

核技术利用建设项目

妈祖重离子医院

重离子治疗系统项目

环境影响报告书

(公示本)

福建中科核医学科技有限公司 (盖章)

2022年5月

生态环境部监制

核技术利用建设项目

妈祖重离子医院

重离子治疗系统项目

环境影响报告书

建设单位名称：福建中科核医学科技有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：福建省莆田市湄洲湾北岸经济开发区山亭镇山

亭村西郭 56 号

邮政编码：351152

联系人：***

电子邮箱：

联系电话：***

目 录

第一章 概述	1
1.1 项目名称、地点	1
1.1.1 名称	1
1.1.2 地点	1
1.2 项目概况	1
1.2.1 项目由来	1
1.2.2 建设规模	2
1.2.3 区域规划与产业政策	5
1.2.4 项目建设“三线一单”符合性	7
1.2.5 项目所在地周边环境简述	10
1.3 编制依据	13
1.3.1 国家相关法律	13
1.3.2 国家相关行政法规、条例	13
1.3.3 部门规章、规范性文件	14
1.3.4 地方法规、规章	15
1.3.5 技术规范和标准	15
1.3.6 与项目有关的文件、资料	16
1.3.7 参考资料	17
1.4.1 正常运行状态下的剂量约束值	18
1.4.2 场所辐射水平控制值	18
1.4.3 放射性污染物排放标准	25
1.4.4 非放射性环境质量和污染物排放标准	25
1.5 评价范围和保护目标	26
1.5.1 评价范围	26
1.5.2 控制与保护目标	27
第二章 自然环境状况	29
2.1 自然环境状况	29

2.1.1 地形、地貌	29
2.1.2 地质、地震	30
2.1.3 土壤	31
2.1.4 水文	32
2.1.5 气象	33
2.2 社会经济状况	33
2.2.1 莆田市秀屿区社会环境概况	33
2.2.2 湄洲湾北岸经济开发区社会环境概况	34
2.3 环境质量和辐射现状	35
2.3.1 辐射环境质量现状	35
2.3.2 非放射性环境质量现状	52
2.4 场址适宜性评价	59
第三章 工程分析与源项	61
3.1 项目规模与基本参数	61
3.1.1 重离子治疗加速器 (HIMM)	61
3.1.2 DR 机	61
3.2 工程设备与工艺分析	62
3.2.1 重离子治疗加速器 (HIMM)	62
3.2.2 DR 机	80
3.3 污染源项	81
3.3.1 施工期污染源项	81
3.3.2 营运期污染源项	81
3.4 废弃物	100
3.4.1 放射性废弃物	100
3.4.2 非放射性废弃物	103
第四章 辐射安全与防护	104
4.1 场所布局与屏蔽	104
4.1.1 场所布局	104
4.1.2 屏蔽设计	118

4.2 辐射安全与防护措施	123
4.3 三废的治理	142
4.3.1 放射性污染物治理措施	142
4.3.2 非放射性污染物治理措施	144
第五章 环境影响分析	146
5.1 建设阶段对环境的影响	146
5.2 运行阶段对环境的影响	146
5.2.1 项目运行期放射性环境影响	146
5.2.2 项目运行期非放射性环境影响	214
5.3 事故影响分析	217
5.3.1 事故谱	217
5.3.2 假想事故的环境影响	220
第六章 辐射安全管理	223
6.1 机构与人员	223
6.1.1 辐射安全与环境保护机构	223
6.1.2 辐射工作人员配备计划	225
6.2 辐射安全管理规章制度	226
6.3 辐射监测	227
6.3.1 个人剂量监测	227
6.3.2 工作场所监测	228
6.3.3 流出物监测	229
6.3.4 环境监测	230
6.4 辐射事故应急	233
6.4.1 应急响应机构	233
6.5.2 应急响应	234
6.5.3 应急物资与保障	235
6.5.4 应急培训与演练	236
第七章 利益-代价简要分析	237
7.1 利益分析	237

7.1.1 社会效益	237
7.1.2 直接效益	237
7.1.3 环境效益	238
7.2 代价分析	238
7.2.1 社会代价	238
7.2.2 经济代价	238
7.2.3 环境代价	241
7.3 正当性分析	243
第八章 结论与建议	244
8.1 项目工程概况	244
8.2 辐射安全与防护	244
8.3 环境影响分析	246
8.4 辐射安全管理	247
8.5 公众参与结论	247
8.6 结论	248
8.7 建议与承诺	248
附录 项目竣工环境保护验收一览表	250

附图

附图 1 项目地理位置图

附图 2 项目拟建地周边环境及敏感目标图

附图 3 项目所在地块控制性规划图

附图 4 医院规划总平面布置图

附图 5-1 重离子治疗中心平面布置图[负二层北侧]

附图 5-2 重离子治疗中心平面布置图[负二层南侧]

附图 6-1 重离子治疗中心平面布置图[负一层北侧]

附图 6-2 重离子治疗中心平面布置图[负一层南侧]

附图 7-1 重离子治疗中心平面布置图[一层北侧]

附图 7-2 重离子治疗中心平面布置图[一层南侧]

附图 8-1 重离子治疗中心平面布置图[二层北侧]

附图 8-2 重离子治疗中心平面布置图[二层南侧]

附图 9-1 重离子治疗中心平面布置图[三层北侧]

附图 9-2 重离子治疗中心平面布置图[三层南侧]

附图 10-1 重离子治疗中心平面布置图[屋顶层北侧]

附图 10-2 重离子治疗中心平面布置图[屋顶层南侧]

附图 11 重离子治疗加速器机房及治疗室平面及剖面图

第一章 概述

1.1 项目名称、地点

1.1.1 名称

项目名称：妈祖重离子医院重离子治疗系统项目

建设单位：福建中科核医学科技有限公司（以下简称中科核医学）

1.1.2 地点

项目建设地点位于福建省莆田市湄洲湾北岸经济开发区山亭镇妈祖国际健康城，场址范围北至妈祖国际健康城启动区地块B伦琴医学影像诊断中心的6#住院楼、7#共享医技中心，西至园区规划道路，东至荔港大道，南至东吴大道。

项目地理位置见附图 1。

1.2 项目概况

1.2.1 项目由来

福建中科核医学科技有限公司注册地址位于福建省莆田市湄洲湾北岸经济开发区山亭镇山亭村西郭56号，是从事医学研究和试验发展、医疗设备及器械制造、第三类医疗器械销售的企业。公司注册资金28000万元，统一社会信用代码为91350305MA3313R515。

为落实“健康中国”战略，完成社会资本举办医疗机构的重大任务，提高群众的健康水平，将我国自主知识产权、具备国际前沿水平的重离子加速器治癌技术推广应用，福建中科核医学科技有限公司拟在湄洲湾北岸经济开发区中妈祖国际健康城启动区地块**新建**妈祖重离子医院重离子治疗系统项目。本项目主要辐射设备为：重离子治疗系统1套（含1台重离子加速器，离子能量：120MeV/u~400MeV/u，

最大束流强度 1.017×10^8 pps)、其他医用射线装置(III类射线装置5台)。

本项目重离子治疗系统由兰州科近泰基新技术有限责任公司提供,并负责其安装、调试、运行和维护工作。兰州科近泰基新技术有限责任公司成立于2002年4月,是中国科学院控股有限公司和中国科学院近代物理研究所旗下的高新技术企业,主要从事医用碳离子治疗系统(医用重离子加速器)的生产制造、安装调试、运行维护及相关人才培养,非标准实验电磁铁、真空管道设备及零部件的加工、销售以及相关业务。公司现有员工400余人;拥有各种类制造、检测、试验设备200多台套;具备大型成套设备的设计、加工和制造能力;是目前国内唯一拥有碳离子治疗系统核心技术及生产制造、安装销售、运维能力和医疗器械生产许可证等相应资质的企业。

本项目涉及使用I类、III类射线装置。根据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国环境影响评价法》和《中华人民共和国放射性污染防治法》的要求,本项目应进行环境影响评价。根据生态环境部(原环境保护部)、国家卫生和计划生育委员会公告2017年第66号《射线装置分类》的规定,重离子治疗装置的管理类别属于I类射线装置。根据生态环境部令第16号《建设项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)》,本项目属于“五十五、核与辐射”中“172.核技术利用建设项目——使用I类射线装置的”,应编制环境影响报告书。为此,福建中科核医学科技有限公司委托中国核动力研究设计院承担本项目的环境影响报告书编制工作。

1.2.2 建设规模

妈祖重离子医院规划用地 33354m^2 ,规划总建筑面积 106700m^2 。医院规划总平面布置示意图见附图4。

本项目涉及的主要建(构)筑物包括一座重离子治疗中心。重离

子治疗中心布置在院区西侧，是医院的核心建筑，为 1 栋主体 5 层（地上 3 层、地下 2 层）的框架结构建筑物，占地面积 5871m²，地上总建筑面积 13816m²，地下总建筑面积 8200m²。

1、首层布置：高能束运线爬升区、Gantry 治疗室、重离子加速器大厅（上空）、设备转运大厅、主入口大厅、门诊区、检验科、医护用房、设备用房等。

2、二层布置：高能束运线爬升区、Gantry 治疗室（上空）、配电室、电源间、加速器备品间、空调机房及其他设备用房、医护办公室、更衣室、档案室等。

3、三层布置：高能束运线爬升区（上空）、Gantry 治疗室（上空）空调机房及其他设备用房、医护办公室、会议室等。

4、负一层布置：重离子治疗区，包括加速器大厅、终端治疗室 5 个及冷却水泵房等相关工艺设备用房，患者等候区、卫生间等患者用房，医护办公用房等；此外，本项目在 5 个治疗室内配置 5 台 DR 机（均属 III 类射线装置）。

5、负二层布置：进排风机房、污水提升间、生活水泵房、配电间等设备用房和停车场。

重离子治疗中心根据重离子工艺的要求，高能线爬升区需要高出地面 20.3 米，以满足设备布置、安装、以及天车运行的要求。高能线爬升区以外的区域设置了 3 层，首层层高为 6.2 米，主要功能为主入口大堂、诊室及重离子工艺设备用房，其中部分区域的上半部分需要设置二层的工艺设备用房的线缆夹层（层高为 1.7 米）；二层层高为 6 米，主要功能为重离子工艺设备用房和医护用房，其中重离子工艺设备用房的电源间和配电室内需要设置天车，对层高要求较高；三层层高为 6 米，主要功能为设备用房。高能线爬升区的屋顶女儿墙高度为 3.6 米，因此建筑高度为 23.9 米。负一层层高为 7.5 米，以满足

重离子加速器大厅及相关工艺设备用房的净高要求。屋面共布置 7 个排气筒，顶部标高 24.6m。

项目主要建设内容、规模及可能产生的环境问题见表 1.2-1。

表 1.2-1 项目组成及主要环境问题

名称	建设内容及规模		可能产生的环境问题	
			施工期	运行期
主体工程	重离子治疗中心	<p>独栋建筑，共 4 层（地上 3 层，地下 2 层），地上建筑面积 13816m²，地下建筑面积 8200m²。包括 3 部分，即重离子辅助治疗区、重离子辐射治疗区、重离子机房供应区。其中，重离子辐射治疗区包括 5 个治疗室，重离子机房供应区包括回旋加速器大厅和同步加速器大厅等。安装重离子治疗加速器系统一套，加速离子为 ¹²C⁶⁺，能量 120MeV/u~400MeV/u。管理类别为 I 类射线装置。5 个治疗室内各配置 DR 机 1 台，均为 III 类射线装置。</p>	<p>施工扬尘、施工噪声、施工废水、建筑垃圾、生活污水、生活垃圾</p>	<p>γ 射线、中子、感生放射性废气、感生放射性废水、放射性固废、臭氧、氮氧化物、微波电磁辐射、医疗废水、医疗垃圾</p>
辅助工程	公用工程，负二层停车场等		/	/
公用工程	供配电、给排水等公用设施。		/	/
办公及生活设施	各辐射工作单元设置有相应的办公设施。		/	生活垃圾 生活污水
环保工程	<p>放射性废水收集池：位于同步加速器大厅西侧，两个，尺寸 2m×1.5m×1.5m，池底采用聚合物水泥 II 型防水涂料防渗；</p> <p>放射性固体废物暂存间：位于同步加速器大厅内的东北角，尺寸 3m×2m×2m；</p> <p>排气筒：共 7 个，位于屋顶，顶部标高 24.6m；</p> <p>依托医院的医疗废水处理设施及医疗垃圾收集设施。</p>		/	/

本项目的非放射性环境影响评价部分《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》已获得莆田市生态环境局的批复，本次环境影响评价内容为重离子治疗中心的辐射环境影响。目前，重离子治疗中心的土建部分已建设完成。

1.2.3 区域规划与产业政策

(1)与国家产业政策的符合性

根据中华人民共和国国家发展和改革委员会《产业结构调整指导目录》（2019年本），本项目属于鼓励类第六项“核能”的第6条“同位素、加速器及辐照应用技术开发”，本项目符合国家现行产业政策要求。

(2)与地方产业政策的符合性

根据福建省人民政府办公厅《关于促进医药产业健康发展实施方案的通知》（闽政办[2017]22号），总体要求中指出“牢固树立和落实五大发展理念，坚持政府引导与市场推动相结合、自主创新与引进吸收相结合、重点突破与集聚发展相结合，通过优化政策环境、强化要素支撑、调整产业结构，实现医药产业整体素质明显提升，创新能力显著增强，产品质量全面提高，产业规模不断壮大，产业组织结构进一步优化，逐步提高医药工业在我省国民经济中的比重。”

《莆田市湄洲湾北岸经济开发区管委会主任办公会议纪要》（[2019]14号），指出“争取医用重离子设备在妈祖健康城落户、运营，是推进莆田市与中国科学院近代物理研究所核医学产业合作的一项重要内容，对北岸医疗健康产业发展具有里程碑意义。”

妈祖重离子医院项目可行性研究报告已获得莆田市湄洲湾北岸经济开发区发展和改革局的批复（莆湄北发改[2020]62号）。

本项目的重离子加速器为中国科学院近代物理研究所自主创新的医疗项目，符合《福建省促进医药产业健康发展实施方案》文件的精神，同时项目的实施能够积极推进相关产业化进程，符合地方产业政策。

(3)项目与相关规划的符合性分析

①地方发展规划的符合性

根据莆田市人民政府办公室关于印发《建设美丽莆田打造医疗健康品牌行动规划（2017-2021年）》的通知（莆政办[2017]133号），奋斗目标中指出“规划建设妈祖医疗健康城，以大健康产业作为发展方向，打造一个集总部经济、高端医疗、特色专科、医疗旅游、养生保健、健康管理、药械交易、会展经济等为一体的现代医疗健康产业集聚区。”本项目为高端医疗项目，符合《建设美丽莆田打造医疗健康品牌行动规划（2017-2021年）》的规划。

②与湄洲湾北岸经济开发区规划的符合性

本项目选址在湄洲湾北岸经济开发区内，该开发区于1996年经福建省人民政府批准设立，2002年莆田市行政区划调整时改设秀屿区，2007年3月经国家发改委、国土资源部、建设部等部门核准保留为省级开发区。该开发区已形成“东城西港”的空间布局，即在开发区东部打造以妈祖城为核心，大爱城、北江新城为拓展的滨海新区；在开发区西部构建以东吴临港产业园为核心的临港产业集中区。2007年3月市五届人大一次会议审议通过《莆田市妈祖城总体规划》，将妈祖城开发功能定位为集休闲、娱乐、购物、餐饮、金融、会展、文化、行政于一体。

本项目位于妈祖城中启动区地块南侧，根据《莆田市350305-27单元妈祖医疗健康城启动区地块一控制性详细规划》，项目地块为医院用地（规划图见附图3），本项目规划用地面积33354m²，容积率2.04，绿地率35%，最高楼建筑高度60m，满足控规要求。本项目用地已取得莆田市自然资源局湄洲湾北岸经济开发区分局的《建设项目用地预审和选址意见书》（选字第350300201905007号）。可以看出，本项目所在地块的功能分区及用地性质均与规划相符。

综上所述，本项目与国家产业政策、地方产业政策以及湄洲湾北岸经济开发区规划均相符，项目符合区域相关规划。

1.2.4 项目建设“三线一单”符合性

根据原环境保护部文件《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》（环环评[2016]150号）的要求，建设项目选址选线、规模、性质和工艺路线等应与“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单”（以下简称“三线一单”）进行对照。《莆田市人民政府关于印发莆田市“三线一单”生态环境分区管控方案的通知》（莆政综[2021]112号）对落实生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单（以下简称“三线一单”），建立生态环境分区管控体系并监督实施提出了要求，具体如下。

(1)生态保护红线

生态保护红线是生态空间范围内具有特殊重要生态功能必须实行强制性严格保护的区域。本项目位于福建省莆田市湄洲湾北岸经济开发区山亭镇妈祖国际健康城内，项目用地未涉及饮用水源、风景区、自然保护区等生态保护区，符合生态保护红线划定的相关要求。

(2)环境质量底线

环境质量底线是国家和地方设置的大气、水和土壤环境质量目标，也是改善环境质量的基准线。本项目地表水环境执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类标准，大气环境执行《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准，声环境执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）1类标准。本项目为核技术利用项目，主要产生感生放射性气态流出物，对大气环境影响较小；正常工况下无废水外排，不会对地表水环境造成影响；事故工况下产生的冷却水由放射性废水收集池收集，若要排放，需满足以下两种条件之一：①采取静置衰变措施，并在排放前进行监测，放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）表1中限值（总 β 放射性浓度不大于10Bq/L），并经审管部门批准后，方可纳入市政污水管网，后排

入莆田市港城新区污水处理厂；②根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 $1ALI_{min}$ ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录（根据 GB18871-2002 B1.3.4 的公式及表 B3 中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 7Be 、 3H 核素的 ALI_{min} 分别为 $8.33 \times 10^8 Bq$ 、 $4.17 \times 10^8 Bq$ 、 $1.11 \times 10^9 Bq$ ）；各类感生放射性固体废物，于放射性固体废物暂存间暂存一段时间后，加速器结构部件及靶件若可回用则维修后继续使用，若不可回用，则送福建省放射性废物库处置，废树脂最终送福建省放射性废物库处置，废过滤器由厂家人员更换后，最终送福建省放射性废物库处置，废手套、棉纱和口罩等暂存一段时间，最终送福建省放射性废物库处置。采取本环评提出的相关环保措施后，项目污染物排放不会对区域环境质量底线造成冲击。

(3)资源利用上线

资源利用上线是各地区能源、水、土地等资源消耗不得突破的“天花板”。本项目为核技术利用项目，项目所在医院用水主要为生活用水、食堂用水和医疗用水，总用水量为 120816.6t/a，用电量为 112.89 万 kwh/a，水资源及能源消耗量不大，不属于高耗能和资源消耗型企业；新建的重离子治疗中心占用少量土地为永久用地（5871m²），位于医院内，不新增用地，对资源消耗极少。

项目建成运行后通过内部管理、设备选择、原辅材料的选用和管理、污染治理等多方面采取合理可行的防治措施，以“节能、降耗、减污”为目标，有效的控制污染及资源利用水平。项目的水、电等资源利用不会突破区域的资源利用上线。

(4)生态环境准入清单

根据《莆田市人民政府关于印发“三线一单”生态环境分区管控

方案的通知》(莆政综[2021]112号)、莆田市环境管控单元图,本项目位于福建莆田湄洲湾北岸经济开发区,属于重点管控单元。

莆田市生态环境准入总体要求为:①木兰溪木兰陂以上流域范围和萩芦溪南安陂以上流域范围内禁止新(扩)建化工、涉重金属、造纸、制革、琼脂、漂染行业和以排放氨氮、总磷等为主要污染物的工业项目(污水深海排放且符合园区规划及规划环评的工业项目除外)。②华林经济开发区纺织鞋服业禁止印染、染整及鞣制工艺,鼓励使用低挥发性有机物含量的原料和产品;机械加工、家具制造、工业美术等产业禁止电镀工艺;莆田高新技术产业开发区制鞋、服装及化学纤维指导等产业只进行成品加工,禁止引入原料合成企业;莆田湄洲湾(石门澳)产业园控制石化中游产业发展规模,按照规划环评要求,严格控制己内酰胺产业发展规模,加大向低污染、高附加值的下游产业延伸;湄洲湾北岸经济开发区差别化纤维等资源型产业应优先引进低能耗、低排放、高附加值的下游产业,除列入国家规划的大型煤电和符合相关要求的等容量替代项目,以及以供热为主的热电联产项目外,原则上不再新建煤电项目;仙游经济开发区北部片区的纺织鞋服业禁止印染、染整及鞣制工艺,鼓励使用低挥发性有机物含量的原料和产品,机械制造业禁止电镀和喷漆工艺,不得引进化工类项目,火车站物流中心禁止危险化学品的存储和运输,南部片区重点发展低水耗、轻污染的石化下游精细化工和化工新材料产业。本项目西南侧200m处为木兰河流域,不涉及禁止新(扩)建的项目类别;本项目位于湄洲湾北岸经济开发区,属于核技术利用项目,不涉及不再新建的项目。

福建莆田湄洲湾北岸经济开发区为重点管控单元,其管控要求为:
A.空间布局约束:①差别化纤维等资源型产业应优先引进低能耗、低排放、高附加值的下游产业。②除列入国家规划的大型煤电和符合相关要求的等容量替代项目,以及以供热为主的热电联产项目外,原则

上不再建设新的煤电项目。③园内将不规划居住用地，现有居民逐步搬迁。

B.污染物排放管控：①使用溶剂型涂料的工业涂装工序必须密闭作业，配备有机废气收集系统，并安装高效回收净化设施，有机废气净化率达到规定要求。推广使用低毒、低挥发性溶剂。②新增涉VOCs排放项目，VOCs排放实行倍量替代。③园区内生活污水全收集全处理，工业企业的污水接管率达到100%。

C.环境风险防控：①建立健全环境风险防控体系，制定环境风险应急预案，建设事故应急池，成立应急组织机构，防止在处理安全生产事故过程中产生的可能严重污染水体的消防废水、废液直接排入水体。②园区事故应急池、污水处理厂等区域应采取必要的防渗处理，不得污染地下水环境。

D.资源开发效率要求：①入园项目清洁生产需达到国内先进水平，火电、差别化纤维项目应达到国际先进水平。②中水回用率应达到25%以上。本项目为核技术利用项目，不涉及不再新建的项目；事故工况下产生的冷却水由放射性废水收集池收集，静置衰变，纳入市政污水管网；符合环境风险防控要求；冷却水循环使用，不外排。

综上，本项目为核技术利用，所在区域不涉及生态保护红线区，资源消耗少，符合莆田市重点管控单元管控要求，满足莆田市生态环境准入总体要求和福建莆田湄洲湾北岸经济开发区管控要求。根据现场监测与环评预测，项目建设满足环境质量底线要求。因此，本项目的建设符合“三线一单”管控要求。

1.2.5 项目所在地周边环境简述

项目拟建地点位于湄洲湾北岸经济开发区山亭镇，距莆田市区中心约40km，土地属妈祖国际健康城启动区地块，医院北侧约15m为伦琴医学影像诊断中心的6#住院楼、7#共享医技中心（已建成，未运营）；西北侧紧邻园区规划道路，27m处为铁灶村社区，人口较为密集；东南侧为荔港大道；南侧为东吴大道。建设地点附近（实体建

筑向外 100m 范围) 的村民集中居住地、企事业单位见表 1.2-2。项目评价范围内无风景旅游区、名胜古迹、自然保护区等环境敏感保护目标。项目拟建地周边环境及敏感目标图见附图 2，项目所在地块控制性规划图见附图 3。将建设地点附近（实体建筑向外 100m 范围）的人口按与本项目重离子治疗中心建筑实体的距离和方位划分子区（如图 1.2-1 所示），结果见表 1.2-3。

表 1.2-2 实体建筑向外 100m 范围内的主要村社（居委）及人口数

村（居委）/企事业单位	方位	距离（m）	户数（户）	人口数（人）
铁灶村社区	NW	27	14	97
伦琴医学影像诊断中心	N	15	-	约 100
硼中子治疗中心	E	25	-	约 15

表 1.2-3 实体建筑向外 100m 范围内按子区划分的人口数

方位	距离（m）	0~50	50~100
	N	53	78
E	11	4	
S	0	0	
W	10	56	

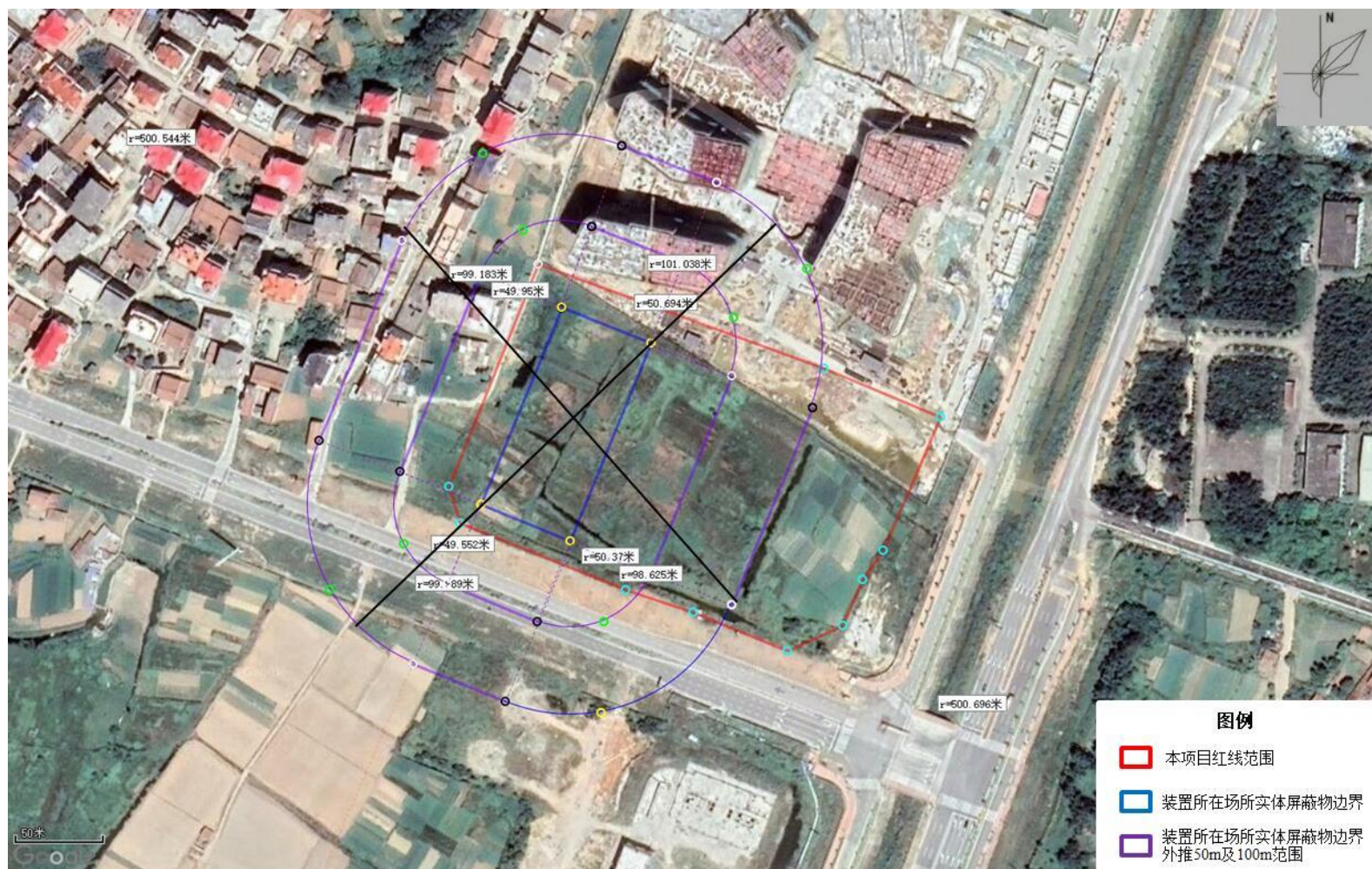


图 1.2-1 实体建筑向外 100m 范围内的子区划分图

1.3 编制依据

1.3.1 国家相关法律

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》，2015 年 1 月 1 日实施；
- (2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，2018 年 12 月 29 日实施；
- (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月 1 日实施；
- (4) 《中华人民共和国大气污染防治法》，2018 年 10 月 26 日实施；
- (5) 《中华人民共和国水污染防治法》，2018 年 1 月 1 日实施；
- (6) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，2020 年 9 月 1 日实施；
- (7) 《中华人民共和国噪声污染防治法》，2018 年 12 月 29 日实施。

1.3.2 国家相关行政法规、条例

- (1) 《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（2005 年 9 月 14 日国务院令 第 449 号公布，根据 2019 年 3 月 2 日《国务院关于修改部分行政法规的决定》修订），2019 年 3 月 2 日实施；
- (2) 《放射性废物安全管理条例》，国务院令 第 612 号，2012 年 3 月 1 日实施；
- (3) 《建设项目环境保护管理条例》，国务院令 第 682 号（1998 年 11 月 29 日国务院令 第 253 号发布，根据 2017 年 7 月 16 日《国务院关于修改〈建设项目环境保护管理条例〉的决定》修订），2017 年 10 月 1 日实施；
- (4) 《危险化学品安全管理条例》，国务院令 第 645 号，（2002 年 1 月 26 日中华人民共和国国务院令 第 344 号公布，2011 年 2 月 16 日国务院第 144 次常务会议修订通过），2013 年 12 月 7 日实施。

1.3.3 部门规章、规范性文件

(1) 《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 日起实施；

(2) 《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 7 号（2006 年 1 月 18 日国家环境保护总局令第 31 号公布，根据 2019 年 7 月 11 日生态环境部部务会议通过的《生态环境部关于废止、修改部分规章的决定》修正）；

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

(4) 《产业结构调整指导目录（2019 年本）》，国家发展和改革委员会第 29 号令，2020 年 1 月 1 日实施；

(5) 关于发布《放射性废物分类》的公告，环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月 1 日起实施；

(6) 《城市放射性废物管理办法》，[87]环放字第 239 号，1987 年 7 月 16 日实施；

(7) 《危险废物污染防治技术政策》，环发[2001]199 号，2001 年 12 月 17 日实施；

(8) 《环境影响评价公众参与办法》，生态环境部第 4 号令，2019 年 1 月 1 日起实施；

(9) 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]66 号，2017 年 12 月 6 日；

(10) 生态环境部公告，2019 年第 57 号；

(11) 《放射工作人员职业健康管理暂行办法》，卫生部令第 55 号，2007 年 11 月 1 日起施行。

1.3.4 地方法规、规章

(1)《核技术利用单位辐射事故/事件应急预案编制大纲(试行)》，福建省环境保护厅，2013年3月15日。

1.3.5 技术规范和标准

(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)《核辐射环境质量评价一般规定》(GB11215-1989)；

(4)《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)；

(5)《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》(GB11928-1989)；

(6)《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)；

(7)《医疗废物专用包装袋、容器和警示标志标准》(HJ421-2008)；

(8)《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》(HJ2.1-2016)；

(9)《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ2.2-2018)；

(10)《环境影响评价技术导则 地表水环境》(HJ2.3-2018)；

(11)《环境影响评价技术导则 声环境》(HJ2.4-2009)；

(12)《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)；

(13)《低、中水平放射性固体废物包装安全标准》(GB12711-1991)；

(14)《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》(GB27742-2011)；

(15)《环境空气质量标准》(GB3095-2012)；

(16)《海水水质标准》(GB3097-1997)；

(17)《声环境质量标准》(GB3096-2008)；

(18)《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)；

(19)《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)；

(20)《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)；

(21)《危险化学品重大危险源辨识》(GB18218-2018);

(22)《危险废物贮存污染控制标准》(GB18597-2001, 2003年修订);

(23)《放射治疗机房辐射屏蔽规范 第1部分:一般原则》(GBZ 201.1-2007);

(24)《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);

(25)《职业性外照射个人监测规范》(GBZ 128-2019);

(26)《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)。

1.3.6 与项目有关的文件、资料

(1)建设项目环境影响评价委托书;

(2)莆田市湄洲湾北岸经济开发区发展和改革局,《关于妈祖重离子医院项目可行性研究报告的批复》(莆湄北发改[2020]62号);

(3)莆田市自然资源局湄洲湾北岸经济开发区分局,《建设项目用地预审和选址意见书》(选字第350300201905007号);

(4)莆田市卫生健康委员会,《设置医疗机构批准书》(莆卫医设准字[2019]2号);

(5)莆田市自然资源局,《关于公布<莆田市忠门南分区(350305-27)单元妈祖医疗健康城启动区地块一控制性详细规划>的公告》,2018年7月10日;

(6)《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》(2020年11月);

(7)莆田市生态环境局,关于对《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》的批复(莆环审北[2020]5号);

(8)《妈祖重离子医院项目可行性研究报告》,福建昇华工程造价咨询有限公司,2020年4月;

(9)《莆田加速器辐射防护设计报告》,兰州科近泰基新技术有限

责任公司，2020年8月；

(10)重离子加速器项目辐射环境质量现状监测报告（鄂核检字【202010-400】号），湖北省核工业放射性核素检测实验中心，2020年10月；

(11)妈祖重离子医院重离子治疗系统环境现状补充监测报告（SNPI环检（电离）字[2022]第057号），苏州热工研究院有限公司环境检测中心，2022年3月21日；

(12)其他相关文件资料。

1.3.7 参考资料

(1)International Atomic Energy Agency. Safety Reports Series No.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA, Vienna, 2001；

(2)《辐射防护手册》（第一分册 辐射源与屏蔽，原子能出版社，1987）；

(3)《辐射防护手册》（第三分册 辐射安全，原子能出版社，1990）；

(4)《实用辐射安全手册》（从慧玲，北京：原子能出版社，2007.8）；

(5)《加速器保健物理》（原子能出版社，1983）；

(6)C. Sunil et al. Neutron yield and dose equivalent from heavy ion interactions on thick target. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 534 (2004) 518-530；

(7)K. Goebel, G.R. Stevenson, J.T. Routti, H.G. Vogt, Evaluating dose rates due to neutron leakage through the access tunnels of the SPS, CERN Lab II-RA Note,75-10, 1975；

(8)K. Eckerman, J Ryman. Federal Guidance Report No.12. External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil. Washington, DC, 1993；

(9)《原子核物理》（卢希庭，原子能出版社，1981）；

(10)National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities。

1.4 评价标准

1.4.1 正常运行状态下的剂量约束值

福建中科核医学科技有限公司妈祖重离子医院重离子治疗系统项目正常运行期间对职业人员和公众中任何个人造成的有效剂量的约束值依据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的规定：“对任何工作人员的照射的剂量限值由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均）不超过 20mSv，其中任何一年中的有效剂量不超过 50mSv；公众照射剂量限值是公众中有关关键人群组的成员所受到的平均个人年有效剂量估计值不超过 1mSv”，同时，依据 HJ1198-2021《放射治疗辐射安全与防护要求》规定的职业照射和公众照射的剂量约束值作为本项目辐射环境影响评价标准，见表 1.4-1。

表 1.4-1 本项目辐射环境影响评价标准

单位：mSv/a

分类		GB18871-2002 基本限值标准	剂量约束值
职业 照射	工作人员	20	5
公众照射		1	0.1

1.4.2 场所辐射水平控制值

根据《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）的规定，本项目各辐射工作场所屏蔽体外的剂量率控制水平见表 1.4-2。

表 1.4-2 本项目各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

序号	楼层	点位描述	主要考虑的束流损失点	居留因子	方法一确定的屏蔽体外剂量率控制水平 (μSv/h)	保护目标	H ₀ (μSv/周)	周最大运行/出束时间 (h)	方法二确定的屏蔽体外剂量率控制水平 (μSv/h)	屏蔽体外剂量率控制水平 (μSv/h)
1	-1	1 [#] 治疗室迷宫门外	1 [#] 治疗室	1/8	10	公众	5	35	1.14	1.14
2		2 [#] 治疗室迷宫门外	2 [#] 治疗室	1/8	10	公众	5	35	1.14	1.14
3		3 [#] 治疗室迷宫门外	3 [#] 治疗室	1/8	10	公众	5	35	1.14	1.14
4		4 [#] 治疗室迷宫门外	4 [#] 治疗室	1/8	10	公众	5	35	1.14	1.14
5		Gantry 治疗室迷宫门外	Gantry 治疗室	1/8	10	公众	5	35	1.14	1.14
6		前台走廊	1 [#] 治疗室	1/5	10	公众	5	35	0.71	0.71
7		医梯	1 [#] 治疗室、回旋引出部位、同步环引出部位	1/40	10	公众	5	100.8	1.98	1.98
8		护士站走廊	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 治疗室	1/5	10	公众	5	35	0.71	0.71
9		储藏室	3 [#] 治疗室	1/20	10	运维工作人员	100	35	57.14	10.00
10		冷却水泵房	2 [#] 治疗室	1/20	10	运维工作人员	100	35	57.14	10.00
11		治疗区卫生	Gantry 治疗室	1/20	10	公众	5	35	2.86	2.86

		间								
12		机动车坡道 1	Gantry 治疗室	1/40	10	公众	5	35	5.71	5.71
13	1	护士办公室	Gantry 治疗室	1	2.5	医护人员	100	35	2.86	2.50
14	院内	重离子治疗 中心外南侧	Gantry 治疗室	1/40	10	公众	5	35	5.71	5.71
15		重离子治疗 中心外西侧	Gantry 治疗室	1/40	10	公众	5	35	5.71	5.71
16	-1	加速器备品 间	同步环注入口、同 步环引出部位	1/20	10	运维 工作人员	100	100.8	19.84	10.00
17		设备区走廊	同步环注入口、同 步环引出部位	1/5	10	运维 工作人员	100	100.8	4.96	4.96
18		设备转运大 厅	同步环引出部位	1/20	10	运维 工作人员	100	100.8	19.84	10.00
19	-1	等候室 1	1 [#] 治疗室	1/20	10	公众	5	35	2.86	2.86
20		等候室 2	1 [#] 治疗室	1/20	10	公众	5	35	2.86	2.86
21		前台	1 [#] 治疗室	1	2.5	医护 工作人员	100	35	2.86	2.50
22		咨询	1 [#] 治疗室	1	2.5	医护 工作人员	100	35	2.86	2.50
23		中央控制室	1 [#] 治疗室	1	2.5	运维	100	35	2.86	2.50

						工作人员				
24		护士站	3#治疗室	1	2.5	医护人员	100	35	2.86	2.50
25		等候室 3	Gantry 治疗室	1/20	10	公众	5	35	2.86	2.86
26	1	接待室	1#治疗室	1	2.5	医护人员	100	35	2.86	2.50
27		运维办公室	3#治疗室	1	2.5	运维工作人员	100	35	2.86	2.50
28		护士办公室	Gantry 治疗室	1	2.5	医护人员	100	35	2.86	2.50
29		Gantry 等候区	Gantry 治疗室	1/20	10	公众	5	35	2.86	2.86
30		诊室 2	同步环注入口、同步环引出部位	1/2	10	医护人员	100	100.8	1.98	1.98
34		加速器大厅 1#迷宫门外	1#治疗室	1/8	10	运维工作人员	100	35	22.86	10.00
35	-1	加速器大厅 2#迷宫门外	同步环引出部位	1/8	10	运维工作人员	100	100.8	7.94	7.94
36	1	医护更衣室 1	同步环注入口、同步环引出部位	1/2	10	医护工作	100	100.8	1.98	1.98

					人员					
37		医护更衣室 2	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
38		诊室 1	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
39		诊室 3	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
40		诊室 4	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
41		诊室 5	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
42		诊室 6	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
43		诊室 7	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
44		诊室 8	同步环注入口、同 步环引出部位	1/2	10	医 护 工 作 人 员	100	100.8	1.98	1.98
45	2	重离子工艺 变配电房	同步环引出部位	1/20	10	运 维 工 作 人 员	100	100.8	19.84	10.00

46	3	会议室	Gantry 治疗室	1/2	10	医护人员	100	35	5.71	5.71
①	-1	2#治疗室	1#治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
②		1#治疗室	2#治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
③		3#治疗室	2#治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
④		2#治疗室	3#治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
⑤		4#治疗室	3#治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
⑥		3#治疗室	4#治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
⑦		Gantry 治疗室	4#治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
⑧		4#治疗室	Gantry 治疗室	1/2	10	医护人员	100	7	28.57	10.00
A	屋面	1#治疗室上方屋面	1#治疗室	不上人	2.5	-	-	-	-	2.50

B	2#治疗室上方屋面	2#治疗室		100					100
C	3#治疗室上方屋面	3#治疗室		100					100
D	4#治疗室上方屋面	4#治疗室		100					100
E	Gantry 治疗室上方屋面	Gantry 治疗室	1/20	-	工作人员	-	-	-	-

1.4.3 放射性污染物排放标准

放射性废水的排放执行《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)表1中限值(总 β 放射性浓度不大于10Bq/L)或《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)8.6.2的要求排放。

1.4.4 非放射性环境质量和污染物排放标准

1.4.4.1 非放射性环境质量标准

(1) 环境空气质量标准

执行《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准。

(2) 地表水环境质量标准

本项目所在地附近没有成型的地表淡水体系。莆田市港城新区污水处理厂所在区域纳污水体为湄洲湾,海水环境质量应执行《海水水质标准》(GB3097-1997)中II类标准。(3) 声环境质量标准

执行《声环境质量标准》(GB3096-2008)1类标准;临湄头东路和学府路一侧厂界声环境执行《声环境质量标准》(GB3096-2008)4a类标准。

1.4.4.2 非放射性污染物排放标准

(1) 大气污染物排放标准

项目运营期废气排放执行《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)二级标准。

(2) 水污染物排放标准

项目运营期生活污水、洗涤废水、医疗废水等一起先经化粪池(自建医院专用)处理后再经自建污水处理站处理达标后,排入市政污水管网,纳入港城污水处理厂集中处理达标后排放,废水排放执行《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)中的“预处理标准”,其

中氨氮执行《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T 31962-2015）表 1 中 B 级标准（氨氮 \leq 45mg/L）。

(3) 环境噪声排放标准

项目运营期厂界环境噪声排放执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）1 类标准，临湄头东路和学府路一侧厂界噪声排放执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）4a 类标准。

(4) 固体废物

医疗废物属于危险废物，在医院暂时贮存期间执行《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2001）（医院产生的临床废物，必须当日消毒，消毒后装入容器。常温下贮存期不得超过 1d，于 5°C 以下冷藏的，不得超过 7d），并应符合《医疗废物管理条例》和《医疗卫生机构医疗废物管理办法》的相关规定。不属于危险废物的一般固体废物处置执行《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》（GB18599-2001）及 2013 年修改单。

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

参照 HJ10.1-2016《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》中有关“Ⅰ类射线装置”项目评价范围的相关要求，“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”，“对于”“Ⅰ类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”。故本项目辐射环境影响评价范围为以重离子治疗加速器机房所在场所实体屏蔽物边界外 100m 的区域。

1.5.2 控制与保护目标

本项目辐射环境影响评价的范围确定为以重离子治疗加速器机房所在场所实体屏蔽物边界外 100m 的区域。

根据项目拟建场址所在环境现状，在评价范围区域内，除医院的相关设施外，主要为铁灶村社区 1 块居民聚居地和北侧的伦琴医学影像诊断中心。据此确定本项目辐射环境影响保护目标为辐射工作人员（职业照射）和评价范围内的公众，辐射工作人员所受的职业照射剂量应不大于 5mSv/a，公众所受照射剂量应不大于 0.1mSv/a。

与污染源项相应的环境保护目标情况详见表 1.5-1。

表 1.5-1 项目环境保护目标

辐射工作场所	方位	周围场所名称	照射类别	与屏蔽体边界最近距离 (m)	对象	规模 (人)
重离子加速器装置场所	E	等候室 1	公众	8.4	流动人员	-
	E	等候室 2	公众	17.6	流动人员	-
	E	前台	职业	9.8	医护人员	-
	E	咨询	职业	18.8	医护人员	-
	S	中央控制室	职业	7.7	运维工作人员	-
	E	护士站	职业	7	医护人员	-
	E	等候室 3	公众	11.4	流动人员	-
	E	接待室	职业	0.3	医护人员	-
	E	运维办公室	职业	4.4	运维工作人员	-
	E	护士办公室	职业	1.8	医护人员	-
	E	Gantry 等候区	公众	0.3	流动人员	-
	E	诊室 2	职业	0.3	医护人员	-
	E	医护更衣室 1	职业	0.3	医护人员	-
	E	医护更衣室 2	职业	0.3	医护人员	-
	E	诊室 1	职业	0.3	医护人员	-
	E	诊室 3	职业	0.3	医护人员	-
	E	诊室 4	职业	0.3	医护人员	-
	E	诊室 5	职业	8.5	医护人员	-
	E	诊室 6	职业	8.5	医护人员	-
	E	诊室 7	职业	8.5	医护人员	-
	E	诊室 8	职业	8.5	医护人员	-
	E	重离子工艺变配电房	职业	0.3	运维工作人员	-
	E	会议室	职业	1.7	医护人员	-
	NW	铁灶村社区	公众	27	居民	97
	N	伦琴医学影像诊断中心	公众	15	流动人员	约 100
E	硼中子治疗中心	公众	25	流动人员	约 15	

第二章 自然环境状况

2.1 自然环境状况

妈祖重离子医院位于福建省莆田市湄洲湾北岸经济开发区山亭镇，中心点经纬度为 25°08′ 48.99″ N，119°06′ 29.55″ E。

莆田市湄洲湾北岸经济开发区位于福建省中部和东南沿海突出部，东南濒临台湾海峡，与台湾省隔海相望，北接莆田市秀屿组团和东峤组团，东、南、西三面环海。项目靠近著名的湄洲湾、平海湾，港口现已建设初具规模的东吴港区。1999 年 12 月国务院批准东吴港区、湄洲湾港区对外轮开放的一类口岸。

本项目所在地北侧为妈祖国际健康城启动区地块 B 伦琴医学影像诊断中心的 6#住院楼、7#共享医技中心，南侧为东吴大道，东侧为荔港大道，西侧为园区规划道路，项目地理位置见附图 1，项目拟建地周边环境及敏感目标图见附图 2。

2.1.1 地形、地貌

湄洲湾北岸经济开发区地处东南沿海丘陵地带，海拔高程为 0~398.4m，地貌类型以丘陵、台地为主，相对高程较小，地面坡度大多较平缓，地质环境条件良好，地质灾害点较少。本区花岗岩类岩石分布广泛，风化强烈，形成的残坡积层厚度大，结构松散；沿海剥蚀残丘多，形成高陡边坡。

湄洲湾周围陆地为低山丘陵红土地，地势西北高、东南低，呈波状起伏，自西向东呈阶梯状下降。湄洲湾海岸属基岩海岸，湾内岸线曲折，众多半岛岬角和大小岛屿上分布有海蚀崖、海蚀平台等海蚀地貌。

