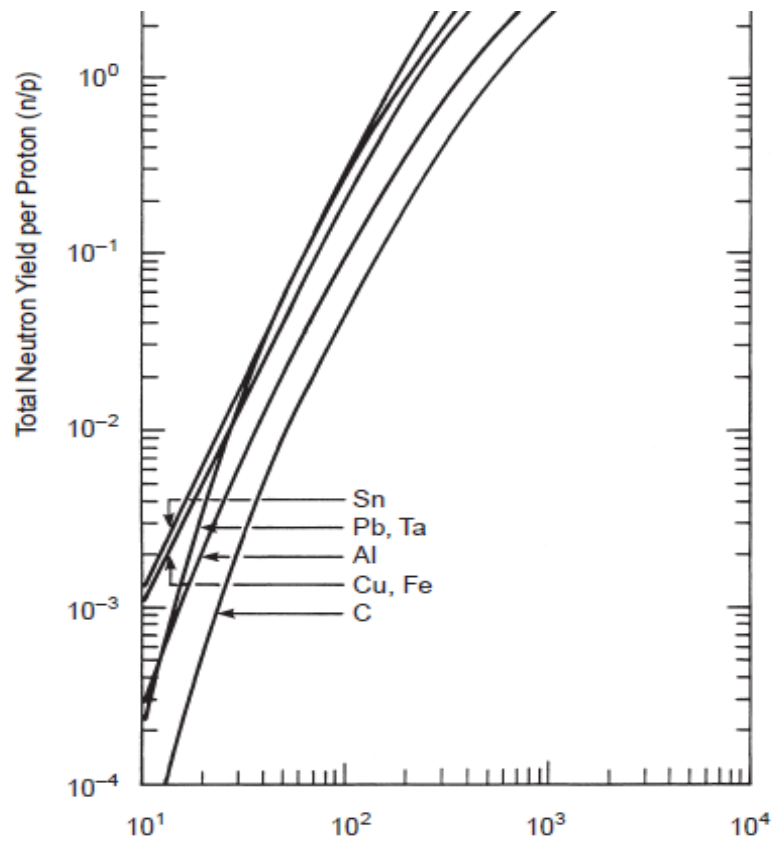


图 3-23 不同能量的单个质子与不同材料的靶物质作用的中子产额

(5) σ

σ 取值来自《加速器保健物理》(H.W.帕特森, R.H.托马斯) P297, 表 7.4, σ 取值与中子的能量有关, 本次评价采用“总截面”进行保守估算, 各靶核 σ 取值见表 3-15。

表 3-15 各靶核的活化截面取值

靶核	σ, cm^2
^{12}C	2.00E-26
^{14}N	3.00E-26
^{16}O	6.00E-26
^{40}Ar	6.10E-25

3.3.3.1.1.3 计算结果

利用以上公式可计算得出质子治疗系统运行期间，回旋加速器大厅（含输运线隧道）和治疗室内感生放射性气体的浓度，具体见表 3-16。

表 3-16 回旋加速器大厅（含输运线隧道）和治疗室内空气感生放射性核素的活度浓度， Bq/m^3

核素	回旋加速器大厅 (含输运线隧道)	治疗室		导出空气浓度 DAC
		旋转束治疗室	固定束实验室	
^{11}C	1.14E+03	6.12E-01	1.83E+00	1.00E+07
^{13}N	1.31E+07	7.49E+03	1.85E+04	7.00E+04
^{15}O	1.35E+07	9.52E+03	1.43E+04	7.00E+04
^{41}Ar	7.13E+04	3.57E+01	1.33E+02	1.00E+06

注：DAC 为职业照射放射性核素的导出空气浓度，是放射性核素在空气中的浓度限值。其值取自《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-1985）附录 C 中表 C3，表 C4，表 C5 和表 C10。

由表 3-16 可知，治疗室内的各空气感生放射性核素的饱和活度浓度均低于各自的导出空气浓度值。

考虑到质子治疗系统停机后，通常至少通风 45min 后工作人员才能进入回旋加速器大厅内部，则由式 3-6 可计算得出，质子治疗系统停机通风 30min 后，回旋加速器大厅（含输运线隧道）内空气感生放射性核素的活度浓度，具体见表 3-17。

表 3-17 停机后再通风 45min 回旋加速器大厅（含输运线隧道）内空气感生放射性核素的活度浓度， Bq/m^3

核素	回旋加速器大厅（含输运线隧道）	导出空气浓度 DAC
^{11}C	2.91E-01	1.00E+07
^{13}N	6.70E+02	7.00E+04
^{15}O	5.64E-03	7.00E+04
^{41}Ar	6.25E+01	1.00E+06

由表 3-17 可知，停机后再通风 45min 后人员进入时，回旋加速器大厅内空气感生放射性核素的活度浓度均低于各自的导出空气浓度值。

3.3.3.1.2 排入环境的空气感生放射性核素量

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”，质子治疗系统运行期间和停机通风期间向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由式 3-5 和式 3-6 计算。

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

$$= \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \left(t - \frac{1}{\lambda + r_1} + \frac{e^{-(\lambda + r_1)t}}{\lambda + r_1} \right) \quad (3-5)$$

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

$$= C_t R_{t_c} \frac{1 - e^{-(\lambda + r_2)t_c}}{\lambda + r_2} \quad (3-6)$$

式中，

Q_t 和 Q_{t_c} 分别质子治疗系统运行 t 时间和停机排放 t_c 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度，Bq；

R_t 和 R_{t_c} 分别为质子治疗系统正常运行和停机通风状态下的通风速率， cm^3/s ；

由此可计算得出质子治疗系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量，列于表 3-18。

表 3-18 质子治疗系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量，Bq

核素	回旋加速器大厅 (含输运线隧道)	治疗室		总计
		旋转束治疗室	固定束实验室	
^{11}C	2.99E+06	1.54E-03	1.84E-02	1.03E+07
^{13}N	3.43E+10	1.89E+01	1.86E+02	1.18E+11
^{15}O	3.54E+10	2.40E+01	1.44E+02	1.22E+11
^{41}Ar	1.86E+08	8.99E-02	1.34E+00	6.41E+08
总计	6.99E+10	4.30E+01	3.32E+02	2.41E+11

3.3.3.2 冷却水的感生放射性

质子治疗系统中，用于冷却磁铁、狭缝、热交换器等器件的冷却水，在由束流损失产生的中子辐射场的照射下会被活化。高能中子与冷却水中的氧发生散裂反应，产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 等放射性核素，各放射性核素的参数见表 3-19。

表 3-19 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

核素	半衰期 $T_{1/2}$	衰变常数, s^{-1}	生成核反应	反应截面 σ_i , barns
^3H	12.3a	1.78E-09	$^{16}\text{O}(\text{N},\text{X})^3\text{H}$	6.00E-03
^7Be	53.1d	1.51E-07	$^{16}\text{O}(\text{N},\text{X})^7\text{Be}$	2.00E-03
^{11}C	20.4min	5.67E-04	$^{16}\text{O}(\text{N},\text{X})^{11}\text{C}$	3.50E-03
^{13}N	9,97min	1.16E-03	$^{16}\text{O}(\text{N},\text{X})^{13}\text{N}$	7.00E-04
^{15}O	2.04min	5.67E-03	$^{16}\text{O}(\text{N},\text{X})^{15}\text{O}$	1.40E-02

注：表中所列的反应截面是在 CSISRS 数据库中查得，数据库中给出的反应截面与能量有关。考虑到计算的保守性，本次评价选用各核反应中最大的反应截面作为计算依据。

Probeam 质子治疗系统设有三个相互独立的主冷却水回路，其中，只有一个主冷却回路用于冷却位于辐射安全区域（回旋加速器、能量选择系统、部分束流传输系统和所有束流线上的磁铁）的系统组件，其余两个冷却回路用于冷却位于辐射安全区域以外的装置（如电柜、磁铁电源、高频放大器等）。因此，在计算冷却水感生放射性时，考虑到系统主要束流损失点位的分布，冷却水活化主要在辐射安全区域（回旋加速器、能量选择系统、部分束流传输系统和所有束流线上的磁铁）的主冷却回路，最终结果取该主冷却回路各束流损失点产生的冷却水感生放射性之和。

3.3.3.2.1 计算方法

质子治疗系统运行过程中，当冷却水系统经过无数次循环，冷却水活化的饱和浓度可利用式 3-7 计算。

$$C(i) = N\sigma_i\Phi \frac{1 - e^{-\lambda_i t_v}}{1 - e^{-\lambda_i T}} \quad (3-7)$$

式中，

$C(i)$ 为冷却水中第 i 种放射性核素的饱和浓度， Bq/cm^3 ；

N 为冷却水中母核 (^{16}O) 的原子数密度，取值 $3.34 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ；

σ_i 为中子与 ^{16}O 反应生成核素 i 的截面， cm^2 ；

ϕ 为中子注量率， $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ；

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

t_v 为冷却水循环一周内流经靶室被中子辐照的时间， s ；

T 为冷却水循环一周的时间， s 。

3.3.3.2.2 各参数取值

(1) ϕ

利用式 3-7 计算得出中子注量率 ϕ 的值，见表 3-20。

表 3-20 冷却水系统中子注量率计算用参数和计算结果

位置	束流损失, p/s	单个质子打靶的中子产额, n/p	总中子产额, n/s	中子注量率, $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$
回旋加速器	1.25E+12	1	1.25E+12	9.95E+06
降能器	5.00E+12	0.3	1.50E+12	4.78E+07
准直器	1.50E+12	1	1.50E+12	4.78E+07
能量狭缝	6.25E+10	1	6.25E+10	1.99E+06
束流管道	5.63E+08	1	5.63E+08	1.79E+04

(2) 冷却水参数

该回路冷却水的设计参数见表 3-21。

表 3-21 一次循环冷却水设计参数

区域	冷却水循环一周的时间 T, s	水流经靶室的时间 t _v , s	冷却水管径, mm
回旋加速器	120	10	100
能量选择系统	120	10	150
束流传输线	120	10	150

3.3.3.2.3 计算结果

利式 3-5，计算得出该冷却水回路中感生放射性核素的饱和浓度，结果见表 3-22。

表 3-22 冷却水感生放射性计算结果

核素	感生放射性核素的饱和浓度, Bq/cm ³						饱和活度, Bq
	回旋加速器	降能器	准直器	能量狭缝	束流管道	总计	
³ H	1.66E+02	3.99E+01	3.99E+01	1.66E+00	2.99E-01	2.48E+02	7.44E+08
⁷ Be	5.54E+01	1.33E+01	1.33E+01	5.54E-01	9.97E-02	8.26E+01	2.48E+08
¹¹ C	1.00E+02	2.41E+01	2.41E+01	1.00E+00	1.80E-01	1.49E+02	4.48E+08
¹³ N	2.07E+01	4.98E+00	4.98E+00	2.08E-01	3.72E-02	3.09E+01	9.26E+07
¹⁵ O	5.20E+02	1.28E+02	1.28E+02	5.34E+00	9.35E-01	7.82E+02	2.35E+09
总计	8.62E+02	2.10E+02	2.10E+02	8.76E+00	1.55E+00	1.29E+03	3.88E+09

上述放射性核素中，¹¹C、¹³N、¹⁵O 的半衰期很短，加速器停机后，这些核素将迅速衰变，浓度也会很快降低。因此，冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的 ³H 和 ⁷Be。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修时才需要排放。本项目第三个旋转束治疗室底板下方设有冷却水贮存池，采用防水衬砌混凝土，尺寸（长×宽×深）为 2m×2m×3m，容积约为 5t，用于贮存更换下来的冷却水。

冷却水管的末端位于束流输运线隧道的管沟内，管沟内设有地漏，地漏通过管道与冷却水贮存池连接。当因检修等原因需要排放时，打开需要排放的该路冷

却水管末端的阀门，直接排入管沟内，经地漏排入贮存池。经一定时间暂存后，短半衰期核素 ^{15}O 、 ^{13}N 和 ^{11}C 等将迅速衰变，浓度也很快降低，因此只需考虑半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 。对废水贮存槽中冷却水采样分析 ^3H 和 ^7Be 的含量，监测达标并经环保部门同意后排入医院污水管网。

3.3.3.3 加速器结构部件的感生放射性

加速器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。质子加速器产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如束流管、偏转磁铁等，其主要材料为铁、不锈钢、铜、铝和铝合金以及各种烃类。相关实验研究表明，加速器关机后所被活化部件中的核素主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

根据质子治疗系统的主要的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序（2011.2C-5 版本），计算了回旋加速器区、降能器、准直器、狭缝、束流闸等主要束流损失部位的感生放射性，计算时所用参数如下：

（1）回旋加速器

加速器运行工况：连续运行 500h：

束流参数：能量为 250MeV，束流损失率为 $3.11\text{E}+11\text{p/s}$ ；

靶材料：半径为 3cm，厚度为 7cm 的圆柱体铜靶。

（2）降能器

加速器运行工况：连续运行 500h：

束流参数：能量为 250MeV，束流损失率为 $5.0\text{E}+12\text{p/s}$ ；

靶材料：半径为 3cm，厚度为 18cm 的圆柱体碳靶。

（3）散度准直器

加速器运行工况：连续运行 500h：

束流参数：能量为 250MeV，束流损失率为 $1.5E+12p/s$ ；

靶材料：半径为 3cm，厚度为 7cm 的圆柱体铜靶。

(4) 能量狭缝

加速器运行工况：连续运行 500h；

束流参数：能量 250MeV，束流损失率为 $6.25E+10p/s$ ；

靶材料：半径为 3cm，厚度为 7cm 的圆柱体铜靶。

(5) 束流闸

加速器运行工况：连续运行 500h；

束流参数：能量 245MeV，束流损失率为 $1.88E+10p/s$ ；

靶材料：半径为 3cm，厚度为 4cm 的圆柱体钨靶。

各部分结构部件感生放射性的计算结果见表 3-23~表 3-27。

表 3-23 回旋加速器结构部件感生放射性计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	停机时刻活度浓度, Bq/g	冷却 12 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后的活度浓度, Bq/g
H-3	2.98E+06	1.68E+03	2.98E+06	1.68E+03
Be-7	4.53E+06	2.55E+03	4.51E+06	2.54E+03
Na-22	1.44E+03	8.12E-01	1.44E+03	8.12E-01
Na-24	9.08E+05	5.12E+02	7.55E+05	4.26E+02
V-48	5.70E+07	3.21E+04	4.25E+07	2.40E+04
Cr-51	1.24E+08	6.99E+04	1.04E+08	5.86E+04
Mn-52	1.69E+08	9.53E+04	7.19E+07	4.05E+04
Mn-54	1.94E+07	1.09E+04	1.91E+07	1.08E+04
Fe-55	1.37E+07	7.72E+03	1.37E+07	7.72E+03
Fe-59	6.08E+06	3.43E+03	5.45E+06	3.07E+03
Co-55	2.17E+08	1.22E+05	1.41E+08	7.95E+04
Co-56	9.32E+07	5.25E+04	9.29E+07	5.24E+04
Co-57	8.11E+07	4.57E+04	8.13E+07	4.58E+04
Co-58	2.71E+08	1.53E+05	2.78E+08	1.57E+05
Co-60	1.97E+06	1.11E+03	1.97E+06	1.11E+03
Co-61	2.41E+08	1.36E+05	2.38E+06	1.34E+03

Ni-57	2.40E+08	1.35E+05	1.94E+08	1.09E+05
Ni-63	1.13E+05	6.37E+01	1.13E+05	6.37E+01
Ni-65	2.62E+07	1.48E+04	1.27E+06	7.16E+02
Cu-61	5.47E+09	3.08E+06	5.56E+08	3.13E+05
Cu-62	8.49E+08	4.79E+05	2.91E+08	1.64E+05
Cu-64	4.32E+09	2.44E+06	2.37E+09	1.34E+06
Zn-62	6.57E+08	3.70E+05	2.86E+08	1.61E+05
Zn-65	5.38E+06	3.03E+03	5.37E+06	3.03E+03
总计	1.29E+10	7.26E+06	4.57E+09	2.57E+06

表 3-24 降能器感生放射性计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	停机时刻活度浓度, Bq/g	冷却 12 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后的活度浓度, Bq/g
H-3	1.02E+08	1.11E+05	1.02E+08	1.11E+05
Be-7	7.98E+09	8.71E+06	7.93E+09	8.66E+06
Be-10	9.32E+01	1.02E-01	9.32E+01	1.02E-01
C-11	4.71E+10	5.14E+07	8.50E+00	9.28E-03
C-14	3.70E+00	4.04E-03	3.70E+00	4.04E-03
总计	5.52E+10	6.02E+07	8.03E+09	8.77E+06

表 3-25 准直器感生放射性计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	停机时刻活度浓度, Bq/g	冷却 12 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后的活度浓度, Bq/g
H-3	1.44E+07	8.10E+03	1.44E+07	8.10E+03
Be-7	2.18E+07	1.23E+04	2.17E+07	1.22E+04
Na-22	6.94E+03	3.91E+00	6.94E+03	3.91E+00
Na-24	4.38E+06	2.47E+03	3.64E+06	2.05E+03
V-48	2.75E+08	1.55E+05	2.05E+08	1.16E+05
Cr-51	5.98E+08	3.37E+05	5.01E+08	2.82E+05
Mn-52	8.15E+08	4.59E+05	3.47E+08	1.95E+05
Mn-54	9.35E+07	5.25E+04	9.21E+07	5.21E+04
Fe-55	6.60E+07	3.72E+04	6.60E+07	3.72E+04
Fe-59	2.93E+07	1.65E+04	2.63E+07	1.48E+04
Co-55	1.05E+09	5.88E+05	6.80E+08	3.83E+05
Co-56	4.49E+08	2.53E+05	4.48E+08	2.53E+05
Co-57	3.91E+08	2.20E+05	3.92E+08	2.21E+05

Co-58	1.31E+09	7.37E+05	1.34E+09	7.57E+05
Co-60	9.50E+06	5.35E+03	9.50E+06	5.35E+03
Co-61	1.16E+09	6.56E+05	1.15E+07	6.46E+03
Ni-57	1.16E+09	6.51E+05	9.35E+08	5.25E+05
Ni-63	5.45E+05	3.07E+02	5.45E+05	3.07E+02
Ni-65	1.26E+08	7.13E+04	6.12E+06	3.45E+03
Cu-61	2.64E+10	1.48E+07	2.68E+09	1.51E+06
Cu-62	4.09E+09	2.31E+06	1.40E+09	7.90E+05
Cu-64	2.08E+10	1.18E+07	1.14E+10	6.46E+06
Zn-62	3.17E+09	1.78E+06	1.38E+09	7.76E+05
Zn-65	2.59E+07	1.46E+04	2.59E+07	1.46E+04
总计	6.20E+10	3.50E+07	2.20E+10	1.24E+07

表 3-26 能量狭缝感生放射性计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	停机时刻活度浓度, Bq/g	冷却 12 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后的活度浓度, Bq/g
H-3	5.99E+05	3.38E+02	5.99E+05	3.38E+02
Be-7	9.10E+05	5.12E+02	9.06E+05	5.10E+02
Na-22	2.89E+02	1.63E-01	2.89E+02	1.63E-01
Na-24	1.82E+05	1.03E+02	1.52E+05	8.56E+01
V-48	1.15E+07	6.45E+03	8.54E+06	4.82E+03
Cr-51	2.49E+07	1.40E+04	2.09E+07	1.18E+04
Mn-52	3.40E+07	1.92E+04	1.44E+07	8.14E+03
Mn-54	3.90E+06	2.19E+03	3.84E+06	2.17E+03
Fe-55	2.75E+06	1.55E+03	2.75E+06	1.55E+03
Fe-59	1.22E+06	6.89E+02	1.10E+06	6.17E+02
Co-55	4.36E+07	2.45E+04	2.83E+07	1.60E+04
Co-56	1.87E+07	1.06E+04	1.87E+07	1.05E+04
Co-57	1.63E+07	9.18E+03	1.63E+07	9.20E+03
Co-58	5.45E+07	3.07E+04	5.59E+07	3.16E+04
Co-60	3.96E+05	2.23E+02	3.96E+05	2.23E+02
Co-61	4.84E+07	2.73E+04	4.78E+05	2.69E+02
Ni-57	4.82E+07	2.71E+04	3.90E+07	2.19E+04
Ni-63	2.27E+04	1.28E+01	2.27E+04	1.28E+01
Ni-65	5.27E+06	2.97E+03	2.55E+05	1.44E+02
Cu-61	1.10E+09	6.19E+05	1.12E+08	6.29E+04
Cu-62	1.71E+08	9.63E+04	5.85E+07	3.30E+04
Cu-64	8.68E+08	4.90E+05	4.76E+08	2.69E+05

Zn-62	1.32E+08	7.44E+04	5.75E+07	3.24E+04
Zn-65	1.08E+06	6.09E+02	1.08E+06	1.46E+04
总计	2.59E+09	1.46E+06	9.18E+08	5.32E+05

表 3-27 束流闸感生放射性计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	停机时刻活度浓度, Bq/g	冷却 12 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后的活度浓度, Bq/g
Ho-160	2.62E+06	9.17E+02	1.96E+06	6.87E+02
Ho-161	4.39E+06	1.54E+03	1.07E+06	3.75E+02
Tm-165	1.89E+07	6.61E+03	1.45E+07	5.07E+03
Tm-166	2.17E+07	7.61E+03	2.13E+07	7.46E+03
Tm-167	1.20E+07	4.22E+03	1.18E+07	4.14E+03
Yb-166	2.29E+07	8.03E+03	1.98E+07	6.95E+03
Yb-167	4.53E+07	1.59E+04	0.00E+00	0.00E+00
Yb-169	4.40E+06	1.54E+03	5.07E+06	1.78E+03
Lu-169	7.54E+07	2.64E+04	5.92E+07	2.08E+04
Lu-170	7.91E+07	2.77E+04	8.05E+07	2.82E+04
Lu-171	3.94E+07	1.38E+04	4.24E+07	1.49E+04
Lu-172	1.22E+06	4.26E+02	1.20E+06	4.21E+02
Hf-170	1.13E+08	3.96E+04	6.76E+07	2.37E+04
Hf-173	2.49E+08	8.72E+04	1.99E+08	6.99E+04
Hf-175	1.40E+07	4.93E+03	1.54E+07	5.40E+03
Ta-173	2.45E+08	8.59E+04	1.79E+07	6.26E+03
Ta-175	3.97E+08	1.39E+05	1.88E+08	6.61E+04
Ta-176	4.90E+08	1.72E+05	2.36E+08	8.28E+04
Ta-177	3.78E+08	1.33E+05	3.43E+08	1.20E+05
Ta-178	1.05E+08	3.68E+04	6.92E+07	2.43E+04
Ta-179	2.91E+06	1.02E+03	2.94E+06	1.03E+03
Ta-180	3.08E+07	1.08E+04	1.11E+07	3.89E+03
Ta-182	1.05E+06	3.69E+02	1.05E+06	3.69E+02
Ta-183	1.64E+07	5.76E+03	1.53E+07	5.38E+03
Ta-184	1.52E+07	5.31E+03	5.88E+06	2.06E+03
W-177	4.59E+08	1.61E+05	1.19E+07	4.19E+03
W-178	7.02E+07	2.46E+04	6.91E+07	2.42E+04
W-181	1.67E+07	5.87E+03	1.72E+07	6.02E+03
W-185	1.46E+07	5.12E+03	1.45E+07	5.10E+03
W-187	9.79E+07	3.43E+04	6.89E+07	2.42E+04

Re-181	2.08E+08	7.28E+04	1.37E+08	4.79E+04
Re-182	4.54E+07	1.59E+04	3.98E+07	1.40E+04
Re-183	4.46E+06	1.56E+03	4.44E+06	1.56E+03
Re-184	1.93E+06	6.76E+02	1.91E+06	6.71E+02
Re-186	1.67E+06	5.87E+02	1.53E+06	5.35E+02
总计	3.30E+09	1.16E+06	1.80E+09	6.30E+05

3.3.3.4 土壤和地下水的感生放射性

根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》，同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。本项目各区域地板厚度及地板外表面与土壤边界处的剂量率列于表 3-28。由此可知，各区域地板外表面与土壤边界处的剂量率远低于 5mSv/h，本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

表 3-28 各区域地板厚度及其外表面剂量率水平

区域		地板厚度, m	地板外表面与土壤边界处剂量率, Sv/h
回旋加速器大厅	回旋加速器下方	1.5	6.59E-04
	能量选择系统下方	2.0	4.26E-03
	束流输运线隧道下方	1.5	5.67E-07
旋转束治疗室		1.5	3.82E-04
固定束实验室		1.5	5.98E-06

3.3.3.5 旋转束治疗室内病人的感生放射性

项目共建设 3 间旋转束治疗室和 1 间固定束实验室，其实仅旋转束治疗室用于临床治疗，固定束实验室为科研实验用。每间治疗室在满负荷运行的情况下每天治疗 16 小时，每小时规划治疗 2 个病人。因此，平均每 30min 需要对病人进行摆位/解除摆位一次。由于解除摆位时，工作人员处于治疗室内且近距离接触刚受到照射的患者，因此需计算分析此时治疗室内患者感生放射性强度，以此确定摆

