

编号：FA·HP·2024·12

核技术利用建设项目
中国科学院近代物理研究所销售（含建造）和使用
SIMM-01 型重离子治疗系统项目环境影响报告书
（公示版）

中国科学院近代物理研究所

2024 年 12 月

生态环境部监制

核技术利用建设项目
中国科学院近代物理研究所销售（含建造）和使用 SIMM-
01 型重离子治疗系统项目环境影响报告书

建设单位名称：中国科学院近代物理研究所

建设单位法人代表（签名或签章）：孙志宇

通讯地址：甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号

邮政编码：730010 **联系人：**杨博

电子邮箱：yangbo@impcas.ac.cn **联系电话：**0931-4969573

打印编号: 1725250498000

编制单位和编制人员情况表

项目编号	cahdad		
建设项目名称	中国科学院近代物理研究所销售(含建设)和使用SIMM-01型重离子治疗系统项目		
建设项目类别	55-172核技术应用建设项目		
环境影响评价文件类型	报告书		
一、建设单位情况			
单位名称(盖章)	中国科学院近代物理研究所		
统一社会信用代码	121000004388021159		
法定代表人(签字)	孙志宇		
主要负责人(签字)	李武元		
直接负责的主管人员(签字)	杨博		
二、编制单位情况			
单位名称(盖章)	中国原子能科学研究院		
统一社会信用代码	12100000400000309R		
三、编制人员情况			
1. 编制主持人			
姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
陈凌	06351123506110497	BH009720	
2. 主要编制人员			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
胡自正	第一、二、六、七、八章	BH058100	
陈凌	主持编制	BH009720	
王春霖	第三、四、五章	BH049368	
金蕾	审核	BH013175	

严源	审定	BH013174	
----	----	----------	--

目录

1	概述.....	1
1.1	项目性质	1
1.2	项目概况	1
1.2.1	单位概况.....	1
1.2.2	项目由来和意义.....	14
1.2.3	与原有项目依托关系.....	15
1.2.4	建设规模.....	16
1.2.5	产业政策符合性分析.....	17
1.3	编制依据	18
1.3.1	法律法规.....	18
1.3.2	技术导则、标准.....	19
1.3.3	其它文件、资料.....	20
1.4	评价标准	20
1.4.1	剂量限值和剂量约束值.....	20
1.4.2	辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	21
1.4.3	评价范围.....	22
1.5	安全责任划分	23
2	厂址与环境.....	25
2.1	地理位置	25
2.2	辐射环境质量现状调查	27
3	工程分析与源项.....	28
3.1	项目概况	28
3.2	重离子治疗系统概况	29
3.2.1	装置组成.....	29
3.2.2	工作原理.....	38
3.3	工作流程	49
3.3.1	生产.....	49
3.3.2	销售.....	50
3.3.3	安装调试.....	52
3.3.4	运行维护.....	57
3.4	污染源项分析	59
3.4.1	瞬发辐射源.....	60
3.4.2	感生放射性.....	64
3.5	本项目污染源分析	74
4	辐射安全与防护.....	75
4.1	辐射工作场所分区	75
4.2	辐射屏蔽设计	80

4.2.1	年剂量约束值	81
4.2.2	屏蔽体外剂量率控制水平	81
4.3	辐射屏蔽案例-惠州重离子医学中心项目	82
4.3.1	屏蔽设计	84
4.3.2	关注点设置	94
4.3.3	计算结果	103
4.4	安全联锁系统	112
4.4.1	系统设计准则	112
4.4.2	系统组成	112
4.5	场所辐射监测系统	127
4.6	通风系统	134
4.7	工作人员剂量控制措施	134
4.8	放射性三废治理	135
4.8.1	放射性废气	135
4.8.2	放射性废液及处理措施	136
4.8.3	放射性固体废物及其处理措施	136
4.9	拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析	137
4.10	III类射线装置	145
4.10.1	辐射工作场所分区	145
4.10.2	机房布局和辐射屏蔽	145
4.10.3	拟采取的其他安全与防护措施	145
5	环境影响分析	147
5.1	生产工作流程的环境影响分析	147
5.2	正常运行时的环境影响分析	147
5.2.1	工作人员受照剂量估算	147
5.2.2	公众受照剂量估算	154
5.3	事故工况下的环境影响	155
	5.3.1 人员误照射事故	155
	5.3.2 人员受照剂量超出年剂量限值	157
6	辐射安全管理	157
6.1	辐射安全与环境保护管理机构	157
6.2	辐射工作人员管理	159
6.3	辐射安全管理制度	160
6.4	辐射监测	160
6.4.1	环境监测	160
6.4.2	工作场所监测	161
6.4.3	个人剂量监测	162
6.5	监测设备	162
6.6	环保投资及竣工验收一览表	163
6.7	申请者从事辐射工作能力评价	165
6.7.1	辐射安全与环境保护管理	165
6.7.2	辐射工作人员培训	166
6.7.3	工作场所的安全防护措施	166

6.7.4	个人防护用品及监测仪器.....	167
6.7.5	规章制度.....	167
6.7.6	辐射事故应急预案.....	168
6.7.7	对用户单位的要求.....	169
6.7.8	辐射工作能力综合评价.....	169
7	利益-代价分析.....	171
7.1	利益分析.....	171
7.2	代价分析.....	171
8	结论和承诺.....	172
8.1	结论.....	172
8.2	承诺.....	174
附件 1 事业单位法人证书.....		175
附件 2 建设单位现辐射安全许可证正本及副本.....		176
附件 3 注册核安全工程师注册证.....		198
附件 4 2023 年度个人剂量检测报告.....		199
附件 5 2023 年近代物理所现有辐射工作场所监测和环境监测报告.....		232
附件 6 委托书.....		272

文中图目录

图 2-1 本项目地理位置图.....	25
图 2-2 本项目周围环境图.....	26
图 2-3 惠州重离子医学中心项目周围环境图.....	27
图 3-1 本项目重离子治疗装置束流中心线示意图.....	31
图 3-2 惠州重离子医学中心项目的重离子治疗装置总体布局及对应平面布局.....	32
图 3-3 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地上三层）.....	33
图 3-4 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地上二层）.....	34
图 3-5 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地上一层）.....	35
图 3-6 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地下一层）.....	36
图 3-7 惠州重离子医学中心项目地下工艺管廊平面图.....	37
图 3-8 ECR 离子源工作原理.....	39
图 3-9 离子源及低能传输系统布局图.....	40
图 3-10 直线加速器系统布局图.....	41
图 3-11 注入线系统布局图.....	42
图 3-12 同步加速器布局图.....	43
图 3-13 高能束运线系统布局图.....	44
图 3-14 新一代医用重离子加速器治疗装置（左图）与国际常识的“旋转治疗室”（右图） 旋转示意图.....	45
图 3-15 多角度治疗室束流切换示意图.....	46
图 3-16 放射治疗用 X 射线图像引导系统示意图（DR）.....	47
图 3-17 机械臂治疗床示意图.....	48
图 3-18 治疗头示意图.....	48
图 3-19 调制扫描示意图.....	49
图 3-20 生产流程图.....	50
图 3-21 安装调试流程图.....	54
图 3-22 设备检修工作流程图.....	55
图 3-23 设备检修、恢复运行工作流程图.....	58
图 3-24 穿过 PMMA 后碳离子的总能量分布.....	62
图 3-25 290MeV/u 碳离子穿过不同 PMMA 厚度后的剩余通量.....	63
图 3-26 不同能量碳离子的反应截面.....	64
图 3-27 冷却水计算模型.....	69
图 3-28 治疗头感生放射性计算模型.....	70
图 4-1 惠州重离子医学中心项目地下一层辐射工作场所分区示意图.....	76
图 4-2 惠州重离子医学中心项目地上一层辐射工作场所分区示意图.....	77
图 4-3 惠州重离子医学中心项目地上二层辐射工作场所分区示意图.....	78
图 4-4 惠州重离子医学中心项目地上三层辐射工作场所分区示意图.....	79
图 4-5 惠州重离子医学中心项目加速器大厅及水平治疗室计算模型.....	83
图 4-6 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅与多角度治疗室计算模型.....	84
图 4-7 惠州重离子医学中心项目地下一层屏蔽结构平面示意图.....	87
图 4-8 惠州重离子医学中心项目地上一层屏蔽结构平面示意图.....	88
图 4-9 惠州重离子医学中心项目地上二层屏蔽结构平面示意图.....	89
图 4-10 惠州重离子医学中心项目地上三层屏蔽结构平面示意图.....	90
图 4-11 惠州重离子医学中心项目屏蔽结构剖面示意图.....	91

图 4-12 惠州重离子医学中心项目水平治疗室、高能束运线大厅及加速器大厅顶板屏蔽厚度示意图.....	92
图 4-13 惠州重离子医学中心项目水平治疗室、高能束运线大厅及加速器大厅底板屏蔽厚度示意图.....	93
图 4-14 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地下一层）.....	98
图 4-15 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地上一层）.....	99
图 4-16 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地上二层）.....	100
图 4-17 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地上三层）.....	101
图 4-18 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点剖图示意图.....	102
图 4-19 惠州重离子医学中心项目加速器大厅剂量率分布图.....	107
图 4-20 惠州重离子医学中心项目水平终端剂量率分布图.....	107
图 4-21 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅（倾斜束线）剂量率分布图.....	108
图 4-22 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅（倾斜束线）地上二层平面剂量率分布图.....	109
图 4-23 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅（垂直束线）剂量率分布图.....	109
图 4-24 惠州重离子医学中心项目地下一层多角度治疗室剂量率分布图（水平照射）.....	110
图 4-25 惠州重离子医学中心项目地下一层多角度治疗室剂量率分布图（45° 照射）.....	110
图 4-26 惠州重离子医学中心项目地下一层多角度治疗室剂量率分布图（垂直照射）.....	111
图 4-27 惠州重离子医学中心项目地下工艺管廊剂量率分布图（垂直照射）.....	111
图 4-28 人身安全连锁系统设施示意图.....	113
图 4-29 地上三层辐射安全连锁设施安装点位及清场搜索路线图.....	114
图 4-30 地上二层辐射安全连锁设施安装点位及清场搜索路线图.....	115
图 4-31 地下一层辐射安全连锁设施安装点位及清场搜索路线图.....	116
图 4-32 地下工艺管廊辐射安全连锁设施安装点位及清场搜索路线图.....	117
图 4-33 辐射安全连锁设施安装点位剖面图.....	118
图 4-34 各连锁子区的安全连锁逻辑.....	124
图 4-35 加速器大厅及高能束运线大厅区域人身安全连锁系统主要连锁逻辑.....	125
图 4-36 水平治疗室区域人身安全连锁系统主要连锁逻辑.....	126
图 4-37 多角度治疗室区域人身安全连锁系统主要连锁逻辑.....	126
图 4-38 重离子治疗装置场所辐射监测系统结构.....	128
图 4-39 惠州重离子医学中心项目地上三层区域辐射监测点分布图.....	130
图 4-40 惠州重离子医学中心项目地上二层区域辐射监测点分布图.....	131
图 4-41 惠州重离子医学中心项目地上一层区域辐射监测点分布图.....	132
图 4-42 惠州重离子医学中心项目地下一层区域辐射监测点分布图.....	133
图 6-1 应急演练现场照片.....	169

文中表目录

表 1-1 现有射线装置情况.....	3
表 1-2 现有放射源情况.....	4
表 1-3 现有非密封放射性物质情况.....	8
表 1-4 个人剂量限值	20
表 1-5 屏蔽体外剂量率控制水平.....	22
表 1-6 工作人员进入控制区内部进行维修工作的准入条件.....	22
表 3-1 本项目拟销售（含建造）和使用射线装置基本情况.....	28
表 3-2 装置的主要技术规格参数.....	29
表 3-3 安装调试阶段出束时间.....	55
表 3-4 每台重离子治疗系统安装调试期间工作人员配置.....	57
表 3-5 工作人员进入控制区内部进行维修工作的准入条件.....	59
表 3-6 本项目束流损失情况	61
表 3-7 空气活化产生的主要放射性核素.....	65
表 3-8 地下一层多角度治疗室空气感生放射性静态饱和活度及活度浓度.....	65
表 3-9 地上三层水平治疗室空气感生放射性静态饱和活度及活度浓度.....	65
表 3-10 加速器大厅及高能束运线大厅空气感生放射性静态饱和活度及活度浓度.....	66
表 3-11 放射性核素衰变常数计算结果.....	67
表 3-12 重离子治疗装置各区域通风换气设计情况.....	67
表 3-13 重离子治疗机房内空气感生放射性核素动态饱和浓度/（Bq/m ³ ）.....	67
表 3-14 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数.....	68
表 3-15 冷却水中主要核素的活度及活度浓度.....	69
表 3-16 照射 3000 小时、停机 4 小时后同步引出口（厚铜靶）的放射性核素活度	71
表 3-17 照射 3000 小时、停机 4 小时后真空管道（不锈钢）的放射性核素活度	71
表 3-18 照射 12 小时、停机 4 小时后治疗室 Beamdump（聚乙烯）的放射性核素活度	72
表 3-19 照射 10min、停机 10min 后降能片的放射性核素活度与活度浓度.....	72
表 3-20 停机后不同时间距同步引出口表面不同距离处残余剂量率.....	72
表 3-21 停机后不同时间距真空管道表面不同距离处残余剂量率.....	73
表 3-22 停机后不同时间距治疗室 Beamdump 表面不同距离处残余剂量率.....	73
表 3-23 停机后不同时间，治疗头对治疗等中心点位置的残余剂量率.....	73
表 3-24 照射 10min、停机不同时间后，降能片的残余剂量率.....	73
表 3-25 本项目污染源分析	74
表 4-1 惠州重离子医学中心项目屏蔽设计一览表.....	84
表 4-2 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统屏蔽体外关注点.....	94
表 4-3 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统屏蔽体外关注点剂量率模拟计算结果， μ Sv/h.....	103
表 4-4 惠州重离子医学中心项目各区域安全联锁设施数量.....	119
表 4-5 声光报警灯状态	121
表 4-6 各联锁子区，各子区束流闸机联锁通道门.....	122
表 4-7 维修工作条件和工作类别.....	135
表 4-8 重离子治疗系统安装调试及运行维护期间产生的放射性固体废物年产生量.....	137
表 4-9 重离子治疗系统拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗辐射安全与防护要求》 （HJ1198-2021）中相关要求对比	139
表 4-10 治疗室尺寸和面积建设要求对标	145

表 5-1 安装调试期间隔室操作受照剂量计算结果.....	149
表 5-2 活化部件所致受照剂量结果.....	150
表 5-3 剂量转换因子	151
表 5-4 活化空气对调试工作人员所致的年有效剂量, mSv/a	152
表 5-5 调试期间每名工作人员年总受照剂量.....	152
表 5-6 运行维护期间现场服务工程师年总受照剂量.....	153
表 5-7 安装调试、运行维护期间站点工作人员年最大受照剂量.....	154
表 5-8 公众最大受照剂量	155
表 6-1 辐射安全管理委员会成员.....	158
表 6-2 本项目环境监测计划	161
表 6-3 工作场所监测计划.....	161
表 6-4 辐射监测设备清单.....	162
表 6-5 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表.....	163
表 6-6 环保竣工验收项目一览表	164

1 概述

1.1 项目性质

项目名称：中国科学院近代物理研究所销售（含建造）和使用 SIMM-01 重离子治疗系统项目

项目地点：甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号（销售（含建造））、用户现场（安装调试、运行维护）

项目性质：扩建

项目单位：中国科学院近代物理研究所

建设内容：中国科学院近代物理研究所（以下简称“近代物理所”）拟在国内对其研发的重离子治疗系统（碳离子最大能量 400MeV/u，型号：SIMM-01，I 类射线装置）及治疗室内的放射治疗用 X 射线图像引导系统（DR）（最大管电压 150kV，最大管电流 1000mA，III 类射线装置）进行销售（含建造）、安装调试和运行维护。重离子治疗系统每年最大销售（含建造）量为 2 台，放疗用 X 射线图像引导系统（DR）年销售量 40 台。生产方及安装调试、运行维护（接受用户单位委托）方为近代物理所，后续使用方为用户单位。该装置由离子源、直线加速器（注入器）、注入线、同步加速器（主加速器）、高能束运线及治疗室组成。

项目环保投资：项目环保手续投资 50 万元；每台（套）重离子治疗系统环保投资约 750 万，主要用于监测仪器与防护用品的购置。

1.2 项目概况

1.2.1 单位概况

1.2.1.1 单位简介

中国科学院近代物理研究所（事业单位法人证书见**附件 1**）位于甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号，创建于 1957 年，是新中国成立后按照我国原子能科学技术和核工业发展战略布局创建的一所核科学研究机构。近代物理所多年来一直以重离子核物理基础研究和相关领域的交叉研究为主要学科方向，相应发展加速器物理与技术及核技术，在重离子物理基础和应用研究的前沿领域完成了国家和省、部委等一系列重大科研项目，在世界上首次合成了 25 种新核素，并承担了国防科研 I、II 号任务，取得了一批具有国际先进水平的科研成果。截至 2019 年底，共有 197 项成果获得省、部级以上奖励，其中国家级奖励 18 项。主要科研成果先后 7 次入选全国十大科技成就、全国十大科技进展、全国十大科技新闻和全国基础科学研究十大新闻；“重（轻）离子合成新核素及衰变性质、核结构和生成机制研究”入选建国 60 周年“创新中国 60 项科技成就”；新核素合成、冷却储存环（CSR）工程、加速器驱动系统（ADS）关键核心技术等成果入选中国科学院改革开放四十年 40 项标志性重大成果。

1.2.1.2 核技术利用现状

1.2.1.2.1 许可种类和范围

本项目建设单位近代物理所已持有生态环境部颁发的辐射安全许可证（国环辐证[00298]，见**附件 2**），有效期至 2028 年 12 月 31 日。许可的种类和范围是：使用 I、II、III 类射线装置；使用 I、III、IV、V 类放射源；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所。

1.2.1.2.2 履行环保审批情况

表 1-1 现有射线装置情况

序号	装置名称	型号	类别	数量	活动种类	工作场所	环评情况	验收情况
1	中国超重元素专用加速器装置 ^①	自制	I类	1	使用	调试楼负一层	甘环核发[2021]14号	已验收
2	X射线生物辐照仪	X-RAD225	III类	1	使用	1号楼103室	已登记备案	不涉及
3	高功率离子源研究装置	自制	III类	1	使用	测磁大厅	已登记备案	不涉及
4	低能质子加速器	自制	II类	1	使用	工艺楼负一层	兰环核审[2022]05号	建成后正在验收
5	移动数字X射线摄影系统	晶睿	III类	1	使用	重离子束医学研究中心	已登记备案	不涉及
6	西门子CT模拟机	Somatom Sensation Open	III类	1	使用	重离子束医学研究中心CT机房	已登记备案	不涉及
7	兰州重离子加速器电子冷却存储	自制	I类	1	使用	兰州重离子加速器国家实验室	环函[1999]55号	环核验[2007]源02号
8	320kV高电荷态离子综合研究平台	自制	III类	1	使用	6号楼1楼116室	已登记备案	不涉及

9	同轴腔电子加速器建设项目	DQ-10/100	II类	2	使用	兰州新区中国科学院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园	新环审发[2021]9号	建成后待验收
---	--------------	-----------	-----	---	----	------------------------------	--------------	--------

注：①由原 25MeV 质子直线加速器改为中国超重元素专用加速器装置，改建环保手续齐全。

表 1-2 现有放射源情况

序号	核素名称	类别	活度（贝克）×枚数	活动种类
1	Th-232	V类	7.4E+7	使用
2	Sr/Y	III类	1E+12	使用
3	Sr-90(Y-90)	V类	7.4E+8	使用
4	Sr-90(Y-90)	V类	1.68E+4	使用
5	Ra-226/Be	V类	2.86E+5	使用
6	Ra-226/Be	V类	6.7E+5	使用
7	Ra-226	V类	1.78E+8	使用
8	Pu-239/Be	V类	1.84E+7	使用
9	Pu-239	III类	6E+10	使用
10	Pu-239	V类	1.83E+5	使用
11	Pu-238	IV类	1.5E+9	使用
12	Pu-238	IV类	3.7E+9	使用
13	Pu-238	V类	1.85E+8	使用

序号	核素名称	类别	活度 (贝克) × 枚数	活动种类
14	Na-22	V类	3.7E+7	使用
15	Fe-55	V类	1.85E+8	使用
16	Fe-55	V类	1.85E+6	使用
17	Fe-55	V类	7.04E+8	使用
18	Fe-55	V类	4.44E+7	使用
19	Fe-55	V类	2.93E+8	使用
20	Fe-55	V类	3.7E+8	使用
21	Eu-152	III类	7E+10	使用
22	Eu-152	IV类	7E+8	使用
23	Cs-137	III类	1E+11	使用
24	Cs-137	IV类	1E+9	使用
25	Cs-137	V类	1E+5	使用
26	Cs-137	V类	1.02E+5	使用
27	Cs-137	V类	1.05E+5	使用
28	Cs-137	V类	6.63E+4	使用
29	Cs-137	III类	7.4E+11	使用
30	Cs-137	V类	1.05E+5	使用

序号	核素名称	类别	活度 (贝克) × 枚数	活动种类
31	Cs-137	V类	4.05E+6	使用
32	Cs-137	V类	4.4E+8	使用
33	Cs-137	V类	1.34E+5	使用
34	Cs-137	V类	6.63E+4	使用
35	Cs-137	V类	8.5E+4	使用
36	Cs-137	III类	7.4E+11	使用
37	Cs-137	IV类	2.22E+10	使用
38	Cs-137	V类	3.7E+8	使用
39	Co-60	I类	2.22E+14	使用
40	Co-60	III类	4E+10	使用
41	Co-60	IV类	1.41E+10	使用
42	Co-60	V类	1.17E+6	使用
43	Co-60	III类	3.7E+10	使用
44	Co-57	V类	1.8E+9	使用
45	Cf-252	III类	3E+10	使用
46	Cf-252	V类	7.91E+5	使用
47	Cf-252	V类	8.96E+6	使用

序号	核素名称	类别	活度 (贝克) × 枚数	活动种类
48	Cf-252	V类	3.71E+4	使用
49	Bi-207	V类	1.8E+5	使用
50	Am-241/Be	III类	3.7E+11	使用
51	Am-241/Be	IV类	5.5E+9	使用
52	Am-241/Be	V类	1.3E+5	使用
53	Am-241	IV类	9.6E+8	使用
54	Am-241	III类	8E+10	使用
55	Am-241	V类	2.53E+5	使用
56	Am-241	V类	5.49E+4	使用
57	Am-241	V类	5.9E+4	使用
58	Am-241	V类	7.44E+4	使用
59	Am-241	V类	3.31E+4	使用
60	Am-241	V类	4.8E+8	使用
61	Am-241	V类	3.83E+4	使用
62	Am-241	III类	1.85E+11	使用
63	Th-228	V类	1E+5	使用
64	Gd-148	V类	1E+5	使用

序号	核素名称	类别	活度（贝克）×枚数	活动种类
65	Ac-227	V类	1E+5	使用

表 1-3 现有非密封放射性物质情况

序号	核素名称	场所等级	日等效最大操作量（贝可）	年最大用量（贝可）	使用场所
1	Gd-151	乙级场所	7.4E+6	1.08E+8	放射化学实验室：2号楼 负一层
2	Cm-245		7.4E+8	1.08E+8	
3	Ta-182		3.7E+8	7.4E+7	
4	Nb-95		3.7E+8	7.4E+7	
5	Pu-238		7.4E+8	1.48E+6	
6	Pu-244		7.4E+8	1.48E+7	
7	Pu-242		7.4E+8	1.48E+6	
8	AM-243		7.4E+8	7.4E+8	
9	Cs-137		7.4E+5	1.08E+8	

序号	核素名称	场所等级	日等效最大操作量（贝可）	年最大用量（贝可）	使用场所
10	Cm-247		7.4E+7	1.08E+8	
11	Gd-148		7.4E+8	1.08E+8	
12	Sn-126		7.4E+7	1.08E+8	
13	Am-241		7.4E+8	1.08E+8	
14	Se-79		7.4E+5	1.08E+8	
15	U-233		7.4E+8	1.08E+8	
16	Pm-146	乙级	7.4E+6	1.08E+8	放射化学实验室：2号楼 负一层
17	Cs-135		7.4E+5	1.08E+8	
18	U-235		7.4E+5	1.08E+8	
19	Pu-239		7.4E+8	1.08E+8	
20	Eu-152		7.4E+7	1.08E+8	
21	Sm-151		7.4E+6	1.08E+8	

序号	核素名称	场所等级	日等效最大操作量（贝可）	年最大用量（贝可）	使用场所
22	Th-229		7.4E+5	1.08E+8	
23	U-238		7.4E+5	1.08E+8	
24	Th-232		7.4E+5	1.08E+8	
25	Np-237		7.4E+7	1.08E+8	
26	Zr-93		7.4E+5	1.08E+8	
27	Cm-248		7.4E+8	1.08E+8	
28	Cf-252		7.4E+8	1.08E+8	
29	Co-60		7.4E+7	1.08E+8	
30	Na-22		7.4E+6	1.08E+8	
31	I-229		7.4E+5	1.08E+8	
32	Tc-99		7.4E+5	1.08E+8	
33	Pd-107		7.4E+5	1.08E+8	

序号	核素名称	场所等级	日等效最大操作量（贝可）	年最大用量（贝可）	使用场所
34	Ta-179		3.7E+8	7.4E+7	

1.2.1.3 辐射安全管理现状

1.2.1.3.1 辐射安全管理机构

辐射安全管理委员会是近代物理所辐射安全工作的管理机构，所长任委员会主任，主管所领导任委员会副主任，委员会委员由所技术安全办公室主任、辐射安全与防护室主任及其他相关部门负责人担任。

技术安全办公室是辐射安全管理委员会的执行部门，负责全所辐射安全工作的日常管理。

近代物理所注册核安全工程师由苏有武担任，其证书见附件 3。

1.2.1.3.2 辐射安全管理规章制度

中国科学院近代物理研究所制定了《中国科学院近代物理研究所辐射安全管理规定》、《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急预案》等，针对本项目制定了相应的制度和规程，主要包括：《辐射工作人员教育与培训规定》、《个人剂量监测管理规定》、《加速器销售，安装调试，维修维护辐射安全管理办法》、《加速器安全操作规程》、《加速器维护、检修规程》、《加速器辐射环境监测方案》。

1.2.1.3.3 辐射工作人员

根据生态环境部公告《核技术利用辐射安全与防护培训和考核》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），自 2020 年 1 月 1 日，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当通过培训平台报名并参加考核。2020 年 1 月 1 日前已取得的原培训合格证书在有效期内继续有效。

目前近代物理所 723 名辐射工作人员，均通过了生态环境部门认可的辐射安全与防护考核。同时对新入所的职工和学生进行辐射安全内部培训，培训内容包括辐射安全法规、辐射安全防护基础知识及近代物理所相关规章制度。

1.2.1.3.4 个人剂量监测

近代物理所为辐射工作人员配备了个人剂量计，并委托有资质单位进行个人剂量监测，每季度委托监测一次。安排专人负责个人剂量监测，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等。根据近代物理所 2023 年度个人剂量检测报告（见附件 4），个人剂量监测结果最大值为 0.60mSv，低于其年剂量约束值 5mSv。

1.2.1.3.5 工作场所及环境监测

近代物理所每年委托有资质单位开展辐射工作场所监测和环境监测，监测频次为 1 次/年。2023 年近代物理所现有辐射工作场所监测和环境监测报告见附件 5，由监测结果可知，近代物理所现有的射线装置、放射源以及非密封放射性物质使用期间，其机房周围 γ 辐射剂量率、中子周围剂量当量率和场所 β 表面污染水平均能满足相应标准规范的要求。

1.2.1.3.6 辐射事故应急管理情况

近代物理所依据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《核技术利用单位辐射事故应急预案的格式和内容（TBSRS047-2020）》等相关法律法规制定了《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急预案》，一旦发生辐射事故能快速响应，采取有效措施保护辐射工作人员、公众的健康和安全。应急预案中明确规定近代物理所有关意外放射事件处理组织机构及其职责、事故报告、信息发布和应急处理程序等内容。

发生辐射事故时，应立即启动本单位的辐射事故应急预案，采取必要的防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向卫生行政部门报告。同时，需进行工作人员的意外事故剂量监测和工作场所及周围环境的应急监测，并做好详细的监测记录。

近代物理所每年会组织进行辐射事故应急演练，近几年未发生辐射事故（事件），最近一次辐射事故应急演练的时间是 2023 年 11 月 1 日，于近代物理所园区内开展了“放射源丢失辐射事故应急演练”。通过演练，使相关工作人员对实际工作中可能出现的突发事件有了直观清楚的认识，加强了辐射工作人员的辐射安全防护意识和应急处置能力，同时也使得辐射工作人员对辐射事故应急处置的流程更加清楚和熟练。

1.2.2 项目由来和意义

癌症是严重危害人类健康的重大慢性疾病。根据世界卫生组织（WHO）发布的《2020 年世界癌症报告》，作为世界上人口最多的国家，中国占新增癌症病例的 23% 以上，其中约 50% 的新病例来自肝癌、食管癌和胃癌，死亡人数约占全球的 30%。

目前，放疗是肿瘤治疗最主要的方法之一。重粒子治疗是放疗技术范畴的一类，是当今国际公认的放疗尖端技术。与传统的光子线不同，重粒子线可以形成能量布拉格峰，能够在对肿瘤进行“集中爆破”的同时，极大减少对健康组织的伤害。重离子束治疗癌症不仅具有物理学剂量分布的优势，而且在生物学效应上的优势更为显著。特别适宜于外科手术、化疗、常规放疗无效或易复发的难治病例。由于重离子优越的物理特性和良好的生物学效应，重离子肿瘤治疗技术已逐渐发展成为当今世界最先进的肿瘤治疗技术，也被誉为 21 世纪最理想的放射用射线。世界上许多国家都倾注了大量的人力和物力进行重离子束肿瘤治疗装置的建设及基础研究，使得重离子束治疗成为放射治疗领域的前沿性研究热点，是一个国家医疗发展水平特别是肿瘤治疗水平的重要标志。

中国科学院近代物理研究所，先后完成了兰州重离子加速器 HIRFL、国家“九五”大科学工程 HIRFL-CSR、“十二五”国家重大科技基础设施强流重离子加速器装置 HIAF、重离子治癌专用装置 HIMM、兰州重离子研究装置分离扇回旋加速器 SSC 等装置的建设，在重离子加速器装置的设计、生产、建造方面积累了雄厚的技术实力和丰富的经验，得到了国内同行的广泛认可。因此近代物理所对于重离子治疗系统的研发和设计方面具有得天独厚的背景优势。

中国科学院近代物理研究所在国内首先提出并开展重离子束治癌研究，自 1993 年开展重离子束治癌的相关基础研究至今以来，在国家、甘肃省及中国科学院“九五”攀登计划、973、863 等重大科技计划项目的支持下，突破了一系列核心技术瓶颈，在甘肃武威建造了首台具有完全自主知识产权的医用重离子加速器示范装置。2020 年 3 月正式投入临床应用，截至 2024 年 9 月，该装置已完成近 1500 例来自国内北京、上海、香港、澳门、台湾等地区患者的临床治疗，疗效显著，实现了高质量的安全运行，效率达到国际先进水平。目前已推广 9 台，取得了很好的社会与经济效益。

中国科学院近代物理研究所负责设计建造的国家“十二五”重大科技基础设施建设项目（强流重离子加速器装置（HIAF）及加速器驱动嬗变研究装置（CiADS））项目均已落地广东省惠州市，为促进重离子治疗成果转换、推广新一代普惠型医用重离子加速器系统、响应习总书记对科学家和广大科技工作者提出的“面向人民生命健康”的要求，因此拟在广东省惠州市惠州重离子医学中心建设首台套 SIMM-01 型重离子治疗系统。

综上，本项目将助力重离子治疗技术的普及与推广，提高国民医疗卫生水平，加快我国高端医疗装置的国产化，降低国民治疗成本，推动重离子治疗成为一种普惠的肿瘤治疗手段。

1.2.3 与原有项目依托关系

1.2.3.1 建设地点

本项目为销售（含建造）和使用 SIMM-01 型重离子治疗系统，销售（含建造）地点依托甘肃省兰州市中国科学院近代物理研究所，重离子治疗系统安装调试、运行维护（接受用户单位委托）所在的辐射工作场所为用户单位重离子治疗机房。

1.2.3.2 人员管理

本项目所有辐射工作人员均属于近代物理所调配，存在与近代物理所内其他

核技术利用工作交叉的情况。

1.2.3.3 辐射管理机构及相关规章制度

近代物理所已成立辐射安全管理委员会和一系列辐射安全管理规章制度和辐射事故应急预案。本项目的辐射安全管理工作统一由该委员会负责，并在现有规章制度的基础上针对本项目核技术利用活动的内容和特点进行优化。

1.2.3.4 个人剂量监测

本项目所有辐射工作人员均已纳入了近代物理所目前的个人剂量监测计划中，委托有资质单位进行个人剂量监测，每季度委托监测一次。安排专人负责个人剂量监测，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等。

1.2.3.5 工作场所及环境监测

本项目制定了辐射监测计划，根据用户单位所在位置以及机房布局的不同，监测点位会有不同，但均依据制定的辐射监测计划进行。所需的便携式辐射监测仪器均为重新购置。

1.2.3.6 辐射事故应急管理

本项目依托《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急预案》并根据销售（含建造）和使用项目与常规项目的区别，对用户单位可能发生的辐射事故均进行考虑，以完善辐射事故应急预案。

1.2.4 建设规模

本项目建设内容包括重离子治疗系统的销售（含建造）、安装调试及后续的运行维护活动，不包括用户单位重离子治疗系统使用场所的土建施工，也不参与用户单位的临床使用和临床调试。项目涉及到的工作场所有两类，分为销售（含

建造)场所和用户使用场所。其中,销售(含建造)场所为中国科学院近代物理研究所地址,即甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号,装置由近代物理所设计、生产、验证(不涉及放射性操作)后直接发货至用户,装置的运输由近代物理所委托的运输公司负责。安装调试、运行维护(接受用户单位委托后)环节由近代物理所在用户单位使用射线装置的场所内进行。

由于 SIMM-01 型重离子治疗系统属于 I 类射线装置,且首台套示范装置建设地点位于广东省惠州市(惠州重离子医学中心项目),按照全链条管理原则,拟向广东省生态环境厅报批《中国科学院近代物理研究所销售(含建造)和使用 SIMM-01 型重离子治疗系统项目环评报告书》,报告书的重离子治疗系统的设备型号、参数与惠州重离子医学中心项目使用环评报告所涉一致。

SIMM-01 型重离子治疗系统的重离子最高能量为 400MeV/u,年最大销售(含建造)及安装调试量为 2 台。

放射治疗用 X 射线图像引导系统(DR),最大管电压 150kV,最大管电流 1000mA,本项目申请的 DR,年最大销售(含建造)及安装调试量为 40 台。

根据《射线装置分类办法》的规定,重离子治疗系统属于 I 类射线装置。此外,本项目申请使用的 40 台放射治疗用 X 射线图像引导系统(DR)均为 III 类射线装置。根据《中华人民共和国环境影响评价法》、《建设项目环境保护管理条例》和《建设项目环境影响评价分类管理名录》中的相关规定,本项目应进行环境影响评价,编制环境影响报告书。

因此,近代物理所委托中国原子能科学研究院对其“中国科学院近代物理研究所销售(含建造)和使用重离子治疗系统项目”进行环境影响评价,编制《中国科学院近代物理研究所销售(含建造)和使用重离子治疗系统项目环境影响报告书》,委托书及服务协议见**附件 6**。

1.2.5 产业政策符合性分析

根据《产业结构调整指导目录》(2024 年本),本项目属于其中**鼓励类**第六

项“核能”第 4 条“同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”项，本项目建设符合国家产业政策。

1.3 编制依据

1.3.1 法律法规

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

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

(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（中华人民共和国主席令第 6 号，2003 年 10 月 1 日）；

(4) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日修正版）；

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

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

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

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

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

(10) 中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 7 号（《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（2023 年 12 月 27 日））；

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

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

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

(14) 《关于加强互联网购销放射性同位素和射线装置安全管理的通知》（环辐射[2023]66 号，2023 年 10 月 23 日）；

(15) 《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，2015 年 2 月 26 日）；

1.3.2 技术导则、标准

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

(2) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

(3) 《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）；

(4) 《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；

(5) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

(6) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

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

(8) 《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）；

(9) 《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）

(10) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第一部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）；

(11) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；

(12) 《低、中水平放射性固体废物包安全标准》(GB12711-2018)；

(13) 《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》(GBZ2.1-2019)；

(14) 《工业企业厂界噪声排放标准》(GB12348-2008)。

1.3.3 其它文件、资料

(1) 近代物理所提供的与本项目相关的管理制度和技术资料等；

(2) NCRP REPORT NO.144 《Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities》。

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

本项目剂量限值执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)规定，具体限值见表 1-4。

表 1-4 个人剂量限值

辐射工作人员	公众关键人群组成员
连续 5 年的年平均有效剂量不超出 20mSv，且任何一年中的有效剂量不超出 50mSv。	年有效剂量不超出 1mSv，特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

1.4.1.2 本项目剂量约束值

(1) 辐射工作人员年剂量约束值

结合项目特点，本项目从事重离子治疗系统安装调试、运行维护的辐射工作

人员的年剂量约束值取上述限值的 1/4，即 5mSv/a。

正常情况下参与重离子治疗系统销售（含建造）和使用项目的工作人员，不参与在兰州近代物理所的辐射工作。对确须同时参与本项目及兰州近代物理所辐射工作的人员，其年剂量约束值按照兰州近代物理所 1mSv、用户单位进行辐射工作的年剂量约束值为 4mSv 进行管理，但本项目工作人员的年剂量约束值以用户单位进行辐射工作的年剂量约束值为主体，当超过 4mSv/a 时，将减少在兰州近代物理所辐射工作的工作量，以确保年剂量约束值不超过 5mSv。

（2）公众年剂量约束值

结合项目特点，本项目对公众造成的辐射影响主要来自设备安装调试和运行维护，公众剂量约束值取上述限值的 1/10，即 0.1mSv/a。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

参照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），本项目辐射工作场所屏蔽体外关注点处剂量率控制水平按照下述规定确定：

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

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

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

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

2) 按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,max}$ ($\mu\text{Sv/h}$): 人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所： $\dot{H}_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；

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

(2) 穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量 250 μSv 加以控制。

(3) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 30 cm 处的剂量率参考控制水平可按 $100\mu\text{Sv/h}$ 加以控制。

综上，屏蔽体外的各辐射工作场所剂量率控制水平总结如表 1-5 所示。

表 1-5 屏蔽体外剂量率控制水平

场所	剂量率控制水平	
	治疗室墙和入口门外表面 30cm 处、邻近治疗室的关注点、治疗室房顶外的地面附近和楼层，距治疗室顶外表面 30cm 处和在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处	居留因子 $T > 1/2$
居留因子 $T \leq 1/2$		10 $\mu\text{Sv/h}$
不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 30 cm 处	100 $\mu\text{Sv/h}$	
屏蔽体与土壤交界处*	5.5 mSv/h	

注：*根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5.5 mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5.5 mSv/h ”作为各辐射工作场所地板外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

对于运行维护过程中，工作人员需进入控制区内进行相关工作，其许可准入条件如下所示：

表 1-6 工作人员进入控制区内部进行维修工作的准入条件

维修工作条件	维修工作类别
距设备表面 30cm 处剂量率 $< 0.1\text{mSv/h}$	手工维修不受限制。
距设备表面 30cm 处剂量率 $0.1 \sim 1\text{mSv/h}$	手工维修需要控制时间。具体工作时间根据维修现场剂量率测量结果计算后确定。
距设备表面 30cm 处剂量率 $> 1\text{mSv/h}$	手工维修须采取相应的辐射防护措施。

1.4.3 评价范围

根据《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），放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围，对I类射线装置或I类放射源的项目可根据环境影响的范围适当扩大。

本项目建设内容为重离子治疗系统的销售（含建造）、安装调试和售后运行维护。销售（含建造）环节属于纯商务行为，不涉及放射性操作。电离辐射主要来自在用户单位装置使用场所内的调试和运行维护环节。因此，销售（含建造）场所不作为辐射工作场所管理。重离子治疗系统安装调试、运行维护（接受用户单位委托）所在的辐射工作场所为用户单位重离子治疗机房，近代物理所的安装调试和运行维护须在用户单位取得重离子治疗系统的环评批复后方可开展。本项目注册地点位于甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号，仅进行生产（不涉及放射性操作）、商务活动，不涉及射线装置出束。其次，用户单位重离子治疗系统的评价范围需以其进行环境影响评价时确定的评价范围为准。

本项目保护目标为评价范围内的公众、医护人员、陪同家属、院内和周边道路的流动人员等，本次评价以惠州重离子医学中心项目为例，评价范围取实体屏蔽物边界外 100m。

1.5 安全责任划分

本项目涉及近代物理所和用户单位（医院）两方，其各自的安全责任划分如下：

（1）近代物理所：负责依据合同签署时的验收条款对设备参数逐一测试，验证交付的设备符合客户的要求；负责重离子治疗系统移交前（安装调试阶段）的辐射安全责任；在用户单位委托的情况下，负责本单位辐射工作人员在运行维护过程中的辐射安全责任。

（2）用户单位（医院）：用户单位作为重离子治疗系统的使用方，负责提供能够满足相关法规标准要求的辐射工作场所；负责安装调试和运行维护过程中的安全保卫工作；负责重离子治疗系统投入临床使用时的安全责任；负责重离子治疗系统产生的放射性三废治理（安装调试阶段及运行维护阶段）；负责装置交

付后的辐射安全责任。

2 厂址与环境

2.1 地理位置

中国近代物理研究所位于甘肃省兰州市南昌路 509 号，地理位置如图 2-1 所示。近代物理所周围以居民社区、研究院及学校为主，北侧为兰州化物所科化小区，南侧为兰州大学，东侧为中国科学院兰州分院化物所理化楼，西侧为天水中路，周围环境图见图 2-2。



图 2-1 本项目地理位置图



图 2-2 本项目周围环境图

本项目的首台套装置落地于广东省惠州市惠城区金山湖 8-01-02 地块（惠州重离子医学中心项目），其周围环境图如图 2-3 所示。



图 2-3 惠州重离子医学中心项目周围环境图

2.2 辐射环境质量现状调查

根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021），“辐射本底调查指新建设施投料（或装料）运行之前、或在某项设施实践开始之前，对特定区域环境中已存在的辐射水平、环境介质中放射性核素的含量以及为评价公众剂量所需的环境参数、社会状况所进行的全面调查”。因此，辐射环境质量现状调查为针对辐射工作场所周围环境开展的调查。

本项目涉及的辐射工作场所包括安装调试、运行维护时所在的用户使用场所。根据对本项目建设内容的分析，销售（含建造）场所内不设装置暂存场所，属于纯商务活动场所，销售过程不涉及放射性操作。安装调试和运行维护场所为用户单位装置使用场所，涉及到开机出束。