2.1.2 地质、地震

湄洲湾地处戴云山隆起带和台湾海峡沉降带之间的过渡带,东北向、西北向和东西向构造成为本区的构造骨架。构造以断裂为主,上述几个不同方向的断裂带把湄洲湾及其临近地区分成许多大小不同的断块。湄洲湾沿岸没有较大的河流汇入,湾内水流以潮流为主。构造断裂和强大的潮流作用形成湄洲湾岬角岛礁、潮滩和潮流深槽的现代地形的基本轮廓。

湄洲湾突出的半岛岬角间形成湾澳,湾澳内发育潮间浅滩和水下浅滩。湾口剑屿—斗尾之间的湾澳仅在该湾顶发育狭长浅滩,宽 300 余 m。湄洲湾中部山腰沃为口内最大湾澳,纵深 16.5km,浅滩宽阔平缓,最宽处可达 10km,坡度 1‰~2‰,滩面由淤泥或粉砂质淤泥组成。从湾口至湾顶,浅滩范围越来越接近其两侧岬角的连线,反映出潮流动力由湾口向湾顶减弱,淤积作用增强。

拟建区域位于长乐—南澳深大断裂北段,漳平—莆田东西向构造带横亘于(湄洲)湾顶部位,构造以断裂为主,褶皱不发育,区内主要为岱前山—东白山断裂,走向北东,局部发育有东西向和北西向低级序断裂(现大部分为第四系地层和海上覆盖)。受大断裂影响,沿该深大断裂带两侧出现一套变质火山岩系。其岩性主要为灰白-肉红色混合二长花岗岩、均质混合岩及混合花岗岩、混合花岗闪长岩及凝灰熔岩等。

本项目拟建地地形较为开阔,场地现状地形较平坦,场地周边有道路与外界相通,交通条件较好。根据区域地质资料,该场地附近无断裂构造通过,未发现可能发生滑坡、崩塌、岩溶、泥石流、地陷、地裂、断裂带等影响场地稳定的不良地质,未发现防空洞、洞穴、孤石等对工程不利的不明埋藏物、场地基岩不存在空穴、临空面、破碎岩体或软弱夹岩。

历史上在该湾内虽无地震发生，但临近海域常有中强地震发生，对本区有一定影响。1918年2月13日南澳发生7.25级(X度)地震，对本区造成一定的破坏性影响；1922年2月29日平潭海外发生震级为6级的地震，也波及本区；自1970年有仪器记录以来，周围地区经常出现小震活动，属于小震活动频率较高的地区之一，但强度不大，最大震级为2.6级。依据国标《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)，拟建场地抗震设防烈度为7度，设计基本地震加速度值为0.10g，设计地震分组为第三组。

2.1.3 土壤

本场地内地层结构自上而下依次为：①素填土、②粉质粘土、③残积砂质粘性土、④全风化花岗岩、⑤砂土状风化花岗岩、⑥碎块状强风化花岗岩及⑦中风化花岗岩。现将各岩土层的岩性特征分述如下：

①素填土(Q4ml)：黄褐、灰褐色，稍湿~湿，呈松散状态，成份主要为坡残积粘性土及多量的风化碎石块，硬质物的粒径一般为5~30cm，个别大于50cm，均匀性差。

②粉质粘土(Q4dl)：灰白，灰黄色，湿，呈可塑状态，成份为粘性土及多量的石英中细砂颗粒。干强度中等，韧性中等，无摇振反应，光泽反应稍有光泽。该土层在场地内均有分布。

③残积砂质粘性土(Qe1)：黄褐、黄白色，稍湿~湿，呈可塑至硬塑状态。成份由粘性土及石英中细砂粒组成。组织结构全部破坏，已风化成土状，干钻易钻进，系花岗岩风化残积而成，遇水易软化和崩解，干强度中等，韧性中等，光泽反应稍有光泽。该土层在场地内均有分布。

④全风化花岗岩(γ 53)：黄白色，中粗粒结构，散体状构造，主要矿物成分为石英、长石，组织结构已基本破坏，但尚可辨认，岩芯为土状，长石矿物已完全粘性土化，遇水较易软化、崩解，岩体完整

程度为极破碎，岩石坚硬程度为极软岩，岩体基本质量等级为V级。该岩层在场地内均有分布。无洞穴、临空面和软弱夹层。

⑤砂土状强风化花岗岩 ($\gamma 53$): 黄褐、黄白色，中粗粒结构，散体状构造。主要矿物成分为石英、长石，岩芯呈砂土状，遇水可崩解和软化。风化裂隙很发育，裂隙面多以次生矿物及铁质氧化物所充填。岩体完整程度为极破碎，属于极软岩，岩体基本质量等级为V级。该岩层在场地内均有分布，未发现有洞穴、临空面及软弱夹层。

⑥碎块状强风化花岗岩 ($\gamma 53$): 黄褐、黄白色，中粗粒结构，碎裂状构造。主要矿物成分为石英、长石，岩芯呈碎块状，遇水可崩解和软化。风化裂隙很发育，裂隙面多以次生矿物及铁质氧化物所充填。岩体完整程度为破碎，属于软岩，岩体基本质量等级为V级。该岩层在场地内均有分布，未发现有洞穴、临空面及软弱夹层。

⑦中风化花岗岩 ($\gamma 53$): 黄白、灰白色，中粗粒结构，块状构造，主要矿物成分为石英、长石。岩芯呈短柱状，见有一至两组与岩芯轴夹角 $50\sim 60^\circ$ 的裂隙，裂隙面略有风化，裂隙稍有发育，为较硬岩~坚硬岩，RQD 值大于 60，岩体完整程度为较完整，岩体基本质量等级为III级。该岩层在场地内均有分布，未发现有洞穴、临空面、软弱岩层或破碎岩体。

2.1.4 水文

项目周边水域为湄洲湾。湄洲湾是一个深入内陆的半封闭狭长海湾，南北长 33km，东西宽 30km。港湾水域面积 516km^2 ，其中平均低潮位以下的水域面积超过 374km^2 。纳潮量达 $2.423\times 10^9\text{m}^3$ ，且退潮速度大于涨潮速度，自净能力强。

湄洲湾属于亚热带海洋性气候，湾内无大河流入，流入湾内年径流量约 $3.77\times 10^8\text{m}^3$ ，与潮流量相比，径流量所占的比重极微，海水 中含沙量低，平均含沙量 $0.012\sim 0.02\text{kg/m}^3$ ，是不冻不淤的清水港。

湄洲湾岸线总长 289km，其中泉州市辖区海岸线 162km，莆田市辖区内岸线 127km，其中规划港口及临港工业岸线 134km，城市生活旅游岸线 83.3km，湾内水域面积 516km²。北岸的秀屿，水深 10~16m，南岸水深 10~20m。

2.1.5 气象

根据湄洲湾北岸经济开发区气象站历年气象统计资料分析，本项目所在区域气象特征大体如下：

①气温：常年平均气温 19.9℃，历年最高气温 37.9℃，最低气温 0.7℃。

②湿度：受海洋湿空气影响，空气中平均水汽密度较大，平均湿度差异较小，多年平均相对湿度在 70~80%，五、六月份最高达 80% 以上，十至十二月最低。

③降水：湄洲湾北岸经济开发区降水量偏少，年均在 1000~1200mm 之间，平均降水日数小于 110 日。降水主要分布在春、夏两季，以春雨、梅雨和台风雨为最多，秋冬雨量最小。

④风：湄洲湾北岸经济开发区平均风速大，多年平均风速达 2.9m/s，大风日多，小风、静风日少，受季节影响明显。年主导风向为东北风，受西南季风的影响，夏季为偏南风或西南风。

2.2 社会经济状况

2.2.1 莆田市秀屿区社会环境概况

莆田市现辖一县四区两个管委会（仙游县、荔城区、城厢区、涵江区、秀屿区、湄洲岛管委会、湄洲湾北岸管委会），陆域面积 4200km²，海域面积 11000km²，人口 343 万。莆田市地处福建省沿海中部，北连省会城市福州，南接历史名城泉州，西依戴云山，东南濒临台湾海峡，与台湾隔海相望，与台中市距离仅 72 海里。妈祖文化独特，是“海

上和平女神”妈祖圣地。基础设施完善，拥有湄洲湾深水良港，可建万吨级以上泊位 150 多个，已建成 49 个深水泊位；福厦铁路、向莆铁路贯穿全境，湄洲湾港口铁路支线投入使用；福厦高速、沈海复线、莆永高速、湄渝高速形成“两纵两横”格局。主城区拥有 65 km² 城市生态绿心、6 万亩的荔枝林带，森林覆盖率达 59.8%，城市内河水系发达。莆商在全国及旅外经商从业者约 220 万人，其中海外侨胞约 150 万人，分布在 85 个国家和地区；在国内大约占民营医疗行业的 85%、木材市场近 70%、金银珠宝行业的 60%、油画出口行业的 33%。

2019 年，莆田市实现地区生产总值可比增长 7.4%，增幅比全国高 1.3 个百分点，以第四次全国经济普查总量为基数，全市地区生产总值总量 2595.39 亿元，其中：第一产业增加值 123.65 亿元，增长 2.8%；第二产业增加值 1377.98 亿元，增长 7.5%；第三产业增加值 1093.76 亿元，增长 7.8%。三次产业增加值占地区生产总值的比重，第一产业为 4.8%，第二产业为 53.1%，第三产业为 42.1%。全年人均地区生产总值 89342 元，比上年增长 6.4%。

2.2.2 湄洲湾北岸经济开发区社会环境概况

湄洲湾北岸经济开发区于 1996 年经福建省人民政府批准设立，2002 年莆田市行政区划调整时改设秀屿区，2007 年 3 月经国家发改委、国土资源部、建设部等部门核准保留为省级开发区。为加快湄洲湾北岸的开发建设，莆田市委、市政府于 2007 年 4 月 29 日调整北岸开发区管辖区域并重新挂牌，主要任务是以妈祖城开发来推进滨海新城建设，以发展临港产业来促进港城崛起。

(1) 行政区划与人口

湄洲湾北岸经济开发区北岸管委会拥有 87km 海岸线和 40 多 km² 的浅海面积，辖忠门、山亭、东埔镇三个镇 38 个行政村，总人口 16.7 万人。

(2)经济状况

2015 年实现北岸生产总值 555.72 亿元，其中，第一产业 85.7 亿元；第二产业 311.14 亿元；第三产业 158.875 亿元，人均年生产总值为 91101 元。

2.3 环境质量和辐射现状

2.3.1 辐射环境质量现状

为了解掌握本项目所在区域的辐射环境质量现状，项目建设单位福建中科核医学科技有限公司委托湖北省核工业放射性核素检测实验中心于 2020 年 10 月 13 日对拟建场址进行了辐射环境监测，并出具了监测报告。为进一步了解掌握本项目所在区域的辐射环境质量现状，项目建设单位福建中科核医学科技有限公司委托苏州热工研究院有限公司于 2022 年 1 月 23 日对拟建场址进行了辐射环境监测，并出具了监测报告。

2.3.1.1 监测方案

(1)X- γ 辐射剂量率水平

监测方法：《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》(GB/T14583-1993)；

监测日期：2020 年 10 月 13 日；

监测仪器：6150AD-b/H 型 X- γ 辐射剂量率仪；

监测点位：本次监测设 X- γ 辐射剂量监测点位 21 个，具体监测点位描述见表 2.3-1；

表 2.3-1 本项目 X-γ辐射剂量率监测点位

点位编号	位置描述
1	装置位置
2	装置所在位置南侧 50m
3	装置所在位置东侧 50m
4	装置所在位置北侧 50m
5	装置所在位置南侧 100m
6	装置所在位置东侧 100m
7	装置所在位置北侧 100m
8	环境敏感点 1*
9	环境敏感点 2*
10	环境敏感点 3*
11	环境敏感点 4*
12	环境敏感点 5*
13	环境敏感点 6*
14	环境敏感点 7*
15	环境敏感点 8*
16	环境敏感点 9*
17	环境敏感点 10*
18	环境敏感点 11*
19	环境敏感点 12*
20	环境敏感点 13*
21	环境敏感点 14*

(2)中子剂量当量率

监测方法：《辐射防护仪中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T 14318-2008）；

监测日期：2020 年 10 月 13 日；

监测仪器：TPS-451C 型中子剂量率仪；

监测点位：本次监测设中子剂量当量率监测点位 2 个，具体监测点位描述见表 2.3-2；

表 2.3-2 本项目中子剂量率监测点位

点位编号	检测地点	位置描述
1	福建中科核医学科技有限公司妈	装置位置
12	祖重离子医院场址及周边	环境敏感点 5(监测点位图 1 中点位编号 12)

(3)气溶胶中的总 β

监测方法：《水中总 β 放射性测定蒸发法》(EJ/T 900-94)；

采样日期：2020 年 10 月 13 日；

监测仪器：MPC9604 型低本底 α 、 β 测量仪；

采样监测点位：本次监测设气溶胶中的总 β 采样监测点位 5 个，具体采样监测点位描述见表 2.3-3；

表 2.3-3 本项目气溶胶中的总 β 监测点位

序号	采样监测点位名称
1	装置位置（监测点位图中点位编号 1）
2	装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 处，常年主导风向上风向
3	装置所在场所实体屏蔽边界外 100m 处，常年主导风向下风向
4	环境敏感点 4（监测点位图 1 中点位编号 11，山亭镇铁灶村 88-1）
5	环境敏感点 6（监测点位图 1 中点位编号 13，山亭镇铁灶村 1-1）

(4)土壤中的总 β

监测方法：《水中总 β 放射性测定蒸发法》(EJ/T 900-94)；

采样日期：2020 年 10 月 13 日；

监测仪器：MPC9604 型低本底 α 、 β 测量仪；

采样监测点位：本次监测设土壤中的总 β 采样监测点位 5 个，具体采样监测点位描述见表 2.3-4；

表 2.3-4 本项目土壤中的总 β 监测点位

序号	采样地点
1	装置位置（监测点位图中点位编号 1）
2	装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 处，常年主导风向上风向
3	装置所在场所实体屏蔽边界外 100m 处，常年主导风向下风向
4	环境敏感点 4（监测点位图 1 中点位编号 11，山亭镇铁灶村 88-1）
5	环境敏感点 6（监测点位图 1 中点位编号 13，山亭镇铁灶村 1-1）

(5)循环冷却水、地表水、地下水中的总 β

监测方法：《水中总 β 放射性测定蒸发法》（EJ/T 900-1994）；

采样日期：2020 年 10 月 13 日；

监测仪器：MPC9604 型低本底 α 、 β 测量仪；

采样监测点位：本项目运营期拟采用的循环冷却水为去离子水（由去离子水机生产），其水源为自来水。本次监测取自来水厂取水口、运营期放射性废水收集池中放射性废水衰变后拟排入的污水处理厂排污口、拟建重离子加速器场址地下水监测井 3 个水样样品，进行总 β 放射性活度浓度分析。具体采样监测点位描述见表 2.3-5；

表 2.3-5 本项目循环冷却水、地表水、地下水中的总 β 监测点位

序号	采样监测点位名称
1	自来水厂取水口
2	污水处理厂排污口
3	拟建重离子加速器场址地下水监测井

2.3.1.2 补充监测方案

(1)X- γ 辐射剂量率水平

监测方法：《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；

监测日期：2022 年 1 月 23 日；

监测仪器：BG9550 型 X- γ 剂量率仪；

监测点位：本次监测设 X- γ 辐射剂量监测点位 24 个，具体监测点位描述见表 2.3-6；

表 2.3-6 本项目 X-γ辐射剂量率补充监测点位

点位编号	位置描述
1	重离子治疗系统所在大楼 1 号点
2	重离子治疗系统所在大楼 2 号点
3	重离子治疗系统所在大楼 3 号点
4	重离子治疗系统所在大楼 4 号点
5	重离子治疗系统所在大楼 5 号点
6	重离子治疗系统所在大楼 6 号点
7	重离子治疗系统所在大楼 7 号点
8	重离子治疗系统所在大楼 8 号点
9	重离子治疗系统所在大楼 9 号点
10	重离子治疗系统所在大楼 10 号点
11	重离子治疗系统所在大楼 11 号点
12	重离子治疗系统所在大楼 12 号点
13	重离子治疗系统所在大楼 13 号点
14	重离子治疗系统所在大楼 14 号点
15	重离子治疗系统所在大楼 15 号点
16	大楼北侧（院区内）
17	大楼东侧
18	大楼南侧（院区内）
19	大楼西侧（院区内）
20	院区北侧外花坛
21	院区东侧外花坛
22	院区南侧外花坛
23	院区西侧居民区
24	院区北侧伦琴医院

(2)空气中的 ^3H

监测方法：《水中氚的分析方法》（HJ1126-2020）；

采样日期：2022 年 1 月 22 日~2 月 9 日；

监测仪器：Quantulus1220 型超低本底液体闪烁谱仪；

采样监测点位：本次监测设空气中的 ^3H 采样监测点位 3 个，具体采样监测点位描述见表 2.3-7；

表 2.3-7 本项目空气中的 ^3H 补充监测点位

序号	采样监测点位名称
1	重离子大楼
2	院区西侧居民区
3	院区西侧居民区（平行样）

(3)气溶胶中的 γ 能谱

监测方法：《空气中放射性核素的 γ 能谱分析方法》（WS/T184-2017）；

采样日期：2020 年 1 月 22 日~2 月 16 日；

监测仪器：GMX50P4-83 型高纯锗谱仪；

采样监测点位：本次监测设气溶胶中的 γ 能谱采样监测点位 3 个，具体采样监测点位描述见表 2.3-8；

表 2.3-8 本项目气溶胶中的 γ 能谱补充监测点位

序号	采样监测点位名称
1	重离子大楼
2	院区西侧居民区
3	院区西侧居民区（复测样）

(4)土壤中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱

监测方法：《氢-3 分析方法》（EMC-H3-01）、《环境中放射性核素测量 土壤 第六部分：总 α 和总 β 活度测定》（ISO18589-6-2019）、《土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法》（GB/T11743-2013）；

采样日期：2022 年 1 月 21 日；

监测仪器：Quantulus1220 型超低本底液体闪烁谱仪、MPC9604 型低本底 α 、 β 测量仪、GMX50P4-83 型高纯锗谱仪；

采样监测点位：本次监测设土壤中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱采样监测点位 6 个，具体采样监测点位描述见表 2.3-9；

表 2.3-9 本项目土壤中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱补充监测点位

序号	采样地点
1	院区北侧外花坛
2	院区西侧居民区菜地
3	院区南侧外花坛
4	院区南侧外花坛（平行样）
5	院区东侧外花坛
6	院区北侧伦琴医院

(5)地表水、地下水中的 ^3H 、 γ 能谱

监测方法：《水中氚的分析方法》（HJ1126-2020）、《水中放射性核素的 γ 能谱分析方法》（GB/T16140-2018）；

采样日期：2022 年 1 月 21 日~1 月 22 日；

监测仪器：Quantulus1220 型超低本底液体闪烁谱仪、GEM50P4-83 型高纯锗谱仪；

采样监测点位：本项目运营期拟采用的循环冷却水为去离子水（由去离子水机生产），其水源为自来水，不适合作为样品进行 ^3H 、 γ 能谱监测。本次监测取运营期放射性废水收集池中放射性废水衰变后拟排入的污水处理厂排污口、拟建重离子加速器场址地下水监测井 2 个水样样品，进行 ^3H 、 γ 能谱分析。具体采样监测点位描述见表 2.3-10；

表 2.3-10 本项目地表水、地下水中的 ^3H 、 γ 能谱补充监测点位

序号	采样监测点位名称
1	院区监测井
2	港城新区污水处理厂排污口

(6)生物中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱

监测方法：《氢-3 分析方法》（EMC-H3-02）、《水质 总 β 放射性的测定 厚源法》（HJ899-2017）、《生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法》（GB/T 16145-2020）；

采样日期：2022 年 1 月 23 日；

监测仪器：Quantulus1220 型超低本底液体闪烁谱仪、BH1227 型低本底 α 、 β 测量仪、GMX50P4-83 型高纯锗谱仪；

其中生物中总 β 由中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室测量，CMA 证书编号：170012184003。

采样监测点位：本次监测设生物中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱采样监测点位 1 个，具体采样监测点位描述见表 2.3-11；

表 2.3-11 本项目生物中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱补充监测点位

序号	采样监测点位名称
1	院区西侧居民区包菜

2.3.1.3 监测结果

(1) X- γ 辐射剂量率

本项目拟建辐射工作场址周围 X- γ 辐射剂量率水平监测结果见表 2.3-12 和表 2.3-13。

表 2.3-12 本项目 X-γ辐射剂量率监测结果

点位 编号	位置描述	检测结果 (μ Gy/h)	不确定度 k=2 (μ Gy/h)	备注 (地面类型)
1	装置位置	0.109	0.008	土壤
2	装置所在位置南侧 50m	0.124	0.008	水泥地
3	装置所在位置东侧 50m	0.103	0.007	土壤
4	装置所在位置北侧 50m	0.164	0.011	水泥地
5	装置所在位置南侧 100m	0.093	0.006	土壤
6	装置所在位置东侧 100m	0.101	0.007	土壤
7	装置所在位置北侧 100m	0.122	0.008	水泥地
8	环境敏感点 1*	0.114	0.008	水泥地
9	环境敏感点 2*	0.110	0.008	水泥地
10	环境敏感点 3*	0.123	0.008	水泥地
11	环境敏感点 4*	0.133	0.009	水泥地
12	环境敏感点 5*	0.143	0.010	水泥地
13	环境敏感点 6*	0.144	0.010	水泥地
14	环境敏感点 7*	0.124	0.009	水泥地
15	环境敏感点 8*	0.134	0.009	水泥地
16	环境敏感点 9*	0.110	0.008	水泥地
17	环境敏感点 10*	0.123	0.008	水泥地
18	环境敏感点 11*	0.132	0.009	水泥地
19	环境敏感点 12*	0.163	0.011	水泥地
20	环境敏感点 13*	0.151	0.010	水泥地
21	环境敏感点 14*	0.155	0.011	水泥地

*注：环境敏感点 1-14 均位于铁灶村社区。

表 2.3-13 本项目 X-γ辐射剂量率补充监测结果

点位编号	位置描述	空气吸收剂量率 (μGy/h)	标准偏差 (μGy/h)
1	重离子治疗系统所在大楼 1 号点	0.117	0.001
2	重离子治疗系统所在大楼 2 号点	0.116	0.002
3	重离子治疗系统所在大楼 3 号点	0.120	0.002
4	重离子治疗系统所在大楼 4 号点	0.119	0.002
5	重离子治疗系统所在大楼 5 号点	0.114	0.001
6	重离子治疗系统所在大楼 6 号点	0.114	0.001
7	重离子治疗系统所在大楼 7 号点	0.116	0.001
8	重离子治疗系统所在大楼 8 号点	0.111	0.002
9	重离子治疗系统所在大楼 9 号点	0.110	0.001
10	重离子治疗系统所在大楼 10 号点	0.111	0.001
11	重离子治疗系统所在大楼 11 号点	0.110	0.001
12	重离子治疗系统所在大楼 12 号点	0.121	0.001
13	重离子治疗系统所在大楼 13 号点	0.113	0.001
14	重离子治疗系统所在大楼 14 号点	0.118	0.002
15	重离子治疗系统所在大楼 15 号点	0.117	0.001
16	大楼北侧 (院区)	0.103	0.001
17	大楼东侧	0.099	0.001
18	大楼南侧 (院区)	0.102	0.002
19	大楼西侧 (院区)	0.097	0.003
20	院区北侧外花坛	0.115	0.001
21	院区东侧外花坛	0.101	0.002
22	院区南侧外花坛	0.088	0.001
23	院区西侧居民区	0.105	0.001
24	院区北侧伦琴医院	0.091	0.001

由表 2.3-12 和表 2.3-13 可知, 本项目拟建辐射工作场址周围各

监测点处 X- γ 辐射剂量率为 0.088 μ Gy/h~0.164 μ Gy/h，与《2019 年全国辐射环境质量报告》中福建省的 4 个自动站的空气吸收剂量率 75.6nGy/h~201.4nGy/h、《2020 年全国辐射环境质量报告》中福建省的 4 个自动站的空气吸收剂量率 84.9nGy/h~113.2nGy/h 相比，在天然本底涨落范围内。

(2)中子剂量当量率

本项目拟建场址及周围环境 neutron 剂量率监测结果见表 2.3-14。

表 2.3-14 本项目中子剂量率监测结果

点位编号	检测地点	位置描述	监测结果 (μ Sv/h)
1	福建中科核医学科技有限公司 妈祖重离子医院场址及周边	装置位置	小于探测下限
12		环境敏感点 5 (监测点位图 1 中 点位编号 12)	小于探测下限

由表 2.3-14 可知，妈祖重离子医院重离子治疗系统项目拟建场址、环境敏感点中子剂量率均小于探测下限。

(3)气溶胶中的总 β 、 γ 能谱

本项目拟建辐射工作场址周围气溶胶中的总 β 监测分析结果见表 2.3-15，气溶胶中的 γ 能谱补充监测分析结果见表 2.3-16。

表 2.3-15 本项目气溶胶中的总 β 监测分析结果 单位: Bq/m³

序号	采样监测点位名称	总 β
1	装置位置 (监测点位图中点位编号 1)	2.72 \times 10 ⁻³
2	装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 处, 常年主导风向上风向	3.60 \times 10 ⁻³
3	装置所在场所实体屏蔽边界外 100m 处, 常年主导风向下风向	5.61 \times 10 ⁻³
4	环境敏感点 4 (监测点位图 1 中点位编号 11, 山亭镇铁灶村 88-1)	3.78 \times 10 ⁻³
5	环境敏感点 6 (监测点位图 1 中点位编号 13, 山亭镇铁灶村 1-1)	3.72 \times 10 ⁻³

表 2.3-16 本项目气溶胶中的 γ 能谱补充监测分析结果 单位: mBq/m^3

序号	采样监测点位名称	γ 核素					
		Be-7	Ar-41	U-238	Th-232	Ra-226	K-40
1	重离子大楼	2.16 ± 0.11	< 0.011	< 0.19	< 0.013	< 0.028	< 0.19
2	院区西侧居民区	2.19 ± 0.11	< 0.010	< 0.19	< 0.014	< 0.027	< 0.19
3	院区西侧居民区 (复测样)	2.17 ± 0.11	< 0.010	< 0.19	< 0.013	< 0.026	< 0.20

由表 2.3-15 可知,妈祖重离子医院重离子治疗系统项目拟建场址、敏感点气溶胶中总 β 放射性活度浓度为 $2.72 \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3 \sim 5.61 \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$ 。

由表 2.3-16 可知, γ 能谱中 ^7Be 放射性活度浓度为 $(2.16 \pm 0.11 \sim 2.19 \pm 0.11) \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$, 与《2020 年全国辐射环境质量报告》中福建省气溶胶中 ^7Be 监测结果 $(0.54 \sim 9.4) \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$ 相比,在天然本底涨落范围内; γ 能谱中 ^{40}K 放射性活度浓度为 $< (1.9 \sim 2.0) \times 10^{-4} \text{Bq/m}^3$, 与《2020 年全国辐射环境质量报告》中全气溶胶中 ^{40}K 监测结果 $(0.01 \sim 1.1) \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$ 相比,在天然本底涨落范围内; γ 能谱中 ^{41}Ar 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 放射性活度浓度分别为 $< (1.0 \sim 1.1) \times 10^{-5} \text{Bq/m}^3$ 、 $< 1.9 \times 10^{-4} \text{Bq/m}^3$ 、 $< (1.3 \sim 1.4) \times 10^{-5} \text{Bq/m}^3$ 、 $< (2.6 \sim 2.8) \times 10^{-5} \text{Bq/m}^3$ 。

(4)空气中的 ^3H

本项目拟建辐射工作场址周围空气中的 ^3H 补充监测分析结果见

表 2.3-17。

表 2.3-17 本项目空气中的 ^3H 补充监测分析结果

序号	采样监测点位名称	^3H	
		Bq/L 水	mBq/m ³
1	重离子大楼	<1.06	<9.83
2	院区西侧居民区	<1.06	<7.25
3	院区西侧居民区（平行样）	<1.06	<7.25

由表 2.3-17 可知，妈祖重离子医院重离子治疗系统项目拟建场址、敏感点空气中的 ^3H 放射性活度浓度为 <1.06Bq/L 水、<(7.25~9.83) $\times 10^{-3}\text{Bq/m}^3$ ，与《2020 年全国辐射环境质量报告》中全国空气中的 ^3H 监测结果 <(0.49~12) Bq/L 水、<(8.2~37) $\times 10^{-3}\text{Bq/m}^3$ 相比，未见异常。

(5)土壤中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱

本项目拟建辐射工作场址周围土壤中的总 β 监测分析结果见表 2.3-18，土壤中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱补充监测分析结果见表表 2.3-19。

表 2.3-18 本项目土壤中的总 β 监测分析结果

单位：Bq/kg·干

序号	采样地点	总 β
1	装置位置（监测点位图中点位编号 1）	564
2	装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 处，常年主导风向上风向	884
3	装置所在场所实体屏蔽边界外 100m 处，常年主导风向下风向	798
4	环境敏感点 4（监测点位图 1 中点位编号 11，山亭镇铁灶村 88-1）	831
5	环境敏感点 6（监测点位图 1 中点位编号 13，山亭镇铁灶村 1-1）	753

表 2.3-19 本项目土壤中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱补充监测分析结果

序号	采样地点	^3H		总 β	γ 核素 (Bq/kg·干)				
		Bq/L 水	mBq/m ³	Bq/kg·鲜	U-238	Th-232	Ra-226	K-40	Be-7
1	院区 北侧 外花 坛	<1.06	<0.149	-	58± 13	75.5± 2.0	34.9±1.3	349±10	<4.9
2	院区 西侧 居民 区菜 地	<1.06	<0.156	-	32± 11	46.7± 1.7	23.1±1.1	649±12	6.2±2.7
3	院区 南侧 外花 坛	<1.06	<0.149	1.062± 0.038	41± 12	64.3±2.0	29.6±1.3	754±14	<5.1
4	院区 南侧 外花 坛 (平 行 样)	-	-	1.044± 0.038	40± 12	63.7±2.0	29.4±1.3	772±14	<5.0
5	院区 东侧 外花 坛	<1.06	<0.137	0.859± 0.034	29± 12	55.5±1.8	26.8±1.2	618±12	5.0±2.8
6	院区 北侧 伦琴 医院	<1.06	<0.140	0.822± 0.034	58± 13	75.5±2.0	34.9±1.3	349±10	<4.9

由表 2.3-18 和表 2.3-19 可知, 妈祖重离子医院重离子治疗系统项目拟建场址周边及环境敏感点土壤中总 β 放射性活度浓度为 564Bq/kg·干~884Bq/kg·干, (0.822±0.034~1.062±0.038)Bq/kg·鲜。

由表 2.3-19 可知, 妈祖重离子医院重离子治疗系统项目拟建场址周边及环境敏感点土壤中的 ^3H 放射性活度浓度为 <1.06Bq/L 水、<(1.37~1.56) × 10⁻⁴Bq/m³。

由表 2.3-19 可知,妈祖重离子医院重离子治疗系统项目拟建场址周边及环境敏感点土壤 γ 能谱中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 放射性活度浓度分别为 $(29\pm 12\sim 58\pm 13)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$ 、 $(46.7\pm 1.7\sim 75.5\pm 2.0)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$ 、 $(23.1\pm 1.1\sim 34.9\pm 1.3)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$,与《2020 年全国辐射环境质量报告》中福建省土壤中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 监测结果 $(34\sim 127)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$ 、 $(34\sim 127)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$ 、 $(44\sim 112)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$ 相比,在天然本底涨落范围内; γ 能谱中 ^{40}K 、 ^7Be 放射性活度浓度分别为 $(349\pm 10\sim 772\pm 14)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$ 、 $(<4.9\sim 6.2\pm 2.7)\text{Bq/kg}\cdot\text{干}$ 。

(5)循环冷却水中的总 β 、地表水、地下水中的总 β 、 ^3H 、 γ 能谱

本项目拟建辐射工作场址周围循环冷却水、地表水、地下水中的总 β 监测分析结果见表 2.3-20,地表水、地下水中的 ^3H 、 γ 能谱监测分析结果见表 2.3-21。

表 2.3-20 本项目循环冷却水、地表水、地下水中的总 β 监测分析结果 单位: Bq/L

序号	采样监测点位名称	总 β 分析结果
1	自来水厂取水口	0.046
2	污水处理厂排污口	2.271
3	拟建重离子加速器场址地下水监测井	0.494

表 2.3-21 本项目地表水、地下水中的 ^3H 、 γ 能谱补充监测分析结果

序号	采样监测点位名称	^3H (Bq/L)	γ 核素 (mBq/L)				
			U-238	Th-232	Ra-226	K-40	Be-7
1	院区监测井	<1.06	<185	<4.7	<10.2	2409 \pm 57	<18
2	港城新区污水处理厂排污口	<1.06	<173	<4.3	<9.0	945 \pm 40	<17

由表 2.3-20 可知,妈祖重离子医院重离子治疗系统项目运营期拟采用的循环冷却水水源自来水厂取水口的总 β 放射性活度浓度为 0.046Bq/L ,与《2020 年全国辐射环境质量报告》中福建省饮用水水源地水中总 β 活度浓度监测结果 $0.04\text{Bq/L}\sim 0.24\text{Bq/L}$ 相比,属正常环

境本底水平。本项目运营期放射性废水收集池中放射性废水衰变后拟排入的污水处理厂排污口的总 β 放射性活度浓度为 2.271Bq/L，与《2019 年全国辐射环境质量报告》中全国重点湖泊（水库）水中总 β 活度浓度监测结果 0.04Bq/L~3.5Bq/L 相比，属正常环境本底水平。拟建重离子加速器场址地下水监测井中的总 β 放射性活度浓度为 0.494Bq/L，与《2020 年全国辐射环境质量报告》中全国地下水中总 β 活度浓度监测结果 0.02Bq/L~0.56Bq/L 相比，属正常环境本底水平。

由表 2.3-21 可知，本项目运营期放射性废水收集池中放射性废水衰变后拟排入的污水处理厂排污口的 ^3H 放射性活度浓度为 < 1.06Bq/L；拟建重离子加速器场址地下水监测井中的 ^3H 放射性活度浓度为 < 1.06Bq/L。

由表 2.3-21 可知，本项目运营期放射性废水收集池中放射性废水衰变后拟排入的污水处理厂排污口的 γ 能谱中 ^{226}Ra 放射性活度浓度分别为 < $9.0 \times 10^{-3}\text{Bq/L}$ ，与《2020 年全国辐射环境质量报告》中全国重点湖泊（水库）水中 ^{226}Ra 监测结果 $(0.98\sim 16) \times 10^{-3}\text{Bq/L}$ 相比，在天然本底涨落范围内； γ 能谱中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^7Be 放射性活度浓度分别为 < $1.73 \times 10^{-1}\text{Bq/L}$ 、< $4.3 \times 10^{-3}\text{Bq/L}$ 、 $(9.45 \pm 0.4) \times 10^{-1}\text{Bq/L}$ 、< $1.7 \times 10^{-2}\text{Bq/L}$ 。拟建重离子加速器场址地下水监测井中的 γ 能谱中 ^{226}Ra 放射性活度浓度分别为 < $1.02 \times 10^{-2}\text{Bq/L}$ ，与《2020 年全国辐射环境质量报告》中全国地下水中 ^{226}Ra 监测结果 $(1.9\sim 26) \times 10^{-3}\text{Bq/L}$ 相比，在天然本底涨落范围内； γ 能谱中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^7Be 放射性活度浓度分别为 < $1.85 \times 10^{-1}\text{Bq/L}$ 、< $4.7 \times 10^{-3}\text{Bq/L}$ 、 $2.409 \pm 0.057\text{Bq/L}$ 、< $1.8 \times 10^{-2}\text{Bq/L}$ 。

(6)生物中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱

本项目拟建辐射工作场址周围的植被主要为农作物，补充监测采样时生物样为包菜。生物中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱监测分析结果见表 2.3-22。

表 2.3-22 本项目生物中的 ^3H 、总 β 、 γ 能谱补充监测点位

序号	采样监测点位名称	自由水 ^3H		有机 ^3H (OBT)		总 β Bq/L·鲜	γ 核素 (Bq/kg·鲜)				
		Bq/L·水	Bq/L·鲜	Bq/L·水	Bq/L·鲜		U-238	Th-232	Ra-226	K-40	Be-7
1	院区西侧居民区包菜	<1.06	<0.972	<1.06	<0.041	21.9±0.1	<0.031	<0.039	<0.033	2.281±0.016	<0.034

由表 2.3-22 可知,妈祖重离子医院重离子治疗系统项目拟建场址周边生物中自由水 ^3H 放射性活度浓度为<1.06Bq/L·水、<0.972Bq/L·鲜,有机 ^3H 放射性活度浓度为<1.06Bq/L·水、<0.041Bq/L·鲜,生物中总 β 放射性活度浓度为 21.9±0.1Bq/L·鲜,生物 γ 能谱中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{223}Ra 、 ^{40}K 、 ^7Be 放射性活度浓度分别为<0.031、<0.039、<0.033、2.281±0.016、<0.034Bq/L·鲜。

2.3.1.4 质量保证及质量控制

湖北省核工业放射性核素检测实验中心 (CMA 证书编号: 171720180424)、苏州热工研究院有限公司环境检测中心 (CMA 证书编号: 171012050252) 环境检测中心均建立了完善的质量管理体系,包含有相应的仪器校准、期间核查等质量保证程序,建立了完善的监测报告三级审核及质量保证体系管理文件,能保证监测报告的真实性和有效性。监测单位编制了监测项目作业指导书,监测人员均经过相关的培训,确保环境监测工作有序进行。

监测、补充监测选用的仪器，均经过检定和校准，监测仪器见表 2.3-23、表 2.3-24。

表2.3-23 监测所使用的仪器情况

仪器名称/型号	仪器编号	检定有效期至	测量范围
X-γ 辐射剂量率仪/6150AD-b/H	HJ097	2021 年 4 月 29 日	5nSv/h~999mSv/h
中子剂量率仪/TPS-451C	HJ048	2020 年 10 月 13 日	0.01 μ Sv/h~10mSv/h
低本底 α、β 测量仪/MPC9604	HJ091	2022 年 6 月 17 日	0.004Bq/L

表2.3-24 补充监测所使用的仪器情况

仪器名称/型号	检定有效期至	测量范围/性能指标
X-γ 剂量率仪/BG9550	2022 年 12 月 2 日	0.01μGy/h~40mGy/h
超低本底液体闪烁谱仪/Quantulus1220	2022 年 5 月 7 日	本底计数 < 1cpm, 效率 > 20%
低本底 α、β 测量仪/MPC9604	2024 年 1 月 3 日	本底计数率: α<0.1CPM、β<0.9CPM; 探测效率 α>40%(Am-241), β>55%(Sr-90/Y-90)
低本底 α、β 测量仪/BH1227	暂无(北京疫情)	本底计数率 α<0.05CPM、β<0.5CPM; 探测效率 α>65%(Am-241), β>35%(Sr-90/Y-90)
高纯锗谱仪/GEM50P4-83	2022 年 6 月 23 日	能量范围 10keV~10MeV; 本底计数率 2.9cps; 能量分辨率 1.9keV; 相对效率 50.02%
高纯锗谱仪/GMX50P4-83	2022 年 4 月 6 日	能量范围 3keV~10MeV; 本底计数率 2.9cps; 能量分辨率 2.0keV; 相对效率 50.0%

2.3.2 非放射性环境质量现状

非放射性环境质量现状数据来源于莆田市生态环境局公报、本项目的非放射性环境影响评价部分《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》，本报告书中仅简要叙述。

2.3.2.1 环境空气质量现状

根据莆田市生态环境局 2022 年 2 月 7 日发布《2022 年 1 月份莆田市各县区环境空气质量排名情况》(详见图 2.3-1), 北岸开发区 1 月份空气质量可达到《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 及其修改单中的二级标准, 达标率为 100%, 优良天数为 30 天, 超标天数为 0 天。具体见表 2.3-25。

表 2.3-25 莆田市北岸开发区 7 月份环境空气质量情况一览表

县区	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	达标率	天数			首要污染物
						优	良	超标	
北岸开发区	4	11	35	17	100	21	9	0	臭氧(O ₃)

根据莆田市生态环境局《2021 年莆田市环境质量状况》(详见图 2.3-2), SO₂ 年均值为 5 μg/m³, NO₂ 年均值为 15 μg/m³, PM₁₀ 年均值为 40 μg/m³, PM_{2.5} 年均值为 22 μg/m³, CO 特定百分位数平均值为 0.8mg/m³, O₃ 日特定百分位数平均值为 133 μg/m³, 6 个项目均达到《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 及其修改单中的二级标准。

由此可知项目所在评价区域为达标区。

2022年1月份莆田市各县区环境空气质量排名情况

发布时间: 2022-02-07 16:32

点击数: 85

字号: T | T

2022年1月份各县区环境空气质量按达标率、综合指数和优天数总体考核排名由好到差依次为北岸开发区、城厢区、仙游县、荔城区、涵江区和秀屿区。首要污染物除北岸开发区为臭氧(O₃)，其他区均为细颗粒物(PM_{2.5})。

排名	各县区	达标率 %	综合指数	天数			AQI范围		SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO-95per	O ₃ -8h ⁻⁹ 0per	首要 污染物
				优	良	超标	最小	最大							
1	北岸 开发区	100	2.18	21	9	0	30	70	4	11	35	17	0.8	102	臭氧(O ₃)
2	城厢区	100	2.40	25	5	0	27	100	4	15	30	26	0.8	93	细颗粒物 (PM _{2.5})
3	仙游县	100	2.42	22	9	0	20	98	4	11	42	25	0.8	90	细颗粒物 (PM _{2.5})
4	荔城区	100	2.65	20	10	0	30	93	4	21	38	27	0.8	88	细颗粒物 (PM _{2.5})
5	涵江区	100	2.71	22	7	0	32	97	6	20	35	28	0.8	97	细颗粒物 (PM _{2.5})
6	秀屿区	96.7	2.68	22	7	1	30	107	5	19	32	30	0.8	96	细颗粒物 (PM _{2.5})
	城区	100	2.63	26	5	0	28	99	5	19	34	28	0.8	93	细颗粒物 (PM _{2.5})

备注：(1) 排名原则：首先当月达标率高的排在前，其次综合指数低的排在前，最后优的天数多的排在前；(2) SO₂、NO₂、PM₁₀和PM_{2.5}为日均浓度，CO为日均值第95百分位数，O₃为日最大8小时值第90百分位数，除CO浓度指标的单位为mg/m³，其余项目浓度指标的单位均为μg/m³。(3) 本月有效监测天数仙游县为31天，荔城区、城厢区、秀屿区、北岸开发区为30天，涵江区为29天。

图 2.3-1 2022 年 1 月份莆田市各县区环境空气质量排名情况

2.3.2.2 地表水环境质量现状

根据莆田市生态环境局《2021年莆田市环境质量状况》(详见图2.3-2)。

(1) 主要流域

2021年莆田市主要流域20个断面I~III类水质比例为95.0%，水质状况优。

河流：莆田市主要河流16个断面I~III类水质比例为93.8%。其

中，木兰溪水系（10个断面）I~III类占90.0%，IV类占10.0%，水质状况优。主要污染指标为总磷和溶解氧。

闽江水系（1个断面）符合III类水质，水质状况良好。

萩芦溪水系（4个断面）符合II类水质，水质状况优。

龙江水系（1个断面）符合II类水质，水质状况优。

湖库：东圳水库、金钟水库水质均符合II类水质，水质状况优。

营养状态均为中营养。

(2)集中式生活饮用水水源地

2021年莆田市4个城市集中式生活饮用水水源地各期监测值均达标，达标率为100%，与上年持平。

综合营养状态指数：东圳水库取水口为42.1，同比上升1.7，为中营养级；外度水库取水口为44.6，同比上升0.4，为中营养级；古洋水库取水口为35.5，同比上升2.4，为中营养级；金钟水库取水口为37.6，为中营养级。

(3)小流域

2021年全市14个小流域水质监测断面I~III类水质比例为100%。各类水质比例中：II类64.3%，III类35.7%。

(4)黑臭水体

2021年6条黑臭水体水质均优于城市黑臭水体污染程度分级标准中限值要求，水质污染级别均为非黑臭，水质保持稳定。

(5)近岸海域

2021年全市22个近岸海域水质站位中，一类~二类水质比例为90.9%，同比下降4.6个百分点，整体水质良好。除兴化湾萩芦溪入口海域、兴化湾内湾三江口站位为四类水质外，其余站位均达到或优于二类海水水质。

富营养化等级评价：贫营养级比例为86.4%，同比下降4.5个百

分点；轻度富营养级比例为 9.1%，同比上升 4.5 个百分点；中度富营养级比例为 4.5%，同比上升 4.5 个百分点；重度营养级比例为 4.5%，同比下降 4.5 个百分点。

按水质功能区评价：按照参加评价的 20 个站位（泉州湾基线外海域、南日岛东基线外侧站位不参与功能区类别评价）计算，海水功能区类别水质达标率为 95.0%，同比持平。主要超标项目为无机氮。

2021年莆田市环境质量状况

发布时间：2022-01-25 11:05 点击数：193 字号：T|T

1 大气环境质量

1.1 城市环境空气质量

1.1.1 达标情况

莆田市：2021年有效监测365天，达标天数比例为98.9%，同比上升3.0个百分点。其中空气质量优、良和轻度污染天数比例分别为47.1%（同比上升2.0个百分点）、51.8%（同比上升1.0个百分点）和1.1%（同比下降3.0个百分点，均为臭氧超标）。

仙游县：2021年有效监测362天，达标天数比例为99.7%，同比下降0.3个百分点。空气质量优、良和轻度污染天数比例分别为67.1%（同比下降8.3个百分点）、32.6%（同比上升8.0个百分点）和0.3%（同比上升0.3个百分点，为臭氧超标）。

1.1.2 主要监测指标情况

莆田市：2021年二氧化硫、二氧化氮、臭氧浓度分别为5微克/立方米、15微克/立方米、133微克/立方米，同比分别下降1微克/立方米、1微克/立方米、7微克/立方米；可吸入颗粒物、细颗粒物和一氧化碳浓度分别为40微克/立方米、22微克/立方米和0.8毫克/立方米，同比均持平。6个项目均达到环境空气质量二级标准要求。全年的首要污染物中，臭氧占142天（同比减少22天），可吸入颗粒物占30天（同比增加17天），细颗粒物占24天（同比减少3天）。

仙游县：2021年二氧化氮、细颗粒物、一氧化碳、臭氧浓度分别为12微克/立方米、19微克/立方米、1.0毫克/立方米、112微克/立方米，同比分别上升1微克/立方米、2微克/立方米、0.1毫克/立方米、18微克/立方米。二氧化硫和可吸入颗粒物浓度分别为5微克/立方米和39微克/立方米，同比均持平。6个项目均达到环境空气质量二级标准要求。全年的首要污染物中，臭氧占67天（同比增加48天），可吸入颗粒物占52天（同比减少10天），细颗粒物占3天（同比减少8天）。