位前有无必要等待合适时间再进入治疗室对患者解除摆位，并评估治疗后患者带有的感生放射性对摆位人员和周围陪护人员的辐射影响。

3.3.3.5.1 计算条件

旋转束治疗室内由于照射病人所致感生放射性强度的计算条件如下：

(1) 采用治疗时常用的束流条件：束流能量 200MeV，流强 3nA，连续治疗 2min。

(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》中推荐的 ICRP 标准软组织成分，列于表 3-29，靶的尺寸为厚度 40cm，半径 35cm 的圆柱体。

表 3-29 人体组织等效靶的组成成分

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

3.3.3.5.2 单次治疗后旋转束治疗室内剩余剂量率

结合实际治疗情况，以常用的治疗条件 200MeV-3nA 的束流连续治疗 2min，假设病人不移动，计算了停机时刻、停机 1min、5min、10min、30min 和 1h 时刻

旋转束治疗室内剩余剂量率分布。计算结果如图 3-24~图 3-29 和表 3-30 所示。

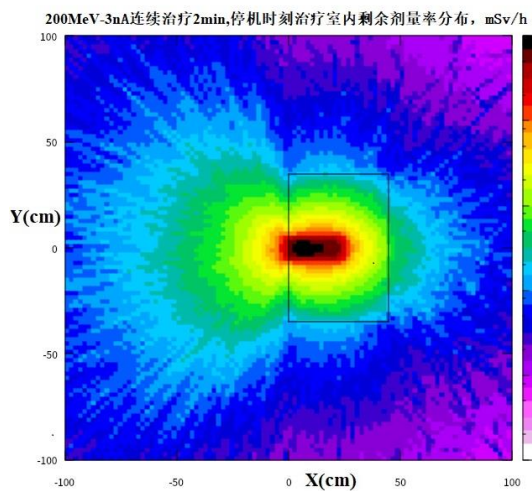


图 3-24 停机时刻治疗室内剩余剂量率

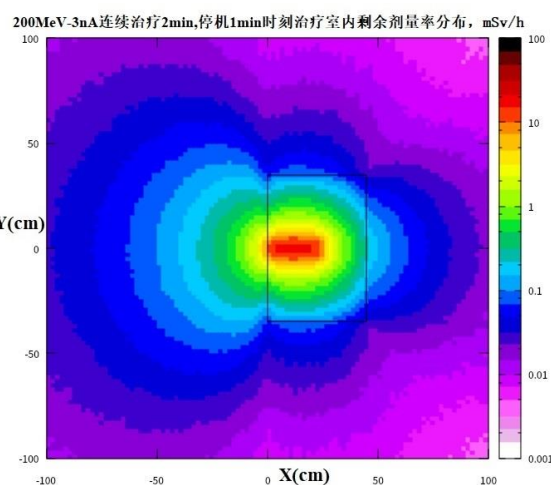


图 3-25 停机 1min 后治疗室内剩余剂量率

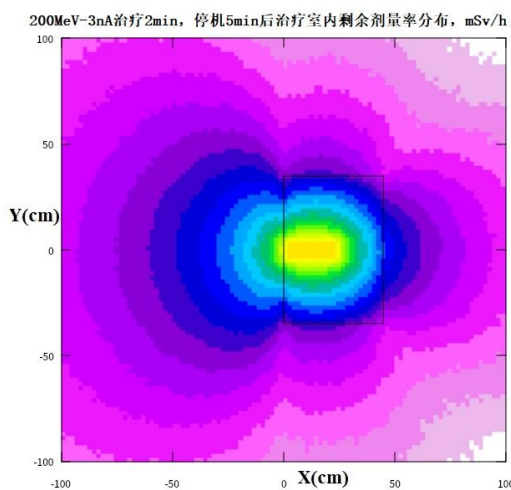


图 3-26 停机 5min 后治疗室内剩余剂量率

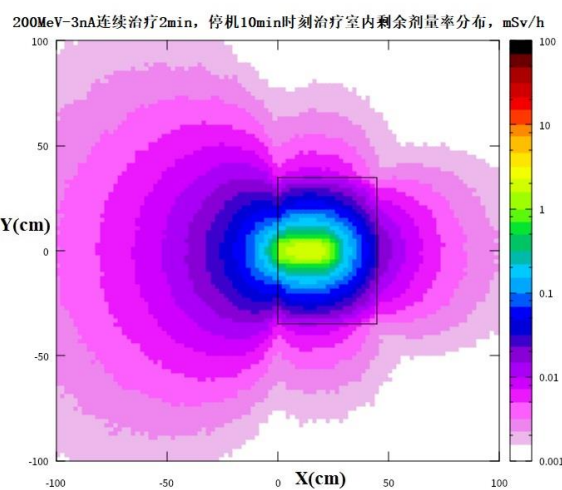


图 3-27 停机 10min 后治疗室内剩余剂量率

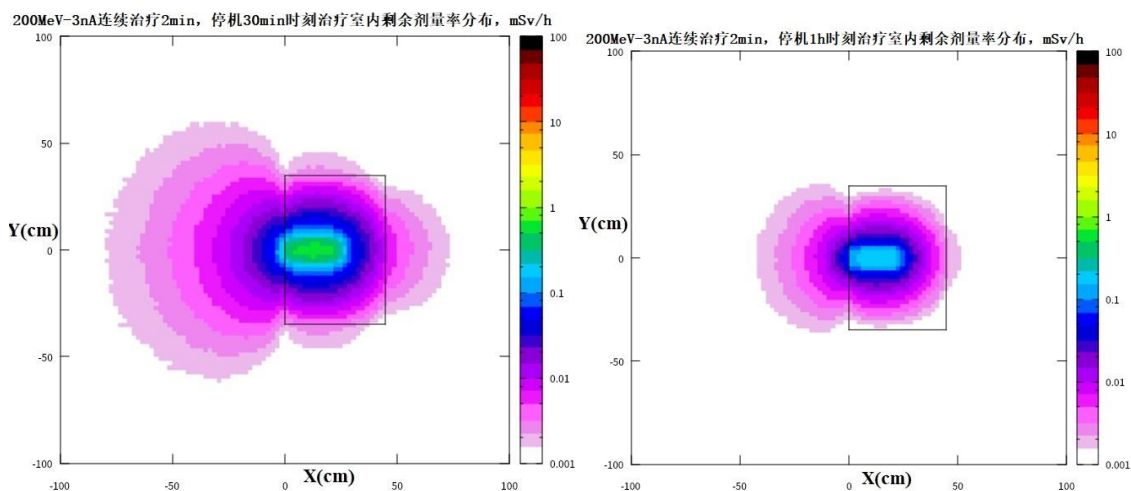


图 3-28 停机 30min 后治疗室内剩余剂量率

图 3-29 停机 1h 后治疗室内剩余剂量率

表 3-30 单次治疗后，治疗室内距靶（患者）表面 30cm、50cm、1m 处感生放射性剂量率随停机时间的变化

距靶 30cm 处的剂量率随停机时间的变化		
200MeV-3nA 治疗 2min		
停机时间	最大剂量率, mSv/h	最小剂量率, mSv/h
0s	2.06E-01	4.86E-02
1min	1.10E-01	1.56E-02
5min	3.13E-02	4.38E-03
10min	1.12E-02	1.58E-03
30min	3.41E-03	4.85E-04
1h	1.17E-03	1.65E-04
4h	4.75E-06	7.00E-07
1d	6.21E-07	1.32E-07
1w	3.40E-08	5.40E-09
距靶 50cm 处的剂量率随停机时间的变化		
200MeV-3nA 治疗 2min		
停机时间	最大剂量率, mSv/h	最小剂量率, mSv/h
0s	5.70E-02	2.45E-02
1min	3.08E-02	9.15E-03
5min	8.67E-03	2.70E-03
10min	3.03E-03	1.00E-03
30min	9.07E-04	3.03E-04
1h	3.10E-04	1.01E-04
4h	1.03E-06	4.14E-07
1d	9.34E-08	6.68E-08
1w	1.17E-08	5.07E-09

距靶 1m 处的剂量率随停机时间的变化		
200MeV-3nA 治疗 2min		
停机时间	最大剂量率, mSv/h	最小剂量率, mSv/h
0s	1.46E-02	7.75E-03
1min	7.92E-03	4.08E-03
5min	2.30E-03	1.22E-03
10min	8.53E-04	4.40E-04
30min	2.67E-04	1.34E-04
1h	9.05E-05	4.66E-05
4h	4.76E-07	3.17E-07
1d	1.14E-07	1.95E-08
1w	2.00E-09	2.22E-09

由此可分析得出以下结论:

(1) 以 200MeV-3nA 连续治疗 2min, 治疗结束后, 若患者不移动, 治疗室内距离患者 50cm 处的剂量率最高可达 5.70E-02mSv/h; 停机 10min 后, 距离患者 50cm 处剂量率降至 3.03E-03mSv/h; 停机 30min 后, 距离患者 30cm 处剂量率低于 2.5 μ Sv/h;

(3) 停机时间由 1min~10min, 治疗室由于患者造成的感生放射性剂量率降低 1 个量级; 停机时间由 10min~1h, 剂量率再降低 1 个量级, 进一步说明患者照射产生的感生放射性主要是由半衰期在半小时内的短寿命核素贡献。因此, 本次评价进一步对主要核素进行分析, 结果列于表 3-31, 主要核素为 C-11、N-13 和 O-15。

表 3-31 旋转束治疗室连续治疗 2min 后, 不同停机时刻由患者所致感生放射性核素的活度浓度

核素	活度浓度, Bq/cm ³				
	停机时刻	停机 1min	停机 10min	停机 30min	停机 1h
C-10	3.13E+02	3.61E+01	1.30E-07	0	0
C-11	3.38E+02	3.26E+02	2.41E+02	1.22E+02	4.40E+01
N-12	5.22E+01	0	0	0	0
N-13	8.28E+01	7.72E+01	4.13E+01	1.03E+01	1.28E+00
N-16	9.64E+01	2.82E-01	0	0	0
N-17	6.81E+00	3.20E-04	0	0	0
O-14	2.61E+02	1.45E+02	7.23E-01	5.53E-06	8.20E-07
O-15	4.21E+03	2.99E+03	1.40E+02	1.55E-01	5.74E-06

3.3.3.5.3 旋转束治疗室工作区内瞬时剂量率来源

本项目建设的旋转束治疗室全部使用铅笔束扫描的治疗模式，该治疗模式下经束流输运线传输至治疗室终端的所有束流都被用于患者治疗，没有治疗头、光栏这部分额外的束流损失。因此，不考虑治疗头和旋转机架区结构部件的活化。

以第一个旋转束治疗室为例，当摆位医生在该治疗室对照射结束后的患者进行解除摆位的操作时，其工作区瞬时剂量率主要考虑以下 5 个来源：

(1) 照射结束后的患者产生的感生放射性剂量率；

(2) 回旋加速器大厅内束流损失所致的瞬时剂量率，如图 3-30，主要考虑回旋加速器部分的束流损失（250MeV-200nA）和降能器处的束流损失（250MeV-800nA）；

(3) 束流输运线上的束流损失（250MeV-0.09nA）所致的瞬时剂量率，如图 3-31；

(4) 相邻正在出束的旋转束治疗室（245MeV-3nA）所致的瞬时剂量率，如图 3-32；

(5) 治疗室内感生放射性空气所致的外照射剂量率。计算空气感生放射性所致剂量率时，采用治疗室内空气感生放射性饱和浓度进行保守计算，计算结果列于表 3-32。

表 3-32 空气感生放射性剂量率计算结果

核素	停机 10min 后的浓度, Bq/m ³	空气浸没外照射剂量率, Sv/h	空气吸入内照射剂量率, Sv/h	总计, Sv/h
¹¹ C	3.04E-02	5.34E-12	6.56E-13	2.33E-11
¹³ N	2.60E+02	4.59E-08	---	4.59E-08
¹⁵ O	2.45E+01	4.32E-09	---	4.32E-09
合计	---	5.02E-08	6.56E-13	5.02E-08

回旋加速器大厅内束流损失所致周围中子剂量率分布, $\mu\text{Sv/h}$

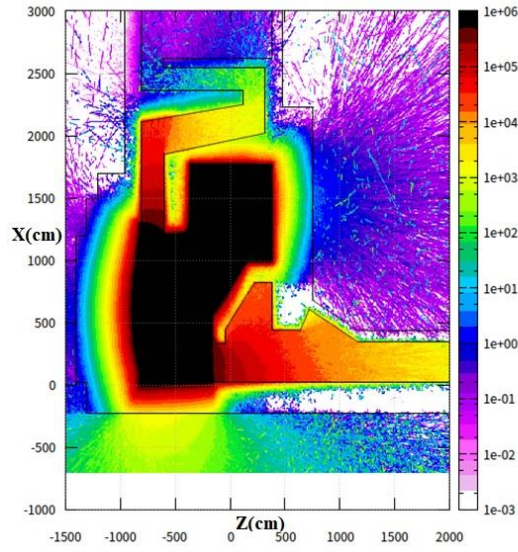


图 3-30 回旋加速器大厅内束流损失所致周围中子剂量率分布

束流运输线上的沿程束流损失 (0.09nA) 所致中子剂量率分布, $\mu\text{Sv/h}$

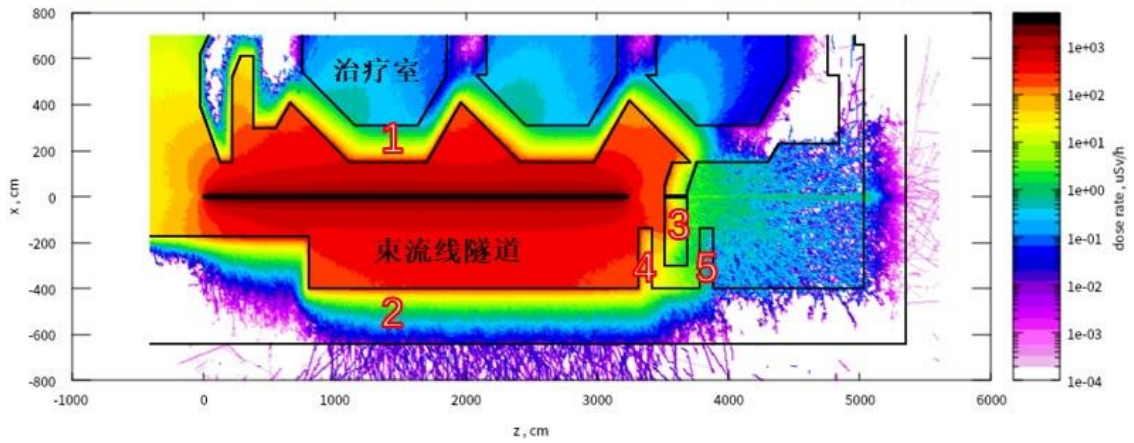


图 3-31 束流运输线上的沿程束流损失所致中子剂量率分布

旋转束治疗室朝向相邻治疗室工作区照射时，
中子剂量率分布， $\mu\text{Sv/h}$

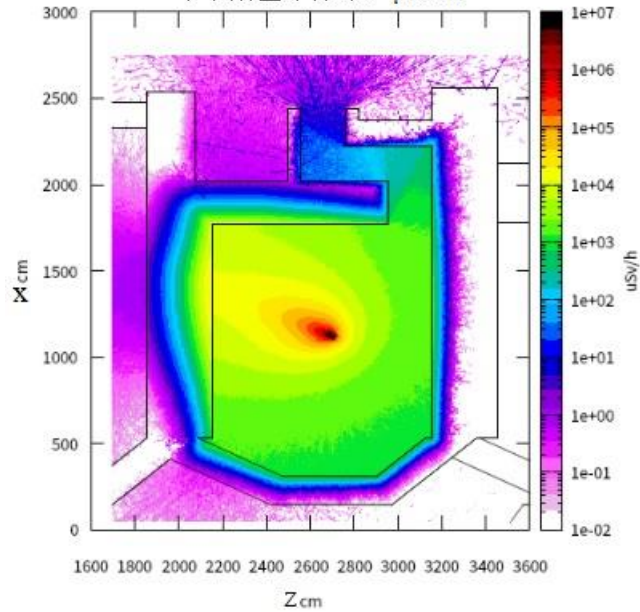


图 3-32 旋转束治疗室向相邻治疗室工作区照射时的中子剂量率分布

本次评价对 **200MeV-3nA** 连续治疗 2min 后，患者不移动，不同停机时刻下治疗室摆位区（距离患者 50cm 处）的剂量率及其来源进行分析，结果列于表 3-33。

由计算结果可知，治疗室内对患者单次治疗 2min 后停机 10min 内，摆位区瞬时剂量率主要来自患者感生放射性，剂量率占 50% 以上，其次是相邻正在出束的治疗室。停机 30min 后，摆位区瞬时剂量率主要来自相邻正在出束的治疗室。

表 3-33 旋转束治疗室治疗 2min，停机 1min、5min 和 10min 后，治疗室摆位区（距离患者 50cm 处）的剂量率

来源	停机 1min 后		停机 5min 后		停机 10min 后		停机 30min	
	剂量率， Sv/h	贡献 率，%	剂量率， Sv/h	贡献 率，%	剂量率， Sv/h	贡献 率，%	剂量率， Sv/h	贡献 率，%
患者	3.08E-05	93.6	8.67E-06	80.5	3.03E-06	59.1	9.07E-07	30.2
回旋加速器大厅	8.97E-07	2.7	8.97E-07	8.3	8.97E-07	17.5	8.97E-07	29.9
束流运输线	2.15E-07	0.7	2.15E-07	2.0	2.15E-07	4.2	2.15E-07	7.2
相邻治疗室	9.32E-07	2.8	9.32E-07	8.7	9.32E-07	18.2	9.32E-07	31.1
空气感生放射性	5.02E-08	0.2	5.02E-08	0.5	5.02E-08	1.0	5.02E-08	1.7
总计	3.29E-05	100	1.08E-05	100	5.12E-06	100	3.00E-06	100

3.3.4 臭氧等有害气体的产生

O₃ 和 NO₂ 是当光子能量低于 (γ, n) 反应的阈能时, 光子对空气的辐照而产生, 同时其产生量与带电粒子的质量密切相关, 是电子加速器环境影响评价中需要考虑的因素。对质子治疗系统而言, 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。因此, 对质子治疗系统, 其 O₃ 和 NO₂ 很小, 可以不用考虑。

4 辐射安全与防护设施

4.1 辐射屏蔽

4.1.1 屏蔽体外剂量率限值

根据业主单位提供质子治疗系统辐射屏蔽设计报告，质子治疗机房屏蔽体外剂量率限值主要依据《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）中的相关要求确定，如下表 4-1 所示。

表 4-1 本项目质子治疗系统工作场所屏蔽体外剂量率限值

位置	位置描述（居留因子）	剂量率限值
机房墙和入口门外	居留因子 $T \geq 1/2$	2.5 μ Sv/h
	居留因子 $T < 1/2$	10 μ Sv/h
机房顶	居留因子 $T \geq 1/2$	2.5 μ Sv/h
	居留因子 $T < 1/2$	10 μ S v/h

4.1.2 屏蔽设计

回旋加速器大厅、束流输运线隧道以及各治疗室的墙体厚度如图 4-1 所示，各场所屋顶的厚度如和图 4-3 所示。



图 4-1 墙体厚度示意图

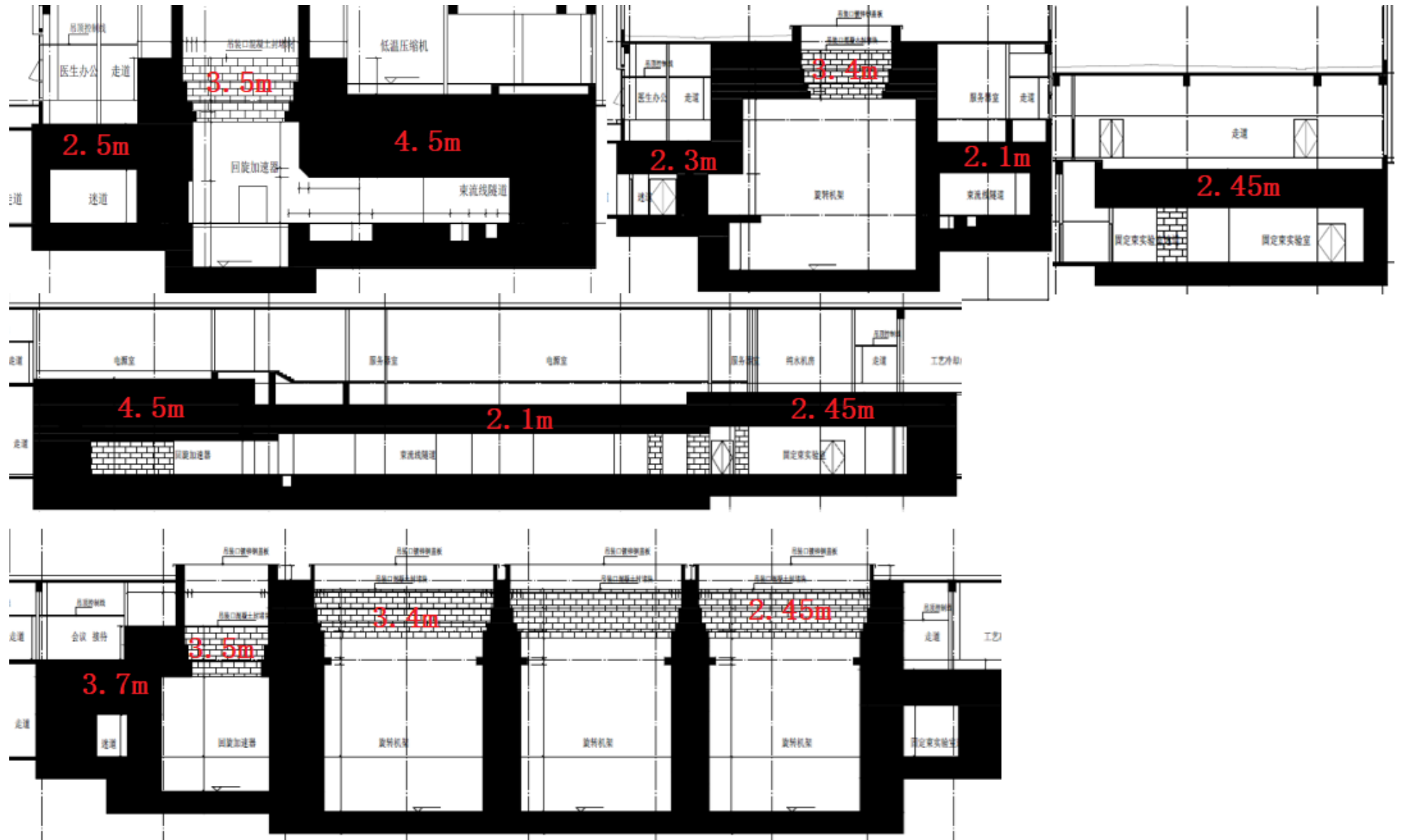


图 4-2 质子治疗系统辐射工作场所各区域屋顶厚度

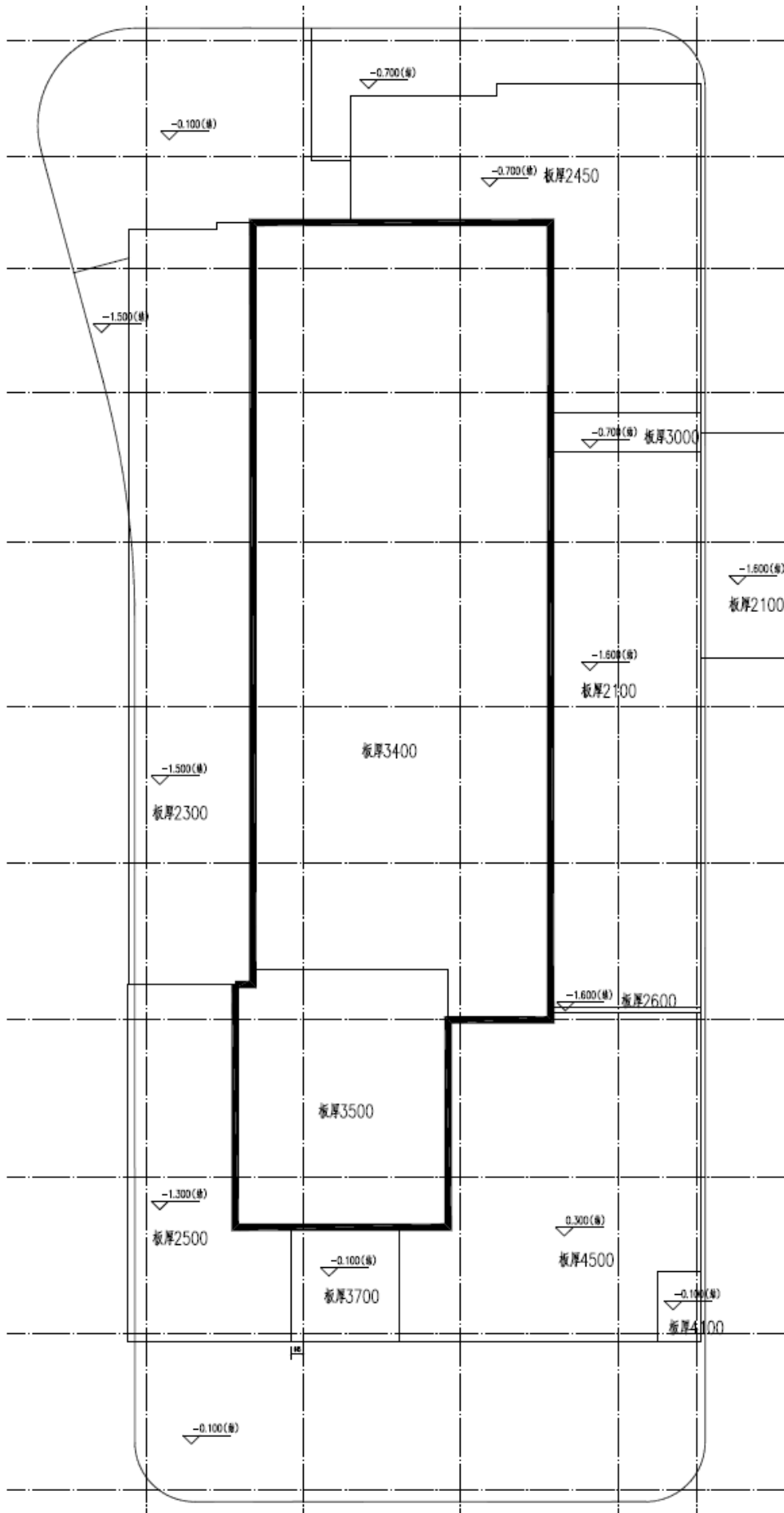


图 4-3 质子治疗系统辐射工作场所各区域屋顶厚度示意图

4.1.3 屏蔽计算

本项目使用的质子治疗系统的质子最高能量为 250MeV，束流打靶后产生的次级粒子有蒸发中子、级联中子、光子和正负电子等。研究表明，几百 MeV 能量范围的质子束流损失后产生的光子、正负电子甚至介子，经较厚的混凝土屏蔽衰减后对剂量率的贡献很小，屏蔽体外的剂量贡献主要来源于高能级联中子。因此，屏蔽的主要对象是中子。