由于装置使用场所具有不确定性，其周围辐射环境质量现状因用户单位不同而不同。同时，考虑到用户单位在取得使用该装置的资质前，需编制环境影响评

价文件，并委托有相关资质的辐射监测机构对装置使用场所进行辐射环境质量现状调查。用户进行的辐射环境质量现状调查与本项目需要进行的辐射环境质量现状是一致的。因此，本项目不再单独进行辐射环境质量现状调查。

3 工程分析与源项

3.1 项目概况

本项目拟在国内销售（含建造）由近代物理所设计、生产的 SIMM-01 型重离子治疗系统，并负责用户单位后续的安装调试、运行维护（接受用户单位委托）。重离子治疗系统的规划年最大销售（含建造）量和安装调试量为 2 台，放射治疗用 X 射线图像引导系统（DR）规划年最大销售（含建造）量和安装调试量为 40 台，其基本情况见表 3-1。

本次评价以惠州重离子医学中心项目工作场所为例。

表 3-1 本项目拟销售（含建造）和使用射线装置基本情况

装置名称	规格型号	加速粒子	主要参数（最大能量）	生产厂家	年最大销售（含建造）数量	类别
重离子治疗系统	SIMM-01	^{12}C	能量范围：120~400MeV/u； 终端流强： 5×10^8 pps	中国科学院近代物理研究所	2	I
放射治疗用 X 射线图像引导系统（DR）	待定	电子	最大管电压为 150kV， 最大管电流为 1000mA	待定	40	III

3.2 重离子治疗系统概况

3.2.1 装置组成

近代物理所设计及生产的重离子治疗系统主要由离子源、直线加速器（注入器）、注入线、同步加速器（主加速器）、高能束运线、若干间治疗室（治疗室数量、照射角度可选）组成。

离子源系统产生的包含 C^{4+} 离子的混合离子束，由低能传输系统输运并选择分析后，将 C^{4+} 离子注入到直线加速器，通过电场加速至能量 $4MeV/u$ 后，经剥离膜剥离为 $^{12}C^{6+}$ 引出至注入线系统，再注入到同步加速器，加速到治疗室终端所需的能量（ $120MeV/u-400MeV/u$ ），最后经高能束运线配送至各治疗室。

从治疗原理上，SIMM-01 重离子治疗系统与目前国际上的重离子治疗系统是相同的，都是利用碳离子突出的生物学效应（碳离子可以使 DNA 双链断裂，不易复发，局部控制效果好，生存率高）与物理学效应（碳离子束流的大部分能量沉积在肿瘤处，对健康组织的损伤小，副作用小）。因此，在束流能量等方面与国际重离子治疗装置是一致的。

治疗室数目由用户单位与近代物理所签订合同时确定，本项目以惠州重离子医学中心项目为例进行评价，其系统构成具体见图 3-1。

SIMM-01 重离子治疗系统主要解决目前国际上的重离子治疗装置面临的占地面积大、束流配送效率低的问题，导致设备成本高，治疗效率低，治疗成本高。通过动力学优化设计，降低装置核心同步加速器的周长，由目前国际同类装置最短的 56m 减小至约 35m，大幅降低占地面积，降低设备成本。同时国际首次提出采用旋转束线方案，提高束流配送效率，即提高束流有效利用率和治疗效率，从而降低治疗成本。新一代医用重离子加速器治疗装置的主要技术规格参数表 3-2 所示。

表 3-2 装置的主要技术规格参数

离子种类	$^{12}C^{6+}$
------	---------------

最高能量-MeV/u	400
最大离子射程-mm	270
射程调节步长-mm	2
终端流强-pps	5×10^8
治疗模式	主动扫描

图 3-2 和图 3-1 分别为惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置总体布局及每一层平面布局和本项目重离子治疗装置束流中心线示意图。多角度旋转治疗室位于地下一层，有 8 个治疗室，如图 3-2 所示。图 3-1 所示的每个多角度治疗室都有三个照射角度，分别为水平， 45° 与垂直，它有两种运行模式，其一是可以通过旋转点 1，同时带动垂直束线和 45° 束线，至其他治疗室；也可以通过旋转点 2，只转动水平束线至其他治疗室，这两个旋转点是相互独立，不受影响的。

束流从地上三层的同步加速器引出后，会垂直向下偏转传输至地下三层的任意一个照射角度，可以为垂直、 45° 或水平照射角度，即同一时刻束流只能达到 1 个照射方向。旋转点 1 可以带动垂直束线或 45° 束线运动，这两条束线始终指向同一个治疗室。旋转点 2 带动水平束线运行，可以与垂直束线或 45° 束线指向的治疗室相同，也可以不同，因为两个旋转点运动是相互独立的。总之，同一时刻三条束线可以对同一治疗室，或垂直束线与 45° 束线对应一个治疗室，而水平束线对应地下一层剩余 7 个治疗室中的 1 个。

旋转点 1 与旋转点 2 均采用磁流体密封方案，在转动过程中真空度保持不变，因此旋转对束流的影响较小。在旋转点 1 或旋转点 2 转动时，不会有束流经过正在转动的束线。

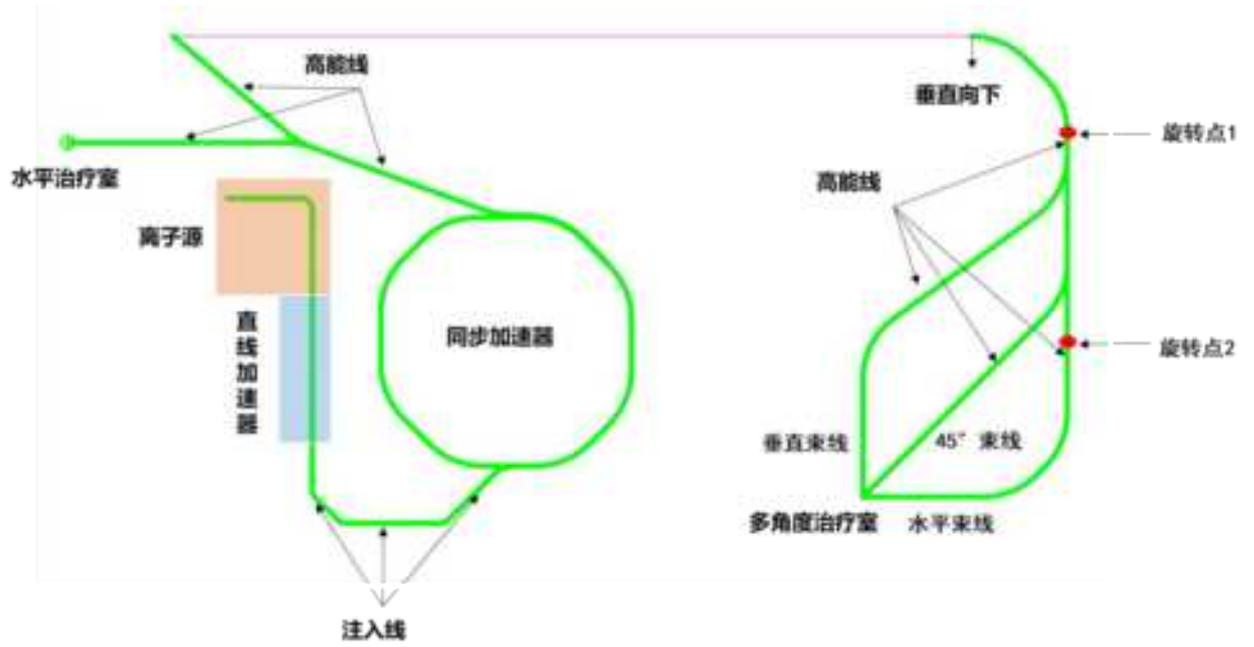


图 3-1 本项目重离子治疗装置束流中心线示意图

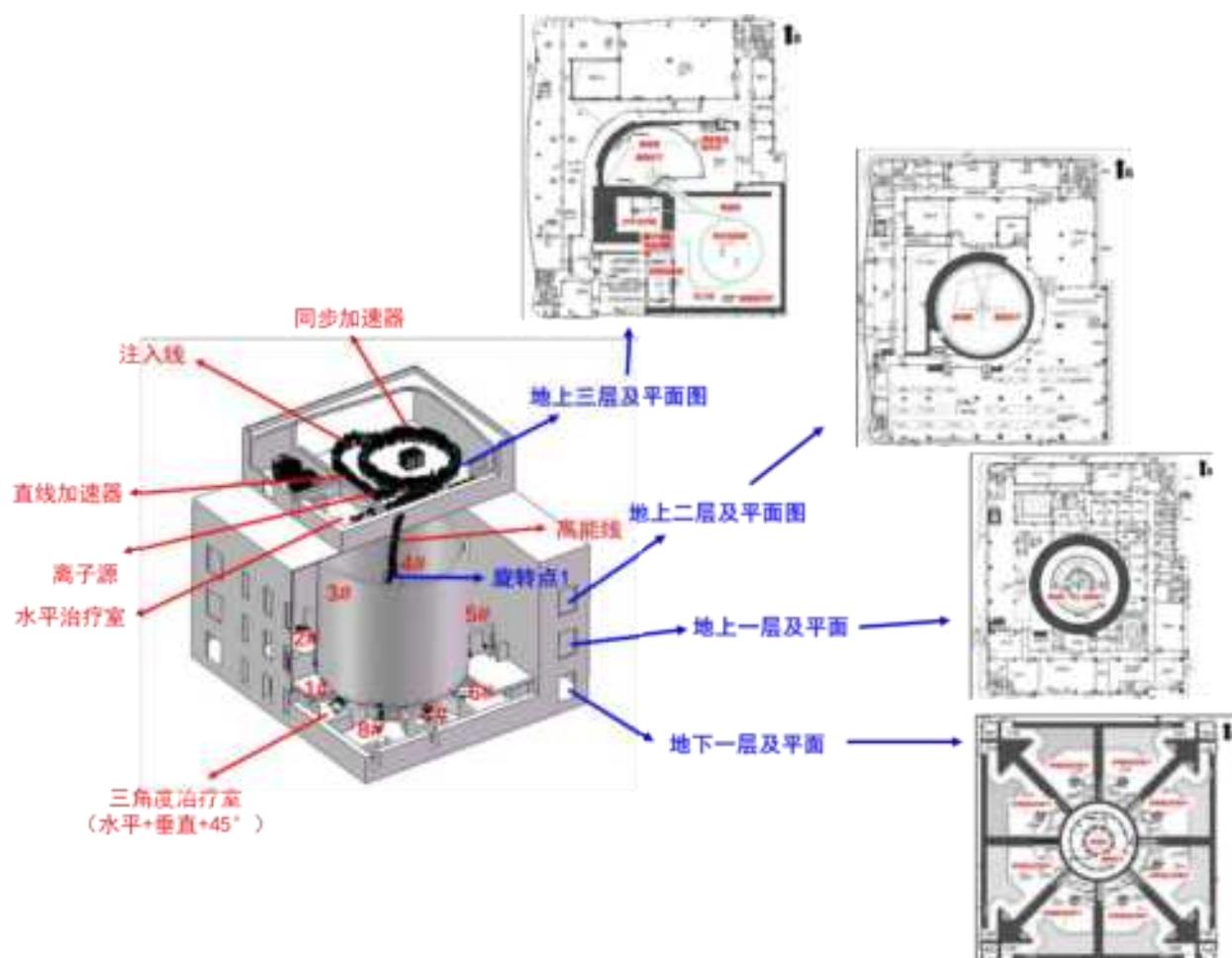


图 3-2 惠州重离子医学中心项目的重离子治疗装置总体布局及对应平面布局
 (旋转点 1 以上为固定束线, 以下为三条旋转束线, 分别对应垂直、45° 以及水平照射角度)

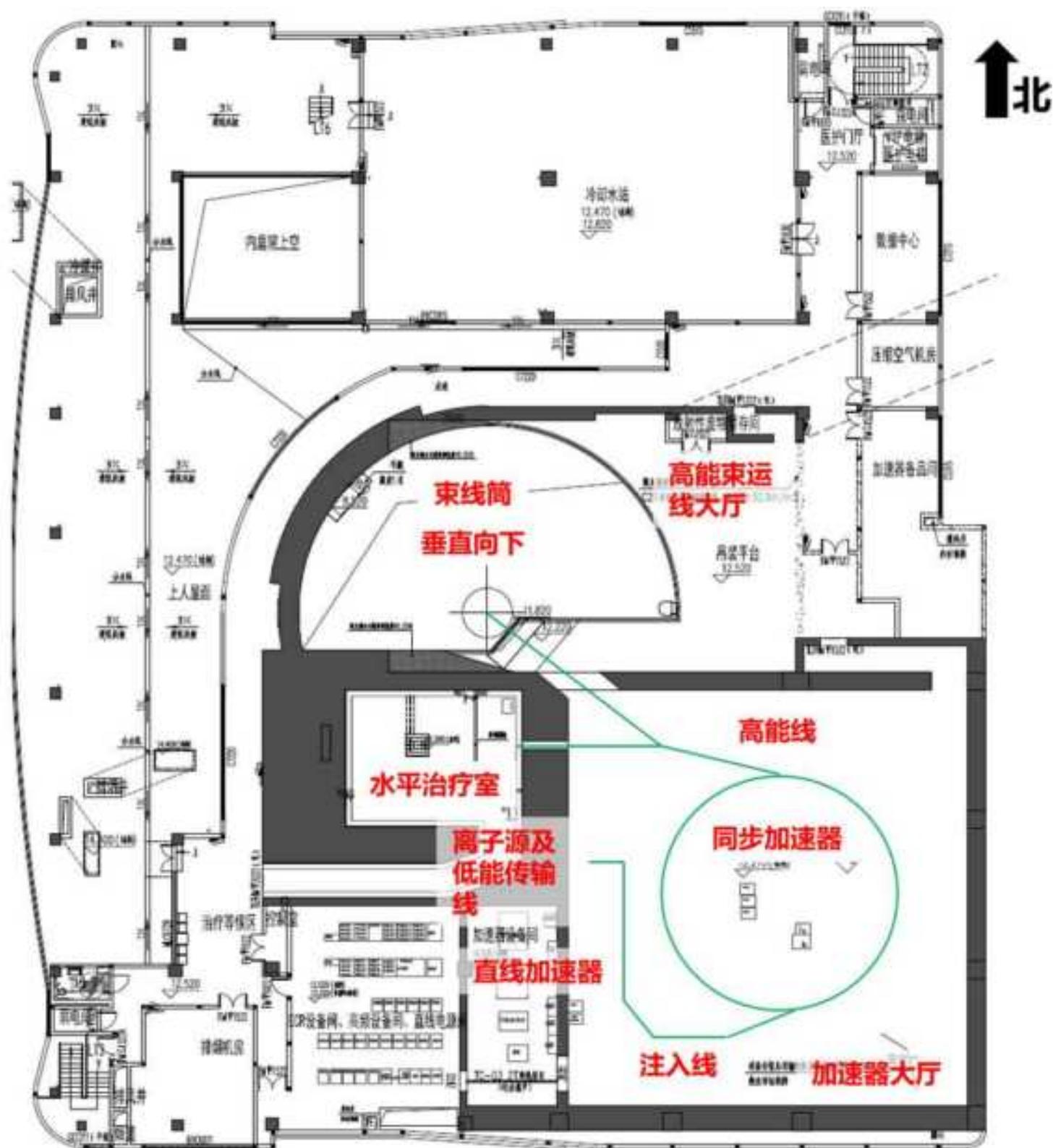


图 3-3 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地上三层）

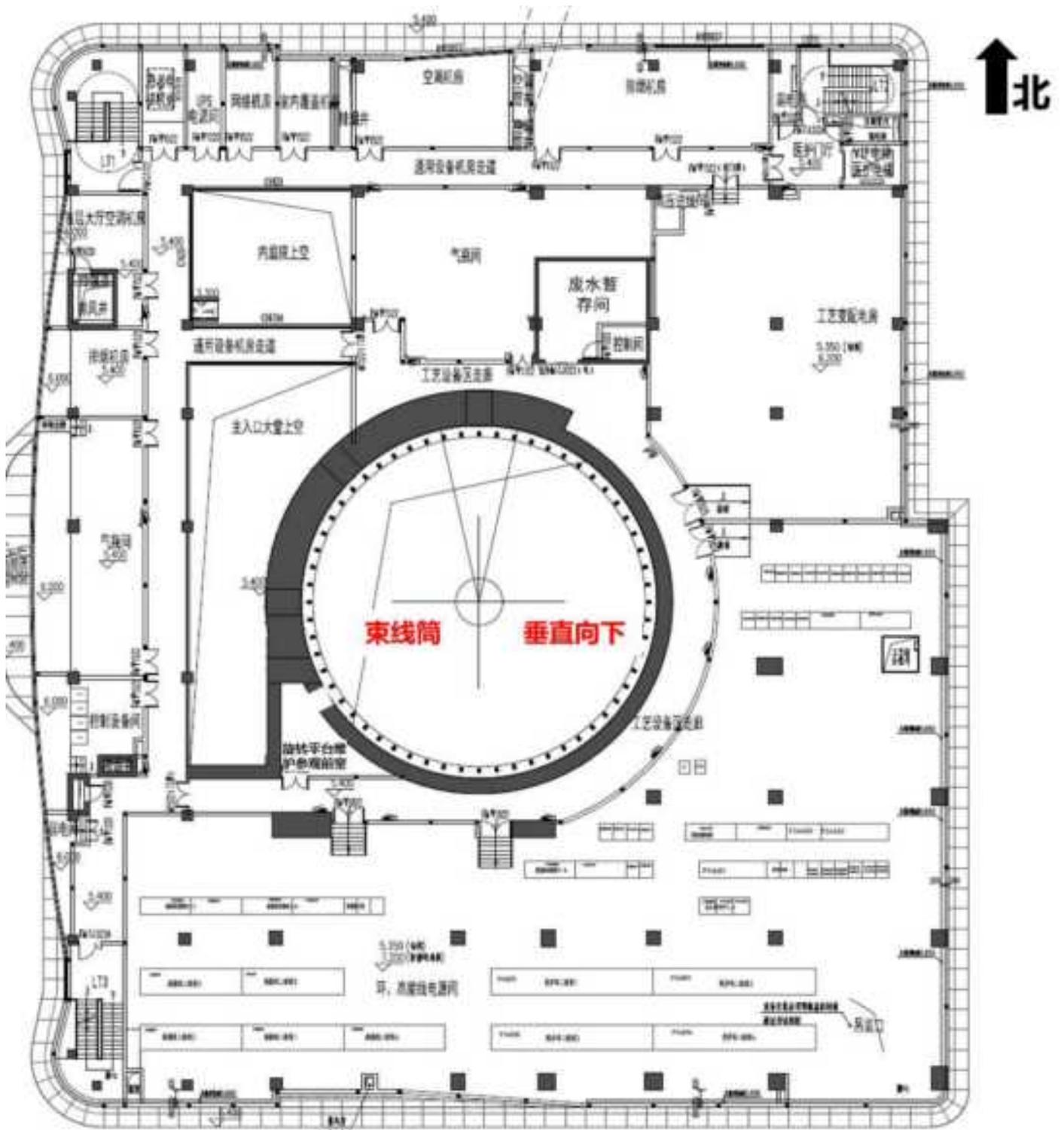


图 3-4 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地上二层）

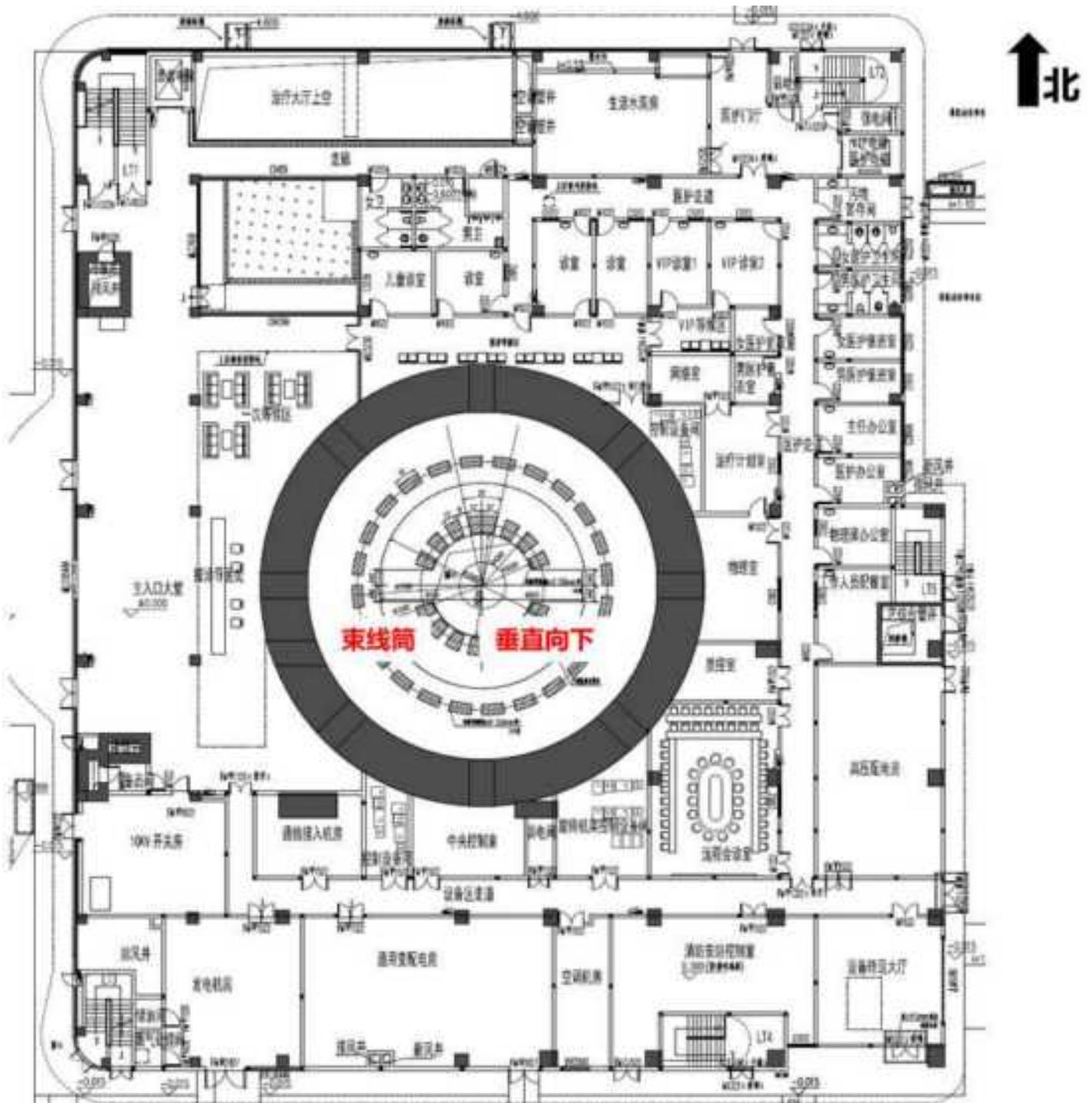


图 3-5 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地上一层）

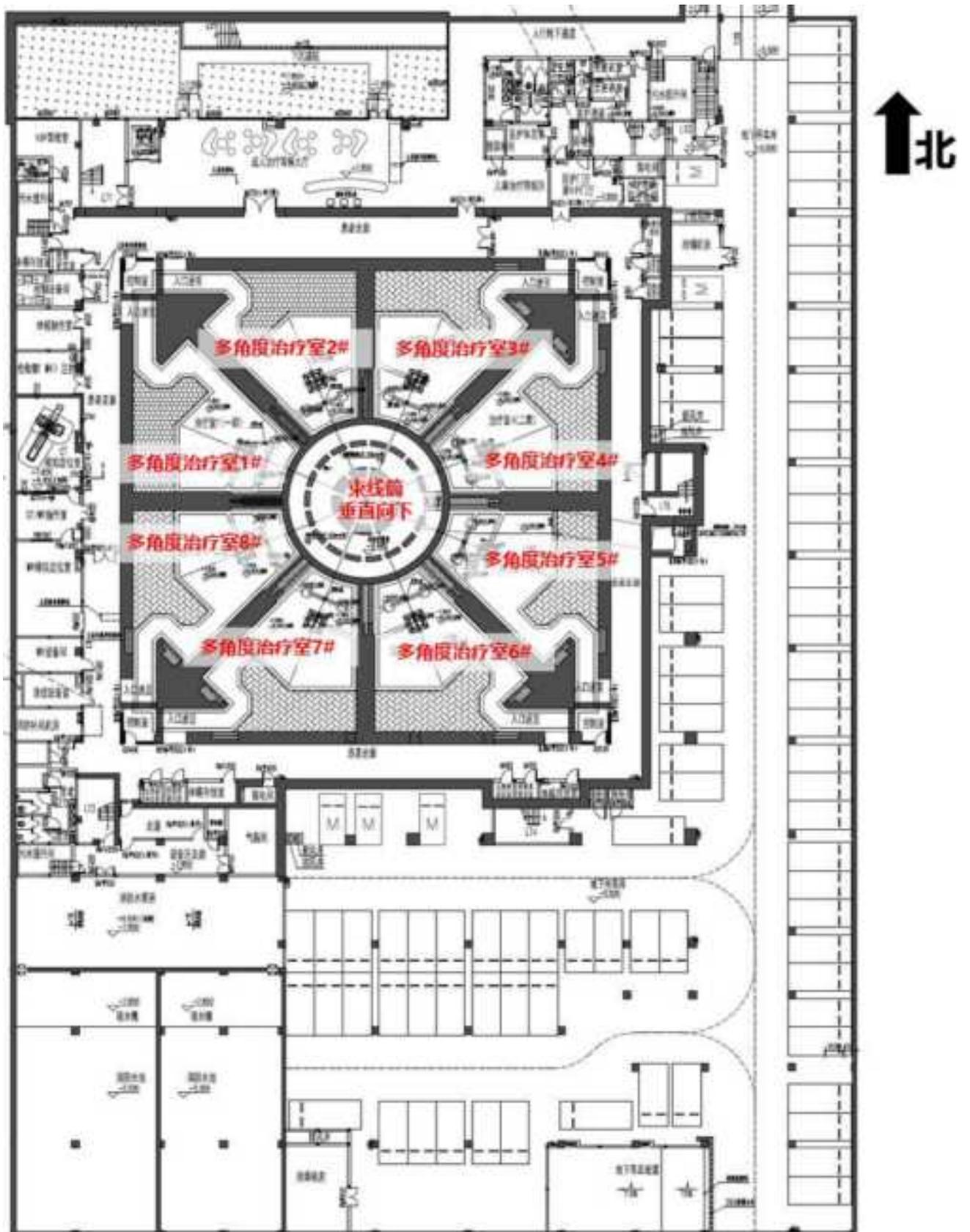


图 3-6 惠州重离子医学中心项目重离子治疗装置平面布局示意图（地下一层）

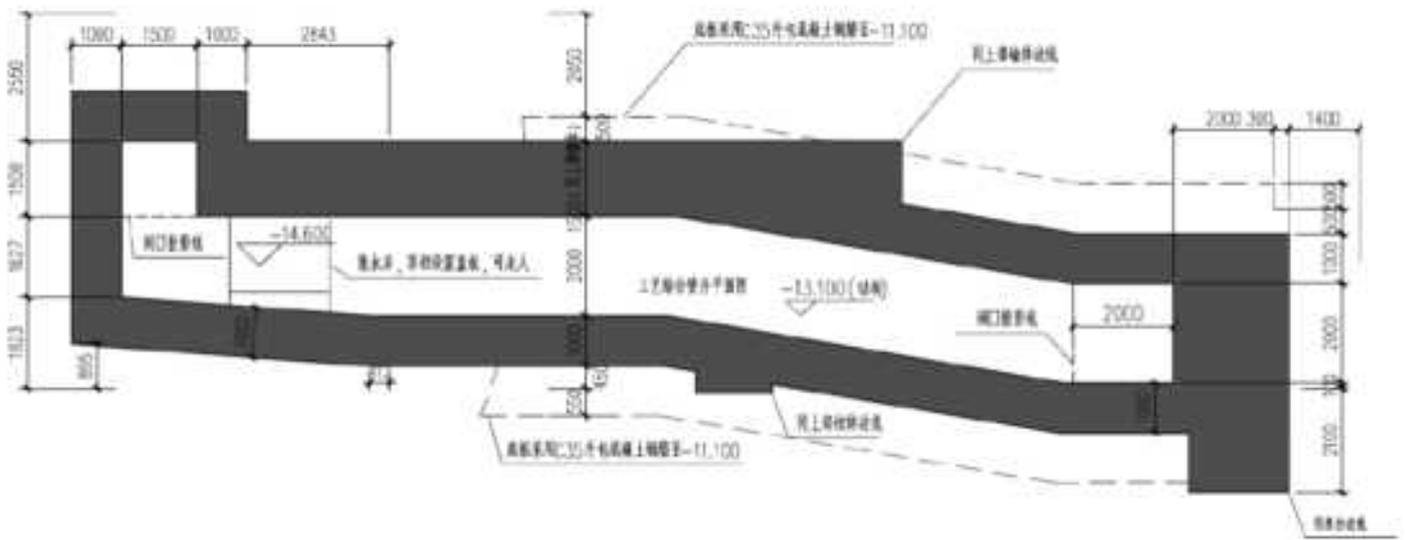


图 3-7 惠州重离子医学中心项目地下工艺管廊平面图

3.2.2 工作原理

本项目重离子治疗装置工作原理为从ECR（Electron Cyclotron Resonance）电子回旋共振离子源引出来的束流是不同电荷态的碳离子混合束，包括 C^{4+} ， C^{5+} ， C^{6+} 等，在经过分析二极铁后，会根据加载的电流值筛选出目标离子 C^{4+} ，此时变成单一 C^{4+} 离子传输至直线加速器。在直线加速器末端有剥离膜，会将单一的 C^{4+} 剥离成 C^{6+} ，向后经过注入线传输至同步加速器， C^{6+} 束流累积加速后输送到治疗终端，最后在终端的使用的是 C^{6+} 束流，经历碳离子加速、注入、引出和治疗。各部分详细的工作原理如下。

3.2.2.1 离子源及低能传输系统

本项目采用 ECR（Electron Cyclotron Resonance）电子回旋共振离子源作为源头。ECR 离子源工作原理如图 3-8 所示，利用微波馈入到工作磁场区，由轴向磁场与径向六极磁场叠加而成，被称为“最小 B”场型。当馈入的微波频率与电子在磁场中的回旋频率相等时电子将通过共振吸收馈入微波的能量，使电子加热产生高能电子。ECR 离子源的等离子体弧腔位于磁场工作区内，馈入的中性气体原子和这些获得微波能量的自由电子碰撞，通过多次电离碰撞过程产生多电荷态离子。在等离子体弧腔上加上几十千伏的正高压，等离子体当中的离子会通过电极被引出而形成很强的离子束。其中大部分多电荷态离子将向束流引出区漂移，引出的多电荷态离子混合束流通过二极分析磁铁的筛选，可以得到所需电荷态的离子束流 $^{12}C^{4+}$ 。

离子源系统引出的离子束含有多种质荷比的混合态离子束，引出能量为 10keV/u，利用不同能量质荷比离子束在分析系统末端横向相点位置不同的原理，筛选出直线加速器需要的 $^{12}C^{4+}$ 离子束。由于直线加速器装置要实现高效率传输和加速，对注入的离子束束流品质有要求，需要经横向发射度匹配系统及纵向发射度匹配系统匹配才能注入。直线加速器的后端是同步加速器装置，因同步加速器只有在束流注入期间需要来自其前端系统的 $^{12}C^{4+}$ 离子束，为了避免中高能 $^{12}C^{4+}$ 离子束在同步加速器入口大量损失造成设备损伤，在低能传输系统中增加了

斩束器，离子源及低能传输系统布局如图 3-9 所示。

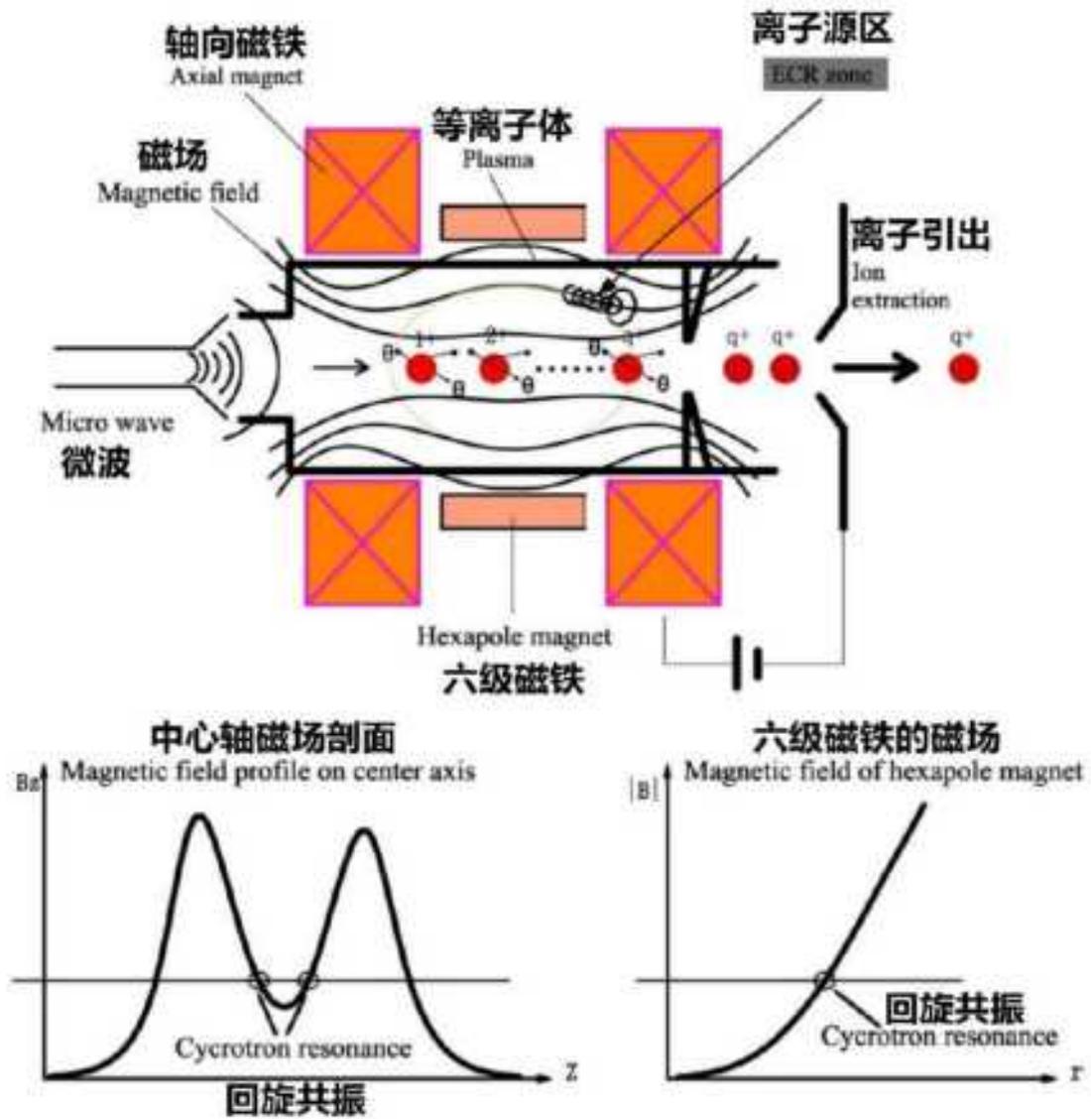


图 3-8 ECR 离子源工作原理

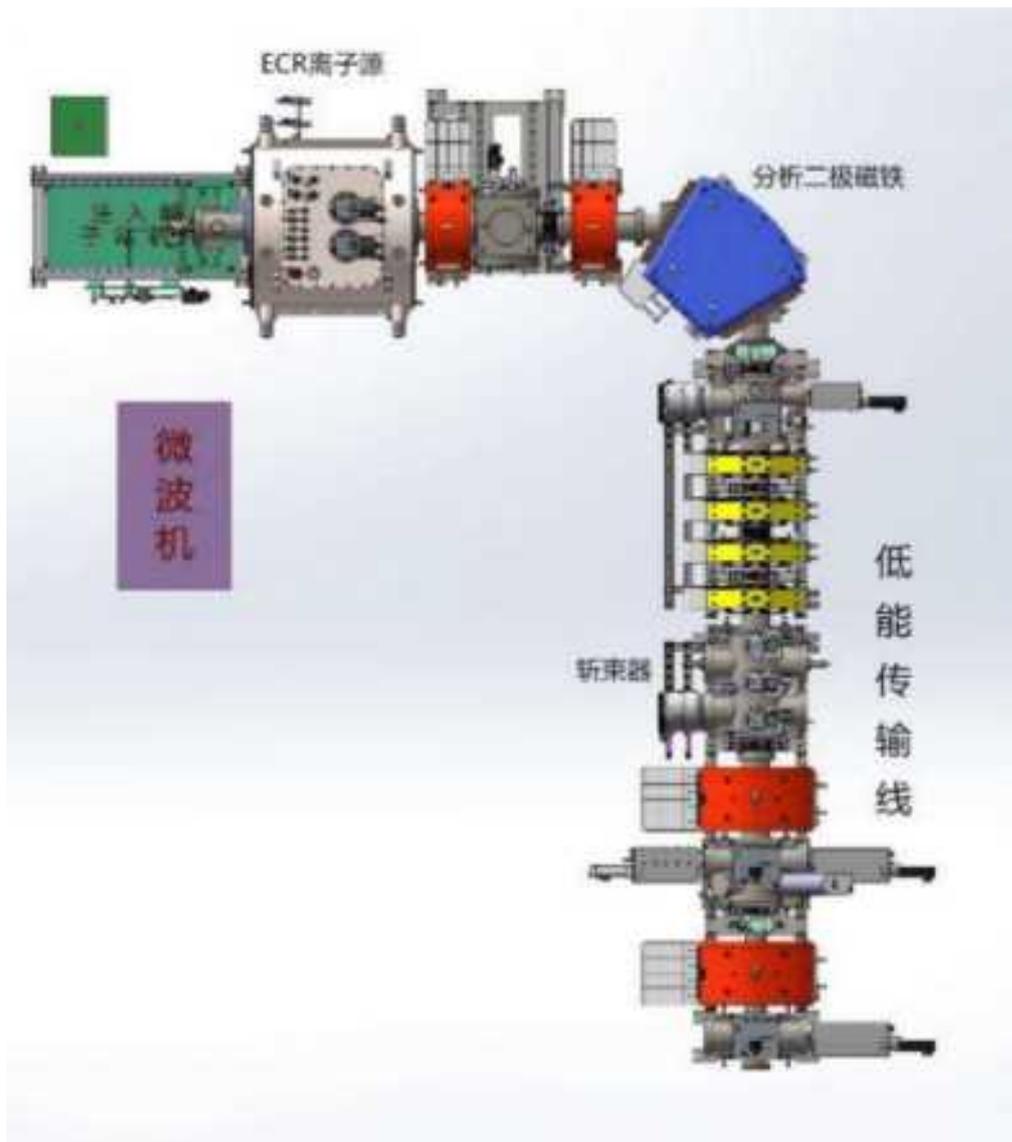


图 3-9 离子源及低能传输系统布局图

3.2.2.2 直线加速器系统

直线加速器作为同步加速器（主加速器）的注入器，旨在对束流进行初加速，最终可以为同步加速器提供 $4\text{MeV}/u$ 的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 离子束。直线加速器总体布局图如图 3-10 所示，主要由 RFQ（Radio Frequency Quadrupole）射频四极腔体、MEBT（Medium Energy Beam Transport line 中能束流匹配线、CH 型 DTL（Drift Tube Linacs）漂移管型腔体和 HEBT（High Energy Beam Transport line）高能束流匹配线组成。

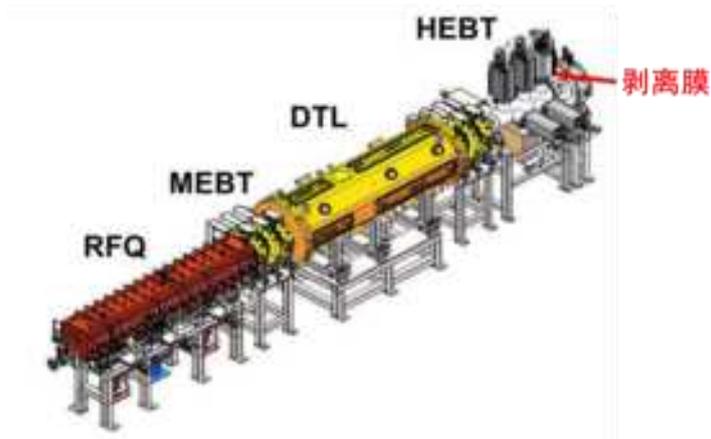


图 3-10 直线加速器系统布局图

直线加速器首先利用 RFQ 将离子源引出的 10keV/u 的 $^{12}\text{C}^{4+}$ 离子束由中能传输线 MEBT 匹配至 DTL 入口，随后利用 DTL 腔内的高频轴向电场加速至 4MeV/u ，再经 HEBT 匹配传输至注入线。同时，通过剥离膜将 $^{12}\text{C}^{4+}$ 剥离为 $^{12}\text{C}^{6+}$ ，并利用散束器实现与同步加速器的纵向匹配。

3.2.2.3 注入线系统

注入线系统是连接直线加速器与同步加速器的“桥梁”，需要实现同步加速器的高效匹配。注入线利用横向聚散焦的四极磁铁在水平与垂直方向把束流限定在真空管道内，分布于四极磁铁之间的二极磁铁将注入束偏转至同步加速器入口。



图 3-11 注入线系统布局图

3.2.2.4 同步加速器系统

同步加速器是加速器装置的核心，具有注入累积、加速与引出的能力。同步加速器采用多圈注入方式对注入线传输的能量为 $4\text{MeV/u}@C^{6+}$ 束流进行了累积，然后利用磁合金高频腔体产生的电场将碳离子束加速到 $120\text{MeV/u}-400\text{MeV/u}$ ，采用三阶共振引出方法将束流引出至高能线，并输送到治疗终端。同步加速器系统布局图如图 3-12 所示。

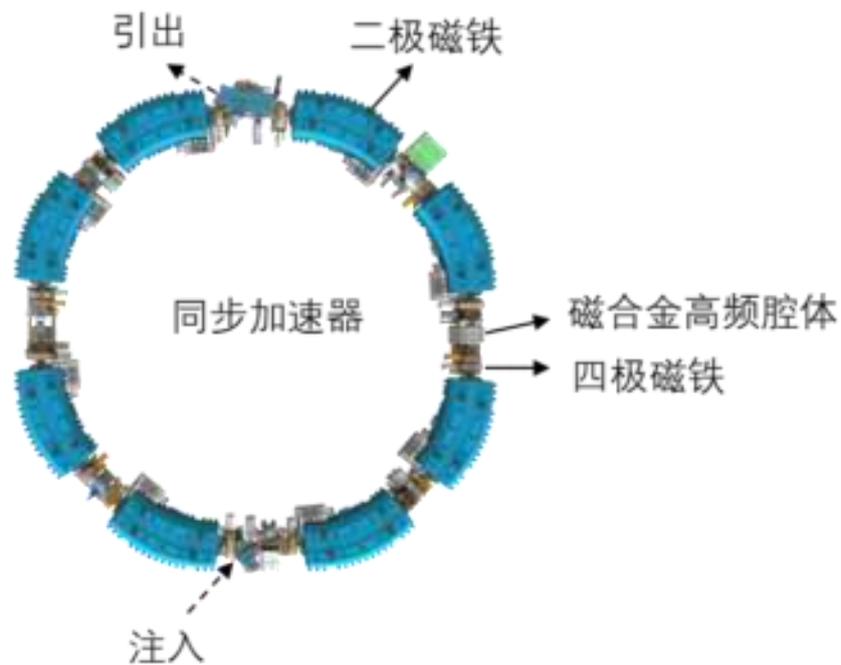


图 3-12 同步加速器布局图

3.2.2.5 高能束运线系统

高能束运线（可简称为“高能线”）是连接同步加速器与治疗终端的桥梁，是利用横向聚散焦的四极磁铁在水平与垂直方向把束流限定在真空管道内，用分布于四极磁铁之间的二极磁铁将引出束偏转至各治疗终端，高能束运线系统布局图如图 3-13 所示。