1.1.3 城市空气质量及县区排名

2021年莆田市环境空气质量综合指数为2.69，同比下降0.09，位列全省第六（去年第七），首要污染物为臭氧。

各县区2021年环境空气质量按达标率、综合指数、优天数总体考核排名由好到差依次为：仙游县、荔城区、秀屿区、涵江区、城厢区。

1.2 大气降水

2021年我市为非酸雨区，大气降水酸雨频率为25.8%，同比上升9.1个百分点。降水pH年均值为5.75，同比上升0.18个pH单位。降水pH值范围为4.74~8.57。

2 水环境质量

2.1 主要流域

2021年莆田市主要流域20个断面I~III类水质比例为95.0%，水质状况优。具体评价结果见表2-1。

河流：莆田市主要河流16个断面I~III类水质比例为93.8%。其中，木兰溪水系（10个断面）I~III类占90.0%，IV类占10.0%，水质状况优。主要污染指标为总磷和溶解氧。

闽江水系（1个断面）符合III类水质，水质状况良好。

萩芦溪水系（4个断面）符合II类水质，水质状况优。

龙江水系（1个断面）符合II类水质，水质状况优。

湖库：东圳水库、金钟水库水质均符合II类水质，水质状况优。营养状态均为中营养。

2.2 集中式生活饮用水水源地

2021年莆田市4个城市集中式生活饮用水水源地各期监测值均达标，达标率为100%，与上年持平。具体评价结果见表2-2。

综合营养状态指数：东圳水库取水口为42.1，同比上升1.7，为中营养级；外度水库取水口为44.6，同比上升0.4，为中营养级；古洋水库取水口为35.5，同比上升2.4，为中营养级；金钟水库取水口为37.6，为中营养级。

2.3 小流域

2021年全市14个小流域水质监测断面I~III类水质比例为100%。各类水质比例中：II类64.3%，III类35.7%。具体评价结果见表2-3。

2.4 黑臭水体

2021年6条黑臭水体水质均优于城市黑臭水体污染程度分级标准中限值要求，水质污染级别均为非黑臭，水质保持稳定。

2.5 近岸海域

2021年全市22个近岸海域水质站位中，一类~二类水质比例为90.9%，同比下降4.6个百分点，整体水质良好。除兴化湾萩芦溪入口海域、兴化湾内湾三江口站位为四类水质外，其余站位均达到或优于二类海水水质。具体评价结果见表2-4。

富营养化等级评价：贫营养级比例为86.4%，同比下降4.5个百分点；轻度富营养级比例为9.1%，同比上升4.5个百分点；中度富营养级比例为4.5%，同比上升4.5个百分点；重度富营养级比例为4.5%，同比下降4.5个百分点。

按水质功能区评价：按照参加评价的20个站位（泉州湾基线外海域、南日岛东基线外侧站位不参与功能区类别评价）计算，海水功能区类别水质达标率为95.0%，同比持平。主要超标项目为无机氮。

图 2.3-2 2021 年莆田市环境质量状况

2.3.2.3 声环境质量现状

本项目的非放射性环境影响评价部分《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》对项目所在医院的4个边界及敏感点进行了布点监测，监测频次为昼夜各1次，周期为1天。具体监测结果见表2.3-26，监测点位见图2.3-3。

表 2.3-26 噪声监测结果 单位：dB(A)

检测点位	检测日期	2020-09-15		标准值	达标情况
	主要声源	检测时间	检测结果 Leq		
厂界▲N1	环境	9:10-9:20	58	70	达标
厂界▲N2	环境	9:25-9:35	58	70	达标
厂界▲N3	环境	9:40-9:50	50	55	达标
厂界▲N4	环境	10:00-10:10	52	55	达标
敏感点▲N5	环境	10:20-10:30	50	55	达标
厂界▲N1	环境	22:10-22:20	48	55	达标
厂界▲N2	环境	22:25-22:35	48	55	达标
厂界▲N3	环境	22:40-22:50	42	45	达标
厂界▲N4	环境	23:00-23:10	41	45	达标
敏感点▲N5	环境	23:20-23:30	41	45	达标

根据监测结果，项目厂界现状噪声 N1~N2 均能满足《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 4a 类标准要求，项目厂界现状噪声 N3~N5 均能满足《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 1 类标准要求，项目周边声环境质量状况良好。



图 2.3-3 项目周边噪声监测点位图

2.4 场址适宜性评价

本项目选址于湄洲湾北岸经济开发区妈祖国际健康城启动区地块，东临荔港大道，南接东吴大道。妈祖国际健康城主导产业为医疗及相关产业，本项目为新增使用 I 类射线装置，项目符合园区的产业规划。

项目可充分依托园区配套完善的给排水、供配电、供气等配套设施，且园区交通便利，便于病患就诊。医院北侧约 15m 为伦琴医学影像诊断中心的 6#住院楼、7#共享医技中心（已建成，未运营）；西北侧紧邻园区规划道路，27m 处为铁灶村社区，人口较为密集；东南侧为荔港大道；南侧为东吴大道。

项目周边无易燃、易爆物品的生产和贮存区，项目所在地的环境适合项目的建设。

综上所述，本项目选址与周边环境相容，并且综合考虑项目所在

地周边的自然环境、社会经济状况和环境质量现状，本项目选址较合理。

第三章 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

3.1.1 重离子治疗加速器（HIMM）

本项目在重离子治疗中心配置 1 台由兰州科近泰基新技术有限责任公司研制生产的重离子治疗加速器及配套设备。重离子治疗加速器为治疗人体肿瘤或其他疾病的重离子治疗装置。根据原环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号《射线装置分类》的规定，重离子治疗装置的管理类别属于 I 类射线装置。

重离子是指元素周期表上重于 2 号元素氦并被电离的粒子。重离子加速器就是通过电磁场提高重离子能量的装置。本项目重离子治疗加速器所加速的是原子序数为 6，核子数为 12，核外电子全部剥离的碳离子（ $^{12}\text{C}^{6+}$ ）。

该装置产生的碳离子能量为 120MeV/u~400MeV/u，束流强度为 $2 \times 10^6 \sim 1.017 \times 10^8$ pps（治疗终端），在治疗终端等中心处的剂量率范围为 0.001~1Gy/min，在人体组织中的最大治疗深度为 27cm，通过扫描磁铁使束流形成最大面积为 20cm×20cm 的照射野（均匀扫描射野为 10cm×10cm）。本项目重离子治疗加速器的主要参数见表 3.1-1。

表 3.1-1 重离子治疗加速器基本参数

装置名称	型号	粒子	能量 (MeV/u)	束流强度 (pps)	生产厂家	数量	活度 种类	类别
妈祖重离子治疗系统	-	$^{12}\text{C}^{6+}$	120~400	$2 \times 10^6 \sim 1.017 \times 10^8$	兰州科近泰基新技术有限责任公司	1	使用	I

3.1.2 DR 机

本项目在重离子治疗中心的 5 个治疗室中各配置 DR 机 1 台，共 5 台。DR 机是数字化 X 射线摄影（Digital Radiography）系统的英文缩写，为诊断、定位人体肿瘤或其他疾病的 X 射线装置，属于 III 类

射线装置。本项目 DR 机的主要参数见表 3.1-2。

表 3.1-2 DR 机基本参数

装置名称	型号	光子	最大管电压 (kV)		最大管电流 (mA)		生产厂家	数量	活度种类	类别
			照相时	透视时	大焦点	小焦点				
DR 机	E7869X	X 射线	150	125	1000	500	Canon	5	使用	III

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 重离子治疗加速器 (HIMM)

3.2.1.1 工程设备组成及工作原理

本项目重离子治疗加速器的主体设备包括离子源、低能束运线、回旋加速器、中能束运线、同步加速器 (主加速器)、高能束运线和 5 个治疗终端。

图 3.2-1 为重离子治疗加速器 (HIMM) 总体布局。

图 3.2-1 中：1 为回旋加速器 (含离子源、低能束运线)；2 为中能束运线；3 为同步加速器；4 为高能束运线；5 为治疗终端 (共 5 个)。回旋引出部位、同步环注入口部位、同步环引出部位及 5 个终端治疗室为主要的束流损失点。

图 3.2-2 为重离子治疗加速器 (HIMM) 设备布局。

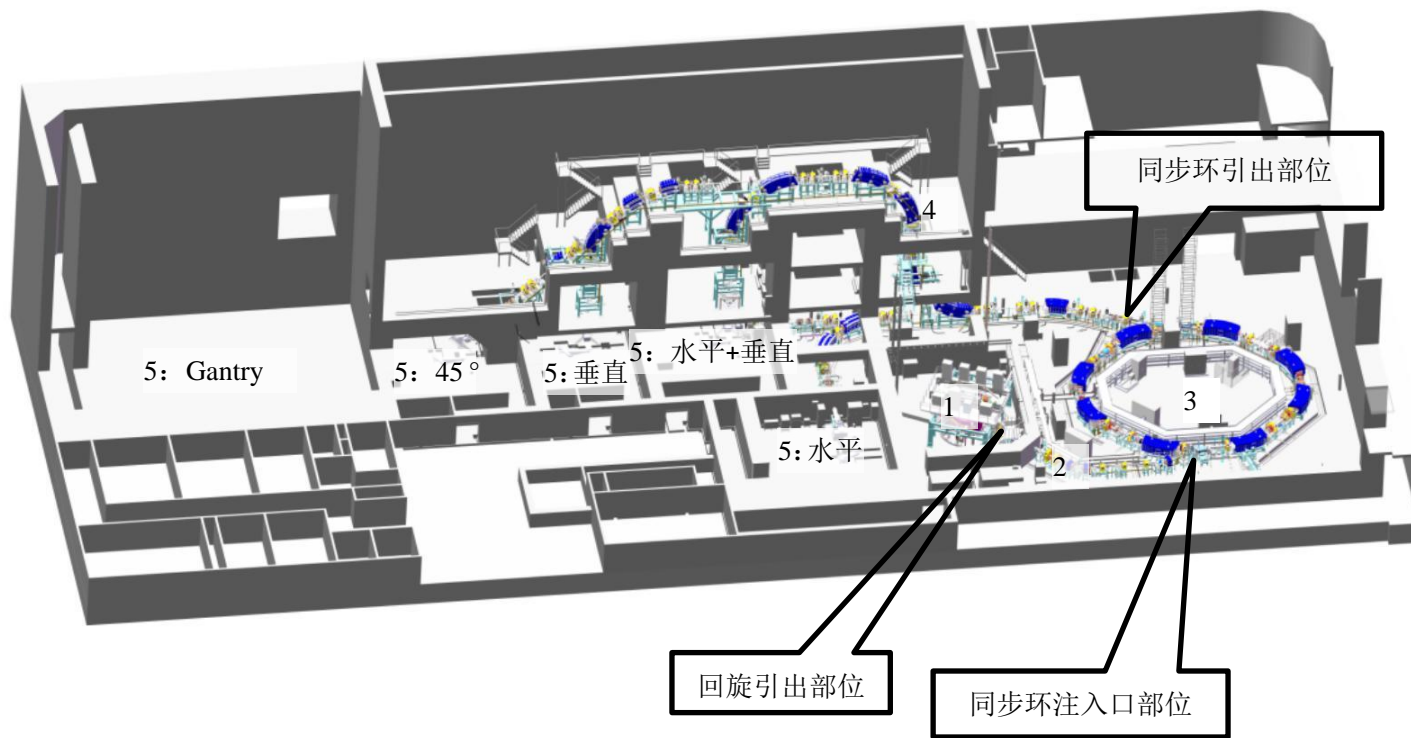


图 3.2-1 重离子治疗加速器 (HIMM) 总体布局

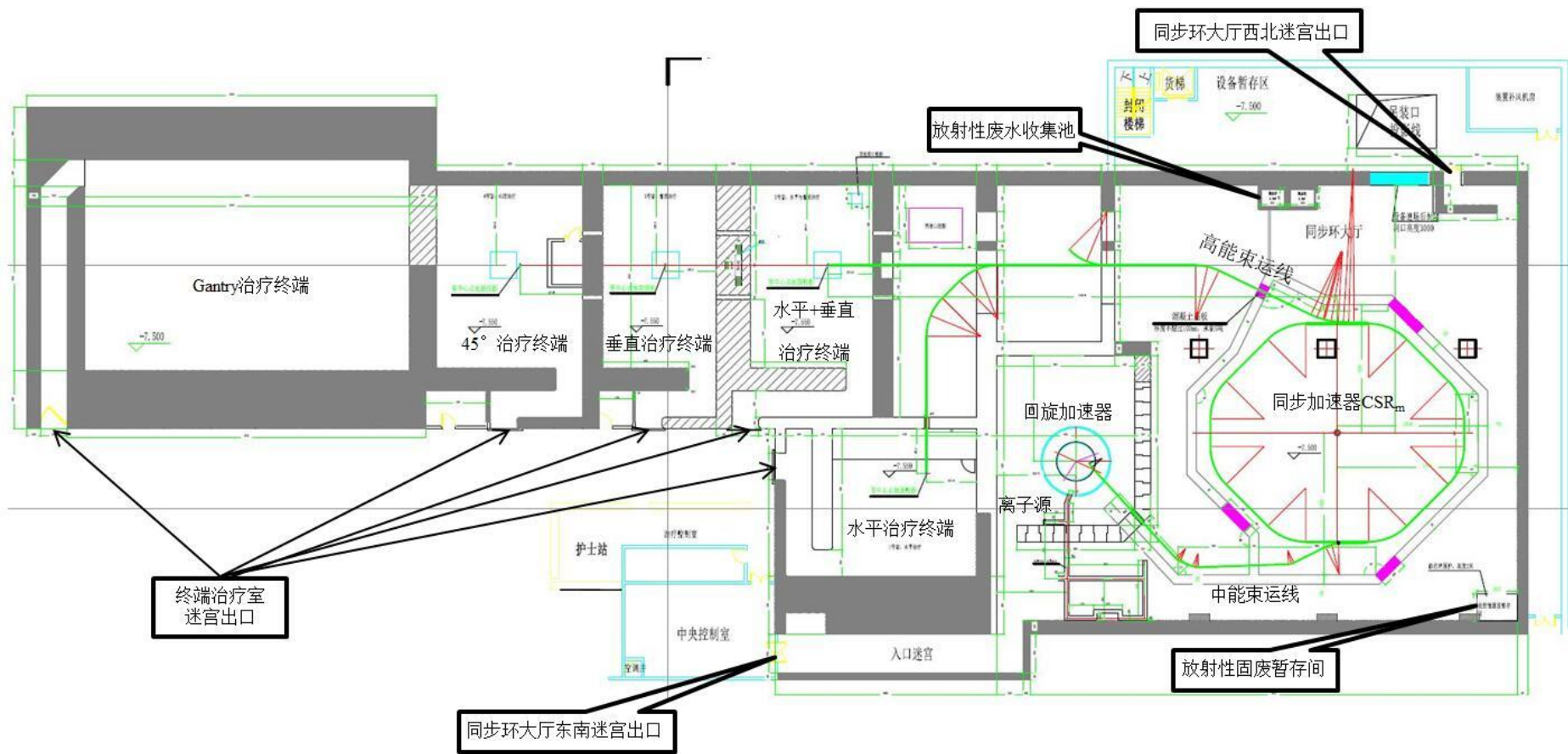


图 3.2-2 重离子治疗加速器平面布局

重离子治疗加速器工作原理简述如下，如图 3.2-3 所示：

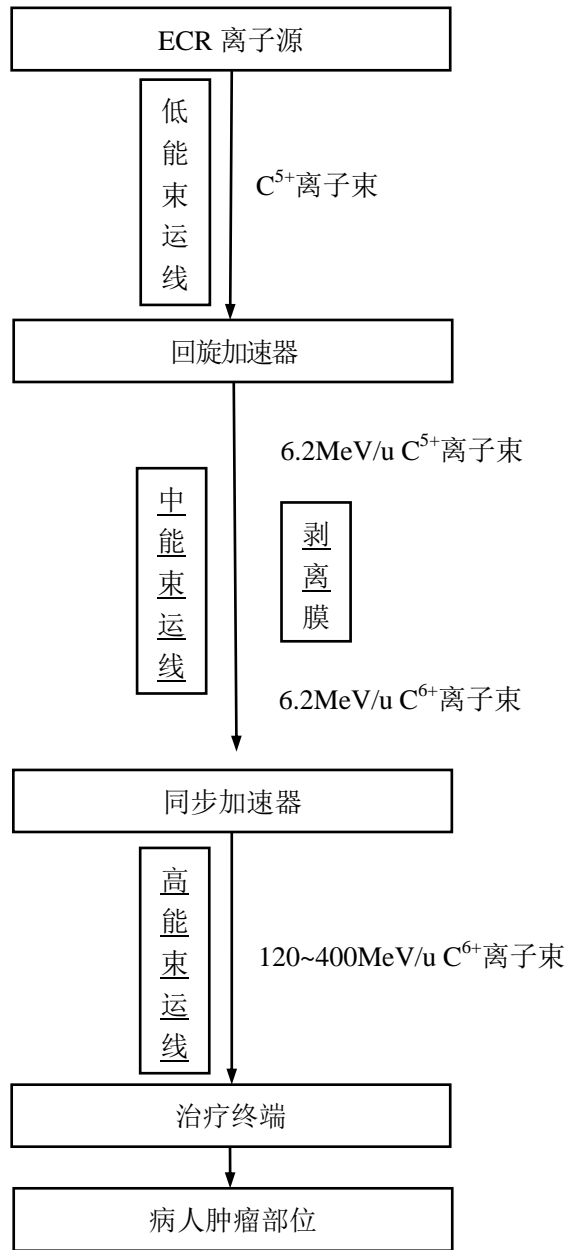


图 3.2-3 重离子加速器工作原理图

①碳离子源的产生：通入离子源腔体中 CH_4 或 C_2H_2 气体分子，与吸收微波能量的热电子碰撞，通过多次电离碰撞过程产生多电荷态离子，在引出过程中利用分析磁铁筛选，得到所需要的 C^{5+} 离子束。

②碳离子源的加速：离子源产生的 C^{5+} 离子束经低能束运线注入到回旋加速器，在回旋加速器中 C^{5+} 离子束被加速到 6.2MeV/u 后被

引出；中能束运线的 C^{5+} 离子束首先穿过剥离膜，被剥离成为 C^{6+} ，然后进入同步加速器被加速到 $120\sim 400\text{MeV/u}$ 后被引出。

③碳离子用于治疗：被引出的高能 C^{6+} 通过高能束运线传输到治疗终端，通过治疗终端精确定位，将其能量准确沉积到病人肿瘤部位，从而完成治疗。

本项目重离子治疗加速器设置 5 个治疗终端：第一为水平治疗终端，第二为水平+垂直治疗终端，第三为垂直治疗终端，第四为 45° 治疗终端，第五为一个 Gantry 治疗终端。前 4 个治疗终端照射方向固定，可满足放射治疗从不同方向进行照射的需求；Gantry 治疗终端能实现束流绕等中心点的全角度（ 360° ）范围内的分度照射。

各设备的工作原理简介如下：

① ECR 离子源

ECR 离子源是一种强流高电荷态重离子产生装置，提供的束流稳定性、可重复性较好。离子源采用全永磁结构，高磁场、高频率以及较高功率馈入模式，产生强流 C^{5+} 离子束流。离子源采用微波加热等离子体产生多电荷态离子，运行周期长，被认为是目前提供强流高电荷态离子束的最有效装置。

ECR 离子源利用微波馈入离子源工作区，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，使电子得以加热，产生热电子。热电子与中性粒子（原子或分子）碰撞，通过多次电离碰撞过程产生多电荷态离子。其中部分多电荷态离子向束流引出区漂移，通过引出电场的加速，引出多电荷态离子混合束流，通过分析磁铁分析得到所需电荷态的离子束流。离子源的引出电压为 22.3kV 。

② 低能束运线-回旋加速器

从离子源引出的 $^{12}C^{5+}$ 离子束通过低能束运线注入到回旋加速器

中心区。回旋加速器中心区安装有静电偏转镜和加速高频电极，静电偏转镜将从低能束运线传输来的束流作 90° 的偏转，运送到注入器的中心平面附近，再通过加速高频电极将束流加速并限制在合理的运动轨道上，并使束流继续加速。

回旋加速器的加速系统由 2 个 30° 的 Dee 盒构成，2 个 Dee 盒放置在两个相对的磁铁谷区。高频频率为 31.02MHz ，采用 4 次谐波加速，高频加速电压 70kV 。离子在磁场和高频加速电压的作用下，在注入器中心平面附近做螺旋线运动，随着离子能量的增加，离子的回旋半径增大。当 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子的能量为 6.2MeV/u 时，通过引出系统将离子束引出到回旋加速器外的中能束运线。

③中能束运线

中能束运线长约 27m ，连接回旋加速器和同步加速器，共有 8 台四极透镜和 3 台偏转磁铁传输束流。其中，前半段采用 5 台直径为 140mm 的透镜，主要功能是接收由回旋加速器加速的中能束流；后半段采用 3 台直径 80mm 的透镜，用于匹配同步加速器对注入束流相空间分布的要求。

中能束运线由磁铁、电源、真空、束诊等系统元器件构成。

④同步加速器

同步加速器是采用调变的磁场将带电粒子约束在固定轨道上，采用高频电场加速带电粒子以达到高能量的环形加速装置。同步加速器主要采用二极磁铁偏转束流，采用四极磁铁保证束流聚焦，采用六极磁铁校正色品和驱动共振。同步加速器由 8 块二极磁铁和 12 块四极磁铁组成二折对称结构，周长 56.17 米。

慢引出是让束流在做回旋运动的同时，使粒子的 β 振荡振幅逐渐增大，振幅达到临界值时被引出，振幅小的粒子依旧在真空轨道中进行循环运动。随着粒子振幅的增大，束流将全部被引出，通过适

当的配送系统输送到治疗终端

重离子治疗加速器采用回旋加速器作为同步加速器的注入器。从回旋加速器加速得到能量为 6.2MeV/u 的 C^{5+} 粒子束，经中能束运线传输到达同步加速器入口，经过切割磁铁偏转使其轨道与同步加速器里存贮束的轨道成一很小的夹角（约 28.6mrad ），然后到达嵌在同步加速器二极磁铁里面的剥离膜，被剥离成为 C^{6+} 。

⑤ 高能束运线

高能束运线把重离子束流从同步加速器输送到治疗终端，按照处方要求配置剂量分布，实现束流传输、束斑控制和束流扫描等功能。束线由 12 台二极铁、38 台四极铁、11 台扫描铁（包含 1 台开关铁）、20 台校正铁构成。图 3.2-7 是高能束运线元件布局图。

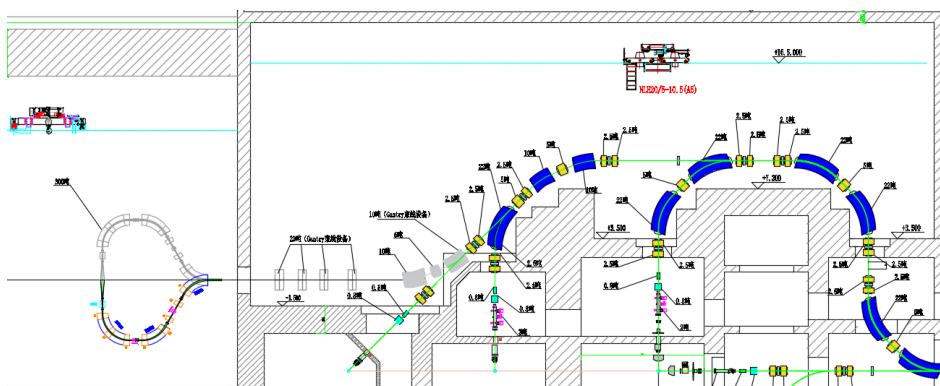


图 3.2-7 高能束运线元件布局

⑥ 治疗终端

重离子治疗加速器配备了 5 个固定治疗终端，结构布局如图 3.2-8 所示，其中 1#为水平治疗终端、2#为水平+垂直治疗终端、3#为垂直治疗终端、4#为 45° 治疗终端。四个治疗终端采用相同的束流配送系统、束流与剂量监测系统、治疗控制系统和患者定位系统等。从同步加速器引出的 C^{6+} 离子束经由高能束运线的束流扫描段和治疗头进入治疗终端实施治疗，扫描磁铁为高能束运线的末端设备，其余为治

疗终端设备。

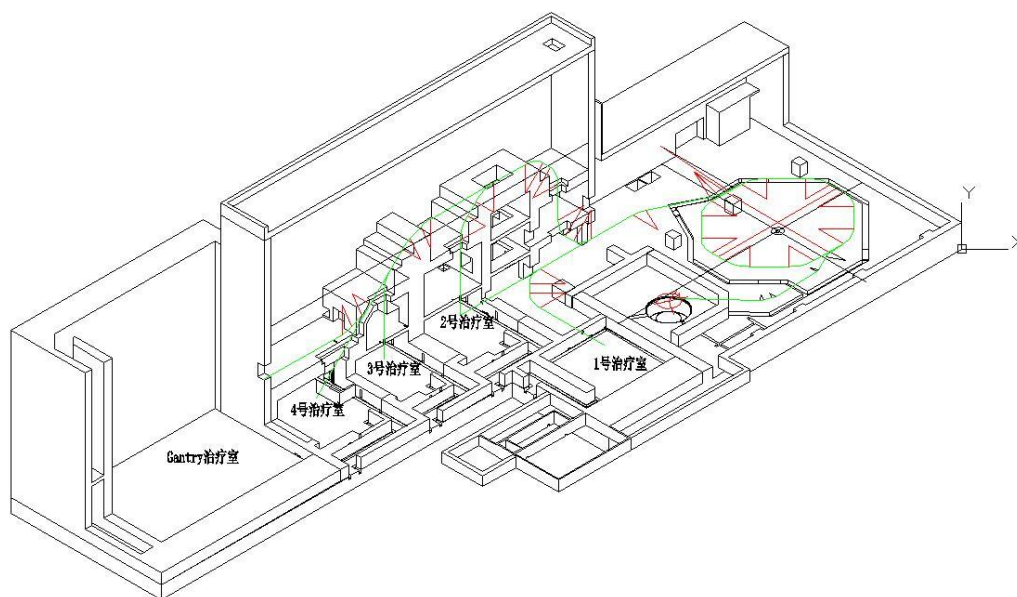


图 3.2-8 治疗终端布局图

Gantry 治疗终端可以实现在一个治疗过程中将肿瘤辐射总剂量从不同方向、分剂量对肿瘤病灶的照射，增加治疗的焦皮比值，进一步凸显碳离子 Bragg 峰的优势，更大程度上减少束流对正常组织的辐照损伤。Gantry 原则上可实现束流绕等中心点的照射平面全角度（ 360° ）范围内的分度照射。

Gantry 主磁铁采用基于 CCT 技术的超导磁铁技术，其整体重量 300 吨，设计寿命 30 年。为防止温度变化引起机架的变形而增加等中心点误差，整个房间有恒温要求。

各个设备的工作方式总结如下：

1. 离子源（ECR）：产生 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束；
2. 低能束运线：将 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束从离子源配送到回旋加速器；
3. 回旋加速器：通过加速电场将 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束加速到能量 6.2MeV/u 并引出；
4. 中能传输系统：将 $^{12}\text{C}^{5+}$ 束流配送到同步加速器；
5. 同步加速器：通过剥离膜将 $^{12}\text{C}^{5+}$ 剥离为 $^{12}\text{C}^{6+}$ ，将束流累积到

高流强，然后将束流能量从 6.2MeV/u 加速到终端所需要的能量（120MeV/u-400MeV/u）并引出；

6. 高能传输系统：将引出的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 束流配送到各个治疗终端；

7. 治疗终端：配备 4 个不同方向的固定治疗头（水平、水平+垂直、垂直、 45° ）和一个可实现束流绕等中心点的全角度（ 360° ）分度照射的 Gantry 治疗头，通过治疗头中束流配送系统和束流能量调节系统，将最大射程 27 厘米的束流送至人体。

3.2.1.2 重离子治疗加速器质量和尺寸

重离子治疗加速器从离子源到治疗终端总束流设备长度约 226m，总重量约 1047.08t。

① ECR 离子源

源体直径 0.76m，重量约 0.58t。

② 回旋注入线

长度约 4m，重量约 12t。

③ 回旋注入器

直径 2.92m，高 1.52m，重量约 80t。

④ 回旋注入器至主加速器之间的束运线

长度约 20.8m、重量约 24.5t。

⑤ 同步加速器

周长约 56.17m、重量约 213.5t。

⑥ 重离子治疗束运线

长度约 149.4m、重量约 408.5t。

⑦ 治疗终端

5 个重量合计约 308 吨。

3.2.1.3 重离子治疗加速器治疗工作流程

本项目重离子治疗加速器开启后即可长期维持在运行状态，一般

一次连续运行约 30d，一年运行 7 次。

本项目重离子治疗加速器一般在 2~5d 可完成开机调试工作。调试完成后，装置即处于正常可用状态，开启总束流闸，即可提供束流，关闭总束流闸，则整个装置内无束流。

根据患者需要，治疗束流被输送到其中的一个治疗室（同时只有一个治疗室开展治疗），其它治疗室用于患者摆位，治疗结束后可切换束流至下个治疗室。治疗间歇期，关闭对应治疗室的束流闸。

装置的调试、运行、束流切换、离子源开关操作全部在控制室。运行期间，加速器大厅无工作人员滞留；需维护、检修时，在停束进行有效通风后，工作人员才进入相关场所进行维护、检修工作。

本项目重离子治疗加速器治疗流程叙述如下：

首先，病人确诊需要进行放射性治疗（医生应向病人或其家属告知可能受到的辐射危害），在中央控制室内远程使用 DR 机（一种诊断类 X 射线机）对病灶部位进行准确定位，根据定位结果确定照射位置和剂量；治疗计划经物理师验证后，病人进入治疗室准备（包括摆位、非照射部位的屏蔽防护等），除病人外全部人员退出治疗室，关闭治疗室屏蔽门，开启安全联锁；再次远程使用 DR 机对病灶部位进行准确定位和监控；重离子加速器开启对应治疗室的束流闸对病人实施放射治疗，治疗完毕后关闭对应治疗室的束流闸；再次远程使用 DR 机对病灶部位进行回顾性验证；病人离开，完成一次放射治疗。

本项目重离子治疗加速器的治疗流程及产污环节如图 3.2-10 所示。重离子治疗加速器运维人员运行流程图见图 3.2-11。

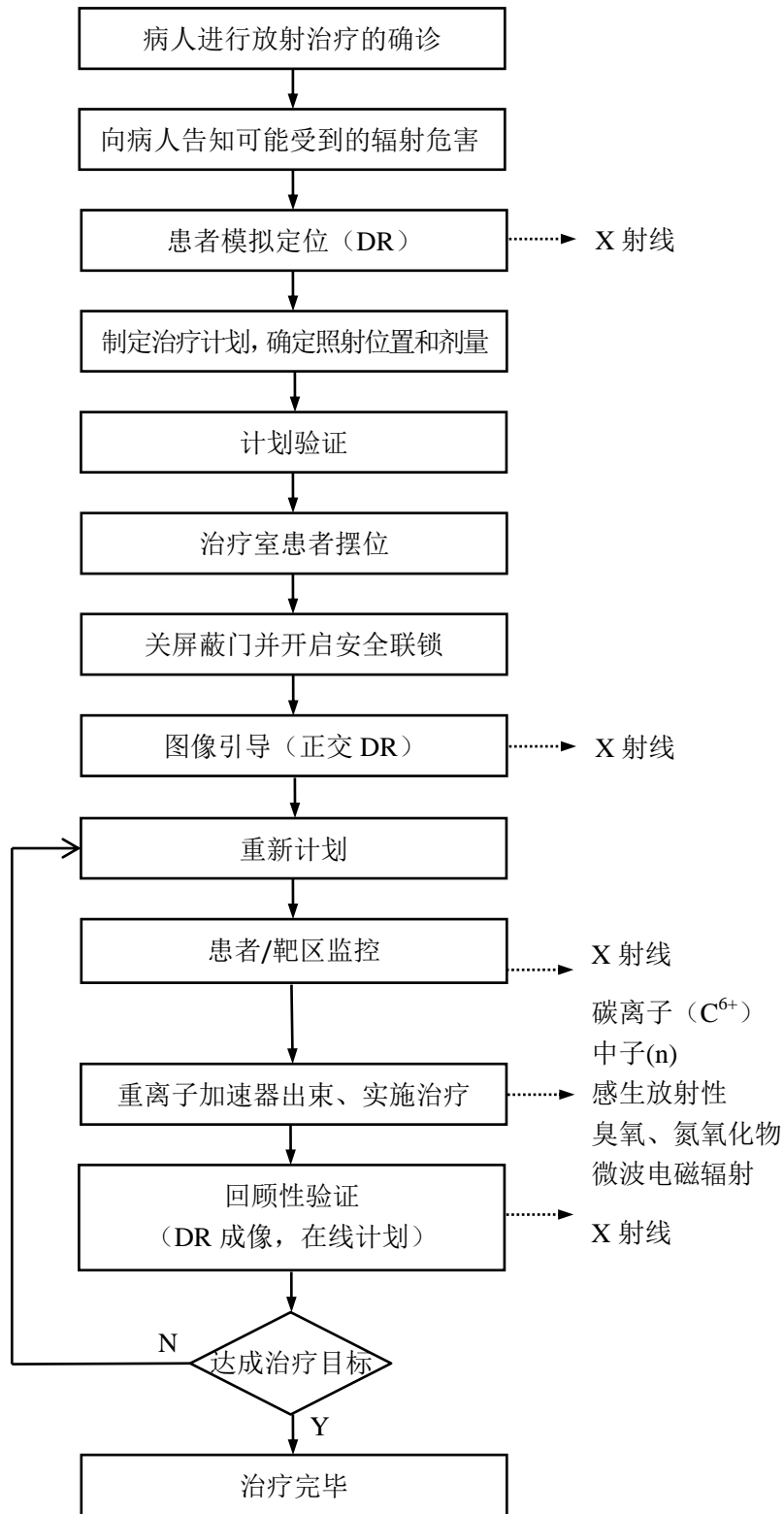
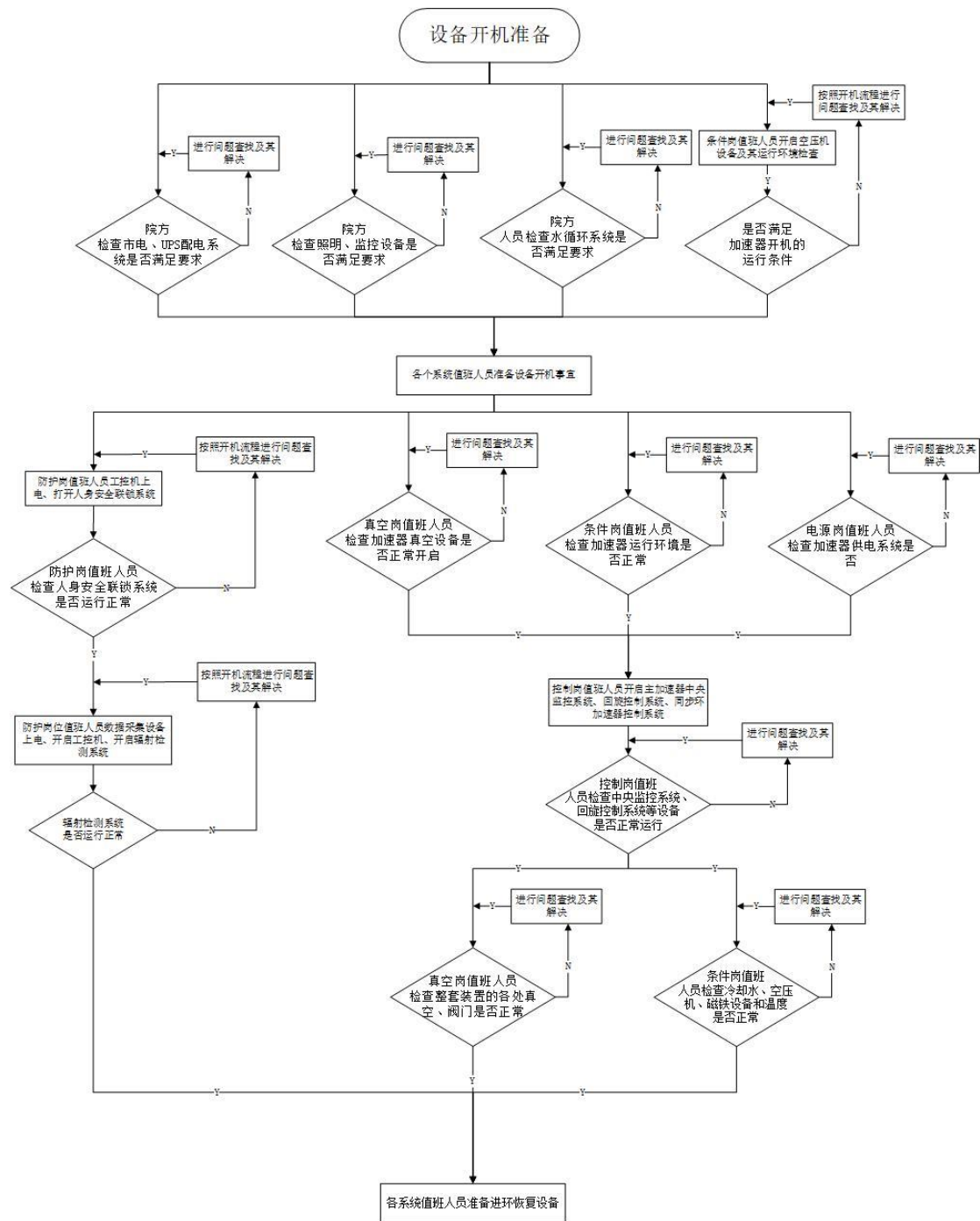
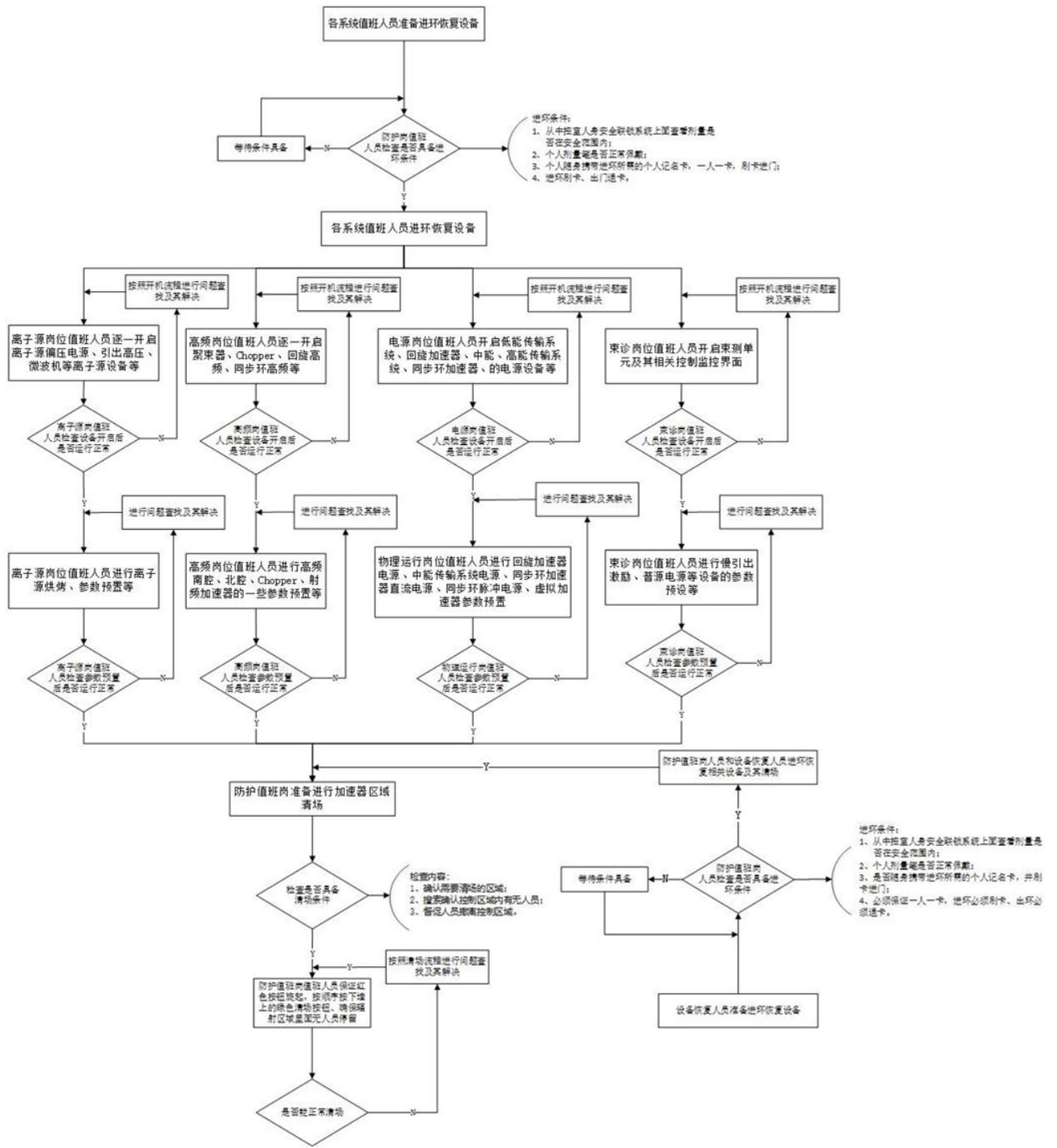


图 3.2-10 重离子治疗加速器的治疗流程及产污环节示意图





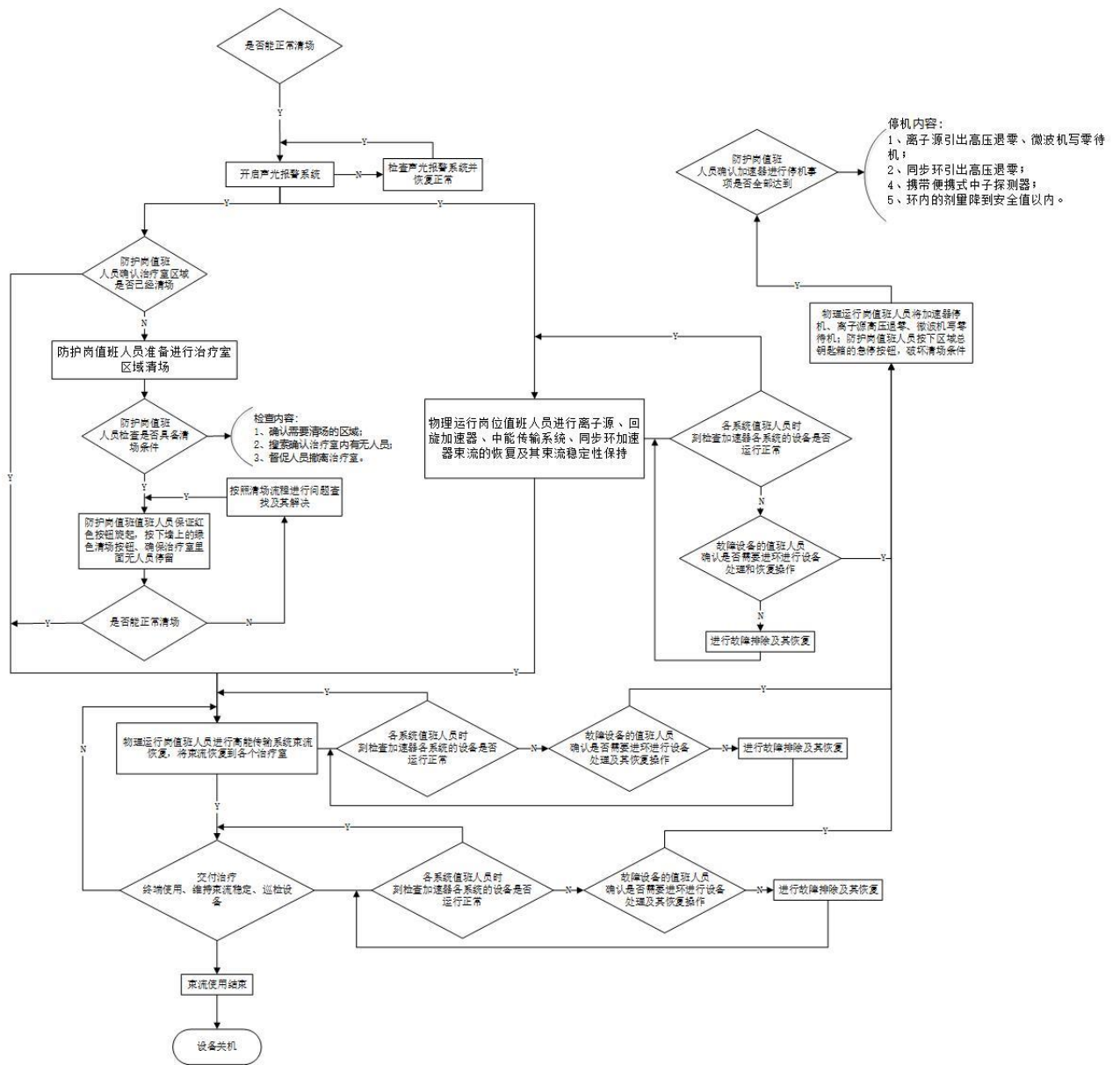


图 3.2-11 重离子治疗加速器运维人员运行流程图

3.2.1.4 岗位设置及人员配备

妈祖重离子医院拟严格按照《放射诊疗管理规定》的第七条(一)的规定，配备：(1)中级以上专业技术职务任职资格的放射肿瘤医师；(2)病理学、医学影像学专业技术人员；(3)大学本科以上学历或中级以上专业技术职务任职资格的医学物理人员；(4)放射治疗技师和设备运维人员。

医院拟配置取得《执业医师证书》的放射治疗医师 15 人，其中

从事放射治疗专业 10 年以上并取得高级专业职称者 6 人；拟配置从事放射治疗物理专业人员 10 人，其中从事放射治疗专业 5 年以上并取得高级专业职称者 3 人；辐射防护专业技术人员 1 人；设备运维人员 21 人，现场负责人 1 名，下辖 5 个班组，每班 4 人；满足开展重离子放射治疗技术临床应用所需的其他相关专业技术人员若干人。

各岗位的职责如下：

(1)放射肿瘤医师：在领导和主治医师指导下进行工作；负责重离子治疗工作，按时完成诊断报告，遇有疑难问题，及时请示上级医师；参加会诊和临床病例讨论会；担负一定的科学研究和教学任务，做好进修、实习人员的培训；掌握重离子治疗加速器的一般原理、性能、使用及投照技术，遵守操作规程，做好防护工作，严防差错事故。

(2)病理学专业技术人员：参加疑难病例的病理检查，组织病理讨论；参加会诊和临床病理讨论会；做好病理资料的积累和保管工作，搞好登记、统计工作；参加业务训练和技术考核，培养和提高技术水平；学习、了解国内外先进经验，开展科学研究和技术革新工作。