根据《放射性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）中“6 机房墙体屏蔽估算方法”，当关注点与束流损失点的距离远大于束流损失点的几何尺寸（大于 7 倍时），可将靶视为点源。根据质子治疗系统的设备结构和平面布局，本项目各束流损失点均视为点源处理。屏蔽体外剂量率采用下式 4-1 计算。

$$D_p = S_p H(\theta) \frac{1}{r^2} e^{-d(\theta)\lambda(\theta)} \quad (4-1)$$

$$D_L = S_L H(\theta) \frac{2}{r} e^{-d/0.89\lambda(\theta)} \quad (4-2)$$

D_p 分别为对点源和线源屏蔽体外的剂量率，Sv/s；

S_p 为单位时间内在束流损失点处损失的质子数，s⁻¹；

S_L 为单位时间内在单位束流损失线上损失的质子数，s⁻¹；

$H(\theta)$ 为单个质子打靶时，在距靶 1m 处中子引起的剂量，Sv·m²；

$\lambda(\theta)$ 为中子在屏蔽层内的衰减长度，g/cm²；

θ 为入射质子与出射中子之间的夹角；

r 为源点到计算点之间的距离，m；

$d(\theta)$ 为屏蔽体的有效质量厚度，g/cm²。

$$d(\theta) = \rho \cdot d \cdot c \sec \theta \quad (4-3)$$

式中：d 为屏蔽体厚度，cm；

ρ 为屏蔽体密度，g/cm³；

α 为出射中子与屏蔽体法线之间的夹角；

此外，对于回旋加速器部分的束流损失点位，同时考虑了回旋加速器磁轭的自屏蔽，约为 45cm 厚的铁屏蔽体。根据文献《Shielding data for 100-250MeV proton accelerators: Attenuation of secondary radiation in thick iron and concrete/iron shields》，对于铁和混凝土的复合屏蔽体，其屏蔽体外剂量率的计算公式如下：

$$H = \frac{H_{0Fe}(E_p, \theta)}{r^2} \exp\left[-\frac{d_{Fe}(\theta)}{\lambda_{Fe}(\theta)}\right] \exp\left[-\frac{d_{concrete}(\theta)}{\lambda_{concrete}(\theta)}\right] \quad (4-4)$$

因此，对于回旋加速器部分束流损失点造成的屏蔽墙体外的剂量率，采用式 4-4 计算。

此外，考虑到本项目质子治疗系统多处采取不规则屏蔽以及局部加厚屏蔽，根据质子打靶产生中子源项的角分布特点，对同一角度区间的中子源项，选取源点与关注点的最短距离以及屏蔽体最小有效厚度进行保守计算。

4.1.3.1 回旋加速器大厅

根据回旋加速器大厅的设备布局及其周围环境分布情况，对该大厅周围设置的关注点如图 4-4 所示。各关注点及其设计的剂量率限值见下表 4-2。

表 4-2 回旋加速器大厅周围关注点及设计的剂量率限值

编号	区域描述	设计的剂量率限值	束流损失点
关注点 1	走廊	2.5 μ Sv/h	回旋加速器 4#、降能器、准直器
关注点 2	走廊	2.5 μ Sv/h	回旋加速器 4#、降能器、准直器
关注点 3	机械电子工作室	2.5 μ Sv/h	降能器、准直器、能量狭缝
关注点 4	第一旋转束治疗室的通道	10 μ Sv/h	回旋加速器 1#、2#、3#、4#、降能器
关注点 5	第一旋转束治疗室的机架	10 μ Sv/h	回旋加速器 1#、2#、3#、4#、

	区		降能器
关注点 6	第一旋转束治疗室的工作区	2.5 μ Sv/h	回旋加速器 1#、2#、3#、4#、降能器
关注点 7	第一旋转束治疗室的控制室	2.5 μ Sv/h	回旋加速器 1#、2#、3#、4#、第一旋转束治疗室
关注点 8	走廊	2.5 μ Sv/h	回旋加速器 1#、2#、3#、4#
关注点 9	主控室	2.5 μ Sv/h	回旋加速器 1#、降能器

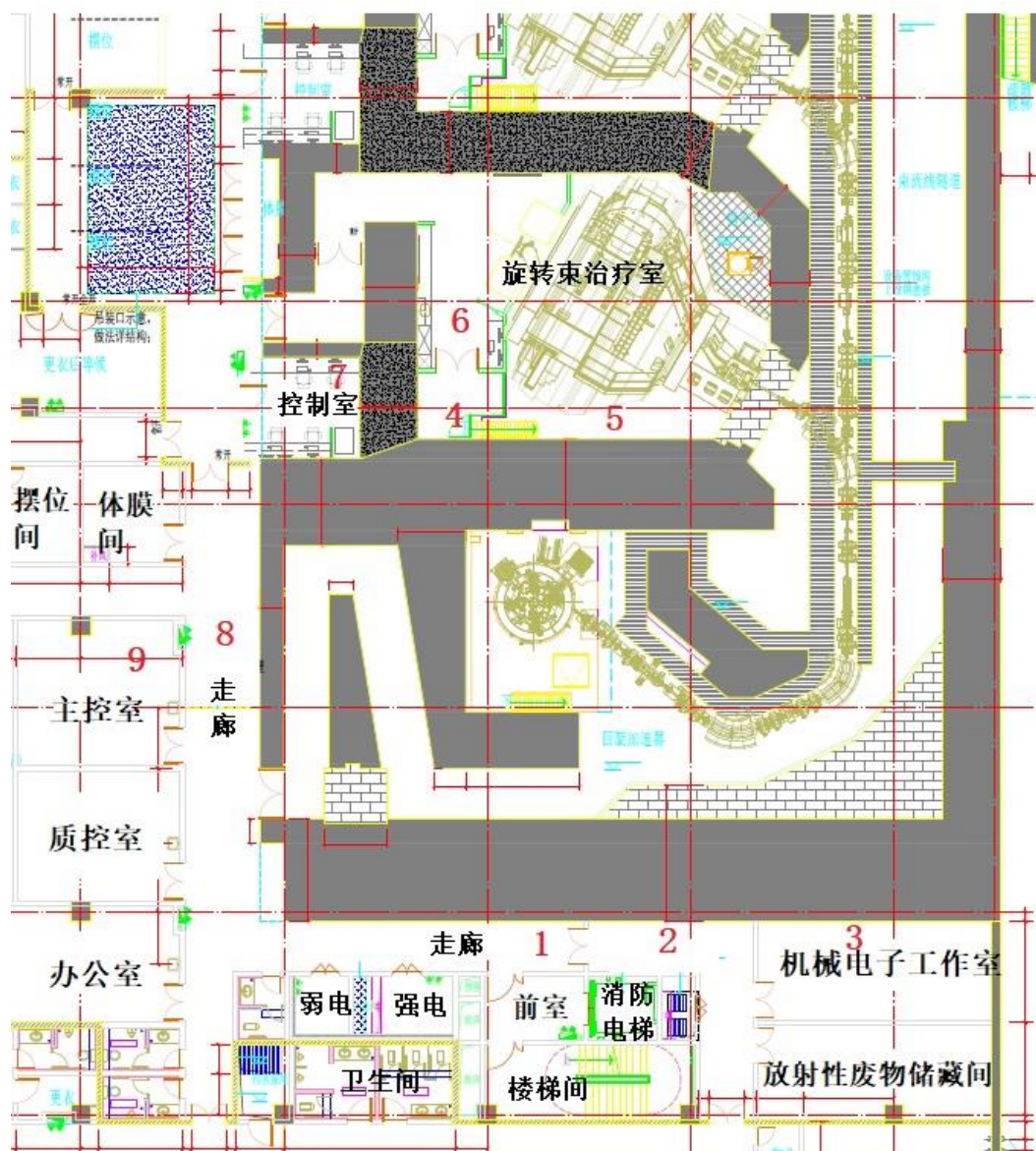


图 4-4 回旋加速器大厅周围关注点位示意图

4.1.3.1.1 关注点 1

关注点 1 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-3 和表 4-4。

表 4-3 回旋加速器大厅关注点 1 屏蔽计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 4#	0°	13.1	56cmFe +655cm 混凝土
降能器	70°	10.8	443m 混凝土
散度准直器	90°	10.2	680cm 混凝土

注：对于回旋加速器部分，考虑了 40cm 磁轭（铁）的自屏蔽体。计算时根据束流方向与出射中子方向的夹角取其有效厚度进行计算。下同

表 4-4 回旋加速器大厅屏蔽计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
回旋加速器 4#	3.13E+11	7.0E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 443.9; 混凝土: 1539.25	3.13E-09
降能器	5.00E+12	2.0E-15	69.96	1041.05	3.81E-08
散度准直器	1.50E+12	5.70E-16	63.0	1598	2.85E-13

4.1.3.1.2 关注点 2

关注点 2 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-5 和表 4-6。

表 4-5 回旋加速器大厅关注点 2 屏蔽计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 4#	10°	13.5	56cmFe+424cm 混凝土
降能器	30°	11.0	601cm 混凝土
	45°	10.3	563cm 混凝土
	50°	10.2	560cm 混凝土
散度准直器	40°	8.55	571cm 混凝土
	50°	8.40	560cm 混凝土

表 4-6 回旋加速器大厅关注点 2 屏蔽计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
回旋加速器 4#	3.11E+11	7.0E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 443.9 混凝土: 996.4	4.10E-07
降能器	5.00E+12	1.87E-15	114.78	1412.35	1.26E-06

	5.00E+12	1.49E-15	106.03	1323.05	9.63E-07
	5.00E+12	1.33E-15	94.55	1316	2.08E-07
散度准直器	1.50E+12	3.50E-15	100	1341.85	3.85E-07
	1.50E+12	2.50E-15	97	1316	2.45E-07

4.1.3.1.3 关注点 3

关注点 3 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-7 和表 4-8。

表 4-7 回旋加速器大厅关注点 3 屏蔽计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
降能器	0°	16.5	958cm 混凝土
	15°	12.7	692cm 混凝土
	27°	11.2	612cm 混凝土
散度准直器	0°	13.3	958cm 混凝土
	10°	11.1	756cm 混凝土
	20°	9.8	654cm 混凝土
	30°	9.0	599cm 混凝土
能量狭缝	116°	8.5	620cm 混凝土

表 4-8 回旋加速器大厅关注点 3 屏蔽计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
降能器	5.00E+12	2.33E-15	118.45	2251.3	8.58E-10
	5.00E+12	2.33E-15	118.45	1626.2	2.84E-07
	5.00E+12	1.87E-15	114.78	1438.2	9.70E-07
散度准直器	1.50E+12	7.00E-15	110	2251.3	2.76E-10
	1.50E+12	7.00E-15	110	1776.6	2.97E-08
	1.50E+12	5.60E-15	108	1536.9	2.08E-07
	1.50E+12	4.70E-15	106	1407.65	5.35E-07
能量狭缝	6.25E+10	5.70E-16	63	1457	1.60E-13

4.1.3.1.4 关注点 4

关注点 4 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-9 和表 4-10。

表 4-9 回旋加速器大厅关注点 4 屏蔽计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 1#	58°	9.3	40cmFe +440cm 混凝土
	70°	8.4	40cmFe +399cm 混凝土
	80°	9.0	40cmFe +379cm 混凝土
回旋加速器 2#	0°	7.7	56cmFe +375cm 混凝土
	10°	6.9	56cmFe +383cm 混凝土
回旋加速器 3#	100°	6.7	40cmFe +381cm 混凝土
	115°	6.1	40cmFe +415cm 混凝土
回旋加速器 4#	140°	8.8	40cmFe +489cm 混凝土
	150°	7.8	50cmFe +433cm 混凝土
	160°	8.1	56cmFe +352cm 混凝土
降能器	158°	12.1	384cm 混凝土

表 4-10 回旋加速器大厅关注点 4 屏蔽计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
1#	3.11E+11	1.80E-15	Fe: 150 混凝土: 91	Fe: 314 混凝土: 1034	3.35E-08
	3.11E+11	1.10E-15	Fe: 145 混凝土: 82	Fe: 314 混凝土: 937.65	2.18E-08
	3.11E+11	7.10E-16	Fe: 141 混凝土: 72	Fe: 314 混凝土: 890.65	4.51E-09
2#	3.11E+11	7.00E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 444 混凝土: 881.25	3.59E-06
	3.11E+11	7.00E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 444 混凝土: 900.05	3.76E-06
3#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 895.35	1.00E-09
	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 975.25	3.41E-10
4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 1149.15	1.04E-11
	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 392 混凝土: 1017.55	6.05E-11
	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 444 混凝土: 827.2	7.95E-10
降能器	5.00E+12	4.17E-16	混凝土: 56.77	混凝土: 902.4	6.40E-09

4.1.3.1.5 关注点 5

关注点 5 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-11 和表 4-12。

表 4-11 回旋加速器大厅关注点 5 屏蔽计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 1#	70°	8.4	40cmFe +395cm 混凝土
	90°	8.0	40cmFe +335cm 混凝土
回旋加速器 2#	0°	6.7	56cmFe +375cm 混凝土
	10°	6.9	56cmFe +383cm 混凝土
	21°	7.3	56cmFe +360cm 混凝土
回旋加速器 3#	57°	6.5	40cmFe +398cm 混凝土
	90°	5.5	40cmFe +335cm 混凝土
回旋加速器 4#	160°	7.1	56cmFe +355cm 混凝土
	180°	6.7	40cmFe +335cm 混凝土
降能器	128°	9.6	375cm 混凝土

表 4-12 回旋加速器大厅关注点 5 屏蔽计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
1#	3.11E+11	1.10E-15	Fe: 145 混凝土: 82	Fe: 314 混凝土: 928.25	2.44E-08
	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 787.25	3.92E-09
2#	3.11E+11	7.00E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 444 混凝土: 881.25	4.86E-06
	3.11E+11	7.00E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 444 混凝土: 900.05	3.86E-06
	3.11E+11	4.70E-15	Fe: 168 混凝土: 106	Fe: 444 混凝土: 846	2.48E-06
3#	3.11E+11	1.80E-15	Fe: 150 混凝土: 91	Fe: 314 混凝土: 935.3	2.03E-07
	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 787.25	1.22E-06
4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 444 混凝土: 834.25	9.25E-10
	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 787.25	5.58E-09
降能器	5.00E+12	5.17E-16	混凝土: 63	混凝土: 881.25	4.98E-08

4.1.3.1.6 关注点 6

关注点 6 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-13 和表 4-14。

表 4-13 回旋加速器大厅关注点 6 屏蔽计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 1#	70°	11.5	40cmFe +399cm 混凝土
	80°	11.0	40cmFe +379cm 混凝土
回旋加速器 2#	0°	9.5	56cmFe +375cm 混凝土
回旋加速器 3#	100°	8.5	40cmFe +381cm 混凝土
回旋加速器 4#	165°	10.0	40cmFe +346cm 混凝土
降能器	158°	14.2	384cm 混凝土

表 4-14 回旋加速器大厅关注点 6 屏蔽计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
1#	3.11E+11	1.10E-15	Fe: 145 混凝土: 82	Fe: 314 混凝土: 937.65	1.16E-08
	3.11E+11	7.10E-16	Fe: 141 混凝土: 72	Fe: 314 混凝土: 890.65	3.02E-09
2#	3.11E+11	7.00E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 444 混凝土: 881.25	2.36E-06
3#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 895.35	6.24E-10
4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 813.1	1.66E-09
降能器	5.00E+12	4.17E-16	混凝土: 56.77	混凝土: 902.4	4.65E-09

4.1.3.1.7 关注点 7

关注点 7 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-15 和表 4-16。

表 4-15 回旋加速器大厅关注点 7 屏蔽计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 1#	45°	10.1	45cmFe +615cm 混凝土
回旋加速器 2#	45°	8.4	45cmFe +615cm 混凝土
回旋加速器 3#	146°	8.6	50cmFe +525cm 混凝土

回旋加速器 4#	165°	10.3	40cmFe +532cm 混凝土
降能器	180°	14.7	541cm 混凝土
第一旋转束治疗室	20°	11.5	305cm 重混凝土
	30°	10.1	268cm 重混凝土
	40°	9.4	177cm 重混凝土+71cm 混凝土

表 4-16 回旋加速器大厅关注点 7 屏蔽计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
1#	3.11E+11	2.50E-15	Fe: 153 混凝土: 97	Fe: 353.25 混凝土: 1445.25	9.33E-09
2#	3.11E+11	2.50E-15	Fe: 153 混凝土: 97	Fe: 353.25 混凝土: 1445.25	1.35E-08
3#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 392.5 混凝土: 1233.75	2.71E-11
4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 1250.2	1.46E-11
降能器	5.00E+12	3.81E-16	混凝土: 56.52	混凝土: 1207.9	1.66E-11
第一旋转束 治疗室	1.88E+10	1.43E-15	重混凝土: 123.19	混凝土: 1067.5	1.26E-07
	1.88E+10	1.43E-15	重混凝土: 123.19	混凝土: 938	4.67E-07
	1.88E+10	1.13E-15	重混凝土: 117.83 混凝土: 83	重混凝土: 619.5 混凝土: 166.85	6.02E-07

4.1.3.1.8 关注点 8

关注点 8 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-17 和表 4-18。

表 4-17 回旋加速器大厅关注点 8 的剂量率计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 1#	0°	11.3	56cmFe +446cm 混凝土
	11°	11.6	56cmFe +347cm 混凝土
回旋加速器 2#	86°	11.5	40cmFe +348cm 混凝土
	75°	10.4	40cmFe +370cm 混凝土
回旋加速器 3#	180°	11.3	56cmFe +362cm 混凝土
回旋加速器 4#	92°	12.6	40cmFe +346cm 混凝土
降能器	155°	16.5	349cm 混凝土

表 4-18 回旋加速器大厅关注点 8 的剂量率计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
1#	3.11E+11	7.00E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 440 混凝土: 1048.1	3.74E-07
	3.11E+11	5.60E-15	Fe: 172 混凝土: 108	Fe: 440 混凝土: 815.45	1.91E-06
2#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 817.8	1.17E-09
	3.11E+11	7.10E-16	Fe: 141 混凝土: 72	Fe: 314 混凝土: 869.5	4.53E-09
3#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 440 混凝土: 850.7	2.90E-10
4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 813.1	1.05E-09
降能器	5.00E+12	4.17E-16	混凝土: 56.77	混凝土: 820.15	1.47E-08

4.1.3.1.9 关注点 9

关注点 9 的剂量率计算参数和计算结果见表 4-19 和表 4-20。

表 4-19 回旋加速器大厅关注点 9 的剂量率计算参数

束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
回旋加速器 1#	0°	14.4	56cmFe +446cm 混凝土
降能器	130°	19.5	464cm 混凝土
	140°	19.1	446cm 混凝土

表 4-20 回旋加速器大厅关注点 9 的剂量率计算结果

束流损失点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
1#	3.11E+11	7.00E-15	Fe: 177 混凝土: 110	Fe: 440 混凝土: 1048.1	2.31E-07
降能器	5.00E+12	5.17E-16	60.68	1090.4	3.84E-10
	5.00E+12	4.56E-16	58.23	1048.1	3.43E-10

4.1.3.1.10 回旋加速器大厅顶板

根据工作人员或公众的可达区域及各区域的用途，回旋加速器大厅顶板设计时考虑的关注点如图 4-5 所示。各关注点位及其设计的剂量率限值如表 4-21 所示。

表 4-21 回旋加速器大厅顶板各关注点及其剂量率限值

关注区域	区域描述	设计的剂量率限值
U1	回旋加速器上方，空地	2.5 μ Sv/h
U2	迷道上方，医生办公室	2.5 μ Sv/h
U3	能量选择系统上方，低温压缩机房	2.5 μ Sv/h
U4	走道	2.5 μ Sv/h
U5	会议、接待室	2.5 μ Sv/h

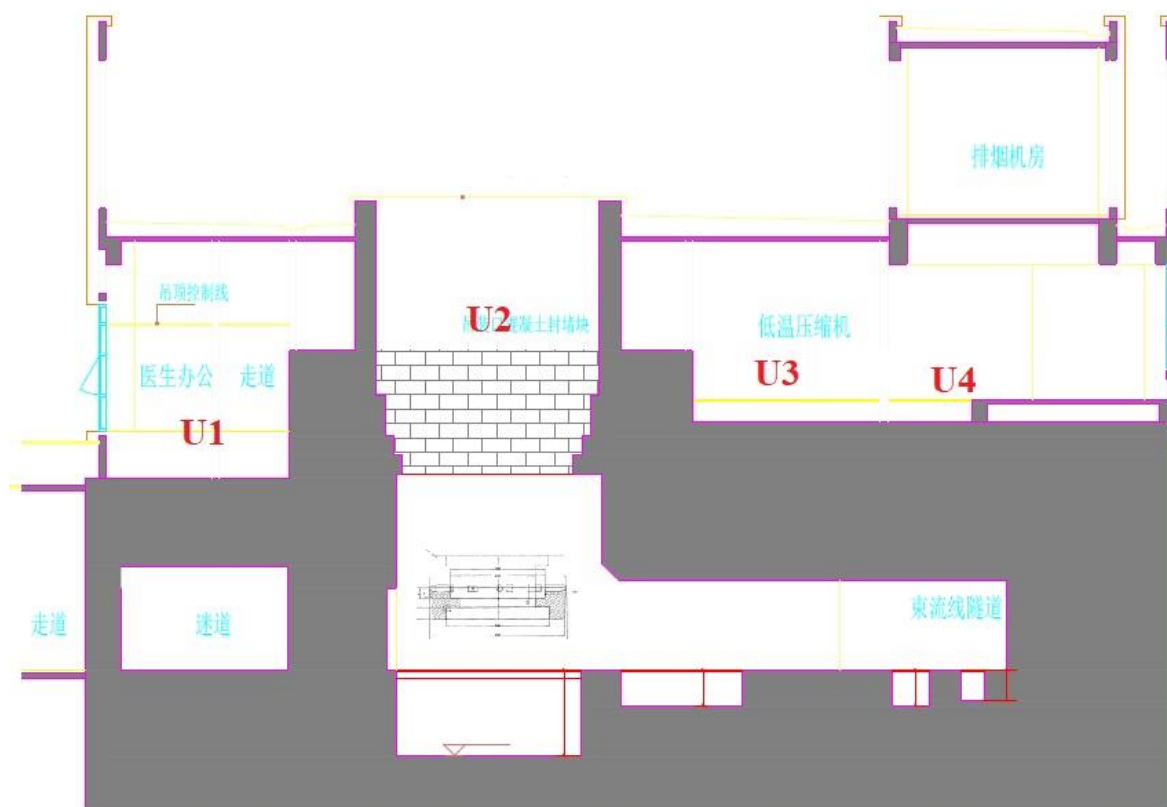


图 4-5 回旋加速器大厅顶板关注点位示意图

各关注点剂量率计算参数和计算结果见表 4-22 错误!未找到引用源。和表

4-23。

表 4-22 回旋加速器大厅顶板处各关注点剂量率计算参数

关注点	束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体有效厚度, cm
U1	回旋加速器 1#	36°	7.1	40cmFe+368cm 混凝土
	回旋加速器 2#	90°	6.2	40cmFe+403cm 混凝土
	回旋加速器 3#	144°	7.1	40cmFe+368cm 混凝土
	回旋加速器 4#	90°	8.1	40cmFe+348cm 混凝土
	降能器	158°	11.3	321cm 混凝土
U2	回旋加速器 1#	90°	7.7	40cmFe +350cm 混凝土
	回旋加速器 2#	90°	7.7	40cmFe +350cm 混凝土
	回旋加速器 3#	90°	7.7	40cmFe +350cm 混凝土
	回旋加速器 4#	90°	7.7	40cmFe +350cm 混凝土
	降能器	135°	10.8	490cm 混凝土
U3	回旋加速器 1#	135°	8.0	40cmFe +370cm 混凝土
	回旋加速器 2#	90°	8.9	40cmFe +338cm 混凝土
	回旋加速器 3#	45°	8.0	40cmFe +370cm 混凝土
	回旋加速器 4#	90°	7.2	40cmFe +428cm 混凝土
	降能器	90°	5.7	450cm 混凝土
	散度准直器	90°	5.7	450cm 混凝土
U4	降能器	90°	8.5	667cm 混凝土
	散度准直器	90°	6.8	538cm 混凝土
	能量狭缝	90°	5.7	450cm 混凝土
U5	回旋加速器 1#	90°	7.9	40cmFe +335cm 混凝土
	回旋加速器 2#	38°	8.8	56cmFe +323cm 混凝土
	回旋加速器 3#	90°	9.8	40cmFe +288cm 混凝土
	回旋加速器 4#	38°	8.8	56cmFe +323 cm 混凝土