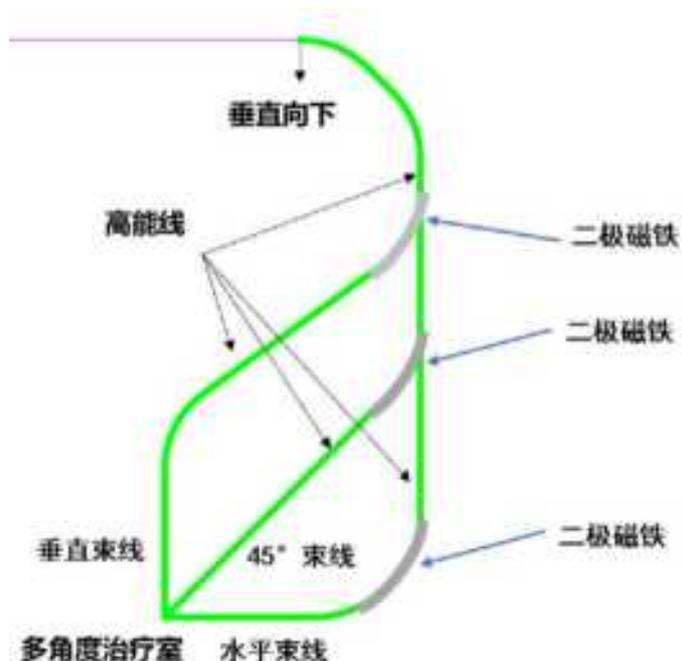


图 3-13 高能束运线系统布局图

3.2.2.6 治疗终端系统

治疗终端系统为治疗病人的场所，以惠州重离子医学中心项目为例，其重离子治疗系统配置了 8 间多角度治疗室和 1 间水平束治疗室，其中多角度治疗室为 1#~8#治疗室、9#治疗室为水平治疗室。每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一间治疗室提供束流，具体结构布置分述如下：

- (1) 多角度治疗室（三个治疗角度：分别是水平照射、45° 照射和垂直照射）

新一代医用重离子加速器治疗装置的多角度治疗室与国际常识的“旋转治疗室”的不同点有：

- ① 旋转轴方向不同。本项目多角度治疗室是轴心垂直地面而旋转，如图 3-14（左图）所示，而国际上的旋转束治疗室是轴心平行于地面为旋转，如图 3-14（右图）所示。

- ② 新一代医用重离子加速器治疗装置通过束线旋转可以实现每个治疗室多角

度照射，而国际上要实现多角度照射只能是一个治疗室对应一个旋转机架，每个治疗室都要多角度照射则每个治疗室都要安装旋转机架，占地面积太大，代价太高，费用太贵。

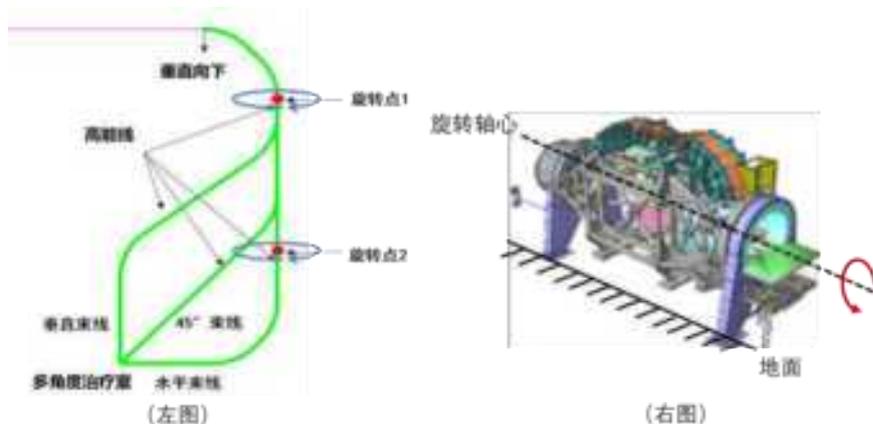


图 3-14 新一代医用重离子加速器治疗装置（左图）与国际常识的“旋转治疗室”（右图）旋转示意图

束线筒内共有三条旋转束线，每条旋转束线均配置一台偏转二极磁铁和一台束流闸。束线切换期间，束流闸关闭、偏转二极磁铁断电，禁止束流通过旋转中的束线；只有旋转束线对准已清场的治疗室（硬限位信号）时，才允许医疗系统通过该条束线向治疗室出束。旋转点采用了磁流体密封方案，旋转过程不会破坏真空。

从一个治疗室切换到另一个治疗室，分两种情况：

情况① 两个治疗室所需的照射角度不同。如从 1#治疗室垂直或 45° 出束切换到最远的 8#治疗室水平出束，由于水平束线从 1#治疗室旋转到 8#治疗室时间约 30s，而 1#治疗室出束照射时间通常为分钟量级，在 1#治疗室停止出束时，水平束线早已经到达 8#治疗室，因此，束流的切换时间不会受到束线旋转时间的影响，而只是受到二极磁铁 1、2、3 切换供电时间影响，该时间约 3s。

情况②：两个治疗室所需的照射角度相同。如从 1#治疗室水平供束切换到 8#治疗室水平供束，此时束流的切换会受到束线旋转时间的影响，而不受到二极磁铁 1、2、3 切换供电时间影响，因为前者所需的时间大于后者，从 1#切换到最远的 8#束线所需的旋转时间约 30s。

综上所述，从一个治疗室到另一个治疗室切换所需的时间 $\leq 30s$ 。

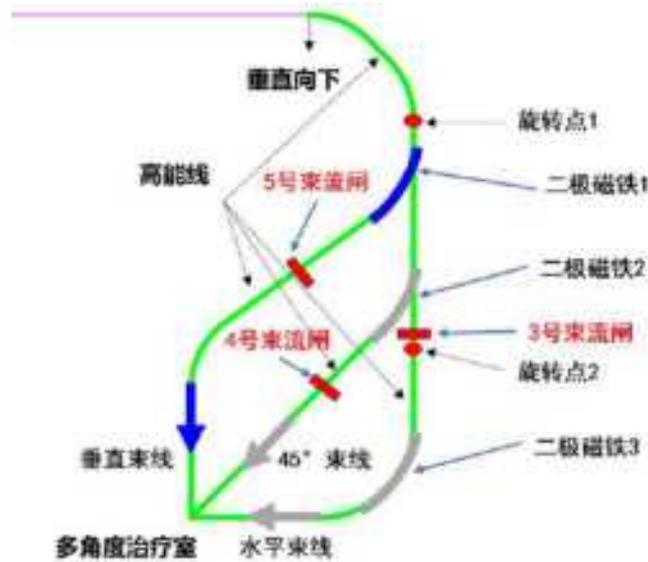


图 3-15 多角度治疗室束流切换示意图

该治疗室配置包括：图像引导系统、机械臂治疗床、治疗头、激光定位灯等设备。其中：

①放射治疗用 X 射线图像引导系统（DR）

放射治疗用 X 射线图像引导系统（DR）为单独配置在每间治疗室内，以配合重离子治疗系统的放射治疗。每 1 套系统包含 2 台 kV 级 X 射线球管（最大管电压为 150kV，最大管电流为 1000mA）和两块 X 射线数字成像板。球管发射出 X 射线经过人体后在成像板上获得数字 X 射线图像。

DR 的两台 X 射线球管安装在地面下与治疗床床板上方的数字成像板成正交夹角。为了配合患者摆位验证，首先放疗技师会将患者固定在治疗床上，根据患者的体表标记和治疗计划参数将患者的肿瘤中心移动到设备的等中心，其次需要使用一套用于患者位置验证的图像配准软件。在患者治疗前，为患者拍摄两张正交的 X 射线图像，将此与治疗计划 CT 影像实现 2D/3D 图像配准，则可获得患者体位与治疗计划之间的差异，即 3 个自由度的平移量和 3 个自由度的转动角度，将此差异数据作为确认患者位置正确与否的标准或指导治疗床位置和姿态的修正参数。最后根据 6 个自由度的差异参数对治疗床进行修正，完成患者肿瘤的定位及验证。

本项目 DR 安装在治疗头附近，并且不设置操作间，由治疗室控制室覆盖操作间的功能。

在患者实际照射时，患者在治疗室外等候，当前一患者离开治疗室后，患者进入治疗室，大部分患者需要脱衣及鞋帽，此时技师将患者固定真空垫等固定在治疗床上，患者再躺在真空垫上，最后利用塑料模体将患者进行固定，技师利用摆位排练时做的体表标记，移动治疗床使得标记点与激光灯交叉点对齐。完成这些工作后，患者的初始摆位已经完成。随后技师或物理师离开治疗室，进入治疗控制室，利用 DR 图像引导系统拍摄 DR 图像，利用相应的软件对患者进行定位验证，当需要修正治疗床时，利用控制系统对治疗床的位置及姿态进行修正。此过程为摆位验证与图像引导阶段，技师利用控制系统申请束流，对患者实施照射。照射完成后，技师分别解除固定在患者体表的固定具，帮助患者离开治疗床，患者完成衣服及鞋帽的穿戴，离开治疗室。治疗室进入下一位患者的治疗环节。从这一流程可知，在同一间治疗室 DR 与高能重离子束不会同时出束。



图 3-16 放射治疗用 X 射线图像引导系统示意图 (DR)

②机械臂治疗床

治疗床采用具有六个运动自由度 (DOF) 的摆动式机器人治疗床，由驱动系统，控制器和床板组成。其主要功能是根据治疗计划系统以准确而有效的方式将患者移动到所需位置，然后再由图像引导系统给出的治疗床位置修正参数实现患者的精确定位。患者治疗床配有力传感器，以检测治疗头与患者和/或治疗床之间可能发生的碰撞。卧式推力传感器与治疗头上的触摸传感器结合使用，可消除发生碰撞时对患者造成伤害和对患者治疗床造成伤害的潜在危险。机械臂治疗床的

基本结构如图 3-17 所示。

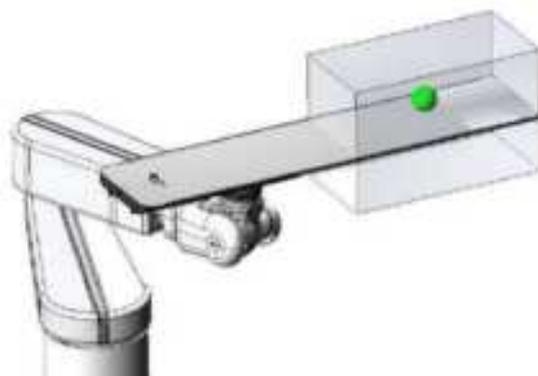


图 3-17 机械臂治疗床示意图

③治疗头

多角度治疗室包含多个治疗头，每个治疗头的设备布局保持一致，以其中一个治疗头为例，从等中心逆向束流看，治疗头依次包括降能片、微型脊形过滤器、分条电离室、剂量监测电离室（主、副及冗余）、分条电离室和真空窗。相对位置示意如图 3-18 所示。

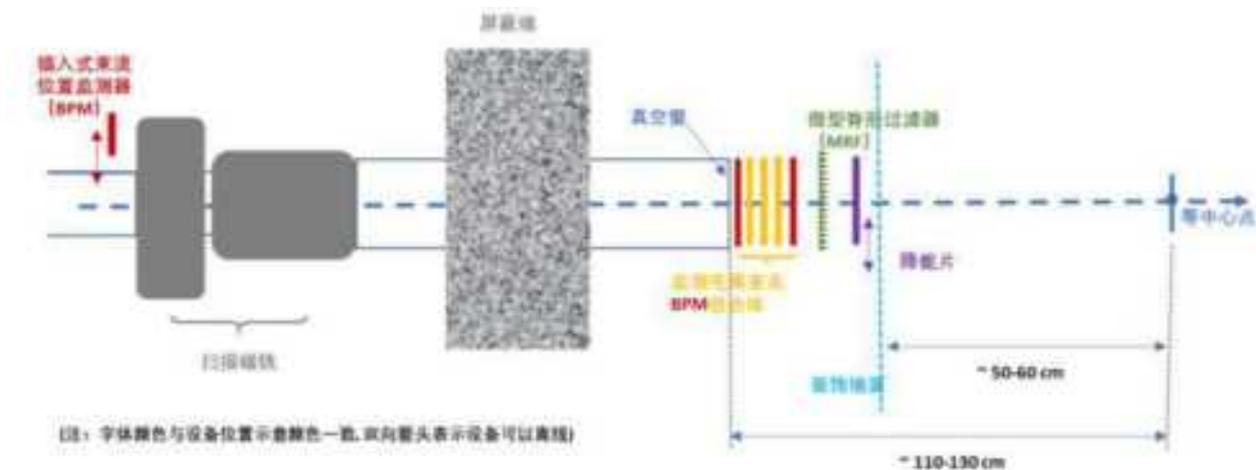


图 3-18 治疗头示意图

(2) 水平束治疗室

水平治疗室主要配置包括：图像引导系统、机械臂治疗床、治疗头、激光定位灯等。除治疗头采用一个外，其余与多角度治疗室配置一致，不再重复介绍。

3.2.2.7 治疗模式

重离子治疗系统采用调制扫描（主动式束流配送）的治疗模式。调制扫描是利用笔形束实现对肿瘤靶区的分层逐点照射，横向上束斑的位置可以由扫描磁铁来控制，纵向上可以通过加速器主动变能的方式实现离子束能量的调节，扫描点在横向上和纵向上相互累加达到计划的均匀剂量分布。该束流配送模式可提高靶区的适形度，不需要专门为患者制作个体化的补偿器和准直器。调制扫描示意图如图 3-19 所示。

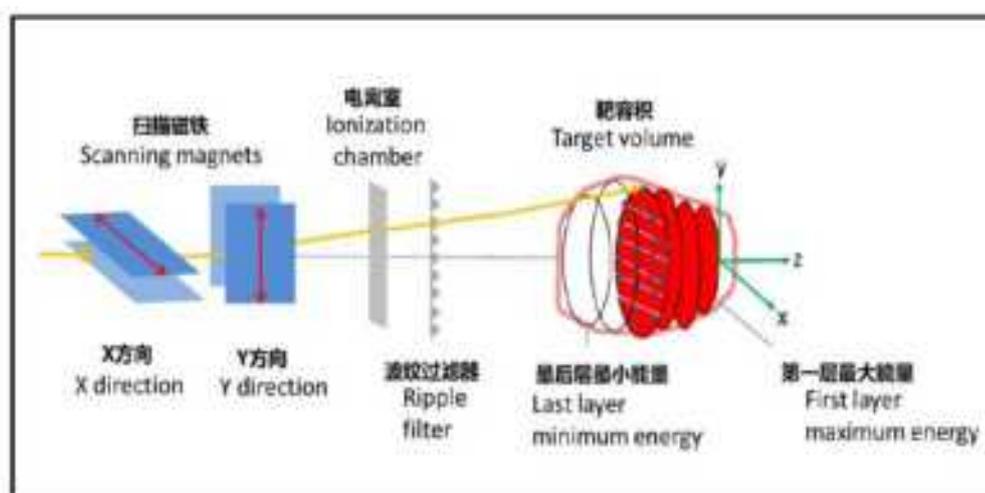


图 3-19 调制扫描示意图

3.3 工作流程

3.3.1 生产

3.3.1.1 生产流程

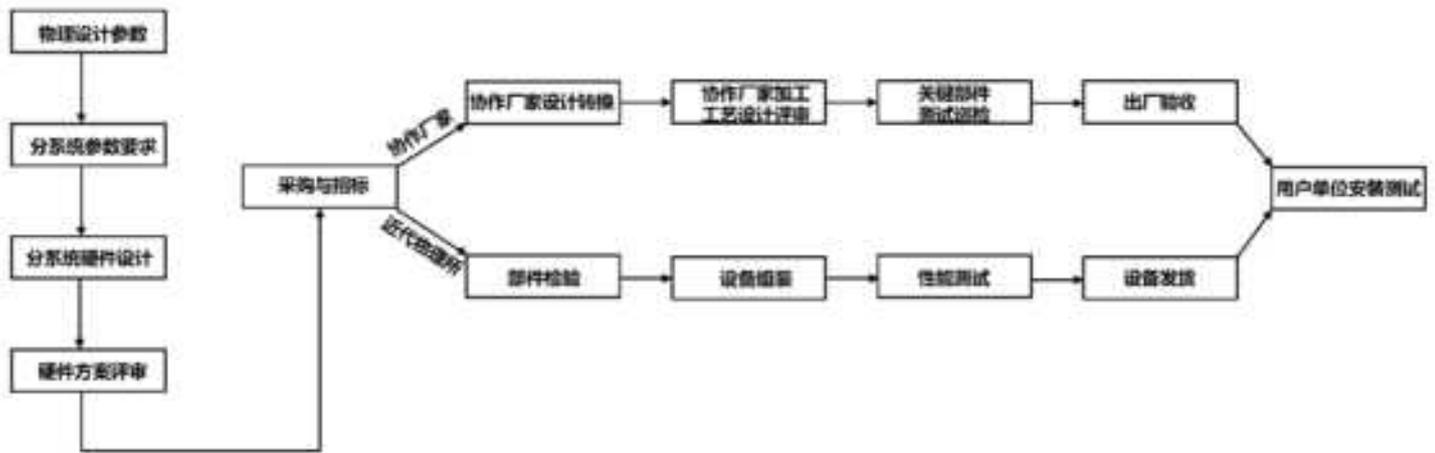


图 3-20 生产流程图

经过研发设计后采购，少部分设备在检验合格后于近代物理研究所（甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号）生产成各组件，并进行性能验证后发往用户单位；另外一部分设备在协作厂家完成生产、出厂验收后直接发往用户单位。此环节不涉及出束操作，所有设备在用户单位现场进行组件装配。

3.3.1.2 生产阶段工作人员配备

生产人员主要包括工艺工程师、生产技术员、测试工程师和质量检验员。工艺工程师主要负责产品工艺设计，生产技术员负责产品的装配，测试工程师负责产品的测试，质量检验员负责产品的检验。

3.3.2 销售

3.3.1.1 销售流程

重离子治疗系统的销售流程如下：

(1) 重离子治疗系统合同签订

经过公开招标或者商业谈判，用户确认选择近代物理所作为合作伙伴后，近代物理所与用户单位进行合同谈判。谈判过程中近代物理所将告知用户单位在取得相应的环评批复后，方可进行重离子治疗系统的安装调试活动。在完成合同谈

判，落实产品配置、价格、安装调试验收的相关条件等信息后，双方签订合同。近代物理所将严格按照《辐射安全许可证》允许的种类和范围开展销售活动，不会超出许可的范围和种类开展活动。

(2) 重离子治疗系统使用场所建造

用户将通过公开招标或者商业谈判选定重离子治疗系统的使用场所以及相应配套设施的建筑设计单位、辐射防护设计单位、施工单位、监理单位。近代物理所将提供产品与建筑需求信息，以支持用户选定的辐射防护设计与建筑设计单位，共同设计符合我国辐射安全标准的使用场所和配套设施。在完成设计进入工程建造后，近代物理所将确认是否满足使用场所和配套设施符合设备的安装要求，但不参与场所建造。

(3) 重离子治疗系统发货、运输

在用户单位使用场所建造过程中，近代物理所的工作人员将与业主定期协商拟定更新设备安装开始日期。在确认设备使用场所和配套设施基本完成，且符合安全和设备安装需求后，将确定最终设备安装开始日期。近代物理所负责将装置运输至用户单位使用场所。

(4) 重离子治疗系统安装、调试、验收

近代物理所将派出工作人员负责重离子治疗系统安装调试工作，安装调试完成后将与用户单位共同进行设备验收。用户单位认可重离子治疗系统符合合同约定的各项验收标准后签署系统验收报告，完成销售合同，交付用户单位，近代物理所转入售后服务阶段。

3.3.1.2 销售阶段工作人员配备

本项目销售阶段的工作人员主要为近代物理所的销售人员，销售活动仅涉及商务谈判和财务结算，对周围环境和相关人员不会产生辐射类的危害和影响，销售人员不属于辐射工作人员。

3.3.3 安装调试

重离子治疗系统的安装调试场所为用户使用场所，本项目的首台套装置位于广东省惠州市惠城区金山湖 8-01-02 地块（惠州重离子医学中心项目），该项目周围环境图如图 2-3 所示，场地布局如图 3-3~图 3-6 所示。

3.3.3.1 安装调试的前提条件

重离子治疗系统送达用户使用场所后，近代物理所确认用户单位具备以下条件时，方可安排相关技术人员进行现场安装。安装过程仅涉及电源、水冷、设备的机械和电气等系统的物理安装，加速器不出束。

（1）用户单位取得使用重离子治疗系统的环评批复，生态环境监管部门对用户单位使用场所进行了辐射安全措施现场检查 and 调试许可后，方可开始调试；

（2）建筑设施满足近代物理所提出的工艺接口要求；

（3）重离子治疗系统安装调试场所水、风、电齐备，场地和墙面整洁、设备起吊与运输顺畅；

（4）用户单位应为安装场所提供必要的安防措施。

设备安装完成后，近代物理所需确认满足以下条件后方可进行重离子治疗系统的带束调试：

1) 该调试阶段所需的辐射防护设施已完成建设；

2) 通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成；

3) 监测仪器仪表配备到位，包括 γ 巡检仪，中子巡检仪，个人剂量计，直读式个人剂量报警仪等；

4) 用户单位应为调试场所提供必要的安防措施；

5) 所有从事重离子治疗系统调试的工作人员均已通过核技术利用辐射安全

与防护考核。

3.3.3.2 安装调试步骤和周期

出束调试按照离子源、直线加速器、同步加速器、高能束运线及治疗终端的顺序分阶段开展，工作内容主要是对加速器各子系统以及整机束流参数进行调试。以惠州重离子医学中心项目为例，现场安装调试的步骤和预计出束时间如表 3-3 所示。安装调试流程图如图 3-21 所示。

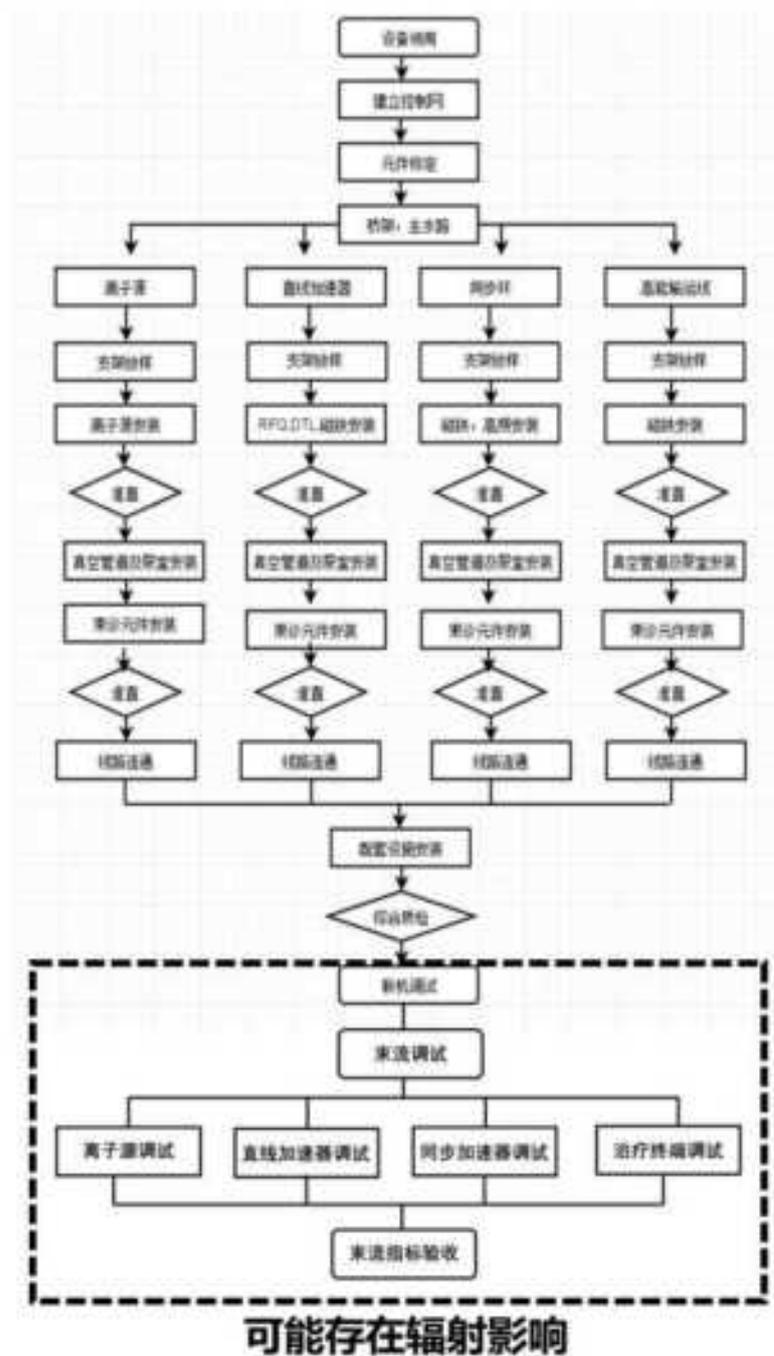


图 3-21 安装调试流程图

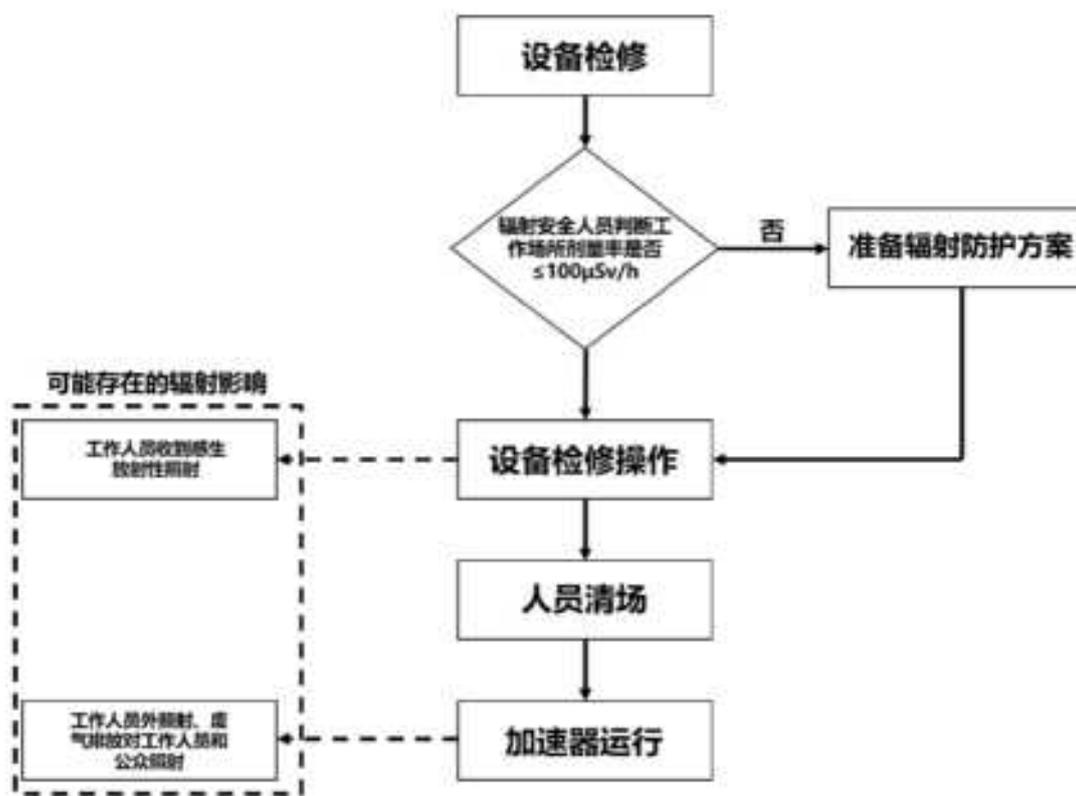


图 3-22 设备检修工作流程图

表 3-3 安装调试阶段出束时间

序号	调试阶段	调试时间, h	出束时间, h	总时间, h
1	离子源	80	40	120
2	离子源+直线加速器	90	30	120
3	离子源+直线加速器+同步加速器	180	60	240
4	离子源+直线加速器+同步加速器+治疗终端	1000	500	1500
5	总计	1350	630	1980

安装调试完成后，近代物理所和用户单位共同对重离子治疗系统进行验收，依据合同签署时的验收条款对设备参数逐一测试，目的是验证交付的设备符合客户的要求，该环节为出束操作。

待用户取得辐射安全许可后，设备交接给用户单位使用，完成整个安装调试的过程。临床使用时的调试由用户单位执行，近代物理所根据与用户单位的合同

进行必要的支持。

3.3.3.3 安装调试工作人员配备

安装调试阶段，现场的工作人员主要分为两类：安装工程师和束流调试工程师。其中安装工程师（仅涉及机械安装，不涉及辐射操作）完成设备就位和通联后会将设备交给束流调试工程师进行设备调试。束流调试工程师为安装调试工作的关键技术人员（涉及辐射操作），属于辐射工作人员。两类工作人员的工作职责如下：

（1）安装工程师

- 1) 对用户现场就绪情况进行检查；
- 2) 在用户现场执行加速器模块及相关设备的所有安装工作，包括布线、装配、运行安全检查；
- 3) 执行重离子治疗系统各组成部分的校准和测试工作；
- 4) 指定并协助获取安装工具和设备；
- 5) 保持准确的安装记录；
- 6) 以安全有效的方式执行所有工作。

（2）束流调试工程师

- 1) 执行离子源、直线加速器、同步加速器、高能束运线及治疗终端的调试和测试，完成束流验证以及其他与束流有关的现场工作；
- 2) 分析束流数据和系统故障数据，对系统进行故障排除；
- 3) 协助用户验收测试；
- 4) 保持准确的调试记录；
- 5) 以安全有效的方式执行所有工作。

表 3-4 每台重离子治疗系统安装调试期间工作人员配置

工作人员类别		岗位职责	工作内容	工作位置	人员配置 (人)	工作负荷
束流调试 工程师	物理运行 工程师	总体负责 加速器的 调试	运行加速器	中央控制 室	3	每班 8h, 每天 3 班 倒
			巡视	控制区		
	电源系统 工程师	负责电源 系统调试	现场检查、 更换零件及 机械调试	监督区	1	
	高频系统 工程师	负责高频 系统功率 源调试			1	
	配电系统 工程师	负责配电 系统调试			1	
	水冷及通 风系统工 程师	负责水冷 及通风系 统调试			1	
	离子源系 统工程 师	负责离子 源系统调 试			1	
	磁铁系统 工程 师	负责磁铁 系统调试			1	
	真空系统 工程 师	负责真空 系统调试			1	
	束诊系统 工程 师	负责束诊 系统在线 设备调试			1	
束流终端 工程 师	负责束流 终端设备 调试	1				
总计					12 人	

3.3.4 运行维护

在接受用户单位委托后，近代物理所对重离子治疗系统进行运行维护工作，主要负责加速器的日常运行、维护和故障检修。

其中运行部分为日常设备开关机、巡检等工作，此外还会对用户单位进行重离子治疗系统的操作培训，培训仅为理论培训，不涉及辐射操作，无辐射影响。

维修维护部分则是按照用户与近代物理所的合同约定由近代物理所的工作人员负责，用户单位负责提供工作场所和协调前期相关准备工作。维修/维护工作的

流程图如图 3-23 所示。

工作流程如下：

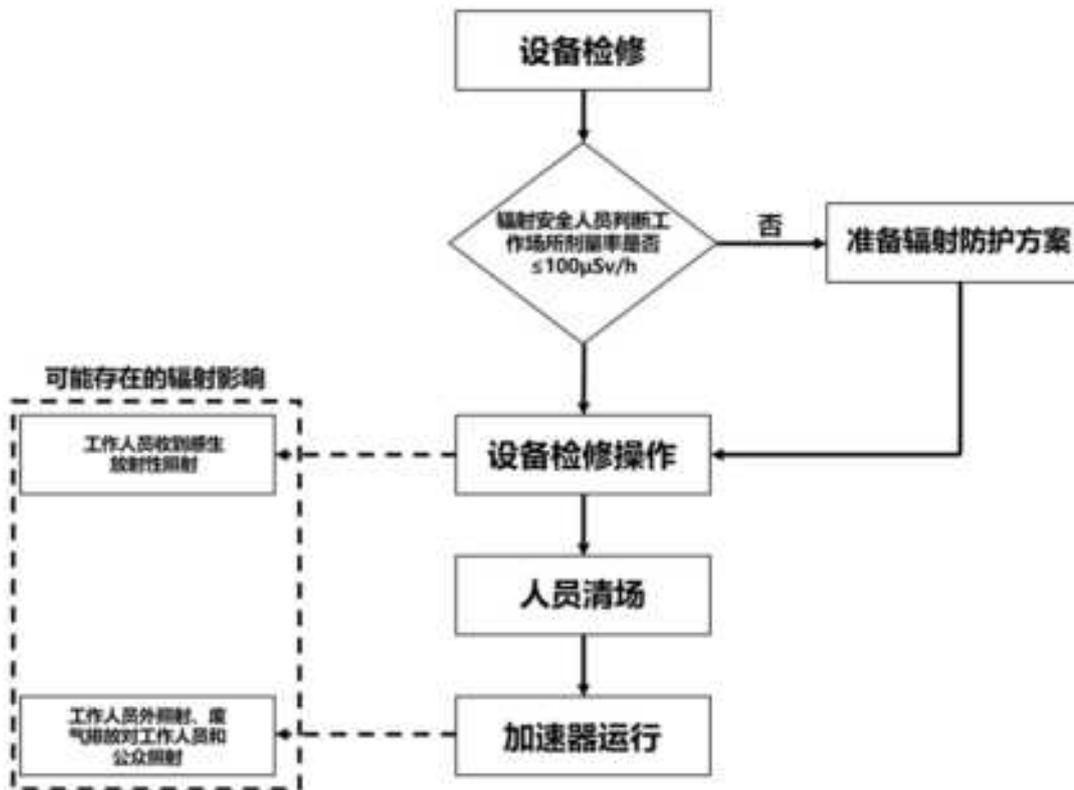


图 3-23 设备检修、恢复运行工作流程图

(1) 用户单位针对重离子治疗系统运行期间出现的故障，提交维修请求。近代物理所收到申请信息后安排人员进行现场维修。若现场维修未能解决问题，则进一步上报近代物理所售后管理部门。

(2) 近代物理所售后管理部门对用户报告的事件进行正式记录，并对事件进行初步评估，确定事件发生的严重程度和所属技术领域（机器故障、用户培训、预防性日常保养、软硬件升级等）。

(3) 经近代物理所售后管理部门初步评估后，以最大限度降低用户设备无法正常工作时间，最大可能保障设备正常工作时间为原则，及时安排专业维修工程师、所需要的工具（维修工具和个人防护工具）、物料（备件和其他过程所需物品）。

(4) 工程师抵达用户现场后，判断故障类型和位置，并制定相应的维修方案。对于可以远程解决的问题，工程师可通过操作系统进行维修调试；对于不可远程解决的问题，工程师需要进入治疗机房内完成维修。

(5) 工程师在进入治疗机房内部前，需检查个人剂量计是否完好并随身携带。在工作开始前，工程师需根据工作内容核实现场是否满足下表所列的条件。对于束流直接照射的加速器部件，在进行接触性维修维护作业前，需要使用 γ 巡检测仪确认检修部位的剂量率水平。工作人员进入控制区内部进行维修的准入条件见下表。

表 3-5 工作人员进入控制区内部进行维修工作的准入条件

维修工作条件	维修工作类别
距设备表面 30cm 处剂量率 <0.1mSv/h	手工维修不受限制。
距设备表面 30cm 处剂量率 0.1~1mSv/h	手工维修需要控制时间。具体工作时间根据维修现场剂量率测量结果计算后确定。
距设备表面 30cm 处剂量率 >1mSv/h	手工维修须采取相应的辐射防护措施。

(6) 若需要更换零部件，工程师与近代物理所售后管理部门联系发送零部件更换申请。

(7) 工程师现场完成维修后，用户操作人员开机做临床调试验证，确认设备无报错信息后，工程师维修任务完成。

(8) 工程师现场维修进行的操作、解决问题之后的设备性能参数以及临床验证后的主要数据将作为该事件报告的一部分被记录到相关维修日志中，近代物理所技术团队将对记录的合规性作出评估并最终关闭该事件。

设备安装调试完成交付用户后，经用户单位委托，近代物理所配置相应工作人员负责装置的运行维护。

3.4 污染源项分析

重离子治疗系统运行过程中产生的辐射场，主要为装置运行时产生的“瞬发辐射场”和装置停机后依然存在的“残余辐射场”。瞬发辐射是装置运行时损失的粒

子束流与结构部件和治疗室内患者等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但会随着装置的停机而完全消失；残余放射性主要来自与装置结构部件、冷却水、场所内空气等被重离子束流或次级粒子轰击产生的活化产物，在装置停机后依然存在。

下文以惠州重离子医学中心项目为例对重离子治疗系统的污染源项进行介绍。

3.4.1 瞬发辐射源

在加速器的运行过程中，束流的传输效率不可能达到 100%，在其被产生、加速、运输的过程及用于实验打靶时会不可避免地发生束流损失，从而产生瞬发次级辐射。瞬发辐射在加速器开机时产生，停机后立即消失，是决定屏蔽的主要因素。高能强子在与物质相互作用时，会通过核反应产生大量的次级粒子，这些次级粒子又会与物质不断相互作用释放出更多的次级粒子，这个过程叫做强子级联过程。

高能重离子加速器装置产生的瞬发次级辐射主要包括中子、带电粒子及 γ 射线等。在瞬发次级辐射中，次级中子的穿透能力最强，经一定的屏蔽后带电粒子和 γ 射线就可被衰减到相当低的水平，因此屏蔽外的辐射剂量几乎全部由次级中子贡献，它是决定加速器主体屏蔽厚度的决定性因素。高能重离子加速器产生的次级中子主要分为级联中子与蒸发中子两类。其中级联中子主要产生于强子级联过程，其能量一般较高，呈各向异性发射，具有很强的前冲性；而蒸发中子主要来自于处于激发态的复合核的退激过程，其能量一般较低，趋近于各向同性发射。

表 3-6 本项目束流损失情况

束流种类	能量, MeV/u	损失位置	损失方式	损失前流强, pps	束流损失, pps	束流损失, pps/m	束线长度, m	传输效率	损失后剩余流强, pps
¹² C	4	直线加速器	均匀损失	6.98E+08	——	8.61E+06	8.1	90%	6.28E+08
¹² C	4	注入线	均匀损失	6.28E+08	——	6.21E+05	10.1	99%	6.22E+08
¹² C	4	注入	集中损失	6.22E+08	6.21E+07	——	——	90%	5.60E+08
¹² C	4	俘获	均匀损失	5.60E+08	——	7.81E+05	35.8	95%	5.32E+08
¹² C	120~400	引出	集中损失	5.32E+08	2.66E+07	——	——	95%	5.05E+08
¹² C	120~400	束流传输线	均匀损失	5.05E+08	——	1.23E+05	41	99%	5.00E+08
¹² C	120~400	患者	集中损失	5.00E+08	5.00E+08	——	——	0%	0

当束流到达患者处之前，会通过治疗头内的降能片（2cm 厚 PMMA， $C_3H_8O_2$ ，密度 $0.95g/cm^3$ ），其束流损失参数如下分析所示：

利用 FLUKA 程序计算了能量 $120MeV/u$ 、流强 $5E+08pps$ 的碳离子穿过 2cm 厚 PMMA（ $C_3H_8O_2$ ，密度 $0.95g/cm^3$ ）后的碳离子能量分布，如图 3-24 所示，其总能量呈高斯分布，峰值分布在 $946.87MeV$ ，即单核能 $78.91MeV/u$ 。穿过两 cm 厚 PMMA 后，剩余碳离子的流强约 $4.63E+08pps$ 。以下为分析过程。

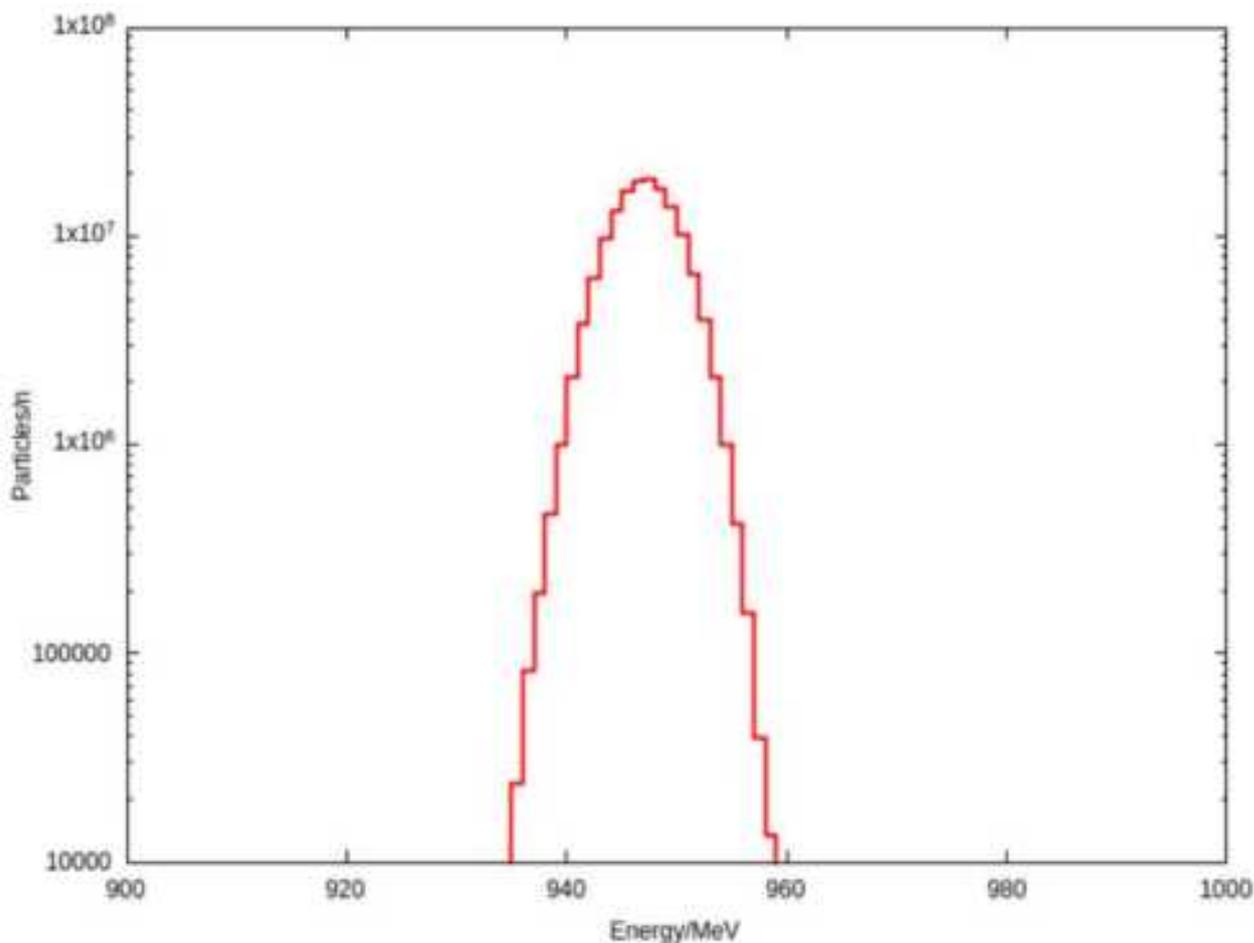


图 3-24 穿过 PMMA 后碳离子的总能量分布

Matsufuji 的文章 (doi:10.1088/0031-9155/48/11/309) 测量了 $290MeV/u$ 的碳离子束在不同厚度 PMMA 中的通量衰减，由文章中的数据图（图 3-25）可见，碳离子束在 PMMA 中的通量随深度呈线性衰减，每穿越 1cm PMMA 碳离子约损失 3.7%。

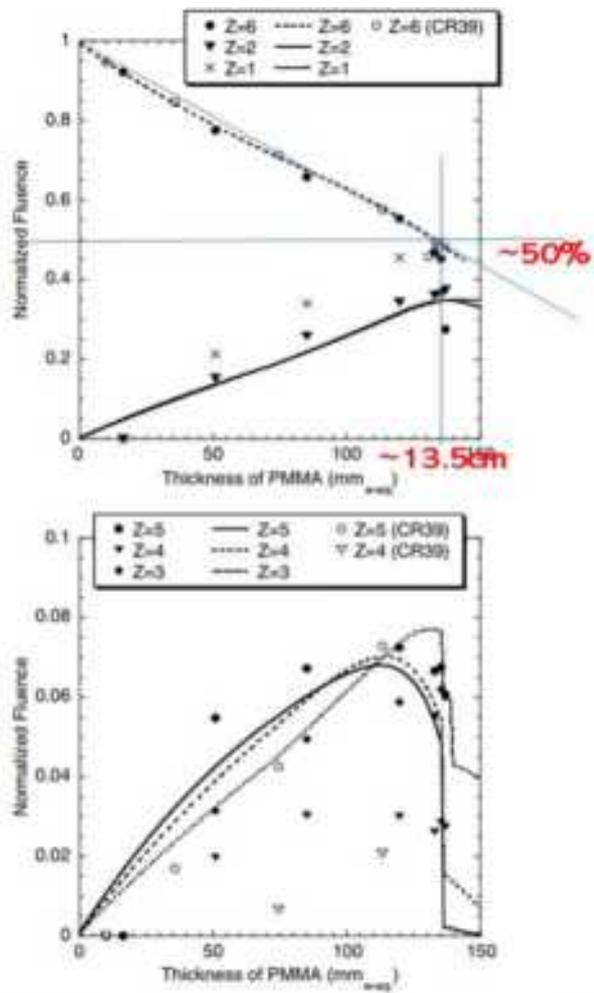


Figure 5. Top: Fluence of primary ($Z=6$) and light fragments ($Z=1, 2$) as a function of PMMA thickness produced by the incidence of $290 \text{ MeV/u } ^{12}\text{C}$ beams. Bottom: Fluence of intermediate fragments ($Z=3-5$). Here, full symbols, open symbols and lines correspond to experimental results obtained by this study, by CR-39 measurement and calculations, respectively.