(3)医学影像学专业技术人员：根据临床请检进行常规和特殊摄影，配合诊断人员进行 DR 检查的机器操作，确保摄影质量；配合诊断人员共同完成应急抢救工作；负有对机器正常运转所需的经常性保养及辅导和监督非专机操作人员使用机器的责任；负责放射技术专业带教、培训工作，进行科研和技术革新；加强与临床科室密切联系，不断提高诊断符合率。

(4)医学物理人员：熟悉治疗计划系统的操作，配合医生完成靶区规划，设计并优化放射治疗计划；验证治疗计划，定期进行调强剂量验证；配合完成模拟定位、制模和患者放射治疗实施；定期进行电脑维护，定期做放疗计划数据备份；配合完成放疗新设备的验收和临床应用前的相关准备工作。

(5)放射治疗技师：在科主任、技术组长的指导下，负责完成本机日常投照等任务，严格遵守各项规章制度及技术操作规程，做好放疗防护安全保卫工作，严防差错事故；熟练掌握各科治疗机的基本性能，主要附件及各类开关按钮的正确使用方法和保管，可能出现的故障和简单的故障排除方法，严防机器不应有的损伤及零配件、材料的短少；详细阅读，正确执行医嘱，如医嘱不详或有疑问时，及时向主管医师提出，必须及时询问清楚后方可执行；了解并掌握各种治疗体位的重要点，严格按照各种投照进行投照；负责做好新病员照光前的准备工作，做好宣教工作，使病员积极配合治疗；正确记录放射治疗单，保持正确无误；学习国内外先进投照技术，参加科内科研项目，做好有关的资料积累和保管。

(6)设备运维人员：24 小时值守现场进行设备运行维护，须熟悉各自负责设备仪器的操作规范、主要性能及常见故障表现和处理方法，确保重离子治疗加速器及其他放疗设备的安全运行及患者治疗的质量，保障设备正常运行。规范做好放疗相关设备的质控工作和计划验证工作，按照相关要求做好放疗相关设备的日检、周检、月检和年检等工作。

3.2.1.5 人流、物流路径规划

重离子治疗中心人流、物流通道及门的布局图见图 3.2-12。

重离子治疗中心的人流路径规划如下：根据重离子治疗中心各出入口的具体功能及所可能带来的安全问题，将对各通道门的安全管理级别分为两级：一级为高安全级别，包括加速器大厅和 5 个治疗室的人员出入口（G11-G17），加入联锁系统并统计人员出入情况。对于加速器大厅，在正常运行时只从 G11 出入；二级次之，指监督区的人员出入口（G21），只控制人员的出入不加入联锁。对于五个治疗室的出入口（G13-G17），在治疗或实验时其控制权可由主控制系统

分配至本地控制室，只有在无人或患者身份的人员（限定一人）在内时可以供束。

重离子治疗中心的物流路径规划如下：装置土建完成后，设备进场在 G12 旁边有个设备进出通道，进出设备安装加速器。加速器安装完成后将设备门封堵。加速器检修或维护期间，小型设备进出从通道门 G12 进出，除此之外正常运行时，进出加速器大厅只从 G11 进出。运行期产生的放射性废物，也走 G12 进出加速器大厅。

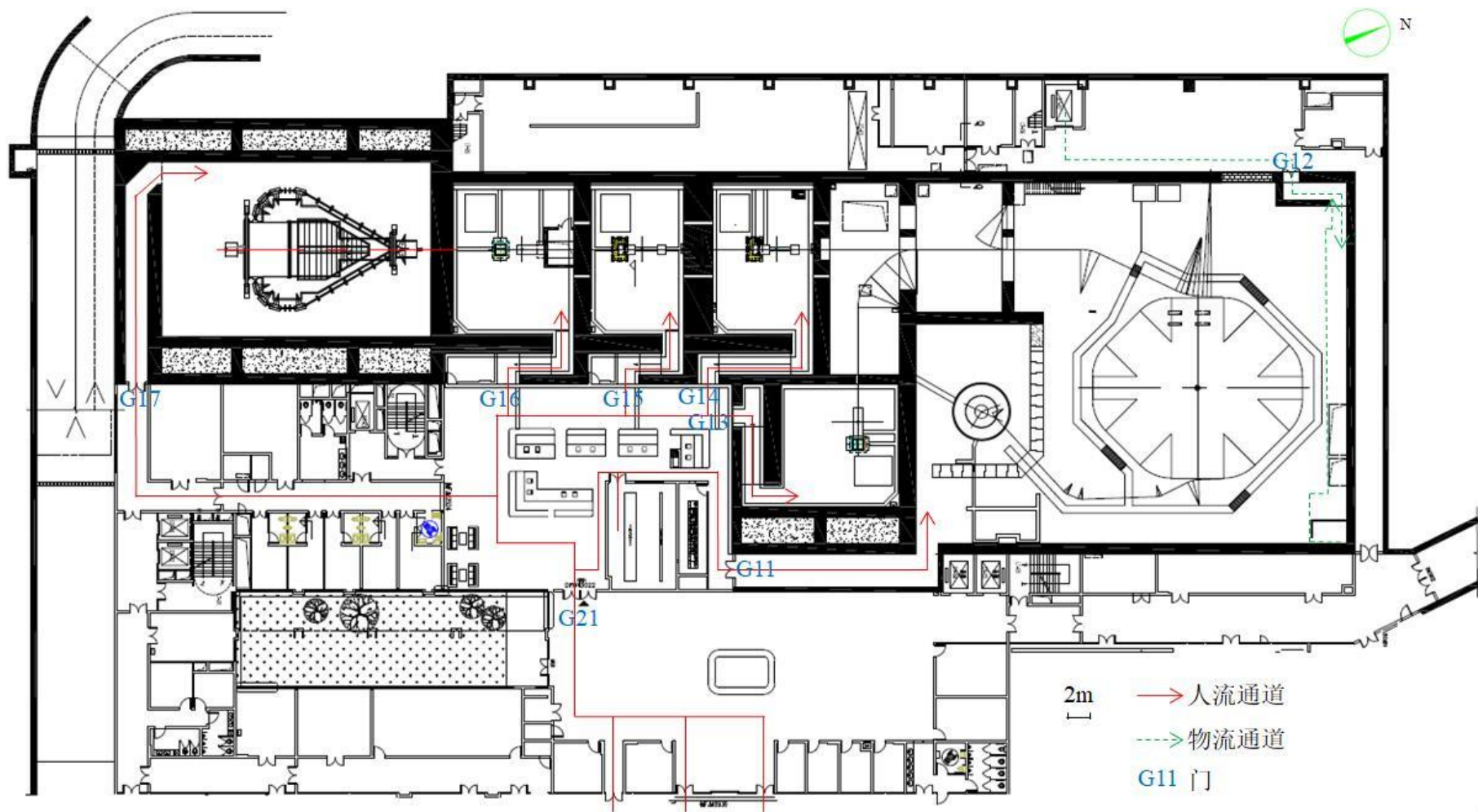


图 3.2-12 重离子治疗中心人流、物流通道及门的分布图

3.2.2 DR 机

DR 机是由电子暗盒、扫描控制器、系统控制器、影像显示器等组成，是直接将 X 线光子通过电子暗盒转换为数字化图像的射线装置。

DR 机主要依据 X 射线的穿透作用、差别吸收、感光作用和荧光作用。由于 X 射线穿过人体时，受到不同程度的吸收，如骨骼吸收的 X 射线量比肌肉吸收的量要多，那么通过人体后的 X 射线量就不一样，这样便携带了人体各部密度分布的信息，在荧光屏上引起的荧光作用的强弱就有较大差别。因而在荧光屏上将显示出不同密度的阴影。根据阴影浓淡的对比，结合临床表现、化验结果和病理诊断，即可判断人体某一部分是否正常。

DR 机的操作工艺流程为：确定受检者需要进行 X 射线检查，受检者进入治疗室并按要求就位，无关人员退出治疗室并关闭进出门，工作人员在控制室远距离操作 DR 机，DR 机曝光出束进行透视或拍片，结束后工作人员关闭 DR 机。X 射线检查结束。

本项目 DR 机的操作流程及产污环节如图 3.2-13 所示。

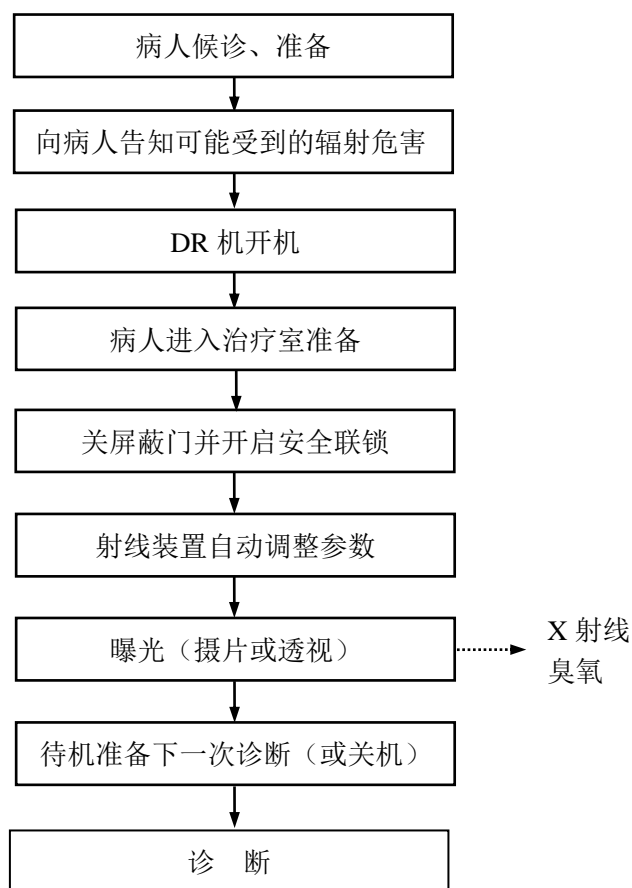


图 3.2-13 DR 机操作流程及产污环节示意图

3.3 污染源项

3.3.1 施工期污染源项

本项目重离子治疗中心建筑工程的施工期环境影响已在《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》中进行了评价，并取得莆田市生态环境局的批复。本报告不再赘述。

重离子治疗加速器及相关设备、DR 机的安装工程产生的主要环境影响为噪声、废包装材料以及施工人员的生活污水、生活垃圾。

3.3.2 营运期污染源项

本项目非放射性环境评价已通过环评审批，本报告主要描述与辐射相关的污染源。

3.3.2.1 重离子治疗加速器（HIMM）

重离子加速器运行会产生瞬时辐射和感生放射性影响。瞬时辐射是指重离子束、重离子与结构材料发生核反应产生的次级中子、 γ 射线等辐射。感生放射性是指重离子、次级中子将加速器结构材料和环境介质（空气、屏蔽体等）中的物质元素活化成放射性核素形成的辐射影响。

重离子加速器在开机出束状态下，除患者外无人员在治疗室、加速器大厅等处停留，工作人员在控制室内进行控制操作。重离子加速器对外面的辐射影响途径是次级中子贯穿辐射外照射影响。以及由通风系统排出的气载感生放射性核素（主要是 ^{41}Ar ）的辐射影响（烟云浸没外照射途径）。

重离子加速器在开机停束状态下，医护人员因摆位而进入终端治疗室时，可能受到终端治疗室感生放射性气体的内外照射和刚结束治疗的病人的外照射影响。重离子加速器在停机状态下，运维工作人员因检查、检修而进入加速器大厅时，则可能受到加速器大厅感生放射性气体的内外照射和感生放射性加速器部件的外照射影响。通过通风、延时进入、缩短停留时间和延长冷却（衰变）时间可有效降低感生放射性对工作人员的辐射影响。

与辐射相关的非放射性污染因素方面，重离子加速器治疗室、加速器大厅等场所的空气在电离辐射作用下产生臭氧、氮氧化物等污染空气的有害气体。

3.3.2.1.1 瞬时辐射

本项目重离子治疗加速器运行产生的瞬时辐射中，用于治疗的重离子从产生、被加速，到治疗终端被引出前，均被束缚在加速器装置的束流通道内，对加速器体外的辐射影响可忽略。在治疗终端，被引出用于治疗的重离子的主要参数如下：

离子能量：120MeV/u~400MeV/u；

束流强度： $1.6 \times 10^7 \sim 8.137 \times 10^8$ ppp（每个脉冲的离子数）或 $2 \times 10^6 \sim 1.017 \times 10^8$ pps（每秒的离子数）；

在治疗终端等中心处的剂量率范围：0.001~1Gy/min。

对重离子治疗加速器的瞬发辐射场起着决定性作用的是次级中子，其它瞬发辐射如 γ 射线等，其对屏蔽体外剂量当量的贡献与中子相比可以忽略。因此，中子辐射场分布是重离子治疗加速器建筑结构屏蔽设计的主要源项。同时，次级中子也是造成空气、冷却水和屏蔽体活化的主要因素。

高能重离子核反应产生的次级中子，其成份包括由核内级联产生的高能中子（前冲分布）和复合核退激出射的蒸发中子（各向同性分布）两部分。

A 加速器中子辐射场源项估算

根据兰州科近泰基新技术有限责任公司编制的《莆田加速器辐射防护设计报告》，对本项目重离子治疗加速器中子辐射场源项估算如下：

(1)理论计算

利用 FLUKA 蒙特卡罗程序，对重离子治疗加速器打靶产生的次级中子辐射场进行模拟计算。模拟计算所依据的主要参数见表 3.3-1，计算结果见图 3.3-1~图 3.3-3。

表 3.3-1 模拟中的参数选择

离子种类	能量 (MeV/u)	靶材料	靶厚 (cm)
^{12}C	400	Cu	6
^{12}C	400 或 430	H ₂ O	27

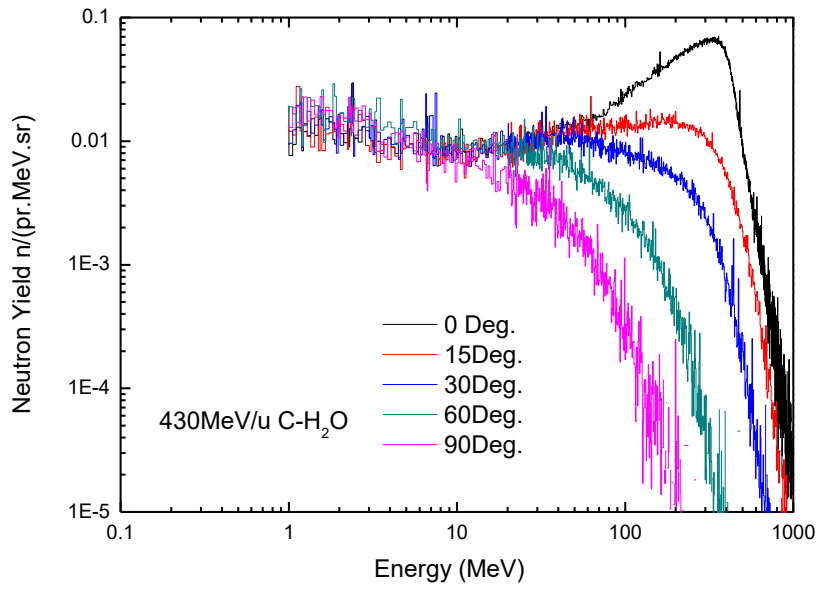


图 3.3-1 430MeV/u C 打 H₂O 靶的中子通量角分布及能谱

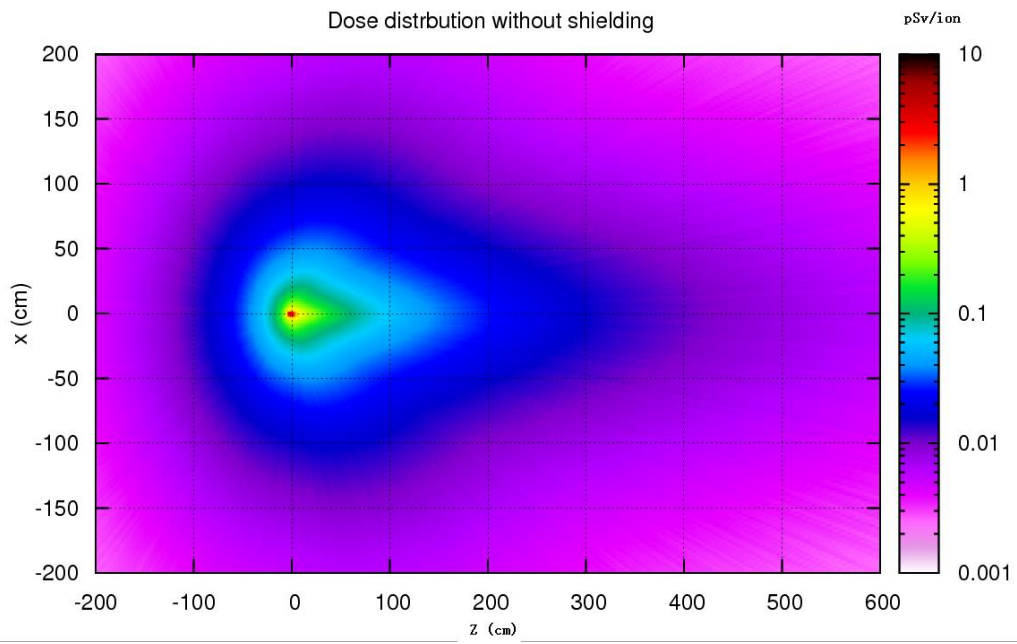


图 3.3-2 400MeV/u C 打厚 Cu 靶周围无屏蔽时周围剂量分布

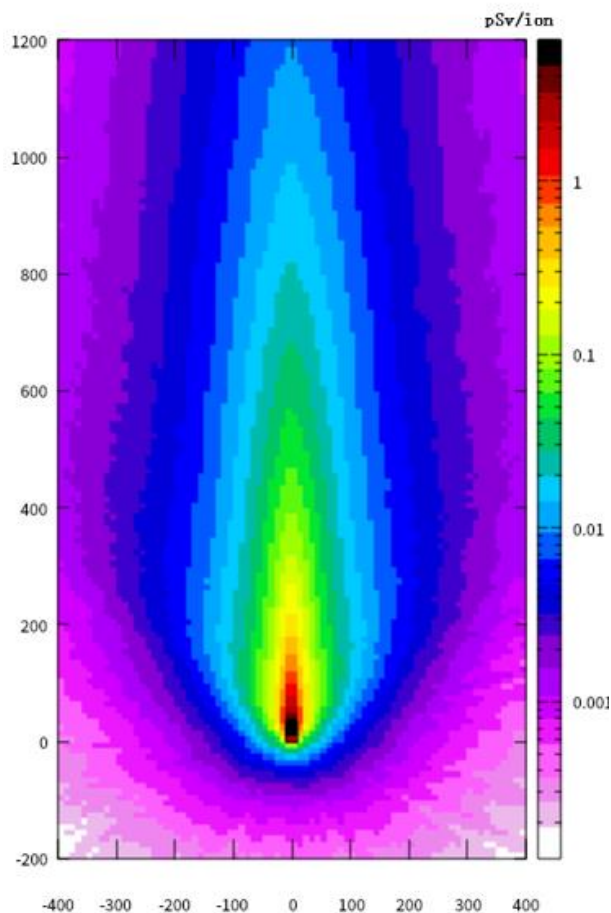


图 3.3-3 400MeV/u C 打厚水靶周围无屏蔽时周围剂量分布

(2)参考实验结果

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

- ①中子产额近似与入射离子单核能的平方成正比;
- ②100MeV/u 和 400MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应的次级中子具有相似的谱形。

图 3.3-4 为 Kurosawa 给出的 400MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应在出射角为 0° 、 7.5° 、 15° 、 30° 、 60° 及 90° 时中子能谱测量结果。从图中可以看到 400MeV/u $\text{C} + \text{Cu}$ 反应的次级中子谱有以下特征:

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

②中子最高能量可达 Eu 的 2 倍；

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

④在大角度方向，情况正好相反， $E_n < 100\text{MeV}$ 的中子占绝对优势。例如，在 60° 方向， $E_n > 100\text{MeV}$ 的中子成分仅占 2%。因此，在考虑侧向屏蔽时应当特别谨慎对待中、低能中子。

表 3.3-2 给出了根据图 3.3-4 积分得到的中子场分布。

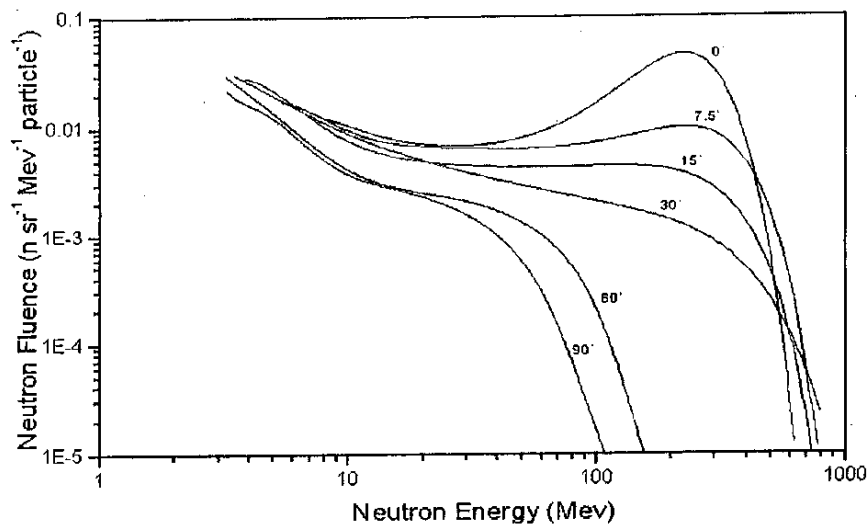


图 3.3-4 400MeV/uC+Cu 次级中子分布

表 3.3-2 400MeV/u 的 ^{12}C 与厚 Cu 靶的中子产额 Y 单位: $\text{n sr}^{-1} \text{ particles}^{-1}$

	0°	30°	60°	90°
$>100\text{MeV}$	$9.33\text{E}+00$	$3.98\text{E}-01$	$2.51\text{E}-03$	$1.32\text{E}-04$
$50 < E_n < 100\text{MeV}$	$9.94\text{E}-01$	$3.35\text{E}-01$	$1.79\text{E}-01$	$1.47\text{E}-01$
$10 < E_n < 50\text{MeV}$	$3.29\text{E}-01$	$2.09\text{E}-01$	$1.48\text{E}-01$	$1.40\text{E}-01$
$<10\text{MeV}$	$3.57\text{E}-02$	$4.54\text{E}-02$	$6.62\text{E}-02$	$7.69\text{E}-02$
Total	$1.03\text{E}+01$	$7.33\text{E}-01$	$1.82\text{E}-01$	$1.47\text{E}-01$

B 加速器各环节束流损失情况

本项目重离子治疗加速器各环节束流损失设计参数见表 3.3-3。

表 3.3-3 重离子治疗加速器各阶段束流损失参数

	束流强度 (ppp*)	效率	束流损失	能量	损失方式
C ⁵⁺ /回旋	1.00E+12	15%	8.50E+11	6.2MeV/u	集中损失
同步环注入线	5.000E+09	95%	2.500E+08	6.2MeV/u	均匀损失
同步环环口	4.750E+09	50%	2.375E+09	6.2MeV/u	集中损失
同步环注入后	2.375E+09				
同步环全环俘获	2.375E+09	47%	1.259E+09	6.2MeV/u	均匀损失
同步环全环加速	1.116E+09	90%	1.116E+08	120-400MeV/u	均匀损失
慢引出	1.005E+09	90%	1.005E+08	120-400MeV/u	集中损失
高能线	9.042E+08	90%	9.042E+07	120-400MeV/u	均匀损失
终端 (患者)	8.137E+08			120-400MeV/u	集中损失

* ppp: particles per pulse; 脉冲周期(pulse): 8s。

3.3.2.1.2 感生放射性

重离子加速器的感生放射性主要是重离子直接与加速器部件相互作用产生的感生放射性和重离子损失产生的次级中子引起的感生放射性。感生放射性强度取决于加速离子的能量、种类、流强、加速器运行时间、被照材料性质等诸多因素。

加速器运行产生的感生放射性不会对屏蔽体外的环境有贯穿辐射影响，不是加速器机房辐射屏蔽设计考虑的主要因素。感生放射性主要是对在加速器停机后，需要进入加速器机房进行加速器的检查、维护维修等操作的工作人员带来辐射影响。

以下分别对重离子加速器结构材料、场所空气、设备冷却水等感生放射性主要产生部位的感生放射性源项进行简要分析。

A 加速器结构材料的感生放射性

加速器结构部件的感生放射性主要是由重离子直接与结构材料

相互作用产生的,集中在可能的束流损失点,包括回旋加速器引出口,同步环注入口、引出口、束流闸等部位。

加速器结构部件材料多为铜、铝合金或不锈钢。在加速器结构材料中鉴别出的感生放射性核素种类见表 3.3-4。

表 3.3-4 在加速器周围受辐照的材料中活化出来的放射性核素一览表

靶材料	放射性核素	半衰期	靶材料	放射性核素	半衰期
塑料与油	^3H	12.3a	钢	^{54}Mn	312.1d
	^7Be	53.22d		^{56}Mn	2.58h
	^{11}C	20.33min		^{56}Co	77.2d
铝	同上加以下			^{57}Co	271.7d
	^{18}F	1.83h		^{58}Co	70.9d
	^{22}Na	2.60a		^{52}Fe	8.28h
	^{24}Na	14.95h		^{55}Fe	2.74a
钢	同上加以下			^{59}Fe	44.5d
	^{42}K	12.32h	铜	同上加以下	
	^{43}K	22.3h		^{57}Ni	35.6h
	^{44}Sc	3.92h		^{65}Ni	2.52h
	$^{44\text{m}}\text{Sc}$	2.44d		^{60}Co	5.27a
	^{46}Sc	83.8d		^{60}Cu	23.7min
	^{47}Sc	3.35d		^{61}Cu	3.33h
	^{48}Sc	1.82d		^{62}Cu	9.67min
	^{48}V	15.97d		^{64}Cu	12.7h
	^{51}Cr	27.7d		^{62}Zn	9.19h
	^{52}Mn	5.59d		^{65}Zn	243.7d
	$^{52\text{m}}\text{Mn}$	21.1min			

加速器结构材料中产生的感生放射性核素种类虽然较多,但对各种加速器的实验研究表明,加速器停机后所观察到的剩余辐射场实际上只有少数放射性核素的贡献,对 γ 剂量率起主要贡献的主要是 ^{54}Mn 、

^{48}V 、 ^{51}Cr 、 $^{52\text{m}}\text{Mn}$ 、 ^{52}Mn 和 ^{56}Mn ，它们的半衰期在 21.12min 至 312d 之间。

从表可见，加速器结构材料产生的感生放射性核素多为短半衰期核素。在加速器停机后冷却一段时间后再进行加速器的检查、维护维修工作，可有效减少工作人员受到的照射剂量。

加速器结构材料感生放射性的产生量，与离子种类、束流强度、离子能量、靶材料及厚度、照射时间等均密切相关。

在这里根据以下假设条件对加速器结构材料感生放射性的产生量进行估算：

加速器运行工况：一次连续运行约 30d，一年运行 7 次，总共 5000h/a；

重离子： $^{12}\text{C}^{6+}$ ，能量为 400Mev/u，流强为 1.017×10^8 pps；

靶材料：铜厚靶，规格 $10\times 10\times 10\text{cm}^3$ 。

保守假设碳离子束全部损失在厚铜靶中，采用 FLUKA 蒙卡程序包，计算出在加速器连续运行 30d 后，停止照射时刻结构部件的总感生放射性活度为 $4.41\times 10^9\text{Bq}$ ，停止照射 2h 后的总活度为 $2.06\times 10^9\text{Bq}$ 。

加速器大厅在停机后需冷却一段时间，运维工作人员再进入工作。加速器大厅内结构部件的感生放射性源项可按设计资料、运维工作人员接触感生放射性结构部件的时间点等因素保守计算。具体计算过程和结果见 5.2.1.2.1 的 E 小节。

本项目重离子加速器一年运行 7 次，考虑核素的衰变，则加速器运行每年产生的感生放射性结构部件、废靶件的活度最大为 $1.79\times 10^7\text{Bq/a}$ 。

B 空气的感生放射性

加速器运行期间有次级中子出射的场所，中子与空气中的氮、氧、

氢等通过热中子俘获、(n, 2n)、(γ, n)、反应和散裂反应等产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。

表 3.3-5 列出了加速器空气活化产生的主要放射性核素。

表 3.3-5 空气活化产生的放射性核素

放射性核素	半衰期	放射性核素	半衰期
^3H	12.3a	^7Be	53d
^{11}C	20.5min	^{13}N	10min
^{15}O	2.1min	^{41}Ar	1.8h

B.1 终端治疗室、加速器大厅内部的感生放射性气体源项

同样按照前面的假设条件和计算模式，可估算出在加速器连续出束 30d 后，致空气中的感生放射性总活度为 $5.81 \times 10^5 \text{Bq}$ ，停止照射 2h 后的总活度为 $7.248 \times 10^4 \text{Bq}$ （空气靶为 $8 \times 6 \times 4 \text{m}^3$ ）。停止照射时、停止照射后 2h 气体感生放射性核素总量及主要核素活度详见表 3.3-6 和 3.3-7。

表 3.3-6 停止照射时气体感生放射性核素总量及主要核素活度 单位: Bq

编号	核素	活度
1	⁴¹ Ar	1.67×10 ⁴
2	¹⁵ O	9.20×10 ⁴
3	¹³ N	1.17×10 ⁵
4	¹² B	2.66×10 ⁴
5	¹¹ C	1.45×10 ⁵
6	¹⁰ C	1.61×10 ⁴
7	⁸ Li	3.08×10 ⁴
8	⁸ B	1.64×10 ⁴
9	⁷ Be	5.73×10 ⁴
10	⁶ He	2.17×10 ⁴
11	³ H	2.02×10 ³
12	其它	3.39×10 ⁴
13	总量	5.81×10 ⁵

表 3.3-7 停止照射后 2h 气体感生放射性核素总量及主要核素活度 单位: Bq

编号	核素	活度
1	⁴¹ Ar	7.83×10 ³
2	⁷ Be	5.72×10 ⁴
3	³ H	2.02×10 ³
4	其它	5.50×10 ³
5	总量	7.25×10 ⁴

终端治疗室需要连续通风换气以保护病人健康, 停束后保持通风换气一段时间, 医护人员再进入工作; 加速器大厅在重离子加速器运行时空调通风系统处于封闭循环状态, 并保持装置区在一定的负压状态, 以防止活化空气的泄漏; 停机后通风换气一段时间, 运维工作人员再进入工作。终端治疗室及加速器大厅内空气的感生放射性源项均可按表 3.3-6、房间通风次数、工作人员进入的时间点等因素保

守计算。具体计算过程和结果见 5.2.1.2.1 的 B 和 D 小节。

B.2 感生放射性气态流出物源项

本项目加速器大厅排出到外环境的感生放射性气态流出物源项可按表 3.3-6 的总量乘以 7 倍计，为 $4.07 \times 10^6 \text{Bq/a}$ ，IAEA No.19 报告的估算模式中排放时间按 $3.15 \times 10^7 \text{s/a}$ 考虑，则本项目加速器大厅放射性核素的年平均排放速率如表 3.3-8 所示。

表 3.3-8 HIMM 运行期间排入环境的空气感生放射性核素年均排放速率，Bq/s

核素	年均排放速率
^3H	4.47E-04
^7Be	1.27E-02
^{11}C	3.22E-02
^{13}N	2.60E-02
^{15}O	2.04E-02
^{41}Ar	3.71E-03
总计	1.29E-01

本项目终端治疗室排出到外环境的感生放射性气态流出物源项可按以下模式估算。

(1) 计算模式

根据《原子核物理》（卢希庭，原子能出版社，1981）的中子核反应产额的计算方法可推出，在考虑通风的情况下，加速器连续运行 t 时间后，停机时刻，房间内空气活化产生的感生放射性核素活度可由下面的公式计算得到：

$$C_i(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \gamma} N_i \sigma_i \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{式 3.3-1})$$

$$N_i = \frac{\rho}{M} \times f_i \times \theta \times N_A \quad (\text{式 3.3-2})$$

式中：

$C_i(t)$ ——加速器运行 t 时间后，房间内空气中感生放射性核素 i 的活度浓度， Bq/cm^3 ；

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

γ ——房间内空气的更换速率, s^{-1} ;

N_i ——单位体积空气中靶核 i 的数目, 个/ cm^3 ;

σ_i ——靶核 i 活化反应的微观反应截面, cm^2 ;

ϕ ——中子通量密度, $n/(cm^2 s)$;

ρ ——空气的密度, g/cm^3 ;

M ——靶核的摩尔质量, g/mol ;

f_i ——母核在空气中的质量份额;

θ ——母核的同位素丰度;

N_A ——阿伏伽德罗常数, 6.02×10^{23} 个/ mol 。

空气中感生放射性核素的浓度随着加速器运行时间增加, 增加到饱和浓度后趋于稳定。由于空气中感生放射性核素的半衰期相对于加速器的运行时间较短, 很容易达到饱和, 因此, 可使用饱和浓度 C_i 来进行评价, 用饱和浓度评价也是偏安全的, 简化公式如下:

$$C_i = \frac{\lambda}{\lambda + \gamma} N_i \sigma_i \phi \quad (3.3-3)$$

加速器停止运行, 通风 t 时间后, 房间内空气感生放射性核素活度为:

$$C_i(t) = C_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (3.3-4)$$

(2) 参数的取值

① 衰变常数 λ

活化空气中的主要放射性核素半衰期及衰变常数见表 3.3-9:

表 3.3-9 活化空气中主要放射性核素半衰期及衰变常数

放射性核素	半衰期 $T_{1/2}(s)$	衰变常数 $\lambda(s^{-1})$
3H	3.88×10^8	1.79×10^{-9}
7Be	4.60×10^6	1.51×10^{-7}
^{11}C	1.22×10^3	5.68×10^{-4}
^{13}N	6.00×10^2	1.16×10^{-3}
^{15}O	1.26×10^2	5.50×10^{-3}
^{41}Ar	6.48×10^3	1.07×10^{-4}

②换气次数 γ

根据项目设计资料,重离子治疗系统终端治疗室的换气次数均为 5 次/h,本次评价 γ 取值为 $1.389 \times 10^{-3} s^{-1}$ 。

③单位体积空气中靶核的数目 N

表 3.3-10 单位体积空气中靶核的数目

靶核	摩尔质量 $M(g)$	质量份额 f	空气密度 ρ (g/cm^3)	$\theta, \%$	N_A	N (个/ cm^3)
^{12}C	12	1.20×10^{-4}	1.29×10^{-3}	99.759	6.02×10^{23}	7.747×10^{15}
^{14}N	14	7.55×10^{-1}		99.625		4.172×10^{19}
^{16}O	16	2.30×10^{-1}		99.759		1.114×10^{19}
^{40}Ar	40	1.30×10^{-2}		99.60		2.514×10^{17}

④中子通量密度 ϕ

根据各个房间的大小、束流损失点所处位置以及中子产额,采用 MCNPX 模型对各治疗室内的平均中子通量密度进行计算,得到各治疗室内平均中子通量密度如表 3.3-11 所示。

表 3.3-11 各房间内平均中子通量密度

场所	束流损失 (pps)	单个重离子打靶中子产额($n/sr \cdot p$)	总中子产额 ($n/sr \cdot s$)	中子通量密度 ($n/(cm^2 s)$)
1#治疗室	1.017×10^8	45.45	4.62×10^9	3.91×10^3
2#治疗室				3.58×10^3
3#治疗室				3.81×10^3
4#治疗室				3.07×10^3
Gantry 治疗室				1.16×10^3

⑤微观截面 σ

σ 取值来自NCRP report No.144, 各靶核 σ 取值见表3.3-12。

表 3.3-12 各靶核的微观吸收截面

核素	靶核	σ, cm^2
^3H	^{12}C	1.00×10^{-26}
	^{14}N	3.00×10^{-26}
	^{16}O	3.00×10^{-26}
^7Be	^{12}C	1.00×10^{-26}
	^{14}N	1.00×10^{-26}
	^{16}O	5.00×10^{-27}
^{11}C	^{12}C	3.00×10^{-26}
	^{14}N	1.00×10^{-26}
	^{16}O	5.00×10^{-27}
^{13}N	^{14}N	1.00×10^{-26}
	^{16}O	9.00×10^{-27}
^{15}O	^{16}O	4.00×10^{-26}
^{41}Ar	^{40}Ar	6.10×10^{-25}

(3)计算结果

根据上述模式, 计算得到在重离子治疗系统运行期间, 终端治疗室内空气中的感生放射性核素活度浓度见表3.3-13。

表 3.3-13 重离子加速器运行时终端治疗室内空气感生放射性核素活度浓度, Bq/m^3

核素	1 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室	4 [#] 治疗室	Gantry治疗室
^3H	7.99E-03	7.31E-03	7.79E-03	6.28E-03	2.37E-03
^7Be	2.01E-01	1.84E-01	1.96E-01	1.58E-01	5.96E-01
^{11}C	5.37E+02	4.91E+02	5.23E+02	4.22E+02	1.59E+02
^{13}N	9.20E+02	8.43E+02	8.97E+02	7.24E+02	2.73E+02
^{15}O	1.39E+03	1.27E+03	1.35E+03	1.09E+03	4.12E+03
^{41}Ar	4.29E+01	3.93E+01	4.18E+01	3.37E+01	1.27E+01

根据上述终端治疗室内空气中的感生放射性核素浓度的计算结果、终端治疗室的通风量以及年最大出束时间(1750h), 可计算得出重离子治疗系统运行期间终端治疗室每年排入环境的空气感生放射性核素总量和年均排放速率, 列于表 3.3-14、3.3-15。

表 3.3-14 HIMM 运行期间终端治疗室每年排入环境的空气感生放射性核素总量, Bq

核素	1 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室	4 [#] 治疗室	Gantry治疗室
³ H	4.55E+04	2.86E+04	2.64E+04	2.94E+04	6.12E+05
⁷ Be	1.14E+06	7.20E+05	6.64E+05	7.39E+05	1.54E+07
¹¹ C	3.05E+09	1.92E+09	1.77E+09	1.97E+09	4.11E+10
¹³ N	5.24E+09	3.30E+09	3.04E+09	3.39E+09	7.05E+10
¹⁵ O	7.91E+09	4.98E+09	4.59E+09	5.11E+09	1.06E+11
⁴¹ Ar	2.44E+08	1.54E+08	1.42E+08	1.58E+08	3.28E+09
总计	1.64E+10	1.04E+10	9.55E+09	1.06E+10	2.11E+11

表 3.3-15 HIMM 运行期间终端治疗室排入环境的空气感生放射性核素年均排放速率, Bq/s

核素	1 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室	4 [#] 治疗室	Gantry治疗室
³ H	1.44E-03	9.07E-04	8.37E-04	9.32E-04	1.94E-02
⁷ Be	3.63E-02	2.28E-02	2.11E-02	2.34E-02	4.88E-01
¹¹ C	9.68E+01	6.10E+01	5.63E+01	6.26E+01	1.30E+03
¹³ N	1.66E+02	1.05E+02	9.65E+01	1.07E+02	2.24E+03
¹⁵ O	2.51E+02	1.58E+02	1.46E+02	1.62E+02	3.38E+03
⁴¹ Ar	7.73E+00	4.87E+00	4.49E+00	5.00E+00	1.04E+02
总计	5.21E+02	3.28E+02	3.03E+02	3.37E+02	7.02E+03

故 HIMM 运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素总量为 2.11×10^{11} Bq。

保守考虑, 本项目放射性核素的年平均排放速率为加速器大厅的源项与 5 个治疗室最大值的叠加, 如表 3.3-16 所示。

表 3.3-16 HIMM 运行期间排入环境的空气感生放射性核素年均排放速率, Bq/s

核素	加速器大厅	Gantry治疗室	总计
³ H	4.47E-04	1.94E-02	1.99E-02
⁷ Be	1.27E-02	4.88E-01	5.01E-01
¹¹ C	3.22E-02	1.30E+03	1.30E+03
¹³ N	2.60E-02	2.24E+03	2.24E+03
¹⁵ O	2.04E-02	3.38E+03	3.38E+03
⁴¹ Ar	3.71E-03	1.04E+02	1.04E+02
总计	1.29E-01	7.02E+03	7.02E+03

其中, 保守考虑 ⁷Be 全部进入废过滤器, 考虑核素的衰变, 则加速器运行每年产生的废过滤器活度最大为 1.58×10^7 Bq/a。

C 冷却水的感生放射性

加速器冷却水是去离子水，因受次级粒子的照射而活化，主要是中子引起水中¹⁶O的散裂，其产物见表3.3-17。其主要核素为¹⁵O、¹¹C、³H和⁷Be。

表 3.3-17 ¹⁶O 的散裂产物

放射性核素	半衰期	放射性核素	半衰期
¹⁰ C	19s	¹³ N	10min
¹⁴ O	71s	¹¹ C	20.5min
¹⁵ O	124s	⁷ Be	53d
³ H	12.3a		

C.1 冷却水的感生放射性源项

同样按照前面的假设条件和计算模式，可估算出在加速器连续运行 30d 后，设备冷却水感生放射性总活度为 $4.07 \times 10^7 \text{Bq}$ ，冷却 2 小时后的感生放射性总活度为 $2.34 \times 10^6 \text{Bq}$ （水靶为 10L）。停止照射时、停止照射后 2h 冷却水感生放射性核素总量及主要核素活度详见表 3.3-18 和 3.3-19。

表 3.3-18 停止照射时冷却水感生放射性核素总量及主要核素活度 单位: Bq

编号	核素	活度
1	^{16}N	7.62×10^5
2	^{15}O	1.78×10^7
3	^{14}O	4.78×10^5
4	^{13}B	1.24×10^5
5	^{13}N	1.62×10^6
6	^{12}B	9.42×10^5
7	^{12}N	1.57×10^5
8	^{11}C	1.14×10^7
9	^{10}C	1.26×10^6
10	^9Li	1.81×10^5
11	^9C	1.72×10^5
12	^8Li	1.21×10^6
13	^8Be	1.98×10^5
14	^8B	9.24×10^5
15	^7Be	2.03×10^6
16	^6He	8.64×10^5
17	^3H	9.60×10^4
18	其它	5.00×10^5
19	总量	4.07×10^7

表 3.3-19 停止照射 2h 后冷却水感生放射性核素总量及主要核素活度 单位: Bq

编号	核素	活度
1	^{18}F	2.37×10^4
2	^{11}C	1.92×10^5
3	^7Be	2.03×10^6
4	^3H	9.60×10^4
5	其它	1.00×10^4
6	总量	2.34×10^6

本项目重离子加速器一年运行 7 次，考虑核素的衰变，则加速器运行每年产生的感生放射性冷却水的活度最大为 $4.52 \times 10^7 \text{Bq/a}$ 。其中，保守考虑 ^7Be 全部进入废树脂，考虑核素的衰变，则加速器运行每年产生的废树脂活度最大为 $5.85 \times 10^6 \text{Bq/a}$ 。本项目的循环冷却水随冷却水管道分布，经离子交换处理后，闭式循环使用，不更换，不外排。事故及系统检修情况下流入放射性废水收集池，若要排放，需满足以下两种条件之一：①采取静置衰变措施，并在排放前进行监测，放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）表 1 中限值（总 β 放射性浓度不大于 10Bq/L ），并经审管部门批准后，方可纳入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂；②根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 1ALI_{\min} ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录（根据 GB18871-2002 B1.3.4 的公式及表 B3 中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 ^7Be 、 ^3H 核素的 ALI_{\min} 分别为 $8.33 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $4.17 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ）。

C.2 刚结束治疗的患者的感生放射性源项

终端治疗室出束会导致患者产生感生放射性。人体的含水量约 70%，可近似将人体看成水靶。终端治疗室停束后，需等患者冷却一段时间，医护人员再进入工作。终端治疗室内患者的感生放射性源项可按表 3.3-18、医护人员接触患者的时间点等因素保守计算。具体计算过程和结果见 5.2.1.2.1 的 C 小节。

3.3.2.2 DR 机

本项目在重离子治疗中心的 5 个治疗室中各配置 1 台 DR 机（均属 III 类射线装置）。

DR 机的 X 射线的产生机理简述如下：X 射线由 X 射线管产生。X 射线管密封在高真空壳内，真空壳内设有阴极和阳极。阴极一般是钨制灯丝，装于聚焦杯中。当灯丝通电加热后，释放出电子，聚焦杯使这些电子聚集成束。在阴极和阳极之间加高压，电子在高压电场作用下获得高速，高速电子轰击靶体（阳极，一般用高原子序数的难熔金属如钨、铂、金、钽等制成）产生 X 射线。

DR 机 X 射线产生原理如图 3.3-5 所示。

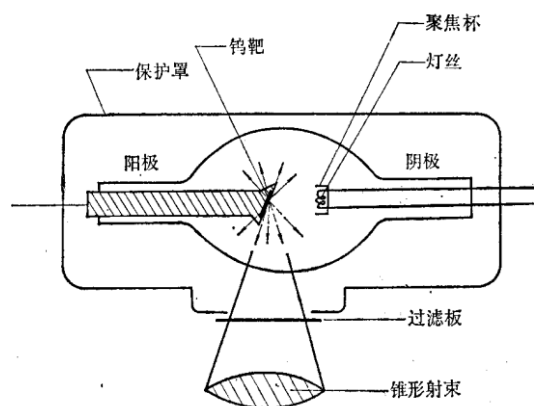


图 3.3-5 X 射线产生原理示意图

DR 机产生的 X 射线有用的锥形射束都是通过与电子射束大致垂直的方向上 X 射线管保护罩上的窗口引出，其他方向上的 X 射线则被保护罩的屏蔽层屏蔽掉。产生的 X 射线强度与管电压、管电流、靶材料和形状、以及过滤板的材料及厚度相关。

DR 机在运行时会产生 X 射线辐射。

DR 机在运行状态下，会对人员产生 X 射线贯穿辐射外照射影响，在停机状态下无辐射影响。

3.4 废弃物

3.4.1 放射性废弃物

项目单位在进行运行期间，会产生放射性废气、放射性废液和放

射性固体废物，各种含放射性的废弃物的来源、种类、活度浓度、总量、排放或处理方式见表 3.4-1。

表 3.4-1 项目运行过程中放射性废弃物年产生量及处理方式一览表

废物种类	来源/名称	产生量	排放量	排放或处理方式
放射性废气	重离子治疗加速器	$2.21 \times 10^{11} \text{Bq/a}$	$2.21 \times 10^{11} \text{Bq/a}$	在运行期间大厅空调通风系统处于封闭循环状态，并保持装置区在一定的负压状态，以防止活化空气的泄漏；停束后通风，治疗室保持通风，经通风系统，由重离子治疗中心屋顶高 24.6m 的 7 个排气筒进行排放。
放射性废液	冷却水	$4.52 \times 10^7 \text{Bq/a}$	正常工 况下不 排放	离子交换处理后，循环使用，不外排。事故及系统检修情况下流入放射性废水收集池，若要排放，需满足以下两种条件之一：①采取静置衰变措施，并在排放前进行监测，放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）表 1 中限值（总 β 放射性浓度不大于 10Bq/L ），并经审管部门批准后，方可纳入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂；②根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 $1 \text{ALI}_{\text{min}}$ ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录（根据 GB18871-2002 B1.3.4 的公式及表 B3 中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 ^7Be 、 ^3H 核素的 ALI_{min} 分别为 $8.33 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $4.17 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ）。
放射性固体废物	冷却水交换树脂	$5.85 \times 10^6 \text{Bq/a}$ ， $0.16 \text{m}^3/\text{a}$	不排放	分类收集后暂存于放射性固体废物暂存间，加速器结构部件及靶件暂存一段时间，若可回用则维修后继续使用，若不可回用，则送福建省放射性废物库处置；冷却水交换树脂最终送福建省放射性废物库处置；手套、棉纱和口罩等低放废物暂存一段时间，最终送福建省放射性废物库处置；废过滤器由厂家人员更换
	含感生放射性的结构部件	$1.79 \times 10^7 \text{Bq/a}$	不排放	