表 4-23 回旋加速器大厅顶板关注点剂量率计算结果

关注点	束流损失点位	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
U1	回旋加速器 1#	3.11E+11	3.50E-15	Fe: 160 混凝土: 100	Fe: 314 混凝土: 1048.1	3.08E-07
	回旋加速器 2#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 817.8	4.01E-09
	回旋加速器 3#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 850.7	1.82E-09
	回旋加速器 4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 813.1	2.53E-09
	降能器	5.00E+12	4.17E-16	混凝土: 56.77	820.15	3.13E-08

U2	回旋加速器 1#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 822.5	2.42E-09
	回旋加速器 2#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 822.5	2.42E-09
	回旋加速器 3#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 822.5	2.42E-09
	回旋加速器 4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 822.5	2.42E-09
	降能器	5.00E+12	5.70E-16	60.68	1151.5	4.58E-10
U3	回旋加速器 1#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 869.5	1.06E-09
	回旋加速器 2#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 794.3	2.83E-09
	回旋加速器 3#	3.11E+11	2.50E-15	Fe: 153 混凝土: 97	Fe: 314 混凝土: 869.5	7.22E-07
	回旋加速器 4#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 1005.8	1.51E-10
	降能器	5.00E+12	9.11E-16	76.49	混凝土: 1057.5	5.00E-07
	散度准直器	1.50E+12	5.70E-16	63	混凝土: 1057.5	4.86E-09
U4	降能器	5.00E+12	9.11E-16	76.49	1567.45	2.86E-10
	散度准直器	1.50E+12	5.70E-16	63	1264.3	1.28E-10
	能量狭缝	1.20E+09	5.70E-16	63	1057.5	2.02E-10
U5	回旋加速器 1#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 787.25	4.02E-09
	回旋加速器 2#	3.11E+11	3.50E-15	Fe: 160 混凝土: 100	Fe: 440 混凝土: 759	1.68E-06
	回旋加速器 3#	3.11E+11	5.70E-16	Fe: 139 混凝土: 63	Fe: 314 混凝土: 676.8	1.51E-08
	回旋加速器 4#	3.11E+11	3.50E-15	Fe: 160 混凝土: 100	Fe: 440 混凝土: 759	1.68E-06

4.1.3.1.11 回旋加速器大厅地板

回旋加速器大厅在能量选择系统周围下方设有地沟，地沟深 1m，如图 4-7 所示。除地沟外，其余区域地板为厚度 3m 的混凝土，地沟下方地板为厚度 2m 的混凝土。考虑到回旋加速器大厅内降能器处的束流损失最大，降能器下方设有地沟，因此认为降能器下方地沟处地板外剂量率为整个回旋加速器大厅地板外最高处，如图 4-7 所示。

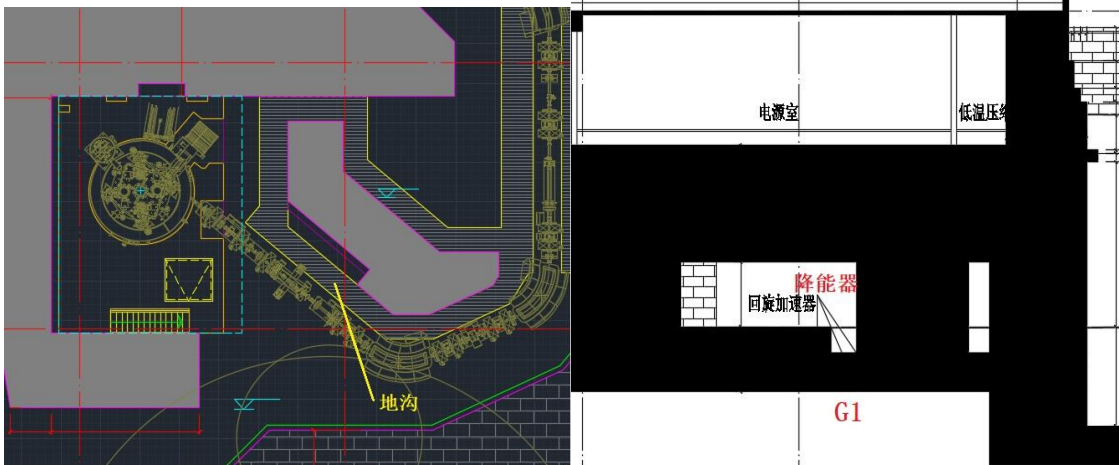


图 4-6 降能器周围地沟位置示意图 图 4-7 降能器下方地板关注点示意图

表 4-24 降能器下方地板关注点计算参数

关注点	束流损失点位	θ	r, m	屏蔽体有效厚度, cm
G1	降能器	56°	4.5	241cm 混凝土
		67°	4.1	217cm 混凝土

表 4-25 降能器下方地板关注点计算结果

关注点	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
G1	$5.00E+12$	$1.33E-15$	94.55	566.35	$2.96E-03$
	$5.00E+12$	$1.14E-15$	84.51	509.95	$2.92E-03$

4.1.3.2 治疗室

本项目质子治疗区域共建设 4 个治疗室，按照其与回旋加速器大厅之间距离的由近至远依次为第一旋转束治疗室、第二旋转束治疗室、第三旋转束治疗室以及输运线隧道末端的固定束实验室。

4.1.3.2.1 第一旋转束治疗室

根据工作人员或公众的可达区域及各区域的用途，在第一旋转束治疗室周围设置的关注点如图 4-8 和图 4-9 所示，各关注点及其设计的剂量率限值见下表 4-26。

表 4-26 第一旋转束治疗室周围各关注点及其剂量率限值

关注区域	区域描述	设计的剂量率限值	
关注点 10	第一旋转束治疗室的迷道口	2.5 μ Sv/h	
关注点 11	体模间	2.5 μ Sv/h	
关注点 12	第二旋转束治疗室的控制室	2.5 μ Sv/h	
关注点 13	第二旋转束治疗室的通道	10 μ Sv/h	
关注点 14	第二旋转束治疗室的机架区	10 μ Sv/h	
关注点 15	第二旋转束治疗室的机架区	10 μ Sv/h	
关注点 16	第一旋转束治疗室的工作区	2.5 μ Sv/h	
关注点 17	第一旋转束治疗室的机架区	10 μ Sv/h	
顶板	U6	第一旋转束治疗室屋顶, 空地	2.5 μ Sv/h
	U7	回旋加速器上方屋顶, 空地	2.5 μ Sv/h
	U8	第二旋转束治疗室屋顶, 空地	2.5 μ Sv/h
	U9	走廊	2.5 μ Sv/h
	U10	服务器室	10 μ Sv/h
地板	土壤	5mSv/h	

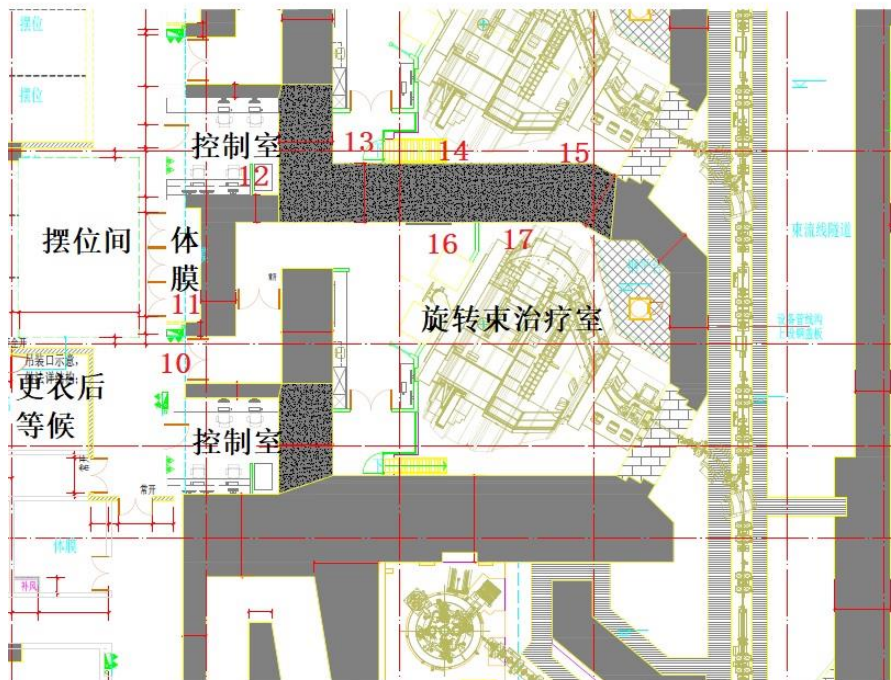


图 4-8 第一旋转束治疗室周围关注点

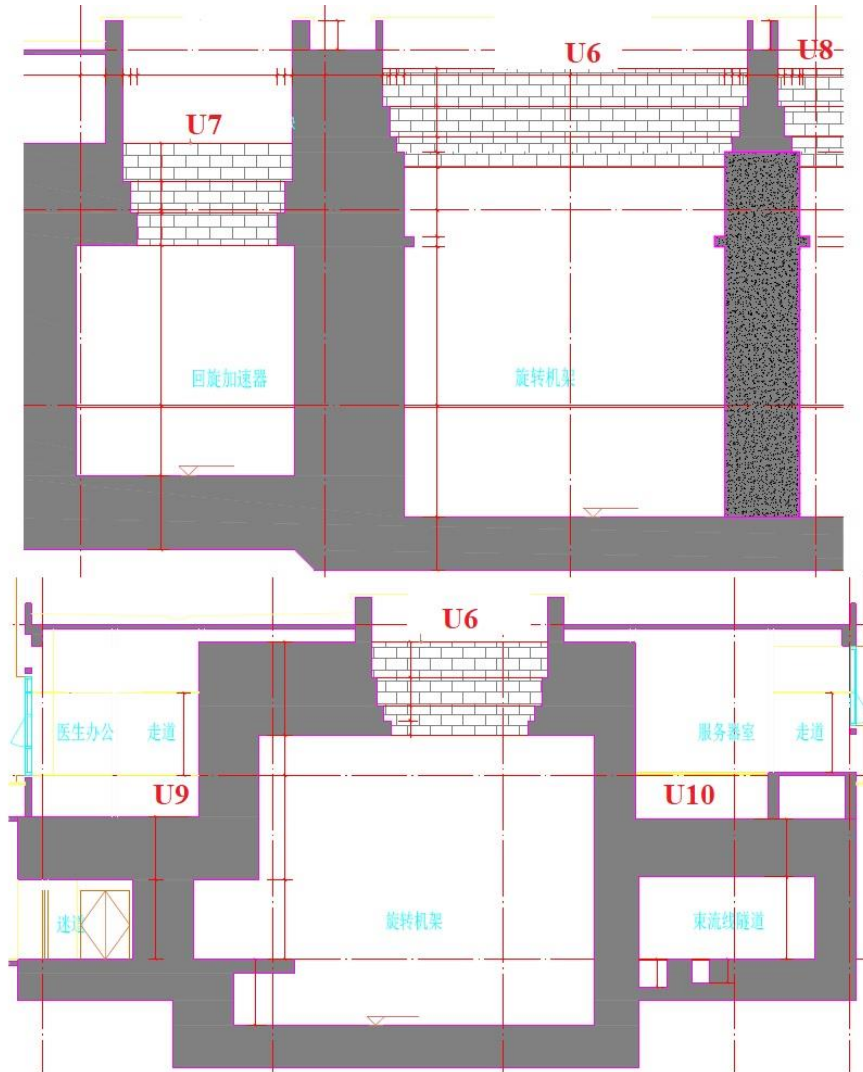


图 4-9 第一旋转束治疗室顶板周围关注点位示意图

第一旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算参数和计算结果见表 4-27 和表 4-28。

表 4-27 第一旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算参数

关注点	束流损失点	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
关注点 10	第一旋转束治疗室	49°	13.1	224cm 混凝土
		58°	12.9	220cm 混凝土
	第二旋转治疗室	0°	19.9	327cm 重混凝土
关注点 11	第一旋转束治疗室	60°	12.2	370cm 混凝土
		80°	13.0	160cm 混凝土
关注点 12	第一旋转束治疗室	87°	10.5	224cm 重混凝土

		87°	12.6	270cm 混凝土	
	第二旋转束治疗室	20°	11.5	305cm 重混凝土	
		30°	10.1	268cm 重混凝土	
		40°	9.4	177cm 重混凝土+71cm 混凝土	
关注点 13	第一旋转束治疗室	49°	8.9	270cm 重混凝土	
		60°	8.1	299cm 重混凝土	
关注点 14	第一旋转束治疗室	30°	7.0	255cm 重混凝土	
关注点 15	第一旋转束治疗室	0°	8.0	294cm 重混凝土	
		15°	7.2	264cm 重混凝土	
关注点 16	第二旋转束治疗室	0°	9.9	294cm 重混凝土	
		27°	8.6	255cm 重混凝土	
关注点 17	第二旋转束治疗室	30°	8.5	255cm 重混凝土	
顶板	U6	第一旋转束治疗室	0°	10.3	340cm 混凝土
	U7	第一旋转束治疗室	0°	12.3	495cm 混凝土
	U8	第一旋转束治疗室	0°	12.5	412cm 混凝土
	U9	第一旋转束治疗室	44°	9.1	229cm 混凝土
		第一旋转束治疗室	60°	8.7	220cm 混凝土
U10	第一旋转束治疗室	32°	9.5	180cm 混凝土	
地板	第一旋转束治疗室	0°	2.75	150cm 混凝土	

表 4-28 第一旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算结果

关注点位置	S_p , s^{-1}	$H(\theta)$, $Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta)$, g/cm^2	$d(\theta)$, g/cm^2	D_p , Sv/h
关注点 10	1.88E+10	9.47E-16	80	526.4	5.17E-07
	1.88E+10	9.47E-16	75	517	3.90E-07
	1.88E+10	1.75E-15	126.84	1144.5	3.60E-08
关注点 11	1.88E+10	7.61E-16	75	869.5	3.18E-09
	1.88E+10	5.89E-16	59	376	4.02E-07
关注点 12	1.88E+10	5.89E-16	97.03	784	1.12E-07
	1.88E+10	5.89E-16	52	634.5	1.26E-09
	1.88E+10	1.43E-15	123.19	1067.5	1.26E-07
	1.88E+10	1.43E-15	123.19	938	4.67E-07
	1.88E+10	1.13E-15	重混凝土: 117.83 混凝土: 83	重混凝土: 619.5 混凝土: 166.85	6.02E-07
关注点 13	1.88E+10	9.47E-16	111.01	945	1.62E-07
	1.88E+10	7.61E-16	103.84	1046.5	3.29E-08
关注点 14	1.88E+10	1.43E-15	123.19	892.5	1.41E-06
关注点 15	1.88E+10	1.75E-15	126.84	1029	5.53E-07
	1.88E+10	1.75E-15	126.84	924	1.56E-06
关注点 16	1.88E+10	1.75E-15	126.84	1029	3.61E-07

	1.88E+10	1.43E-15	123.19	892.5	9.32E-07
关注点 17	1.88E+10	1.43E-15	123.19	892.5	9.54E-07
U6	1.88E+10	1.75E-15	95	799	2.48E-07
U7	1.88E+10	1.75E-15	95	1163.25	3.76E-09
U8	1.88E+10	1.75E-15	95	968.2	2.83E-08
U9	1.88E+10	1.13E-15	80	538.15	1.10E-06
	1.88E+10	9.47E-16	75	517	8.57E-07
U10	1.88E+10	1.13E-15	83	423	5.17E-06
地板	1.88E+10	1.75E-15	95	352.5	3.82E-04

4.1.3.2.2 第三旋转束治疗室

根据工作人员或公众的可达区域及各区域的用途，在第三旋转束治疗室周围设置的关注点如图 4-10 所示，各关注点及其设计的剂量率限值见下表 4-29。

表 4-29 第一旋转束治疗室各关注点的距离因子及其设计的剂量率限值

关注点	区域描述	设计的剂量率限值
关注点 18	走廊	2.5 μ Sv/h
关注点 19	走廊	2.5 μ Sv/h
关注点 20	固定束实验室的迷道	10 μ Sv/h
关注点 21	固定束实验室的工作区	2.5 μ Sv/h
关注点 22	固定束实验室的设备区	10 μ Sv/h
关注点 23	电源间	10 μ Sv/h

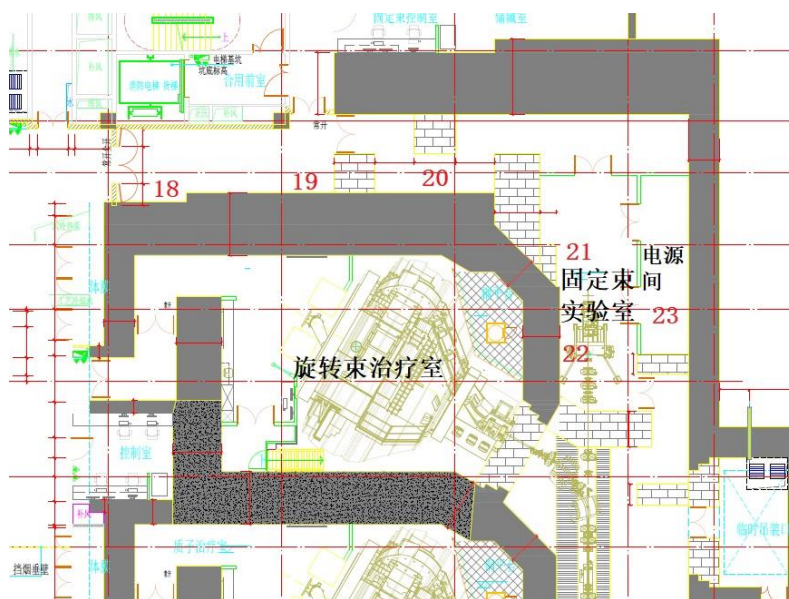


图 4-10 第三旋转束治疗室周围关注点位示意图

第三旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算参数和计算结果见表 4-30 和表 4-31。

表 4-30 第三旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算参数

关注点位置		θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
关注点 18		78°	10.8	400cm 混凝土
关注点 19		37°	7.5	303cm 混凝土
关注点 20		0°	8.5	343cm 混凝土
		23°	7.4	302cm 混凝土
关注点 21		32°	10.1	260cm 混凝土
		45°	10.2	197cm 混凝土
关注点 22	旋转束治疗室	60°	9.8	180cm 混凝土
	束流输运线	56°	3.5	204cm 混凝土
关注点 23		60°	13.6	180cm 混凝土

表 4-31 第三旋转束治疗室周围各关注点剂量率计算结果

关注点位置	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
关注点 18	1.88E+10	5.89E-16	59	940	4.10E-11
关注点 19	1.88E+10	1.13E-15	83	712.05	2.55E-07
关注点 20	1.88E+10	1.75E-15	95	806.05	3.38E-07
	1.88E+10	1.43E-15	92	709.7	7.87E-07
关注点 21	1.88E+10	1.13E-15	83	611	4.75E-07

		1.88E+10	1.13E-15	80	462.95	2.25E-06
关注点 22	旋转束治疗室	1.88E+10	9.47E-16	75	423	2.36E-06
	束流运输线	5.63E+08	1.80E-15	91	480	1.53E-06
	总计	——	——	——	——	3.89E-06
关注点 23		1.88E+10	9.47E-16	75	423	1.23E-06

4.1.3.2.3 固定束实验室

根据工作人员或公众的可达区域及各区域的用途，在固定束实验室周围设置的关注点如图 4-11 和图 4-12 所示，各关注点及其设计的剂量率限值见下表 4-32。

表 4-32 固定束实验室各关注点的距离因子及其设计的剂量率限值

关注区域	区域描述	设计的剂量率限值
关注点 24	第三旋转束治疗室的工作区	2.5 μ Sv/h
关注点 25	储藏室	2.5 μ Sv/h
关注点 26	固定束实验室的控制室	2.5 μ Sv/h
关注点 27	固定束实验室迷道入口	2.5 μ Sv/h
U11	纯水机房	2.5 μ Sv/h
U12	走道	2.5 μ Sv/h
U13	服务器室	10 μ Sv/h
U14	电源室	2.5 μ Sv/h
U15	走道	2.5 μ Sv/h
地板	土壤	5mSv/h

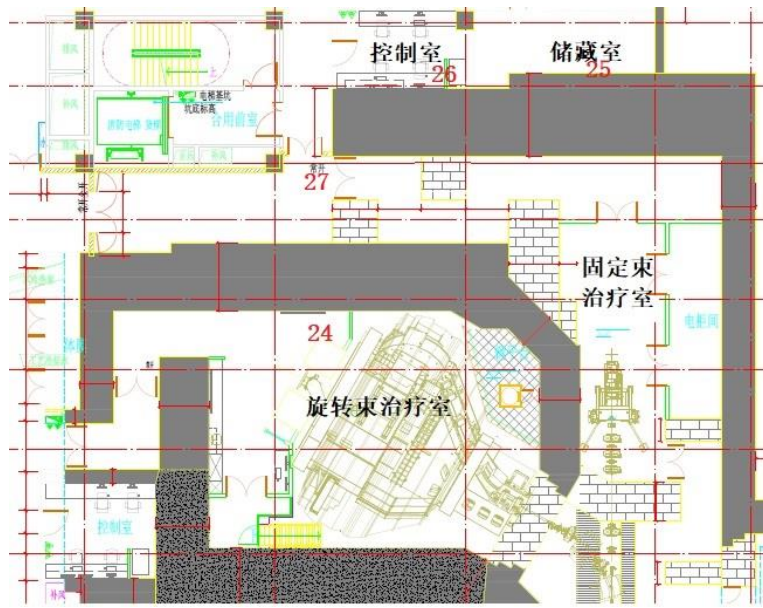


图 4-11 固定束实验室周围关注点位示意图

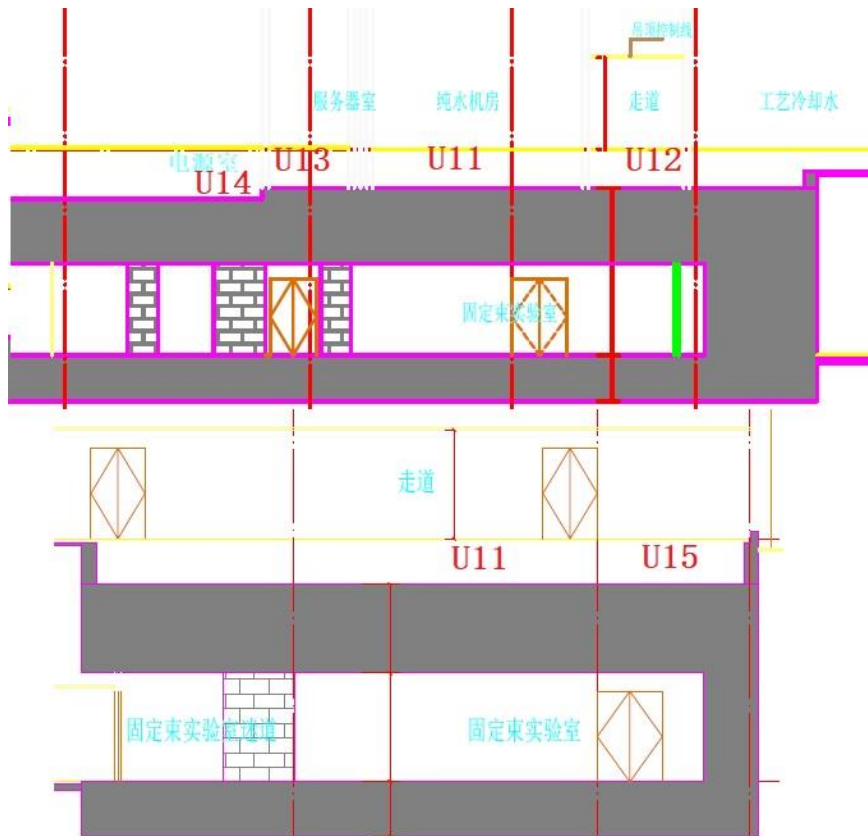


图 4-12 固定束实验室顶板关注点

固定束实验室周围各关注点剂量率计算参数和计算结果见表 4-33 和表 4-34。

表 4-33 固定束实验室周围各关注点剂量率计算参数

关注点位置		θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
关注点 24		80°	11.7	279cm 混凝土
		90°	11.7	206cm 混凝土
关注点 25		0°	12.3	365cm 混凝土
关注点 26		28°	13.3	620cm 混凝土
关注点 27		55°	15.1	665cm 混凝土
顶板	U11	90°	4.1	245cm 混凝土
	U12	40°	6.5	382cm 混凝土
		27°	9.0	531cm 混凝土
	U13	124°	5.1	298cm 混凝土
	U14	146°	6.8	376cm 混凝土
U15	90°	5.5	325cm 混凝土	
地板		20°	7.7	420cm 混凝土
		45°	3.8	210cm 混凝土
		60°	3.2	172cm 混凝土
		75°	2.8	155cm 混凝土
		90°	2.75	150cm 混凝土