图 3-25 290MeV/u 碳离子穿过不同 PMMA 厚度后的剩余通量

碳离子束的通量穿越介质之所以按照线性衰减方式，是因为中高能碳离子与介质的核反应总截面近似为常数，如图 3-26 所示。

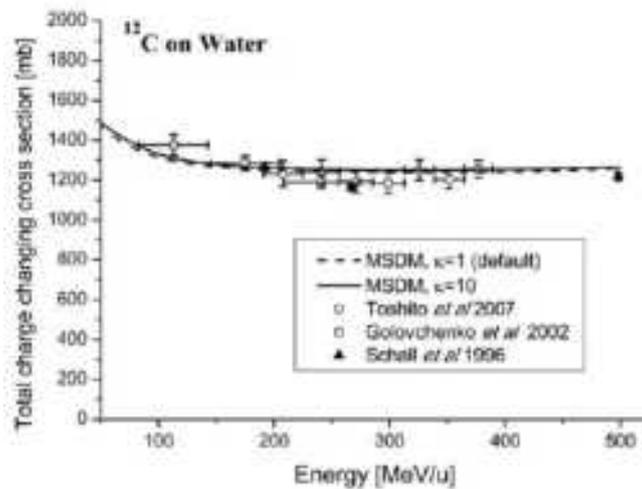


图 3-26 不同能量碳离子的反应截面

290MeV/u 碳离子的反应截面约为 1250mb，120MeV/u 碳离子的反应截面约为 1300mb；据此估算，120MeV/u 的碳离子穿越 2cm PMMA，大约损失 7.7% 的碳离子，因此 $5E+08$ pps 的碳离子穿过 2cm PMMA 后剩余约 $4.63E+08$ pps。

3.4.2 感生放射性

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

重离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，主要的影响对象是停机后，需要进入治疗机房内工作的物理师、技师以及维修工程师等工作人员。本次评价主要对重离子治疗系统空气、冷却水、结构部件的感生放射性进行分析评价。

此外考虑到每次治疗任务结束后，短时间可能进入治疗室的摆位技师人员对治疗结束后的患者进行解除摆位操作时可能受到照射，本次评价对治疗室内患者的感生放射性进行了分析计算。

3.4.2.1 空气的感生放射性

重离子治疗系统运行期间产生的次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过

高能中子散裂反应、热中子俘获和 (γ, n) 反应等产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》(H.W.帕特森, R.H.托马斯) P296, 对于长半衰期核素 ^3H 和 ^7Be , 其产生率较低, 可不必考虑。主要考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素, 具体见表 3-7。

表 3-7 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量份额	产生机制	活化反应截面 σ^2 , mb
^{11}C	20.5min	C	1.2×10^{-4}	(γ, n) 反应	10
		N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.7
^{13}N	9.96min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		N	7.55×10^{-1}	(γ, n) 反应	9
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	9
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.8
^{15}O	2.04min	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	(γ, n) 反应	10
^{41}Ar	1.83h	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	660

注: 表中数据均取自 NCRP NO.144 报告和 IAEA 283 号技术报告。

3.4.2.1.1 空气感生放射性静态饱和浓度

本次评价利用 FLUKA 程序计算了无通风的情况下, 连续照射 2000h, 考虑了所有束流损失点, 并以各束流损失点处最高能量 (400MeV/u) 和最高损失流强为依据进行保守估算。地下一层多角度治疗室、地上三层、地上一层水平治疗室、加速器大厅及高能束运线大厅内的空气感生放射性静态饱和活度, 计算结果列于表 3-8~表 3-10。

表 3-8 地下一层多角度治疗室空气感生放射性静态饱和活度及活度浓度

核素种类	活度 (Bq)	活度浓度 (Bq/cm ³)
^{11}C	8.78E+05	1.93E-03
^{13}N	6.84E+05	1.50E-03
^{15}O	5.46E+05	1.20E-03
^{41}Ar	9.56E+04	2.11E-04

表 3-9 地上三层水平治疗室空气感生放射性静态饱和活度及活度浓度

核素种类	活度 (Bq)	活度浓度 (Bq/cm ³)
^{11}C	9.38E+05	1.61E-03
^{13}N	7.40E+05	1.27E-03

¹⁵ O	5.72E+05	9.84E-04
⁴¹ Ar	1.10E+05	1.90E-04

表 3-10 加速器大厅及高能束运线大厅空气感生放射性静态饱和活度及活度浓度

核素种类	活度 (Bq)	活度浓度 (Bq/cm ³)
¹¹ C	3.20E+04	2.71E-06
¹³ N	2.95E+04	2.50E-06
¹⁵ O	2.17E+04	1.84E-06
⁴¹ Ar	3.25E+04	2.75E-06

3.4.2.1.2 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和活度

重离子治疗装置运行期间，机房内一直保持通风系统开启状态。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻工作场所内空气感生放射性动态饱和浓度可由下式 3-4 计算。

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

式中，

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

C_{sat} 为不考虑通风的情况下，装置运行 t 时间，停机时刻房间内空气中感生放射性静态饱和浓度，Bq/m³；1Bq/m³=1000000Bq/cm³

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；

（1）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	$T_{1/2}, s$	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

根据建设单位提供的资料，重离子治疗装置各区域的通风换气设计情况如表 3-12 所示。具体通风系统设计情况见“4.1.2.3 通风系统”的描述。

表 3-12 重离子治疗装置各区域通风换气设计情况

房间名称	体积/ m^3	新风量/ (m^3/h)	运行排风量/ (m^3/h)	运行排 风换气 次数/ $(次/小时)$	停机排风量/ (m^3/h)	停机排风 换气次数 $/ (次/小时)$
地下一层多角度治疗室	240	240	960	4	1440	6
地上三层水平治疗室	588	588	2352	4	3528	6
加速器大厅及高能束运线大厅	8235	8235	16470	2	49410	6

(2) 计算结果

保守以整间机房内的空气感生放射性静态饱和活度分别作为地下一层多角度治疗室、地上三层水平治疗室和高能束运线大厅及加速器大厅的空气感生放射性静态饱和活度，利用以上公式可计算得出考虑通风的情况下，重离子治疗机房内感生放射性气体的动态饱和浓度。具体结果见表 3-13。

表 3-13 重离子治疗机房内空气感生放射性核素动态饱和浓度/ (Bq/m^3)

核素	地下一层多角度治疗室	地上三层水平治疗室	高能束运线大厅及加速器大厅
^{11}C	6.51E+02	5.43E+02	9.15E-01
^{13}N	7.66E+02	6.49E+02	1.28E+00
^{15}O	9.98E+02	8.19E+02	1.53E+00
^{41}Ar	1.85E+01	1.67E+01	2.42E-01
总计	2.43E+03	2.03E+03	3.96E+00

3.4.2.2 冷却水的感生放射性

涉及活化的冷却水主要用于加速器磁铁、真空、束诊设备，即加速器区域设备使用冷却水。系统冷却水循环量为 120m³/h，检修频次约 1 次/年，管路系统总蓄水量为 15m³，其中管路部分 5m³，循环水箱 10m³，可分次排放，最大排放量 5m³。

根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯），高能中子与冷却水中的 ¹⁶O 发生散裂反应，主要产生 ³H、⁷Be、¹¹C、¹³N、¹⁵O 等放射性核素，各放射性核素的参数见表 3-14。其中，¹¹C、¹³N、¹⁵O 的半衰期很短，装置停机后，这些核素将迅速衰变，浓度也会很快降低。因此，冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的 ³H 和 ⁷Be。

表 3-14 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

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

注：反应截面数据取自 IAEA 技术报告系列 NO.283 号报告。

本次评价利用 FLUKA 程序计算了冷却水的感生放射性。由于冷却水在不停地循环，计算时采用静态的水靶，最后再归一到总体的循环水系统中。

本装置仅加速器区域设备使用冷却水，在模拟计算时采用了保守的简化模型，假设能量为 400MeV/u、流强为 3.16E+07pps（引出束损及高能线均匀束损的总和）的碳离子束集中损失在 10cm 厚的厚铜靶上，在铜靶后方 10cm 的位置放置了长、宽均为 26cm、厚度 5cm 的水靶，统计了连续照射 3000 小时后水中的关键感生放射性核素活度后，按照冷却水的总体积计算其活度浓度。

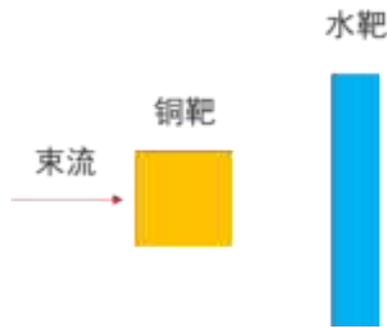


图 3-27 冷却水计算模型

表 3-15 冷却水中主要核素的活度及活度浓度

编号	核素种类	活度/Bq	活度浓度/ (Bq/cm ³)
1	³ H	4.17E+03	2.78E-04
2	⁷ Be	4.79E+04	3.20E-03
3	¹¹ C	1.27E+05	8.50E-03
4	¹³ N	2.07E+04	1.38E-03
5	¹⁵ O	2.63E+05	1.75E-02

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）给出的活化冷却水中主要核素 ³H 和 ⁷Be 的单次排放限值 1ALI_{min} 和单月排放限值 10ALI_{min}，按照冷却水共 15 吨（15m³）进行计算，³H 的总活度最大为 4.17×10³Bq，⁷Be 的总活度为 4.79×10⁴Bq，远小于单次排放限值 1.11×10⁹ Bq 和 3.85×10⁸ Bq，因此满足标准要求。

3.4.2.3 结构部件的感生放射性

结构部件的感生放射性主要是粒子直接与装置结构材料相互作用产生，主要部位是束流损失较大的部位，如磁铁、真空管道等，其主要材料为铜、铁、镍等。相关实验研究表明，停机后活化结构部件中的核素主要是半衰期较长的核素。本装置加速器区域只有同步引出口和真空管道长期发生高能束流损失，调试阶段治疗室内的束流主要损失在聚乙烯 Beamdump 中。根据其束流损失数据，利用 FLUKA 程序计算了主要束流损失点的感生放射性。

①在计算同步引出口的感生放射性时，保守考虑能量 400MeV/u、流强 2.66E+07pps 的碳离子束，射入直径、厚度均为 10cm 的圆柱厚铜靶中；

②计算真空管道的感生放射性时，保守考虑能量 400MeV/u、流强

1.23E+05pps/m 的碳离子束，均匀地损失在 41m 长、内径 10cm、壁厚 3mm 的不锈钢真空管道上；

③计算治疗室 Beamdump 的感生放射性时，考虑 400MeV/u、流强 5E+08pps 的碳离子束，射入厚度 30cm、长宽边均为 30cm 的聚乙烯靶中。

④计算治疗头位置的感生放射性时，计算模型如下图 3-28 所示。保守考虑 400MeV/u 的碳离子束流朝膜窗（250 μ m 厚 PET）、三台电离室（每台 1.75 μ m 厚铝+30 μ m 厚 PET+1.75 μ m 厚铝）、脊形过滤器（4mm 厚铝）与降能片（2cm 厚 PMMA）照射。

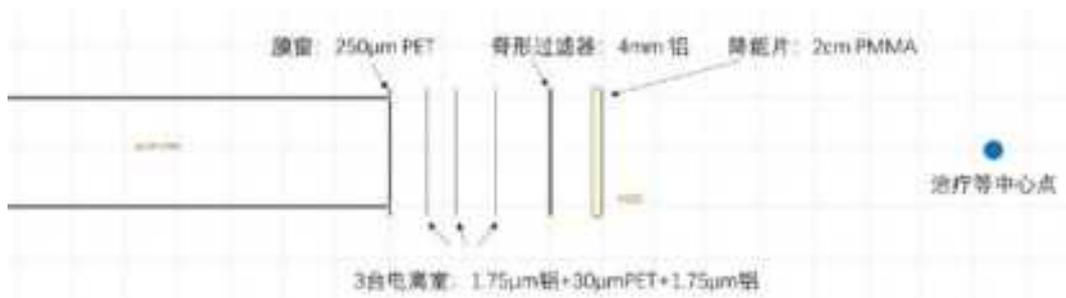


图 3-28 治疗头感生放射性计算模型

⑤装置提供的能量范围为 120-400MeV/u（对应水中理论射程约 3.5-27.0cm）。对于浅表肿瘤，如皮下 5mm 的肿瘤，120MeV/u 碳离子的布拉格峰深度深于 5mm，因此需要通过降能片降低加速器的能量。即降能片仅用于将最低的 120MeV/u 的碳离子降低到患者治疗所需的更低能量，因此其使用频率极低。

降能片的材料为 PMMA，采用轻质材料可以减小核反应截面，减缓主束因为核反应的衰减。降能片的结构为长方体薄板，厚度依据最低能量的实际射程（加速器参数）和所需最小的入射深度（临床要求）而定，一般厚度为 2cm。

计算降能片时，保守考虑 120MeV/u、5.00+08pps 的碳离子照射 10min。。

表 3-16~表 3-17 统计了连续照射 3000 小时、停机 4 小时后，厚铜靶及真空管道中主要放射性核素的总活度。同时统计了连续照射 3000 小时、冷却不同时间后，距同步引出口以及真空管道 5cm、30cm 及 1m 远处的残余剂量率，结果如表 3-20~表 3-21 所示。

表 3-23 给出了单个治疗室连续照射 333 小时（按照惠州重离子医学中心项目 9 个治疗室共出束 3000 小时保守考虑），停机不同时间后，治疗头处的设备对治疗等中心点位置的残余剂量率水平。

统计了连续照射 12 小时、停机 4 小时后，聚乙烯 Beamdump 中主要放射性核素的总活度，如表 3-18 所示；统计了连续照射 12 小时、冷却不同时间后，距 Beamdump 5cm、30cm 及 1m 远处的残余剂量率，结果如表 3-22 所示。

表 3-19 给出了停机 10min 后，降能片中关键放射性核素的活度与活度浓度停机，表 3-24 给出了不同时间降能片周围的残余剂量率水平。

由计算结果可知，结构部件感生放射性水平较低，多数核素的饱和活度均低于其豁免活度，停机后感生放射性主要来自 ^{64}Cu 、 ^{58}Co 、 ^{61}Cu 、 ^{51}Cr 、 ^{48}V 、 ^7Be 、 ^{54}Mn 和 ^{52}Mn 等半衰期在月级别的中长寿命放射性核素。而聚乙烯 Beamdump 中产生的放射性核素主要是短寿命核素。

表 3-16 照射 3000 小时、停机 4 小时后同步引出口（厚铜靶）的放射性核素活度

元素	质量数 A	同步引出口（厚铜靶）	
		活度/Bq	活度浓度/(Bq/cm ³)
Cu	64	5.69E+06	7.24E+03
Co	58	2.01E+06	2.56E+03
Cu	61	1.54E+06	1.96E+03
Co	58	1.06E+06	1.34E+03
Cr	51	6.91E+05	8.80E+02
Co	57	6.99E+05	8.90E+02
Co	56	5.21E+05	6.63E+02
V	48	3.34E+05	4.25E+02
Be	7	3.77E+05	4.79E+02
Mn	54	2.43E+05	3.09E+02
Mn	52	2.08E+05	2.65E+02

表 3-17 照射 3000 小时、停机 4 小时后真空管道（不锈钢）的放射性核素活度

元素	质量数 A	真空管道（不锈钢）	
		活度/Bq	活度浓度/(Bq/cm ³)
Cr	51	2.91E+05	7.30E+01
V	48	1.36E+05	3.41E+01
Be	7	5.40E+04	1.36E+01
Mn	52	6.93E+04	1.74E+01
Mn	54	4.29E+04	1.07E+01

Sc	44	3.12E+04	7.83E+00
V	49	3.53E+04	8.86E+00
Co	56	3.17E+04	7.94E+00
Fe	55	2.85E+04	7.15E+00
Ni	57	2.45E+04	6.15E+00
Ar	37	2.18E+04	5.48E+00
P	32	1.97E+04	4.94E+00
Co	58	1.99E+04	5.01E+00
Sc	46	1.92E+04	4.81E+00
Ti	45	1.80E+04	4.52E+00
Co	57	1.86E+04	4.66E+00
Sc	47	1.75E+04	4.40E+00
H	3	1.29E+04	3.24E+00
Mn	56	1.22E+04	3.07E+00
Co	58	1.99E+04	5.01E+00
Sc	43	1.05E+04	2.66E+00
P	33	1.02E+04	2.55E+00
Co	55	1.07E+04	2.69E+00

表 3-18 照射 12 小时、停机 4 小时后治疗室 Beamdump（聚乙烯）的放射性核素活度

元素	质量数 A	Beamdump（聚乙烯）	
		活度(Bq)	活度浓度(Bq/cm ³)
H	3	9.41E+03	3.49E-01
Be	7	3.06E+05	1.13E+01
C	11	3.31E+04	1.23E+00
N	13	8.83E-03	3.27E-07
C	14	1.46E-02	5.42E-07
O	15	1.58E-31	5.86E-36
F	18	6.35E+03	2.35E-01

表 3-19 照射 10min、停机 10min 后降能片的放射性核素活度与活度浓度

元素	质量数	活度(Bq)	活度浓度(Bq/cm ³)
H	3	4.12E+00	2.29E-03
Be	7	1.55E+02	8.60E-02
C	11	6.28E+05	3.49E+02
N	13	2.77E+04	1.54E+01
O	15	2.25E+04	1.25E+01
F	17	9.85E+00	5.47E-03
F	18	3.67E+02	2.04E-01

表 3-20 停机后不同时间距同步引出口表面不同距离处残余剂量率

停机时间	距表面 5cm 处残余剂量率/ (μSv/h)	距表面 30cm 处残余剂量率/ (μSv/h)	距表面 100cm 处残余剂量率/ (μSv/h)
0s	187.85	16.65	2.69
30min	69.54	5.83	0.99
1h	57.34	4.91	0.86

6h	43.63	3.73	0.67
24h	34.64	2.86	0.46
7d	25.44	2.03	0.29
30d	17.56	1.41	0.20

表 3-21 停机后不同时间距真空管道表面不同距离处残余剂量率

停机时间	距表面 5cm 处残余剂量率/ ($\mu\text{Sv/h}$)	距表面 30cm 处残余剂量率/ ($\mu\text{Sv/h}$)	距表面 100cm 处残余剂量率/ ($\mu\text{Sv/h}$)
0s	0.22	0.04	0.02
30min	0.08	0.02	0.01

注：结果显示 30min 后真空管道表面残余剂量率已降至 $0.08\mu\text{Sv/h}$ ，因此不再计算更长停机时间下的残余剂量率水平。

表 3-22 停机后不同时间距治疗室 Beamdump 表面不同距离处残余剂量率

停机时间	距表面 5cm 处残余剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	距表面 30cm 处残余剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	距表面 100cm 处残余剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
0s	934.05	122.38	15.36
1min	373.57	57.85	7.88
5min	315.76	49.29	6.77
10min	269.05	41.66	5.77
30min	134.08	21.10	3.04
1h	48.39	7.68	1.05
4h	0.16	0.03	0.004

表 3-23 停机后不同时间，治疗头对治疗等中心点位置的残余剂量率

停机时间	治疗等中心点/ ($\mu\text{Sv/h}$)
0s	13.75
1min	1.28
5min	0.97
10min	0.81
30min	0.48
1h	0.26
4h	0.12
12h	0.08
1d	0.05
3d	0.01
7d	0.01

表 3-24 照射 10min、停机不同时间后，降能片的残余剂量率

停机时间	降能片表面残余剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	降能片 30cm 远处残余剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	降能片 100cm 远处残余剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
0s	1.25E+03	85.82	9.87
1min	49.23	2.47	0.27
5min	31.58	1.52	0.17
10min	23.29	1.14	0.13
30min	11.09	0.54	0.06
1h	4.01	0.19	0.02
4h	0.01	5.77E-04	6.39E-05

3.4.2.4 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。对重离子治疗系统而言, 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, 碳离子的质量比电子的质量高 4 个量级。因此, 对重离子治疗系统, 其 O₃ 和 NO₂ 产生量很小, 可以不用考虑。

3.5 本项目污染源分析

重离子治疗系统销售 (含建造) 过程中, 主要涉及商务谈判、财务结算和设计生产, 不涉及放射性操作, 也不会对加速器进行开机出束。因此, 重离子治疗系统的销售 (含建造) 环节不会对周围环境产生辐射污染。重离子治疗系统安装调试和运行维护过程中主要的污染源分析见表 3-25。

表 3-25 本项目污染源分析

活动环节	污染源
销售 (含建造)	—
安装调试	瞬发辐射照射、感生放射性气体、活化部件
运行维护	瞬发辐射照射、感生放射性气体、活化部件

其中安装调试环节主要的污染源为重离子治疗系统开机出束产生的瞬发辐射对工作人员造成的外照射。此外, 安装调试期间产生的感生放射性气体和活化部件也会对工作人员产生辐射影响。

运行维护环节, 工作人员在设备停机后进入加速器大厅 (含高能束运线大厅) 或治疗室检修、维护时, 可能受到这些区域运行产生的感生放射性气体和活化部件的辐射影响。维修完成后进行调试时及日常运行工作时, 设备开机出束产生的瞬发辐射会对屏蔽外的工作人员造成辐射影响。

4 辐射安全与防护

本次评价以惠州重离子医学中心项目为典型案例进行分析评价。

4.1 辐射工作场所分区

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

惠州重离子医学中心项目分区布置如图 4-1~图 4-4 所示，具体如下：

（1）控制区：加速器大厅、高能束运线大厅、治疗室、放射性固体废物暂存间及废水暂存间；

（2）监督区：上述各控制区屏蔽墙体外紧邻的场所，如治疗室控制室、加速器控制室及设备机房等。

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

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

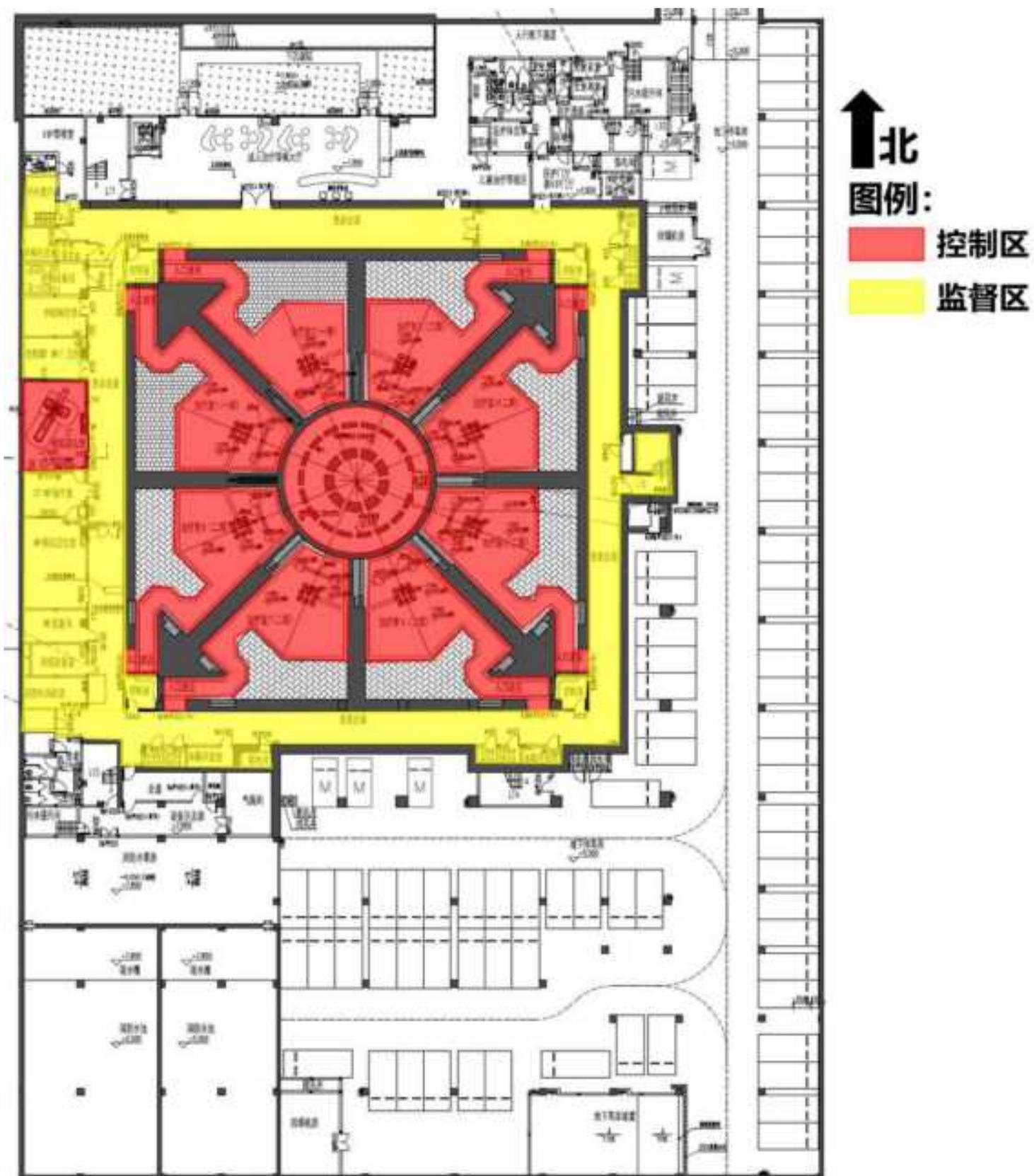


图 4-1 惠州重离子医学中心项目地下一层辐射工作场所分区示意图

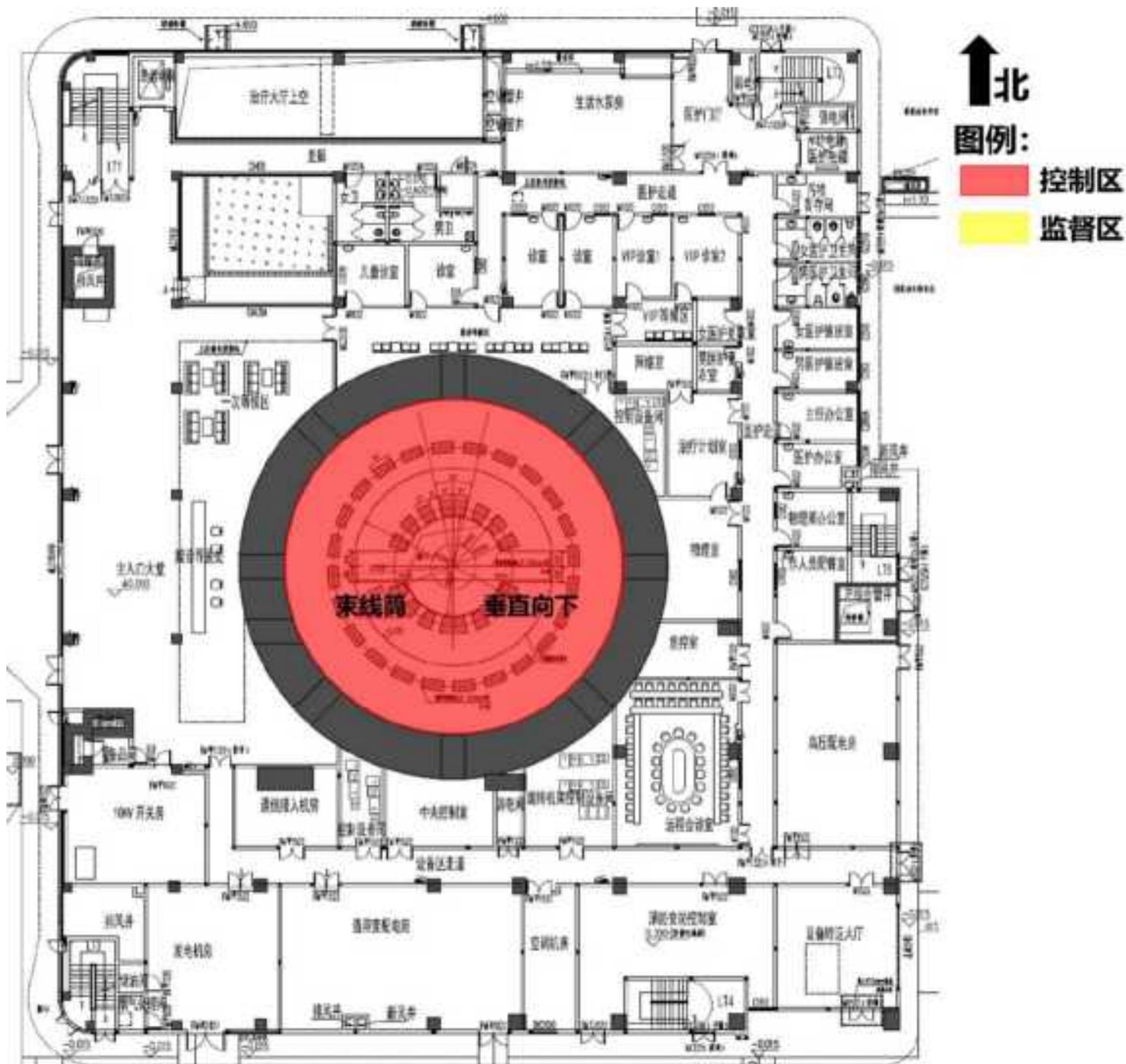


图 4-2 惠州重离子医学中心项目地上一层辐射工作场所分区示意图

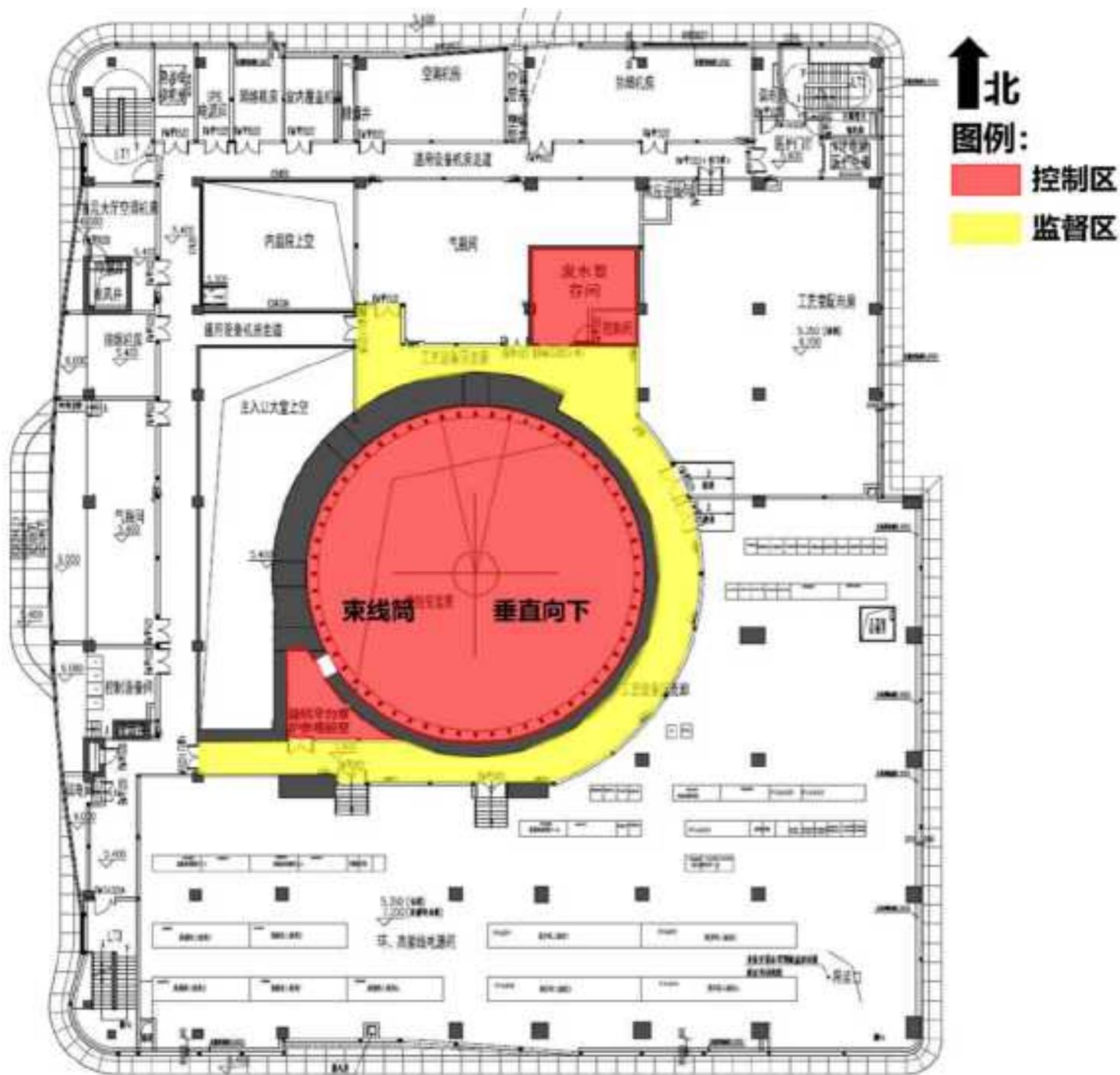


图 4-3 惠州重离子医学中心项目地上二层辐射工作场所分区示意图

4.2 辐射屏蔽设计

重离子治疗系统进行辐射防护设计时，其屏蔽设计需满足以下标准和要求：

(1) 需考虑“年剂量约束值”和“工作场所屏蔽体外剂量率控制限值”的双重标准；

(2) 根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中的规定，放射治疗室屏蔽设计应按照额定最大能量、最大剂量率、最大工作负荷、最大照射野等条件和参数进行计算，同时应充分考虑所有初、次级辐射对治疗室邻近场所中驻留人员的照射。

近代物理所会为用户推荐国内专门的辐射防护设计单位，与建筑设计单位共同完成重离子治疗系统的辐射屏蔽设计，以确保按照我国法规标准中“年剂量约束值”和“工作场所屏蔽体外剂量率限值”的双重标准设计屏蔽墙体厚度。

此外，辐射屏蔽设计还需综合考虑用户单位的建筑面积、建筑结构布局、装置布局等因素，这些因素因用户单位使用场所的不同而不同。考虑到用户单位在使用重离子治疗系统前，需要编制环境影响评价文件，并对工作场所辐射屏蔽设计进行评价，最终编制的环境影响评价文件须取得用户当地生态环境部门的批复后，近代物理所方可进行设备的安装调试。

重离子治疗系统屏蔽设计需要满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中的相关要求，并需要综合考虑用户单位使用系统的工作负荷、束流使用因子、装置布局、建筑结构布局以及用户当地审管部门的相关要求等因素。同时用户单位在使用重离子治疗系统前，需要进行环境影响评价和安全分析，并对其使用场所建筑墙体的屏蔽设计进行评价，确保其能够满足重离子治疗系统屏蔽设计标准的最低要求。最终编制的环境影响评价文件须报送至审管部门审批，选择有资质的施工单位对满足要求的辐射屏蔽设计进行建造。

目前，重离子治疗系统辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

4.2.1 年剂量约束值

参照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中对从事放射治疗的工作人员职业照射和公众照射的剂量约束值应符合以下要求：

（a）一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a。

（b）公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

4.2.2 屏蔽体外剂量率控制水平

重离子治疗系统屏蔽体外剂量率控制水平的确定主要以《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中的相关要求为依据：

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

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

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

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

2) 按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,max}$ ($\mu\text{Sv/h}$): 人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所： $\dot{H}_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；

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

（2）穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量 250 μSv 加以控制。

(3) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 30 cm 处的剂量率参考控制水平可按 100 $\mu\text{Sv/h}$ 加以控制。

4.3 辐射屏蔽案例-惠州重离子医学中心项目

针对惠州重离子医学中心项目的重离子治疗系统。采用 FLUKA 程序计算重离子治疗系统辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平。

FLUKA 程序是一种基于蒙特卡罗模拟的粒子物理计算程序，它包含了详细的强子和原子核相互作用模型、强子和电磁过程之间的耦合等物理作用原理。该程序由欧洲核子研究中心(CERN)主导研发,程序开源，可在 Linux 及 Unix 系统下运行。FLUKA 程序可用来模拟带电粒子、中子、光子、缪子、中微子、 π 介子等数十种不同粒子的相互作用和输运过程，目前已被广泛应用于加速器辐射源项计算、感生放射性分析、屏蔽设计、剂量测量、探测器设计及放射治疗等多个研究领域。程序采用 BME、RQMD 和 DPMJET 模型来模拟重离子的输运过程,上述三种模型适用的能量范围分别为库仑势垒至 100MeV/u、100MeV 至 5GeV/及更高能量。

同时由于 FLUKA 程序搭配 fair 程序具备操作界面功能强大且易于上手的优势，且自带能耗计算模型、能够直接开展感生放射性模拟，是加速器感生放射性领域研究中应用最为广泛的蒙特卡洛程序。该程序在 FAIR、CSNS、HIMM 及 HIRFL 等多台大型粒子加速器的辐射防护设计中得到了广泛的应用，其可靠性也得到了充分验证。

模拟计算使用的模型如图 4-5~图 4-6 所示，计算所用束流损失数据主要取自表 3-6，具体如下：

(1) 粒子种类设置为 ^{12}C ；

(2) 束流在直线、注入线、注入点及俘获过程中会有损失，但是由于损失束流的能量仅为 4 MeV/u，与高能碳离子的束流损失相比，其对屏蔽造成的影响可以忽略。

经同步环加速后碳离子束的最高能量达到了 400 MeV/u，束流在环引出口

的集中损失流强为 2.66×10^7 pps、在 高能束运线的均匀损失流强为 1.23×10^5 pps/m、在终端的集中损失流强为 5.00×10^8 pps，这几部分束流损失共同决定了加速器的屏蔽厚度。

束线筒的屏蔽结构详见图 3-14，是一个圆筒状的封闭屏蔽墙，材料为普通混凝土。在 FLUKA 模拟计算中，设定的密度是 2.3g/cm^3 ，因此密度要求 $> 2.3 \text{g/cm}^3$ 即可满足辐射屏蔽要求。