加速器 检修维 护时的 手套、 棉纱和 口罩	最大表面剂量率 为 0.25 μ Sv/h, 1kg/a	不排放	后, 最终送福建省放射性废物库处置。
废通风 过滤器	1.58×10^7 Bq/a	不排放	

3.4.2 非放射性废弃物

根据本项目的非放射性环境影响评价文件《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》，本项目产生的主要非放射性污染物如下：

本项目运行期废气污染源主要为汽车尾气、柴油发电机尾气和。本项目运行期废水主要为医疗废水和生活污水。本项目运行期主要噪声为设备运行噪声和社会活动噪声等。本项目运行期固体废物主要是医疗废物、生活垃圾等。

第四章 辐射安全与防护

4.1 场所布局与屏蔽

4.1.1 场所布局

4.1.1.1 平面布局

重离子治疗中心位于妈祖重离子医院院区西侧，与医院其他区域分区明晰，各区域之间互不干扰，放射性工作场所相对集中且与办公区、住院区之间留有一定的防护距离。妈祖重离子医院平面布置图见附图 4。

重离子治疗中心为地下两层、地上三层的建筑物。

(1)负二层：无辐射工作场所，为进排风机房、污水提升间、生活水泵房、配电间等设备用房和停车场等。

(2)负一层：辐射工作场所包括加速器大厅、高能束运线爬升区、1[#]~4[#]治疗室、Gantry 治疗室。辐射工作场所东侧由北向南为加速器备品间、配电间、楼梯、医用电梯、前台走廊、前台、重离子等待区、护士站走廊、中央控制室、护士站、楼梯、医用电梯、治疗区卫生间、QA 设备储存间、Gantry 消防补风机房、医护区走廊等；南侧为机动车坡道；西侧由北向南为补风机房、设备转运大厅、货运电梯、楼梯、加速器备品间、电控间、冷却水泵房；北侧为设备区走廊；下方为土壤层；上方大部分为辐射工作场所，1[#]治疗室上方为控制系统设备间、数据中心、备用间、接待室。

(3)一层：辐射工作场所包括加速器大厅（上空）、高能束运线爬升区、Gantry 治疗室。辐射工作场所东侧由北向南为医护更衣室 2 间、诊室 4 间、配电间、楼梯、医用电梯、接待室、备用间、控制系统设备间、数据中心、UPS 配电间、运维办公室、电源间空调机房、楼梯、医用电梯、护士办公室、Gantry 等候区；南侧为重离子治疗中心外空

地；西侧由北向南为配电间、设备转运大厅、货运电梯、楼梯、设备房、楼梯、重离子治疗中心外空地；北侧为重离子治疗中心外空地；下方为辐射工作场所；上方局部为辐射工作场所，加速器大厅上方由北向南为备品间、设备区走廊、重离子通用变配电房、同步环电源间、设备区走廊、高能线电源间。

(4)二层：辐射工作场所包括高能束运线爬升区、Gantry 治疗室(上空)。辐射工作场所东侧由北向南为高能线电源间、预留 Gantry 电源间、楼梯、空调机房、UPS 间、网络机房；南侧为庭院上空；西侧由北向南为气瓶间、庭院上空；北侧为设备区走廊；下方为辐射工作场所；上方为辐射工作场所。

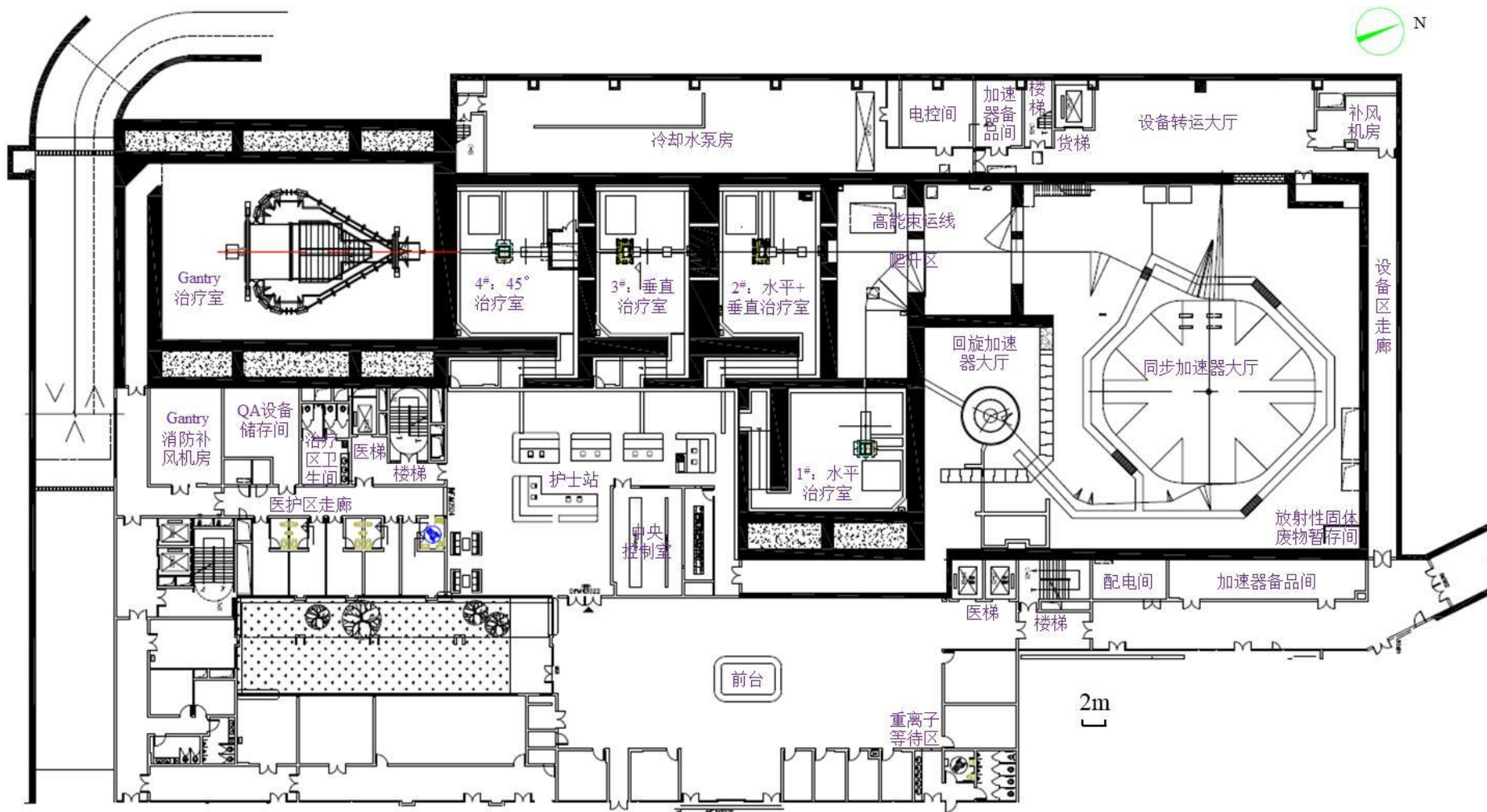
(5)三层：辐射工作场所包括高能束运线爬升区（上空）、Gantry 治疗室（上空）。辐射工作场所东侧由北向南为排烟机房、备用房、治疗室空调机房、Gantry 空调机房、楼梯、空调机房、加压风机房、会议室；南侧为庭院上空；西侧为上人屋面；北侧为设备区走廊；下方为辐射工作场所；高能束运线爬升区上方为不上人屋面，Gantry 治疗室上方为上人屋面。

各个辐射工作场所具有独立的防护设施，且有相对独立、明确的监督和控制划分，各处辐射工作区域相对独立，互不干扰，且又相对集中。

重离子加速器中心负一层机房、治疗室的平面布局图、剖面图见图 4.1-1、图 4.1-2；重离子治疗中心负二层至屋面平面布置图见附图 5~附图 10；重离子治疗加速器机房及治疗室平面布置及剖面图见附图 11。



(a) 负二层



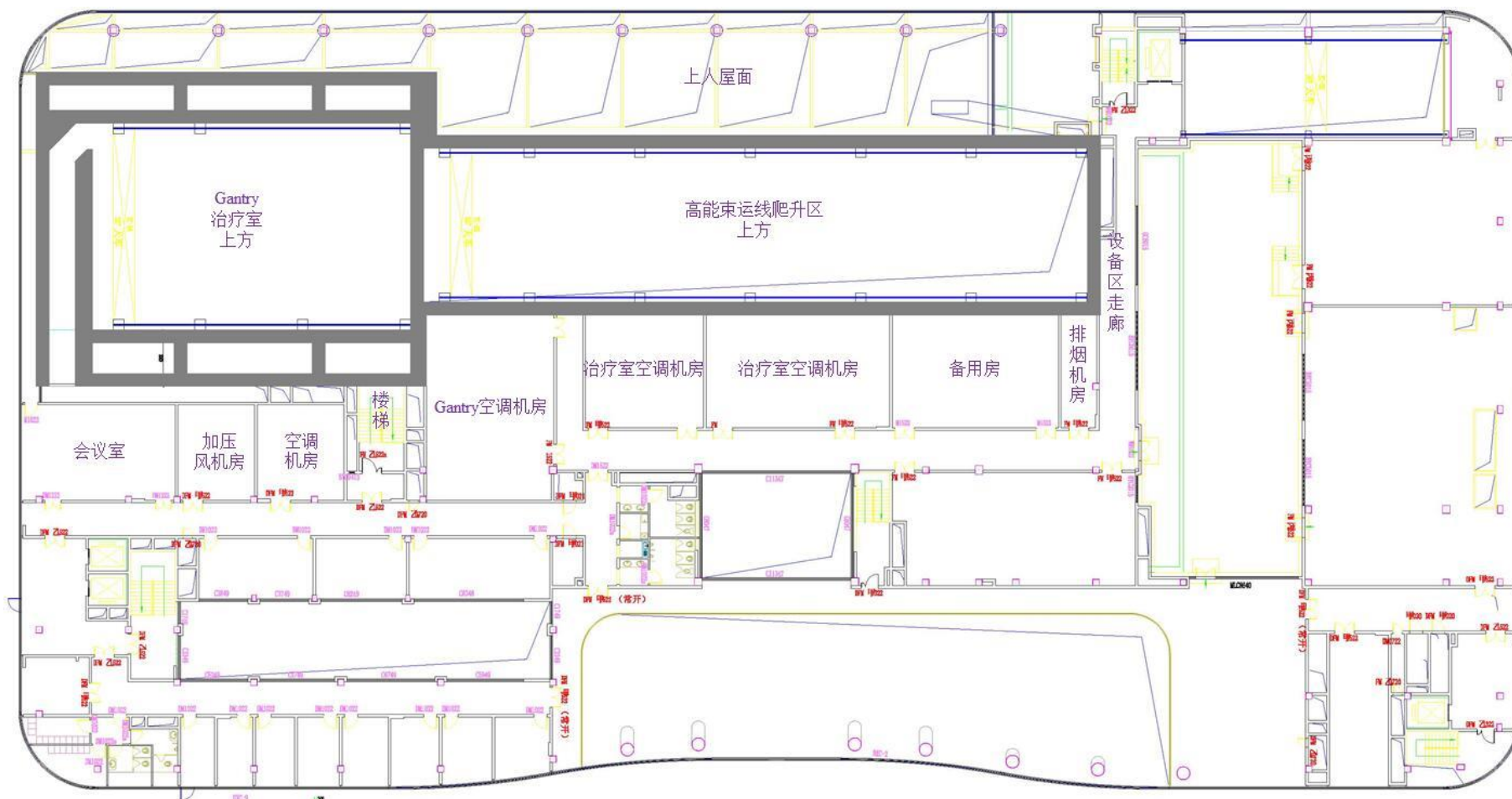
(b) 负一层



(c) 一层



(d) 二层



(e) 三层

图 4.1-1 重离子加速器中心平面布局图

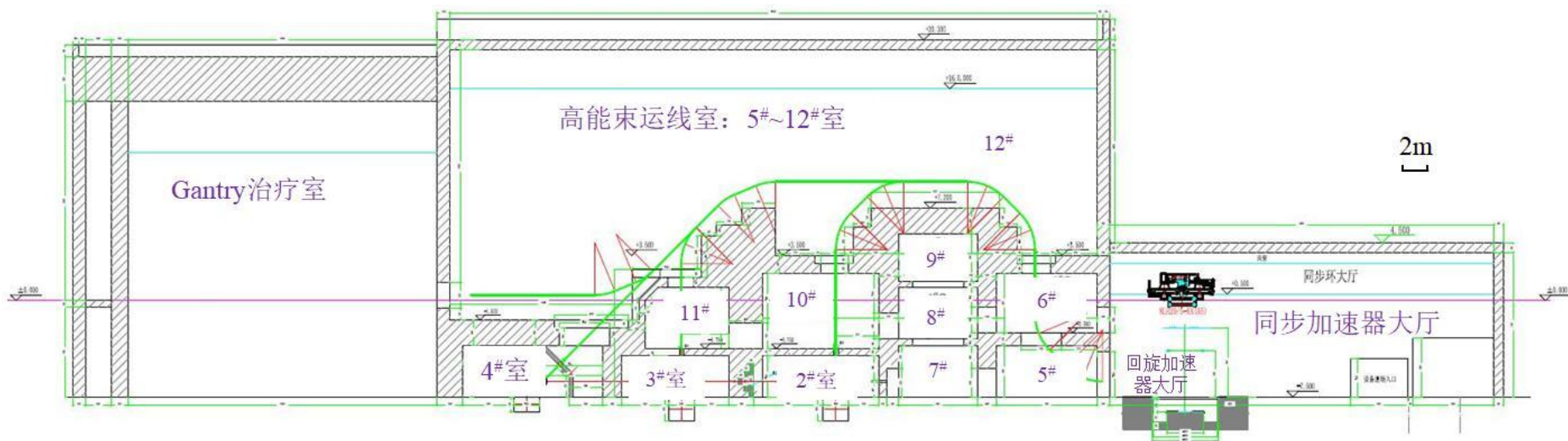


图 4.1-2 重离子加速器中心机房、治疗室的剖面图

4.1.1.2 辐射工作场所的分区管理

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的规定，应将辐射工作场所分为控制区和监督区。

项目单位按照 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》6.4 的规定要求，采用实体边界划定控制区和监督区。

①控制区：回旋加速器大厅、同步加速器大厅（含放射性固体废物暂存间）、5 个治疗室、高能束运线爬升区；

②监督区：

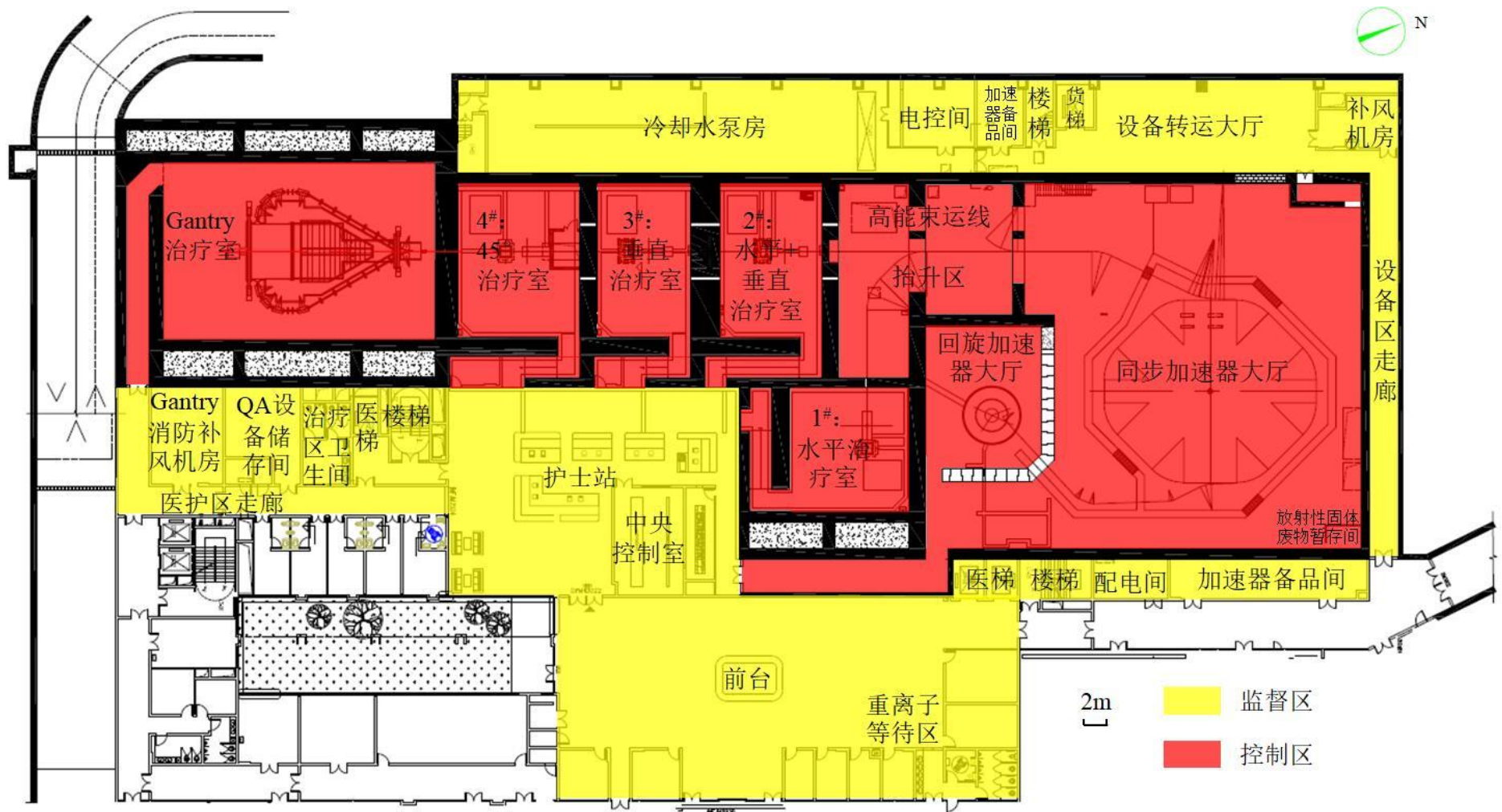
a、负一层：中央控制室、护士站、加速器备品间、配电间、楼梯、医梯、前台、重离子等待区、治疗区卫生间、QA 设备储存间、Gantry 消防补风机房、设备区走廊、补风机房、设备转运大厅、货梯、加速器备品间、电控间、冷却水泵房等；

b、一层：医护更衣室、诊室、楼梯、医梯、备用间、接待室、控制系统设备间、数据中心、UPS 配电间、运维办公室、电源间空调机房、护士办公室、Gantry 等候区、配电间、设备转运大厅、货梯、设备房等；

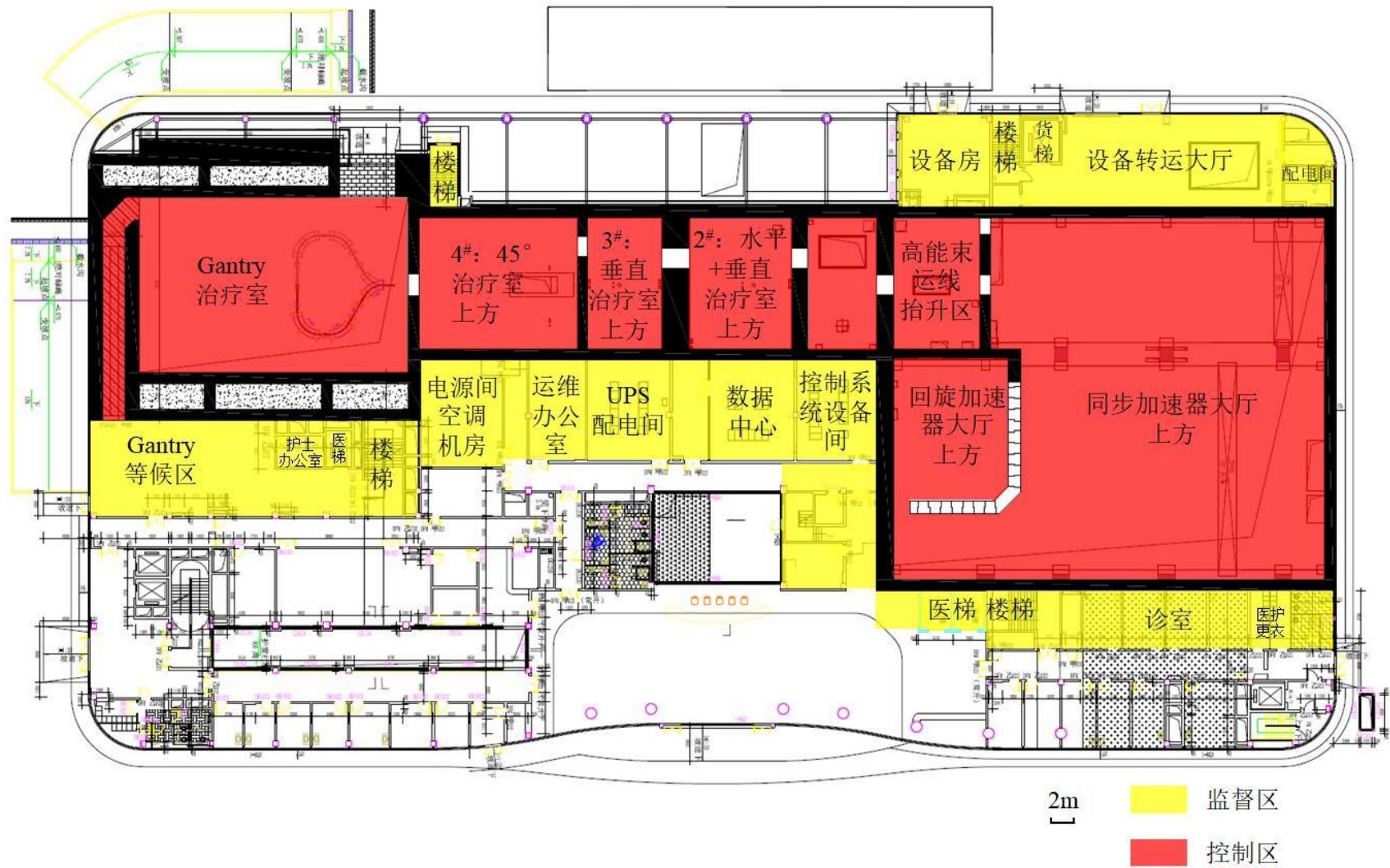
c、二层：气瓶间、重离子工艺变配电房、同步环电源间、重离子通用变配电房、设备区走廊、高能线电源间、预留 Gantry 电源间、楼梯、空调机房、UPS 间、网络机房等；

d、三层：上人屋面、设备区走廊、排烟机房、备用房、治疗室空调机房、Gantry 空调机房、楼梯、空调机房、加压风机房、会议室等。

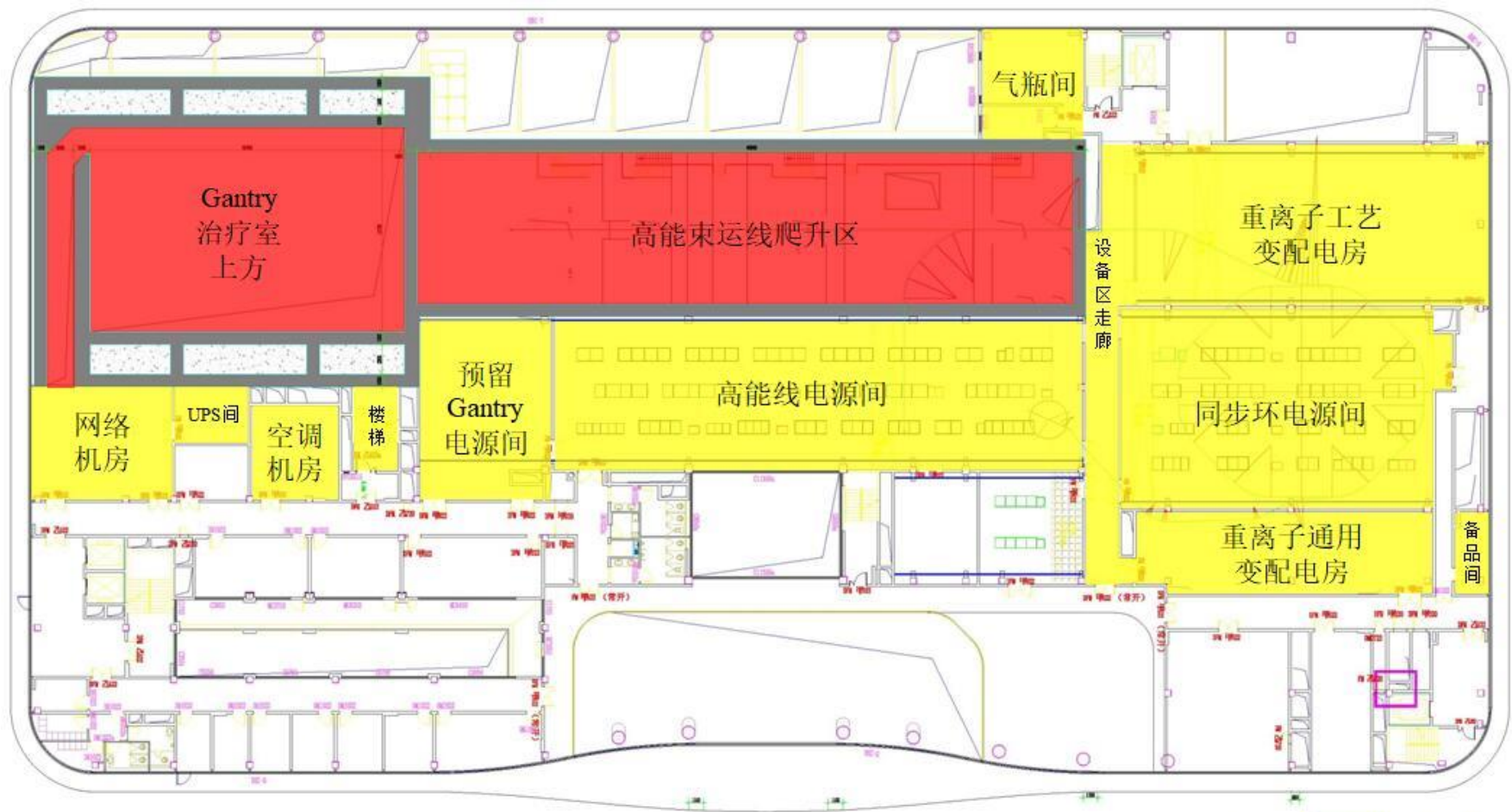
重离子治疗中心的辐射区具体分区平面图、剖面图如图 4.1-3、4.1-4 所示。



(a) 负一层

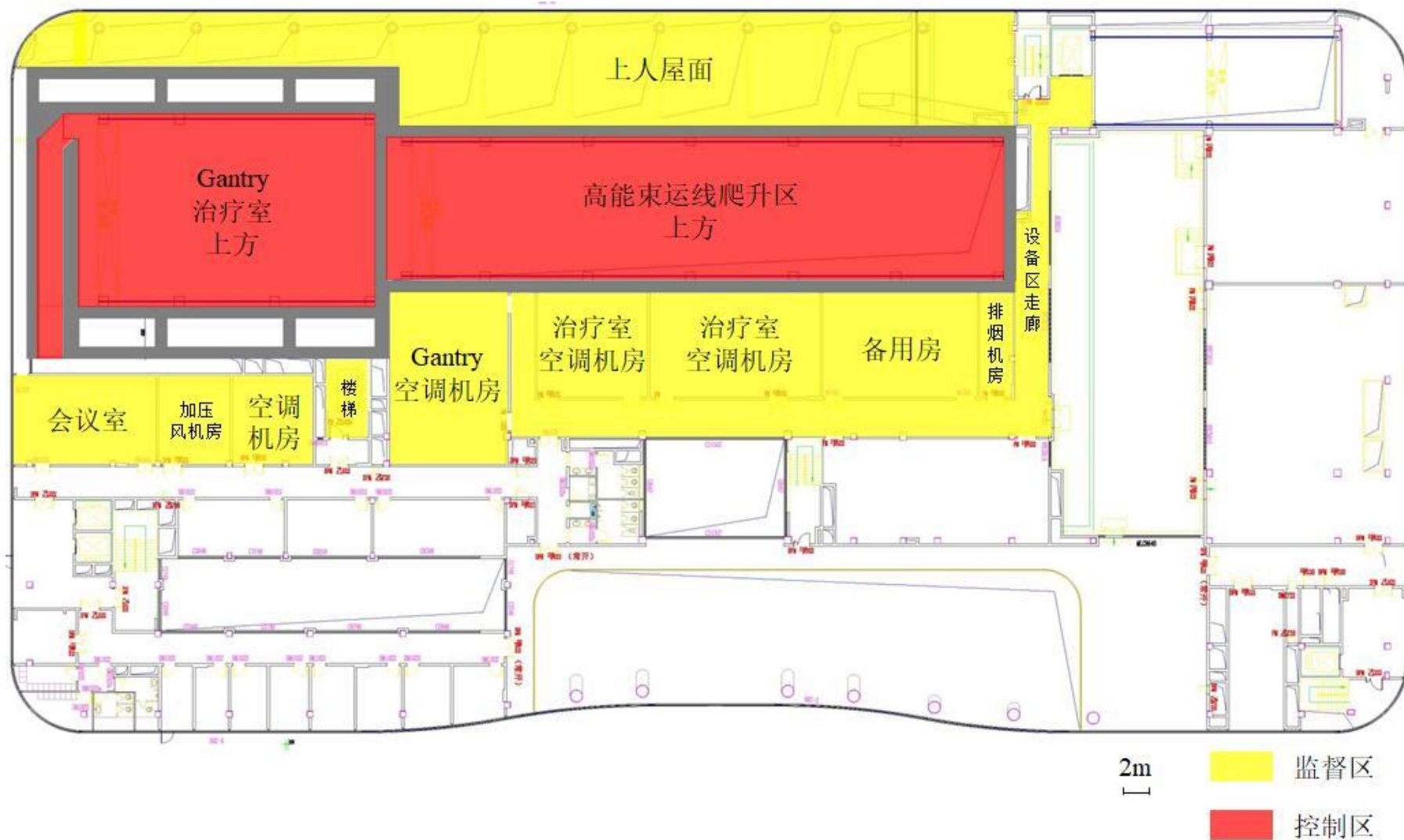


(b) 一层



2m
 1
 监督区
 控制区

(c) 二层



(d) 三层

图 4.1-3 重离子治疗中心的辐射防护分区平面图

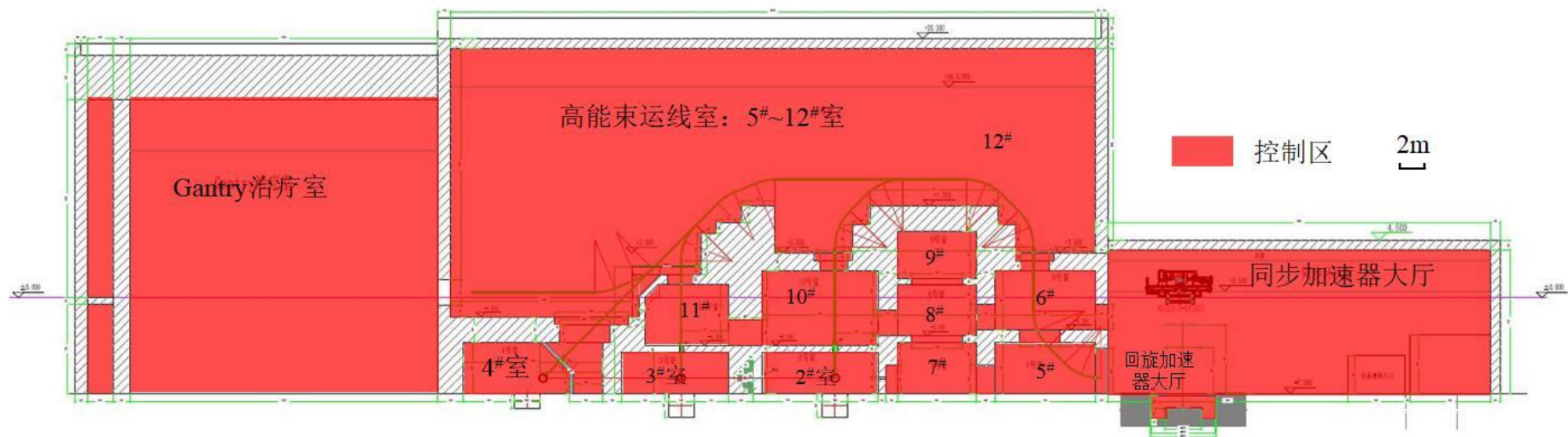


图 4.1-4 重离子治疗中心的辐射防护分区剖面图

4.1.2 屏蔽设计

重离子治疗中心主要放射工作场所不同墙体的屏蔽参数如表 4.1-1 所示。

表 4.1-1 主要放射工作场所防护屏蔽参数

房间	名称	材料	密度 (g/cm ³)	防护厚度 (cm)
回旋加速器大厅	北墙	混凝土	2.3	120cm 厚、200cm 高的混凝土活动屏蔽构件
	东墙	混凝土		120cm 厚、200cm 高的混凝土活动屏蔽构件
	南墙	混凝土		150cm
	西墙	混凝土		100cm
	天花板	混凝土		80cm
	地板	混凝土		-
同步加速器大厅	防护门	钢	-	加速器厅门口的迷宫设计已经达到了防护屏蔽要求，因此防护门没有添加特殊材料，厚 50mm。
	北墙	混凝土	2.3	80cm
	东墙	混凝土		100cm
	南墙	混凝土		150cm (靠 1 号治疗室)
	西墙	混凝土		100cm
	天花板	混凝土		80cm
地板	混凝土	-		
1#治疗室 (水平治疗)	防护门	钢	-	治疗室迷宫设计已经达到了防护屏蔽要求，因此防护门不需要添加特殊材料，厚 50mm。
	北墙	混凝土	2.3	150cm
	东墙	混凝土		430cm
	南墙	混凝土		(150+80) cm
	西墙	混凝土		80cm
	天花板	混凝土		200cm
地板	混凝土	-		
2#治疗室 (水平与垂直治疗)	防护门	钢	-	治疗室迷宫设计已经达到了防护屏蔽要求，因此防护门不需要添加特殊材料，厚 50mm
	北墙	混凝土	2.3	150cm
	东墙	混凝土		(170+80)cm
	南墙	混凝土		混凝土：140cm，铁：120cm (分 3 层梯形布置在墙内，每层 40cm，长宽分别为 50×50cm、150×150cm、300×260cm)
	西墙	混凝土		100cm
	天花板	混凝土		130cm
地板	混凝土	180cm		
3#治疗室 (垂直治疗)	防护门	钢	-	治疗室迷宫设计已经达到了防护屏蔽要求，因此防护门不需要添加特殊材料，厚 50mm
	北墙	混凝土	2.3	混凝土：140cm，铁：120cm (分 3 层梯形布置在墙内，每层 40cm，长宽分别为 50×50cm、150×150cm、300×260cm)
	东墙	混凝土		(170+80)cm
南墙	混凝土	150cm		

房间	名称	材料	密度 (g/cm ³)	防护厚度 (cm)
	西墙	混凝土		100cm
	天花板	混凝土		130cm
	地板	混凝土		180cm
4#治疗室 (45度治疗)	防护门	钢	-	治疗室迷宫设计已经达到了防护屏蔽要求, 因此防护门不需要添加特殊材料, 厚 50mm
	北墙	混凝土	2.3	150cm
	东墙	混凝土		(170+80)cm
	南墙	混凝土		200cm
	西墙	混凝土		100cm
	天花板	混凝土		280cm
	地板	混凝土		110cm
高能束运 线区	北墙	混凝土		100cm
	东墙	混凝土	100cm	
	南墙	混凝土	100cm	
	西墙	混凝土	100cm	
	天花板	混凝土	80cm	
	地板	混凝土	-	
Gantry 治 疗室	一层防 护门	钢		治疗室迷宫设计已经达到了防护屏蔽要求, 因此防护门不需要添加特殊材料, 厚 50mm
	负一层 防护门			
	北墙	混凝土	200cm	
	东墙	混凝土	430cm	
	南墙	混凝土	(130+100)cm	
	西墙	混凝土	390cm	
	天花板	混凝土	350cm	
地板	混凝土	150cm		

同步加速器大厅东南侧的 1#、西北侧的 2#迷宫的屏蔽设计见图 4.1-5~4.1-6。5 个治疗终端迷宫的屏蔽设计见图 4.1-7~4.1-11。

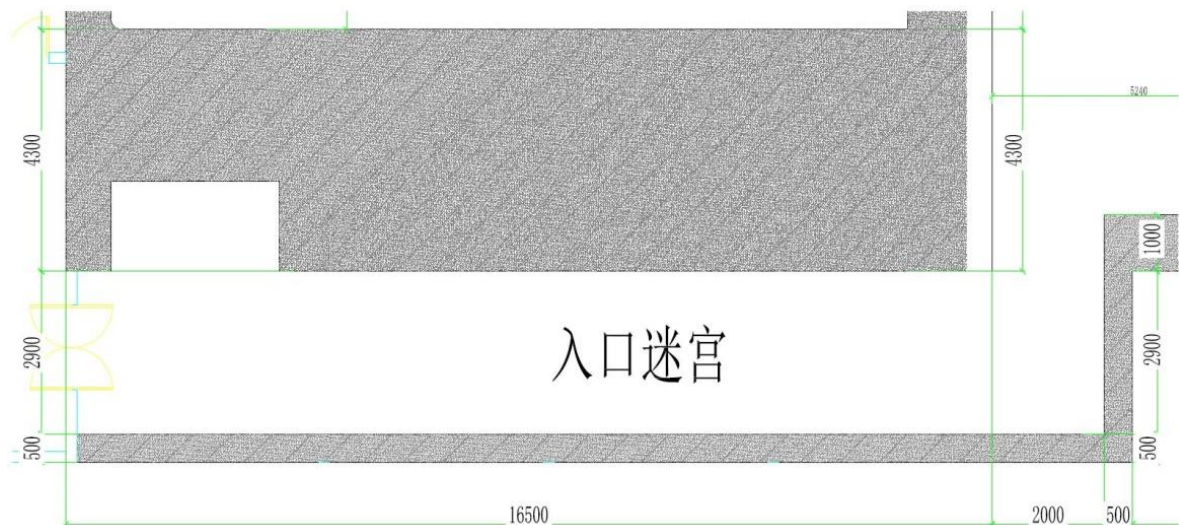


图 4.1-5 同步加速器大厅东南侧 1#迷宫屏蔽设计图

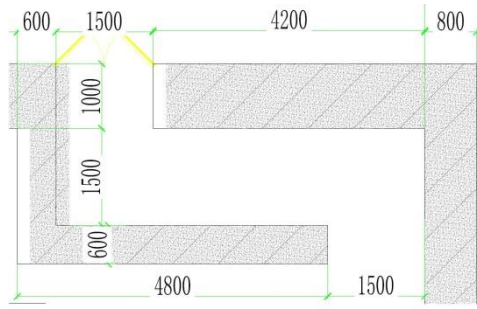


图 4.1-6 同步加速器大厅西北侧 2#迷宫屏蔽设计图

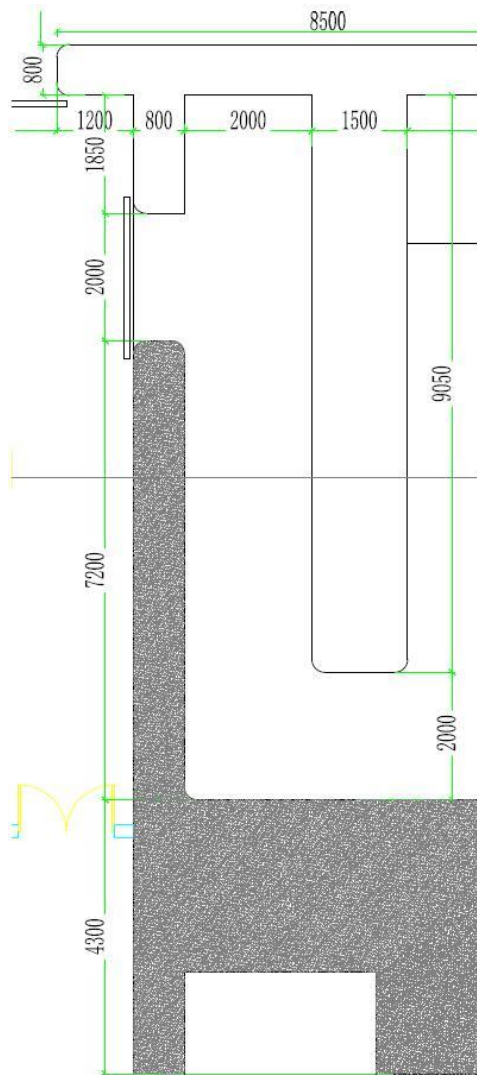


图 4.1-7 1#治疗室迷宫屏蔽设计图

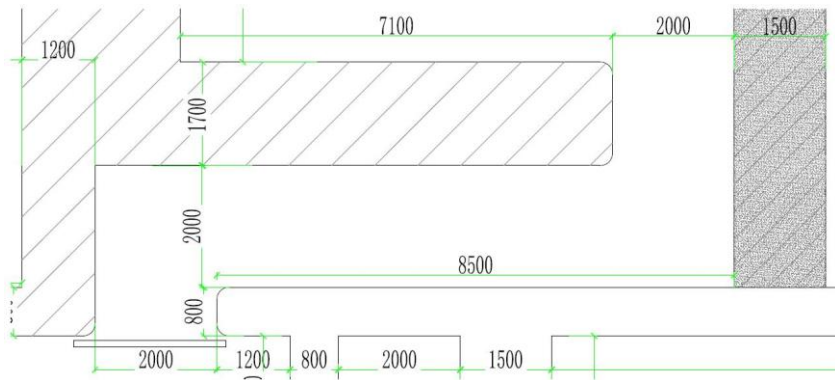


图 4.1-8 2#治疗室迷宫屏蔽设计图

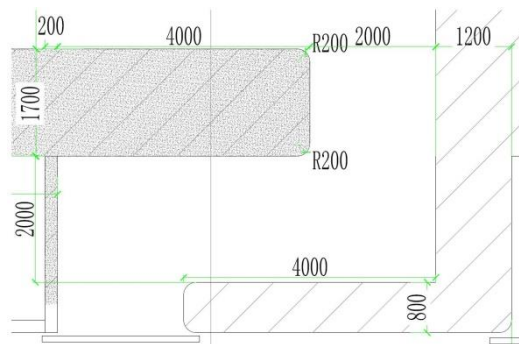


图 4.1-9 3#治疗室迷宫屏蔽设计图

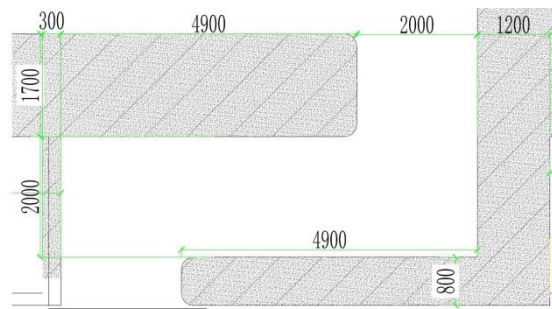


图 4.1-10 4#治疗室迷宫屏蔽设计图

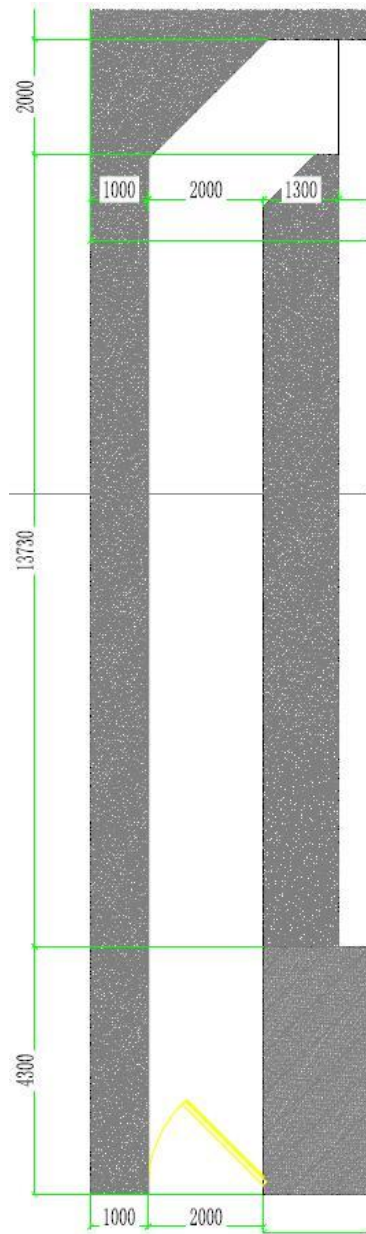


图 4.1-11 Gantry 治疗室迷宫屏蔽设计图

电缆穿墙设计的位置均在束流损失比较弱、瞬时剂量率较低的位置。穿墙时利用小迷宫结构进行屏蔽补偿，不会影响整体屏蔽效果。

循环冷却水系统只有一处在高能线部分穿墙到达加速器大厅，穿墙尺寸为 $0.4\text{m} \times 0.6\text{m}$ ，此处无集中束流损失，且冷却水起到一定的屏蔽补偿，故对屏蔽基本无削弱作用。