表 4-34 固定束实验室周围各关注点剂量率计算结果

关注点位置	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
关注点 24	1.88E+10	5.89E-16	59	655.65	4.33E-09
关注点 25	1.88E+10	5.89E-16	52	484.1	2.63E-08
关注点 26	1.88E+10	1.75E-15	95	857.75	9.36E-08
	1.88E+10	1.43E-15	92	1457	7.23E-11
关注点 27	1.88E+10	9.47E-16	75	1562.75	2.50E-13
U11	1.88E+10	5.89E-16	52	575.75	3.68E-08
U12	1.88E+10	1.13E-15	83	897.7	3.63E-08
	1.88E+10	1.43E-15	92	1247.85	1.53E-09
U13	1.88E+10	2.54E-16	52	700.3	9.34E-10
U14	1.88E+10	1.94E-16	52	883.6	1.18E-11
U15	1.88E+10	5.89E-16	52	763.75	5.50E-10
地板	1.88E+10	1.43E-15	93	987	4.00E-08
	1.88E+10	1.13E-15	80	493.5	1.11E-05
	1.88E+10	9.47E-16	75	404.2	2.85E-05
	1.88E+10	7.61E-16	59	364.25	1.37E-05
	1.88E+10	5.89E-16	52	352.5	5.98E-06

4.1.3.3 束流输运线隧道

束流输运线隧道内主要的束流损失点集中在束流输运线上，束流损失的方式为沿程均匀损失，总束流损失量为 0.09nA ，可视为线损失源。为简化计算过程，保守将 0.09nA 的束流损失全部集中到某一点上，作为点源进行计算。根据输运线隧道周围环境分布情况，对其周围设置的关注点如图 4-13 和图 4-14 所示。这些关注点及其设计的剂量率限值见下表 4-35。



图 4-13 束流输运线隧道周围关注点

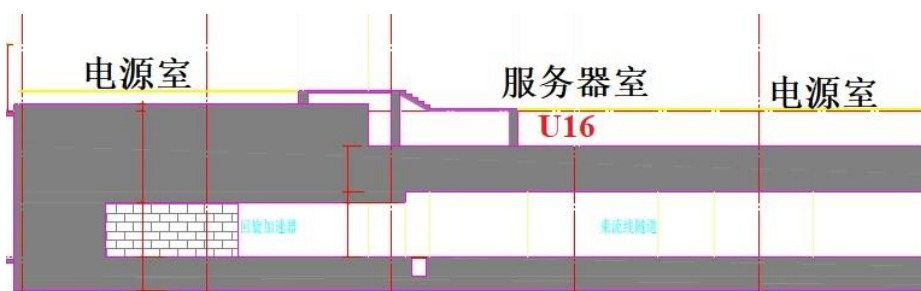


图 4-14 束流输运线顶板关注点

表 4-35 束流输运线隧道周围关注点及其剂量率限值

关注区域	区域描述	设计的剂量率限值
关注点 28	旋转束治疗室的机架区	$10\mu\text{Sv/h}$
关注点 29 (22)	固定束实验室内设备区	$10\mu\text{Sv/h}$
关注点 U16	服务器室	$10\mu\text{Sv/h}$

地板	土壤	5mSv/h
----	----	--------

束流输运线隧道周围各关注点剂量率计算参数和计算结果见表 4-36 和表 4-37。

表 4-36 束流输运线隧道周围各关注点剂量率计算参数

关注点	束流损失点	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
关注点 28	束流输运线	33°	4.1	190cm 混凝土
关注点 29	束流输运线	80°	3.0	173cm 混凝土
	束流输运线	56°	3.5	204cm 混凝土
关注点 U16	束流输运线	90°	3.8	210cm 混凝土
地板	束流输运线	90°	2.75	150cm 混凝土

表 4-37 束流输运线隧道周围各关注点剂量率计算结果

关注点位置	S_p, s^{-1}	$H(\theta), Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta), g/cm^2$	$d(\theta), g/cm^2$	$D_p, Sv/h$
关注点 28	5.63E+08	3.50E-15	100	446.5	4.85E-06
关注点 29	5.63E+08	5.89E-16	59	406.55	1.35E-07
	5.63E+08	1.80E-15	91	480	1.53E-06
关注点 U16	5.63E+08	5.70E-16	63	493.5	3.17E-08
地板	5.63E+08	5.70E-16	63	352.5	5.67E-07

4.1.3.4 各区域屏蔽体外剂量率计算结果汇总

根据前面各节的计算结果，将质子治疗区各区域屏蔽体外剂量率计算结果汇总如表 4-38 所示。

表 4-38 质子治疗区各区域屏蔽体外剂量率计算结果汇总

编号	区域描述	剂量率计算结果, Sv/h	剂量率限值, $\mu Sv/h$
关注点 1	走廊	3.81E-02	2.5
关注点 2	走廊	1.26E+00	2.5
关注点 3	机械电子工作室	9.70E-01	2.5
关注点 4	第一旋转束治疗室的通道	3.76E+00	10
关注点 5	第一旋转束治疗室的机架区	4.86E+00	10
关注点 6	第一旋转束治疗室的工作区	2.36E+00	2.5

关注点 7	第一旋转束治疗室的控制室	6.02E-01	2.5
关注点 8	走廊	1.91E+00	2.5
关注点 9	主控室	2.31E-01	2.5
关注点 10	第一旋转束治疗室的迷道口	5.17E-01	2.5
关注点 11	体模间	4.02E-01	2.5
关注点 12	第二旋转束治疗室的控制室	6.02E-01	2.5
关注点 13	第二旋转束治疗室的通道	1.62E-01	10
关注点 14	第二旋转束治疗室的机架区	1.41E+00	10
关注点 15	第二旋转束治疗室的机架区	1.56E+00	10
关注点 16	第一旋转束治疗室的工作区	9.32E-01	2.5
关注点 17	第一旋转束治疗室的机架区	9.54E-01	10
关注点 18	走廊	4.10E-05	2.5
关注点 19	走廊	2.55E-01	2.5
关注点 20	固定束实验室的迷道	7.87E-01	10
关注点 21	固定束实验室的工作区	2.25E+00	2.5
关注点 22	固定束实验室的设备区	3.89E+00	10
关注点 23	电源间	1.23E+00	10
关注点 24	第三旋转束治疗室的工作区	4.33E-03	10
关注点 25	储藏室	2.63E-02	2.5
关注点 26	固定束实验室的控制室	9.36E-02	2.5
关注点 27	固定束实验室迷道入口	2.50E-07	10
关注点 28	旋转束治疗室的机架区	4.85E+00	10
关注点 29 (22)	固定束实验室内设备区	1.53E+00	10
U1	回旋加速器上方, 空地	3.08E-01	2.5
U2	迷道上方, 医生办公室	2.42E-03	2.5
U3	能量选择系统上方, 低温压缩机房	7.22E-01	2.5
U4	走道	2.86E-04	2.5
U5	会议、接待室	1.68E+00	2.5
U6	第一旋转束治疗室屋顶, 空地	2.48E-01	2.5
U7	回旋加速器上方屋顶, 空地	3.76E-03	2.5
U8	第二旋转束治疗室屋顶, 空地	2.83E-02	2.5
U9	走廊	1.10E+00	2.5
U10	服务器室	5.17E+00	10

U11	纯水机房	3.68E-02	2.5
U12	走道	3.63E-02	2.5
U13	服务器室	9.34E-04	10
U14	电源室	1.18E-05	2.5
U15	走道	5.50E-04	2.5
U16	服务器室	3.17E-02	10

由上表可知，质子治疗区各关注区域屏蔽体外剂量率均低于其设计的剂量率限值。

4.1.4 迷道的设计

为工作人员出入辐射区，在回旋加速器大厅、高能输运线隧道以及各治疗室终端均设计了迷道。此外，出于消防安全的考虑，在输运线隧道东侧设计一处迷道，共 7 处迷道。各区域迷道平面图见图 4-15~图 4-18。其中，每个治疗室的迷道门均含有 6cm 的聚乙烯，回旋加速器大厅和束流输运线隧道的迷道门均为普通门。

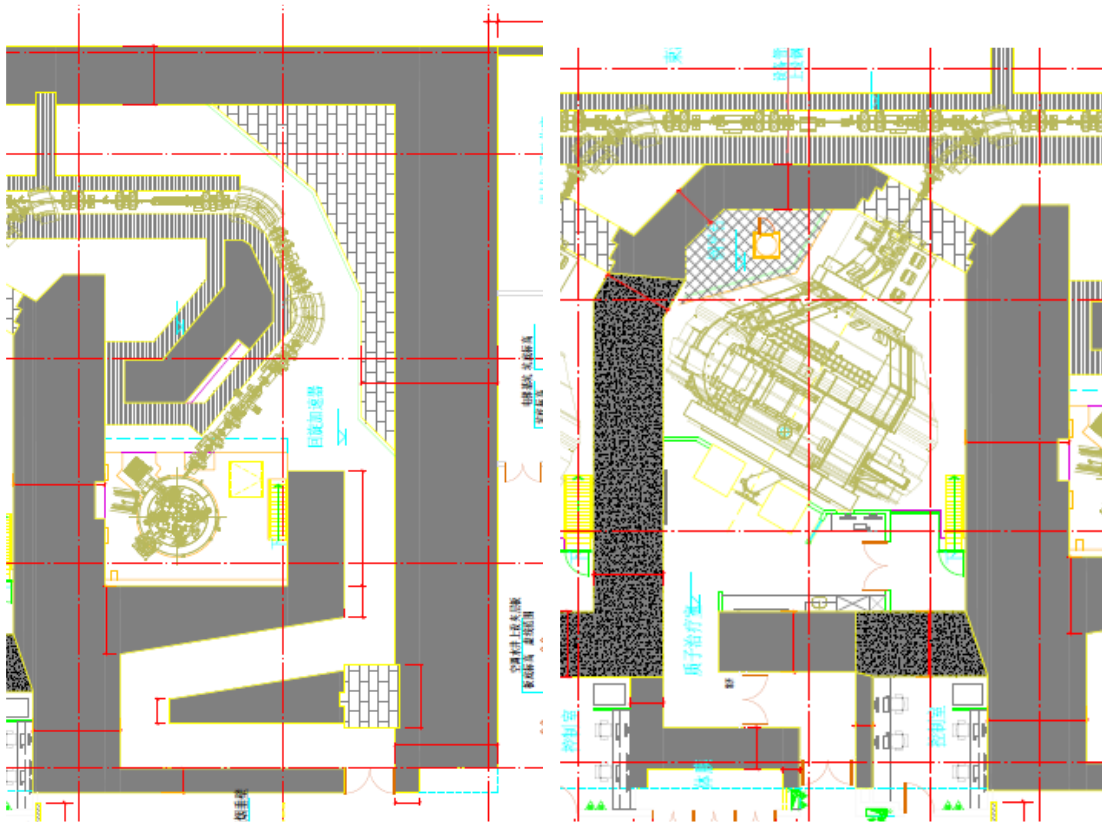


图 4-15 回旋加速器大厅迷道示意图

图 4-16 旋转束治疗室迷道示意图

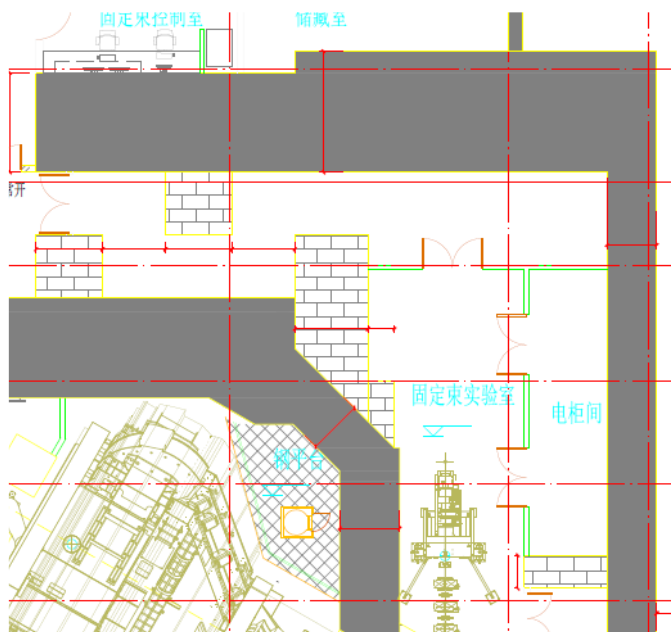


图 4-17 固定束实验室迷道示意图

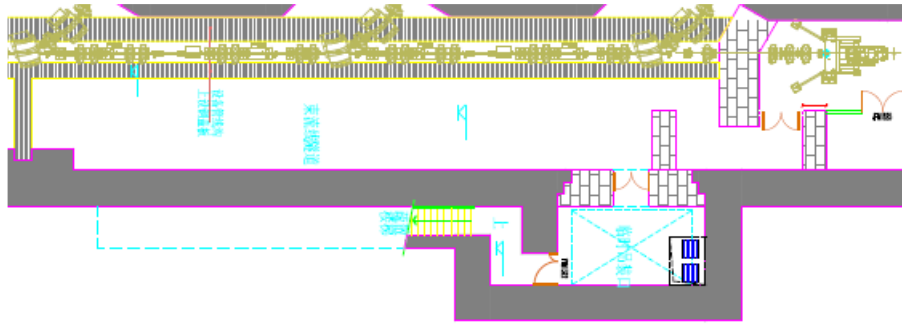


图 4-18 输运线隧道迷道示意图

4.1.4.1 计算方法

迷道内剂量衰减采用 NCRP NO.144 报告中建议的经验公式，具体如下：

(1) 初次弯折

对于初次弯折（射线从散射源点开始的第一段），计算公式如下：

$$H(r) = 2H_0 \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \quad (4-5)$$

式中，

r_0 为从辐射源到迷道口的距离，m；

r_1 从辐射源到第一弯折（leg）的距离，m；

$H_0(r_0)$ 为迷道口处的剂量率，Sv/h。

(2) 其他弯折段

射线接下来的其他各个弯折段计算公式如下：

$$H(r_i) = \left(\frac{e^{-r_i/0.45} + 0.022A_i^{1.3} e^{-r_i/2.35}}{1 + 0.022A_i^{1.3}} \right) H_{oi} \quad (4-6)$$

式中，

A_i 为迷道口或者迷道内有效面积，单位， m^2 ；

H_{oi} 为进入第 i 条迷道中心线在迷道入口处的当量剂量，Sv/h；

r_i 为第 i 条迷道中心线长度, 单位, m。

4.1.4.2 计算结果

4.1.4.2.1 回旋加速器大厅

回旋加速器大厅迷道的计算参数和计算结果见表 4-39。

表 4-39 回旋加速器大厅迷道计算结果

迷道位置	迷道口处	第一弯折			第二弯折			第三弯折			
	H_0 , $\mu\text{Sv/h}$	r_0 , m	r_1 , m	H_1 , $\mu\text{Sv/h}$	A_2 , m^2	r_2 , m	H_2 , $\mu\text{Sv/h}$	A_3 , m^2	r_3 , m	H_3 , $\mu\text{Sv/h}$	
回旋加速器大厅	8.21E+05	5.7	7.5	9.48E+05	9.3	11.4	2.11E+03	5.5	4.9	4.41E+01	
								第四弯折			
								A_3 , m^2	r_3 , m	H_3 , $\mu\text{Sv/h}$	
							18.5	11.3	1.78E-01		

4.1.4.2.2 高能输运线隧道

高能输运线隧道迷道的计算参数和计算结果见表 4-40。

表 4-40 高能输运线隧道迷道计算参数和计算结果

迷道位置	迷道口处	第一弯折			第二弯折			
	H_0 , $\mu\text{Sv/h}$	r_0 , m	r_1 , m	H_1 , $\mu\text{Sv/h}$	A_2 , m^2	r_2 , m	H_2 , $\mu\text{Sv/h}$	
输运线隧道末端	3.99E+02	1.7	1.3	1.37E+03	3	3.5	2.64E+01	
					第三弯折			
					A_3 , m^2	r_3 , m	H_3 , $\mu\text{Sv/h}$	
				4.15	1.5	2.54E+00		
输运线隧道东侧	迷道口处	第一弯折			第二弯折			
	H_0 , $\mu\text{Sv/h}$	r_0 , m	r_1 , m	H_0 , $\mu\text{Sv/h}$	r_0 , m	r_1 , m	H_0 , $\mu\text{Sv/h}$	

	8.43E+00	11.7	14.1	1.16E+01	4.98	2.93	3.99E-01
--	----------	------	------	----------	------	------	----------

4.1.4.2.3 固定束实验室

固定束实验室迷道的计算参数和计算结果见表 4-41。

表 4-41 固定束实验室迷道的计算参数和计算结果

迷道位置	迷道口处	第一弯折			第二弯折			第三弯折		
	H ₀ , μSv/h	r ₀ , m	r ₁ , m	H ₁ , μSv/h	A ₂ , m ²	r ₂ , m	H ₂ , μSv/h	A ₃ , m ²	r ₃ , m	H ₃ , μSv/h
固定束实验室	8.15E+03	2.8	6.1	3.44E+03	22.5	2.8	5.85E+02	14	2.1	1.00E+02
								第四弯折		
								A ₃ , m ²	r ₃ , m	H ₃ , μSv/h
								4.75	2.3	5.89E+00
固定束实验室迷道门含有厚度 6cm 的聚乙烯, 因此, 可推算得出迷道门外剂量率约为 1.15E+00μSv/h。										

4.1.4.2.4 旋转束治疗室

旋转束治疗室迷道的计算参数和计算结果见表 4-42。

表 4-42 旋转束治疗室迷道计算参数和计算结果

迷道位置	迷道口处	第一弯折			第二弯折			第三弯折		
	H ₀ , μSv/h	r ₀ , m	r ₁ , m	H ₁ , μSv/h	A ₂ , m ²	r ₂ , m	H ₂ , μSv/h	A ₃ , m ²	r ₃ , m	H ₃ , μSv/h
固定束实验室	8.35E+02	6.9	8.8	1.03E+03	9.28	5.1	2.72E+01	12	2	4.35E+00
旋转束治疗室迷道门含有厚度 6cm 的聚乙烯, 因此, 可推算得出迷道门外剂量率约为 1.04E+00μSv/h。										

4.1.4.2.5 小结

各区域迷道入口处的剂量率为透射剂量率和散射剂量率之和，根据前面章节对迷道口透射辐射剂量率计算结果，汇总得出迷道口总剂量率，见表 4-43。由此可知，各区域迷道入口处的剂量率均低于其设计的剂量率限值。

表 4-43 各区域迷道口剂量率计算结果

迷道位置	透射辐射剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	散射辐射剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	总剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率限值, $\mu\text{Sv/h}$
回旋加速器大厅	3.74E-07	1.78E-01	1.78E-01	2.5
高能输运线隧道	1.35E-01	2.54E+00	2.68E+00	10
固定束实验室	2.50E-07	1.15E+00	1.15E+00	2.5
旋转束治疗室	5.17E-07	1.04E+00	1.04E+00	2.5

4.2 人身安全联锁系统

4.2.1 设计准则

质子治疗系统人身安全联锁系统的设计准则如下：

- (1) 简单可靠：系统设计要力求在简洁的基础上保证运行可靠性及稳定性。
- (2) 最优切断：当加速器处于“准备”或“运行”状态时，人身安全联锁系统在加速器中央控制系统联锁逻辑中具有最优先的权力切断加速器的束流。
- (3) 失效保护：当人身安全联锁系统关键设备失效时，系统有相应的应急保护措施来保障工作人员的人身安全。
- (4) 冗余：系统关键设备要采取冗余设计，以保障系统的可靠性、减少系统故障时间并预留有进一步改进的余地。
- (5) 纵深防护：在设计系统时要充分考虑并合理安排辐射安全设施设备的联锁逻辑，实现对工作人员人身安全的交叉纵深防护。

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

(7) 以人为本：人身安全联锁系统是在保障工作人员人身安全的基础上兼顾加速器的运行安全，此外系统要具备人性化的特点

4.2.2 控制区划分

根据质子治疗系统治疗模式的不同，同时也便于系统的运行维护和管理，将控制区划分为回旋加速器控制区、第一旋转束治疗室控制区、第二旋转束治疗室控制区、第三旋转束治疗室控制区、固定束实验室控制区，如图 4-19 和表 4-44 所示。

表 4-44 辐射工作场所控制区划分

控制区	联锁区	联锁门
回旋加速器控制区	回旋加速器区	加速器大厅迷道口联锁门
	输运线隧道区	输运线隧道末端连锁门
第一旋转束治疗室	治疗室区域	第一旋转束治疗室连锁门
第二旋转束治疗室	治疗室区域	第二旋转束治疗室连锁门
第三旋转束治疗室	治疗室区域	第三旋转束治疗室连锁门
固定束实验室	治疗室区域	固定束实验室联锁门

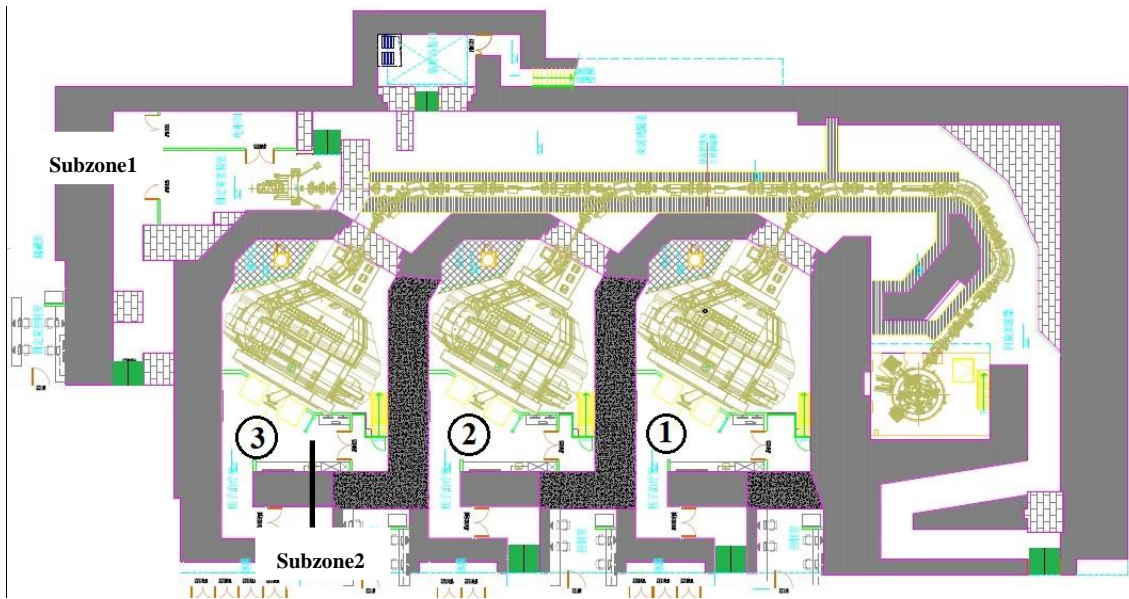


图 4-19 辐射工作场所控制区及联锁门位置示意图

4.2.3 系统组成

人身安全联锁系统主要由 PLC、急停开关、清场按钮、声光报警器、钥匙箱和门禁设备以及加速器束流控制关键设备等组成。PLC 可以收到各个联锁装置的状态情况，并通过现场总线和主控 PLC 进行通信，得知哪些主要设备在工作，哪些治疗室有束流供给，一旦出现与安全逻辑相冲突的事件，安全 PLC 就触发一系列保护动作包括停止束流和发出警报