图 4-5 惠州重离子医学中心项目加速器大厅及水平治疗室计算模型

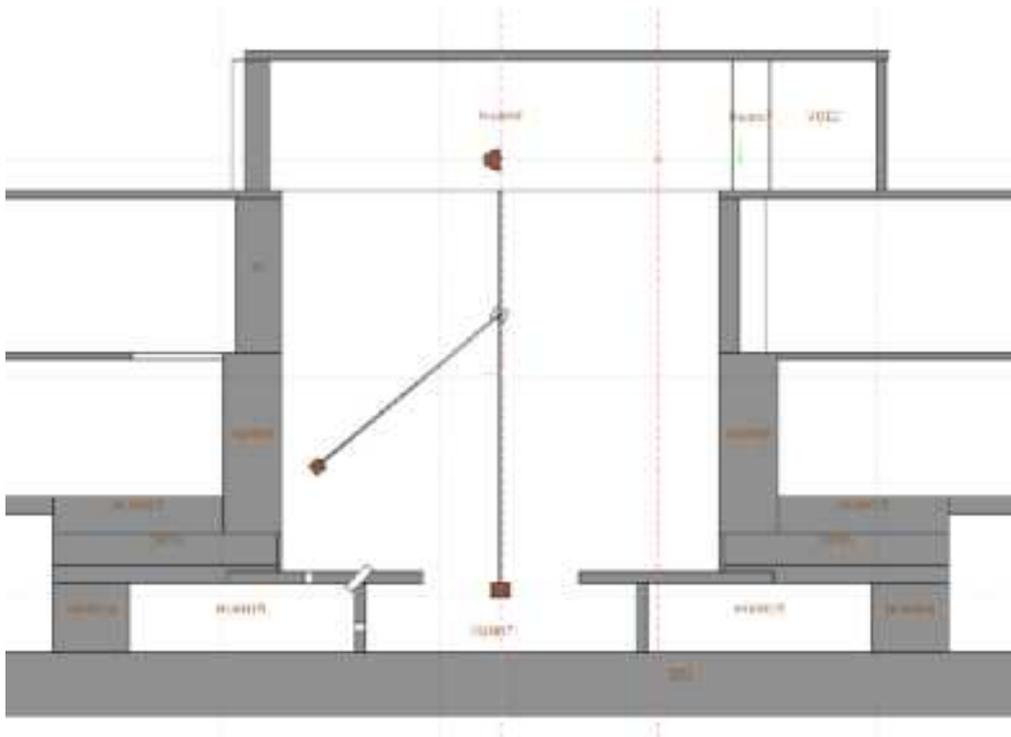


图 4-6 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅与多角度治疗室计算模型

4.3.1 屏蔽设计

惠州重离子医学中心项目的重离子治疗系统机房辐射屏蔽设计如表 4-1 所示。屏蔽厚度示意图如图 4-7~图 4-11 所示，由于具有造价便宜、屏蔽适应性强、与土建契合性高等优势，混凝土是加速器屏蔽设计中最常用的材料。此外铁作为常用重材料，也经常被用来与混凝土结合使用，以实现局部增强屏蔽的作用。在屏蔽设计所用的材料中，混凝土密度不低于 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，铁的密度不低于 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。

由于用户单位的楼层布局将根据其实际工作场所的情况进行变化，因此下文所示各区域所在楼层位置仅为惠州重离子医学中心项目的设置情况，并不代表所有用户单位的楼层布置均与此案例一致。

表 4-1 惠州重离子医学中心项目屏蔽设计一览表

场所名称	位置	墙体屏蔽厚度和材料
加速器大厅	东墙	1m 混凝土
	西墙	1.0m~2.5m 混凝土

		北墙	迷道内墙 1m 混凝土 迷道外墙 0.4m 混凝土
		南墙	1.4m 混凝土
		底板	分区域 0.5m、1m、1.5m、2.5m 混凝土
		顶板	分区域 0.5m、1m 混凝土
高能束运线大厅	地下一层	四周墙体	0.5m 混凝土
		顶板	0.9m 混凝土
		底板	1.2m 混凝土
	地上一层	四周墙体	2.8m 混凝土
	地上二层	东墙	0.9m 混凝土
		西墙	0.8m~2.1m 混凝土
		北墙	2.1m 混凝土
		南墙	0.9m 混凝土
	地上三层	东墙	0.4m 混凝土
		西墙	1m~1.6m 混凝土
		北墙	0.4m~1.0m 混凝土
		南墙	1m~2.2m 混凝土
		顶板	0.6m 混凝土
	水平治疗室		底板
北墙			2.2m 混凝土
西墙			4.6m 混凝土 (局部含 0.5m 铁)
东墙			2.5m 混凝土
南墙			迷道内墙: 2m 混凝土 迷道外墙: 0.4m 混凝土
顶板			分区域 0.8m~2.1m 混凝土
1#~8#多角度治疗室 (以 1# 多角度治疗室为例)		底板	分区域 0.8m、2.7m、3.43m 混凝土
		北墙	分区域 1.2m (含 0.2m~0.6m 厚铁)、1.5m 混凝土
		西墙	主屏蔽墙: 4.5m 混凝土 迷道内墙: 2.4m 混凝土 迷道外墙: 1m 混凝土
		东墙	0.5m 混凝土
		南墙	分区域 1.2m (含 0.2m~0.6m 厚铁)、1.5m 混凝土

	顶板	分区域 0.5m、4m 混凝土
	底板	分区域 1.35m、2.4m、3.2m 混凝土

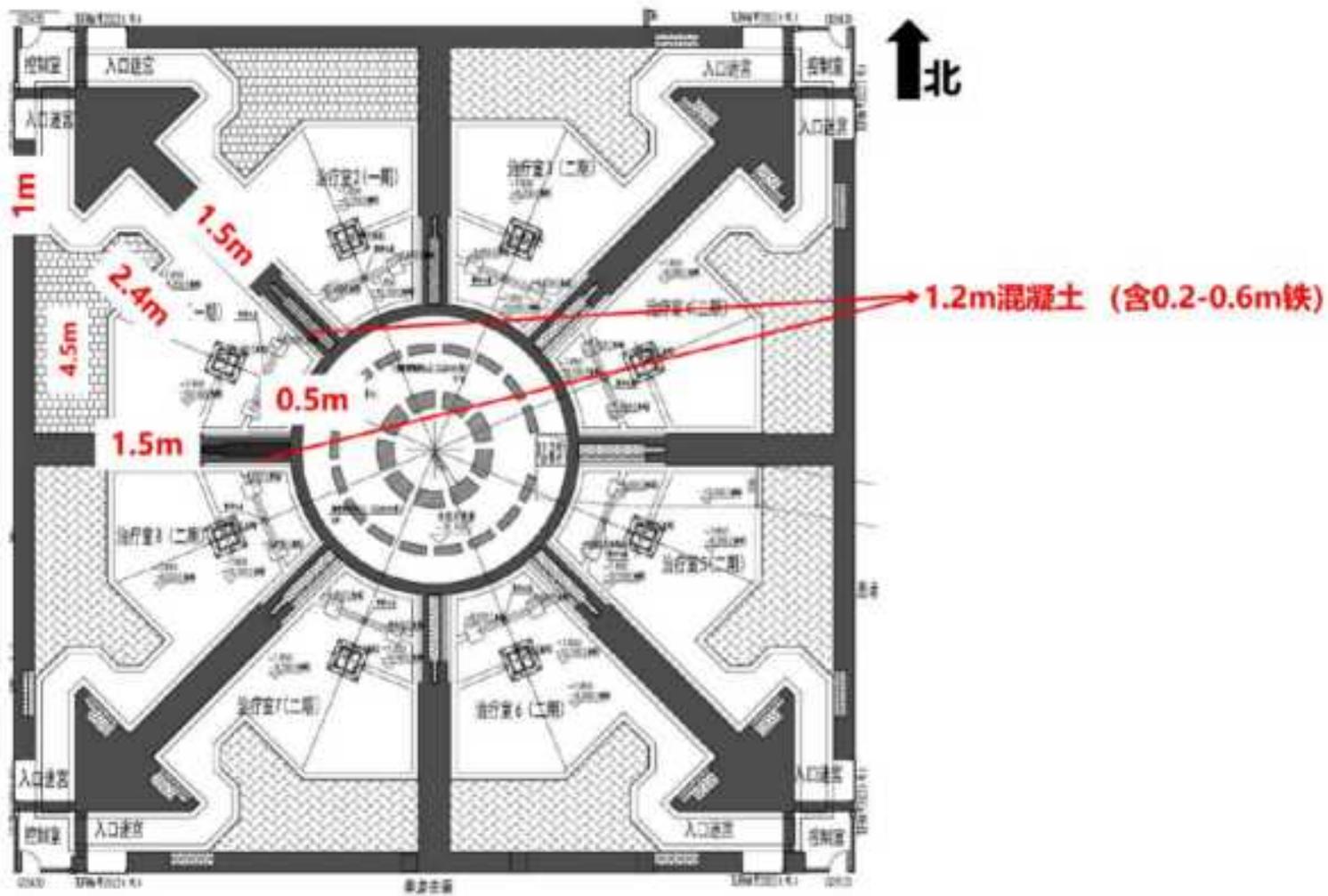


图 4-7 惠州重离子医学中心项目地下一层屏蔽结构平面示意图

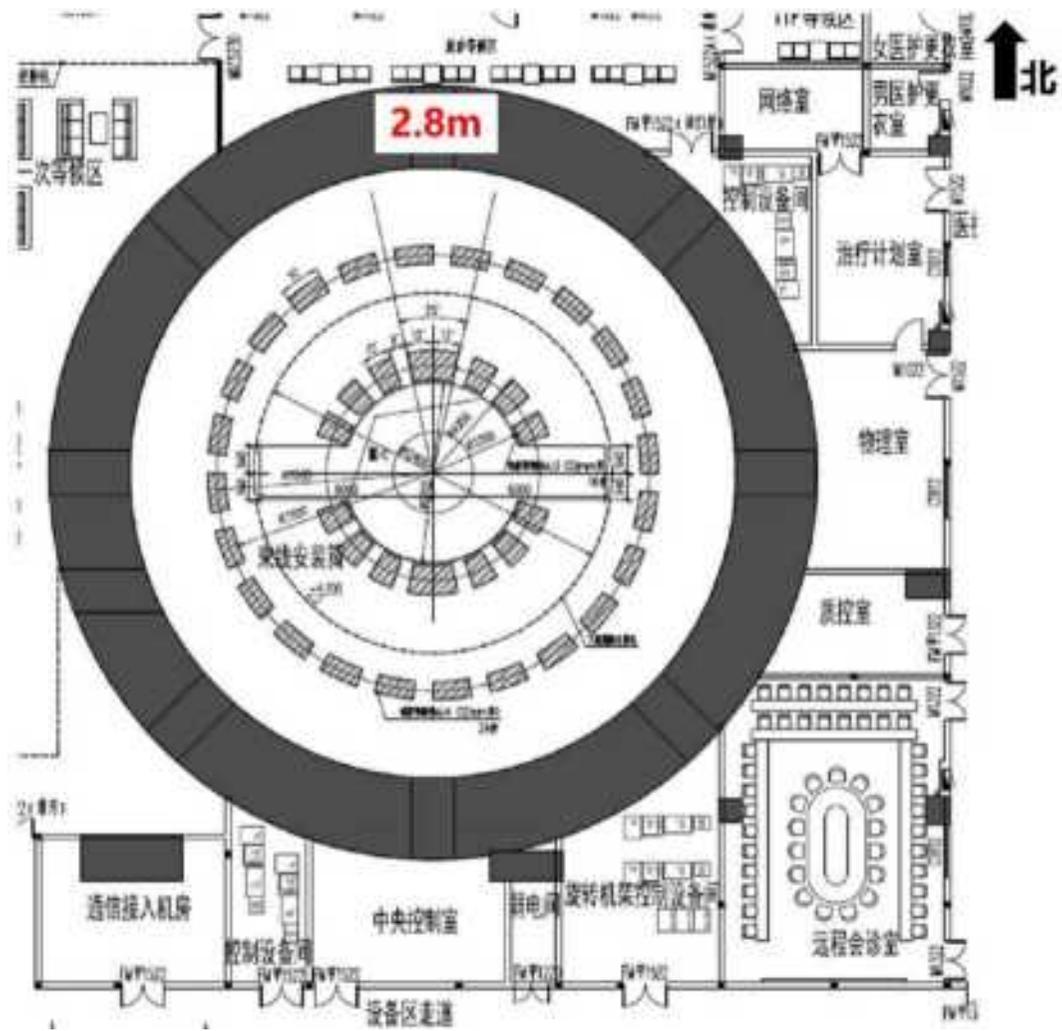


图 4-8 惠州重离子医学中心项目地上一层屏蔽结构平面示意图

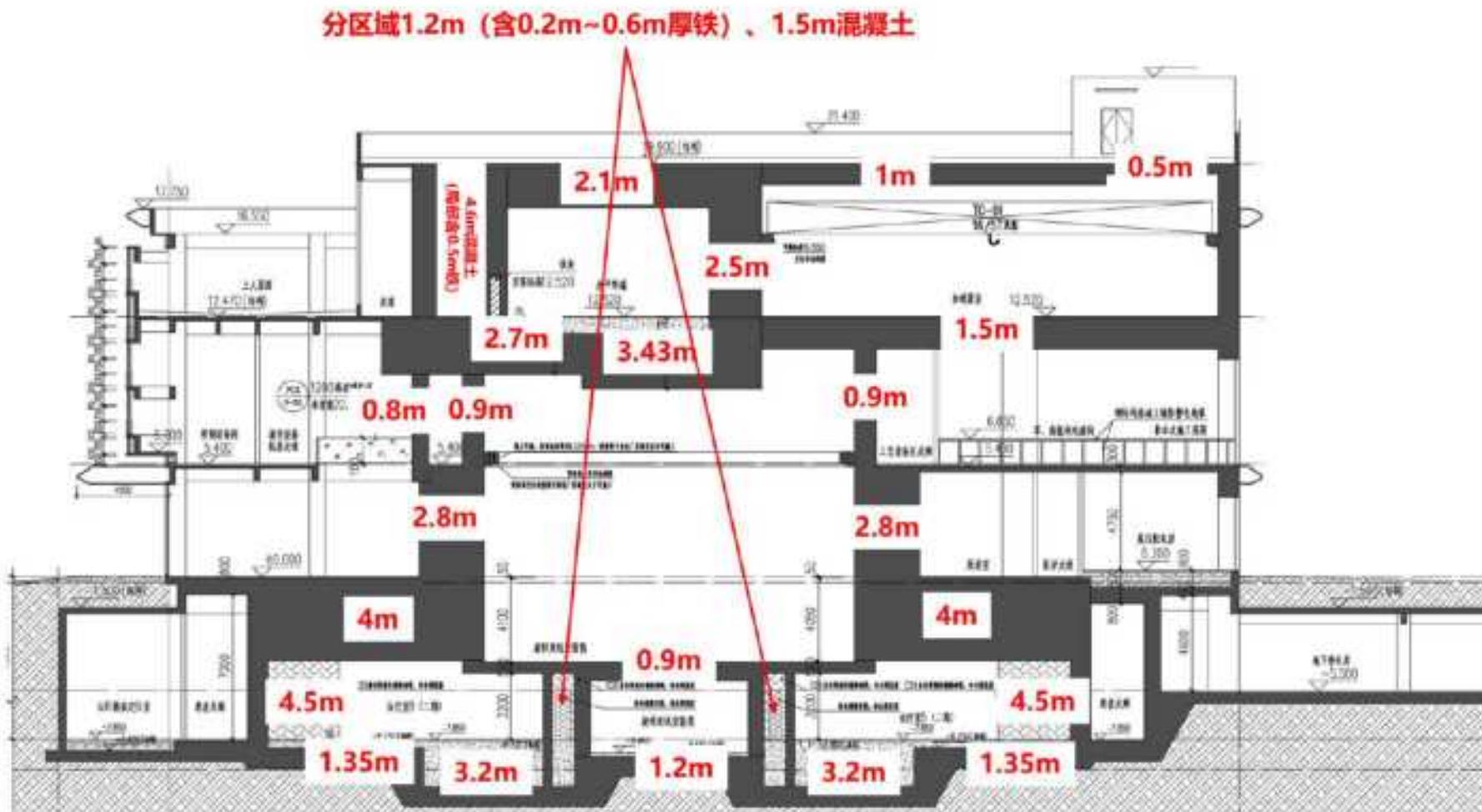


图 4-11 惠州重离子医学中心项目屏蔽结构剖面示意图

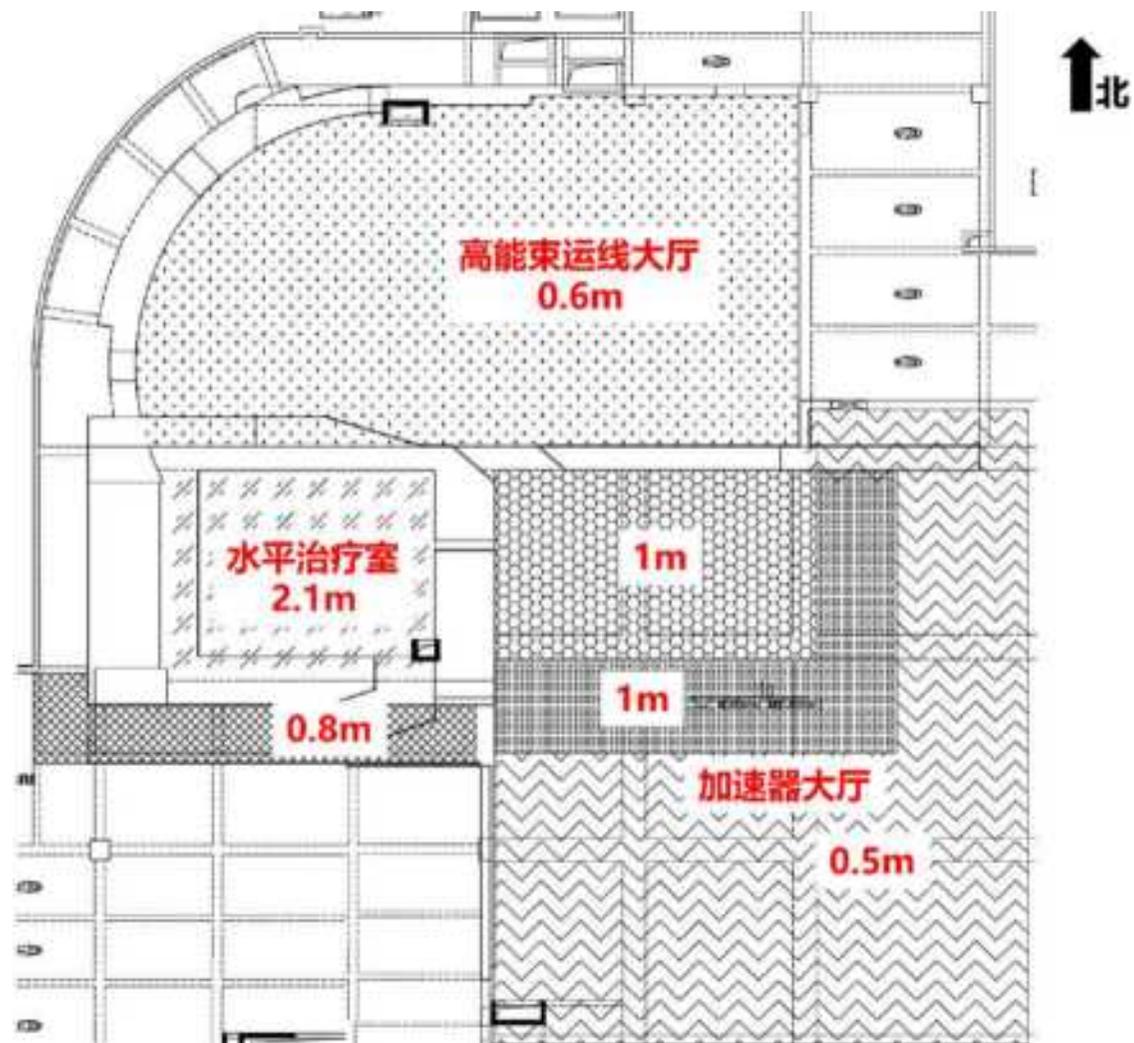


图 4-12 惠州重离子医学中心项目水平治疗室、高能束运线大厅及加速器大厅顶板屏蔽厚度示意图

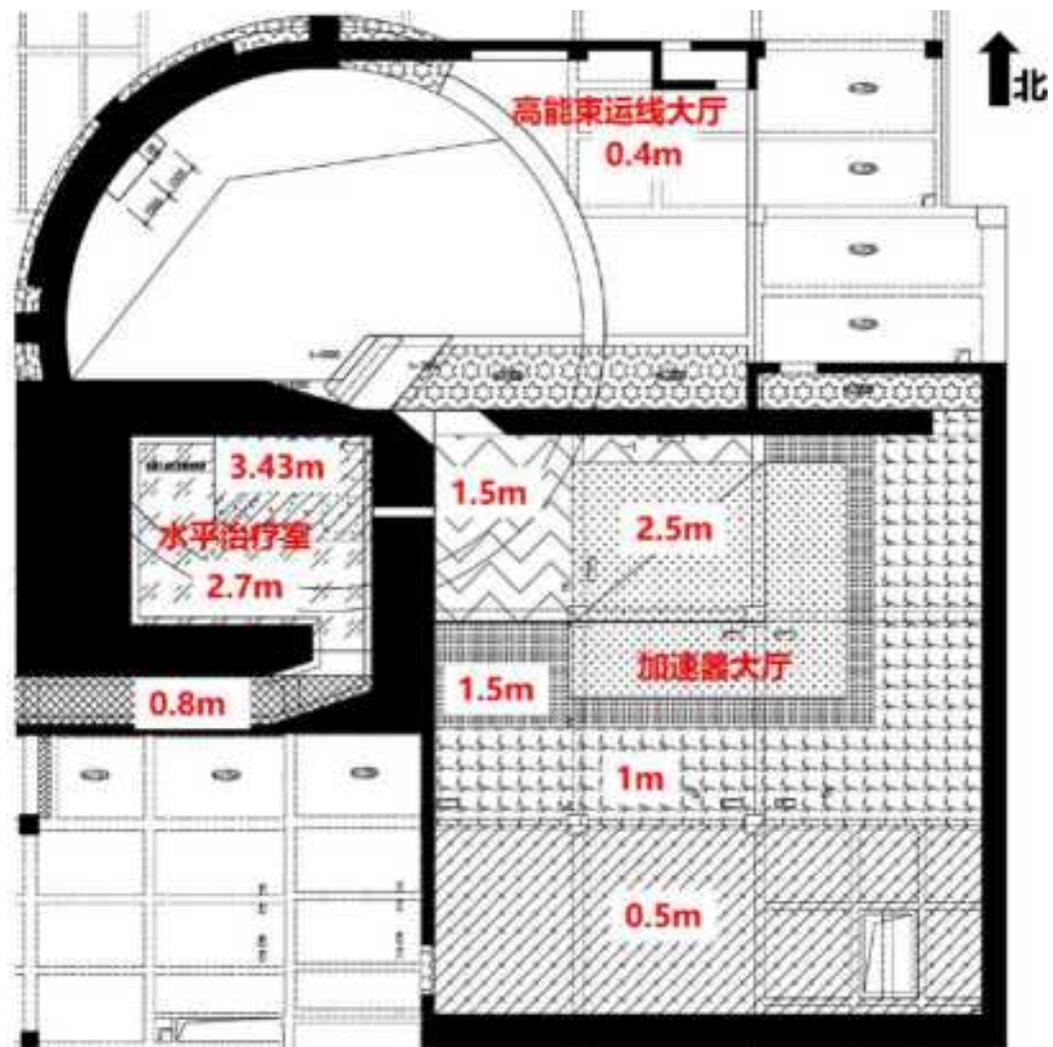


图 4-13 惠州重离子医学中心项目水平治疗室、高能束运线大厅及加速器大厅地板屏蔽厚度示意图

4.3.2 关注点设置

根据惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统的平面布置及周围环境情况设置了关注点，关注点周围环境及剂量率控制水平见表 4-2，各关注点位置示意图见图 4-14~图 4-18。

表 4-2 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统屏蔽体外关注点

源项	关注点序号	关注点位置	楼层
治疗室 1 或 2 水平治疗	1	1#、2#多角度治疗室控制室	地下一层
治疗室 2 水平治疗	2	2#多角度治疗室迷道口	
	3	2#多角度治疗室北侧患者走廊	
治疗室 3 水平治疗	4	3#多角度治疗室北侧患者走廊	
	5	3#多角度治疗室迷道口	
治疗室 3 或 4 水平治疗	6	3#、4#多角度治疗室控制室	
治疗室 4 水平治疗	7	4#多角度治疗室迷道口	
	8	4#多角度治疗室东侧患者走廊	
治疗室 5 水平治疗	9	5#多角度治疗室东侧患者走廊	
	10	5#多角度治疗室迷道口	
治疗室 5 或 6 水平治疗	11	5#、6#多角度治疗室控制室	
治疗室 6 水平治疗	12	6#多角度治疗室迷道口	
	13	6#多角度治疗室南侧患者走廊	
治疗室 7 水平治疗	14	7#多角度治疗室南侧患者走廊	
	15	7#多角度治疗室迷道口	
治疗室 7 或 8 水平治疗	16	7#、8#多角度治疗室控制室	
治疗室 8 水平治疗	17	8#多角度治疗室迷道口	
	18	8#多角度治疗室西侧	
治疗室 1 水平治疗	19	1#多角度治疗室控制室	
	20	1#多角度治疗室迷道口	
治疗室 2 水平治疗	23	3#多角度治疗室内部西墙内	

		侧 30cm 处	
		3#多角度治疗室内部西墙内 侧 1m 处	
治疗室 4 水平治疗	24	3#多角度治疗室内部东墙内 侧 30cm 处	
		3#多角度治疗室内部东墙内 侧 1m 处	
治疗室 3 水平治疗	25	4#多角度治疗室内部北墙内 侧 30cm 处	
		4#多角度治疗室内部北墙内 侧 1m 处	
治疗室 5 水平治疗	26	4#多角度治疗室内部南侧内 侧 30cm 处	
		4#多角度治疗室内部南侧内 侧 1m 处	
治疗室 4 水平治疗	27	5#多角度治疗室内部北墙内 侧 30cm 处	
		5#多角度治疗室内部北墙内 侧 1m 处	
治疗室 6 水平治疗	28	5#多角度治疗室内部南墙内 侧 30cm 处	
		5#多角度治疗室内部南墙内 侧 1m 处	
治疗室 5 水平治疗	29	6#多角度治疗室内部东墙内 侧 30cm 处	
		6#多角度治疗室内部东墙内 侧 1m 处	
治疗室 7 水平治疗	30	6#多角度治疗室内部西墙内 侧 30cm 处	
		6#多角度治疗室内部西墙内 侧 1m 处	
治疗室 6 水平治疗	31	7#多角度治疗室内部东墙内 侧 30cm 处	
		7#多角度治疗室内部东墙内 侧 1m 处	
治疗室 8 水平治疗	32	7#多角度治疗室内部西墙内 侧 30cm 处	
		7#多角度治疗室内部西墙内 侧 1m 处	
治疗室 7 水平治疗	33	8#多角度治疗室内部南墙内 侧 30cm 处	
		8#多角度治疗室内部南墙内 侧 1m 处	
治疗室 1 水平治疗	34	8#多角度治疗室内部北墙内 侧 30cm 处	
		8#多角度治疗室内部北墙内 侧 1m 处	
治疗室 8 水平治疗	35	1#多角度治疗室内部南墙内 侧 30cm 处	
		1#多角度治疗室内部南墙内	

		侧 1m 处		
治疗室 2 水平治疗	36	1#多角度治疗室内部北墙内 侧 30cm 处		
		1#多角度治疗室内部北墙内 侧 1m 处		
治疗室 1 水平治疗	37	2#多角度治疗室内部西墙内 侧 30cm 处		
		2#多角度治疗室内部西墙内 侧 1m 处		
治疗室 3 水平治疗	38	2#多角度治疗室内部西墙内 侧 30cm 处		
		2#多角度治疗室内部西墙内 侧 1m 处		
高能束线朝向关注点 供束	39	一次等候区		地上一层
	40	就诊等候区		
	41	治疗计划室		
	42	物理室		
	43	质控室		
	44	远程会议室		
	45	旋转机架设备间		
	46	中央控制室		
	47	通信接入机房		
	48	接诊导医处		
	49	主入口大堂		
	50	儿童诊室		
	51	诊室		
	52	诊室		
	53	诊室		
	54	VIP 诊室		
	55	VIP 诊室		
	56	VIP 等候区		
	57	医护走道		
	58	女医护值班室		
	59	男医护值班室		
60	主任办公室			
61	医护报告书			
62	物理师办公室			
63	工作人员配餐室			

	64	主入口大堂南侧入口处	地上二层
	65	通信设备机房走道入口门	
	66	气瓶间西侧入口	
	67	气瓶间东侧入口	
	68	废水暂存间入口	
	69	工艺设备区走廊东侧北入口	
	70	工艺设备区走廊东侧南入口	
	71	工艺设备区走廊南侧东入口	
	72	工艺设备区走廊南侧西入口	
	73	高能束线大厅二层入口	
加速器及水平终端供束	74	治疗等候区	地上三层
	75	水平治疗室迷道口	
	76	水平治疗室西侧走廊	
加速器及高能束线供束	77	高能束运线大厅西侧走道 1	
	78	高能束运线大厅西侧走道 2	
	79	高能束运线大厅北侧走道	
	80	高能束运线大厅迷道口	
加速器及高能束线供束	81	加速器大厅迷道口	屋顶
加速器及水平终端供束	82	高频设备间	
加速器及高能束线供束	83	高能束运线大厅顶板外	土壤
加速器及水平终端供束	84	水平治疗室顶板外	
加速器及高能束线供束	85	高能束运线大厅底板外	地下一层
治疗室 45°供束	86	7#多角度治疗室底板外	
治疗室 45°供束	87	2#多角度治疗室底板外	
5#多角度治疗室垂直供束	88	地下工艺管廊通道口处	地上三层
加速器及高能束线供束	89	水平治疗室内部东墙内侧	

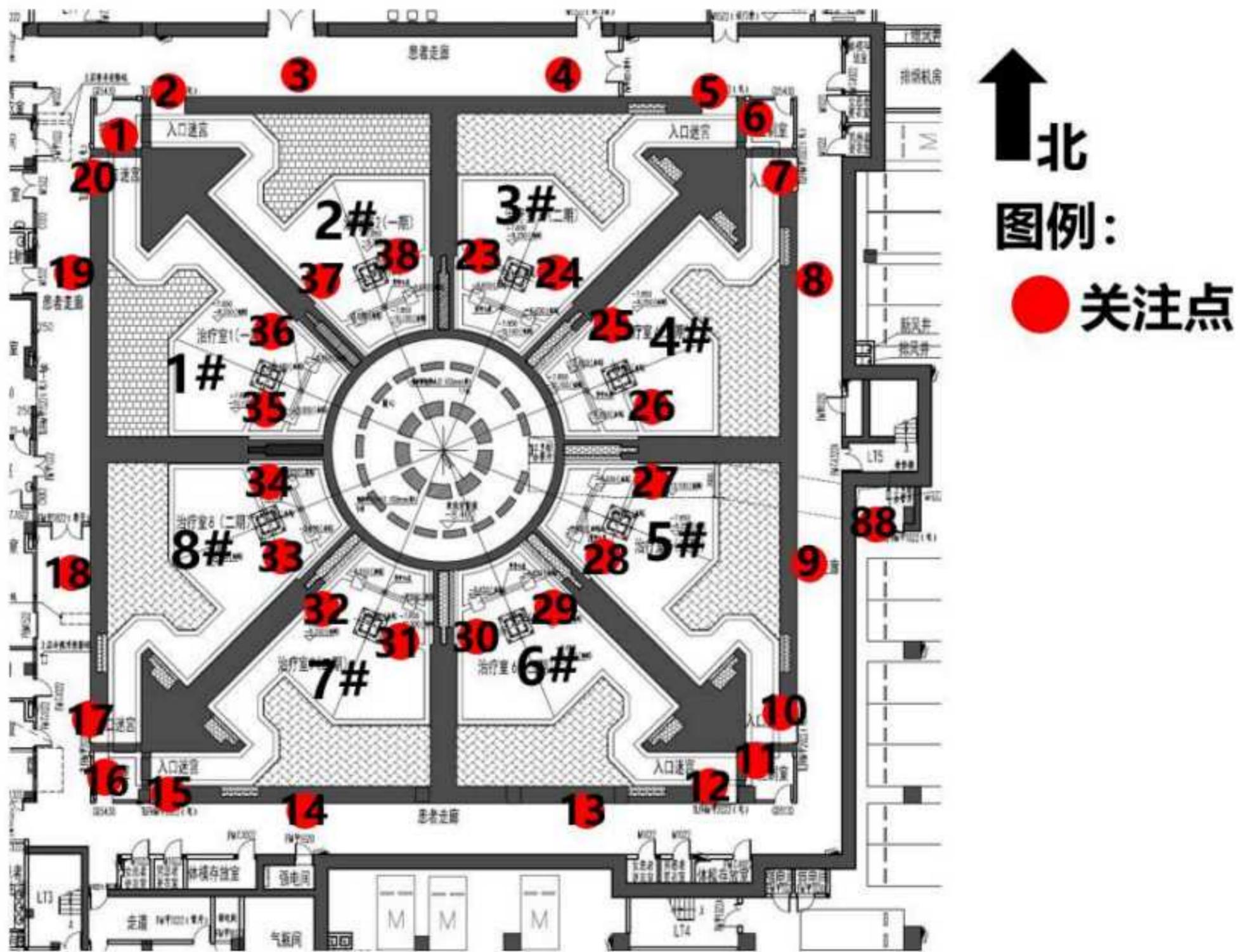


图 4-14 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地下一层）

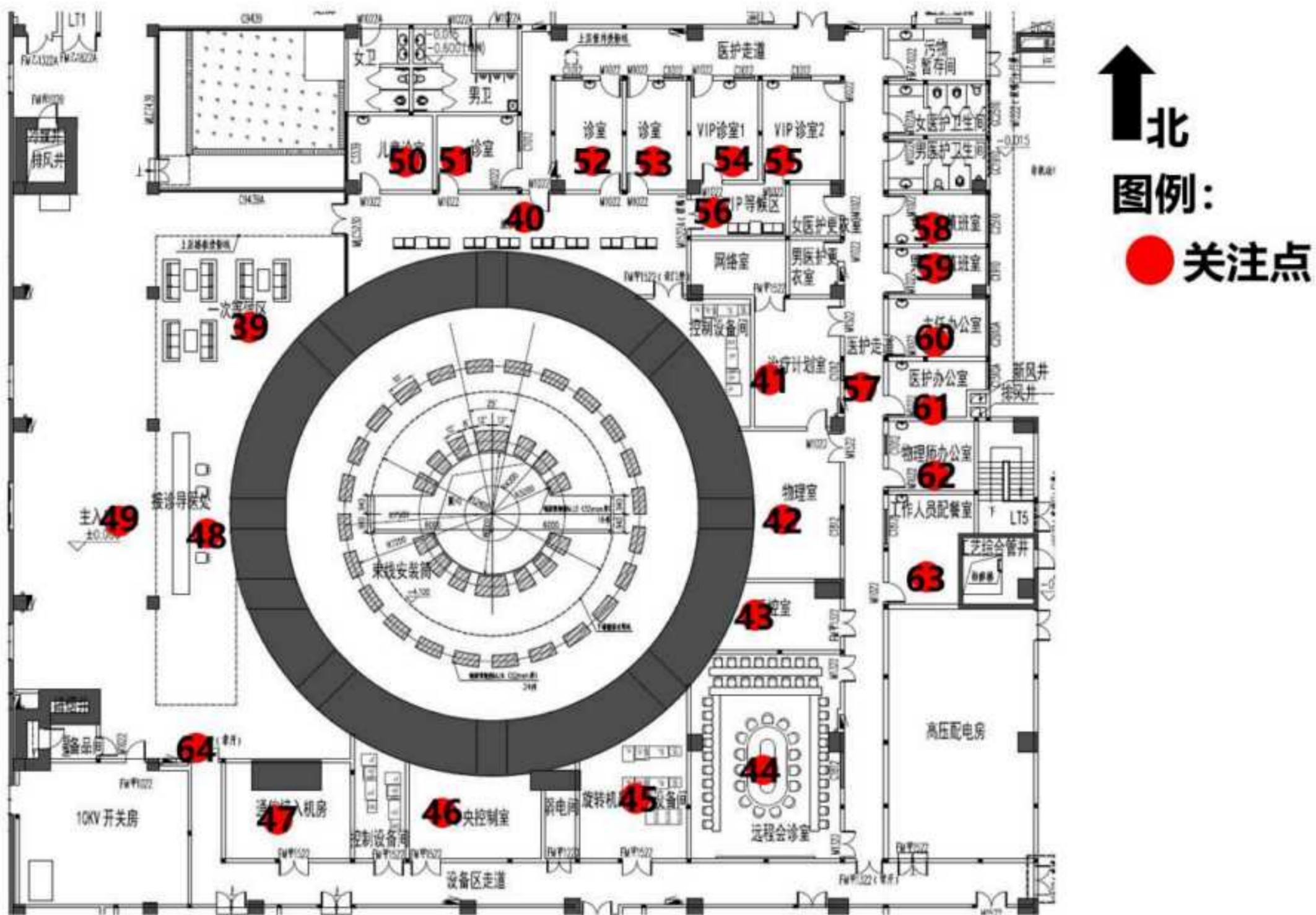


图 4-15 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地上一层）

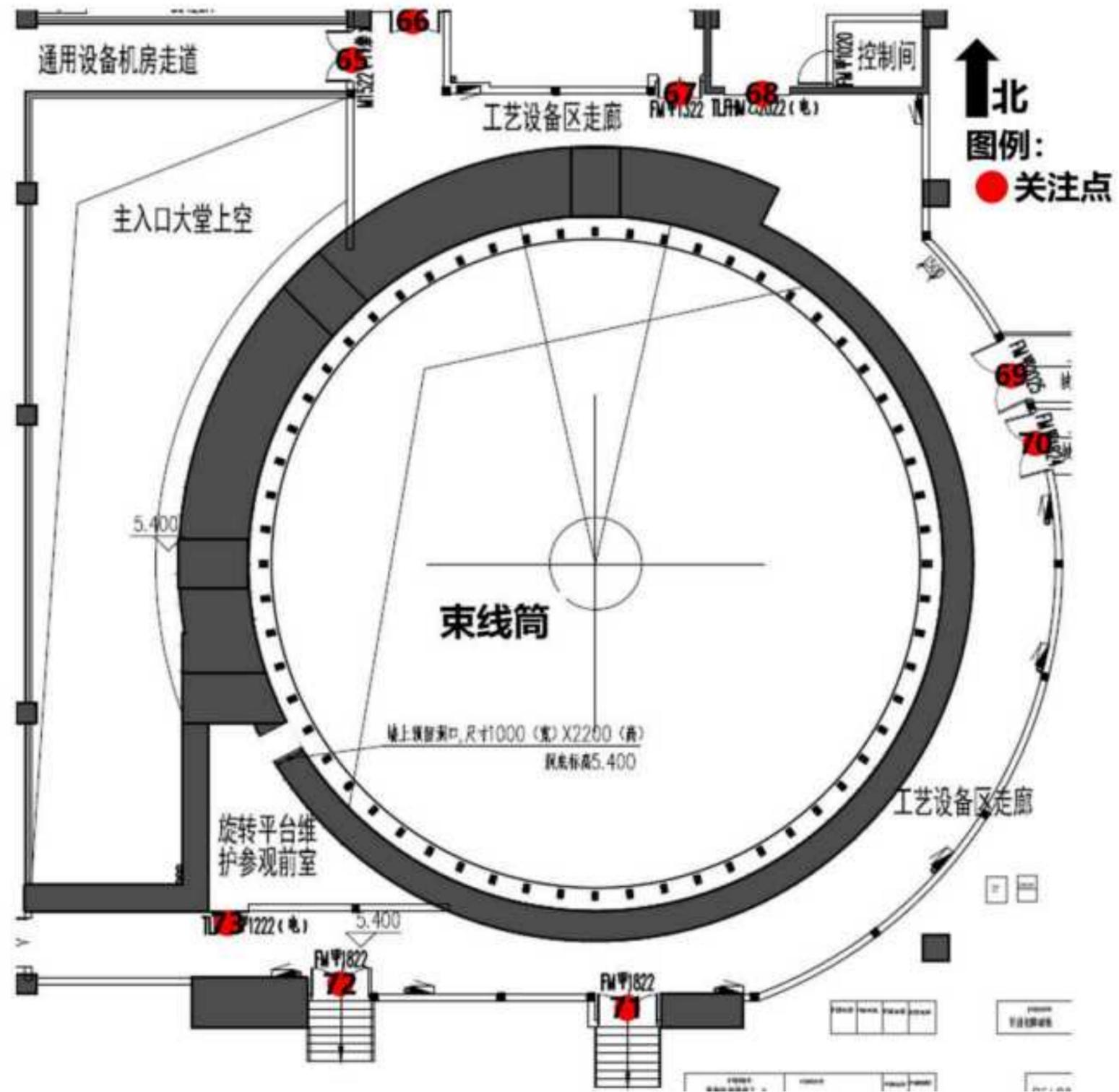


图 4-16 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地上二层）

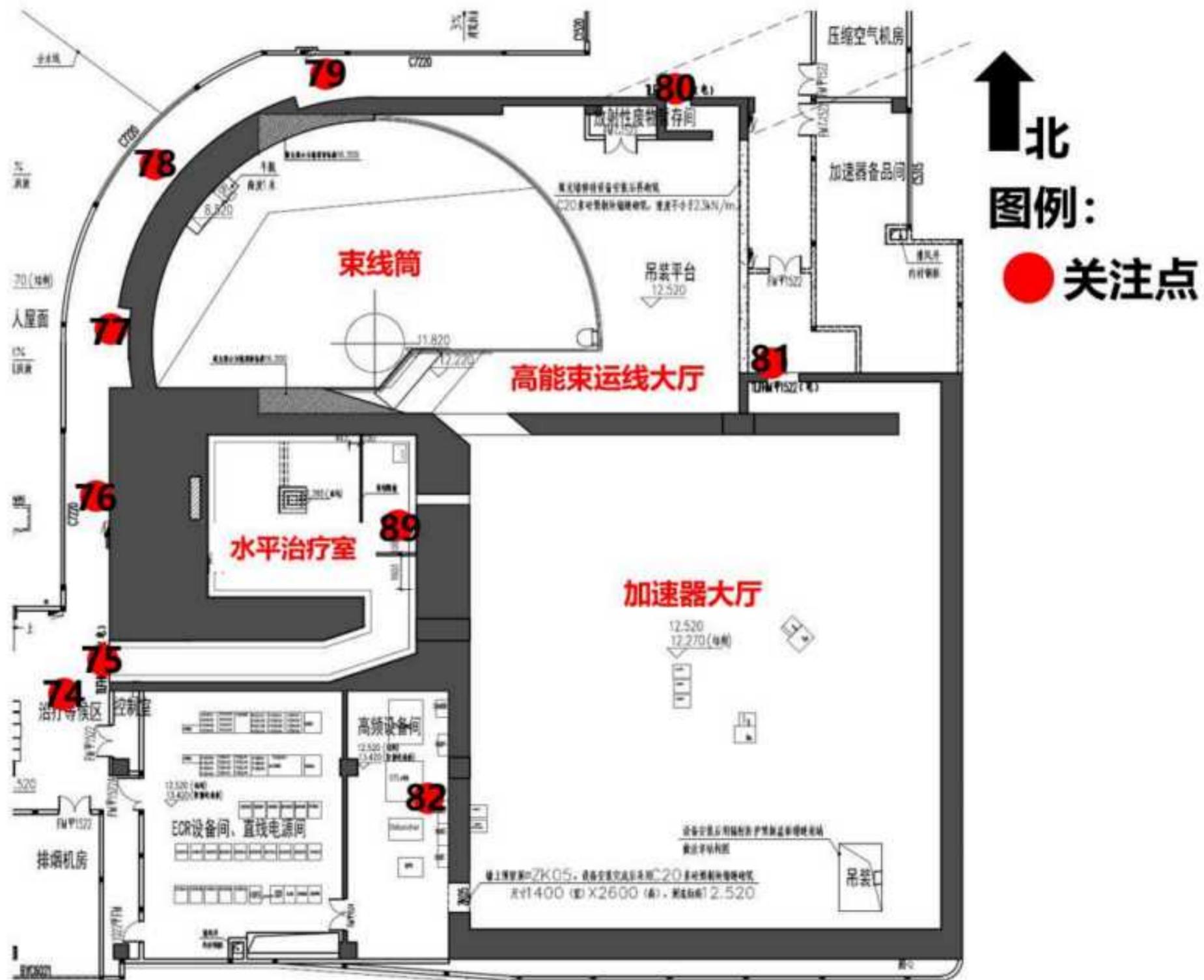


图 4-17 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统关注点平面图示意图（地上三层）

4.3.3 计算结果

根据 FLUKA 程序的计算结果，惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统屏蔽体外各关注点处的剂量率计算结果如表 4-3 所示，模拟得到的剂量率分布图见图 4-19~图 4-27。