治疗室通风系统贯穿墙体时走迷宫，对屏蔽无影响。加速器大厅通风系统从天花板辐射较弱地方穿出后，顶部风井密封，在墙外做小迷宫

进行屏蔽补偿，仍然满足屏蔽要求。加速器大厅通风系统补偿结构图见图 4.1-12。

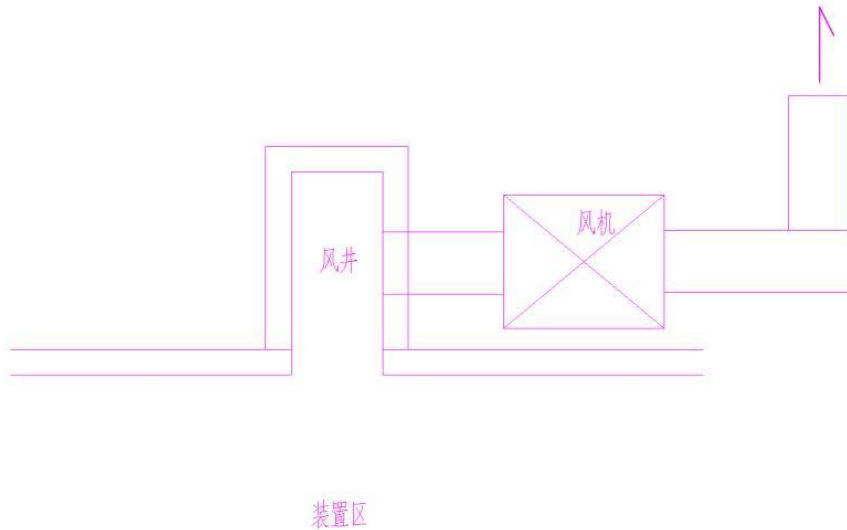


图 4.1-12 加速器大厅通风系统屏蔽补偿结构图

4.2 辐射安全与防护措施

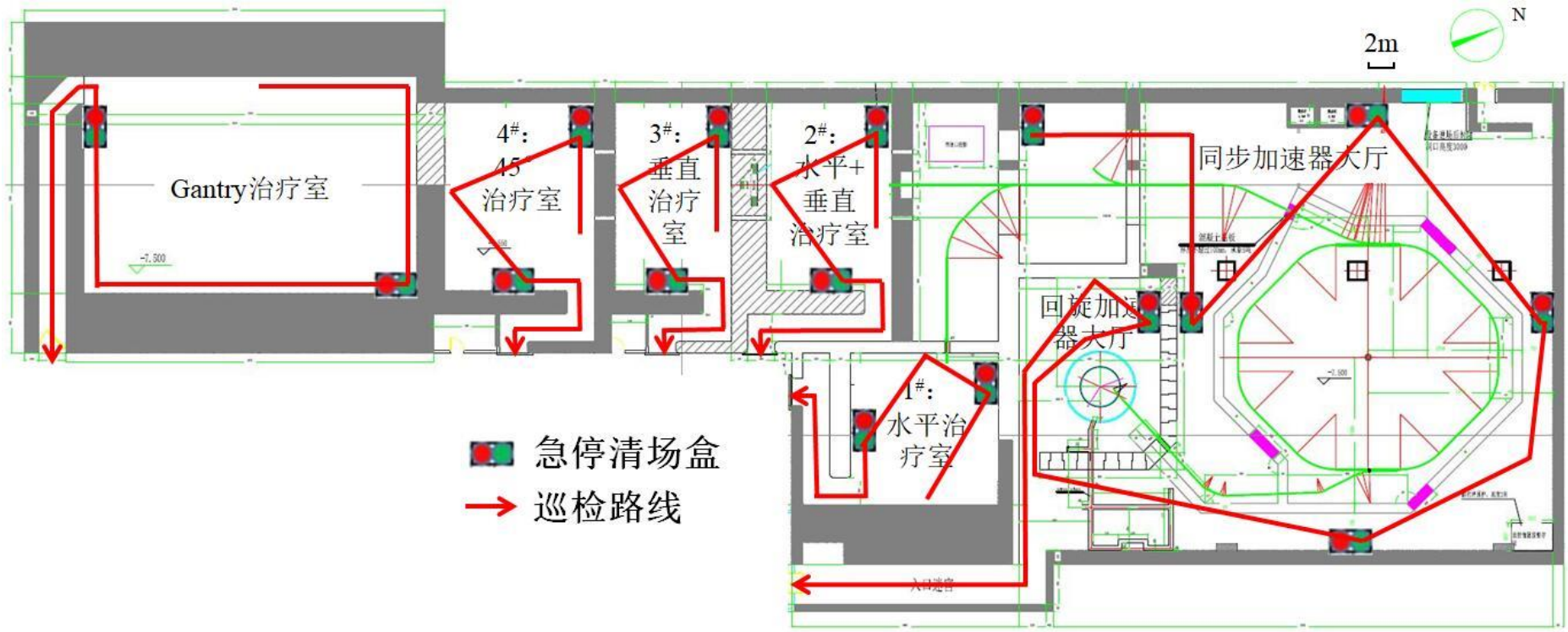
本项目重离子治疗加速器设计采取安全联锁、紧急停机、束流闸分区控制、警报装置、“清场”确认按钮等设备和手段。

(1)门机联锁：本项目重离子治疗加速器遵循门与束流联锁的原则，即当某一控制区需要供束前，巡检人员需进入此区域进行巡检，巡检完成后（无人员在此区域滞留后）关门，此区域方可允许供束；反之，当此区域有人工作时，门开启且未完成巡检，束流无法被送至相应区域。

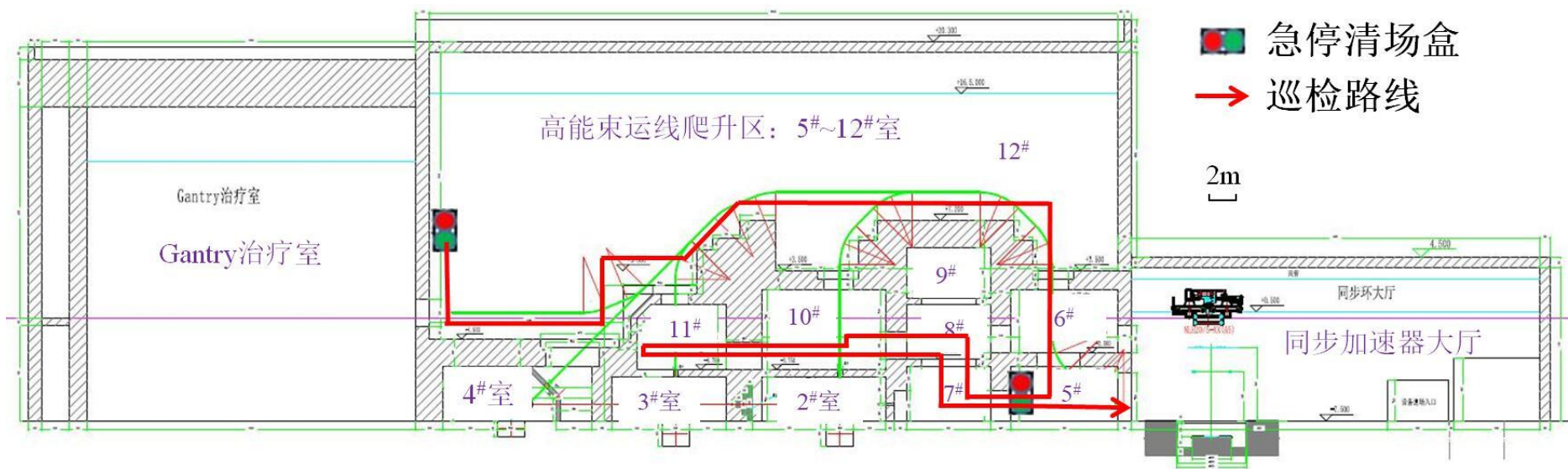
重离子加速器巡检时，1[#]~4[#]治疗室均只涉及到负一层，Gantry 治疗室涉及到负一层和一层，加速器大厅涉及到负一层，高能束运线爬升区涉及到负一层、一层和二层。巡检 1[#]~4[#]治疗室时，巡检人员首先从迷宫进入治疗室，走向最内侧的清场盒，按下后从一侧绕场半周，接着按下第一迷宫墙上的清场盒，同时目视另一侧是否有异常状况，最后从迷宫原路返回。巡检 Gantry 治疗室时，巡检人员首先从一层迷宫进入治疗

室，走向最内侧，之后从一侧绕场半周，到达第一迷宫墙，同时目视另一侧是否有异常状况，最后从负一层迷宫返回。巡检加速器大厅时，巡检人员首先 1[#]迷宫口进入回旋加速器大厅，径直由同步加速器大厅、负一层的 5[#]室、一层的 6[#]室到达二层 12[#]室；按下 12[#]室最内侧的清场盒后，原路返回 5[#]室；由 5[#]室出发，依次巡检负一层的 7[#]室、一层的 8[#]室、10[#]室、11[#]室后原路返回 5[#]室；按下 5[#]室内侧的清场盒，返回同步加速器大厅；接着绕同步加速器大厅一周，依次按下四周墙上的清场盒，再进入回旋加速器大厅；绕场半周后按下回旋加速器大厅最内侧的清场盒，最后从 1[#]迷宫口原路返回。

重离子加速器巡检路线图见图 4.2-1。



(a) 平面图



(b) 剖面图

图 4.2-1 重离子加速器巡检路线图

设计采用束流闸与辐射区的门联锁，重离子治疗加速器束流闸分布图见图 4.2-2。其中，B1 为同步加速器引出束流闸，B2 为 1#治疗室闸，B3、B4 为 2#治疗室水平、垂直方向闸、B5 为 3#治疗室闸，B6 为 4#治疗室闸，B7 为 Gantry 治疗室闸，分别控制对应治疗终端束流的有无。

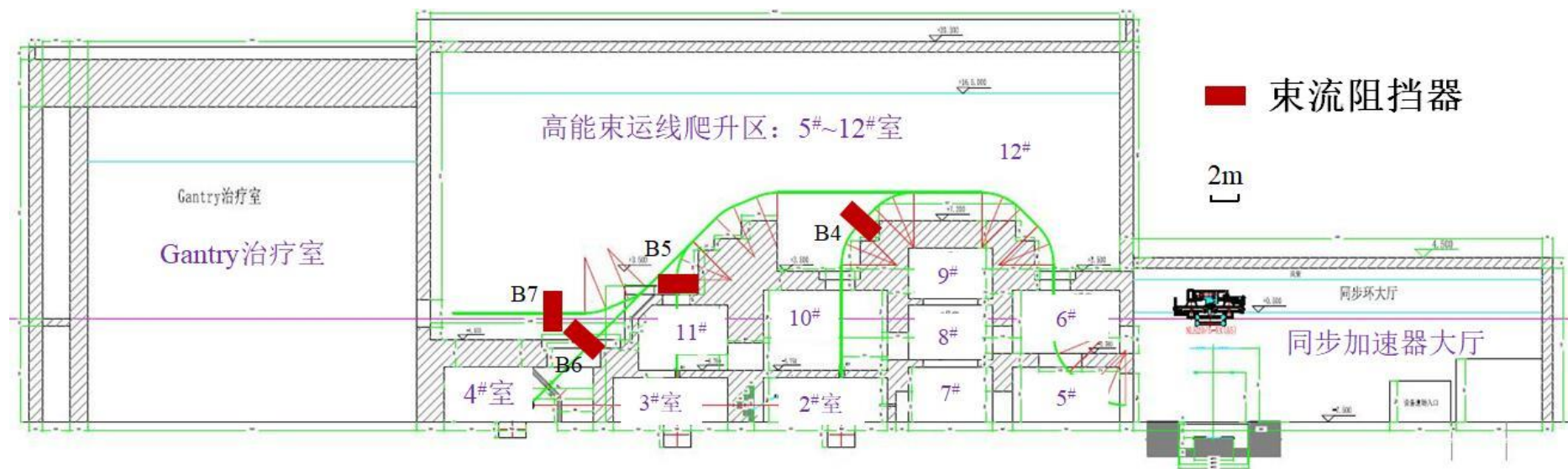
重离子加速器开机的条件为：区域内紧急按钮全部未按下，且区域内清场按钮全部按下，且区域各门磁开关全部关闭，且区域钥匙全部开启，且区域 ECR 总钥匙开启。

治疗室出束时，束流闸开启的条件为：区域内清场按钮全部按下，且区域内紧急按钮全部未按下，且区域各通道门全部关闭，且区域总钥匙开启，且治疗室控制台允许出束。

束流闸关闭的条件为：区域内任意紧急按钮被按下，或区域各通道门被内侧开门按钮打开，或治疗室控制台急停按钮被按下。若出现意外情况，B1 束流闸、对应治疗室的束流闸均关闭，以保证安全联锁措施的冗余性。



(a) 平面图



(b) 剖面图

图 4.2-2 重离子加速器束流闸分布图

(2)剂量连锁：进入辐射区域的门与现场剂量率监测信号和个人剂量连锁。即某一区域有束流时（此时监测到有辐射剂量率）或即便在无束流的状态但区域辐射剂量率超过所设阈值（中子、 γ 剂量率任一数值超过 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ）时，工作人员不能进入该区域（相应控制区域的门不能被打开）。个人剂量连锁可以保障受照剂量超过年剂量限值的工作人员不能进入放射性工作区域。具体来说，个人剂量管理平台可实现工作人员 IC 卡和个人剂量计的自动绑定，以及每次进入加速器区域剂量的自动累加统计。人员进入控制区前，控制系统会确认其身份，根据服务器内的个人剂量数据进行判断，当某一个人的个人剂量值超限时，不允许其进入加速器区域，以保证人员的安全。重离子加速器固定式辐射监测设备布局图见图 4.2-3。

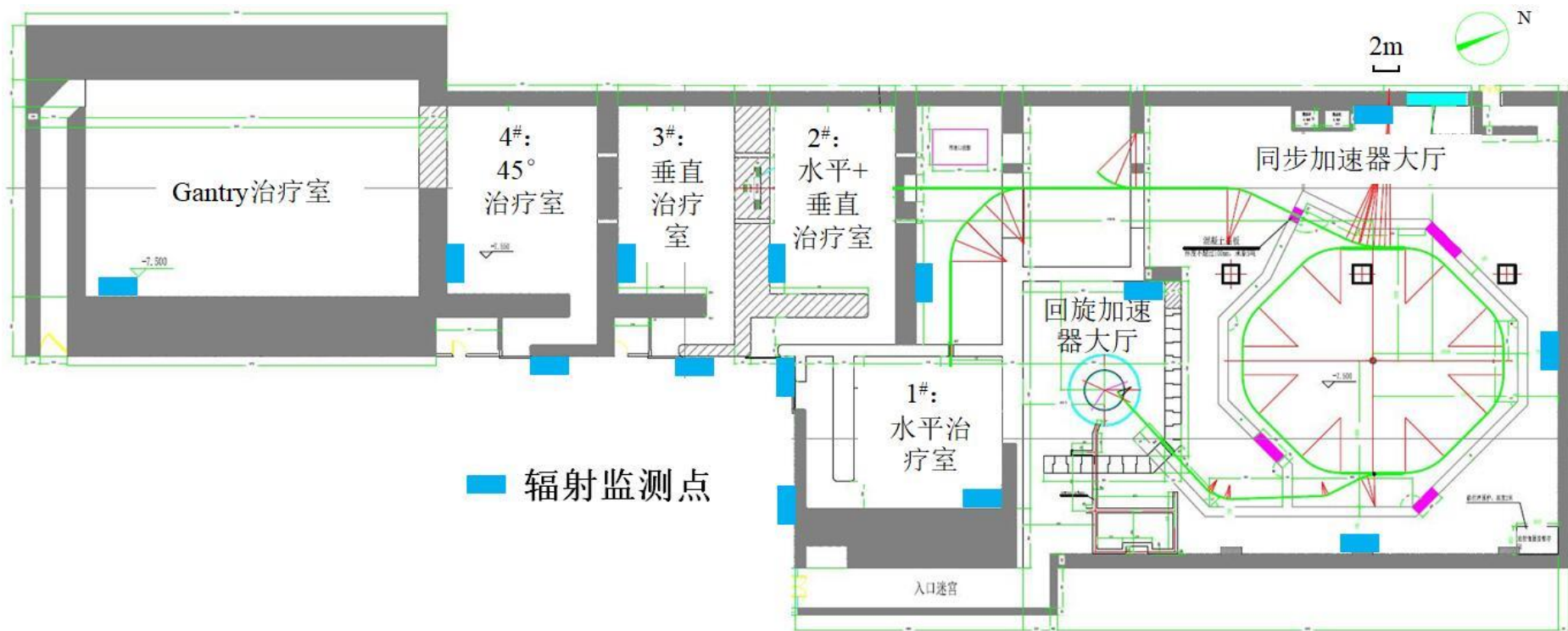


图 4.2-3 重离子加速器固定式辐射监测设备布局图

重离子加速器辐射安全联锁逻辑图（出束条件）见图 4.2-4，重离子加速器辐射安全防护设施见表 4.2-1 和图 4.2-5，重离子加速器清场工作流程图见图 4.2-6。

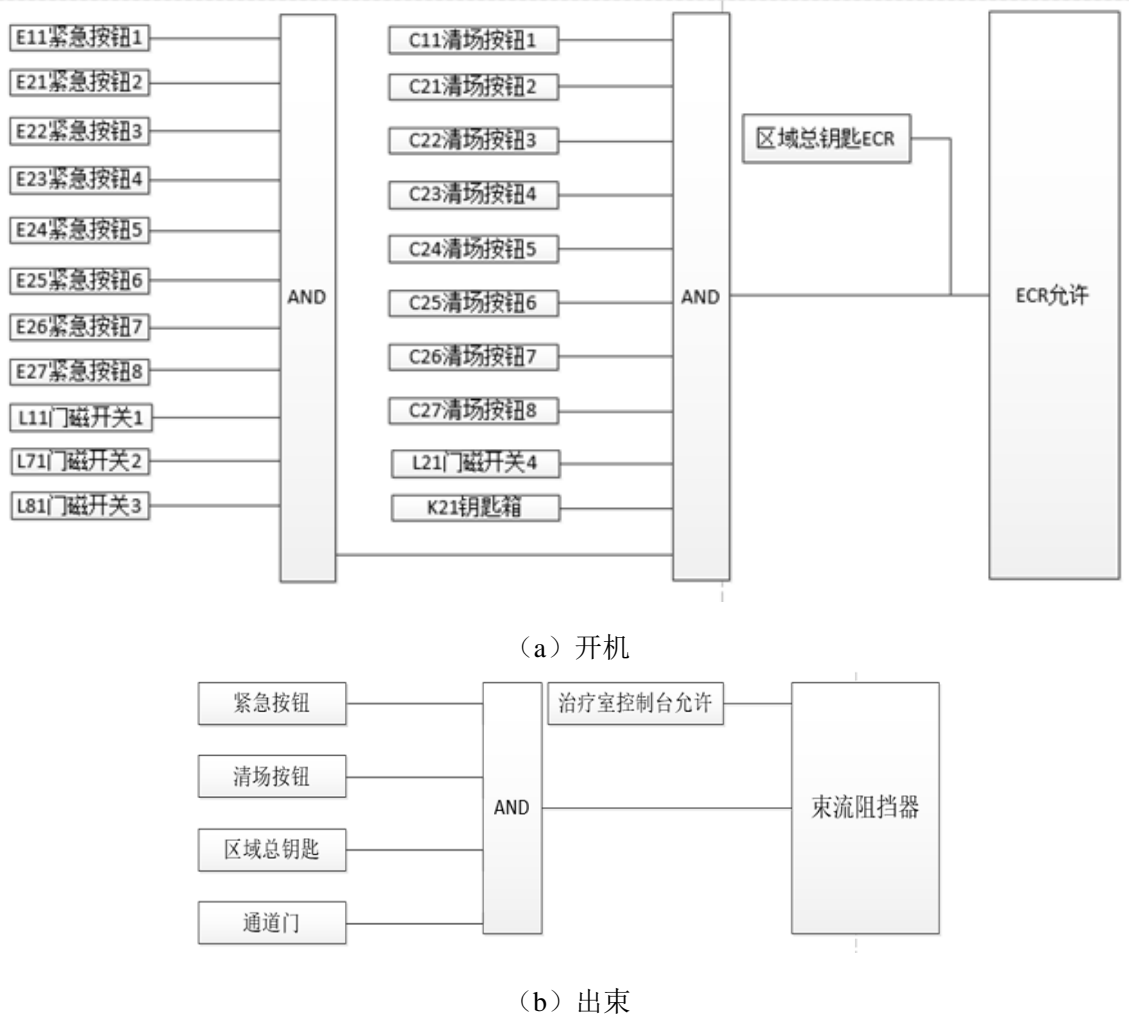
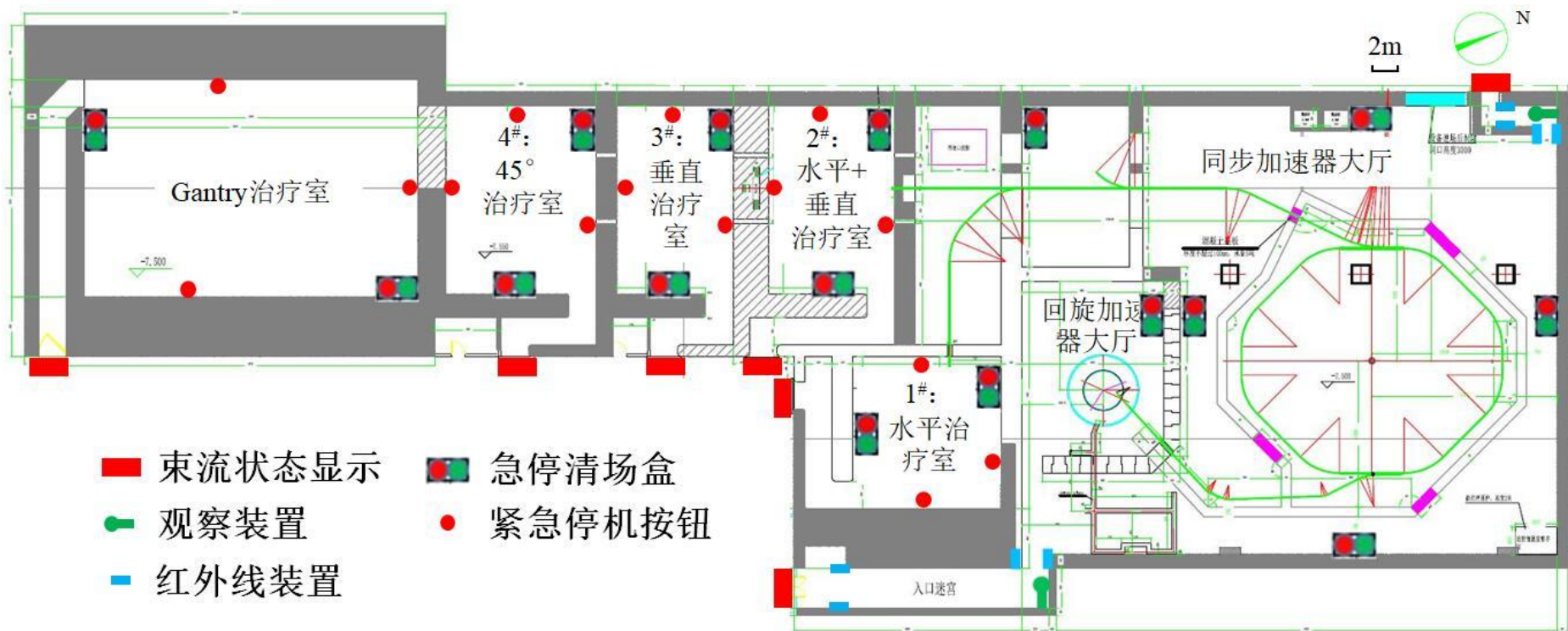


图 4.2-4 重离子加速器辐射安全联锁逻辑图（出束条件）

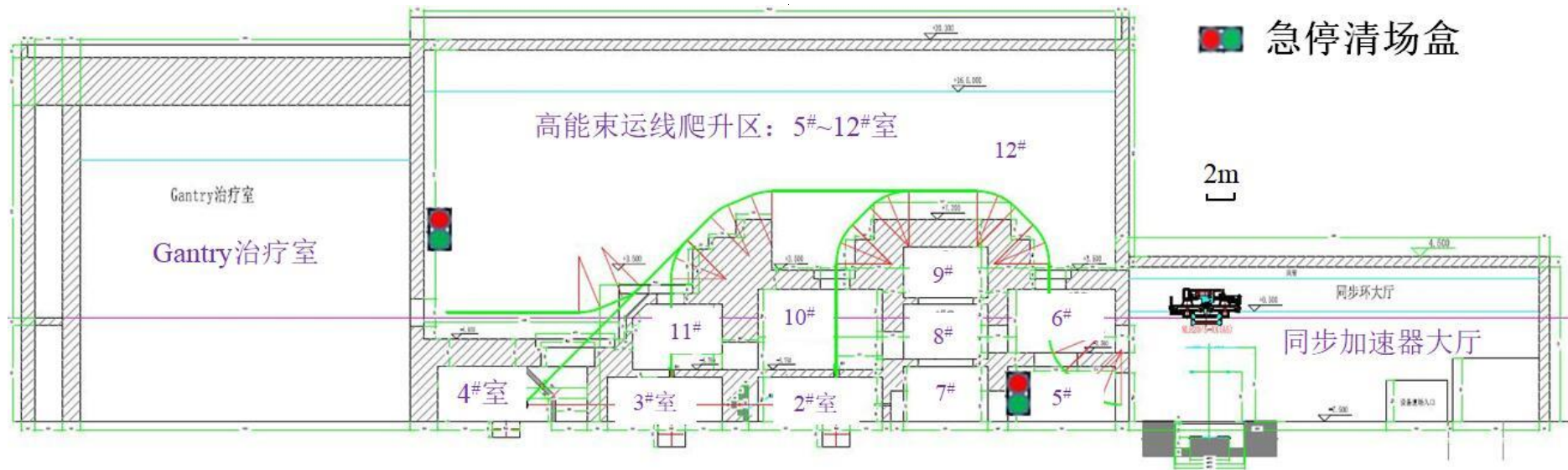
表 4.2-1 重离子加速器辐射安全防护设施一览

防护设备	治疗室	加速器大厅
联锁门	6	2
急停清场盒（包含巡检及紧急 停机按钮）	5×2	7
紧急停机按钮	5×5（急停清场盒内也含有）	7（急停清场盒内也含有）
束流状态显示	6（治疗室门口）	2（加速器大厅门口）
红外线装置	0	2（加速器大厅迷宫）
摄像头（观察装置）	0（治疗系统已集成，无死角 监控）	2（加速器大厅迷宫）
警报装置（声光报警灯）	0	7
电离辐射标志	6（门）	2（门）
开门按钮	6×2（门内及门外）	2（门内）



- 束流状态显示
- 急停清场盒
- 观察装置
- 紧急停机按钮
- 红外线装置

(a) 平面图



(b) 剖面图

图 4.2-5 重离子加速器辐射安全防护设施

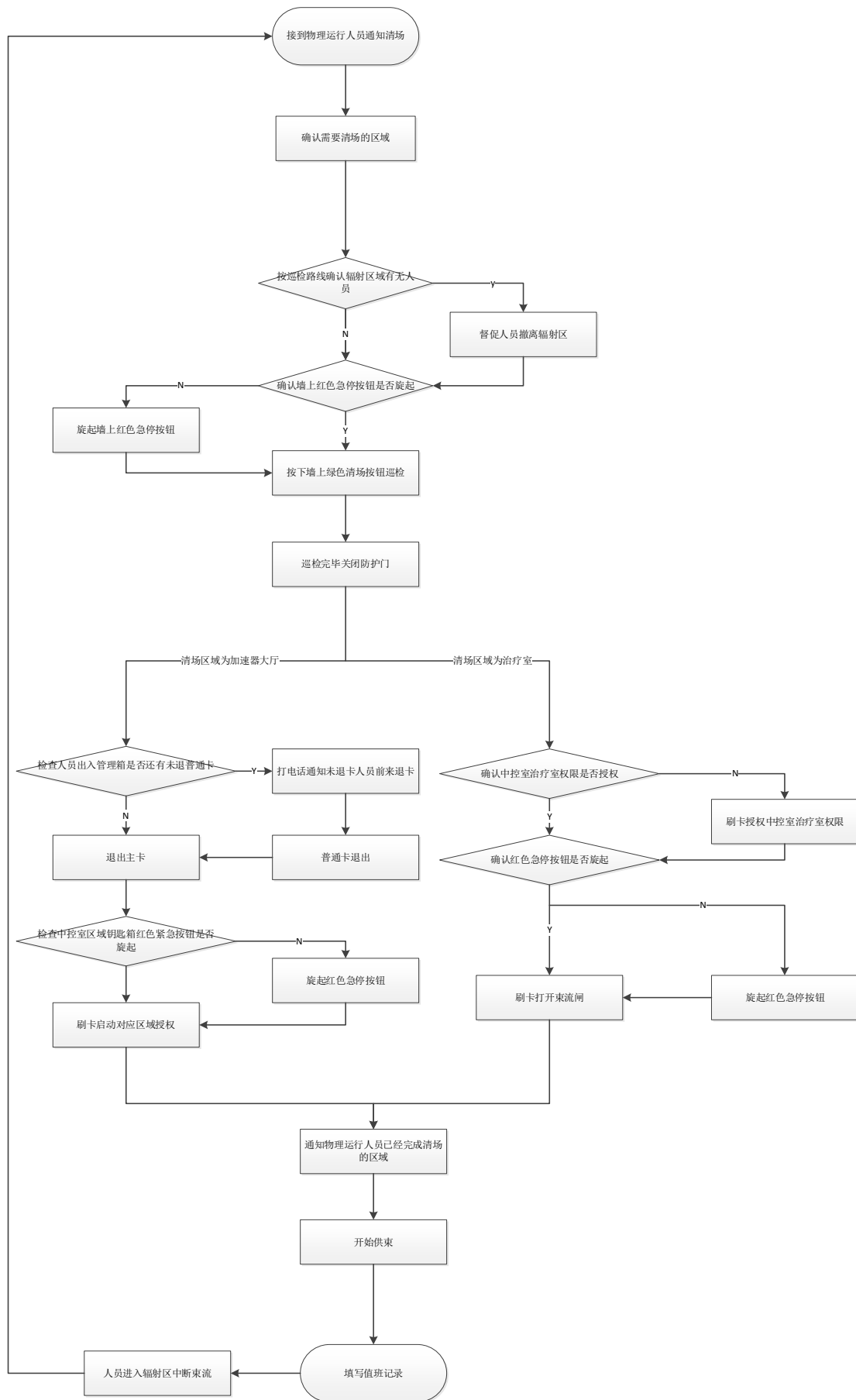


图 4.2-6 重离子加速器清场工作流程图

(3)紧急停机和开门

本项目重离子治疗加速器拟在控制室的控制台、加速器大厅、束流输运通道、治疗室迷宫出入口、防护门内侧及四周墙壁等场所均匀布设紧急停机按钮（见图 4.2-5），在人员来不及离开或者在加速器开机之后仍有工作人员在大厅内的紧急情况下，可就近按下紧急停机按钮来切断加速器运行或治疗室出束，防止或尽量减少人员的受照剂量。急停按钮有醒目的“紧急停机按钮”标识，以便人员观察和触发。

各治疗终端和加速器大厅内部近门处设有紧急开门按钮，在紧急情况下可保障人员快速撤离。加速器大厅及治疗室防护门具有红外感应功能，在人员进出时红外感应触发，防护门无法关闭，人员离开时，防护门自动关闭，可有效防夹伤。

③ “清场” 确认按钮

“清场”确认按钮均匀分布于加速器大厅及治疗室中。加速器大厅“清场”按钮主要功能为在加速器准备开机前进行整个加速器大厅的安全巡检（即清场）活动，在按下清场按钮后对应声光报警灯期间发出进行声光警示，提醒加速器联锁区域内未离开人员迅速撤离。巡检一圈后，“清场”确认按钮将被全部打开。此时，加速器可进行开机操作。治疗室内清场按钮用于治疗室供束前搜索对应区域无人员滞留后按下清场按钮。巡检一圈后，“清场”确认按钮将被全部打开，此时可进行治疗室出束操作。加速器大厅和治疗室根据实际运行情况系统设置清场巡检的最长响应时间，若超过最长响应时间，则巡检人员需重新巡检。

④警告警示装置

本项目重离子加速器拟在人员通道、辐射区域门口、控制室等地方设置辐射标志牌、运行状态显示灯、大型荧光显示等警告警示装置，直观、明显地显示加速器的工作状态、束流走向和工作模式，以及各处的剂量水平等信息，提示相关人员不要误入，防止人员受到不必要的照射。

⑤ 监视和对讲设备

本项目拟在回旋加速器大厅、同步加速器大厅、5 个终端治疗室安装监视和对讲设备。监视设备可监控辐射区内人员滞留状况，观察各种设备运行状态，并对进入辐射区的人员进行定位。对讲设备可使人员间的沟通更加便捷有效。

此外，建设单位针对本项目重离子治疗加速器的安全运行，提出了以下辐射安全运行保障措施：

(1) 加速器开机前必须拉警报、清场、锁门，确保加速器大厅内无人后才能启动加速器；治疗终端出束前必须清场、锁门，确保治疗室内无工作人员后才能开启治疗室束流闸；

(2) 加速器开机前必须进行安全联锁系统检查，保证工作正常，加速器大厅各人员出入口安装的警告警示牌工作正常；

(3) 门的限位开关在门关上后不能立即接通联锁，需确保控制室的控制台急停按钮复位才能接通；紧急停机按钮按下后即处于断开状态，需安全人员到当地进行复位并通过控制台才能重新开机；

(4) 对辐射安全系统进行定期检查或维修，时间间隔不得超过 6 个月，安全联锁系统必须每年进行二次失效检查，并应做好检查记录；

(5) 没有特殊理由，不得旁路联锁系统，因工作需要旁路联锁系统时，必须经过辐射安全管理机构的批准，并且将旁路联锁的名称、原因、时间和日期以及执行人和批准人签字等内容记录到加速器运行日志中，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试；

(6) 加速器供调束期间，现场设备需抢修，由当班值班长安排切断束流，并向防护值班人员下达开门指令；防护值班人员登记人数及时间，检查个人剂量报警仪及佩戴个人剂量计等是否完备，并与值班长进行确认后开门；抢修完成后，由防护值班人员清点人数及记录时间，确认人员全部出来后报告值班长；

(7)为降低感生放射性对工作人员的影响，加速器停机后，在运维工作人员进入加速器大厅前，应先对该区域以 5 次/h 的换气次数通风 5min；治疗室通风常开（换气次数 5 次/h），停束后，医护工作人员、运维工作人员应延迟 2min 进入治疗室；由中央控制室定时解锁，保障延迟开门的功能；

(8)加速器运行人员、检修人员及医护人员须佩戴外照射个人剂量计才能进入控制区；

(9)检修活化部件，应严格遵守操作程序，并做好相应的辐射监测，必要时须采取一定的个人防护措施；

(10)进行检修或操作放射性工作后要及时洗手；

(11)对检修中产生的放射性废物，不能乱丢乱放，应及时收集存放在指定的容器内；

(12)不得把被污染的设备、工具随意带入非放射区，需要携出加工、检修或处理的物品，必须按辐射防护人员监测后的意见处理。

此外，根据放射诊疗实践活动的辐射特点，环评提出以下对医护人员和病人应采取的辐射防护措施要求：对于放射诊断，应根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》附录 G 规定的放射诊断医疗照射指导水平进行优化，确保患者受到的照射剂量是达到预期诊断目标的最小照射剂量；对放射治疗，在对计划照射的靶体积施以所需要的剂量的同时，使正常组织在放射治疗期间所受到的照射控制在可合理达到的尽量低水平。

由于重离子加速器会产生感生放射性气体，因此治疗室应采取负压通风的方式。加速器运行时，加速器大厅空调通风系统处于封闭循环状态，并保持装置区在一定的负压状态，以防止活化空气的泄漏（此模式下，排风换气次数设计为 0.5 次/h）；当加速器停机后以上区域才通风（换气次数 5 次/h），正常情况下通风 5min 后工作人员才可进入。治疗室和

监督区应当始终保持负压通风的状态（治疗室换气次数 5 次/h），所有的新风入口应安装过滤膜，以去除空气中的气溶胶。

本项目放射性固体废物暂存间位于同步加速器大厅东北角，和同步加速器大厅辐射防护分区相同，彼此之间不存在气流组织问题，所以可共享大厅的通风系统，保证放射性固体废物暂存间满足《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》（GB11928-1989）中的定期通风要求。

感生放射性气体由通风系统收集，经两级过滤（每级颗粒物过滤效率为 90%）后，由屋顶标高为 24.6m 的 7 个排气筒向周围大气排放。加速器大厅和终端治疗室排风量合计 58000m³/h，排气筒排风速率为 6~8m/s。最南侧的排气筒负责 Gantry 治疗室排风，其西北侧的排气筒负责 1#~4#治疗室排风，北侧 5 个排气筒负责加速器大厅及高能束运线爬升区的排风。

通风系统的平面布局见图 4.2-7，竖向布局见图 4.2-8。

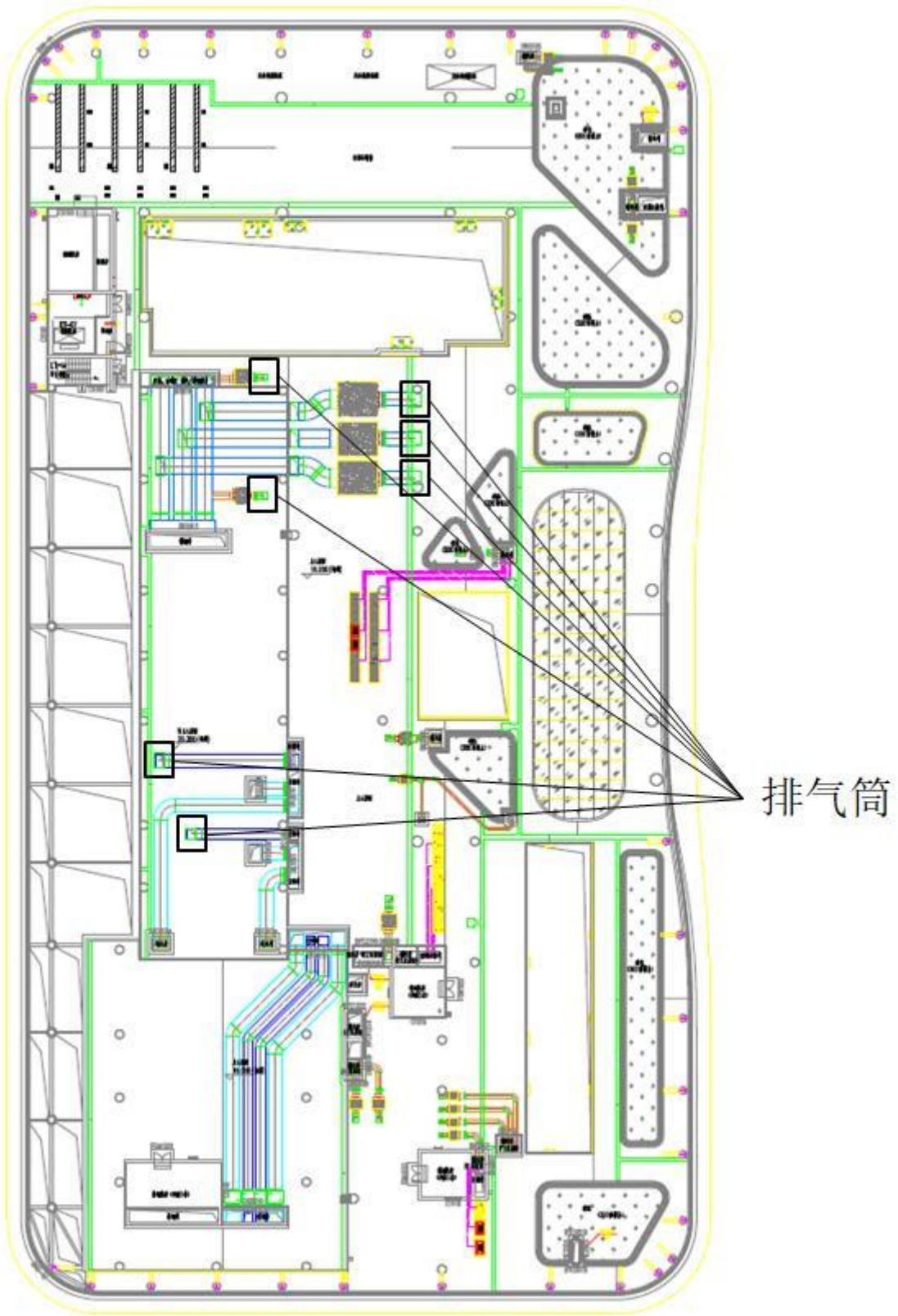


图 4.2-7 通风系统平面布局图

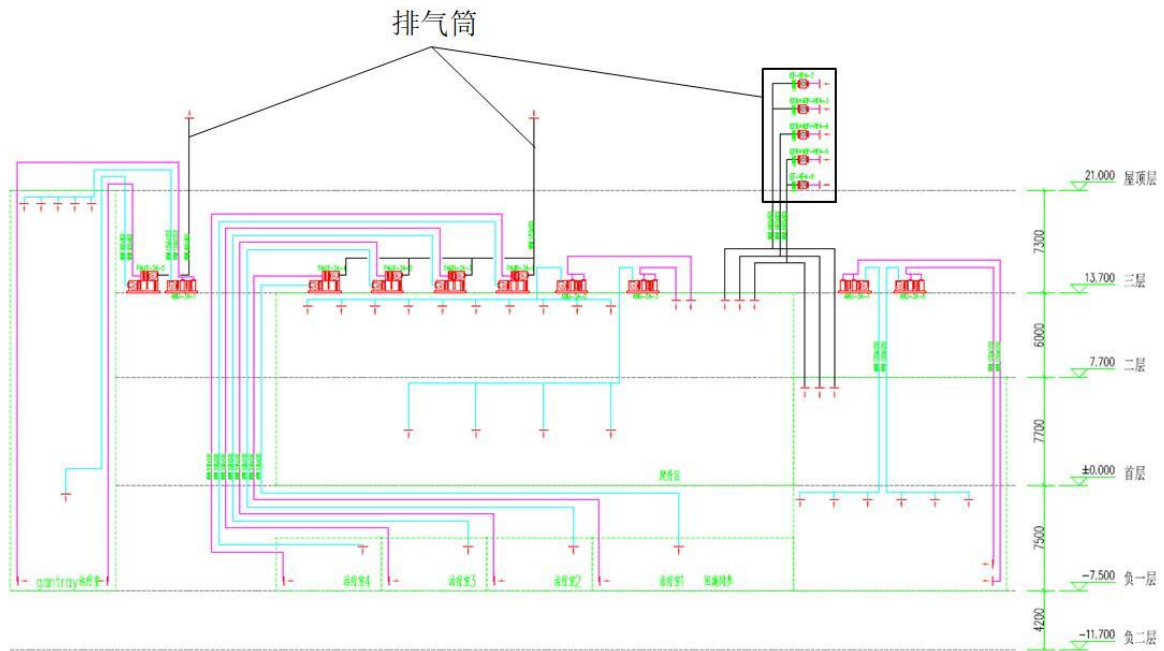


图 4.2-8 通风系统竖向布局图

本项目的辐射安全与防护措施种类多样，留有足够的冗余度，并互相独立，在运行期能对辐射工作人员和公众辐射安全起到积极的作用。

4.3 三废的治理

4.3.1 放射性污染物治理措施

4.3.1.1 放射性废气治理措施

本项目重离子治疗加速器运行将产生感生放射性气体。加速器运行时，重离子加速器的治疗室始终保持负压通风状态（总排风量为 $8000\text{m}^3/\text{h}$ ，换气次数 $5\text{次}/\text{h}$ ），及时排出产生的感生放射性气体；同步环大厅和回旋加速器大厅空调通风系统处于封闭循环状态，并保持装置区在一定的负压状态，以防止活化空气的泄漏（此模式下，排风换气次数设计为 $0.5\text{次}/\text{h}$ ）；当加速器停机后以上区域才通风换气（排风量为 $50000\text{m}^3/\text{h}$ ，换气次数 $5\text{次}/\text{h}$ ），以尽量减少放射性核素的排出。放射性气态流出物从排风系统经二级过滤（每级颗粒物过滤效率为 90% ）后，由重离子治疗中心屋顶标高 24.6m 的 7 个排气筒排入大气环境。重离子加速器运行产生的气态感生放射性核素多为短半衰期核素（主要是 ^{11}C 、

^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等核素), 排入环境后很快衰变消失, 经估算对公众的辐射影响很小 ($2.72 \times 10^{-5} \text{mSv/a}$), 完全满足国家相关标准的要求。项目拟采取的放射性废气处理措施是合理可行的。

4.3.1.2 放射性固体废物治理措施

本项目重离子治疗加速器运行将产生加速器检修更换下来的如束流装置、靶件等含感生放射性的结构部件、失效的冷却水净化树脂、加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等含放射性的固体废物。项目单位拟在同步加速器大厅内的东北角设置放射性固体废物暂存间 (尺寸 $3\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$), 暂存产生的放射性固体废物。项目单位应按照《城市放射性废物管理办法》的相关要求, 产生的放射性固体废物经分类收集、包装后, 装入带有分类标记的专用口袋或容器, 送入放射性固体废物暂存间暂存。对于加速器结构部件及靶件暂存一段时间, 若可回用则维修后继续使用, 若不可回用, 则送福建省放射性废物库处置; 冷却水交换树脂最终送福建省放射性废物库处置; 加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩属低放废物, 暂存一段时间, 最终送福建省放射性废物库处置; 废过滤器由厂家人员更换后, 最终送福建省放射性废物库处置。项目单位拟采取的放射性废物处理措施可行。

4.3.1.3 放射性废水治理措施

本项目重离子加速器所用冷却水为去离子水, 冷却水循环使用, 不外排。事故及系统检修情况下, 冷却水流入位于同步加速器大厅西侧的放射性废水收集池 (两个, 尺寸 $2\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$, 池底采用聚合物水泥 II 型防水涂料防渗), 环评要求: 重离子加速器事故及系统检修情况下产生的冷却水若要排放, 需满足以下两种条件之一: ①采取静置衰变措施, 并在排放前进行监测, 放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005) 表 1 中限值 (总 β 放射性浓度不大于 10Bq/L), 并经审管部门批准后, 方可纳入市政污水管网, 后排入莆

田市港城新区污水处理厂；②根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 $1ALI_{min}$ ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录（根据 GB18871-2002 B1.3.4 的公式及表 B3 中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 7Be 、 3H 核素的 ALI_{min} 分别为 $8.33 \times 10^8 Bq$ 、 $4.17 \times 10^8 Bq$ 、 $1.11 \times 10^9 Bq$ ）。

4.3.2 非放射性污染物治理措施

根据本项目的非放射性环境影响评价文件《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》，本项目拟采取的主要非放射性污染防治措施如下。

4.3.2.1 非放射性废气治理措施

本项目运行期非放射性废气污染源主要为汽车尾气、柴油发电机废气。机动车尾气经空气流动自然稀释扩散；柴油发电机废气通过采用轻质燃油添加催化剂使燃烧彻底，建设单位委托专业环保公司进行尾气治理，并通过排气筒引至顶层排放。

4.3.2.2 非放射性废水处理措施

本项目运行期非放射性废水主要为医疗废水和生活污水，采取厌氧+缺氧+接触氧化+消毒工艺处理后，排入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂。