4.2.3.1 PLC

PLC 是人身安全联锁系统的核心控制系统，能够完成联锁门、急停开关、清场按钮、联锁钥匙等信号的回收，根据预先编程定义好的安全策略执行相应的动作，可以通过控制加速器束流控制关键设备，允许或切断束流的供应。也可以给主控系统提供信号，进行控制层的通信。PLC 还可与中央监控终端通讯，将自己的数据通过现场总线或串行总线发送给监控终端计算机。

4.2.3.2 联锁钥匙和门禁卡

4.2.3.2.1 联锁钥匙

对于回旋加速器大厅和束流输运线区域，采用联锁钥匙的方式加速器运行和人员进出，联锁钥匙分为两类：

(1) 在加速器控制台上使用，以便在加速器停机时锁定控制装置，避免未授权的开机运行。只有当该钥匙插入在加速器控制台上的规定位置，安全系统才能允许加速器开机。

(2) 在回旋加速器大厅、束流输运线末端门的附近设有钥匙面板，如图 4-22 所示，面板上根据实际使用需求设若干钥匙。若进入某控制区内，必须使用相应面板上的一枚钥匙才能打开防护门。且只有当所有的钥匙都插在面板上，且其他联锁条件也满足时，才能允许开机或该区域的束流输送。其中任何一把钥匙没有归位，则不允许给该区域提供束流，同时在操作员界面上显示出此处钥匙的使用情况。钥匙授权给有权限的人员使用，这些人员用身份识别卡方可获取钥匙。

4.2.3.2.2 门禁卡

对于治疗室的出入控制，采用门禁卡的形式，以便治疗相关人员的出入。一间治疗室根据工作需要设若干门禁卡，平时由专人统一保管，仅授权给有权限的人员使用。

4.2.3.2.3 紧急出门按钮

回旋加速器大厅和各治疗室的入口门内设有紧急出门按钮。

4.2.3.3 门限位开关

控制区内所有的人员进出的大门处，均设有门限位开关。开关也采用冗余设计，设两个位置开关。只有当两个位置开关全部到位，才能确认门的位置。门位置信息通过 PLC 送入中央监控室计算机中，并在操作员界面显示。一旦其中一个门的位置开关不到位，则会启动安全联锁系统，切断装置出束。

4.2.3.4 急停按钮

在回旋加速器的控制室和所有控制区内安装急停按钮。加速器控制室内的急停按钮安装在控制台上。回旋加速器大厅和各治疗室的急停按钮安装在 1.5m 高度处，按钮上有灯光显示，设在各区域防护门处以及沿程人员容易到达的位置，其安装点位如图 4-22 所示。

回旋加速器大厅内急停按钮被按下时，将首先停止加速器的高频系统，然后关闭离子源引出的高压电源。治疗室的急停按钮控制各治疗室传输线的束流阻断靶。同时将信号传送给 PLC，PLC 进而切断其他束流控制设备，并将该区域的防护门打开，使人员能够及时推出该区域。

急停按钮有明确的操纵位置和可动复位功能，在未经手动复位时，在其他地方无法复位此处被按下的按钮，也无法在控制室内复位。只有当引发急停事件的按钮被复位后，才有可能使加速器重新运行。

4.2.3.5 清场搜索按钮

清场搜索按钮安装在各控制区内部四周沿途一定距离、一定高度的墙壁上，安装点位如图 4-22。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。

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。每个子区的出、入口设有红外感应器。若该区域搜索完成后，探测到再有人进入，则清场无效，需重新进行清场。

加速器区和治疗室区的清场搜索的具体流程如下：

(1) 加速器每次停机后重新开机前，由专门的辐射防护人员对加速器区（包括回旋加速器大厅和束流输运线隧道）进行清场；开始治疗前，由在场负责的医生对执行治疗任务的治疗室进行清场搜索。

(2) 清场人员需要从最深处区域开始搜索，沿途通知人员离场，按一定的搜索顺序逐个按下清场按钮，并关闭所有区域的门，若违反规定清场顺序则系统认为此次清场无效，需重新清场。

对于加速器区域，每个子区域和整个大区域都有搜索时间窗口限制。每个治疗区域也有搜索时间窗口限制。搜索超时则认为该次搜索无效，需重新清场搜索。

(3) 所有清场按钮被按下后联锁系统将自动开启警铃警灯；

(4) 对于加速器大厅，清场人员确认所有清场按钮全部按下后，将主控钥匙插回主控室的控制台上，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。对于治疗室，清场人员确认治疗室内无人停留，且所有清场按钮全部按下，回到其控制室内通过其治疗系统给加速器控制系统内发送允许开机的信号。

4.2.3.6 声光报警装置

回旋加速大厅、输运线隧道入口和内部四周沿途一定距离处以及各治疗室入口处，安装有声光报警指示灯，如图 4-20 所示。



图 4-20 声光报警装置

治疗室内信号灯的颜色定义：

绿灯亮：辐射保护区内未出束（可进入）；

黄灯亮：辐射保护区内“安全”（治疗室已搜索完毕，且除病人外无人停留在该区域）；

黄灯+绿灯亮：急停开关被按下。

走廊区信号灯的颜色定义

红灯亮：准备出束或治疗室内正在出束。

加速器区信号灯的颜色定义：

绿灯亮：辐射保护区内未出束（可进入）；

红灯亮：辐射保护区内“安全”（服务区已搜索完毕，且无人停留在该区域，准备出束）；

绿灯+红灯亮：急停开关被按下。

主控室内信号灯的颜色定义：

蓝灯亮：准备出束或正在出束。

4.2.3.7 状态指示灯

在回旋加速器大厅内醒目的地方安装“磁场”和“高频”指示灯，在回旋加速器大厅和各治疗室入口门处安装能显示厅内不同工作状态的指示灯。

4.2.3.8 状态监控

状态监控包括 LED 显示屏和摄像头。LED 显示屏设在加速器控制室和各治疗室的控制室内，以确保工作人员掌握安全联锁系统的状态。

回旋加速器大厅和各治疗室内均设有摄像头，以便工作人员直观的观察各区域内人员的活动情况。

4.2.3.9 束流保护装置

4.2.3.9.1 束流中断系统

在回旋加速器正常运行情况下因某种原因中断束流时，系统会根据“使辐射和活化最小”的原则停止束流，以“最快返回正常态”的原则选用停束器。在检测到错误状况时停机，主要根据需要的反应时间选用某个安全系统断开束流。

束流中断部件的设计是冗余的，主要包括离子源、静电快偏转板、射频系统等。可以用正常的或快速及机械束流停止器和快速偏转磁铁中断束流，也可以关闭加速器的高频加速电压，或关闭离子源弧电流，或利用加速器的静电快偏转板等，不同的束流中断部件会产生不同的剂量误差。

4.2.3.9.2 束流电流监测

(1) 束流准直器

在回旋加速器中，由于离子源孔径突然破裂或者出现裂缝等原因，可能导致束流猛增，为了限制其值，在回旋加速器中部装有一个永久的固定准直器，可以拦截大部分不必要的额外电流。

(2) 狭缝

为了防止束流电流过高，对回旋加速器中的狭缝进行监控，一旦探测到狭缝位置错误，束流会立刻中断。

(3) 束流电流监测

为了防止束流电流（病人照射期间的剂量率）过高，对回旋加速器出口的引出束流进行监测。在回旋加速器和降能器中间设置了充足的监测系统，能够确保束流电流不超过扫描喷嘴系统内电离室的测量范围。

束流电流监测主要用于在发生束流电流错误的情况下，尽可能快的记下反应时间和剂量率，根据二者的乘积决定患者在治疗故障停机期间接受的额外剂量

值。

4.2.3.9.3 束流监测

(1) 束流闸

为了防止极端情况，即回旋加速器的停束器均失效，在束流输运线上安装了束流闸，其安装位置示意图如图 4-21 所示。

只有当所有的安全联锁条件都满足时，束流闸才会提起，允许束流通过。正常运行时，束流闸上不会监测有束流。一旦束流闸上监测有束流电流，就会触发联锁中断束流。

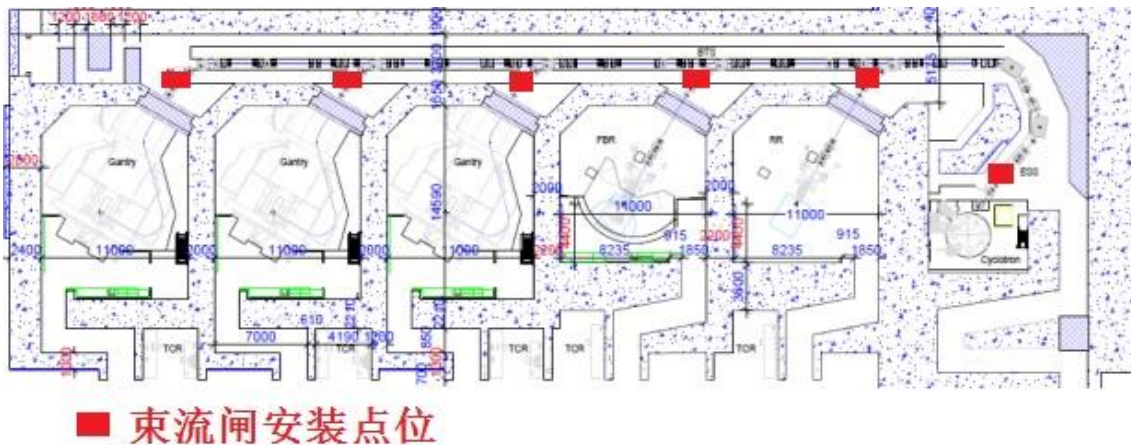


图 4-21 质子治疗系统束流闸安装点位示意图

(2) 束流分配

在每各束流传输区域内均设有两个偏转磁铁，使束流偏转至进入选定的治疗室。偏转磁铁电源的开关由人身安全联锁系统的控制器监控。

(3) 束流输运线设备

为防止错误的束斑和束流损失，所有可移动的、能够阻断束流的输运线设备（如束斑监控器、真空窗等），在“治疗”模式下，都由人身安全联锁系统监控。在照射期间，任何一个设备的位置不正确，都会导致束流的中断。

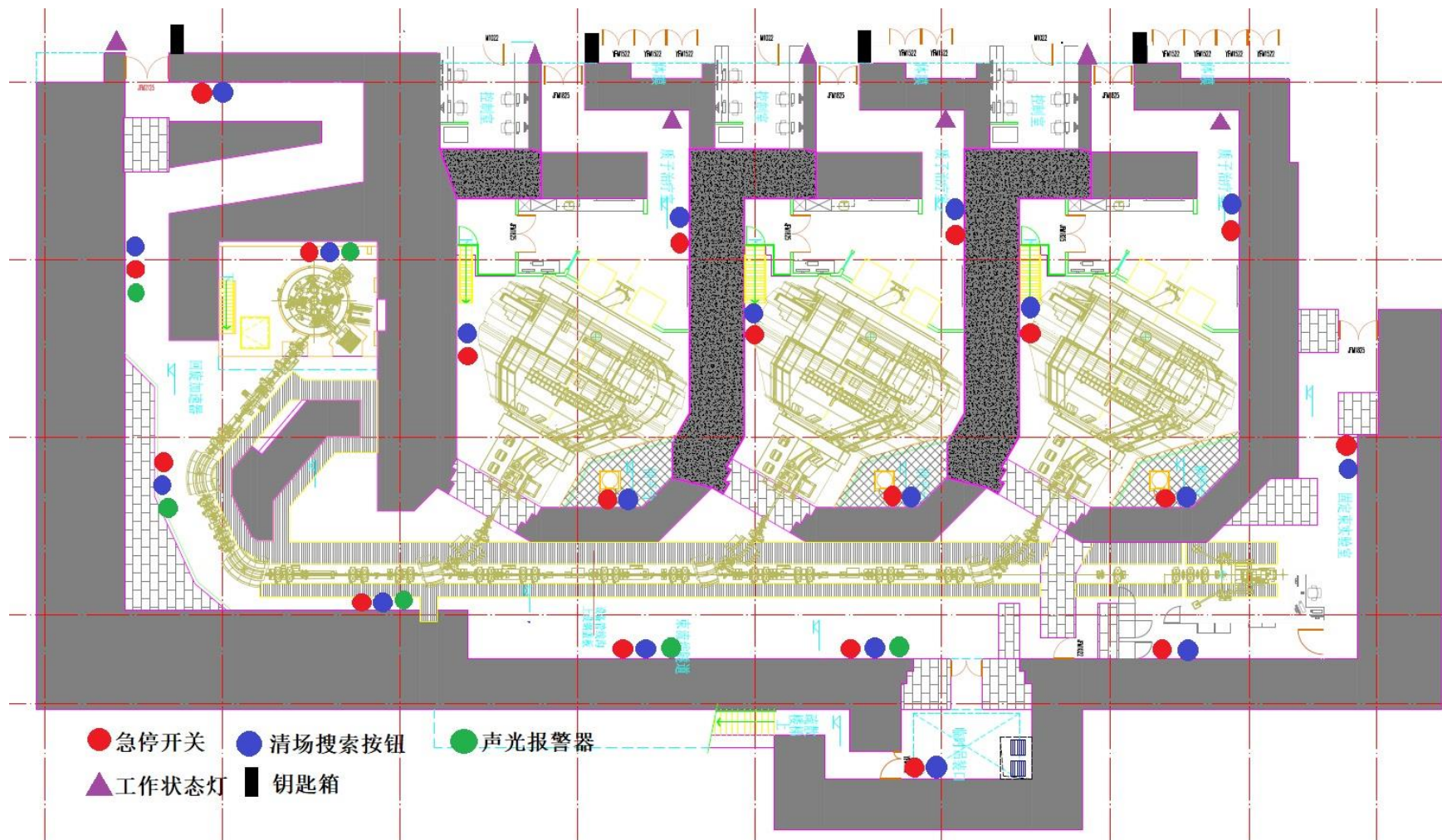


图 4-22 安全联锁设施分布点位图

4.2.3.10 安全联锁逻辑

子治疗系统人身安全联锁系统允许出束的逻辑如下：

- (1) 加速器大厅和需要使用的治疗室内清场按钮按一定顺序全部按下；
- (2) 加速器大厅和需要使用的治疗室内的急停按钮全部复位；
- (3) 加速器大厅和需要使用的治疗室门口钥匙面板上的钥匙全部归位，主控室控制台上的控制钥匙归位；
- (4) 加速器大厅和需要使用的治疗室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。

4.3 场所辐射监测系统

质子治疗系统的场所辐射监测系统主要负责工作场所的监测，由固定安装探测器、安全冗余控制单元、内部局域网、监控计算机、中心管理计算机组成，如图 4-23 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，用于对整个辐射监测系统进行实时数据观测、控制。

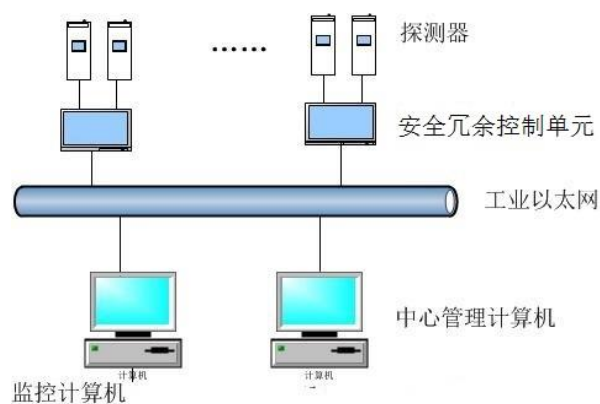


图 4-23 Probeam 质子治疗系统辐射监测系统结构

固定安装的探测器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。每个监测点由一台中子探测器和 γ 探测器组成。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。

4.4 通风系统

考虑到质子治疗系统运行过程中，会产生少量感生放射性气体，质子治疗区的回旋加速器大厅和各治疗室均设计了通风系统，设置一个总排风口，位于束流输运线隧道末端的屋顶，排风高度约为 7.1m。各区域的排风管道汇总至输运线隧道内，最终由该排风口排入环境。其中：回旋加速器大厅与输运线隧道连通，大厅内空气直接流通到输运线隧道内；各治疗室的排风管道穿过与输运线隧道相连的屏蔽墙体，引入至输运线隧道内。各区域通风管道和排风口的位置布局如图 4-24 和图 4-25 所示，通风系统的设计参数见表 4-45。

表 4-45 质子治疗区通风系统设计参数

区域名称	通风方式	气流走向	体积, m ³	排风量, m ³ /h	换气次数
回旋加速器大厅+束流输运线隧道	空调机送风+排风机排风	顶送风顶排风	1510	14000	9
旋转束治疗室	空调机送风+排风机排风	顶送风顶排风	120	500	4
固定束实验室	空调机送风+排风机排风	顶送风顶排风	120	2000	16

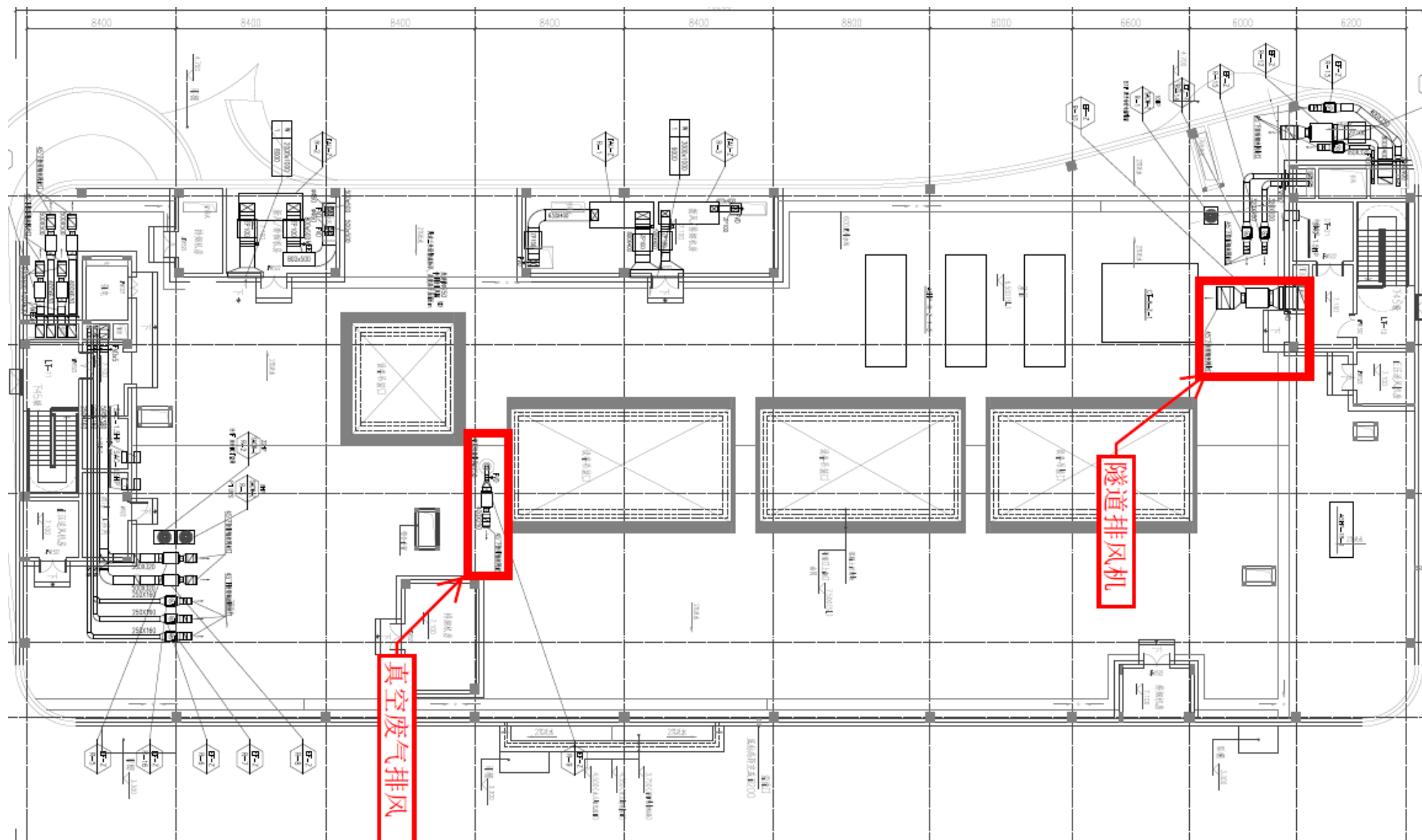


图 4-25 束流输运线末端排风机位置示意图

4.5 人流路线

质子维护楼地下一层设有门厅入口，医护人员和病人均由该门厅进入质子治疗区，具体路线如图 4-26 所示：

(1) 病人由该处门厅进入，经接待和分诊台分诊后由医护人员带入相应的更衣室更衣，更衣后进入摆位区进行治疗前摆位后等待进入相应的治疗室进行治疗，治疗完成后沿进入治疗室的路线返回。

(2) 医生经该门厅进入其办公室，等待后续进行治疗。

(3) 病人陪同人员留在门厅处的等候区等候。

为防止无关人员进入，质子治疗区与门诊楼交界处的门均为常闭门，且设有门禁控制，如图 4-26 所示。

质子维护楼设有三处电梯和楼梯，仅用于医护人员出入质子维护楼内不同楼层之间使用，无法通过这些电梯和楼梯进入质子维护楼外的区域。

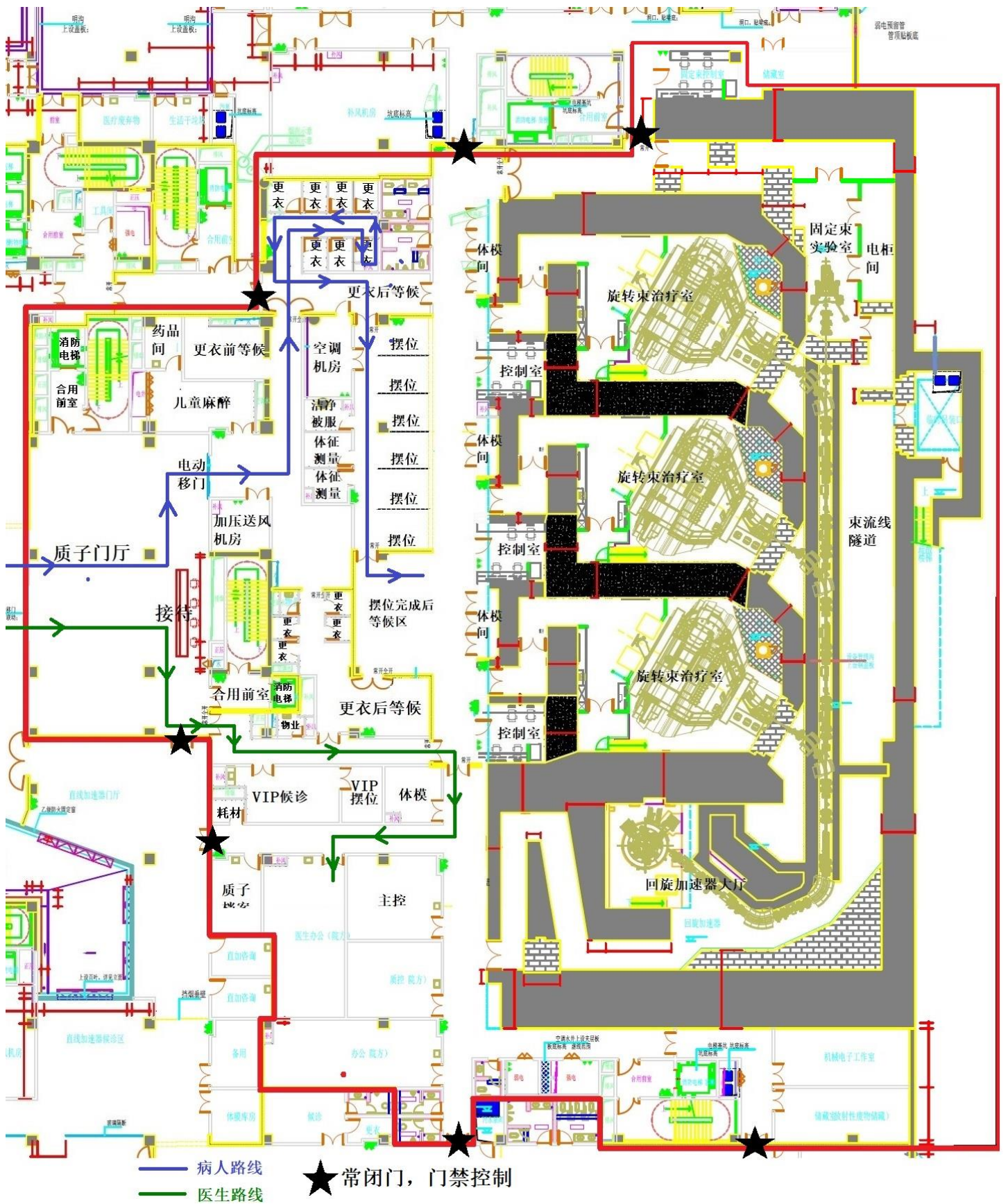


图 4-26 质子治疗区人流路线图

4.6 辐射工作场所分区

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的规定，应将辐射工作场所分为控制区和监督区。控制区是指需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域；监督区是指通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。