表 4-3 惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统屏蔽体外关注点剂量率模拟计算结果， $\mu\text{Sv/h}$

源项	楼层	关注点序号	关注点位置	计算结果	剂量率控制水平
治疗室 1 或 2 水平治疗	地下一层	1	1#、2#多角度治疗室控制室	1.1	2.5
治疗室 2 水平治疗		2	2#多角度治疗室迷道口	2.5	10
		3	2#多角度治疗室北侧患者走廊	2.4	6.94
治疗室 3 水平治疗		4	3#多角度治疗室北侧患者走廊	2.4	6.94
		5	3#多角度治疗室迷道口	2.5	10
治疗室 3 或 4 水平治疗		6	3#、4#多角度治疗室控制室	1.1	2.5
治疗室 4 水平治疗		7	4#多角度治疗室迷道口	2.5	10
		8	4#多角度治疗室东侧患者走廊	2.4	6.94
治疗室 5 水平治疗		9	5#多角度治疗室东侧患者走廊	2.4	6.94
		10	5#多角度治疗室迷道口	2.5	10
治疗室 5 或 6 水平治疗		11	5#、6#多角度治疗室控制室	1.1	2.5
治疗室 6 水平治疗		12	6#多角度治疗室迷道口	2.5	10
		13	6#多角度治疗室南侧患者走廊	2.4	10
治疗室 7 水平治疗		14	7#多角度治疗室南侧患者走廊	2.4	10
		15	7#多角度治疗室迷道口	2.5	6.94
治疗室 7 或 8 水平治疗		16	7#、8#多角度治疗室控制室	1.1	2.5
治疗室 8 水平治疗		17	8#多角度治疗室迷道口	2.5	6.94
		18	8#多角度治疗室西侧	2.4	10
治疗室 1 水平治疗		19	1#多角度治疗室控制室	2.4	2.5
		20	1#多角度治疗室迷道口	2.5	0.28
治疗室 2 水平治疗	23	3#多角度治疗室内部西墙内侧 30cm 处	7.8	10	
		3#多角度治疗室内部西墙内侧 1m 处	4.9		

治疗室 4 水平治疗	24	3#多角度治疗室内部东墙内侧 30cm 处	7.8	10
		3#多角度治疗室内部东墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 3 水平治疗	25	4#多角度治疗室内部北墙内侧 30cm 处	7.8	10
		4#多角度治疗室内部北墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 5 水平治疗	26	4#多角度治疗室内部南侧内侧 30cm 处	7.8	10
		4#多角度治疗室内部南侧内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 4 水平治疗	27	5#多角度治疗室内部北墙内侧 30cm 处	7.8	10
		5#多角度治疗室内部北墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 6 水平治疗	28	5#多角度治疗室内部南墙内侧 30cm 处	7.8	10
		5#多角度治疗室内部南墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 5 水平治疗	29	6#多角度治疗室内部东墙内侧 30cm 处	7.8	10
		6#多角度治疗室内部东墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 7 水平治疗	30	6#多角度治疗室内部西墙内侧 30cm 处	7.8	10
		6#多角度治疗室内部西墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 6 水平治疗	31	7#多角度治疗室内部东墙内侧 30cm 处	7.8	10
		7#多角度治疗室内部东墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 8 水平治疗	32	7#多角度治疗室内部西墙内侧 30cm 处	7.8	10
		7#多角度治疗室内部西墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 7 水平治疗	33	8#多角度治疗室内部南墙内侧 30cm 处	7.8	10
		8#多角度治疗室内部南墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 1 水平治疗	34	8#多角度治疗室内部北墙内侧 30cm 处	7.8	10
		8#多角度治疗室内部北墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 8 水平治疗	35	1#多角度治疗室内部南墙内侧 30cm 处	7.8	10
		1#多角度治疗室内部南墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 2 水平治疗	36	1#多角度治疗室内部北墙内侧 30cm 处	7.8	10
		1#多角度治疗室内部北墙内侧 1m 处	4.9	10

治疗室 1 水平治疗		37	2#多角度治疗室内部西墙内侧 30cm 处	7.8	10
			2#多角度治疗室内部西墙内侧 1m 处	4.9	10
治疗室 3 水平治疗		38	2#多角度治疗室内部西墙内侧 30cm 处	7.8	10
			2#多角度治疗室内部西墙内侧 1m 处	4.9	10
高能束线朝向关注点供束	地上一层	39	一次等候区	0.05	0.28
		40	就诊等候区	0.05	0.28
		41	治疗计划室	0.05	2.5
		42	物理室	0.06	2.5
		43	质控室	0.06	2.5
		44	远程会议室	0.01	0.28
		45	旋转机架设备间	0.02	10
		46	中央控制室	0.05	2.5
		47	通信接入机房	0.01	10
		48	接诊导医处	0.06	0.28
		49	主入口大堂	0.01	4.44
		50	儿童诊室	0.01	4.44
		51	诊室	0.01	4.44
		52	诊室	0.01	4.44
		53	诊室	0.01	4.44
		54	VIP 诊室	<0.01	4.44
		55	VIP 诊室	<0.01	4.44
		56	VIP 等候区	0.01	1.11
		57	医护走道	0.01	6.94
		58	女医护值班室	<0.01	0.28
		59	男医护值班室	<0.01	0.28
		60	主任办公室	<0.01	0.28
		61	医护报告书	<0.01	0.28
		62	物理师办公室	<0.01	0.28
	63	工作人员配餐室	<0.01	10	
	64	主入口大堂南侧入口处	0.01	4.44	
	地上二层	65	通信设备机房走道入口门	0.01	10
		66	气瓶间西侧入口	0.01	10
		67	气瓶间东侧入口	0.02	10

		68	废水暂存间入口	0.02	10
		69	工艺设备区走廊东侧北入口	<0.01	10
		70	工艺设备区走廊东侧南入口	<0.01	10
		71	工艺设备区走廊南侧东入口	<0.01	10
		72	工艺设备区走廊南侧西入口	<0.01	10
		73	高能束线大厅二层入口	0.13	10
加速器及水平终端供束	地上三层	74	治疗等候区	0.6	1.11
		75	水平治疗室迷道口	1.5	10
		76	水平治疗室西侧走廊	1.2	6.94
加速器及高能束线供束		77	高能束运线大厅西侧走道1	0.14	6.94
		78	高能束运线大厅西侧走道2	0.25	6.94
		79	高能束运线大厅北侧走道	0.27	6.94
		80	高能束运线大厅迷道口	0.21	10
加速器及高能束线供束		81	加速器大厅迷道口	1.4	10
加速器及水平终端供束		82	高频设备间	0.9	10
加速器及高能束线供束		屋顶	83	高能束运线大厅顶板外	0.7
加速器及水平终端供束	84		水平治疗室顶板外	1.5	10
加速器及高能束线供束	土壤	85	高能束运线大厅底板外	4.2	5500
治疗室 45°供束		86	7#多角度治疗室底板外	4300	5500
治疗室 45°供束		87	2#多角度治疗室底板外	4300	5500
5#多角度治疗室垂直供束	地下一层	88	地下工艺管廊通道口处	<0.01	10
加速器及高能束线供束	地上三层	89	水平治疗室内部东墙内侧	1.4	10

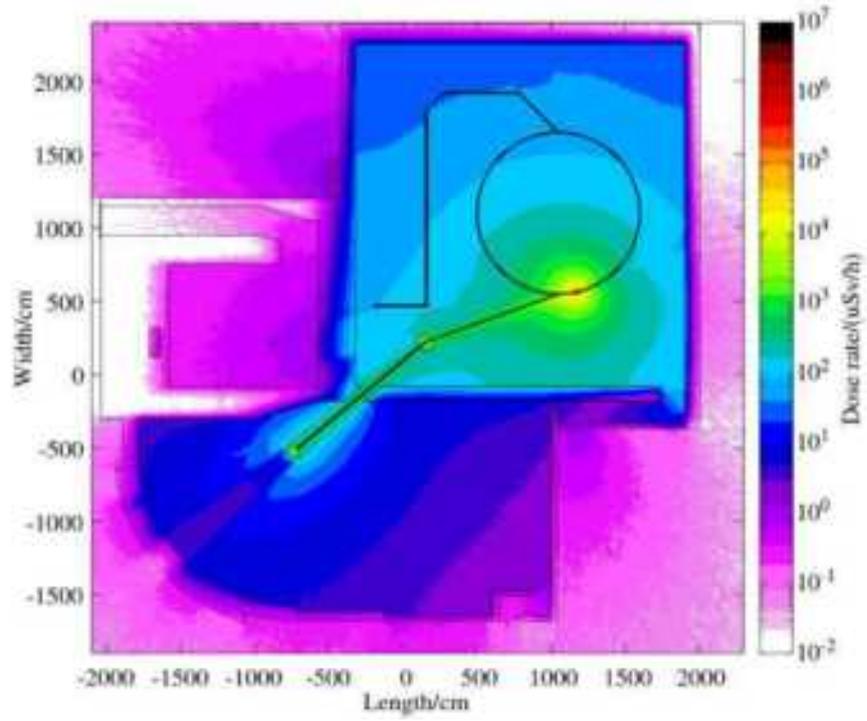


图 4-19 惠州重离子医学中心项目加速器大厅剂量率分布图

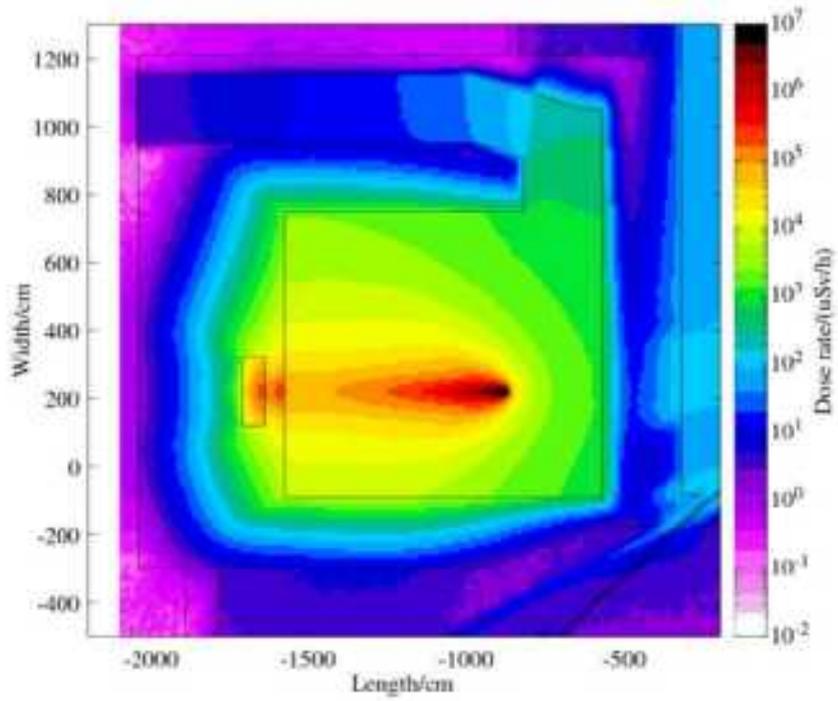


图 4-20 惠州重离子医学中心项目水平终端剂量率分布图

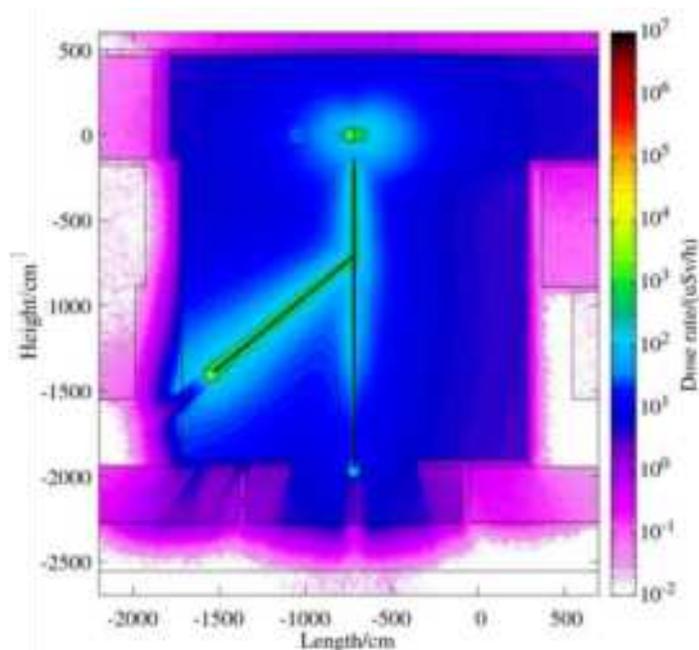


图 4-21 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅（倾斜束线）剂量率分布图

辐射屏蔽计算时，考虑了对屏蔽外辐射影响最大的工况。束线筒每个位置所需的厚度，保守考虑都是按照图中的斜束线正对该方向时（此时屏蔽外剂量率最大）所需要的屏蔽厚度来设计的。

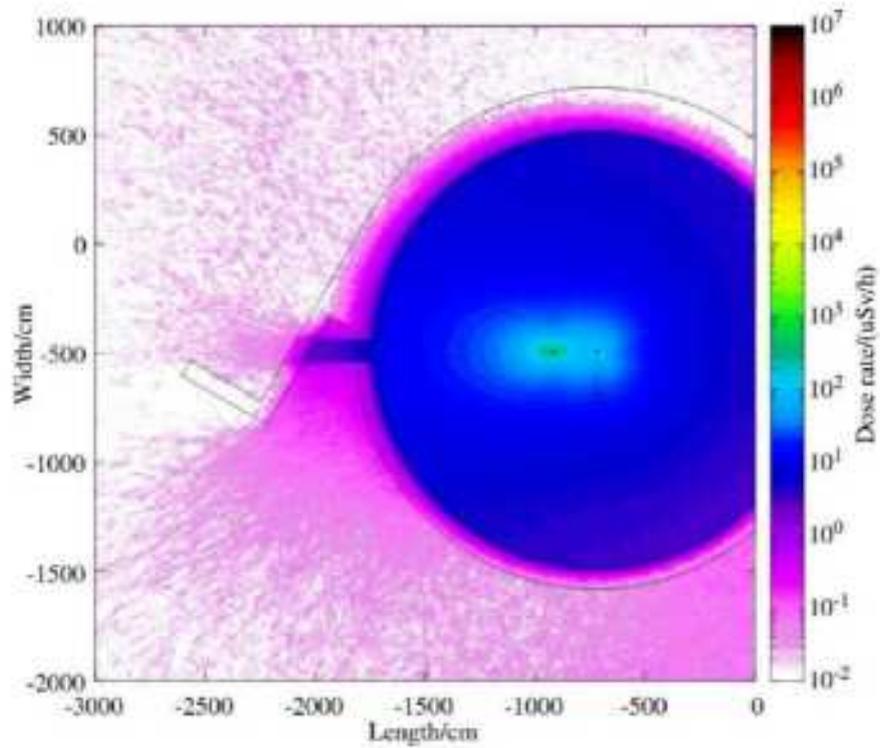


图 4-22 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅（倾斜束线）地上二层平面剂量率分布图

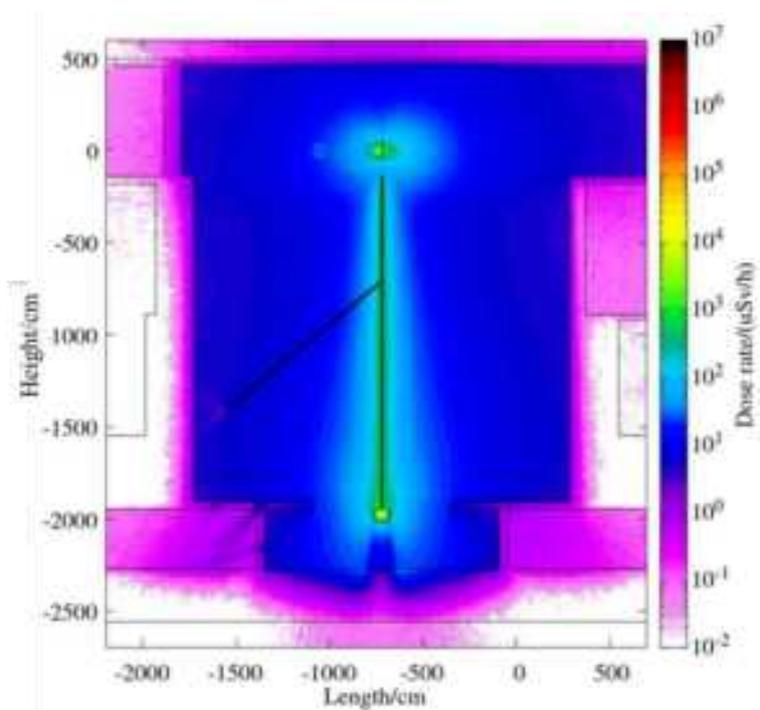


图 4-23 惠州重离子医学中心项目高能束运线大厅（垂直束线）剂量率分布图

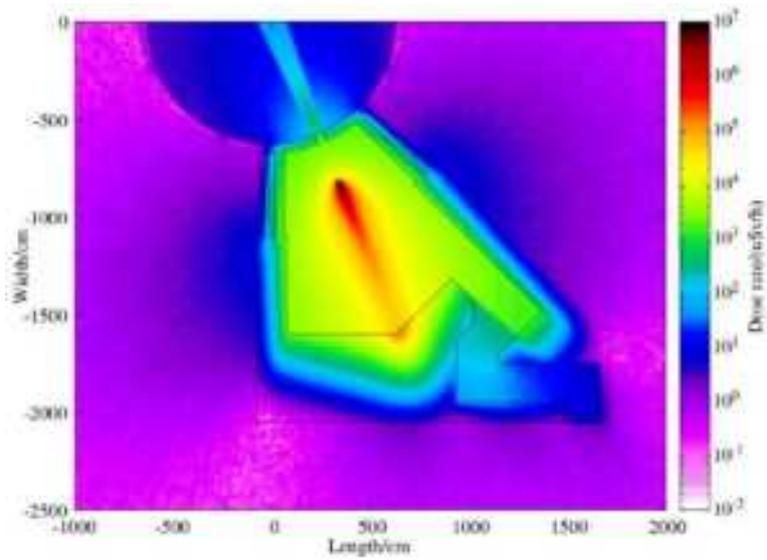


图 4-24 惠州重离子医学中心项目地下一层多角度治疗室剂量率分布图（水平照射）

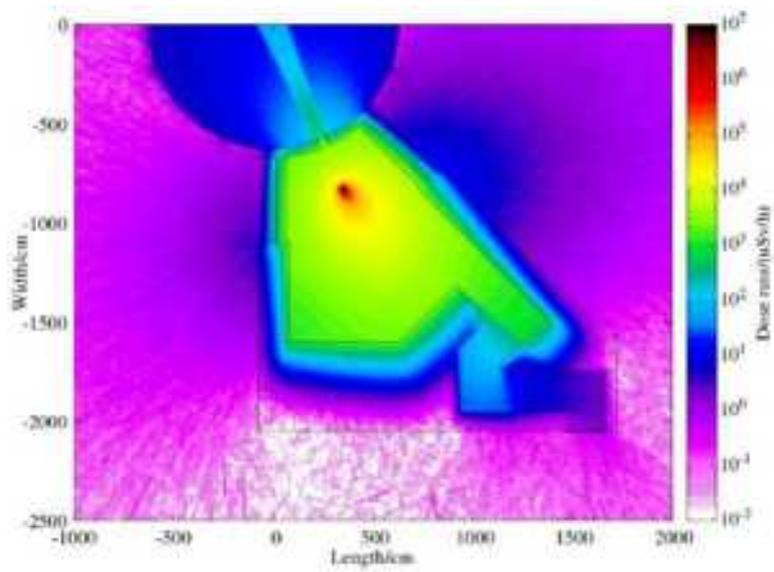


图 4-25 惠州重离子医学中心项目地下一层多角度治疗室剂量率分布图（45°照射）

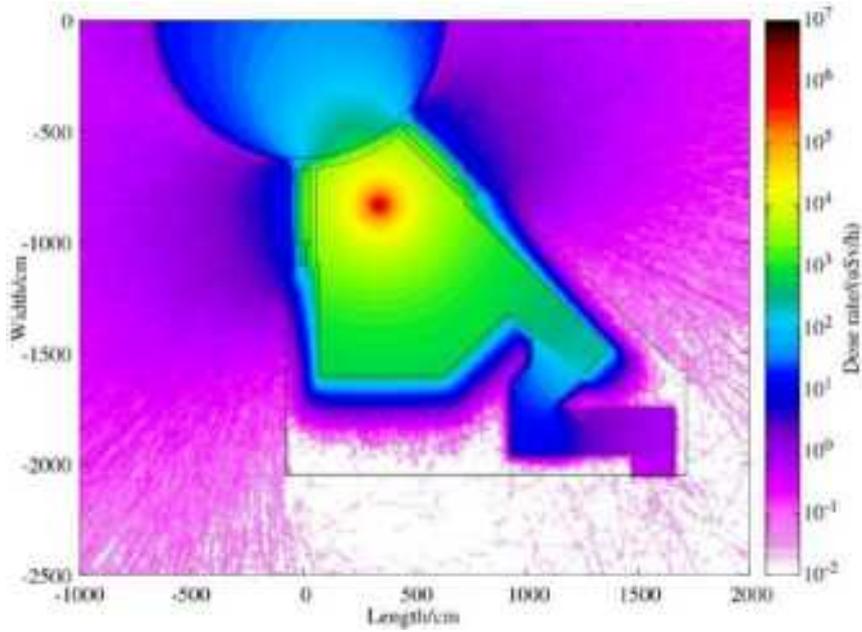


图 4-26 惠州重离子医学中心项目地下一层多角度治疗室剂量率分布图（垂直照射）

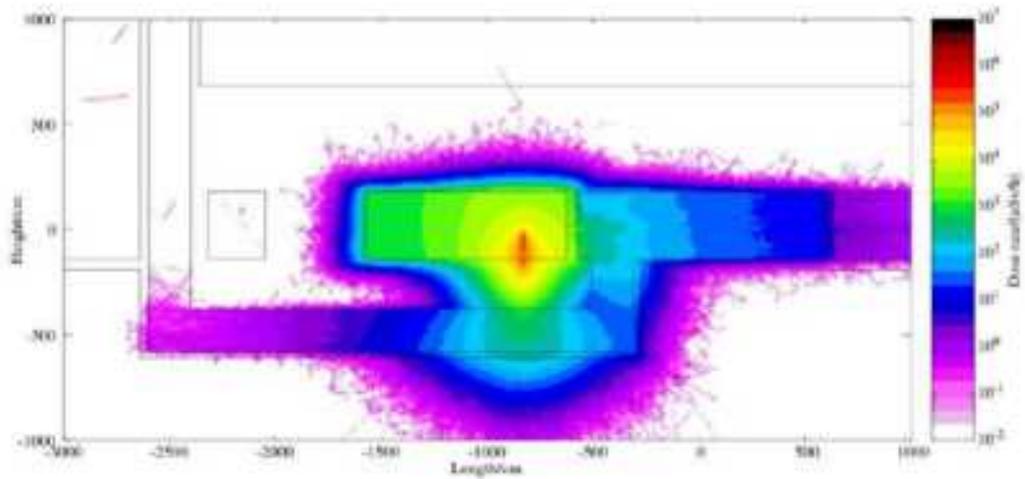


图 4-27 惠州重离子医学中心项目地下工艺管廊剂量率分布图（垂直照射）

综上所述，惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统根据我国法规标准要求确定辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算重离子治疗系统辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平。

4.4 安全联锁系统

4.4.1 系统设计准则

人身安全联锁系统的设计准则如下：

（1）分区联锁：根据装置的运行模式，将本项目重离子治疗系统相关区域分为控制区和监督区。按工艺要求，在束流上游域有束流时，可以允许下游束流区域人员进入工作；利用“束流闸”保证束流不会被送到有人区域。

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

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

（4）失效保护：关键联锁部件采用失效保护设计，设备故障时联锁系统处于安全状态。

4.4.2 系统组成

安全联锁系统是安装调试及运行维护工作期间最重要的辐射安全与防护措施，用以保障工作人员的安全。

重离子治疗系统的人身安全联锁系统主要由 PLC、出入管理系统、门机联锁、急停、清场按钮等组成，如图 4-28 所示。PLC 可以与各联锁装置通信，能够实时获取其联锁状态，一旦出现与安全逻辑相冲突的事件，PLC 就触发联锁来停止束流，防止人员收到误照射。以惠州重离子医学中心项目为例，其主要安全联锁系统设置点位以及清场搜索路线如图 4-29~图 4-33 所示：

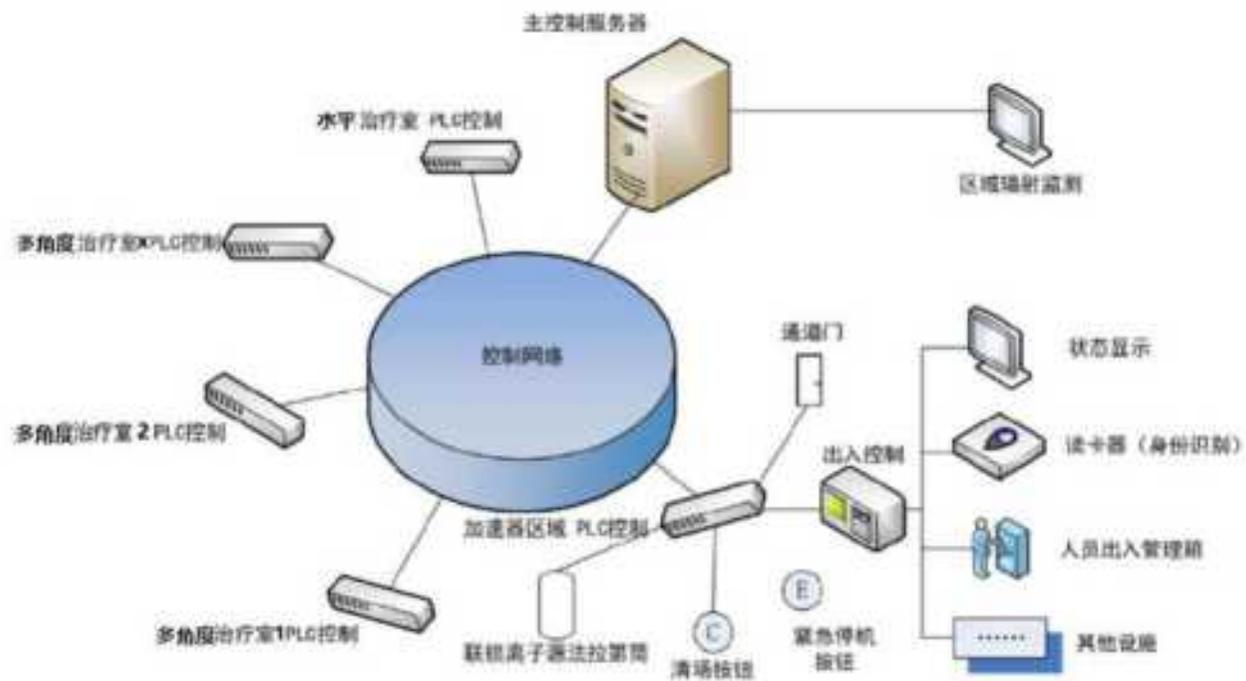


图 4-28 人身安全联锁系统设施示意图

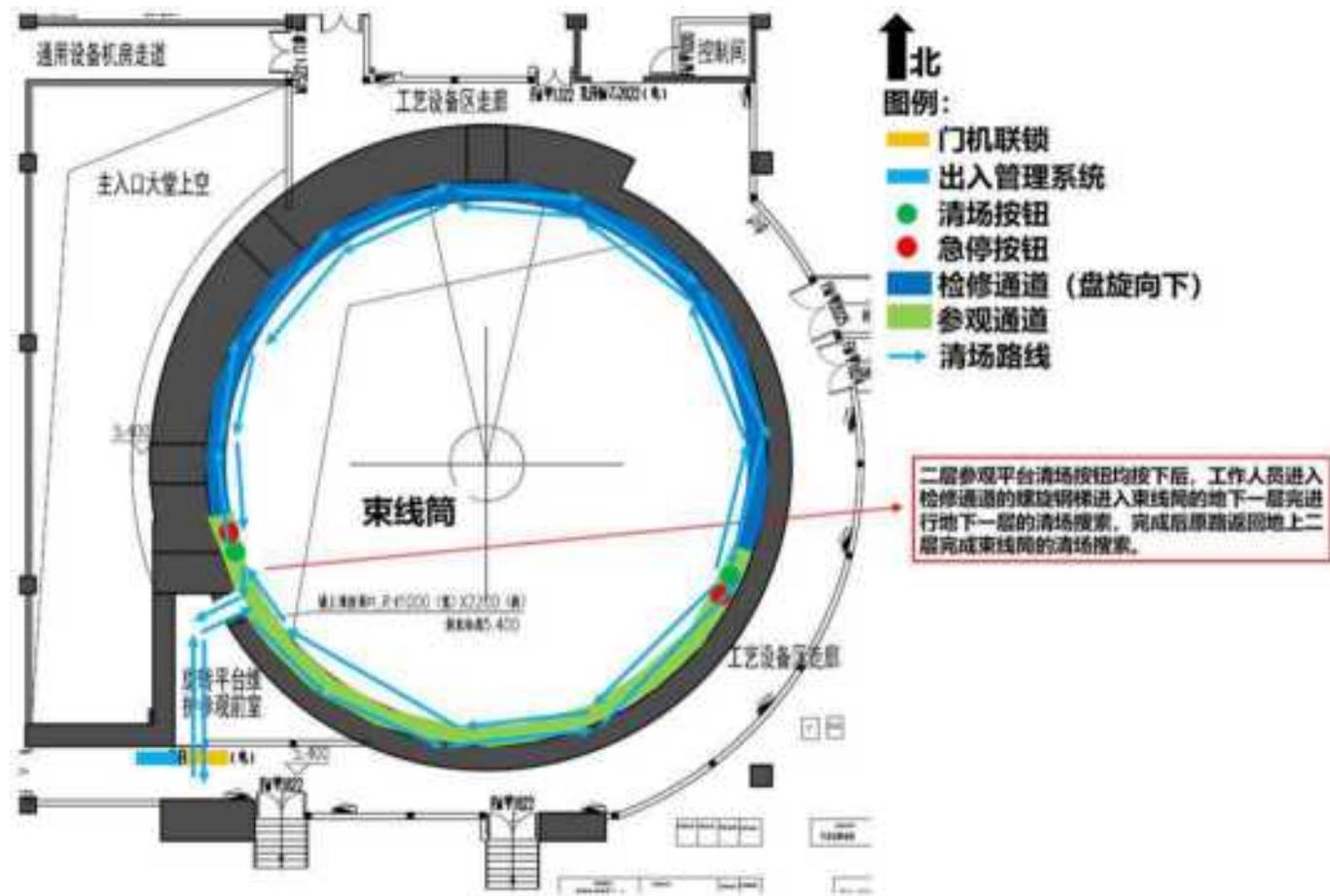


图 4-30 地上二层辐射安全联锁设施安装点位及清场搜索路线图

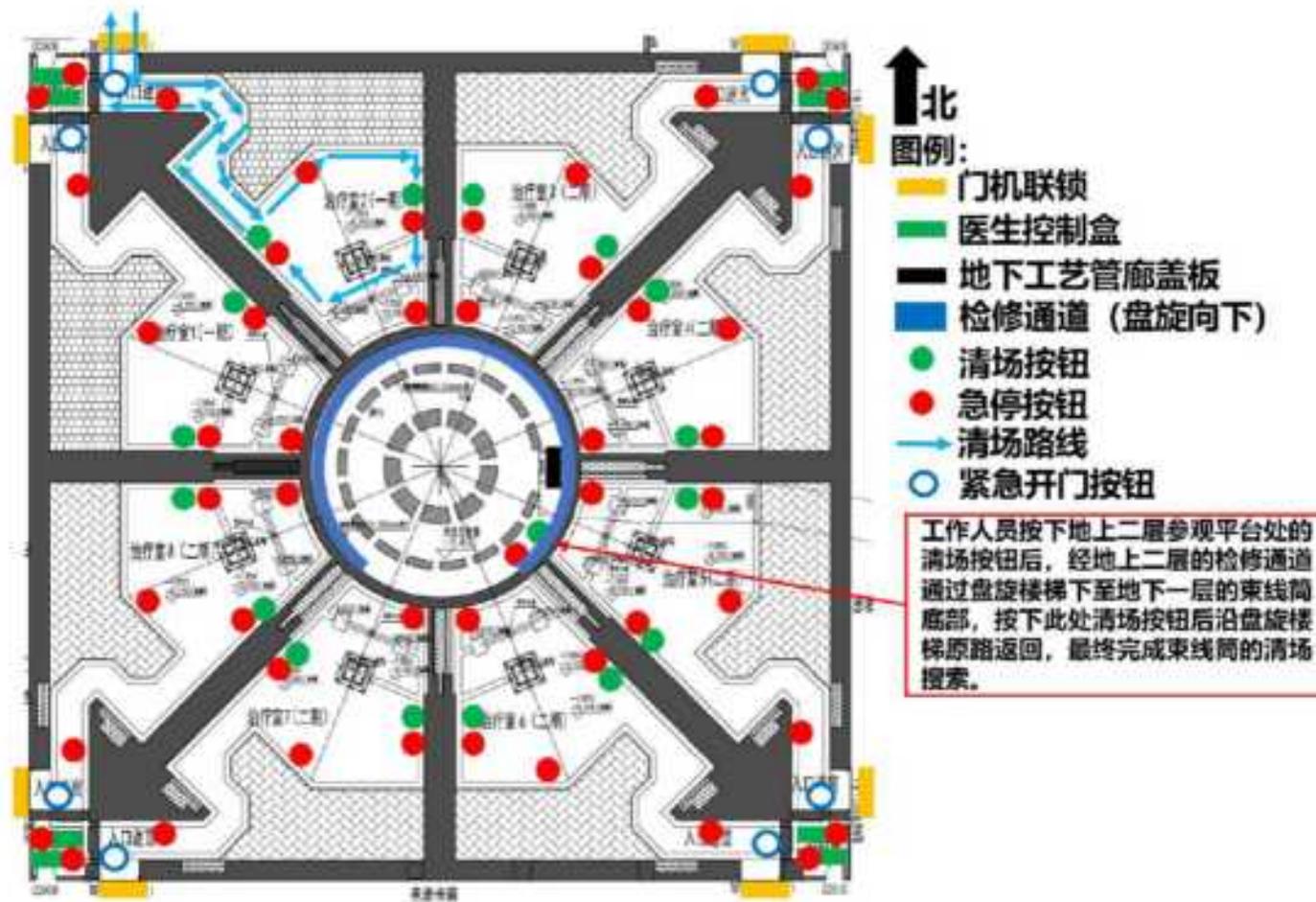


图 4-31 地下一层辐射安全联锁设施安装点位及清场搜索路线图
 (各多角度治疗室清场路线一致)

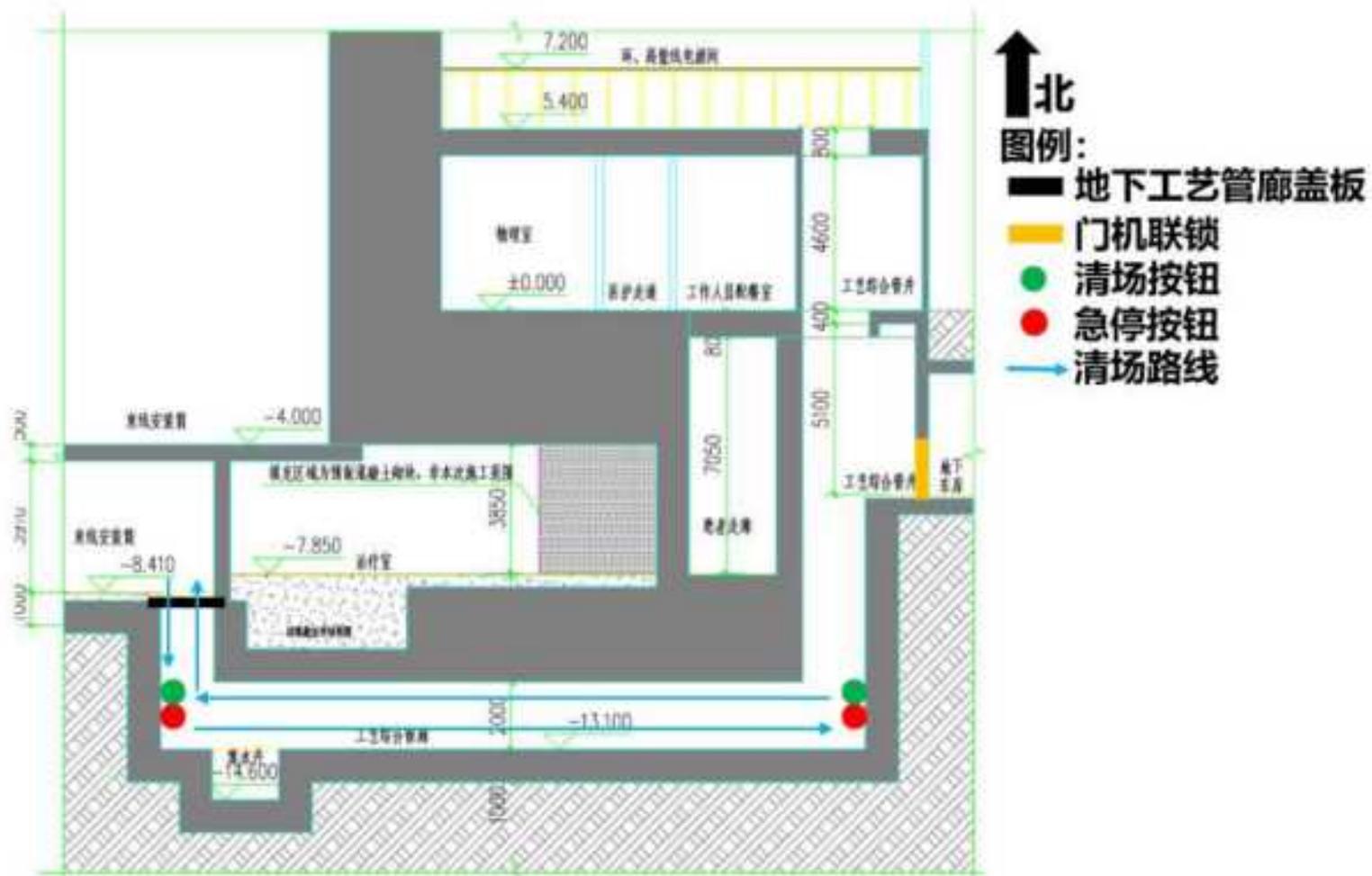


图 4-32 地下工艺管廊辐射安全联锁设施安装点位及清场搜索路线图



图 4-33 辐射安全联锁设施安装点位剖面图

表 4-4 惠州重离子医学中心项目各区域安全联锁设施数量

区域名称	急停按钮	清场搜索按钮	出入管理系统	医生控制盒	门机联锁	紧急开门按钮	束流闸
多角度治疗室（地下一层，含治疗控制室）	48	16	/	8	8	8	/
加速器大厅（地上三层）	5	5	1	/	1	1	2
高能束运线大厅	4	4	2	/	2	1	3
水平治疗室（地上三层，含治疗控制室）	6	2	/	1	1	1	/
地下工艺管廊	2	2	/	/	1	/	/
总计	65	29	3	9	13	11	5

4.4.2.1 主控制服务器及软件

主控制服务器及其软件是人身安全联锁系统的核心，其将各子系统有机联系起来。它不仅是一个管理平台，同时它还构成了系统信息交换平台，通过对各子系统相关信息的采集和分析来完成系统信息管理工作。

4.4.2.2 PLC 逻辑控制

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将束流闸、防护门、清场搜索按钮及紧急停机按钮等设施或信号进行联锁，规定了人身安全联锁各子系统的联锁逻辑关系，并在联锁动作发生时执行这些联锁关系，以此来保障加速器的安全运行及工作人员的人身安全。

4.4.2.3 出入管理系统

加速器大厅及高能束运线大厅区域出入管理系统主要由各防护门入口处设置的出入管理箱进行管理，治疗室区域由医生控制盒对人员出入进行管理。

(1) 加速器大厅及高能束运线大厅区域

加速器大厅及高能束运线大厅地上三层区域防护门入口处以及地上二层旋转平台维护参观前室入口处各安装有一台人员出入管理箱，当有人员需要进入加速

器大厅或高能束运线大厅时，须在人员管理箱处进行人员权限验证（刷卡或人脸识别），权限验证通过后打开防护门，人员进入后防护门自动关闭。

人员离开加速器大厅或高能束运线大厅区域时，按下防护门内侧的开门按钮（无条件开门，此按钮同样为紧急开门按钮），防护门会自动打开。

（2）治疗室区域

治疗室区域进出的人员主要是医院工作人员（医生、技师、物理师及维护工程师）及患者。当医院工作人员或医院工作人员带领患者进入治疗室时，由医院工作人员在治疗控制室内医生控制盒上进行刷卡验证并按下解除联锁按钮，此时医院工作人员按下治疗室外侧的开门按钮，防护门将打开，医院工作人员及患者可进入治疗室。

当一切准备工作完成，准备开始治疗时，医院工作人员按动门外的关门按钮将防护门关闭。待所有联锁建立后，进入治疗控制室在医生控制盒上刷卡验证，按下确认按钮，即可开始进行出束治疗。当医院工作人员及患者需要离开治疗室时，在防护门内设有开门按钮（无条件开门，此按钮同样为紧急开门按钮），人员按动此按钮，防护门自动打开。

4.4.2.4 门机联锁

重离子治疗装置各防护门都设有位置开关。门开关状态在中控室联锁软件中实时显示。防护门处于打开状态时，重离子治疗装置无法供束。重离子治疗装置出束期间打开防护门，则会触发安全联锁系统，切断该区域束流。