4.3.2.3 噪声治理措施

本项目运行期主要噪声为冷水机组噪声等，拟采用：选用低噪声设备、高噪声设备置于封闭隔间、安装减振垫、管道柔性连接、风机风口设消声器等噪声防治工程措施，以及加强设备维护保养，并定期检修，保证设备处于良好的运行状态。

4.3.2.4 非放射性固体废物治理措施

本项目运行期非放射性固体废物主要是医疗垃圾、生活垃圾。生活垃圾分类收集，统一由环卫部门及时清运；医疗垃圾收集并分类管理后，临时存放在医疗废物暂存间，然后由具有资质的相关部门负责及时清运，集中处置，常温下存储时间不超过 24h，于 5℃ 以下冷藏的，不得超过 7 天。

第五章 环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

本项目建设阶段对环境的影响已由《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》评价，该报告表已获得莆田市生态环境局批复，本报告不再赘述。

5.2 运行阶段对环境的影响

本项目的非放射性环境影响评价文件《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》已获得莆田市生态环境局批复，本报告主要分析评价项目的辐射环境影响。

5.2.1 项目运行期放射性环境影响

5.2.1.1 场所辐射水平

本项目拟配置重离子治疗加速器(HIMM)医用射线装置和 DR 机，开展放射性诊断和治疗服务。

本项目在重离子治疗中心的 5 个治疗室内拟各配置 1 台 DR 机，均为 III 类射线装置，辐射源强较小；在使用过程中放射诊断的出束照射时间短；X 射线装置均位于的治疗室内，治疗室防护设计情况见表 4.1-1，混凝土墙体的最小厚度为 80cm，远大于《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）表 3 和表 c.7 中标称 125kV 以上的摄影机房有用线束 25.5cm 混凝土、90° 非有用线束 21.6cm 混凝土的防护要求，故经墙体屏蔽后 DR 机对屏蔽体外的辐射影响很小。相比重离子加速器，DR 机估算时可不考虑。

根据 3.3.2.1 小节，对重离子治疗加速器的瞬发辐射场起着决定性作用的是次级中子，其它瞬发辐射如 γ 射线等，其对屏蔽体外剂量当量的贡献与中子相比可以忽略。本项目重离子治疗加速器运行时通过贯穿辐

射途径对屏蔽体外产生辐射影响的主要是中子射线，中子辐射场分布是重离子治疗加速器建筑结构屏蔽设计考虑的主要源项。

将重离子（碳离子）束流损失点视为一点中子源，在屏蔽体外某点处的中子当量剂量率可以表示为：

$$H = \frac{1}{r^2} \int_{E_0}^{E_{\max}} q_{E_n, \Omega}(E_n, \Theta) \cdot C_n(E_n) \cdot Tr(\rho \cdot d, E_n) dE_n \quad (\text{式 5.2-1})$$

式中：

$q_{E_n, \Omega} = d^3 N_n / dt \cdot dE_n \cdot d\Omega$ ：靶上（束流损失点）的中子源强；

C_n ：中子的注量—当量剂量转换系数；

T_r ：屏蔽的中子当量剂量传输系数；

E_n ：中子能量；

r ：参考点到靶的距离；

Θ ：中子出射角；

d ：中子在屏蔽体内所走的距离。

本项目重离子治疗加速器运行时，屏蔽体外场所辐射水平主要包括终端治疗室屏蔽体外场所辐射水平和加速器大厅屏蔽体外场所辐射水平。

5.2.1.1.1 终端治疗室屏蔽体外场所辐射水平

A 预测点位

本项目终端治疗室相关的预测点位如表 5.2-1 和图 5.2-1~图 5.2-4 所示。

表 5.2-1 终端治疗室相关的预测点位

序号	楼层	点位描述	主要考虑的束流损失点	备注
1	-1	1 [#] 治疗室迷宫门外	1 [#] 治疗室	剂量率控制点位
2		2 [#] 治疗室迷宫门外	2 [#] 治疗室	
3		3 [#] 治疗室迷宫门外	3 [#] 治疗室	
4		4 [#] 治疗室迷宫门外	4 [#] 治疗室	
5		Gantry 治疗室迷宫门外	Gantry 治疗室	
6		前台走廊	1 [#] 治疗室	
7		医梯	1 [#] 治疗室、回旋引出部位、同步环引出部位	
8		护士站走廊	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 治疗室	
9		储藏室	3 [#] 治疗室	
10		冷却水泵房	2 [#] 治疗室	
11		治疗区卫生间	Gantry 治疗室	
12		机动车坡道 1	Gantry 治疗室	
13	1	护士办公室	Gantry 治疗室	剂量预测点位
14	院内	重离子治疗中心外南侧	Gantry 治疗室	
15		重离子治疗中心外西侧	Gantry 治疗室	
19	-1	等候室 1	1 [#] 治疗室	
20		等候室 2	1 [#] 治疗室	
21		前台	1 [#] 治疗室	
22		咨询	1 [#] 治疗室	
23		中央控制室	1 [#] 治疗室	
24		护士站	3 [#] 治疗室	
25		等候室 3	Gantry 治疗室	
26	1	接待室	1 [#] 治疗室	
27		运维办公室	3 [#] 治疗室	
28		护士办公室	Gantry 治疗室	
29		Gantry 等候区	Gantry 治疗室	
31	院内	硼中子治疗中心	1 [#] 治疗室	
32	院外	铁灶村社区	2 [#] 治疗室	
33		伦琴医学影像诊断中心	1 [#] 治疗室	
34	-1	加速器大厅 1 [#] 迷宫门外	1 [#] 治疗室	剂量率控制点位
46	3	会议室	Gantry 治疗室	剂量预测点位

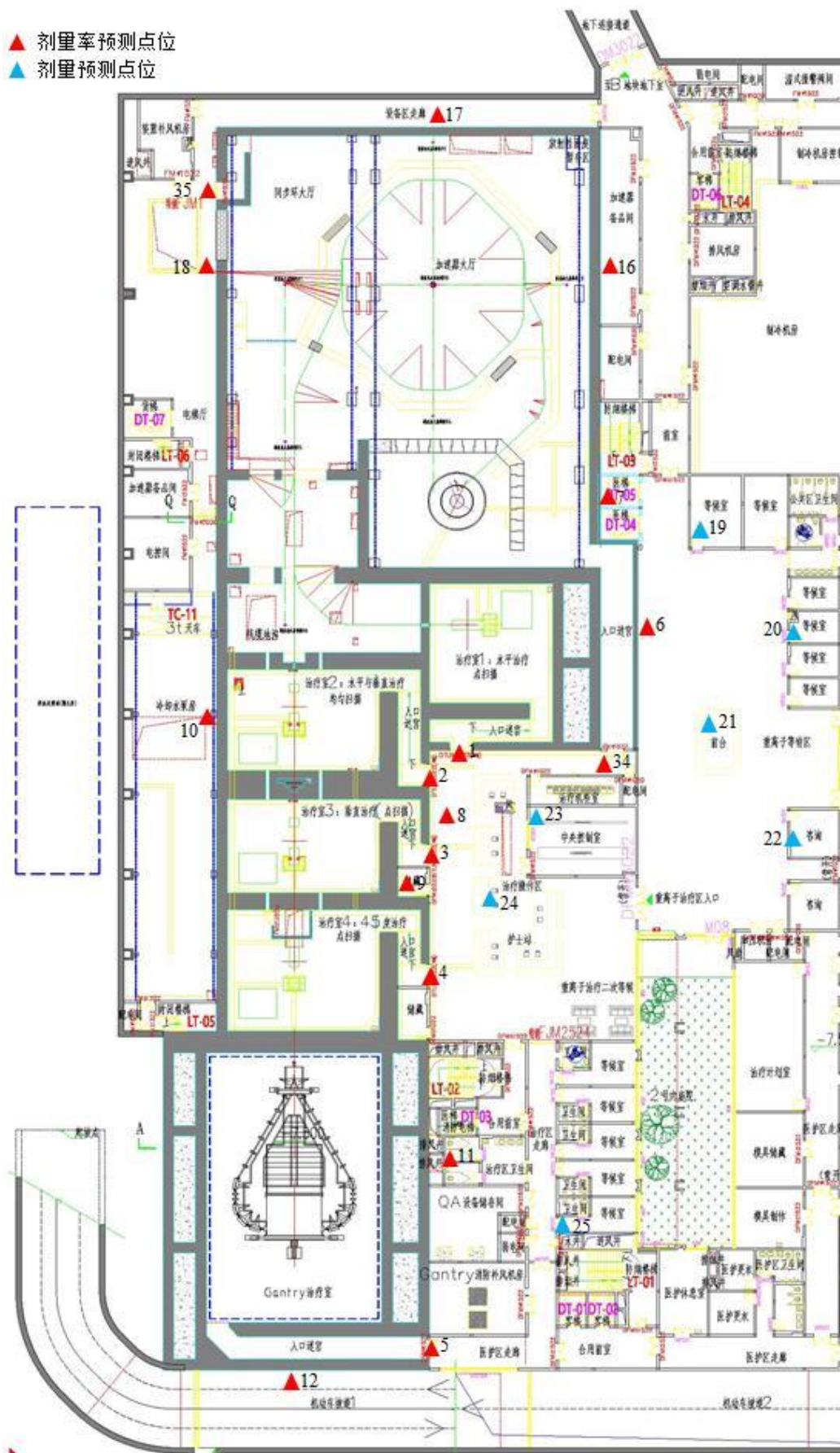


图 5.2-1 重离子加速器中心负一层预测点位示意图

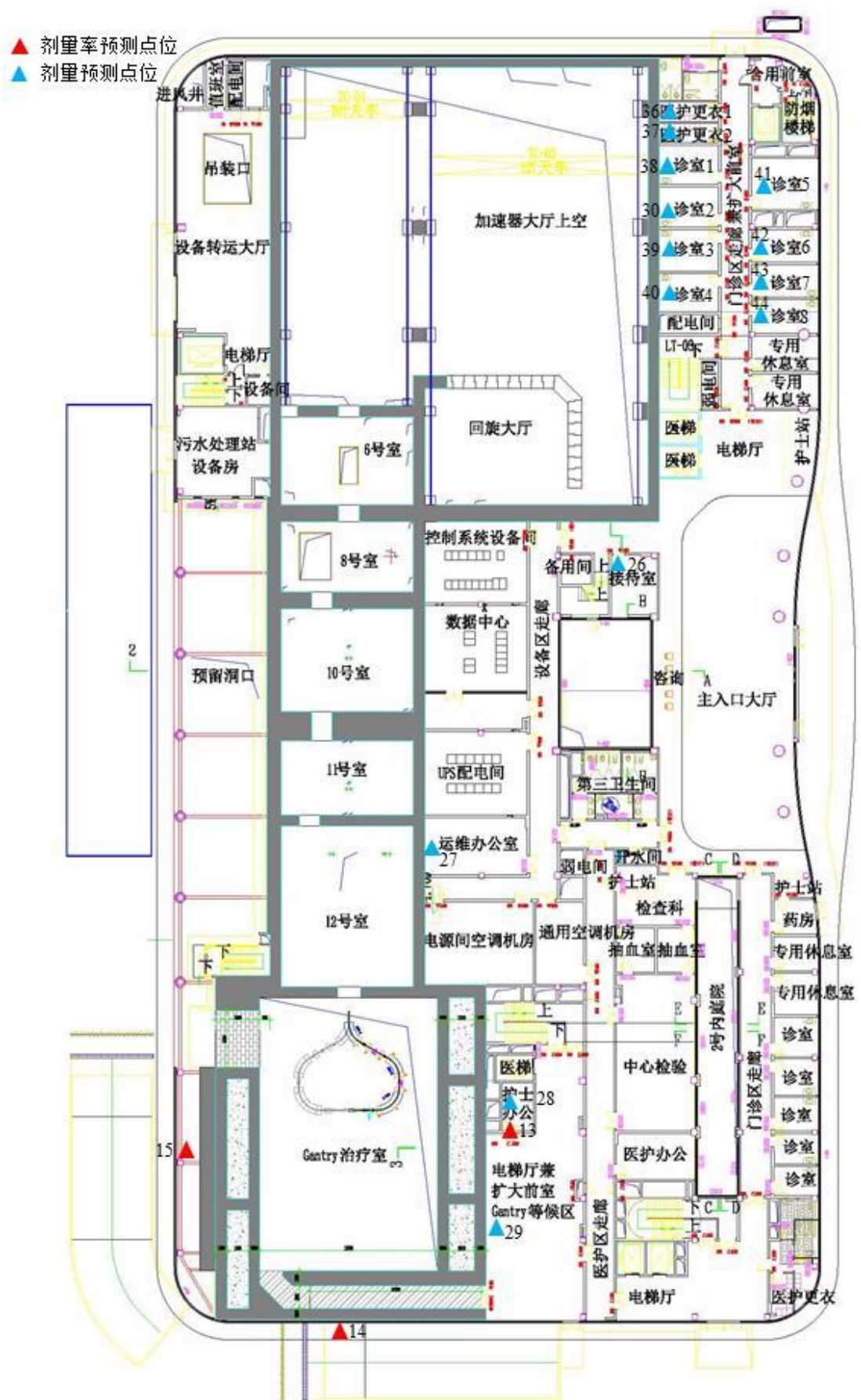


图 5.2-2 重离子加速器中心一层预测点位示意图

▲ 剂量预测点位



图 5.2-3 重离子加速器中心二层预测点位示意图

▲ 剂量预测点位



图 5.2-4 重离子加速器中心三层预测点位示意图



图 5.2-5 妈祖重离子医院院内、外公众预测点位示意图

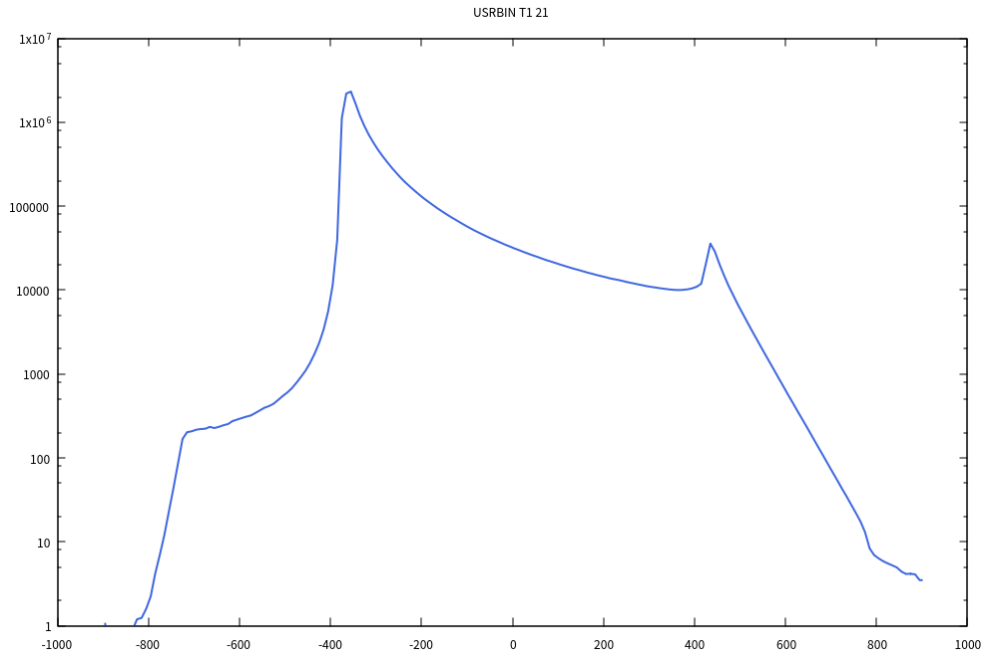
B 预测方法

(1) 贯穿辐射

根据式 5.2-1，以本项目加速器碳离子最大能量 400MeV/u 打 30cm 水靶所产生的中子源强保守计算，得到在不同方向、各屏蔽厚度下的辐射剂量率分布情况，见图 5.2-6、图 5.2-7。

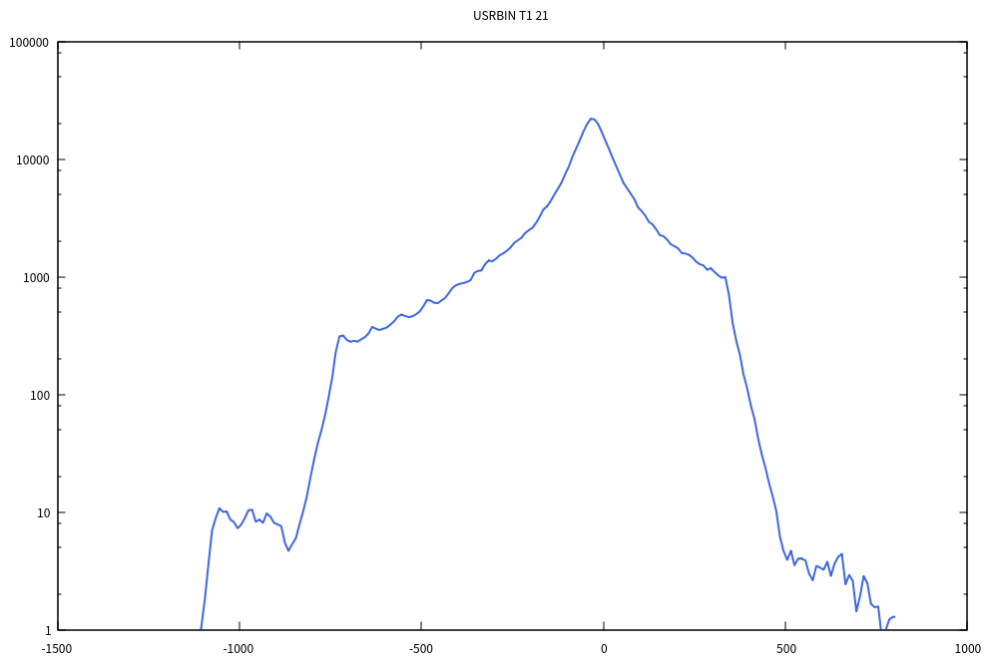
图 5.2-6 中，横坐标-3.6m 处为束流损失点；束流损失点左侧为背向，考虑了 0.8m 厚的混凝土屏蔽；右侧为前向，考虑了 4.3m 厚的混凝土屏蔽。

图 5.2-7 中，横坐标-0.3m 处为束流损失点；束流损失点两侧均为侧向，均考虑了 1.5m 厚的混凝土屏蔽。



(横坐标单位: cm, 纵坐标单位: $\mu\text{Sv/h}$)

图 5.2-6 400MeV/u C 打 30cm 水靶前向有 4.3m、背向有 0.8m 混凝土屏蔽时剂量率分布



(横坐标单位: cm, 纵坐标单位: $\mu\text{Sv/h}$)

图 5.2-7 400MeV/u C 打厚 30cm 水靶侧向有 1.5m 混凝土屏蔽时剂量率分布

根据图 5.2-6、图 5.2-7, 可知束流前向、侧向和背向的剂量率在混

混凝土层中的衰减符合指数规律，对应的混凝土的十值层大约为 1m、0.7m 和 0.4m。此外，铁对中子的十值层厚度为 0.4231m（引自 NCRP report No.144 的 Table 4.3）。

治疗室屏蔽墙外各预测点的剂量率可通过以下方法保守计算：墙内侧的剂量分布（Sv/ion）按对应的束流方向和束流损失点到墙的距离在图 3.3-3 中读出（若距离太大，则保守取最近可读距离的剂量分布）；墙内侧剂量分布（Sv/ion）乘以终端最大损失 1.017×10^8 ion/s，可得墙内侧剂量率（ μ Sv/h）；墙体对剂量率的衰减按十值层法计算，可得出墙外侧的剂量率（ μ Sv/h）；墙外侧的剂量率按式 5.2-1 中的距离衰减原理，乘以束流损失点到墙外侧的距离 r_1^2 ，再除以束流损失点到预测点的距离 r_2^2 ，由此可得各预测点的剂量率（ μ Sv/h）。

以 1 号点位为例，说明计算过程。先在图 3.3-3 中保守地读出 1[#]治疗室第一迷宫墙内侧（侧向，距束流损失点 7m 处，在图 3.3-3 中保守取侧向 4m）剂量分布为 4×10^{-16} Sv/ion，乘以终端最大损失 1.017×10^8 ion/s，可得墙内侧剂量率约为 $1.46 \times 10^2 \mu$ Sv/h；再根据侧向的混凝土厚度 1.5m 和侧向的十值层 0.7m 计算出第一迷宫墙外侧的剂量率为 1.054μ Sv/h；通过第一道迷宫墙外侧（距束流损失点 8.5m）到迷宫门外 30cm 处（距束流损失点 11.6m）的距离衰减，可得迷宫门外的贯穿辐射剂量率估算结果为 $5.659 \times 10^{-1} \mu$ Sv/h。

(2) 绕迷宫辐射

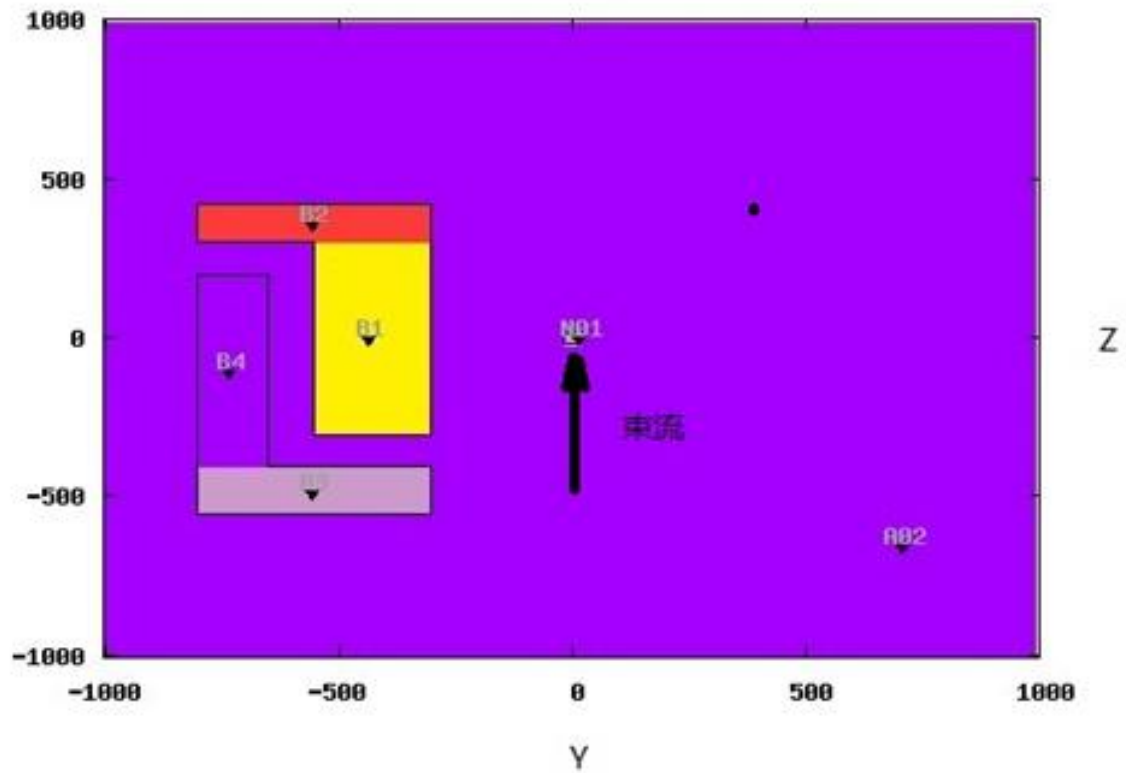


图 5.2-8 迷宫相关参数对应图

本项目重离子治疗加速器终端治疗室的迷宫如图 4.1-7~4.1-11 所示。屏蔽水泥体 B1~B4 的位置关系如图 5.2-8 所示，重离子治疗加速器终端治疗室迷宫相关参数见表 5.2-2。

表 5.2-2 HIMM 终端治疗室迷宫相关参数

单位: m

序号	参数符号		1#治疗室 (水平终端)	2#治疗室 (水平+垂直终端)	3#治疗室 (垂直终端)	4#治疗室 (45° 终端)	Gantry 治疗室 (负一层)	Gantry 治疗室 (一层)
1	B1	厚度	1.5	1.7	1.7	1.7	1.3	1.3
2		长度	9.05	7.1	4	4.9	13.73	13.73
3	B2	厚度	0.8	1.2	0.2	0.3	4.3	4.3
4		长度	4.3	4.5	4.5	4.5	1.3	1.3
5	B3	厚度	2.7	1.5	1.2	1.2	3.9	3.9
6		长度	4.3	4.5	4.5	4.5	4.3	4.3
7	B4	厚度	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1
8		长度	7.2	8.5	4	4.9	20.03	20.03
9	迷宫	宽度	2	2	2	2	2	2
10		高度	5.45	6.15	6.15	6.15	7	15.5

通过计算 d/\sqrt{A} ，然后通过查图 5.2-9、图 5.2-10，可以得出中子在经过迷宫门后的剂量衰减率，其中 d 为迷宫门内的横向通道，A 为迷宫门内通道的截面积。此迷宫门可以分为三段计算。

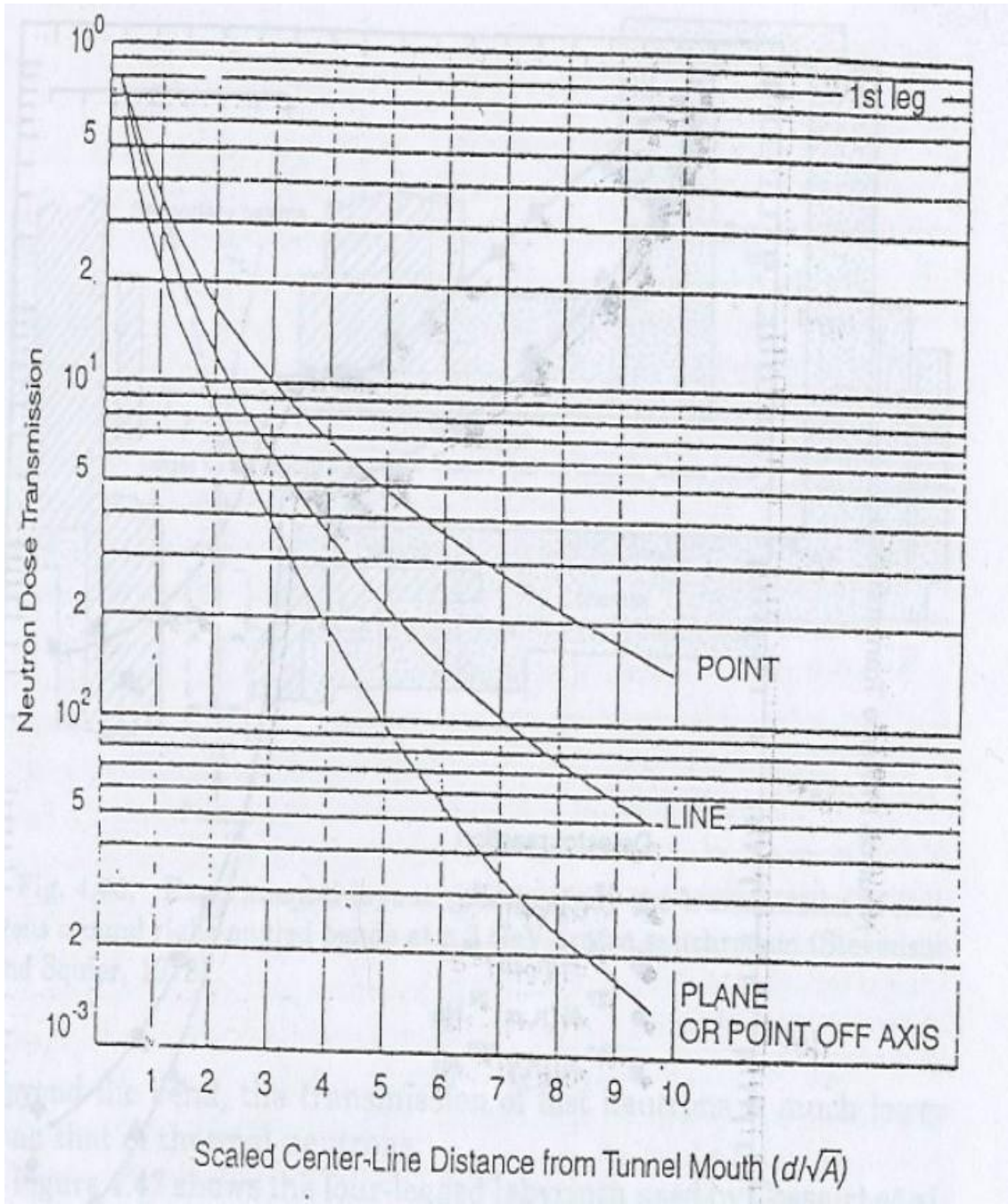


图 5.2-9 迷宫第一通道内中子传输因子图

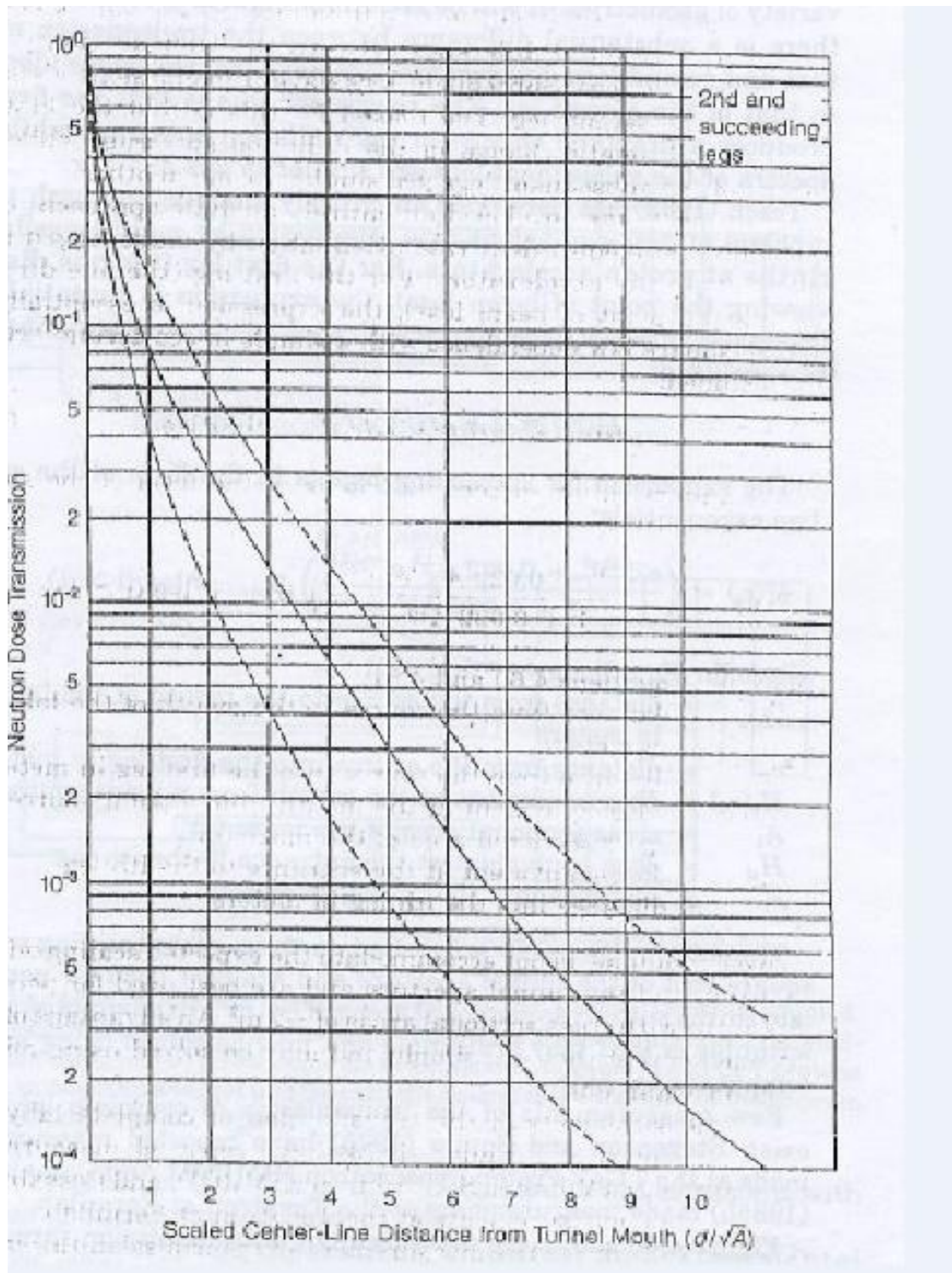


图 5.2-10 迷宫第二通道内中子传输因子图

注：图 5.2-9 和图 5.2-10 引用自 K. Goebel, G.R. Stevenson, J.T. Routti, H.G. Vogt, Evaluating dose rates due to neutron leakage through the access tunnels of the SPS, CERN Lab II-RA Note,75-10, 1975.

本项目 HMM 束流完全损失时为 8.137×10^8 ion/脉冲周期，一个脉

冲周期为 8s，因此，终端束流最大损失约为 $1.017 \times 10^8 \text{ ion/s}$ 。按照束流损失点距离迷宫门的距离，由图 3.3-3 可知在该距离处的侧向剂量分布 (Sv/ion)，并计算出加速器大厅迷宫门的入口处中子剂量率 ($\mu \text{ Sv/h}$)。

C 预测结果

(1) 贯穿辐射

表 5.2-1 中终端治疗室周边各预测点的贯穿辐射剂量率计算结果如表 5.2-3 所示。

表 5.2-3 终端治疗室周边各预测点的贯穿辐射剂量率

点位号	点位描述	主要考虑的束流损失点	方向	墙内侧与束流损失点的距离 (m)	屏蔽墙内的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	混凝土厚度 (m)	屏蔽墙外的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	屏蔽墙外侧与束流损失点的距离 (m)	预测点墙外 30cm 处与束流损失点的距离 (m)	剂量率预测值 ($\mu\text{Sv/h}$)
1	1 [#] 治疗室迷宫门外	1 [#] 治疗室	侧向	7 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.5	1.054	8.5	11.6	5.659×10^{-1}
2	2 [#] 治疗室迷宫门外	2 [#] 治疗室	侧向	8.3 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.86	3.225×10^{-1}	10.2	13.6	1.814×10^{-1}
3	3 [#] 治疗室迷宫门外	3 [#] 治疗室	侧向	7.6 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.7	5.459×10^{-1}	9.3	12.4	3.071×10^{-1}
4	4 [#] 治疗室迷宫门外	4 [#] 治疗室	侧向	7.6 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.7	5.459×10^{-1}	9.3	12.4	3.071×10^{-1}
5	Gantry 治疗室迷宫门外	Gantry 治疗室	侧向	10.9 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	5.54	1.784×10^{-6}	15.8	16.5	1.636×10^{-6}
6	前台走廊	1 [#] 治疗室	前向	7.6	7.32×10^3	4.8	1.161×10^{-1}	12.4	15.6	7.332×10^{-2}
7	医梯	1 [#] 治疗室	侧向	6.8 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	3.69	7.839×10^{-4}	10.5	14.5	4.111×10^{-4}
8	护士站走廊	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 治疗室	侧向	7 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.5	1.054	8.5	11.6	5.659×10^{-1}
9	储藏室	3 [#] 治疗室	侧向	7.9 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.75	4.631×10^{-1}	9.6	9.9	4.355×10^{-1}
10	冷却水泵房	2 [#] 治疗室	侧向	6 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1	5.459	7	7.3	5.02
11	治疗区卫生间	Gantry 治疗室	前向	8.1	7.32×10^3	4.48	2.425×10^{-1}	12.6	14.4	1.856×10^{-1}
12	机动车坡道 1	Gantry 治疗室	侧向	8.3 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	2.3	7.585×10^{-2}	10.7	13	5.139×10^{-2}
13	护士办公室	Gantry 治疗室	前向	8.1	7.32×10^3	4.48	2.425×10^{-1}	12.6	14.4	1.856×10^{-1}

14	重离子治疗中心外南侧	Gantry 治疗室	侧向	8.3 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	2.3	7.585×10^{-2}	10.7	13	5.139×10^{-2}
15	重离子治疗中心外西侧	Gantry 治疗室	前向	7.8	7.32×10^3	5.3	3.67×10^{-2}	13.1	13.4	3.507×10^{-2}
19	等候室 1	1#治疗室	前向	8.1	7.32×10^3	5.08	6.091×10^{-2}	13.1	21.5	2.261×10^{-2}
20	等候室 2	1#治疗室	前向	7.6	7.32×10^3	4.8	1.161×10^{-1}	12.4	30	1.983×10^{-2}
21	前台	1#治疗室	前向	8.2	7.32×10^3	5.14	5.305×10^{-2}	13.3	23.1	1.758×10^{-2}
22	咨询	1#治疗室	前向	8.8	3.66×10^3	5.55	1.032×10^{-2}	14.4	33.2	1.941×10^{-3}
23	中央控制室	1#治疗室	侧向	7.4 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	2.43	4.946×10^{-2}	9.8	17.5	1.551×10^{-2}
24	护士站	3#治疗室	侧向	7.7 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.71	5.282×10^{-1}	9.4	16.4	1.735×10^{-1}
25	等候室 3	Gantry 治疗室	前向	7.8	7.32×10^3	4.3	3.67×10^{-1}	12.1	23.5	9.729×10^{-2}
26	接待室	1#治疗室	侧向	8.8 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	3.16	4.481×10^{-3}	9.8	10.1	4.219×10^{-3}
27	运维办公室	3#治疗室	背向	2.9 (保守取图 3.3-3 中背向 2)	2.2×10^2	2.1	1.235×10^{-3}	5	9.4	3.495×10^{-4}
28	护士办公室	Gantry 治疗室	前向	8.1	7.32×10^3	4.48	2.425×10^{-1}	12.6	14.4	1.856×10^{-1}
29	Gantry 等候区	Gantry 治疗室	前向	7.8	7.32×10^3	4.3	3.67×10^{-1}	12.1	12.4	3.494×10^{-1}
31	硼中子治疗中心	1#治疗室	前向	8.1	7.32×10^3	5.11	5.684×10^{-2}	13.2	39.7	6.284×10^{-3}
32	铁灶村社区	2#治疗室	侧向	6.3 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.57	8.372×10^{-1}	7.8	44.2	2.607×10^{-2}

33	伦琴医学影像诊断中心	1#治疗室	侧向	3.7	2.2×10^2	2.3	1.138×10^{-1}	6	78.1	6.715×10^{-4}
34	加速器大厅 1#迷宫门外	1#治疗室	前向	10.2	7.32×10^3	5.75	1.302×10^{-2}	16	16.8	1.181×10^{-2}
46	会议室	Gantry 治疗室	前向	10.5	7.32×10^3	5.79	1.188×10^{-2}	16.3	18.6	9.12×10^{-3}

由表 5.2-3 可知，6、8~15、19~33、46 号预测点位，终端治疗室周边各预测点的贯穿辐射剂量率计算结果在 $3.495 \times 10^{-4} \sim 5.02 \mu\text{Sv/h}$ 之间，均小于表 1.4-2 中其对应的剂量率控制水平，满足辐射防护要求。

同理，1[#]~4[#]、Gantry 治疗室出束时对相邻治疗室的剂量率计算结果，如表 5.2-4 所示。

表 5.2-4 1[#]~4[#]、Gantry 治疗室出束时对相邻治疗室的贯穿辐射剂量率

点位号	点位描述	主要考虑的束流损失点	方向	墙内侧与束流损失点的距离 (m)	墙内的剂量率(μSv/h)	混凝土厚度 (m)	铁厚度 (m)	墙外的剂量率(μSv/h)	墙外侧与束流损失点的距离 (m)	墙外 30cm 处与束流损失点的距离 (m)	剂量率预测值 (μSv/h)
①	2 [#] 治疗室	1 [#] 治疗室	背向	4.7 (保守取图 3.3-3 中背向 2)	2.2×10^2	1.1	-	3.906×10^{-1}	5.8	6.1	3.532×10^{-1}
②	1 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室	侧向	11.5 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	0.81	-	10.199	12.3	12.6	9.719
③	3 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室	前向	5.7	2.2×10^4	1.4	1.2	1.51×10^{-1}	8.3	8.6	1.188
④	2 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室	侧向	3.7	2.2×10^2	1.4	1.2	3.792×10^{-4}	6.3	6.6	2.918×10^{-3}
⑤	4 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室	侧向	4.8 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	1.55	-	8.941×10^{-1}	6.3	6.6	8.147×10^{-1}
⑥	3 [#] 治疗室	4 [#] 治疗室	侧向	2	7.32×10^2	1.8	-	1.964	3.8	6.4	6.925×10^{-1}
⑦	Gantry 治疗室	4 [#] 治疗室	侧向	6.2 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	2	-	2.035×10^{-1}	8.2	8.5	1.894×10^{-1}
⑧	4 [#] 治疗室	Gantry 治疗室	侧向	15.8 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	2	-	2.035×10^{-1}	17.8	18.1	1.968×10^{-1}

由表 5.2-4 可知，终端治疗室出束时对相邻治疗室的贯穿剂量率计算结果在 $3.455 \times 10^{-4} \sim 9.719 \mu\text{Sv/h}$ 之间，均小于表 1.4-2 中其对应的剂量率控制水平，满足辐射防护要求。

同理，1[#]~4[#]、Gantry 治疗室出束时对重离子治疗中心屋面上方的剂量率计算结果，如表 5.2-5 所示。

表 5.2-5 1#~4#、Gantry 治疗室出束时对重离子治疗中心屋面上方的贯穿辐射剂量率

点位号	点位描述	主要考虑的束流损失点	方向	墙内侧与束流损失点的距离(m)	墙内的剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	混凝土厚度(m)	墙外的剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	墙外侧与束流损失点的距离(m)	墙外 30cm 处与束流损失点的距离(m)	剂量率预测值($\mu\text{Sv/h}$)
A	1#治疗室上方屋面	1#治疗室	侧向	4.2 (保守取图 3.3-3 中侧向 4)	1.46×10^2	2	2.035×10^{-1}	6.2	24.8	1.272×10^{-2}
B	2#治疗室上方屋面	2#治疗室	侧向	2	7.32×10^2	1.3	10.174	3.3	26.9	1.531×10^{-1}
C	3#治疗室上方屋面	3#治疗室	背向	2	2.2×10^2	1.3	1.235×10^{-1}	3.3	26.9	1.859×10^{-3}
D	4#治疗室上方屋面	4#治疗室	侧向	2.5	7.32×10^2	3.05	3.217×10^{-2}	5.6	26.9	1.394×10^{-3}
E	Gantry 治疗室上方屋面	Gantry 治疗室	前向	15 (保守取图 3.3-3 中前向 10)	7.32×10^3	3.5	2.316	18.5	18.8	2.242

由表 5.2-5 可知, 1[#]~4[#]治疗室出束时对重离子治疗中心屋面上方的贯穿辐射剂量率计算结果在 $1.394 \times 10^{-3} \sim 1.531 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ 之间, 其对应的屋面为不上人屋面, 满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021) 中对“不需要人员到达并只有借助工具才能进入的”机房顶外表面 30cm 处 $100 \mu\text{Sv/h}$ 的剂量率要求。

(2)绕迷宫辐射

HIMM 终端治疗室迷宫传输因子计算及结果见表 5.2-6。

表 5.2-6 HIMM 终端治疗室迷宫传输因子计算及结果

序号	参数符号	1#治疗室 (水平)	2#治疗室 (水平+ 垂直)	3#治疗室 (垂直)	4#治疗室 (45°)	Gantry 治 疗室 (负 一层)	Gantry 治疗室 (一层)
1	d1 (m)	3.5	3.7	3.7	3.7	2.3	2.3
2	A1 (m)	10.9	12.3	12.3	12.3	14	31
3	$d_1 / \sqrt{A_1}$	1.1	1.1	1.1	1.1	0.6	0.4
4	减弱倍数	2×10^{-1}	2×10^{-1}	2×10^{-1}	2×10^{-1}	3.5×10^{-1}	4.5×10^{-1}
5	d2 (m)	11.05	10.5	6	6.9	20.03	20.03
6	A2 (m)	10.9	12.3	12.3	12.3	14	31
7	$d_2 / \sqrt{A_2}$	3.3	3.0	1.7	2.0	5.4	3.6
8	减弱倍数	3×10^{-3}	4×10^{-3}	1.8×10^{-2}	1.2×10^{-2}	6.5×10^{-4}	2.4×10^{-3}
9	两段累积 减弱倍数	6×10^{-4}	8×10^{-4}	3.6×10^{-3}	2.4×10^{-3}	2.28×10^{-4}	1.08×10^{-3}
10	束流损失点 距迷宫门的 距离 X(m)	9 (保守取 图 3.3-3 中 侧向 4)	7.8 (保守 取图 3.3-3 中侧向 4)	7.8 (保守 取图 3.3-3 中侧向 4)	8.1 (保守 取图 3.3-3 中侧向 4)	15.4 (保守 取图 3.3-3 中侧向 4)	15.4 (保守 取图 3.3-3 中侧向 4)
11	距靶 Xm 处 的最大剂量 (Sv/ion)	4×10^{-16}	4×10^{-16}	4×10^{-16}	4×10^{-16}	4×10^{-16}	4×10^{-16}
12	中子迷宫入 口处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	1.46×10^2	1.46×10^2	1.46×10^2	1.46×10^2	1.46×10^2	1.46×10^2
13	中子迷宫出 口处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	8.787×10^{-2}	1.172×10^{-1}	5.272×10^{-1}	3.515×10^{-1}	3.332×10^{-2}	1.582×10^{-1}

通过对比表 5.2-2 和表 5.2-6 可知, HIMM 运行产生的中子经过迷

宫后的衰减效果，与通过屏蔽墙的衰减效果相当，并未减弱整个重离子治疗加速器治疗室屏蔽结构的辐射防护效果，累加可得表 5.2-7。

表 5.2-7 HIMM 终端治疗室迷宫门外总剂量率结果

项目	1#治疗室 (水平)	2#治疗室 (水平+垂直)	3#治疗室 (垂直)	4#治疗室 (45°)	Gantry 治疗室(负一层)	Gantry 治疗室(一层)
中子绕迷宫的出口处剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	8.787×10^{-2}	1.172×10^{-1}	5.272×10^{-1}	3.515×10^{-1}	3.332×10^{-2}	1.582×10^{-1}
中子贯穿辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	5.659×10^{-1}	1.814×10^{-1}	3.071×10^{-1}	3.071×10^{-1}	1.636×10^{-6}	1.636×10^{-6}
迷宫门外总剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	6.538×10^{-1}	2.986×10^{-1}	8.343×10^{-1}	6.586×10^{-1}	3.332×10^{-2}	1.582×10^{-1}

由表 5.2-7，得出本项目 HIMM 终端 5 个治疗室的门外的剂量率为 $3.332 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h} \sim 8.343 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ 之间，小于表 1.4-2 中其对应的剂量率控制水平，满足辐射防护要求。

5.2.1.1.2 加速器大厅屏蔽体外场所辐射水平

本项目加速器大厅屏蔽体外场所辐射水平主要为回旋引出、同步环注入和同步环引出 3 个束流集中损失关键部位碳离子束流集中损失所致。

A 预测点位

本项目加速器大厅相关的预测点位如表 5.2-8 和图 5.2-1~图 5.2-3 所示。

表 5.2-8 加速器大厅相关的预测点位

序号	楼层	点位描述	主要考虑的束流损失点	备注
7	-1	医梯	1#治疗室、回旋引出部位、同步环引出部位	剂量率控制点位
16		加速器备品间	同步环注入口、同步环引出部位	
17		设备区走廊	同步环注入口、同步环引出部位	
18		设备转运大厅	同步环引出部位	
34		加速器大厅 1#迷宫门外	回旋引出部位、同步环引出部位	
35		加速器大厅 2#迷宫门外	同步环引出部位	
30	1	诊室 2	同步环注入口、同步环引出部位	剂量预测点位
36		医护更衣室 1	同步环注入口、同步环引出部位	
37		医护更衣室 2	同步环注入口、同步环引出部位	
38		诊室 1	同步环注入口、同步环引出部位	
39		诊室 3	同步环注入口、同步环引出部位	
40		诊室 4	同步环注入口、同步环引出部位	
41		诊室 5	同步环注入口、同步环引出部位	
42		诊室 6	同步环注入口、同步环引出部位	
43		诊室 7	同步环注入口、同步环引出部位	
44		诊室 8	同步环注入口、同步环引出部位	
45	2	重离子工艺变配电房	同步环引出部位	

B 预测方法与结果

(1)束流集中损失点的贯穿辐射

①回旋引出部位束流损失

根据本项目重离子治疗加速器束流损失设计参数，回旋加速器出口的束流损失为集中损失， $^{12}\text{C}^{5+}$ 粒子能量为 6.2MeV，损失流强 8.5×10^{11} ppp（计算时保守按回旋加速器内束流 1×10^{12} ppp 全部损失计）。

根据图 5.2-11，6.2MeV 的 C 束轰击铜靶在前向的中子产额保守取值为 9×10^{-5} n/(srion)。束流损失点距屏蔽墙最近的距离约 6.9m，则可计算出 6.9m 处中子的通量率为 23.63 n/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。

保守取 6.2MeV 的 C 束轰击铜靶产生的中子的平均能量为 3MeV，3MeV 的中子通量剂量转换系数为 400 pSv $\cdot\text{cm}^2$ ，则可计算得到 6.9m 处

中子所致辐射剂量率为 34.03 μ Sv/h。

本项目重离子治疗加速器距回旋加速器引出口最近的屏蔽墙为 1.5m 混凝土墙，由图 5.2-12 可见，对于混凝土，3MeV 的中子的十分之一层为 35cm，则加速器大厅距回旋加速器引出口最近的屏蔽墙外 30cm 处(1[#] 治疗室内)的剂量率为 $1.643 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/h}$ ，小于表 1.4-2 中其对应的剂量率控制水平，满足辐射防护要求。

同理，对于图 5.2-1 中的 7 号点位医梯，束流损失点距屏蔽墙内的距离约 4.7m，屏蔽墙厚 2.2m，束流损失点到墙外侧的距离 6.8m，束流损失点到预测点的距离 12.7m，束流损失点距其受到回旋引出部位的辐射影响为 $1.089 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ 。

Table 1
The neutron yield in the forward and lateral directions for several projectile energies E_p for the ion-target systems studied. The percentage error in all the systems did not exceed 2%

System	E_p (MeV)	$\text{nsr}^{-1} \text{ion}^{-1}$	
		0°	90°
${}^7\text{Li} + \text{Al}$	46	2.3E-6	1.5E-6
	40	1.7E-6	7.7E-7
	34	8.3E-7	5.3E-7
	28	3.8E-7	2.5E-7
${}^7\text{Li} + \text{Cu}$	22	4.6E-8	2.3E-8
	46	1.5E-6	1.4E-6
	40	8.4E-7	5.1E-7
	34	3.2E-7	2.5E-7
	28	9.0E-8	7.8E-8
${}^{11}\text{B} + \text{Al}$	22	1.2E-8	1.1E-8
	72	9.4E-5	4.2E-5
	62	7.1E-5	3.2E-5
${}^{11}\text{B} + \text{Ni}$	52	6.0E-5	2.6E-5
	42	3.0E-5	1.1E-5
	72	5.0E-5	2.4E-5
${}^{12}\text{C} + \text{Al}$	62	3.1E-5	1.5E-5
	52	2.2E-5	1.1E-5
	42	1.0E-5	3.6E-6
	84	4.5E-5	1.7E-5
${}^{12}\text{C} + \text{Ni}$	75	3.1E-5	1.2E-5
	65	2.3E-5	9.1E-6
	54	1.4E-5	5.3E-6
	42	6.8E-6	2.6E-6
${}^{12}\text{C} + \text{Cu}$	84	2.4E-5	1.1E-5
	75	1.5E-5	7.1E-6
	65	9.7E-6	5.0E-6
	54	4.7E-6	1.8E-6
${}^{19}\text{F} + \text{Al}$	42	1.7E-6	5.4E-7
	84	9.0E-5	4.4E-5
	75	6.3E-5	3.3E-5
	60	2.7E-5	1.3E-5
${}^{19}\text{F} + \text{Cu}$	48	1.2E-5	7.4E-6
	105	6.4E-5	2.1E-5
	95	5.1E-5	1.9E-5
	90	4.7E-5	1.6E-5
	85	3.5E-5	1.2E-5
	75	2.2E-5	8.7E-6
${}^{19}\text{F} + \text{Al}$	55	9.5E-6	3.6E-6
	45	3.6E-6	1.4E-6
	95	3.5E-5	1.9E-5
	90	2.7E-5	1.4E-5
	85	2.3E-5	1.1E-5
${}^{19}\text{F} + \text{Cu}$	75	1.5E-5	8.0E-6
	65	8.5E-6	4.8E-6

图5.2-11 部分能量的重离子打靶产生的中子产额

注：图5.2-11引用自C. Sunil et al. Neutron yield and dose equivalent from heavy ion interactions on thick target. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 534 (2004) 518-530.