质子治疗区工作场所分区情况具体如下：

（1）控制区：回旋加速器大厅、束流输运线隧道、三个旋转束治疗室和末端固定束实验室；

（2）监督区：主控室、各治疗室的控制室、加速器大厅和治疗室外走廊、放射性固体废物储藏间。

4.7 放射性三废治理

4.7.1 放射性废气

（1）废气来源

根据第三章的分析，质子治疗装置安装调试以及维修维护环节将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为 ^{13}N （ $T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$ ）、 ^{15}O （ $T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$ ）、 ^{11}C （ $T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$ ）和 ^{41}Ar （ $T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$ ）。各核素年产生量见表 3-10。

（2）废气处理措施

质子治疗装置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。根据 3.3.3.1 节的计算结果，现有的通风系统设计能够使回旋加速器大厅和治疗室内的空气感生放射性核素的浓度均低于各自的导出空气浓度。

质子治疗系统各区域均设有排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体由各区域屋面排入环境。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，结合第五章的计算结果，其对环境的影响很小。

4.7.2 放射性废液及处理措施

本项目产生的放射性废液主要是活化的冷却水。质子治疗装置所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素见表 3-19。除 ^7Be 、 ^3H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。根据对冷却水感生放射性核素活度浓度的计算结果，活化冷却水的活度浓度为 $1.29\text{E}+03\text{Bq}/\text{cm}^3$ ，属于低放废液。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修时才需要排放。本项目第三个旋转束治疗室底板下方设有冷却水贮存池，采用防水衬砌混凝土，尺寸（长×宽×深）为 $2\text{m}\times 2\text{m}\times 3\text{m}$ ，容积约为 5t，用于贮存更换下来的冷却水。冷却水管的末端位于束流输运线隧道的管沟内，管沟内设有地漏，地漏通过管道与冷却水贮存池连接。当因检修等原因需要排放时，打开需要排放的该路冷却水管末端的阀门，直接排入管沟内，经地漏排入贮存池。经一定时间暂存后，短半衰期核素 ^{15}O 、 ^{13}N 和 ^{11}C 等将迅速衰变，浓度也很快降低，因此只需考虑半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 。对废水贮存槽中冷却水采样分析 ^3H 和 ^7Be 的含量，监测达标并经环保部门同意后排入医院污水管网。

根据 GB18871-2002 中的方法，本次评价计算了冷却水中 ^3H 和 ^7Be 的单次排放限值 1ALI_{min} 和单月排放限值 $10\text{ALI}_{\text{min}}$ ，列于表 4-46。

表 4-46 冷却水感生放射性核素排放限值

核素	单次排放限值 1ALI_{min} (Bq)	单月排放限值 $10\text{ALI}_{\text{min}}$ (Bq)
^3H	$1.11\text{E}+09$	$1.11\text{E}+10$
^7Be	$4.65\text{E}+08$	$4.65\text{E}+09$

根据“3.3.3.2 节”的计算结果，检修时产生的冷却水中感生放射性核素的活度浓度能够满足单次排放和单月排放的要求。

5 辐射环境影响分析

5.1 正常运行的环境影响分析

5.1.1 工作人员受照剂量估算

质子治疗系统正常运行期间，对工作人员的辐射影响主要来自加速器开机出束产生的瞬时辐射照射。质子治疗系统的维修维护由生产厂家负责进行，本项目的工作人员不参与该项工作。因此，本次评价仅对质子治疗系统运行期间工作人员的受照剂量进行估算。

工作人员所受直接照射剂量可由下式 5-1 进行计算：

$$H=D \times T \times t \quad (5-1)$$

式中，

H 为工作人员年受照剂量， $\mu\text{Sv/a}$ ；

D 为工作人员所在区域剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

T 为工作人员的居留因子；

t 为工作人员年受照时间，h/a。

5.1.1.1 系统年出束时间

根据业主单位提供的资料，每间旋转束治疗室按每周治疗 5 天，每天满负荷运行的情况下最多治疗 16h，每小时治疗 2 个病人计，则可推算出每个旋转束治疗室每天最多治疗 32 人次。每个病人每次治疗期间平均出束时间保守按 2min 计，则每个旋转束治疗室每天出束时间约为 1h，每年治疗天数按 250d 计，则每间旋转束治疗室每年的出束时间为 250h。本项目共建设 3 间旋转束治疗室和 1 间固定束实验室，保守假设固定束实验室年出束时间也为 250h，由此可计算得质子治疗系

统年出束时间约为 1000h。

此外，考虑到质子治疗系统运行期间，治疗室每日、周、月进行的“QA（质量保证）”过程中，系统也会开机出束。根据业主提供的资料，质子治疗系统每年“QA”过程中的开机出束时间相当于每年治疗病人出束时间的 15%。

综上，质子治疗系统年出束时间共 1150h。

5.1.1.2 剂量估算结果

根据质子治疗系统的治疗模式，将受照工作人员分为加速器控制人员、治疗室控制室内的医生和治疗室内负责摆位等操作的医生。

5.1.1.2.1 加速器控制人员

加速器控制人员的工作区域位于加速器控制室，根据“4.1.3 屏蔽计算”中对“关注点 9”的计算结果，该区域的剂量率为 $4.39\text{E-}01\mu\text{Sv/h}$ 。其受照剂量估算结果见表 5-1。

表 5-1 加速器控制室内工作人员受照剂量估算结果

工作区域	居留因子 T	最高剂量率, Sv/h	受照时间, h	受照剂量, mSv/a
加速器控制室	1	$2.31\text{E-}07$	1150	$2.66\text{E-}01$

5.1.1.2.2 治疗室控制室内的医生

根据“4.1.3 屏蔽计算”的计算结果，不考虑质子治疗系统技术区（即仅有生产厂家的专业技术人员能进入的区域），旋转束治疗室控制室（关注点 7 和关注点 12）内的剂量率最高，为 $6.02\text{E-}07\text{Sv/h}$ 。每名医生的受照时间为每间治疗室的出束时间 250h，由此可得出治疗室控制室内的工作人员的受照剂量，见表 5-2。

表 5-2 治疗室控制室的工作人员受照剂量估算结果

工作区域	居留因子 T	最高剂量率, Sv/h	受照时间, h	受照剂量, mSv/a
治疗室控制室	1	$6.02\text{E-}07$	250	$1.51\text{E-}01$

5.1.1.2.3 治疗室内负责摆位的医生

摆位人员的受照剂量来自患者治疗前摆位和治疗后解除摆位两个过程。根据治疗室满负荷运行情况下规划的工作量，每间治疗室每天照射病人 32 次，每年治疗 250d，每间治疗室设有 4 名摆位人员，则每间治疗室内所有摆位人员的年总工作量计算结果列于表 5-3。每间治疗室内每名摆位人员的年工作量列于表 5-4。

表 5-3 每间治疗室内所有摆位人员的年工作量

单次治疗前摆位所需时间, min	年进行治疗前摆位总次数	年进行治疗前摆位总时间, h	单次解除摆位所需时间, min	年总进行解除摆位工作的次数	年进行解除摆位总时间, h
15	8000	2000	1	8000	133.3

表 5-4 每间治疗室内每名摆位人员的工作量

年进行治疗前摆位总时间, h	年进行解除摆位总时间, h
500	33.3

5.1.1.2.3.1 患者治疗前摆位

患者每次治疗前，摆位人员在治疗室接触的是未受到照射的患者，该过程中摆位人员所在区域的瞬时剂量率主要来自“3.3.3.5.3 节”所列的（2）~（5），该区域的剂量率列于表 5-5。由此可计算出每间治疗室每名摆位人员对患者进行治疗前摆位期间所受的年剂量为 6.20E-01mSv/a。

表 5-5 患者治疗前摆位期间，摆位人员所在区域的剂量率

来源	瞬时剂量率, Sv/h	年工作时间, h	使用因子	照射因子	年受照剂量, Sv/a
回旋加速器大厅	8.97E-07	500	1	1	1.79E-03
束流输运线	2.15E-07	500	1	1	4.30E-04
相邻治疗室	9.32E-07	500	1/3	1/4	2.33E-04
空气感生放射性	5.02E-08	500	1	1	1.00E-04
总计	2.09E-06	500	——	——	6.20E-04

5.1.1.2.3.2 患者治疗后解除摆位

患者每次治疗结束后，摆位人员需要进入治疗室内，对患者解除摆位及谈话。此时，作为工作区瞬时剂量率主要来源的患者会对摆位人员产生一定照射。根据业主单位提供的资料，患者单次治疗结束停机 10min 后，摆位人员方可进入治疗室内对其进行解除摆位的操作。解除摆位过程中，摆位人员与患者被照射部位的平均距离为 0.5m。根据表 3-33 中计算得出“200MeV-3nA 连续治疗 2min，停机 10min 后距离患者 50cm 处摆位区的剂量率”，可计算得出每间治疗室每名摆位人员由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量，结果列于表 5-6。

每间治疗室每位摆位人员年总受照剂量计算结果列于表 5-7。

表 5-6 每间治疗室每位摆位人员由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量

来源	瞬时剂量率, Sv/h	年工作时间, h	使用因子	照射因子	年受照剂量, Sv/a
患者	3.03E-06	33.3	1	1	1.01E-04
回旋加速器大厅	8.97E-07	33.3	1	1	2.99E-05
束流输运线	2.15E-07	33.3	1	1	7.16E-06
相邻治疗室	9.32E-07	33.3	1/3	1/4	2.56E-06
空气感生放射性	5.02E-08	33.3	1	1	1.67E-06
总计	2.09E-06	33.3	——	——	1.42E-04

表 5-7 每间治疗室每位摆位人员年总受照剂量

每名摆位人员由于治疗前摆位所致受照剂量, mSv/a	每个摆位人员由于解除摆位所致的年剂量, mSv/a	每名摆位人员总年受照剂量, mSv/a
6.20E-01	1.42E-01	7.62E-01

5.1.1.2.4 工作人员受照剂量汇总

本项目工作人员受照剂量汇总如下表 5-8 所示。由上述计算结果可知，本项目工作人员所受个人年最大有效剂量为 7.62E-01mSv/a，低于工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-8 工作人员受照剂量汇总

人员类别	受照剂量, mSv/a
加速器控制人员	2.66E-01
治疗室控制室内的人员	1.51E-01
治疗室内摆位人员	7.62E-01

5.1.2 公众的受照剂量估算

质子治疗系统正常运行期间,对公众的辐射影响主要来自加速器开机出束产生的瞬时辐射的直接外照射以及感生放射性气体的排放造成的空气浸没外照射。

5.1.2.1 瞬时辐射照射

公众所受瞬时辐射照射剂量由下式 5-2 计算

$$H = D \times t \times T \quad (5-2)$$

H 为公众的年受照剂量, $\mu\text{Sv/a}$;

D 为公众所在区域剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

t 为公众年受照时间, h/a 。

T 为居留因子。

质子维护楼正常运行期间,除准备接受治疗的病人和参与治疗的工作人员外,其他无关人员不会进入。由其地下一层平面布局可以看出,质子维护楼外公众可达的最近区域为其第三旋转束治疗室北侧墙外(关注点 19)的合用前室、固定束治疗室控制室(关注点 26)外的锅炉房控制室以及回旋加速器大厅南侧墙外(关注点 1、2、3)的区域,如图 5-1 所示。利用公式 4-1 可计算得出这些区域的瞬时剂量率,计算参数和计算结果列于表 5-9 和表 5-10。这些区域公众所受瞬时辐射照射剂量计算结果列于表 5-11。

对于直加控制室内人员的受照剂量,需叠加考虑直线加速器的运行对其所致的受照剂量。根据《山东肿瘤防治研究院核医学工作场所及医用电子加速器应用项目环境影响报告表》,直加控制室内工作人员受照剂量率为 0.018mSv/a ,叠加

本项目运行所致剂量，直加控制室内工作人员总受照剂量为 0.025mSv/a，低于其剂量率约束值 5mSv/a。

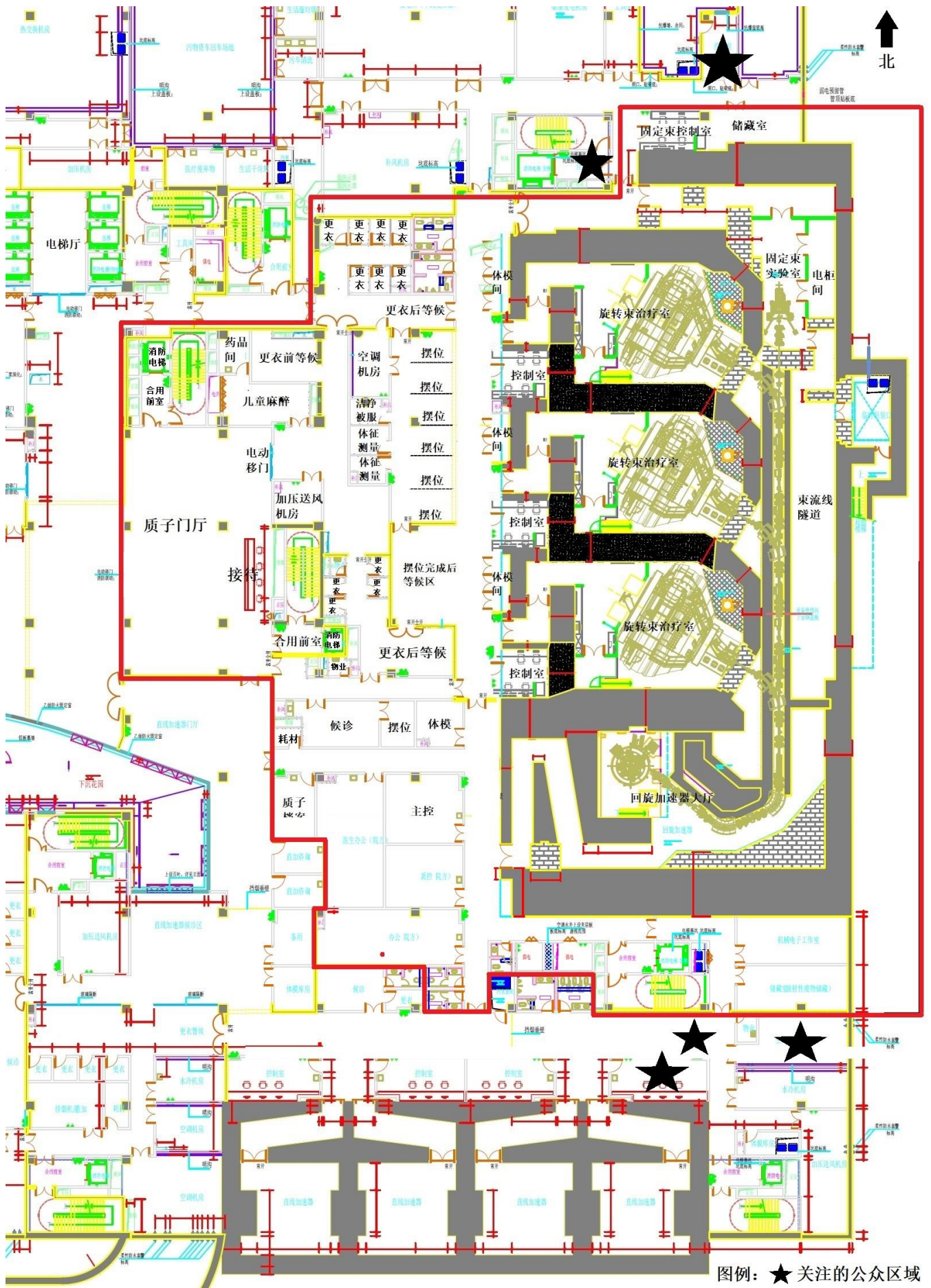


图 5-1 计算时关注的公众区域

表 5-9 公众所在区域瞬时剂量率计算参数

关注点	束流损失点	θ	r, m	屏蔽体材料和有效厚度, cm
合用前室	第三旋转治疗室	48°	11.2	315cm 混凝土
锅炉房控制室	固定束治疗室	0°	17.8	365cm 混凝土
走廊	降能器	45°	18.8	563cm 混凝土
		50°	18.6	560cm 混凝土
		67°	19.6	440cm 混凝土
直加控制室	降能器	45°	22.3	563cm 混凝土
		50°	22	560cm 混凝土
		67°	23.2	440cm 混凝土
空调机房（直加）	降能器	27°	20.4	612cm 混凝土
		37°	18.9	574cm 混凝土

表 5-10 公众所在区域瞬时剂量率计算结果

关注点位置	S_p , s^{-1}	$H(\theta)$, $Sv \cdot m^2$	$\lambda(\theta)$, g/cm^2	$d(\theta)$, g/cm^2	D_p , Sv/h
合用前室	1.88E+10	9.47E-16	80	740.25	4.88E-08
锅炉房控制室	1.88E+10	1.75E-15	95	857.75	4.47E-08
走廊	5.00E+12	1.49E-15	106.03	1323.05	2.89E-07
	5.00E+12	1.33E-15	94.55	1316	6.24E-08
	5.00E+12	1.14E-15	84.51	1034	2.59E-07
直加控制室	5.00E+12	1.49E-15	106.03	1323.05	2.05E-07
	5.00E+12	1.33E-15	94.55	1316	4.46E-08
	5.00E+12	1.14E-15	84.51	1034	1.85E-07
空调机房（直加）	5.00E+12	1.87E-15	114.78	1438.2	2.92E-07
	5.00E+12	1.49E-15	106.03	1348.9	4.88E-08

表 5-11 公众所受瞬时辐射照射剂量计算结果

公众区域	剂量率, Sv/h	居留因子	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
合用前室	4.88E-08	1/4	250	3.05E-03
锅炉房控制室	4.47E-08	1	250	1.12E-02
走廊	2.89E-07	1/16	1150	2.08E-02
直加控制室	2.05E-07	1	1150	2.36E-01
空调机房（直加）	2.92E-07	1/8	1150	4.20E-02

5.1.2.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用李红等人在《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》中推荐的简单稀释模式估算质子治疗系统正常运行工况下放射性气态流出物对环境的影响。放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射。

5.1.2.2.1 空气浸没外照射

质子治疗系统放射性气体排放口高度 H 约 7.1m，临近最高建筑物高度 H_b 为 94.6m， $H < 2.5H_b$ ，且最近距离处居民小区与排放口的距离 $x=340m > 2.5A_b^{0.5}$ (A_b 为最靠近接收点的建筑物的最大截面积，约 11920m²)。则地面空气浓度可由式 5-3 计算：

$$C_{a,i} = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \quad (5-3)$$

式中，

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

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

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s；

u_a 为释放高度上年平均风速，m/s，取值 2m/s；

B 为在下风距离 x 处的高斯扩散因子，1/m²；由下式 5-4 计算。

σ_z 为垂直扩散参数，m，

$$B = \frac{1.6}{\sqrt{2\pi^3}} \frac{1}{x \sum z}, \quad \sum z = (\sigma_z^2 + A_b / \pi)^{0.5}, \quad \sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \quad (5-4)$$

最近距离处居民小区所在位置处地面空气浓度计算结果列于表 5-12。

表 5-12 最近距离居民小区处地面空气浓度计算结果

核素	Pp	Q_i , Bq/s	u_a , m/s	B, 1/m ²	$C_{a,i}$, Bq/m ³
¹¹ C	0.25	1.19E+02	2	9.37E-05	1.40E-03
¹³ N	0.25	1.37E+06	2	9.37E-05	1.60E+01
¹⁵ O	0.25	1.41E+06	2	9.37E-05	1.65E+01
⁴¹ Ar	0.25	7.42E+03	2	9.37E-05	8.69E-02

空气浸没外照射剂量可由下式 5-5 计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G \quad (5-5)$$

式中：

H_A 为空气浸没照射所致年受照剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；

S_f 为建筑物屏蔽因子，对个人取 0.7；

G 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-13，取值来自 IAEA NO.19；

表 5-13 剂量转换因子

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

空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-14。

表 5-14 空气浸没外照射剂量计算结果

核素	S _F	C _{a,i} , Bq/m ³	t, s/a	G, (Sv/s)/(Bq/m ³)	H, Sv/a
¹³ N	0.7	1.40E-03	3.15E+07	4.90E-14	1.51E-09
¹⁵ O	0.7	1.60E+01	3.15E+07	4.91E-14	1.73E-05
¹¹ C	0.7	1.65E+01	3.15E+07	4.89E-14	1.78E-05
⁴¹ Ar	0.7	8.69E-02	3.15E+07	6.50E-14	1.25E-07
总计	——	——	——	——	3.53E-05

5.1.2.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由式 5-6 计算：

$$H_{h,i} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \quad (5-6)$$

式中：

$H_{h,i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a；

T 为受照时间，8760h/a；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m³/h，成人：1.2；

$C_{a,i}$ 为评价点的核素的地面空气浓度，Bq/m³；

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

吸入内照射剂量计算结果见表 5-15。

表 5-15 吸入内照射剂量计算结果

核素	C _{a,i} , Bq/m ³	T, h/a	u, m ³ /h	g _{h,i} , Sv/Bq	H _{h,i} , Sv/a
¹³ N	5.85E-03	8.76E+03	1.2	1.80E-11	2.65E-10
¹⁵ O	6.83E+00	8.76E+03	1.2	——	
¹¹ C	8.43E-07	8.76E+03	1.2	——	
⁴¹ Ar	2.29E+00	8.76E+03	1.2	——	
总计	——	——	——	——	2.65E-10

5.1.2.2.3 公众受照剂量汇总

公众受照剂量计算结果汇总见表 5-16。

表 5-16 公众受照剂量汇总，mSv/a

瞬时辐射照射，mSv/a	放射性气体排放，mSv/a	
	空气浸没外照射	吸入内照射
4.20E-02	3.53E-02	2.65E-07

由此可见，质子治疗系统正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 4.20E-02mSv/a，主要途径是瞬时辐射外照射，低于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

5.2 事故工况下的环境影响

5.2.1 事故情景分析

质子治疗系统的核心是回旋加速器，加速器是一种人工脉冲辐射源，它产生的辐射场是瞬发性的，加速器一旦停机，能造成环境影响的主要辐射源就会立即消失，不会再引起周边介质的活化。

装置使用期间可能发生的各类事故及其应急和预防措施如表 5-17 所示。

表 5-17 质子治疗装置使用期间可能发生的各类事故分析

序号	事故（事件）描述	可能原因	后果	应急措施	主要预防措施
1	治疗室终端误入	①.分区管理失效； ②.安全联锁装置失效； ③.工作人员误操作。	误入人员受到超过年剂量照射。	①.立即停止出束； ②.启动辐射事故应急预案； ③.划出警戒线，疏散非事故处理人员； ④.进行现场辐射环境监测 ⑤.对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施。	①.加强分区管理和巡察力度； ②.定期对安全联锁的有效性进行检查； ③加强工作人员的技能培训与考核； ④严格按照安全操作规程进行操作。
2	回旋加速	①.分区管理失效；	误入人员	①.立即停止出束；	①.加强分区管理和巡

	器大厅人员误入	②.安全联锁装置失效； ③.工作人员误操作。	受到超过年剂量照射。	②.启动辐射事故应急预案； ③.划出警戒线，疏散非事故处理人员； ④.进行现场辐射环境监测 ⑤.对受到误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施。	察力度； ②.定期对安全联锁的有效性进行检查； ③加强工作人员的技能培训与考核； ④严格按照安全操作规程进行操作。
3	质子治疗区机房通风系统故障	①.断电； ②.风机故障； ③.人员误操作。	增加工作人员和公众照射	①.立即停止出束，对通风系统进行检查、维修； ②.检查风机，若发生故障，立即维修或更换。	①.加强检查和监测； ② 定期对风机进行检查； ③设置备用风机和备用电源； ④加强管理和培训。
4	冷却水泄漏	① 冷却水管故障或破裂； ② 人员误操作；	造成环境污染	①.立即停止出束，对冷却水系统进行检查、维修； ②.检查冷却水管路，若发生破裂，立即维修或更换。	①.加强检查和监测； ② 定期对冷却水管进行检查； ③ 加强管理和培训。

5.2.2 假想事故后果分析

根据表 5-17 所列事故，综合考虑事故类型、事故所致的辐射影响后果等因素，在质子治疗系统出束运行期间，误入治疗室和误入加速器大厅且此时安全联锁系统失效为较严重事故。考虑到误入治疗室的工作人员可能受到质子束流的直接照射，本次评价以“误入治疗室”为作为假想事故，估算事故期间人员的受照剂量。

根据业主提供的资料，治疗室治疗头处质子束流直接照射的剂量率约为 2Gy/min。当人员误入治疗室，受到质子束流直接照射，由开始受照到采取应急措施切断束流需约 10s。由此可计算得该过程中，误入人员的受照剂量为 0.3Gy。