重离子治疗装置各防护门都设有红外防夹功能，并且为预防紧急情况下无法开门，在防护门内侧设置了紧急开门按钮，按下后可无条件开门。

4.4.2.5 急停、清场按钮及声光报警灯

急停按钮及清场按钮均匀分布于加速器大厅及治疗室中。

（1）急停按钮

急停按钮设计为红色和文字显示，使其位置比较醒目。发生紧急情况时，该

区域人员可按下急停按钮切断束流。急停按钮有手动复位功能，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。只有当引发急停事件的按钮被复位后，才有可能使设备重新运行。

(2) 清场按钮

清场搜索是在开机前按照规定顺序按下清场按钮，完成区域巡检，该信号作为开机出束的必要前提条件之一，从而确保在开机出束前无人员滞留在辐射区。惠州重离子医学中心项目清场巡检路线见图 4-29~图 4-32，其中高能束运线大厅的清场路线分三部分完成，第一部分是地上三层高能束运线大厅的清场搜索程序，第二部分是经地上二层旋转平台维护参观前室进入的束线筒内的清场搜索程序，第三部分是地下工艺管廊的清场搜索程序（地下工艺管廊正常运行时全程封闭，清场搜索程序完成后管廊联锁未被破坏，则地下工艺管廊的清场搜索联锁信号不变，可不重复清场）。

(3) 声光警示灯

在按下清场按钮后对应声光报警灯（与加速器大厅及高能束运线大厅清场按钮放置位置相同，治疗室区域不设置声光警示灯）发出声光警示，其与束流或联锁状态的对应情况见表 4-5，提醒加速器联锁区域内人员离开该区域。若遇紧急情况，可按下加速器大厅、高能束运线大厅及治疗控制室内设置的急停按钮来切断束流。

表 4-5 声光报警灯状态

束流/联锁状态	声光报警灯状态
停止供束	全部绿灯亮、红灯灭、无报警声
开始清场	对应绿灯灭、红灯亮，有报警声
开始供束	全部绿灯灭、红灯亮、无报警声

4.4.2.6 工作状态指示装置

各控制区防护门上均有电离辐射警告标志，加速器大厅入口处及各治疗室入口处均有运行状态显示屏，可直观、明显地显示加速器的工作状态。在治疗室入口处安装剂量显示屏幕，可实时显示各治疗室内剂量监测系统的数据。

4.4.2.7 束流闸

每个辐射分区前都有一个束流闸（加速器大厅联锁离子源高压起到“束流闸”作用），其主要作用是防止束流进入有人区域。束流闸只有当下游的联锁逻辑符合条件时才可打开，束流方可进入下游区域。安全联锁系统分区分别是：加速器大厅、高能束运线大厅、水平治疗室及地下一层的多角度治疗室。其中加速器大厅的区域联锁控制离子源高压，高能束运线大厅的区域联锁控制 2 号束流闸，水平治疗室的区域联锁控制 1 号束流闸，地下一层的多角度治疗室区域与旋转束线的朝向结合，联锁 3~5 号束流闸。束流闸安装位置如图 4-29 和图 4-33 所示。

4.4.2.8 安全联锁系统的工作流程及联锁逻辑

安全联锁系统将整个重离子治疗装置分为以下几个联锁子区。以惠州重离子医学中心项目为参考进行说明：加速器大厅、高能束运线大厅、水平治疗室、1#多角度治疗室、2#多角度治疗室、3#多角度治疗室、4#多角度治疗室、5#多角度治疗室、6#多角度治疗室、7#多角度治疗室、8#多角度治疗室。

每一个联锁子区都有独立的通道门（防护门）、清场/急停按钮等安全联锁设备，在进入各子区之前都配有“束流闸”（加速器大厅为离子源高压）。在允许出束的状态下，任一联锁条件的破坏，都将切断进入该子区前的“束流闸”，阻挡束流进入该子区。

表 4-6 各联锁子区，各子区束流闸机联锁通道门

联锁子区	联锁“束流闸“	联锁通道门
加速器大厅	离子源高压	三楼加速器大厅通道门
高能束运线大厅	2 号束流闸	三楼高能束运线大厅通道门 二楼高能束运线大厅通道门 工艺管廊入口通道门
水平治疗室	1 号束流闸	水平治疗室通道门
1#多角度治疗室	3/4/5 号束流闸 (1#~8#治疗室的联锁束流闸，对应正对该治疗室的旋转束线上的束流闸)	1#多角度治疗室通道门
2#多角度治疗室		2#多角度治疗室通道门
3#多角度治疗室		3#多角度治疗室通道门
4#多角度治疗室		4#多角度治疗室通道门
5#多角度治疗室		5#多角度治疗室通道门
6#多角度治疗室		6#多角度治疗室通道门

7#多角度治疗室		7#多角度治疗室通道门
8#多角度治疗室		8#多角度治疗室通道门

本项目各联锁子区的安全联锁逻辑如图 4-34 所示，包括联锁正常建立，联锁未建立以及联锁被破坏状态。

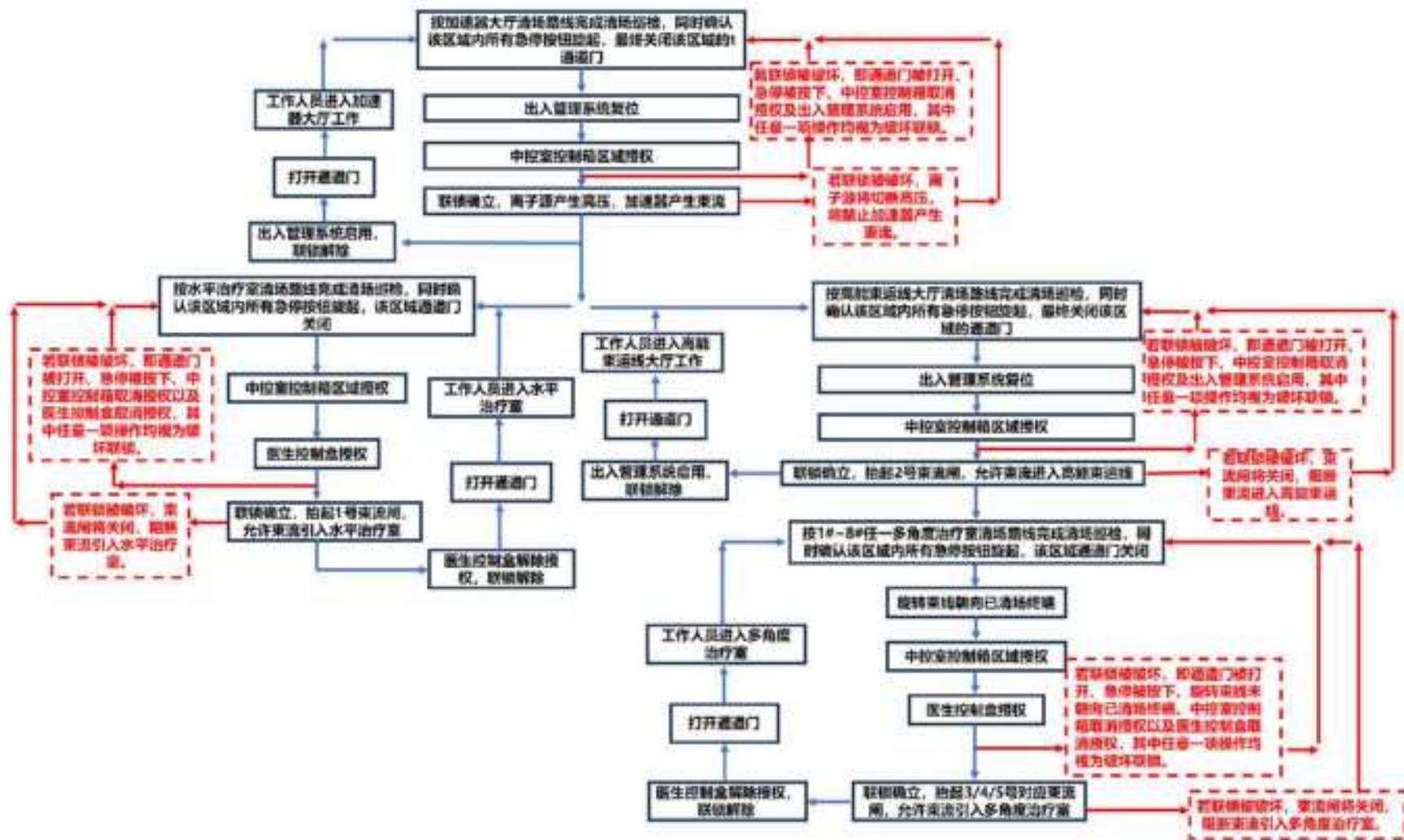


图 4-34 各联锁子区的安全联锁逻辑

4.1.2.1.2.8.1 允许出束的安全联锁逻辑

安全联锁逻辑是按本项目三种类型的区域分别设计的，分别为加速器大厅及高能束运线大厅区域、水平治疗室区域和多角度治疗室区域。安全联锁系统将各区域的急停按钮、清场按钮、通道门开关状态、出入管理设备状态、中控室区域控制盒及医生控制盒等联系在一起，建立了完整的联锁逻辑。在出束过程中，任一联锁条件的改变都会触发联锁切断束流，以保障人员免受束流误照射。

加速器大厅及高能束运线大厅区域必须同时满足以下条件后，才可在中控室区域控制盒最终授权，允许相应的辐射区域出束：

- 1) 区域所有急停按钮复位；
- 2) 区域所有清场按钮按下；
- 3) 辐射区通道门关闭；
- 4) 出入管理设备复位。



图 4-35 加速器大厅及高能束运线大厅区域人身安全联锁系统主要联锁逻辑

水平治疗室区域必须同时满足以下条件后，才可在医生控制盒最终授权，允许治疗室出束：

- 1) 区域所有急停按钮复位；
- 2) 区域所有清场按钮按下；
- 3) 辐射区通道门关闭；
- 4) 中控室控制箱区域确认按钮按下（授权）。

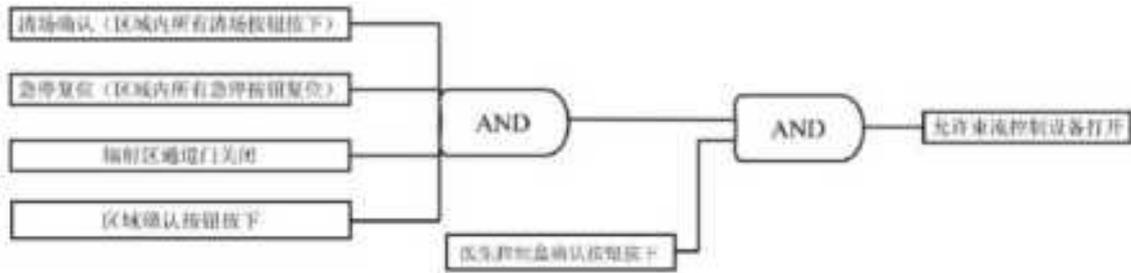


图 4-36 水平治疗室区域人身安全联锁系统主要联锁逻辑

多角度治疗室区域必须同时满足以下条件后，才可在医生控制盒最终授权，允许治疗室出束：

- 1) 区域所有急停按钮复位；
- 2) 区域所有清场按钮按下；
- 3) 辐射区通道门关闭；
- 4) 旋转束线朝向已清场终端；
- 5) 中控室控制箱区域确认按钮按下（授权）。

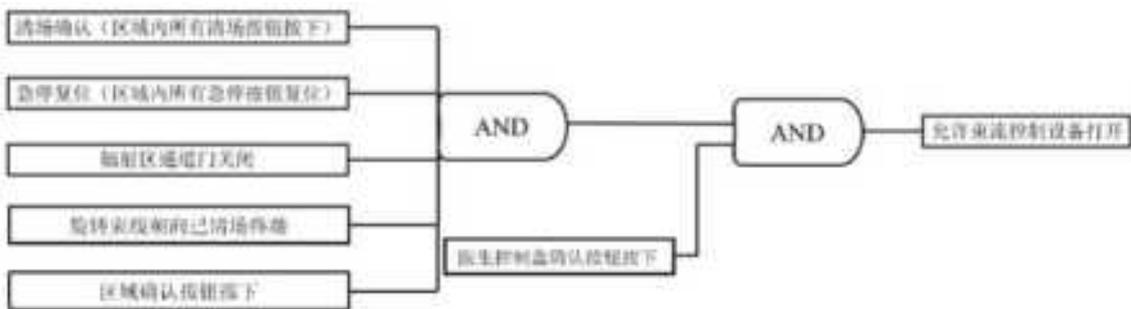


图 4-37 多角度治疗室区域人身安全联锁系统主要联锁逻辑

4.1.2.1.2.8.2 中断出束的安全联锁逻辑

在出束过程中，联锁区域内任一联锁条件被破坏，均关闭束流闸（加速器大厅为切断离子源高压），从而中断束流。要恢复供束，必须重新进行相应操作，使联锁系统满足允许供束的逻辑。其中“急停按钮被按下”、“通道门打开”，均会破坏区域内的清场信号，恢复供束前必须重新清场，以确保无人员滞留辐射区。

对加速器大厅区域，发生以下任一情况，均会立即切断离子源高压、中断束流：

- (1) 区域任一急停按钮被按下；

- (2) 能够进入该区域的任一通道门打开；
- (3) 通道门外的人员出入管理系统被启用；
- (4) 中控室区域控制盒，取消对加速器大厅的区域授权。

对高能束运线大厅区域，发生以下任一情况，均会立即切断 2 号束流闸、中断束流：

- (1) 区域任一急停按钮被按下；
- (2) 能够进入该区域的任一通道门打开；
- (3) 通道门外的人员出入管理系统被启用；
- (4) 中控室区域控制盒，取消对高能束运线大厅的区域授权。

对水平治疗室区域，发生以下任一情况，均会立即切断 1 号束流闸、中断束流：

- (1) 区域任一急停按钮被按下；
- (2) 能够进入该区域的任一通道门打开；
- (3) 中控室区域控制盒，取消对水平治疗室的区域授权；
- (4) 水平治疗室的医生控制盒取消授权。

对地下一层的多角度治疗室区域，发生以下任一情况，均会立即切断对应束线的束流闸（3~5 号）、中断束流：

- (1) 区域任一急停按钮被按下；
- (2) 能够进入该区域的任一通道门打开；
- (3) 中控室区域控制盒，取消对地下一层多角度治疗室的区域授权；
- (4) 多角度治疗室的医生控制盒取消授权；
- (5) 旋转束线未朝向已清场终端。

4.5 场所辐射监测系统

中高能重离子打靶产生的次级辐射场中，从辐射防护角度考虑，需要重点关注的对象是次级中子和 γ 射线。根据次级辐射场的特点，本项目拟配置区域辐射监测系统，用于实时监测项目场所的中子、 γ 剂量率。

场所辐射监测系统的系统结构如图 4-38 所示，系统由探测器、数据采集单元、内部局域网、监控计算机与数据库组成：

- 1) 探测器用于测量场所的中子、 γ 剂量率；
- 2) 数据采集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；
- 3) 内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；
- 4) 监控计算机用于完成监测数据的日常分析与管理，监管探测器的工作状态；
- 5) 数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据, 包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型(γ /中子)。

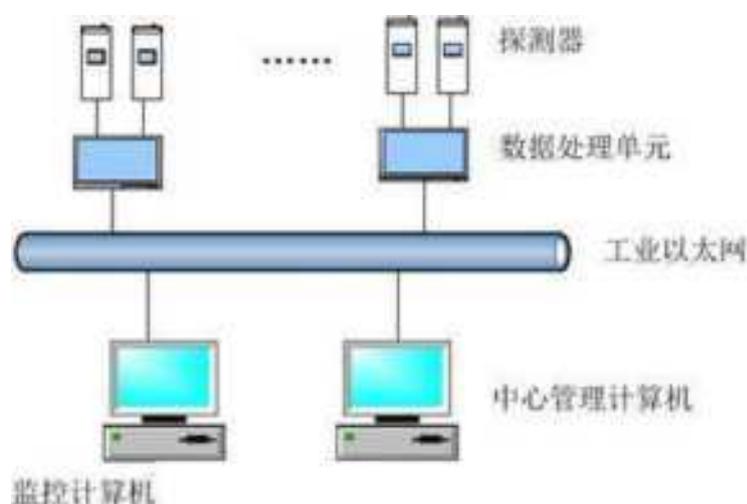


图 4-38 重离子治疗装置场所辐射监测系统结构

场所辐射监测系统一般安装在加速器大厅、高能束运线大厅区域及入口处、各控制室、治疗室迷道内和入口处，每个监测点一般由一台中子探测器和一台 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，保证安装调试及运行维护期间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。

不同区域的中子、 γ 辐射探测器推荐性能指标如下：

(1) 区域中子探测器

本项目推荐采用中子探测器的性能指标应当满足以下条件：

- (1) 中子探测器的能量响应为热中子~20MeV；
- (2) 控制区剂量率范围 0.1 μ Sv/h~100mSv/h； 监督区及环境剂量率范围 0.01 μ Sv/h~10mSv/h；
- (3) 探测器具备良好的可靠性，包括环境适应性、抗电磁干扰能力等；
- (4) 包括可设置报警阈值的声光报警部件，在超过阈值时发出警报信号；
- (5) 包括可远程监控的主机，通过以太网组网，在监控计算机上可管理和展示所有探测器数据。

(2) 区域 γ 探测器：

本项目推荐采用 γ 探测器的性能指标应当满足以下条件：

- (1) 探测器对 γ 射线响应的能量范围不低于 60keV~3MeV；
- (2) 控制区剂量率范围 0.1 μ Sv/h~100mSv/h； 监督区及环境剂量率范围 0.01 μ Sv/h~10mSv/h；
- (3) 探测器具备良好的可靠性，包括环境适应性、抗电磁干扰能力等；
- (4) 包括可设置报警阈值的声光报警部件，在超过阈值时发出警报信号；
- (5) 包括可远程监控的主机，通过以太网组网，在监控计算机上可管理和展示所有探测器数据。

图 4-39~图 4-42 给出了惠州重离子医学中心项目辐射监测点的布局图。

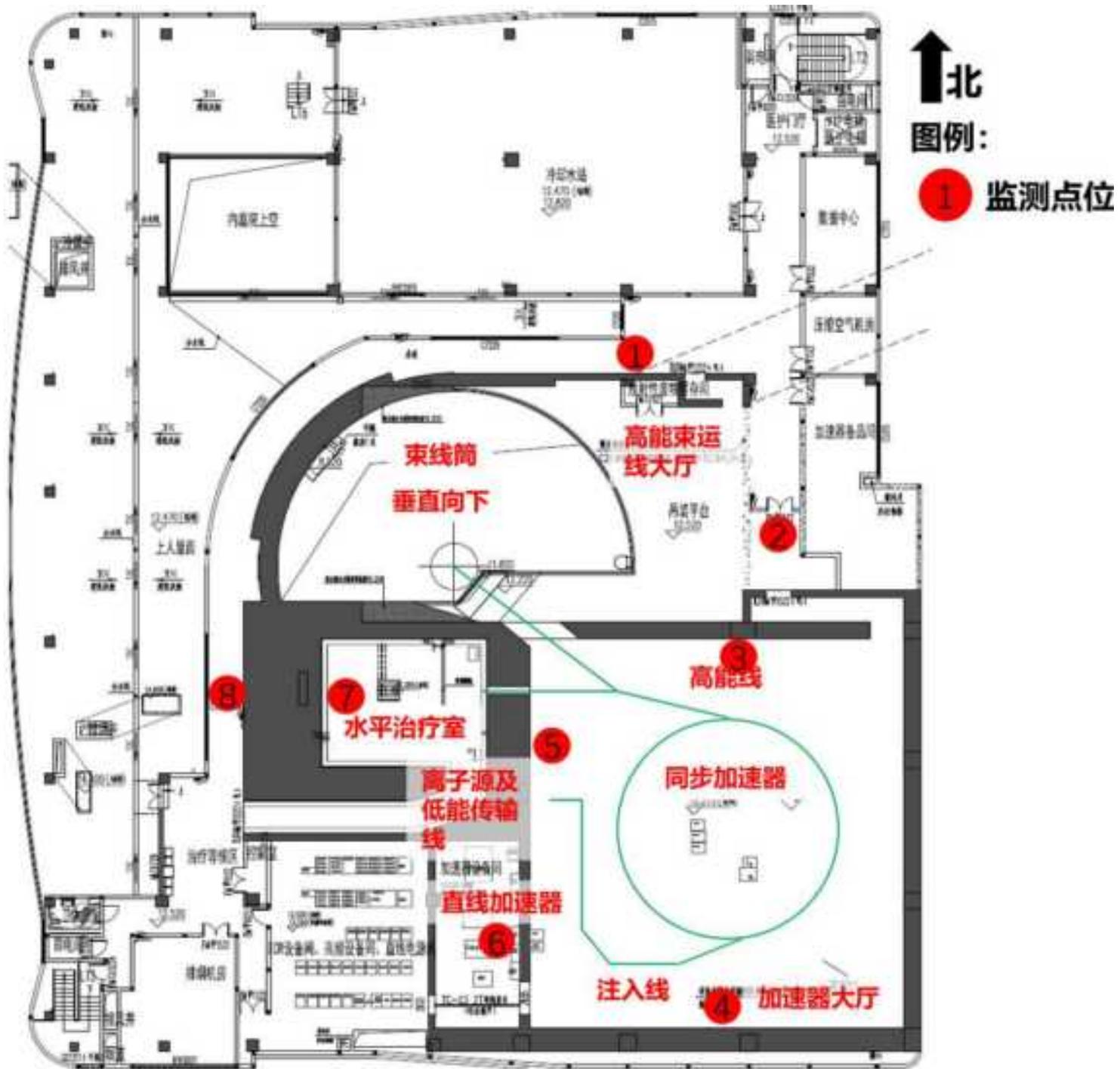


图 4-39 惠州重离子医学中心项目地上三层区域辐射监测点分布图

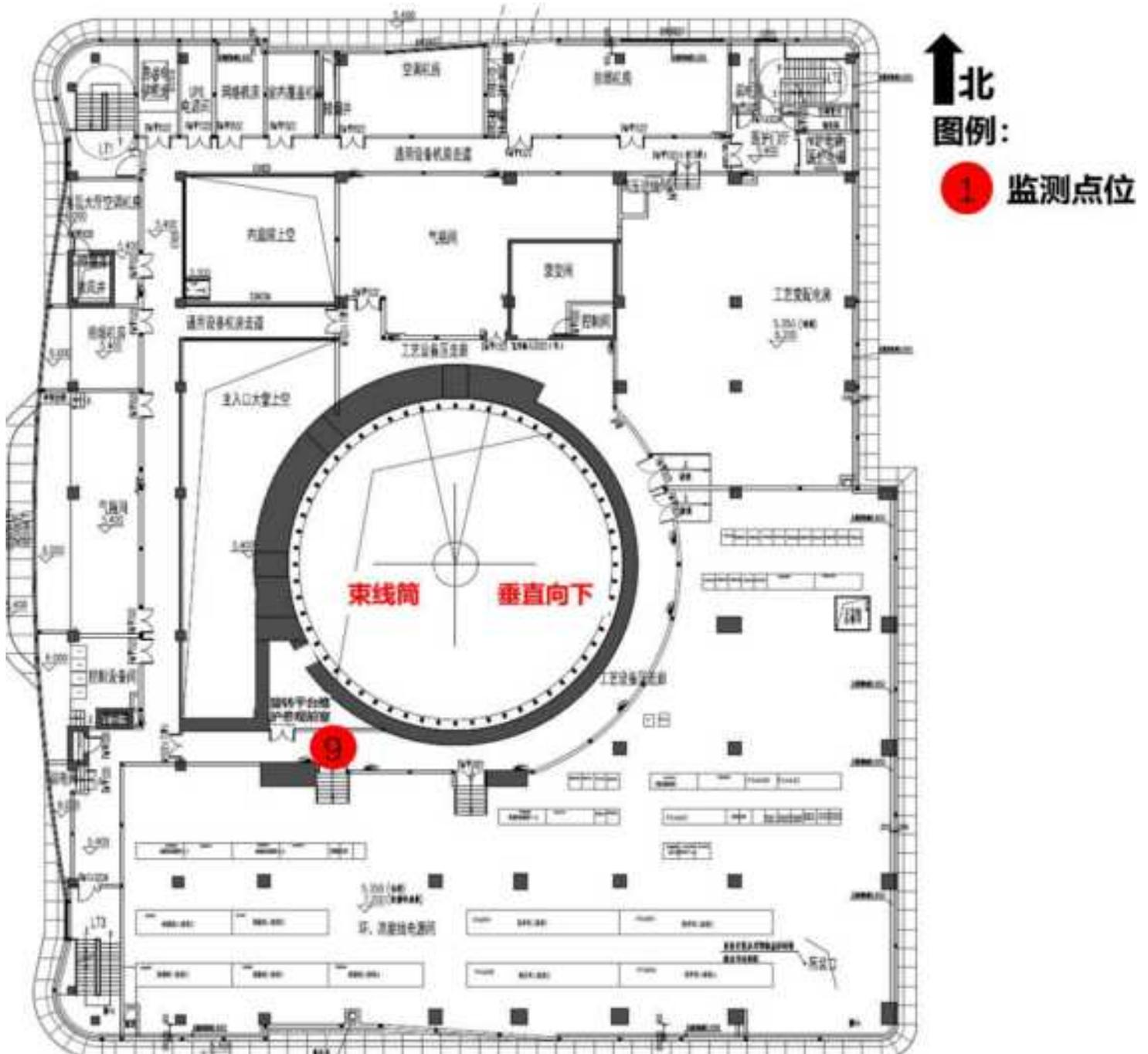


图 4-40 惠州重离子医学中心项目地上二层区域辐射监测点分布图

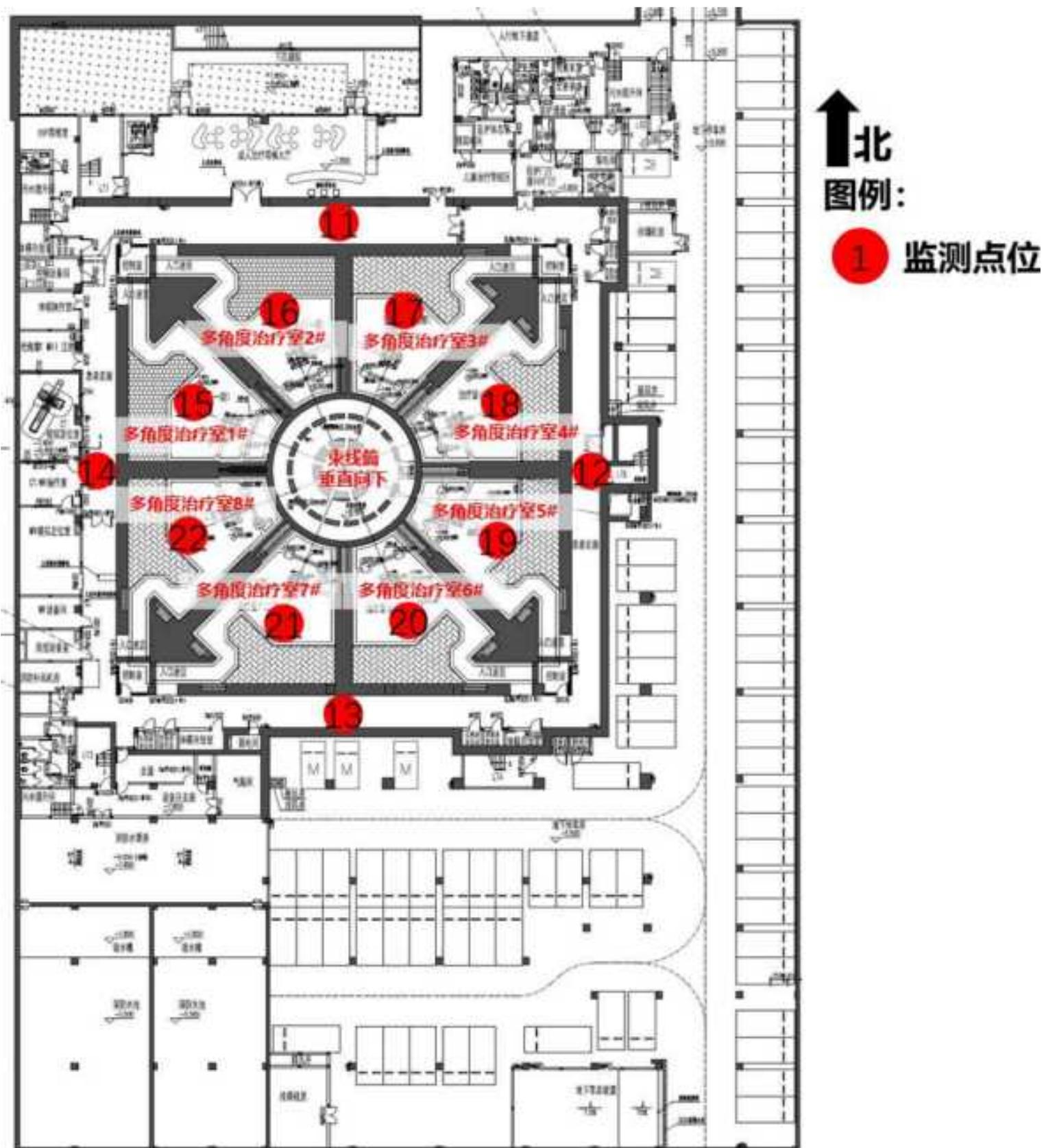


图 4-42 惠州重离子医学中心项目地下一层区域辐射监测点分布图

4.6 通风系统

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）和《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）的要求，近代物理所推荐给用户单位的重离子治疗系统通风系统设计方案：

治疗室内应设置强制排风系统，采用全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，进风口应设置放射治疗室的上部，排风口应设置在放射治疗室的下部，进风口与排风口的位置应对角设置，以确保室内的空气完全交换，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。

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

在实际建设中具体的通风量、排风口的设置以及排风高度在保证符合国家标准的前提下根据用户单位建筑平面布置、各区域尺寸等因素做相应变化。

重离子治疗系统开始安装调试前，需确认用户单位通风系统建设并测试合格。安装调试过程中，各区域通风系统保持运行状态。

4.7 工作人员剂量控制措施

带束调试或运行维护期间确认辐射安全与防护设施功能正常。对于分区调试的情况，确认待调束区下游区域的束流阻挡设备（如束流闸）落下，防止束流意外引出。

调试前期尽量使用单束团、小流强，待束流物理参数达到预期后再逐步增大流强直至达到预定值。

需要进入控制区内部工作，由辐射防护人员对区域辐射水平进行监测，重点关注束流损失较大位置处的辐射水平，并根据监测结果结合工作人员个人剂量测量值制定工作计划、提出辐射防护措施，由近代物理所现场负责人批准后方可进入工作。工作人员单次维修期间受照剂量不超过 1mSv，每季度受照剂量不超过 1.5mSv。维修工作条件和具体类别见表 4-7。

表 4-7 维修工作条件和工作类别

维修工作条件	维修工作类别
距设备表面 30cm 处剂量率 < 0.1mSv/h	手工维修不受限制。
距设备表面 30cm 处剂量率 0.1~1mSv/h	手工维修需要控制时间。具体工作时间根据维修现场剂量率测量结果计算后确定。
距设备表面 30cm 处剂量率 > 1mSv/h	手工维修须采取相应的辐射防护措施。

注.任何工作条件下,都应尽量采取延长停机等待时间、增加工作距离、热点区域设置局部屏蔽、剂量分摊等措施合理可行地降低人员受照剂量。

进入控制区内部工作的人员必须佩戴个人剂量计,对于潜在超过剂量控制目标值的辐射工作人员不允许其进入控制区工作。

4.8 放射性三废治理

重离子治疗系统销售(含建造)环节,不涉及加速器的开机出束,无放射性三废产生。因此,本次评价的放射性三废治理仅针对安装调试以及运行维护环节。产生的放射性废液及放射性固体废物由用户单位负责处理。

4.8.1 放射性废气

(1) 废气来源

根据第三章的分析,重离子治疗系统运行期间将产生感生放射性气体,其主要放射性核素为 ^{13}N ($T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$)、 ^{15}O ($T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$)、 ^{11}C ($T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$) 和 ^{41}Ar ($T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$)。各放射性核素的活度浓度参见表 3-8~表 3-10。

(2) 废气处理措施

安装调试及运行维护期间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。加速器大厅、高能束运线大厅、各治疗室内均设有通风系统,装置运行过程中产生的感生放射性气体经通风系统最终引至建筑物屋面高空排入环境,考虑到其排入大气后的扩散和稀释,其对环境和公众的影响可以忽略。

4.8.2 放射性废液及处理措施

重离子治疗装置可能产生的放射性废液主要是活化的冷却水。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除 ^7Be 、 ^3H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间可自行衰变至较低水平。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修或发生冷却水泄漏事故的情况下才需要排放。涉及活化的冷却水主要用于加速器磁铁、真空、束诊设备，即加速器区域设备使用冷却水。系统冷却水循环量为 $120\text{m}^3/\text{h}$ ，检修频次约 1 次/年，管路系统总蓄水量为 15m^3 ，其中管路部分 5m^3 ，循环水箱 10m^3 ，可分次排放，最大排放量 5m^3 。

根据用户单位布局在场所内合适位置设置废水暂存间，房间内设有废水暂存池，总容积不低于 15m^3 。确保可以满足活化冷却水的暂存要求暂存水池应该满足活化冷却水的暂存要求。各区域的冷却水通过管道与机房的地漏相连且标高低于机房地板标高，机房设自流坡度确保冷却水能够自流并通过机房内地漏排入暂存水池内暂存或通过潜污泵将冷却水提升至暂存间的暂存池。

一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水，污水收集至暂存池存放。根据 3.4.2.2 节的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员和环境造成辐射影响。

暂存水池上设有取样口，活化的冷却水在排放前由用户单位负责委托有资质单位进行取样测量，满足放射性废水排放标准，方可排放。

4.8.3 放射性固体废物及其处理措施

重离子治疗装置运行期间可能产生的放射性固体废物主要有以下两类：

(1) 不再回收利用的活化部件及维修维护过程中被污染的劳保用品，如荧光靶、手套、棉纱等。参考同类设备运行经验，预计每年放射性固体废物产生量不会超过 1m^3 ，见表 4-8。这些放射性固体废物的主要材料是铜、铁和镍等。

装置停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是 ^{64}Cu 、 ^{58}Co 、 ^{61}Cu 、 ^{51}Cr 、 ^{48}V 、 ^7Be 、 ^{54}Mn 和 ^{52}Mn 等半衰期较长的核素。

(2) 冷却水系统更换下来的离子交换树脂，年产生量不超过 0.6m^3 。

表 4-8 重离子治疗系统安装调试及运行维护期间产生的放射性固体废物年产生量

种类	预计年产生量
废旧部件及被污染的劳保用品	不超过 1m^3
废离子交换树脂	不超过 0.6m^3
总计	不超过 1.6m^3

根据用户单位的布局，将设置放射性固体废物暂存区，暂存区及暂存容器的尺寸大小在用户单位实际建设时根据场所布局而定，用于暂存重离子治疗系统运行期间产生的活化结构部件等放射性固体废物。在暂存区周围设置电离辐射警告标志和中文标识，暂存区内的放射性固废暂存容器表面上张贴电离辐射警告标志和中文标签。暂存区带锁，钥匙由专人负责保管。

当放射性固体废物暂存区内的暂存量接近一定容量时，由用户单位委托有资质单位进行集中测量分析：

(1) 对于满足解控标准的：

- ①可回收利用的部件，回收后复用；
- ②不能回收利用的部件，经审管部门认可后，解控后按一般废物处理。

(2) 对于不满足解控标准的，由用户单位委托有资质单位处理。

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

4.9 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析

重离子治疗系统拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗辐射安全与防

护要求》（HJ1198-2021）中相关要求的对比情况列于下表。

表 4-9 重离子治疗系统拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中相关要求对比

标准名称	标准要求		本项目建设情况
《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）	5.1 选址与布局	5.1.1 放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	本项目注册地点位于甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号，仅进行生产（不涉及放射性操作）、商务活动，不涉及射线装置出束。其次，用户单位重离子治疗系统的评价范围需以其进行环境影响评价时确定的评价范围为准。本次评价以惠州重离子医学中心项目的重离子治疗系统为例，评价范围取实体屏蔽物边界外 100m。
		5.1.2 放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。	本项目拟销售（含建造）和使用的重离子治疗系统，其布局根据用户单位的不同而不同，布局选定时将建议用户单位单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。
	5.2 分区原则	5.2.1 放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下，控制区包括加速器大厅、治疗室（含迷路）等场所，如质子/重离子加速器大厅、束流输运通道和治疗室，直线加速器机房、含源装置的治疗室、放射性废物暂存区域等。开展术中放射治疗时，术中放射治疗室应确定为临时控制区。	惠州重离子医学中心项目分区布置如下： （1）控制区：加速器大厅、高能束运线大厅、治疗室、废水暂存间及放射性固体废物暂存间； （2）监督区：上述各控制区屏蔽墙体外紧邻的场所，如治疗室控制室、加速器控制室及设备机房等。
		5.2.2 与控制区相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区（如直线加速器治疗室相邻的控制室及与机房相邻区域等）。	
6.1 屏蔽要求	6.1.1 放射治疗室屏蔽设计应按照额定最大能量、最大剂量率、最大工作负荷、最大照射野等条件和参数进行计算，同时应充分考虑所有初、次级辐射对治疗室邻近场所中驻留人员的照射。	按照要求确定了重离子治疗系统屏蔽体外剂量率控制水平。	

		6.1.2 放射治疗室屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能，符合最优化要求。使用中子源放射治疗设备、质子/重离子加速器或大于 10MV 的 X 射线放射治疗设备，须考虑中子屏蔽。	重离子治疗系统机房主屏蔽墙体采用密度不低于 2.35 g/cm ³ 的普通混凝土以及不低于 7.8 g/cm ³ 的铁。
		6.1.3 管线穿越屏蔽体时应采取不影响其屏蔽效果的方式，并进行屏蔽补偿。应充分考虑防护门与墙的搭接，确保满足屏蔽体外的辐射防护要求。	近代物理所将建议用户单位通风管穿越屏蔽墙体时不采用直穿的方式。
6.2 安全防护设施和措施要求		6.2.1 放射治疗工作场所，应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等：a) 放射治疗工作场所的入口处应设置电离辐射警告标志，贮源容器外表面应设置电离辐射标志和中文警示说明；b) 放射治疗工作场所控制区进出口及其他适当位置应设电离辐射警告标志和工作状态指示灯；c) 控制室应设有实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统。	重离子治疗系统迷道入口处均设有电离辐射中文警告标志和工作状态指示灯。控制区内均设有摄像头，治疗室内设置双向患者监测对讲系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。
		6.2.2 质子/重离子加速器大厅和治疗室内、含放射源的放射治疗室、医用电子直线加速器治疗室（一般在迷道的内入口处）应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内或机房门附近。	场所辐射监测系统一般安装在加速器大厅、高能束运线大厅区域及入口处、各控制室、治疗室迷道内和入口处，每个监测点一般由一台 中子探测器和一台 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。可设置报警阈值的声光报警部件，在超过阈值时发出警报信号。
		6.2.3 放射治疗相关的辐射工作场所，应设置防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全联锁措施：a) 放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置门-机/源联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束/出源照射，出束/出源状态下开门停止出束或放射源回到治疗设备的安全位置。含放射源的治疗设应设有断电自动回源措施；b) 放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置室内紧急开门装	重离子治疗系统设有门机联锁装置，门内设有开门装置，防护门有防挤压功能。重离子治疗系统各区域及治疗室控制室及主控室均设有急停按钮。各控制区内各方向的墙壁、迷道入口门旁均设有急停按钮。重离子治疗系统安全联锁系统还包括了清场巡检系统、人员出入管理系统。日常清场巡检时，如超出设定的清场巡检响应时间，需重新进行清场巡检。

		<p>置，防护门应设置防夹伤功能；c) 应在放射治疗设备的控制室/台、治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁、质子/重离子加速器大厅和束流输运通道内设置急停按钮；急停按钮应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发；d) 质子/重离子治疗装置安全联锁系统还应包括清场巡检系统、门钥匙开关（身份识别系统）。质子/重离子治疗室、加速器大厅和束流输运通道应建立分区清场巡检和束流控制的逻辑关系，清场巡检系统应考虑清场巡检的最长响应时间和分区调试情况的联锁设置。日常清场巡检时，如超出设定的清场巡检响应时间，需重新进行清场巡检；e) 质子/重离子治疗装置应考虑建立调试、检修、运行维护人员的人身安全联锁系统，将调试、检修、运行维护人员的受照剂量与进入控制区的权限实施联锁管控；f) 安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位并通过控制台才能重新启动放射治疗活动；安装调试及维修情况下，任何联锁旁路应通过单位辐射安全管理机构的批准与见证，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。</p>	
	<p>8.2.2 其他固体废物管理要求</p>	<p>8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固体废物暂存间衰变暂存，最终送交给有资质的单位收贮。</p> <p>8.2.2.2 低水平的活化部件如质子/重离子加速器治疗头器件、磁铁等，以及处理质子/重离子加速器冷却水的废树脂，集中放置在固体废物暂存间暂存</p>	<p>用户单位负责重离子治疗系统产生的放射性三废治理（安装调试阶段及运行维护阶段）。</p>

		衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平的送交有资质的单位收贮。	
		8.2.2.3 建立放射性固体废物台账，存放及处置前进行监测，记录部件名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息，低于清洁解控水平的可作为一般固体废物处置，并做好存档记录。	
	8.3 液态废物管理要求	事故或检修状况下质子/重离子加速器的活化冷却水按照放射性废液管理要求妥善收集贮存，暂存衰变至低于豁免水平后可作为普通废液处理，并做好存档记录。	<p>正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修或发生冷却水泄漏事故的情况下才需要排放。涉及活化的冷却水主要用于加速器磁铁、真空、束诊设备，即加速器区域设备使用冷却水。系统冷却水循环量为 120m³/h，检修频次约 1 次/年，管路系统总蓄水量为 15m³，其中管路部分 5m³，循环水箱 10m³，可分次排放，最大排放量 5m³。</p> <p>根据用户单位布局在场所内合适位置设置废水暂存间，房间内设有废水暂存池，总容积不低于 15m³。确保可以满足活化冷却水的暂存要求暂存水池应该满足活化冷却水的暂存要求。各区域的冷却水通过管道与机房的地漏相连且标高低于机房地板标高，机房设自流坡度确保冷却水能够自流并通过机房地漏排入暂存水池内暂存或通过潜污泵将冷却水提升至暂存间的暂存池。</p> <p>一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水，污水收集至暂存池存放。暂存水池上设有取样口，活化的冷却水在排放前由用户单位负责委托有资质单位进行取样测量，满足放射性废水排放标准，方可排放。</p>
	8.4 气态废物管理要求	8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，排气口不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。	根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）和《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）的要求，近代物理所推荐给用户单位的重离子治疗系

		<p>8.4.2 质子/重离子加速器停机后，加速器大厅应加强通风排气，采取措施使人员延时进入，以降低活化空气的感生放射性水平，减少人员受照剂量。</p>	<p>统通风系统设计方案： 治疗室内应设置强制排风系统，采用全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，进风口应设置放射治疗室的上部，排风口应设置在放射治疗室的下部，进风口与排风口的位置应对角设置，以确保室内的空气完全交换，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。 质子重离子加速器停机后，加速器大厅应加强通风排气，采取措施使人员延时进入，以降低活化空气的感生放射性水平，减少人员受照剂量。 在实际建设中具体的通风量、排风口的设置以及排风高度在保证符合国家标准的前提下根据用户单位建筑平面布置、各区域尺寸等因素做相应变化。 重离子治疗系统开始安装调试前，需确认用户单位通风系统建设并测试合格。安装调试过程中，各区域通风系统保持运行状态。</p>
	<p>9.2 放射治疗工作场所监测</p>	<p>9.2.1 应根据使用放射治疗设备种类、能量和使用方式配备相应的辐射监测设备，对辐射工作场所的辐射水平（X-γ 辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率等）进行监测。</p>	<p>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。工作场所监测依托用户单位固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测依托用户单位固定式辐射监测站以及巡测的方式进行；个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，各个项目场所配置了一定数量的直读式个人剂量报警仪，在工作人员进行高活化部件的检修等操作时，其监测数据作为在该项目所受职业照射的参考依据。</p>
		<p>9.2.2 应对放射治疗工作场所机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、观察窗、防护门，以及其他关注点处开展 X-γ 辐射周围剂量当量率监测；中子源治疗装置、质子/重离子加速器治疗装置、大于 10MV 的 X 射线放射治疗设备还应对前述位置开展中子剂量当量率监测。</p>	<p>本项目工作场所监测方案中包括 γ 辐射剂量率和中子剂量率的监测。</p>

	9.3 环境监测	9.3.1 开展放射治疗相关活动的机构应自行或委托有能力的监测机构对工作场所运行工况下周围环境的辐射水平进行监测，监测频次不少于1次/年。	本项目环境监测包主要为自行监测，监测数据记录存档。
		9.3.2 质子/重离子加速器主体建筑周围应根据加速器产生的辐射场在加速器机房屏蔽体外人员可达处、主要束流损失点屏蔽体外和需关注的敏感点等位置合理布置固定式环境辐射监测仪，并将辐射监测数据接入计算机管理系统。	近代物理所为用户单位提供固定式监测仪器的参数要求，由用户单位进行配置（或通过协议由近代物理所进行供货），设置在用户单位辐射工作场所周围环境敏感点处，用于对环境中的中子、 γ 辐射水平进行实时监测。监测数据通过有线或无线通讯设备实时传输至终端数据处理中心。
	9.4 个人剂量监测	9.4.1 放射治疗工作场所的工作人员应佩戴个人剂量计，对个人外照射剂量进行监测。同时应根据射线类型选择合适的个人剂量计。临时工作人员、实习人员应纳入个人剂量监测范围。	本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，各个项目场所配置了一定数量的直读式个人剂量报警仪，在工作人员进行高活化部件的检修等操作时，其监测数据作为在该项目所受职业照射的参考依据。
		9.4.2 个人剂量档案应妥善保存，监测数据异常时，应及时查明原因并报告生态环境主管部门。	近代物理所的辐射工作人员在工作期间必须佩戴个人剂量计。近代物理所为这些工作人员建立档案，个人剂量计每季度委托有相关资质单位监测一次，并由专门的辐射安全员负责存档。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

4.10 III 类射线装置

4.10.1 辐射工作场所分区

重离子治疗系统的每间治疗室均会配置一台放射治疗用 X 射线图像引导系统（DR），其最大管电压 150kV，最大管电流 1000mA，为 III 类射线装置。其典型控制区为治疗室内部，监督区为机房四周屏蔽体墙体外区域。

4.10.2 机房布局和辐射屏蔽

DR 所在治疗室的屏蔽设计需满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“标称 125kV 以上的摄影机房”屏蔽采用 3mm 铅当量（255mm 混凝土）的要求。治疗室最小单边长度和有效使用面积需能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求。治疗室的屏蔽设计求对照情况列于表 4-10。

表 4-10 治疗室尺寸和面积建设要求对标

装置名称	治疗室设计			标准要求			是否满足要求
	最小单边长度, m	有效使用面积, m ²	混凝土屏蔽厚度, mm	最小单边长度, m	有效使用面积, m ²	所需混凝土度屏蔽厚度, mm	
DR	4.5（典型多角度治疗室） 7.6（典型水平治疗室）	103.62（典型多角度治疗室） 107.74（典型水平治疗室）	500~4500（惠州重离子医学中心项目布局场所）	4.5	≥30	255（3mm 铅当量）	是

4.10.3 拟采取的其他安全与防护措施

参照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求，DR 拟采

取的安全防护措施如下：

（1）机房内设有摄像头，位置便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

（2）机房设有机械通风系统，保持良好的通风。

（3）机房门外设有电离辐射警告标志，机房门上方设有醒目的工作状态指示灯，灯箱上设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，候诊区设放射防护注意事项告知栏。

5 环境影响分析

5.1 生产工作流程的环境影响分析

于近代物理所内进行的生产流程，即部件检验、设备组装、性能测试流程中的污染源主要有噪声和固体废物（非放射性）等，其中噪声为最主要的污染物。工作流程中这些环境影响都是暂时性的，其对环境的影响将随施工结束而消失。项目对操作工具进行合理选择及布局，采取一系列有效的噪声污染防治措施，使排放的噪声符合国家规定的工业企业厂界噪声排放标准。进行部件检验、设备组装、性能测试的房间内均设置了固体废物暂存点，同时注意减少固体废物的产生，工程结束后，对工作中产生的固体废物全部清除，生活垃圾及时交由环卫清运处理。在采取一系列污染防治措施后，施工期间对环境的影响较小。

5.2 正常运行时的环境影响分析

本项目销售（含建造）阶段仅为机械、测磁等性能验证、商务谈判和财务结算（不涉及出束操作），对周围环境和相关人员不会产生辐射类的危害和影响，正常运行时造成的辐射影响主要是重离子治疗系统安装调试及运行维护期间的环境影响。

5.2.1 工作人员受照剂量估算

本项目在安装调试阶段工作人员分为安装工程师和束流调试工程师，工作场所均位于用户现场。其中安装工程师负责完成重离子治疗系统及其配件的安装，在安装期间加速器不出束。束流调试工程师参与安装结束后的调试工作。每台重离子治疗系统在调试期间最大出束时间为 630h，根据建设单位提供的数据每台重离子治疗系统带束调试期间，进入治疗机房内的工作时间约为最大出束时间的 50%，即 315h。现场服务工程师在安装调试结束后继续在用户点驻场，并参与后续的维护维修工作。

5.2.1.1 安装调试

根据前面章节的分析，重离子治疗系统安装调试期间对工作人员的辐射影响主要来自调试过程中加速器开机出束产生的瞬发辐射的照射，以及进入加速器大厅等区域内接触活化部件、活化空气造成的感生放射性影响。

5.2.1.1.1 隔室操作的受照剂量

安装调试过程中，隔室操作人员的工作区域主要位于加速器主控室、治疗室控制室和相邻治疗室等区域。

隔室操作的工作人员所受剂量主要来自加速器开机出束和相邻治疗室出束产生的瞬发辐射的直接照射，可由下式 5-1 进行计算：

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

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 为工作人员年受照时间， h/a 。

隔室操作人员的工作区域的剂量率水平根据不同用户单位实际建设情况而有所不同。由于用户单位在使用重离子治疗系统前，需要进行环境影响评价和安全分析，并对其使用场所建筑墙体的屏蔽设计进行评价，确保其能够满足辐射屏蔽设计标准的最低要求。最终编制的环境影响评价文件须报送至生态环境保护行政主管部门审批，取得相关审批部门的批复后，方可使用。

因此，本次评价采用惠州重离子医学中心项目重离子治疗系统中各区域的屏蔽体外剂量率水平进行估算。

安装调试期间，工作机制为三班倒。每年最大出束时间为 630h。由此可计算出每名工作人员每年参与重离子治疗系统的安装调试活动的最大受照时间为 $(630\div 3)\text{h}$ ，即 210h。

表 5-1 安装调试期间隔室操作受照剂量计算结果

工作区域	剂量率水平 ¹ , mSv/h	受照时间 ² , h	居留因子	受照剂量, mSv/a
控制室	2.5E-03	210	1	5.25E-01
相邻治疗室	7.8E-03	16.67	1	1.30E-01

注：1、控制室剂量率水平保守取值，取 2.5μSv/h 作为计算依据；相邻治疗室剂量率水平取值自治疗室间隔墙 30cm 处剂量率的模拟计算结果，见表 4-3 中关注点 23（点位 23~38 一致）中距墙 30m 处的剂量率水平，即为 7.8μSv/h。

2、相邻治疗室受照时间取自表 3-3 中治疗终端调试出束的时间 500h，其中进入治疗终端工作受到其他治疗室出束影响的时间根据建设单位提供的数据约为治疗终端调试的时间的 10%，即 500h÷10=50h 工作人员为三班倒，每名工作人员每年参与患者治疗室调试的时间为 50h÷3=50h。

由式 5-1 可计算得，安装调试期间，工作人员隔室操作时所受年最大受照剂量为 5.25E-01+1.30E-01=6.55E-01mSv/a。

5.2.1.1.2 进入加速器大厅及治疗室内部的受照剂量

进入加速器大厅内部和治疗室内部的工作人员的受照剂量主要来自活化部件、活化空气造成的感生放射性影响。

5.2.1.1.3.1 活化部件的影响

单台重离子治疗系统安装调试期间，只有同步引出口、真空管道以及治疗室 Beamdump 长期发生高能束流损失，因此每名工作人员进入加速器大厅接触的活化部件影响主要来自于同步引出口、真空管道、治疗头、治疗室 Beamdump 以及降能片的影响。活化部件的剂量率水平保守取表 3-20~表 3-23 中停机 1h，表面 5cm 处的模拟计算结果（停机 30min 后真空管道表面残余剂量率已降至 0.08μSv/h，因此真空管道的剂量率水平保守取停机 30min 的剂量率水平；治疗室 Beamdump 因在工作中仅涉及搬运，不会近距离操作因此保守取 30cm 处的剂量；降能片保守取表面的残余剂量率）。下表为安装调试期间接触活化部件所致年受照剂量的计算结果，保守按所有工作均为同一位工作人员完成，其年受照剂量合计为 1.61E-01mSv/a。

表 5-2 活化部件所致受照剂量结果

工作区域	活化部件 ¹	剂量率水平, m Sv/h	工作时间 ¹ , h	受照剂量, mSv/a
加速器大厅、高能束运线大厅、治疗室	同步引出口	5.06E-02	0.98	4.96E-02
	真空管道	8.0E-05	5.89	4.71E-04
	治疗室 Beamdump	7.68E-03	13.75	1.06E-01
	治疗头	2.60E-04	14.14	3.68E-03
	降能片	4.01E-03	0.39	1.57E-03

注：1.①同步引出口的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 5 分钟保守计算，即 $[(1980 \div (7 \times 24)) \times 5] \div 60 = 0.98\text{h}$ ；

②真空管道的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 30 分钟计算，即 $(1980 \div (7 \times 24)) \times 0.5 = 5.89\text{h}$ ；

③治疗室 Beamdump 的工作时间依据建设单位提供的资料为每天一次，一次工作 10 分钟计算，即 $(1980 \div 24) \times (10 \div 60) = 13.75\text{h}$ ；

④降能片的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 2 分钟计算，即 $[(1980 \div (7 \times 24)) \times 2] \div 60 = 0.39\text{h}$ ；

⑤治疗头的工作时间保守估计按治疗室 Beamdump 的工作时间与降能片的工作时间之和， $13.75\text{h} + 0.39\text{h} = 14.14$

5.2.1.1.3.2 活化空气的影响

活化空气对工作人员的影响途径考虑浸没外照射和吸入内照射，分别采用式 5-2 和式 5-3 计算。

(1) 浸没外照射

$$H_A = t \cdot C_{a,i} \cdot G_A \quad (5-2)$$

式中：

H_A 为空气浸没照射所致年受照剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；取自每台重离子治疗系统带束调试期间进入治疗机房

内的工作时间约为最大出束时间的 50%，即 315h=1.134E+06s

$C_{a,i}$ 为工作场所内部空气感生放射性核素的浓度，Bq/m³，参见表 3-8~表 3-10;

G_A 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-3，取值来自 IAEA NO.19。

(2) 吸入内照射:

$$H_{h,i} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \quad (5-3)$$

式中:

$H_{h,i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a;

T 为年受照时间，h/a; 即 315h

u 为正常情况下的呼吸率，m³/h，成人的呼吸率取值 1.2m³/h;

$C_{a,i}$ 为工作场所内部空气感生放射性核素的浓度，Bq/m³，参见表 3-8~表 3-10;

$g_{h,i}$ 为吸入放射性核素 i 产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq，见表 5-3，取值来自 IAEA NO.19。

表 5-3 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
¹³ N	4.90E-14	—
¹⁵ O	4.91E-14	—
¹¹ C	4.89E-14	1.80E-11
⁴¹ Ar	6.50E-14	—

由此可计算得出活化空气对工作人员所致的年有效剂量，见表 5-4。

表 5-4 活化空气对调试工作人员所致的年有效剂量， mSv/a

位置	核素	空气浸没, Sv/a	吸入, Sv/a	合计, mSv/a
多角度治疗室	¹¹ C	1.07E-01	1.31E-02	1.20E-01
	¹³ N	8.33E-02	1.02E-02	9.36E-02
	¹⁵ O	6.68E-02	8.16E-03	7.50E-02
	⁴¹ Ar	1.56E-02	1.44E-03	1.70E-02
	合计	8.93E-02	1.10E-02	1.00E-01
水平治疗室	¹¹ C	7.06E-02	8.64E-03	7.92E-02
	¹³ N	5.48E-02	6.70E-03	6.15E-02
	¹⁵ O	1.40E-02	1.29E-03	1.53E-02
	⁴¹ Ar	1.50E-04	1.84E-05	1.69E-04
	合计	1.39E-04	1.70E-05	1.56E-04
加速器大厅及高能束运线大厅	¹¹ C	1.02E-04	1.25E-05	1.15E-04
	¹³ N	2.03E-04	1.87E-05	2.21E-04
	¹⁵ O	1.07E-01	1.31E-02	1.20E-01
	⁴¹ Ar	8.33E-02	1.02E-02	9.36E-02
	合计	6.68E-02	8.16E-03	7.50E-02
合计	5.63E-01mSv/a			
注： ¹³ N、 ¹⁵ O、 ⁴¹ Ar 的吸入内照射剂量转换因子缺少数据，保守取与 ¹¹ C 相同的数值。				

5.2.1.1.3.3 调试期间工作人员受照剂量汇总

综上所述，调试期间，工作人员年总受照剂量汇总如下表 5-5 所示。

表 5-5 调试期间每名工作人员年总受照剂量

隔室操作, mSv	进入治疗机房		总计, mSv
	进入治疗机房内部接触活化部件, mSv	进入治疗机房内接触活化空气, mSv	
6.55E-01	1.61E-01	5.63E-01	1.38

由此可以看出，调试期间，单台重离子治疗系统工作人员所受年个人有效剂量最大为 1.38mSv/a，按照每年最大销售（含建造）2 台分析，工作人员所受年个人有效剂量最大为 2.76mSv/a。低于其个人剂量约束值 5mSv/a。

5.2.1.2 运行维护

重离子治疗系统安装调试完成交付用户后，接受用户单位委托，近代物理所驻场的现场服务工程师主要负责系统日常的运行维护，根据前面章节的分析，运行维护期间对工作人员的辐射影响主要来自进入加速器大厅（含高能束运线大厅）及治疗室等区域内接触活化部件和活化空气造成的感生放射性影响以及日常运行时隔室操作（控制室或相邻治疗室）所受剂量。在重离子治疗系统运行期间的工作时间依据惠州重离子医学中心项目和同类型设备的年最大出束时间保守约为 3000h，工作机制为三班倒。由此可计算得出每名工作人员在重离子治疗系统运行期间隔室操作的最大受照时间为 $(3000\div 3)\text{h}$ ，即 1000h。同时又因为运行期间多数工作在控制室内完成，且用户单位在使用重离子治疗系统前需要取得环评批复，控制室处的剂量率控制水平一定小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，故本次评价保守取位于控制室时的剂量率水平（以 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 为计算依据）。

调试期间，辐射工作人员的工作主要可分为两部分，一种是在中央控制室、治疗控制室进行调试，另外则是进入加速器大厅（含高能束运线大厅）及治疗室内进行细节部分的调试工作。根据建设单位的加速器运行经验及规划安装调试期间整体的工作内容及时间相比运行维护阶段将会更多。运行维护阶段，辐射工作人员的主要时间是在中央控制室及治疗控制室内。因此，运行维护阶段保守考虑需要进入加速器大厅（含高能束运线大厅）及治疗室内部的工作时间、工作内容与安装调试期间基本相同。

综上所述，运行维修期间，工作人员年总受照剂量如表 5-6 所示。

表 5-6 运行维护期间现场服务工程师年总受照剂量

隔室操作, mSv	进入机房内部, mSv		每名现场服务工程师的受照剂量, mSv
	活化部件	活化空气	
$2.5\text{E}-03\text{mSv/h}\times 1000\text{h}=2.5$	1.61E-01	5.63E-01	3.22

运行维护过程中单一年度现场服务工程师仅在一各项目站点进行工作，由此可以看出，现场服务工程师受照剂量最大为 3.22mSv/a 。低于其个人剂量约束值 5mSv/a 。

5.2.1.3 小结

近代物理所在用户单位安装调试、运行维护重离子治疗系统期间年最大受照剂量如表 5-7 所示。

表 5-7 安装调试、运行维护期间站点工作人员年最大受照剂量

站点工作人员受照剂量, mSv/a	
安装调试	运行维护
2.76	3.22

安装调试期间辐射工作人员的最大受照剂量为 2.76mSv/a。在运行维护阶段，辐射工作人员的年最大受照剂量为 3.22mSv/a。综上，正常工况下安装调试和运行维护阶段，本项目辐射工作人员的年最大受照剂量低于其个人剂量约束值 5mSv/a。

5.2.2 公众受照剂量估算

本项目销售（含建造）阶段仅涉及机械层面验证、商务谈判和财务结算，对周围环境和相关人员不会产生辐射类的危害和影响；运行维护阶段中的维修维护时期，重离子治疗系统已在用户单位通过验收投入正常运营，因此对用户单位周围公众造成的影响为短期影响，装置维修维护期间对公众的辐射影响能够涵盖在装置使用期间对场所周围公众的辐射影响之内。因此，主要考虑重离子治疗系统安装调试期间对公众的辐射影响。安装调试期间严格限制无关人员进入工作区域，对安装调试工作人员进行授权，无授权人员将不得进入。

未来使用重离子治疗系统的用户单位无法预知，其周围公众情况也随之不同。重离子治疗系统正常运行期间，公众受照剂量 90%来自于瞬时辐射照射。本项目取公众所受瞬时辐射照射剂量除以 90%的值作为公众受照剂量估算结果。

公众所受瞬时辐射照射剂量由式（5-4）计算

$$H=D \times t \times T \quad (5-4)$$

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。

参考惠州重离子医学中心项目, 公众多为患者陪诊人员, 为计算结果具有参考性, 本次选取的关注点位为表 4-3 中的关注点 49 (主入口大堂) 作为保守考虑, 剂量率水平为 $0.01\mu\text{Sv/h}$, 本次评价以该数值作为公众区域的剂量率水平进行保守计算。选取的公众区域为偶然居留场所, 居留因子取 $1/16$ 。由此可计算得出重离子治疗系统安装调试期间, 公众年最大受照剂量为 $3.94\text{E-}04\text{mSv/a}$, 低于其公众剂量约束值 0.1 mSv/a 。

表 5-8 公众最大受照剂量

关注点	瞬时剂量率, mSv/h	受照时间, h	居留因子	年受照剂量, mSv/a
关注点 49 (主入口大堂)	1.0E-05	630	1/16	3.94E-04

5.3 事故工况下的环境影响

5.3.1 人员误照射事故

5.3.1.1 事故影响

该类事故是重离子治疗系统运行期间可能发生的最严重事故, 可能导致的原因主要是工作人员在加速器大厅 (含高能束运线大厅)、治疗室内进行工作时, 控制系统及安全联锁系统同时失控, 出现设备异常开机现象, 导致人员意外受照; 安全联锁系统故障失效人员在运行出束期间误入加速器大厅 (含高能束运线大厅)、治疗室内, 短时间的照射可使受到照射的人员产生放射损失。

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

本次评价以误入治疗室为例进行分析。重离子治疗装置出束时, 治疗头输出最大剂量率为 $2\text{Gy}/(\text{min}, \text{L})$, 取单次误照射时间 1min 进行计算, 事故期间工

作人员的最大受照剂量约为 2Gy。

5.3.1.2 事故预防措施

重离子治疗系统设计有功能齐全、安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，采用清场搜索、紧急停机、束流闸、警报装置及状态指示等安全设备和措施。通过搜索清场功能保障了人员在束流开启前及时离开控制区，防止人员被困在高辐射水平的控制区内；通过急停按钮、紧急开门及束流闸保障万一发生人员被困或误入正在出束的控制区内、或设备异常等情况时可以紧急关闭加速器；警报装置和状态指示功能使工作人员了解运行情况，提示人员远离高辐射水平的区域。通过这些措施能够有效防止误入事故的发生。

因此，人员误照射事故发生的概率非常小。

此外，为防止人员误照射事故的发生，可采取以下措施加强防范：

(1) 为防止各项安全联锁硬件设施失效，近代物理所制定了相应的规章制度，定期对安全联锁系统进行检查，确保其能够正常有效运行，检查内容和整改措施记录存档。

(2) 开机出束前，撤离各机房时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和顺序对机房各区域进行清场。出束期间一旦发现有人员滞留在机房内，就近按下急停按钮。

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

(4) 做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

5.3.1.3 事故应急措施

(1) 一旦发生人员误入事故，就近按下急停开关，立即停止装置出束，误入人员迅速撤离；

- (2) 评估误入人员是否受到超剂量照射；
- (3) 查找事故原因，确认安全连锁系统是否发生故障并及时排除故障。

5.3.2 人员受照剂量超出年剂量限值

5.3.2.1 事故情景分析

本项目运行期间，由于辐射安全系统故障或工作人员操作不当等原因，造成人员误入控制区内部，导致人员受照剂量超过国家规定的年剂量限值。

发生该类事故时，由应急工作小组组织相关人员对年剂量限值的辐射工作人员的工作情况以及周围环境可能超出剂量率控制水平的区域进行调查，查找人员受到超年剂量限值照射的原因，尽快提出解决方案。

5.3.2.2 事故预防措施

- (1) 定期测试和维护辐射安全系统，确保其正常运行；
- (2) 加强对工作人员的辐射安全宣传教育，确保各项操作规程得到有效的贯彻和落实；
- (3) 开机出束前，撤离控制区时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和程序对各区域进行清场，确保供束前控制区无人滞留；
- (4) 出束期间一旦发现有人员滞留在控制区内，就近按下急停按钮；
- (5) 辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查；
- (6) 做好设备稳定性和状态检测，使装置始终保持在最佳状态下工作。

6 辐射安全管理

6.1 辐射安全与环境保护管理机构

辐射安全管理委员会是近代物理所辐射安全工作的管理机构，所长任委员会主任，主管所领导任委员会副主任，委员会委员由所技术安全办公室主任、所办公室负责安全保卫的副主任、辐射安全与防护室主任及其他相关部门负责人担任。

技术安全办公室是辐射安全管理委员会的执行部门，负责全所辐射安全工作的日常管理。

表 6-1 辐射安全管理委员会成员

姓名		性别	职务或职称	工作部门	专/兼职
主任	孙志宇	男	所长/研究员	近代物理研究所	兼职
副主任	胡正国	男	书记、副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
	何源	男	副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
	杨建成	男	副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
委员	王猛	男	副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
	宋华龙	男	纪委书记	近代物理研究所	兼职
	张雪莹	男	副主任/研究员	先进核能材料中心	兼职
	孙良亭	男	中心副主任/研究员	加速器技术中心	兼职
	段敬来	男	副主任/研究员	材料研究中心	兼职
	岳珂	男	处长/研究员	科技处	兼职
	苏有武	男	主任/正高级工程师	辐射安全与防护室	专职
	杨维青	男	正高级工程师	加速器总体室	兼职
	吴建强	男	正高级工程师	直线加速器中心	兼职
	张子民	男	中心主任/研究员	电子加速器中心	兼职
秦芝	男	中心副主任/研究员	先进核能材料中心	兼职	

	王思成	男	处长/研究员	工程处	兼职
	王玥	男	副处长/研究员	工程处	兼职
	骆鹏	男	副主任/研究员	核安全与核数据室	专职
	杨胜利	男	主任/高级工程师	技术安全办公室	专职
	赵卫平	男	副主任	综合办公室	兼职

辐射安全管理委员会职责如下：

- 1、贯彻落实国家和地方政府辐射安全相关的法律法规及标准，负责全所辐射安全工作的统一监督管理及决策；
- 2、制订全所辐射安全管理工作基本方针及工作计划；
- 3、建立健全所辐射安全管理规定及辐射事故应急预案等相关辐射安全管理制度；
- 4、其它辐射安全相关重大事项。

6.2 辐射工作人员管理

根据生态环境部公告《核技术利用辐射安全与防护培训和考核》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），自 2020 年 1 月 1 日，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当通过培训平台报名并参加考核。2020 年 1 月 1 日前已取得的原培训合格证书在有效期内继续有效。

目前近代物理所 723 名辐射工作人员，包括加速器各系统工程师等均通过了生态环境部门认可的辐射安全与防护考核。同时对新入所的职工和学生进行辐射安全内部培训，培训内容包括辐射安全法规，熟悉辐射安全防护基础知识。

本项目涉及的各类辐射工作人员除负责重离子治疗系统的安装调试及运行维护外，还会进行其他核技术利用工作，每季度收集工作人员的个人剂量计进行个人剂量监测并做累加，监测结果建立档案，严格按照个人剂量约束值 5mSv/a 控

制。各个项目场所配置了一定数量的直读式个人剂量报警仪，在工作人员进行高活化部件的检修等操作时，其监测数据作为在该项目所受职业照射的参考依据。

近代物理所制定了辐射工作人员考核计划，从事辐射工作的人员必须参加辐射安全防护考核，取得合格成绩单后才能上岗。已经取得辐射安全与防护考核合格证书及合格成绩单的工作人员，到期后若要继续从事辐射工作，需再次考核并合格。新上岗及调入的辐射工作人员在上岗前必须通过生态环境部培训平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

6.3 辐射安全管理制度

为认真贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，从科研工作的实际出发，近代物理所建立健全本单位的辐射安全规章制度。目前已制定了《中国科学院近代物理研究所辐射安全管理规定》、《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急预案》等，针对本项目拟制定相应的制度和规程，如：《辐射工作人员教育与培训规定》、《个人剂量监测管理规定》、《加速器销售，安装调试，维修维护辐射安全管理办法》、《加速器安全操作规程》、《加速器维护、检修规程》、《加速器辐射环境监测方案》。

6.4 辐射监测

根据前面的分析，重离子治疗系统销售（含建造）环节不涉及放射性操作，不需要进行监测。本项目辐射监测主要针对安装调试和运行维护过程进行，监测内容包括环境监测、工作场所监测和个人剂量监测。本次评价中近代物理所仅负责自行巡测，用户单位将在其使用重离子治疗系统的环境影响评价文件中明确其自行巡测点位、频次以及委托监测的频次。

6.4.1 环境监测

近代物理所配备中子巡检仪和 γ 巡检仪，在安装调试期间，定期对周围环境进行巡测。同时项目设置了固定式辐射监测仪实时监测。

交付用户单位后，由用户单位根据以下要求进行环境监测：

(1) 开展放射治疗相关活动的机构应自行或委托有能力的监测机构对工作场所运行工况下周围环境的辐射水平进行监测，监测频次应不少于 1 次/年；

(2) 质子/重离子加速器主体建筑周围应根据加速器产生的辐射场在加速器机房屏蔽体外人员可达处、主要束流损失点屏蔽体外和需关注的敏感点等位置合理布置固定式环境辐射监测仪，并将辐射监测数据接入计算机管理系统。

表 6-2 本项目环境监测计划

监测方式	监测对象	监测方式	监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	外照射	便携式仪表巡测	γ 辐射剂量率和中子剂量率	环境敏感点	定期巡测
		固定式仪表监测		环境监测站	实时

6.4.2 工作场所监测

近代物理所配备中子巡检仪和 γ 巡检仪，在安装调试期间，定期对工作场所进行巡测。用户单位使用场所配备有固定式中子和 γ 探测器，安装调试和维修维护期间，实时监测工作场所的辐射水平。交付用户单位后，由用户单位根据以下要求进行工作场所监测：

(1) 应根据使用放射治疗设备种类、能量和使用方式配备相应的辐射监测设备，对辐射工作场所的辐射水平（X- γ 辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率等）进行监测；

(2) 应对放射治疗工作场所机房四周屏蔽墙外 30 cm 处、顶棚、操作位、观察窗、防护门，以及其关注处点开展 X- γ 辐射周围剂量当量率监测；中子源治疗装置、质子/重离子加速器治疗装置、大于 10 MV 的 X 射线放射治疗设备还应前述位置开展中子剂量当量率监测；

表 6-3 工作场所监测计划

监测方式	监测对象	监测方式	监测项目	监测点位	监测频次
------	------	------	------	------	------

自行监测	外照射	便携式仪表监测	γ 辐射剂量率和中子剂量率	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、治疗室控制室、中央控制室、操作位、观察窗、门，以及其他敏感点位。	定期巡测
		固定式仪表监测		加速器大厅、高能束运线大厅区域及入口处、各控制室、治疗室迷道内和入口处。	实时
	便携式仪表监测	γ 辐射剂量率	放射性固体废物表面	每次拆卸或收贮时	

6.4.3 个人剂量监测

近代物理所的辐射工作人员在工作期间必须佩带个人剂量计。近代物理所为这些工作人员建立档案，个人剂量计每季度委托有相关资质单位监测一次，并由专门的辐射安全员负责存档；各个项目场所配置了一定数量的直读式个人剂量报警仪，在工作人员进行高活化部件的检修等操作时，其监测数据作为在该项目所受职业照射的参考依据。

6.5 监测设备

本项目配备了与其辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，具体清单见表 6-4。可以满足调试及维修维护期间的需要。

表 6-4 辐射监测设备清单

名称	型号	数量	监测对象
γ 巡检仪	待定	1 台	x/ γ
中子巡检仪	待定	1 台	中子
个人剂量报警仪	待定	若干	γ
个人剂量计	热释光片	每人一台	γ

拟配备的辐射监测仪器设备的相关要求如下：

- 1) 仪表应能适应脉冲辐射剂量场测量；
- 2) 中子及 γ 射线检测仪表适用于重离子治疗系统的中子及 γ 辐射场；

- 3) 仪表最低可测度数值应不大于 0.1 μ Sv/h;
- 4) 仪表需经剂量检定并在鉴定有效期内使用。

6.6 环保投资及竣工验收一览表

本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表和环保竣工验收一览表见表 6-5 和表 6-6。

表 6-5 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资
1	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	
2	人员考核	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核	-
3	监测仪器与防护用品	中子巡检仪、 γ 巡检仪、个人剂量计和个人剂量报警仪	30 万元/台（套）
		人身安全联锁及辐射监测系统	720 万元/台（套）
4	环评报告书编制，环保验收及报告编制		50 万元
总计			800 万元

表 6-6 环保竣工验收项目一览表

序号	验收内容	验收要求	
1	环保资料	本项目审批后的环境影响报告书、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。	
2	辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。	
3	人员要求	1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名； 2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
4	电离辐射	屏蔽体外剂量率	重离子治疗系统四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶：剂量率水平不高于第 1.4.2 “辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平”章节的要求。
5	辐射防护与安全措施	重离子治疗系统	1.辐射工作场所分区： 控制区：加速器大厅、高能束运线大厅、治疗室、放射性固体废物暂存间； 监督区：废水暂存间以及上述各控制区屏蔽墙体外紧邻的场所。 2.人身安全连锁系统：由 PLC、出入管理设备、急停、清场按钮、紧急开门按钮、束流闸等组成，且所有安全设备均能正常投入使用。 3.通风系统：重离子治疗系统机房设置了套排风系统，根据项目实地情况设置所需的通风换气次数。 4.场所辐射监测系统：安装在加速器大厅、高能束运线大厅区域及入口处、各控制室、治疗室迷道内和入口处，每个监测点一般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。
6	放射性三废	废气	由用户单位负责处置
		废水	
		固体废物	
7	辐射监测	工作场所/环境监测	制定辐射监测计划，在安装调试和运行维护期间，定期对工作场所及周围环境进行巡测。
		个人剂量监测	每位辐射工作人员配置累积式个人剂量监测计监测，委托有资质的单位监测，每季度进行监测，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。
		监测设备	配备中子巡检仪、 γ 巡检仪、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。

6.7 申请者从事辐射工作能力评价

近代物理所先后建成了 1.5 米回旋加速器（SFC，“一五”大科学工程）、大型分离扇回旋加速器（SSC，“七五”大科学工程）、兰州放射性次级束分离器（RIBLL）、兰州重离子加速器冷却储存环（CSR，“九五”大科学工程）等大科学装置，引领我国重离子科学与技术 and 加速器驱动核能技术的发展，取得了以新核素合成、原子核质量精确测量为代表的一批重大基础研究成果，在超导离子源、加速器驱动核能等方面获得了一系列关键技术突破，转化了重离子治癌、辐照诱变育种等多项重离子辐照技术，实现了大型医疗设备重离子肿瘤治疗专用装置的国产化。在加速器研制方面拥有雄厚的技术和人才储备，完全具备从事本项目辐射工作的能力。

根据中华人民共和国《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第二章第十二条之规定，“辐射工作单位组织编制或者填报环境影响评价文件时，应当按照其规划设计的放射性同位素与射线装置的生产、销售、使用规模进行评价。前款所称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，对近代物理所从事重离子治疗系统销售（含建造）、安装调试和运行维护等相应辐射活动的技术能力、辐射安全和防护措施等进行分析评价如下。

6.7.1 辐射安全与环境保护管理

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行），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。

近代物理所成立了辐射安全管理委员会，所长任委员会主任，主管所领导任委员会副主任，委员会委员由所技术安全办公室主任、辐射安全与防护室主任及其他相关部门负责人担任。本项目注册核安全工程师由苏有武担任，其证书见附件3。

6.7.2 辐射工作人员培训

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第18号，2011年5月1日起施行），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，合格后方可上岗。

目前本项目已有的辐射工作人员已全部参加了辐射安全与防护考核，并通过考核取得合格成绩单。

近代物理所制定了辐射工作人员培训计划，规定新上岗及调入的辐射工作人员在上岗前必须通过核技术利用辐射安全与防护考核后方可上岗。

6.7.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第18号，2011年5月1日起施行），申请者射线装置生产、调试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。

近代物理所重离子治疗系统销售场所不暂存射线装置，不涉及开机出束，不属于辐射工作场所，其安装调试和运行维护场所为用户单位重离子治疗系统机房所在区域。近代物理所的工作人员在进行设备安装调试前，需确认用户单位取得

相应的环评批复，且其安装调试场所的防护设施符合环境影响评价文件的相关要求后，方可进行安装调试的带束工作。

重离子治疗系统设有完备的安全连锁系统。出束调试开始前，检查安全连锁系统是否能正常工作。确认安全连锁系统能正常工作后，进行清场、警报、锁门等安全工作，确保辐射区内无人后方可开始调试。调试过程中，场所设有警示灯，张贴有电离辐射警示标志。

近代物理所采取的以上安全防护措施，基本能够保证其辐射工作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。

6.7.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行），申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

近代物理所为本项目从事科学实验、加速器安装调试和维修维护的辐射工作人员配备个人剂量计和个人剂量报警仪，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计并佩戴个人剂量报警仪。其中，个人剂量计每季度委托有相关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。

本项目辐射工作场所主要为各用户单位的使用场所，近代物理所配备 γ 巡检仪及中子巡检仪，在设备运行过程中，定期对工作场所和周围环境的辐射水平进行巡测。

综上所述，本项目配备的个人防护用品及监测仪器能够满足相关要求。

6.7.5 规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行），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。

为认真贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，从科研工作的实际出发，近代物理所建立健全本单位的辐射安全规章制度。目前已制定了《中国科学院近代物理研究所辐射安全管理规定》、《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急预案》等，针对本项目拟制定相应的制度和规程，如：《辐射工作人员教育与培训规定》、《个人剂量监测管理规定》、《加速器销售，安装调试，维修维护辐射安全管理办法》、《加速器安全操作规程》、《加速器维护、检修规程》、《加速器辐射环境监测方案》。

在以上制度按要求继续完善并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度基本能够满足相关要求。

6.7.6 辐射事故应急预案

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行），申请者应有辐射事故应急措施。

近代物理所已经制定了《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急预案》，应急预案包括应急组织体系及其职责任务、事故类型及相应应急措施、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，应准备充足的辐射事故应急监测、救援等方面的专用装备、器材和工具等，并定期组织开展辐射事故应急演练，增加应急工作人员的实战经验。确保一旦发生辐射事故，能立即启动辐射事故应急预案，并采取相应的应急措施。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。

2023 年 11 月 1 日，近代物理所开展了应急演习。模拟了放射源转移过程丢失的事故场景，现场照片见图 6-1。



图 6-1 应急演练现场照片

6.7.7 对用户单位的要求

近代物理所将严格保证重离子治疗系统只销售（含建造）给已取得环评批复的用户单位，安装调试活动在已取得环评批复的场所开展，运行维护（接受用户单位委托）活动需在用户单位取得辐射安全许可后开展。

此外，在重离子治疗系统交付用户单位之前，近代物理所应对用户单位相关辐射工作人员进行培训，培训的内容包括重离子治疗系统的工作原理及应用、重离子治疗系统的操作规程等方面的内容。

6.7.8 辐射工作能力综合评价

综上所述，近代物理所在严格落实本单位制定的人员培训计划后，其辐射工作人员的能力能够达到相关要求；近代物理所设立专门的辐射安全与环境保护管理机构，完善后能够做到职责和分工明确，满足管理要求；近代物理所在射线装置安装调试场所采取的安全防护措施，能够满足防止误操作、防止工作人员和公

众受到意外照射的安全要求。配备了工作人员个人防护用品和辐射监测仪表；近代物理所正在建立相关辐射安全管理制度，按要求制定完成并严格落实以后，能够确保重离子治疗系统销售、安装调试和运行维护过程中的安全。

近代物理所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。

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

重离子治疗系统是当前国际上肿瘤放射治疗最现实和最先进的主流装置，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包绕的肿瘤，重离子治疗显示出较大的优越性:精确度高、治愈率高、副作用小。

本项目的建设将具有较大的社会效益，主要体现在以下几个方面:

(1) 本项目的建设向社会提供优质的医疗服务，使得全国各地的部分癌症患者享受高水平、先进的重离子治疗，对提高人民群众的身体健康水平具有重要意义;

(2) 本项目重离子治疗系统占地面积小，设备操作和维护过程简单易行。总的来讲，本项目的投资额低，部署时间短，经济效益好，可持续发展，可进一步降低患者使用重离子治疗的费用。

7.2 代价分析

本项目建成之后，在创造很大的经济效益和社会效益的同时，也要付出一定的代价，主要的代价有:

少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，对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，其影响都是可以接受的。

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，对推进我国肿瘤治疗设备的发展具有重大意义。

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》、生态环境部、地方生态环境主管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) 近代物理所拟开展重离子治疗系统销售、安装调试以及运行维护工作。重离子治疗系统属于成型设备，重离子最高能量为 400MeV/u。近代物理所申请的重离子治疗系统年最大销售（含建造）及安装调试数量为 2 台，放疗用 X 射线图像引导系统（DR）年销售量 40 台。建设单位地址位于甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号。本项目的建设符合国家相关的法律规定和国家产业政策。建设项目目的明确、理由正当，同时具备了技术、人员等条件。

(2) 近代物理所在重离子治疗系统销售（含建造）过程中不会开机出束，因此不会对工作人员和环境造成辐射影响。重离子治疗系统的安装调试和运行维护环节，加速器开机出束产生的瞬发辐射和感生放射性为本项目主要的污染源。

(3) 近代物理所会为其用户推荐该装置的结构布置和建筑布局的基础方案和基本要求。同时，用户单位在使用重离子治疗系统前，需要进行环境影响评价和安全分析，并对其使用场所建筑墙体的屏蔽设计进行评价，确保其能够满足重离子治疗系统屏蔽设计标准的最低要求。

(4) 近代物理所对其辐射工作人员采用多重剂量控制措施。评价结果表明，重离子治疗系统安装调试期间，工作人员所受最大个人年有效剂量为 2.76mSv/a；运行维护期间，工作人员所受最大个人年有效剂量为 3.22mSv/a，均低于本项目工作人员剂量约束值 5mSv/a。安装调试及运行维护期间公众所受总剂量为 3.94E-04mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1 mSv/a。项目对工作人员和公众所致附加辐射影响可以接受。

(5) 重离子治疗系统安装调试和运行维护过程中可能发生的事故主要是安装调试和运行维护过程中，工作人员在加速器开机出束的情况下误入加速器大厅（含高能束运线大厅）或治疗室内造成的人身伤害。重离子治疗系统设计有功能齐全，具有安全冗余的高安全等级的安全连锁系统，采用清场搜索、紧急停机、警报装置等安全设备和措施，能够保证工作人员在安装调试和运行维护过程中的安全。此外，近代物理所制定了辐射事故应急预案并拟制定和完善一系列辐射安全管理制度，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，可有效防止事故的发生，减小和缓解事故的影响。近代物理所在安装调试和运行维护期间的辐射安全与防护措施基本满足相关标准要求。

(6) 对近代物理所辐射工作能力的分析评价表明，近代物理所在严格落实制定的人员招聘及培训计划后，其辐射工作人员的能力能够达到相关要求；近代物理所设立专门的辐射安全与环境保护管理机构，完善后能够做到职责和分工明确，满足管理要求；近代物理所在射线装置调试场所采取的安全防护措施，能够满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。配备了工作人员个人防护用品和辐射监测仪表；近代物理所正在建立相关辐射安全管理制度，按要求制定完成并严格落实以后，能够确保重离子治疗系统安装调试和运行维护工作中的安全；在严格按照国家相关法律法规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。

(7) 本项目参照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络公示、报纸媒体公示、现场粘贴的方式进行了公众参与，期间均未收到社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈意见。

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的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

为了保证人员和环境安全，近代物理所承诺：

（1）近代物理所在销售重离子治疗系统时，若用户未取得环评批复，提示用户向当地生态环境主管部门办理使用重离子治疗系统装置的环评审批手续。确认用户单位取得使用重离子治疗系统的环评批复，且用户单位安装调试场所符合要求后，方可安排技术人员进行设备的现场安装调试；

（2）严格遵守国家相关规定，在取得环评批复后方可开展重离子治疗系统安装调试活动；

（3）所有辐射工作人员都参加辐射安全与防护培训，并获得合格成绩单；

（4）项目建设和运行过程中，加强内部监督管理，接受环境保护部门的监督检查；

（5）每年依据相关法律法规对单位辐射工作的安全和防护状况进行年度评估，编写年度评估报告并向生态环境主管部门上报；

（6）所有辐射工作人员年受照剂量不超过 5mSv；

（7）绝不弄虚作假和违规操作。