质子治疗装置设计有功能齐全，具有安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，采用清场搜索、紧急停机、分区控制、警报装置等安全设备和措施，确保当设备某一区域有束流时，该区域的门无法打开，工作人员不能进入该区域；当设

备某一区域有人时，束流也不能被传输到该区域。

此外，业主单位正在建立一系列辐射安全管理制度，包括《操作规程》、《人员培训计划》、《辐射防护与安全保卫制度》等，规定操作质子治疗系统的工作人员均由经过辐射防护培训和专业培训的人员担任，并严格按操作管理规程对设备进行操作运行。本项目正式运行前，编制完成《辐射事故应急预案》并严格执行，确保在发生辐射事故时，能有序、迅速地采取正确的处理措施，缓解事故后果，控制辐射事故的发展，将事故对人员、财产和环境的损失减少到最低限度。

因此，该类事故发生的概率很小。即使发生该类事故，对周围环境的影响也很小。

6 辐射安全管理

6.1 辐射安全与环境保护管理机构

业主单位山东省肿瘤防治研究院目前已成立了专门的放射防护管理领导小组，负责全院的辐射安全与环境保护管理工作。小组人员组成见表 6-1，组长由放射科科室领导担任，全面负责辐射防护和安全管理的工作；小组成员由放疗科、设备科、核医学科、介入科、影像科、物理室等科室的领导和工作人员组成，具体承担辐射防护和安全管理日常工作。本项目建成后，由该领导小组负责本项目相关的辐射防护和管理工作。

表 6-1 辐射安全与环境保护管理小组人员

机构名称	放射防护管理领导小组
组长	李宝生
	王哲海
副组长	陈鲁生
	李文武
	李建彬
成员	王绍平
	佟峰
	李宝河
	赵磊
	闫荣
	葛红霞
	张丽
	卢鸣
	刘娟娟
	孙永敏
	黄勇
	杨国仁
	尹勇
	宋金龙
	谢印法
刘乃富	
李庆水	
秘书	尹勇

放射防护管理领导小组的主要职责如下：

(1) 负责全员放射工作人员的健康查体、个人剂量监测以及各放疗机房的防护、设计、报批、检测、检查等工作；

(2) 制定辐射安全防护与管理规章制度，并定期检查各项规章制度的贯彻落实情况；

(3) 负责放射工作人员的培训和管理；

(4) 管理、监督、协调医用射线装置使用过程中的辐射安全工作；

(5) 负责放射性三废的监督管理和环境保护

6.2 辐射工作人员管理

本项目的辐射工作人员主要为辐射安全专职管理人员以及从事放射性工作的医护人员、物理师等，人员类别及其配备情况如下表 6-2。本项目辐射工作人员仅负责质子治疗系统放射治疗相关工作，不参与医院其他放疗相关工作。所有辐射工作人员计划于 2019 年 9 月参加环保部门认可的机构组织的中级辐射安全与防护培训，考核合格并取得合格证书后方可上岗。

业主单位制定了辐射工作人员培训计划，从事辐射工作的人员、新上岗及调入的辐射工作人员在上岗前必须根据其工作内容参加相应级别的辐射安全与防护培训，取得合格证书后才能上岗。已经取得辐射安全与防护培训合格证书的工作人员，若要继续从事辐射工作，每 4 年进行一次再培训。

表 6-2 工作人员类别及配置情况

科室	岗位类别	人数
质子治疗区	辐射安全专职管理人员（注册核安全工程师）	1 人
	放疗医师	5
	物理师	10
	放疗技师	15

6.3 辐射安全管理制度

医院目前已制定的辐射安全制度主要有：（1）《辐射安全管理组织机构及岗位职责》；（2）《辐射安全保卫制度》；（3）《辐射监测计划》；（4）《个人剂量监测及健康档案管理制度》；（5）《工作人员培训制度》；（6）《放射性废物管理规定》，根据本项目的建设内容和特点对现有制度进行补充完善后方可满足要求。此外，为加强辐射安全管理，医院正在建立以下辐射安全管理制度，主要包括：

- （1）《质子治疗系统操作规程》；
- （2）《质子治疗系统辐射防护措施》；
- （3）《质子治疗系统检查与维修制度》；
- （4）《质子治疗系统质量控制规范》。

上述规章制度从操作人员岗位职责、辐射防护与安全保卫、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面分别做出了明确的要求和规定，保障了辐射工作人员和公众的健康和安全，建成后可满足辐射管理要求。

6.4 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监测计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。

6.4.1 工作场所监测

质子治疗区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。

在线区域辐射监测利用在线区域辐射监测系统，如“4.3 场所辐射监测

系统”所描述。固定监测点位选在回旋加速器大厅内、迷道出入口和控制室内、治疗室内、迷道出入口和控制室内等人员常驻区域等代表性位置。每个监测点位设一台 γ 探测器和一台中子探测器，场所辐射监测系统监测点位图见图 6-1。

放射防护管理领导小组根据在线区域监测系统获取的监测数据，按管理要求提交辐射监测报告。并由本项目辐射安全管理专职人员定期向主管部门汇报固定监测结果并随时反应实时监测中出现的辐射安全问题。

区域巡测包括对回旋加速器区域、治疗室周围、辐射监督区边界、放射性固体废物贮存间周围等，拟配备的监测仪器包括：便携式中子辐射巡测仪、便携式X- γ 辐射巡测仪、便携式表面污染监测仪等。

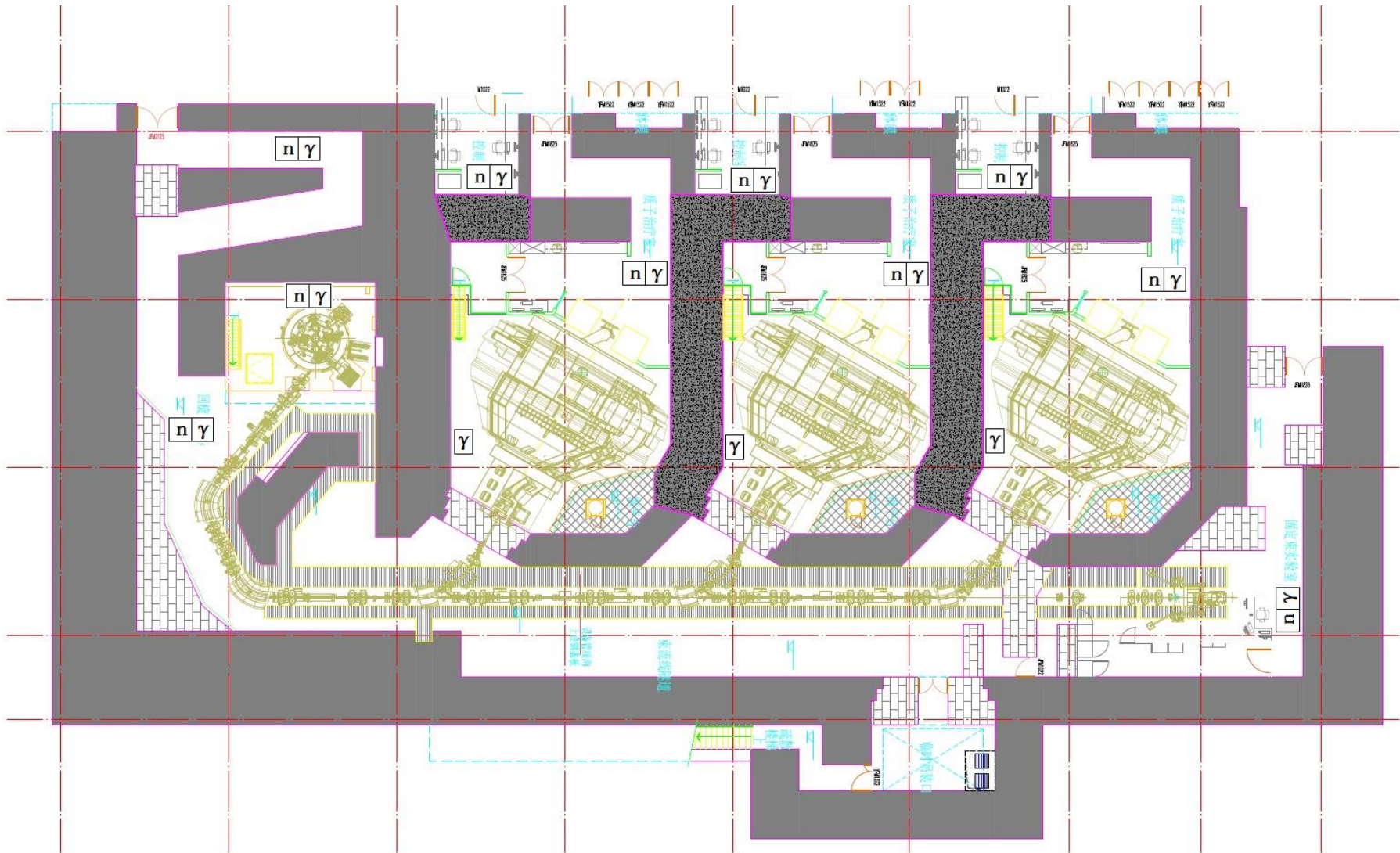


图 6-1 在线辐射监测系统监测点位

6.4.2 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量监测计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。质子治疗区配备的个人剂量计和个人剂量报警仪均需具有监测 X- γ 和中子的功能。

个人剂量计用于对放射性工作人员和相关医护人员的常规个人剂量监测，业主单位为每名放射性工作人员配备了个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，个人剂量计每季度委托有资质的单位监测一次，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。

个人剂量报警仪用于工作人员进入加速器大厅、治疗室等控制区内部维护、检修或应急时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。医院为进入控制区内工作的人员建立档案，每次在控制区内的工作结束后，由辐射安全专职管理人员负责回收个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，统一汇总在该工作人员个人剂量档案中。

工作人员的个人剂量档案采用计算机管理系统进行管理，建立个人剂量数据库管理系统，以实现快速检索、统计、分析、报表、归档，剂量监测结果须终身保存。放射性工作人员可通过申请，查询和复印本人相关剂量档案。

6.4.3 环境监测

环境监测包括采用便携辐射监测仪表进行连巡测和环境介质取样分析两种方式。

(1) 巡测

采用便携式辐射监测仪表定期对各辐射工作场所周围环境辐射剂量率进行监测，监测频次为 1 次/半年。

(2) 环境介质取样分析

环境介质取样分析委托有资质的单位进行，主要采用对环境介质样品（空气、水、土壤等）进行伽玛能谱分析等方法。定期对周围环境土壤、气溶胶取样，进行核素分析，并将数据收集整理，与不同时期的测量数据进行比对，存档。具体监测计划见表 6-3。

表 6-3 环境介质取样监测计划

监测对象	监测周期	采样点位
土壤	1 次/年	本项目东、南、西、北四侧
冷却水	每次排放前监测	冷却水贮存槽
空气	1 次/年	质子治疗区排风口、项目下风向敏感点

6.4.4 监测设备

本项目拟配备的主要监测设备包括：便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- γ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见表 6-4。

表 6-4 辐射监测设备清单

序号	仪器名称	数量，台
1	固定式 γ 探测器	以最终建设为准
2	固定式中子探测器	以最终建设为准
3	X/ γ 巡检仪	1
4	中子巡检仪	1
5	便携式表面污染监测仪	1
6	直读式个人剂量报警仪	10
7	个人剂量计	1 支/人

6.5 申请者从事辐射工作能力评价

根据中华人民共和国环境保护部令第 3 号《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（以下简称环保部第 3 号令）第二章第十二条之规定，“辐射工作单位组织编制的环境影响评价文件，除按照国家有关环境影响评价的要求编制或

者填报外，还应当包括对辐射工作单位从事相应辐射活动的技术能力、辐射安全和防护措施进行评价的内容”。本报告依据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第二章第十六条对辐射安全许可证申领单位的要求，对业主单位使用质子治疗系统的技术能力、辐射安全和防护措施等进行分析评价如下。

6.5.1 辐射安全与环境保护管理

根据环保部第 3 号令，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，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。

业主单位已成立了放射防护管理领导小组，组长由放射科科室领导担任，全面负责辐射防护和安全管理的工作；小组成员由放疗科、设备科、核医学科、介入科、影像科、物理室等科室的领导和工作人员组成。

1 名注册核安全工程师尚未落实到位。目前，业主单位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。

业主单位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。

6.5.2 辐射工作人员培训

根据环保部第 3 号令，申请者应对从事辐射工作的人员进行辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训，并进行考核，合格后持证上岗。同时，根据，环保部第 18 号令《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，使用 I 类射线装置的，应当接受中级或高级辐射安全培训。

本项目所有辐射工作人员计划于 2019 年 9 月参加环保部门认可的机构组织的中级辐射安全与防护培训，在申领辐射安全许可证之前确保所有工作人员均通过辐射安全与防护培训考核并取得合格证书。

业主单位制定了辐射工作人员培训计划，从事辐射工作的人员、新上岗及调入的辐射工作人员在上岗前必须根据其工作内容参加相应级别的辐射安全与防护培训，取得合格证书后才能上岗。已经取得辐射安全与防护培训合格证书的工作人员，若要继续从事辐射工作，每 4 年进行一次再培训。

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。

6.5.3 工作场所的安全防护措施

根据环保部第 3 号令，申请者射线装置使用场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用质子治疗系统用于放射治疗，经预测分析评价，质子治疗系统所在辐射工作场所的屏蔽设计均能满足辐射防护要求。此外，还设计了完备的安全联锁系统，通过门-机联锁、钥匙控制、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。

业主单位应按照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，射线装置使用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。

6.5.4 个人防护用品及监测仪器

根据环保部第 3 号令，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目为所有辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所前必须佩带。每季度委托有资质的单位进行监测一次，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。此外，为进入加速器大厅、治疗室等控制室内的

工作人员配备个人剂量报警仪，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。此外，还为辐射工作人员和病人配备了足够数量的个人防护用品。

本项目在回旋加速器大厅、治疗室均设有固定式监测仪表，能够对工作场所内的辐射水平进行实时在线监测，并设定了报警阈值。业主单位还配备了便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- γ 辐射巡测仪、便携式表面污染监测仪监测仪器，定期对工作场所的辐射水平进行巡测。

业主单位按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

6.5.5 规章制度

根据环保部第 3 号令，申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

业主单位已制订了辐射防护和安全保卫制度、人员培训计划、辐射监测制度以及个人剂量监测与健康档案管理制度，需根据本项目的建设内容进行补充完善。此外，还需为质子治疗系统及其使用场所，制订相应的设备操作规程、辐射防护、岗位职责和设备检修维护制度。

在以上制度按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

6.5.6 辐射事故应急预案

根据环保部第 3 号令，申请者应有辐射事故应急措施。

业主单位目前正在制定《质子治疗系统辐射事故应急预案》。应急预案应包括应急组织体系及其职责任务、事故类型及相应应急措、应急相应程序、发生辐射事故时向相关部门报告的程序、内容以及报告的部门、事故的处理程序以及各部门的联系方式等方面的内容，应具有可操作性。

业主单位按要求制定完成《辐射事故应急预案》后，可满足相关要求。

6.5.7 放射性三废治理

本项目的放射性三废主要是质子治疗系统运行期间产生的少量感生放射性气体、设备检修时产生的活化的冷却水和活化的加速器结构部件等。

质子治疗区各包括回旋加速器大厅、各治疗室内均设有通风系统，感生放射性气体经通风系统排入环境，根据计算结果，排出的感生放射性气体的环境影响很小。

设备检修期间更换下来的冷却水经排入冷却水衰变池内暂存。衰变池内的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足国家相关规定的排放标准（《污水综合排放标准》（GB8978-1996）第一类污染物最高允许排放浓度标准要求（总 β 放射性浓度不大于 10Bq/L），并经审管部门批准后，方可排入医院污水管。根据计算结果，检修时产生的冷却水中感生放射性核素的活度浓度能够满足单次排放和单月排放的要求，其环境影响很小。

项目运行过程中产生的放射性固体废物妥善收集、包装处理后暂存于加速器大厅内，对于可回收利用的部件，由瓦里安统一回收。对于不能回收利用的部件，暂存一段时间后，满足解控要求的经审管部门批准解控后按一般废物处理，不满足解控要求的申请送往城市放射性废物库贮存。

项目设计的放射性三废处理方案/措施可行，按规定落实后能够满足相关要求。

6.5.8 质量保证

环保部第 3 号令要求：使用放射性同位素和射线装置开展诊断和治疗的单位，还应当配备质量控制检测设备，制定相应的质量保证大纲和质量控制检测计划，至少有 1 名医用物理人员负责质量保证与质量控制检测工作。

结合 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》对医疗照射的质

量保证要求，环评提出以下要求：

① 应配备至少 1 名医用物理人员负责医疗照射的质量保证与质量控制检测工作；

② 应制订全面的医疗照射质量保证大纲和质量控制检测计划。医疗照射质量保证大纲至少应包括：对辐射发生器、显像设备和辐照装置等的物理参数的测量计划；对患者诊断和治疗所使用的辐射剂量的验证方法；对放疗设备及监测仪器的校准计划；以及对质量保证大纲的定期审核与评审等内容。

③ 应配备相应的质量控制检测设备，按质量保证大纲的要求对放射源和射线装置进行校准。

在此基础上，业主单位的医疗照射质量保证体系是满足要求的。

6.5.9 辐射工作能力综合评价

对照环保部第 3 号令第二章第十六条的规定，对业主单位从事申请活动种类（使用 I 类、III 类射线装置）的能力进行综合分析评价，结果见表 6-5。

表 6-5 与环保部第 3 号令的对照

序号	环境保护部令第 3 号要求	评价结果
1	使用 I 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。	项目单位已建立了健全辐射安全与环境保护管理机构，待配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。
	依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	至少应有 1 名注册核安全工程师，目前该名注册核安全工程师尚未到位
2	从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。	拟从事本项目辐射工作的人员需通过相应级别的辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核，方可满足要求。
3	放射性同位素与射线装置使用场所防止误操作、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

4	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
5	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。	制订完善后满足要求
6	有完善的辐射事故应急措施。	制订完善后满足要求
7	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
8	使用放射性同位素和射线装置开展诊断和治疗的单位，还应当配备质量控制检测设备，制定相应的质量保证大纲和质量控制检测计划，至少有 1 名医用物理人员负责质量保证与质量控制检测工作	按要求配备人员、制订相应的质保体系后满足要求

业主单位严格按照国家相关法律法规以及技术规范制定管理制度，完善以上提出各项要求后，能够满足国家相关的管理及技术层面要求。

6.6 环保投资及“三同时”竣工验收一览表

本项目环保投资一览表和环保竣工验收一览表见表 6-6 和表 6-7。

表 6-6 本项目拟采取的环境保护措施及环保投资一览表

项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资（万元）
辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全管理领导小组	--
	辐射安全管理制度：制定操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案，辐射事故应急预案等	
人员培训	工作人员参加辐射防护与安全培训和考核	20
监测仪器和防护用品	便携式中子辐射巡测仪、便携式 X-γ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪	300
	个人剂量监测档案和职业病健康档案	
	工作服、口罩、手套等	

表 6-7 环保竣工验收项目一览表

类型	验收项目	验收标准
辐射安全与防护	辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立的放射防护管理领导小组满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中的相关要求； 辐射安全管理制度：按环评要求制定相关制度，内容全面，具有可操作性。不断更新完善，严格落实并进行记录。
	人员培训	所有辐射工作人员参加中级辐射安全与防护培训，考核合格后上岗。
	监测仪器和防护用品	监测仪器：便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- γ 辐射巡测仪、便携式表面污染监测仪、个人剂量计和直读式个人剂量报警仪，建立个人剂量档案和职业病健康档案。 防护用品：为辐射工作人员配备工作服、口罩、手套、鞋套等工作用品。
	辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平	居留因子 $T \geq 1/2$ 处，剂量率限值为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ； 居留因子 $T < 1/2$ 处，剂量率限值为 $10\mu\text{Sv/h}$ ；
	工作人员年受照剂量	辐射工作人员的年受照剂量不超过 5mSv 。

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

随着我国社会经济的迅速发展，人民生活水平有了很大提高，医疗卫生条件得到进一步改善。然而，肿瘤（特别是恶性肿瘤）依然是国民健康水平进一步提高的主要障碍。据统计数据，2010年我国恶性肿瘤新发病例达220万人，因恶性肿瘤死亡人数达160万人。

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

本项目的建设将具有较好的社会效益和经济效益，具体如下：

（1）本项目的建设是济南市经济社会发展的需要，是提高现代医疗服务业发展水平、不断满足多层次、多样化医疗服务需求的体现。

（2）本项目建成后，将有力的提升济南市乃至山东省的医疗水平，可满足济南市及周边乃至全国人员的就医需求，造福于民。

（3）本项目的建设，对促进社会基础设施建设有重要而深远的意义，对山东省的医疗卫生事业的发展也将起到极大的推动作用，从而提高社会效益。

（4）本项目的经济效益主要来自项目运行后的财政收入。收入来源主要为医疗收入、药品收入、其他收入、财政差额拨款等。财务分析计算结果表明，本项目具有较好的经济效益。

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面：本项目的建筑为一栋地下两层、地上一层的质子维护楼。总建筑面积为 1160m²，主要建设回旋加速器大厅、旋转束治疗室、固定束治疗室及其配套用房、设施等。

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三个方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性物质和有害气体进入大气环境和水环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，给环境带来的这些影响均低于国家标准中规定的限值，环境影响很小。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于广大人民。因此，本项目的实施是正当的。

8 结论和承诺

8.1 结论

本项目在运行过程中严格遵守《中华人民共和国环境保护法》、环境保护部、地方环保部门颁布的有关法规标准，主要的环境影响评价结论如下。

(1) 建设项目概况：山东省肿瘤防治研究院拟在济南市槐荫区济南国际医学科学中心内建设技术创新与临床转化平台项目，本次环评对象为该项目质子维护楼使用的1套质子治疗系统，为I类射线装置。项目总投资为138285.93万元，其中环保投资约400万元，占总投资的0.3%。

(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。质子治疗装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。

本项目拟配置的质子治疗系统设计并建造了完善的辐射防护与安全设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，本项目核技术应用实施活动是正当的。

(3) 辐射环境现状：项目拟建厂址区域环境 γ 辐射剂量率水平、中子周围当量剂量率、地下水、土壤和中的天然放射性核素含量等均属当地天然本底正常水平。

(4) 环境影响评价结论：通过理论预测，质子治疗系统运行所致工作人员职业照射剂量最大为 $7.62\text{E-}01\text{mSv/a}$ ，所致公众照射的有效剂量最大为 $4.20\text{E-}02\text{mSv/a}$ ，均低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

(5) 辐射事故影响评价结论：质子治疗系统运行过程中，可能发生的故事

包括误入治疗室、误入加速器大厅、通风系统故障和冷却水泄漏。以“误入治疗室”为作为假想事故，估算得误入人员的受照剂量为0.3Gy。此类事故将威胁到误入人员的人身安全，但不会对周围环境造成影响。通过加强管理，严格遵守各种规章制度和操作规程，采取有效的事故预防措施，制定事故应急方案等，可有效防止事故的发生，减小和缓解事故的影响。

(6) 对业主单位从事本项目活动能力的分析评价表明，在按照项目设计方案以及本次环评所提出的各项要求实施完善后，项目单位满足中华人民共和国环境保护部令第3号《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》相关条款之规定，具备从事所申请的核技术应用活动（使用Ⅰ类、Ⅲ类射线装置）的能力。

(7) 公众参与：根据《中华人民共和国环境影响评价法》和中华人民共和国生态环境部制定的《环境影响评价公众参与办法》（生态环境部令 第4号）的相关规定，项目建设单位采取网络公示、现场粘贴公示和报纸公示三种方式，就本项目开展了公众参与调查。

本项目网络公示、现场粘贴和报纸公示期间，未收到任何反馈信息。因此，从公众参与的结果看，本项目的建设可行。

(8) 结论：综上所述，本项目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，本项目的建设对环境和影响符合环境保护的要求，故从环境影响的角度考虑，本项目的建设是可行的。

8.2 承诺与建议

8.2.1 承诺

(1) 项目单位按要求配备齐相应资质的专业人员；按要求对拟从事辐射的工作人员进行中级辐射安全与防护培训，通过考核后持证上岗。

(2) 项目单位在运行前补充完善的现有的辐射安全管理制度，并针对本项目的运行制定相应的操作规程、辐射防护措施、和设备检修维护等制度。

(3) 项目单位按照《城市放射性废物管理办法》的要求，做好放射性固体废物的分类收集、包装、存放和送贮（处）。

(4) 项目单位按照环境保护部令第3号《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第四十二条之规定编写放射性同位素安全与防护状况年度评估报告，于每年1月31日前报送辐射安全许可证发证机关。

8.2.2 建议

(1) 落实环评中提出的管理措施和辐射防护措施要求，不断完善相应的辐射管理规章制度和事故应急预案，并保证各种规章制度的有效执行，并受环保部门的监督检查并及时整改检查中发现的问题。

(2) 每半年至少进行一次辐射工作场所监测和环境监测，建立监测技术档案，监测数据定期上报省、市生态环境局备案。

(3) 项目建设和运行过程中，加强内部监督管理。