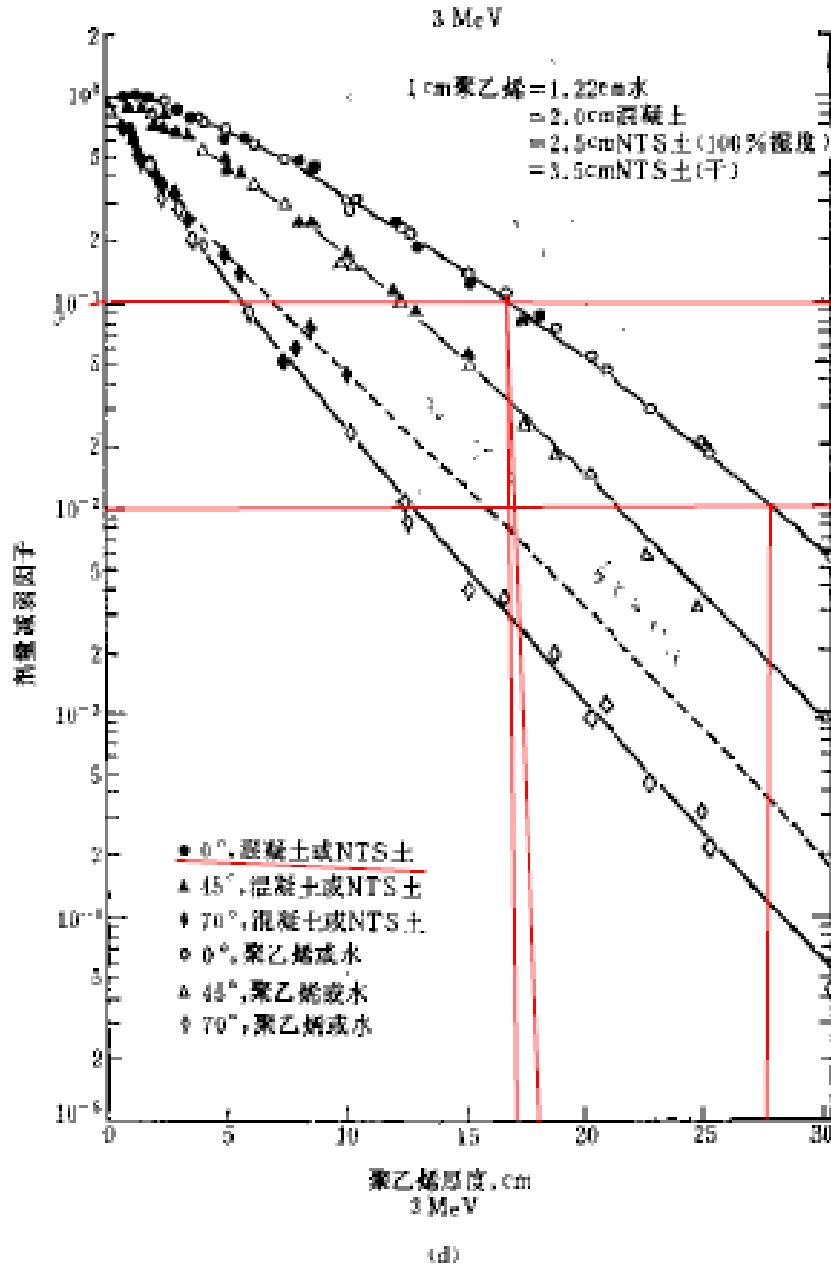


图5.2-12 几种屏蔽材料的3MeV的中子剂量衰减因子

注：图 5.2-12 引用自《加速器保健物理》（原子能出版社，1983）。

②同步环注入口部位束流损失

根据本项目重离子治疗加速器束流损失设计参数，同步环注入口的束流损失为集中损失， $^{12}\text{C}^{5+}$ 粒子能量为 6.2MeV，损失流强 2.375×10^9 ppp（计算时保守按注入同步加速器的束流 4.75×10^9 ppp 全部损失计）。

距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 5.8m，屏蔽墙厚度为 1m。与回

旋引出部位束流损失同理，可计算出加速器大厅距同步加速器注入口最近的屏蔽墙外 30cm 处（即图 5.2-3 中 16 号点位加速器备品间）的辐射剂量率为 $2.916 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 30 号点位诊室 2，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 8m，屏蔽墙厚度为 1.38m，屏蔽墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $1.288 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-1 中的 17 号点位设备区走廊，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 11.2m，屏蔽墙厚度为 0.8m，屏蔽墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $3.025 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 36 号点位医护更衣室 1，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 9.7m，屏蔽墙厚度为 1.68m，屏蔽墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $1.231 \times 10^{-6} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 37 号点位医护更衣室 2，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 8.9m，屏蔽墙厚度为 1.52m，屏蔽墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $4.168 \times 10^{-6} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 38 号点位诊室 1，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 8.1m，屏蔽墙厚度为 1.39m，屏蔽墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $1.177 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 39 号点位诊室 3，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 9m，屏蔽墙厚度为 1.55m，屏蔽墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $3.349 \times 10^{-6} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 40 号点位诊室 4，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 10m，屏蔽墙厚度为 1.73m，屏蔽墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $8.345 \times 10^{-7} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 41 号点位诊室 5，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 6.3m，屏蔽墙厚度为 1.09m，预测点墙外 30cm 处距束流损失点的

距离为 16.5m，则预测点墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $2.990 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 42 号点位诊室 6，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 6.4m，屏蔽墙厚度为 1.11m，预测点墙外 30cm 处距束流损失点的距离为 16.9m，则预测点墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $2.500 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 43 号点位诊室 7，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 6.2m，屏蔽墙厚度为 1.74m（此处为柱子），预测点墙外 30cm 处距束流损失点的距离为 17.7m，则预测点墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $4.303 \times 10^{-7} \mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 44 号点位诊室 8，距同步环注入口距离最近的屏蔽墙约 7.5m，屏蔽墙厚度为 1.29m，预测点墙外 30cm 处距束流损失点的距离为 19.5m，则预测点墙外 30cm 处受到同步环注入口部位的辐射影响为 $5.732 \times 10^{-6} \mu\text{Sv/h}$ 。

③同步环引出部位束流损失

根据本项目重离子治疗加速器束流损失设计参数，同步环引出出口的束流损失为集中损失， $^{12}\text{C}^{6+}$ 粒子能量保守按最大 400MeV 计，损失流强 $1.116 \times 10^8 \text{ppp}$ （即为 $1.395 \times 10^7 \text{ion/s}$ ）计。

距同步环引出部位距离最近的屏蔽墙约 10.2m，由图 5.2-13（束流损失点为横坐标 0m 处，两侧均为侧向，左侧无屏蔽，右侧有 2m 的混凝土屏蔽）可知，在距离靶 10.2m 处的剂量保守取侧向 10m 处的剂量 $3 \times 10^{-4} \text{pSv/ion}$ ，按本项目重离子加速器同步环引出口束流损失最大值 $1.395 \times 10^7 \text{ion/s}$ 保守计算，屏蔽墙内侧辐射剂量率最大值为 $15.066 \mu\text{Sv/h}$ 。

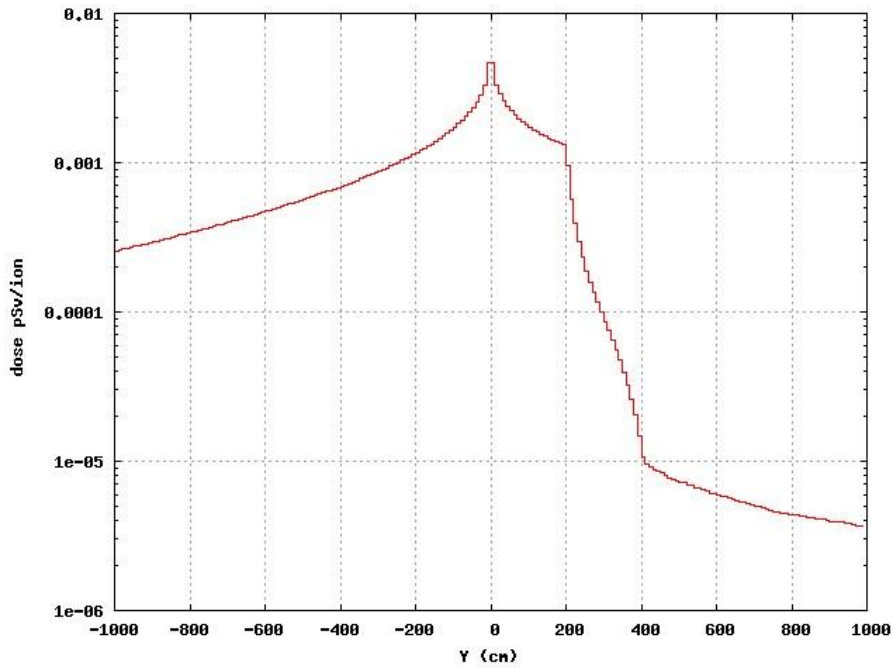


图 5.2-13 400MeV/u C 打厚 Cu 靶侧向有 2.0m 混凝土时剂量分布

本项目重离子治疗加速器距同步环引出部位最近的屏蔽墙为 1m 混凝土墙，由图 5.2-13，束流侧向的剂量率在混凝土层中的衰减符合指数规律，对应的混凝土的十值层大约为 1m，大厅距同步环引出部位最近的屏蔽墙外 30cm 处（即图 5.2-1 中 18 号点位设备转运大厅）的剂量率为 $1.429\mu\text{Sv/h}$ 。

同理，对于图 5.2-1 中的 17 号点位设备区走廊，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 11.1m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 0.8m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 $2.272\mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-1 中的 7 号点位医梯，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 29m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.3m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 $0.741\mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-1 中的 16 号点位加速器备品间，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 22.2m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 $1.469\mu\text{Sv/h}$ 。

对于图 5.2-2 中 30 号点位诊室 2，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 23.1m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.038m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 1.347 μ Sv/h。

对于加速器大厅 2[#]迷宫门外，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 10.6m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.3m 混凝土墙，加速器大厅 2[#]迷宫门外受到同步环引出部位的辐射剂量率为 $7.449 \times 10^{-1} \mu$ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 36 号点位医护更衣室 1，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 23.8m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.071m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 1.250 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 37 号点位医护更衣室 2，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 23.4m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.056m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 1.293 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 38 号点位诊室 1，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 23.1m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.039m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 1.344 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 39 号点位诊室 3，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 23.4m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.053m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 1.302 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 40 号点位诊室 4，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 24.1m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.081m 混凝土墙，故屏蔽墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 1.221 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 41 号点位诊室 5，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 22.7m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.021m 混凝土墙，预测点墙外 30cm 处距束流损失点的距离为 32.3m，故预测点墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 0.771 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 42 号点位诊室 6，同步环引出部位距屏蔽墙内侧

22.8m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.026m 混凝土墙，预测点墙外 30cm 处距束流损失点的距离为 32.6m，故预测点墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 0.757 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 43 号点位诊室 7，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 23.1m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.039m 混凝土墙，预测点墙外 30cm 处距束流损失点的距离为 33m，故预测点墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 0.738 μ Sv/h。

对于图 5.2-2 中 44 号点位诊室 8，同步环引出部位距屏蔽墙内侧 23.6m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），屏蔽墙为 1.064m 混凝土墙，预测点墙外 30cm 处距束流损失点的距离为 33.7m，故预测点墙外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 0.696 μ Sv/h。

对于图 5.2-3 中 45 号点位重离子工艺变配电房，同步环引出部位距天花板底部 10.2m（保守取图 5.2-13 中侧向 10m），天花板为 0.8m 混凝土楼板，故天花板外 30cm 处受到同步环引出部位的辐射剂量率为 2.263 μ Sv/h。

④小结

综上，7、16~18、30、36~45 预测点的辐射剂量率计算结果如表 5.2-9 所示。

表 5.2-9 7、16~18、30 预测点的辐射剂量率

序号	楼层	点位描述	主要考虑的束流损失点				剂量率预测值($\mu\text{Sv/h}$)
			1 [#] 治疗室	回旋引出部位	同步环注入口	同步环引出部位	
7	-1	医梯	4.111×10^{-4}	1.089×10^{-5}	-	7.41×10^{-1}	7.414×10^{-1}
16		加速器备品间	-	-	2.916×10^{-4}	1.469	1.469
17		设备区走廊	-	-	3.025×10^{-4}	2.272	2.272
18		设备转运大厅	-	-	-	1.429	1.429
30	1	诊室 2	-	-	1.288×10^{-5}	1.347	1.347
36		医护更衣室 1	-	-	1.231×10^{-6}	1.250	1.250
37		医护更衣室 2	-	-	4.168×10^{-6}	1.293	1.293
38		诊室 1	-	-	1.177×10^{-6}	1.344	1.344
39		诊室 3	-	-	3.349×10^{-6}	1.302	1.302
40		诊室 4	-	-	8.345×10^{-7}	1.221	1.221
41		诊室 5	-	-	2.990×10^{-5}	7.71×10^{-1}	7.71×10^{-1}
42		诊室 6	-	-	2.500×10^{-5}	7.57×10^{-1}	7.57×10^{-1}
43		诊室 7	-	-	4.303×10^{-7}	7.38×10^{-1}	7.38×10^{-1}
44		诊室 8	-	-	5.732×10^{-6}	6.96×10^{-1}	6.96×10^{-1}
45	2	重离子工艺变配电房	-	-	-	2.263	2.263

由表 5.2-9 可知，7、16~18、30、36~45 号预测点位，加速器大厅周边各预测点的贯穿辐射剂量率计算结果在 $6.96 \times 10^{-1} \sim 2.272 \mu\text{Sv/h}$ 之间，均小于表 1.4-2 中其对应的剂量率控制水平，满足辐射防护要求。

(2)加速器大厅绕迷宫辐射

本项目重离子治疗加速器大厅进出口迷宫有两个，分别为布置在东南侧的 1#迷宫和西北侧的 2#迷宫，辐射源项分别考虑距离较近的回旋加速器引出部位、同步环注入口、同步环引出部位三者叠加、同步环引出部位束流损失点产生的中子辐射。

本项目重离子治疗加速器大厅的迷宫设计如图 4.1-4、4.1-5 所示。屏蔽水泥体 B1~B4 的位置关系如图 5.2-8 所示，重离子治疗加速器大厅迷宫相关参数见表 5.2-10。

表 5.2-10 HIMM 加速器大厅迷宫相关参数

单位：m

序号	参数符号		1#迷宫	2#迷宫
1	B1	厚度	1.0	0.6
2		长度	12.7	4
3	B2	厚度	0.8	0.6
4		长度	4.4	3.1
5	B3	厚度	0.5	0.8
6		长度	4.4	3.1
7	B4	厚度	0.5	1
8		长度	18.3	4.2
9	迷宫	宽度	2.9	1.5
10		高度	4.6	4.6

对于加速器大厅 1#迷宫内口，回旋加速器引出部位束流损失点距最近的隔墙内距离为 5m，屏蔽墙厚 1.3m，束流损失点到墙外侧的距离 6.3m，束流损失点到预测点的距离 12.7m，可计算出迷宫内入口处的辐射剂量率为 $2.722 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/h}$ ；同步环注入口束流损失点距预测点距离为 26.1m，无屏蔽墙阻挡，可计算出迷宫内入口处的辐射剂量率为 $1.13 \times$

$10^{-2}\mu\text{Sv/h}$; 同步环引出部位束流损失点距最近的隔墙内距离为 21.3m(保守取图 5.2-13 中侧向 10m), 屏蔽墙厚 3.5m, 束流损失点到墙外侧的距离 24.9m, 束流损失点到预测点的距离 33.9m, 可计算出迷宫内入口处的辐射剂量率为 $2.19 \times 10^{-3}\mu\text{Sv/h}$; 三者叠加, 加速器大厅 1#迷宫内口的辐射剂量率为 $1.622 \times 10^{-2}\mu\text{Sv/h}$ 。

对于加速器大厅 2#迷宫内口, 距同步环引出部位束流损失点约 12.6m (保守取图 5.2-13 中侧向 10m), 则加速器大厅 2#迷宫内口的辐射剂量率为 $15.066 \mu\text{Sv/h}$ 。

通过计算, 然后通过查图 5.2-9~图 5.2-10, 可以得出中子在经过迷宫门后的剂量衰减率, 其中 d 为迷宫门内的横向通道, A 为迷宫门内通道的截面积。HIMM 加速器大厅迷宫传输因子计算及结果见表 5.2-11。

表 5.2-11 HIMM 加速器大厅迷宫传输因子计算及结果

序号	参数符号		1#迷宫	2#迷宫
1	第一段	d_1 (m)	3.9	2.1
2		A_1 (m)	9.2	6.9
3		$d_1 / \sqrt{A_1}$	1.3	0.8
4		减弱倍数	1.5×10^{-1}	3×10^{-1}
5	第二段	d_2 (m)	18.3	5.5
6		A_2 (m)	13.34	6.9
7		$d_2 / \sqrt{A_2}$	5.0	2.1
8		减弱倍数	8.5×10^{-4}	9×10^{-3}
9	两段累积减弱倍数		1.275×10^{-4}	2.7×10^{-3}
10	中子迷宫入口处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		1.622×10^{-2}	15.066
11	中子迷宫出口处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		2.068×10^{-6}	4.068×10^{-2}

通过对比加速器大厅 1#、2#迷宫门口的贯穿剂量率和表 5.2-11 可知, HIMM 运行产生的中子经过迷宫后的衰减效果, 与通过屏蔽墙的衰减效

果相当，并未减弱整个重离子治疗加速器治疗室屏蔽结构的辐射防护效果，累加可得表 5.2-12。

表 5.2-12 HIMM 加速器大厅迷宫门外总剂量率结果

项目	1#迷宫	2#迷宫
中子绕迷宫的出口处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	2.068×10^{-6}	4.068×10^{-2}
中子贯穿辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	1.181×10^{-2}	7.449×10^{-1}
迷宫门外总剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	1.181×10^{-2}	7.856×10^{-1}

由表 5.2-12，得出本项目 HIMM 加速器大厅 2 个迷宫门外的剂量率为 $1.181 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h} \sim 7.856 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ 之间，小于表 1.4-2 中其对应的剂量率控制水平，满足辐射防护要求。

5.2.1.2 人员受照剂量

本项目拟配置重离子治疗加速器（HIMM）医用射线装置，开展放射性诊断和治疗服务，以下论述评价其产生的工作人员职业照射剂量和公众照射剂量。工作人员职业照射剂量主要途径包括：贯穿辐射、绕迷宫辐射对工作人员的外照射、治疗室感生放射性气体对医护工作人员的内外照射、治疗室治疗结束的患者、质控时水体模对医护工作人员的外照射、加速器大厅感生放射性气体对运维工作人员的内外照射、感生放射性结构部件对运维工作人员的外照射。公众照射剂量主要途径包括：贯穿辐射、绕迷宫辐射对公众的外照射、感生放射性流出物对公众的辐射、中子天空反射对公众的辐射。以下分别对其进行分析和评价。

DR 机由于分别位于 5 个治疗室内，出束时无工作人员和公众在治疗室内，对工作人员职业照射剂量和公众照射剂量的贡献可忽略。

5.2.1.2.1 工作人员受照剂量

A 贯穿辐射、绕迷宫辐射对工作人员的辐射影响分析

屏蔽墙外工作人员所受照射剂量与剂量率、加速器出束时间、人员在参考点所处的居留因子有关。本项目重离子治疗加速器相关的工作人员剂量预测分析如下：

估算时，按重离子治疗加速器年最大治疗 21000 病人次，每次治疗出束时间 5min 计，加速器年最大出束治疗时间为 1750h(共 5 个治疗室，每个 350h)。此处，保守假设每个预测点处工作人员受照射时间为 1750h，进行年有效剂量的估算。

辐射工作区周围各关注点的居留因子选取根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）附录 A、《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）附录 A 的要求进行，由此可得出贯穿辐射所致各剂量预测点工作人员职业照射年有效剂量，见表 5.2-13。

表 5.2-13 贯穿辐射所致各工作人员剂量预测点位的年有效剂量

序号	保护目标	预测点位置	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)	剂量约束值 (mSv/a)
21	医护人员	前台	1	3.077×10^{-2}	5
22	医护人员	咨询	1	3.397×10^{-3}	5
23	运维工作人员	中央控制室	1	2.714×10^{-2}	5
24	医护人员	护士站	1	3.307×10^{-1}	5
26	医护人员	接待室	1	7.383×10^{-3}	5
27	运维工作人员	运维办公室	1	6.116×10^{-4}	5
28	医护人员	护士办公室	1	3.249×10^{-1}	5
30	医护人员	诊室 2	1/2	1.179	5
36	医护人员	医护更衣室 1	1/2	1.094	5
37	医护人员	医护更衣室 2	1/2	1.131	5
38	医护人员	诊室 1	1/2	1.176	5
39	医护人员	诊室 3	1/2	1.139	5
40	医护人员	诊室 4	1/2	1.068	5
41	医护人员	诊室 5	1/2	6.747×10^{-1}	5
42	医护人员	诊室 6	1/2	6.624×10^{-1}	5
43	医护人员	诊室 7	1/2	6.458×10^{-1}	5
44	医护人员	诊室 8	1/2	6.090×10^{-1}	5
45	运维工作人员	重离子工艺变配电房	1/20	1.980×10^{-1}	5
46	医护人员	会议室	1/2	7.980×10^{-3}	5

由表 5.2-13 可知，对于预测点位，贯穿辐射所致医护工作人员的年有效剂量预测值在 $3.397 \times 10^{-3} \sim 1.179 \text{mSv/a}$ 之间；贯穿辐射所致运维工作人员的年有效剂量预测值在 $6.116 \times 10^{-4} \sim 2.714 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ 之间。

当治疗室出束时，相邻的治疗室中有医护人员对病人进行摆位工作。对相邻治疗室中摆位医护工作人员的年有效剂量估算如下：按重离子治疗加速器年最大治疗 21000 病人次，每次摆位时间 5min 计，加速器年最大摆位时间为 1750h（共 5 个治疗室，每个 350h）。此处，假设每个治疗室中摆位医护人员为固定人员，且仅负责本治疗室的摆位工作，则受照射时间为 350h，摆位医护工作人员的年有效剂量的估算如表 5.2-14 所示。

表 5.2-14 贯穿辐射所致摆位医护人员年有效剂量预测值

序号	保护目标	预测点位置	主要考虑的束流损失点	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)	剂量约束值 (mSv/a)
①	医护人员	2 [#] 治疗室	1 [#] 治疗室	1/2	6.18×10^{-2}	/
②		1 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室		1.701	
③		3 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室		2.079×10^{-1}	
④		2 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室		5.107×10^{-4}	
⑤		4 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室		1.426×10^{-1}	
⑥		3 [#] 治疗室	4 [#] 治疗室		1.212×10^{-1}	
⑦		Gantry 治疗室	4 [#] 治疗室		3.314×10^{-2}	
⑧		4 [#] 治疗室	Gantry 治疗室		3.444×10^{-2}	
合计						
②	医护人员	1 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室	/	1.701	5
①+④		2 [#] 治疗室	1 [#] 治疗室、3 [#] 治疗室		6.231×10^{-2}	
③+⑥		3 [#] 治疗室	2 [#] 治疗室、4 [#] 治疗室		3.29×10^{-1}	
⑤+⑧		4 [#] 治疗室	3 [#] 治疗室、Gantry 治疗室		1.77×10^{-1}	
⑦		Gantry 治疗室	4 [#] 治疗室		3.314×10^{-2}	

由表 5.2-14 可知，贯穿辐射所致相邻治疗室中摆位的医护工作人员的年有效剂量预测值在 $3.314 \times 10^{-2} \sim 1.701 \text{mSv/a}$ 之间。

Gantry 治疗室对应的屋面为上人屋面，当其出束时，对屋面上方 30cm 处的贯穿辐射剂量率计算结果为 $2.242 \mu\text{Sv/h}$ ，保守假设 Gantry 治疗室的年出束时间为 1750h，屋顶人员的居留因子为 1/20，则由此产生的年剂量最大为 $196.2 \mu\text{Sv}$ ，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中的“穿出机房顶的辐射对偶然到达机房外的人员的照射，以年剂量 $250 \mu\text{Sv}$ 加以控制”的要求。环评要求，建设单位需通过管理手段使公众不能到达此区域，且通过管理手段使工作人员不能到达 2~4 号射线屋顶夹角范围内。

B 治疗室感生放射性气体对医护工作人员的内外照射影响分析

(1)源项估算

终端治疗室停止出束并以 5 次/h 的换气次数排风 2min 后，医护工

作人员进入治疗室进行操作，会受到治疗室感生放射性气体的内外照射影响。

治疗室内此时的感生放射性气体源项可用下式计算：

$$A_i(t) = A_{0i} \cdot e^{-(\lambda_i + \lambda_p) t} \quad (\text{式 5.2-2})$$

式中：

$A_i(t)$ —— t 时刻房间内核素 i 的放射性活度，Bq；

A_{0i} —— 房间内初始时刻的放射性核素活度，Bq；

λ_i —— 核素 i 的衰变常数， s^{-1} ；

λ_p —— 房间换气次数， s^{-1} ，此处 $\lambda_p = 1.389 \times 10^{-3} s^{-1}$ 。

保守参照表 3.3-6 的源项，按上式可计算出医护人员进入治疗室时，室内的感生放射性气体源项（“其他”核素只考虑排风效应，不考虑衰变），计算结果见表 5.2-15。

表 5.2-15 停束并以 5 次/h 排风 2min 后治疗室气体感生放射性核素总量及主要核素活度

编号	核素	活度 (Bq)
1	^{41}Ar	1.396×10^4
2	^{15}O	4.024×10^4
3	^{13}N	8.622×10^4
4	^{12}B	0
5	^{11}C	1.147×10^5
6	^{10}C	1.823×10^2
7	^8Li	2.038×10^{-39}
8	^8B	1.693×10^{-43}
9	^7Be	4.85×10^4
10	^6He	3.052×10^{-41}
11	^3H	1.705×10^3
12	其他	2.87×10^4
13	总量	3.342×10^5

5 个治疗室的体积 $V_1=650.3\text{m}^3$ ， $V_2=409.3\text{m}^3$ ， $V_3=377.8\text{m}^3$ ， $V_4=420.5\text{m}^3$ ， $V_{\text{Gantry}}=8755.3\text{m}^3$ ，保守考虑医护人员接触的感生放射

性气体的最大活度浓度 $A_{oi}=3.342 \times 10^5 \div 377.8=8.846 \times 10^2 \text{Bq/m}^3$ 。

(2)对医护人员所致剂量估算

根据本报告“3.3.2.1.2”小节所述：本次评价，重离子治疗加速器产生的感生放射性气体仅考虑 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 六种放射性核素。 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 核素考虑烟云浸没外照射途径， ^7Be 、 ^3H 核素考虑烟云浸没外照射和吸入内照射两种途径。

估算时，按重离子治疗加速器年最大治疗 21000 病人次，每次治疗需医护人员进入治疗室 2 次，合计 42000 次，每次时长 3min 计，医护人员受感生放射性气体影响的年最大时间为 2100h（共 5 个治疗室，每个 420h）。此处，保守假设医护人员受照射时间为 2100h，进行年有效剂量的估算。

烟云浸没外照射剂量按下式估算：

$$D_s^{im}(x) = T \cdot C_s(x) \cdot DRF_{im} \dots\dots\dots \text{（式 5.2-3）}$$

式中：

$D_s^{im}(x)$ —年辐射剂量，Sv/a；

T —年照射时间，s，本次评价保守取值 $3.15 \times 10^7 \text{s}$ ；

$C_s(x)$ —S 风向、下风距离 x 处扇形段平均地面浓度， Bq/m^3 ；

DRF_{im} —放射性核素的烟云浸没外照射剂量转换因子， ^{11}C 为 $4.89 \times 10^{-14} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ 、 ^{13}N 为 $4.90 \times 10^{-14} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ 、 ^{15}O 为 $4.91 \times 10^{-14} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ 、 ^{41}Ar 为 $6.50 \times 10^{-14} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ 、 ^7Be 为 $2.36 \times 10^{-15} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ 、 ^3H 为 $3.31 \times 10^{-19} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ （数据引自：Safety Reports Series No.19）。

吸入内照射剂量按下式估算：

$$D_i^{inh} = C_{Ai} R_{inh} DF_{inh} \text{（式 5.2-4）}$$

式中：

C_{Ai} —核素 i 的地面空气浓度，单位 Bq/m^3 ；

R_{inh} ——呼吸率，单位 m^3/a ，对于成人，呼吸率取值为 $8400m^3/a$ （数据引自 Safety Reports Series No.19）；

DF_{inh} ——吸入内照射剂量转换因子，对于成人， 7Be 为 $5.0 \times 10^{-11} Sv/Bq$ 、 3H 为 $4.5 \times 10^{-11} Sv/Bq$ （数据引自 GB18871-2002）。

根据式 5.2-3 和式 5.2-4，可计算出治疗室感生放射性气体对医护人员的工作人员的内外照射所致有效剂量，结果见表 5.2-16。

表 5.2-16 治疗室感生放射性气体对医护人员的工作人员的内外照射所致有效剂量（mSv/a）

核素	烟云浸没外照射	吸入内照射	合计
^{11}C	3.27×10^{-1}	/	3.27×10^{-1}
^{13}N	3.277×10^{-1}	/	3.277×10^{-1}
^{15}O	3.284×10^{-1}	/	3.284×10^{-1}
^{41}Ar	4.347×10^{-1}	/	4.347×10^{-1}
7Be	1.578×10^{-2}	8.907×10^{-2}	1.048×10^{-1}
3H	2.214×10^{-6}	8.016×10^{-2}	8.016×10^{-2}

由表 5.2-16 可知，由治疗室感生放射性气体对医护人员的工作人员的内外照射所致最大有效剂量为 $4.347 \times 10^{-1} mSv/a$ 。

C 治疗室治疗结束的患者、质控时水体模对医护人员的外照射影响分析

(1)源项估算

终端治疗室停止出束约 3min 后，医护人员在治疗室内近距离接触治疗结束的患者、水体模，受到治疗结束患者、水体模的外照射影响。

人体的含水量约 70%，可近似将人体看成水靶。保守考虑参照表 3.3-18 的源项，按式 5.2-2 可计算出医护人员近距离接触治疗结束

的患者、水体模时，患者、水体模的感生放射性源项（只考虑衰变且不考虑“其他”核素的衰变），计算结果见表 5.2-17。

表 5.2-17 停束 3min 后治疗结束的患者、水体模感生放射性核素总量及主要核素活度

编号	核素	活度 (Bq)
1	^{16}N	1.916×10^{-2}
2	^{15}O	6.508×10^6
3	^{14}O	8.246×10^4
4	^{13}B	0
5	^{13}N	1.316×10^6
6	^{12}B	0
7	^{12}N	0
8	^{11}C	1.03×10^7
9	^{10}C	1.95×10^3
10	^9Li	9.126×10^{-285}
11	^9C	0
12	^8Li	2.645×10^{-59}
13	^8Be	0
14	^8B	3.936×10^{-65}
15	^7Be	2.03×10^6
16	^6He	5.852×10^{-62}
17	^3H	9.6×10^4
18	其他	5×10^5
19	总量	2.083×10^7

(2)对医护人员所致剂量率估算

治疗结束的患者、水体模涉及的主要放射性核素核物理参数见表 5.2-18，引自《辐射防护手册》第一分册。

表 5.2-18 治疗结束的患者、水体模涉及的主要放射性核素核物理参数

序号	核素名称	半衰期	衰变方式(分支比, %)	最大粒子能量 (MeV)	最大光子能量 (MeV)	Γ 照射量率常数(R m ² /h Ci)
1	¹⁵ O	124s	β+ (100)	1.723		0.6
2	¹⁴ O	71s	β+ (~100)	1.8126	2.31268	1.59
3	¹³ N	10min	β+ (100)	1.19		0.6
4	¹¹ C	20.5min	β+ (99.8) ε (0.02)	0.9608		0.6
5	¹⁰ C	19s	β+ (100)	1.865	1.02178	1.02
6	⁷ Be	53d	ε (100)		0.477593	0.029
7	³ H	12.3a	β- (100)	0.01861		

本次评价选取 ¹⁴O、¹⁰C、⁷Be 三种核素作为代表性核素，将人体、水体模简化为 φ0.6m×1.7m 的圆柱体。根据《辐射防护手册》第三分册（李德平、潘自强主编，原子能出版社），治疗结束的患者、水体模对医护工作人员的剂量率可用下式计算，几何关系如图 5.2-14 所示：

$$D_a = 8.69 \times 10^{-3} \times \theta \frac{S}{d} \sum_n \Gamma_n C_n \quad (\text{式 } 5.2-5)$$

式中：

D_a ——空气吸收剂量率，Gy/h；

θ ——人体对预测点的张角，弧度， $d=0.1\text{m}$ 时，最大 $\theta=2.907$ ；

S ——人体横截面积，m²，取 $S=0.2826\text{m}^2$ ；

d ——医护人员到人体轴线的距离，m，取 $d=0.1\text{m}$ ；

Γ_n ——照射量率常数，R m² h⁻¹ Ci⁻¹；

C_n ——人体内核素浓度，Ci m⁻³。

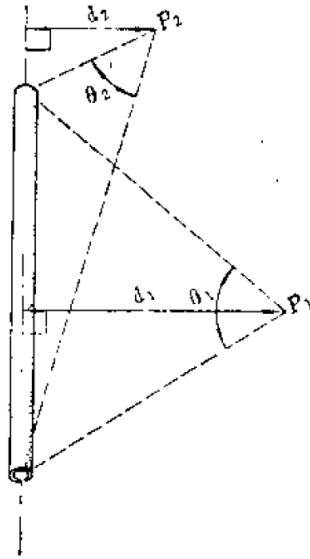


图 5.2-14 估算治疗结束的患者对医护工作人员的剂量率时的几何图形

将参数代入上式，可得治疗结束的患者、水体模对医护工作人员的剂量率为 $7.711 \times 10^{-1} \mu\text{Gy/h}$ 。

(3)对医护工作人员所致剂量估算

估算时，按重离子治疗加速器年最大治疗 21000 病人次，每次接触患者约 1min 计，医护工作人员受治疗结束的患者影响的年最大时间为 350h；根据设计资料，医护工作人员中的物理师的质控时间按年 662h 计，以此进行年有效剂量的估算。故由治疗结束的患者对医护工作人员的外照射所致最大年有效剂量为 $5.105 \times 10^{-1} \text{mSv/a}$ 。

D 加速器大厅感生放射性气体对运维工作人员的内外照射影响分析

(1)源项估算

加速器运行时，加速器大厅不排风；加速器停机，加速器大厅以 5 次/h 的换气次数排风 5min 后，运维工作人员进入加速器大厅进行巡检、维护、故障处理和检修，会受到加速器大厅感生放射性气体的内外照射影响。

保守参照表 3.3-6 的源项，按式 5.2-2 可计算出运维工作人员进入加速器大厅时，室内的感生放射性气体源项（其他核素只考虑排风效应，不考虑衰变， $\lambda_p = 1.389 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ），计算结果见表 5.2-19。

表 5.2-19 停机并以 5 次/h 排风 5min 后加速器大厅气体感生放射性核素总量及主要核素活度

编号	核素	活度 (Bq)
1	^{41}Ar	1.066×10^4
2	^{15}O	1.164×10^4
3	^{13}N	5.454×10^4
4	^{12}B	0
5	^{11}C	8.072×10^4
6	^{10}C	2.197×10^{-1}
7	^8Li	3.470×10^{-104}
8	^8B	5.617×10^{-114}
9	^7Be	3.777×10^4
10	^6He	1.610×10^{-108}
11	^3H	1.328×10^3
12	其他	2.235×10^4
13	总量	2.190×10^5

加速器大厅的体积 $V=12684.38\text{m}^3$ ，保守考虑运维工作人员接触的感生放射性气体的最大活度浓度 $A_{0i}=2.19 \times 10^5 \div 12684.38=17.267\text{Bq/m}^3$ 。

(2)对运维工作人员所致剂量估算

根据本报告“3.3.2.1.2”小节所述：本次评价，重离子治疗加速器产生的感生放射性气体仅考虑 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 六种放射性核素。 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 核素考虑烟云浸没外照射途径， ^7Be 、 ^3H 核素考虑烟云浸没外照射和吸入内照射两种途径。

估算时，运维工作人员进入加速器大厅的情形有：每日巡检 0.5h（每年运行 210d）；每周维护 2h（每年运行 30 周）；故障处理（按武威装置运维经验）平均每年 15 次，共 100h；年度检修每次 8d，每天 10h，则运维工作人员受感生放射性气体影响的年最大时间为 345h，以此进行年有效剂量的估算。

根据式 5.2-3 和式 5.2-4，可计算出加速器大厅感生放射性气体对运维工作人员的内外照射所致有效剂量，结果见表 5.2-20。

表 5.2-20 加速器大厅感生放射性气体对运维工作人员的内外照射所致有效剂量 (mSv/a)

核素	烟云浸没外照射	吸入内照射	合计
^{11}C	1.049×10^{-3}	/	1.049×10^{-3}
^{13}N	1.051×10^{-3}	/	1.051×10^{-3}
^{15}O	1.053×10^{-3}	/	1.053×10^{-3}
^{41}Ar	1.394×10^{-3}	/	1.394×10^{-3}
^7Be	5.061×10^{-5}	2.856×10^{-4}	3.362×10^{-4}
^3H	7.098×10^{-9}	2.57×10^{-4}	2.57×10^{-4}

由表 5.2-20 可知, 由加速器大厅感生放射性气体对运维工作人员的内外照射所致最大有效剂量为 $1.394 \times 10^{-3} \text{mSv/a}$ 。

E 感生放射性结构部件对运维工作人员的外照射影响分析

(1)源项估算

加速器停机后, 运维工作人员换靶、调节装置或检修加速器而进入治疗室或加速器大厅时, 会受到感生放射性结构部件的外照射影响。根据设计资料, 为减小这部分剂量, 加速器停机后运维工作人员应至少等感生放射性结构部件衰变 15min 再近距离接触。

参照设计资料, 以加速器连续运行 30d 后, 停止照射时刻结构部件的感生放射性活度, 按式 5.2-2 可计算出运维工作人员近距离接触感生放射性结构部件时, 结构部件的感生放射性源项 (只考虑衰变), 计算结果见表 5.2-21。

表 5.2-21 停机 15min 后感生放射性结构部件感生放射性核素总量及主要核素活度

编号	核素	活度 (Bq)
1	^3H	2.5×10^3
2	^7Be	4.999×10^2
3	^{11}C	2.998×10^3
4	^{18}F	2.274×10^4
5	^{22}Na	2.5×10^2

6	^{24}Na	4.942×10^3
7	^{42}K	2.465×10^4
8	^{43}K	2.481×10^4
9	^{44}Sc	2.392×10^5
10	$^{44\text{m}}\text{Sc}$	2.493×10^5
11	^{46}Sc	5×10^3
12	^{47}Sc	2.495×10^4
13	^{48}Sc	2.49×10^4
14	^{48}V	7.497×10^4
15	^{51}Cr	7.498×10^4
16	^{52}Mn	7.49×10^4
17	$^{52\text{m}}\text{Mn}$	4.582×10^4
18	^{54}Mn	5×10^3
19	^{56}Mn	7.013×10^4
20	^{56}Co	2.5×10^4
21	^{57}Co	2.5×10^4
22	^{58}Co	7.499×10^4
23	^{52}Fe	4.896×10^3
24	^{55}Fe	5×10^3
25	^{59}Fe	4.999×10^3
26	^{57}Ni	2.488×10^4
27	^{65}Ni	7.002×10^4
28	^{60}Co	2.5×10^3
29	^{60}Cu	1.612×10^5
30	^{61}Cu	7.12×10^5
31	^{62}Cu	1.706×10^6
32	^{64}Cu	9.864×10^6
33	^{62}Zn	2.453×10^4
34	^{65}Zn	5×10^2
35	总量	1.368×10^7

(2)对运维工作人员所致剂量率估算

感生放射性结构部件涉及的主要放射性核素核物理参数见表

5.2-22, 引自《辐射防护手册》第一分册。

表 5.2-22 感生放射性结构部件涉及的主要放射性核素核物理参数

序号	核素名称	半衰期	衰变方式(分支比, %)	最大粒子能量 (MeV)	最大光子能量 (MeV)	Γ 照射量率常数($R\ m^2/h\ Ci$)
1	3H	12.3a	β^- (100)	0.01861		
2	7Be	53.22d	ϵ (100)		0.477593	0.029
3	^{11}C	20.33min	β^+ (99.8) ϵ (0.02)	0.9608		0.6
4	^{18}F	1.83h	β^+ (97) ϵ (3)	0.635		0.58
5	^{22}Na	2.60a	β^+ (90.55) ϵ (9.45)	0.5457	1.27455	1.21
6	^{24}Na	14.95h	β^- (100)	1.3892	2.7541	1.87
7	^{42}K	12.32h	β^- (100)	3.519	1.5246	0.14
8	^{43}K	22.3h	β^- (100)	1.24	0.6178	0.577
9	^{44}Sc	3.92h	β^+ 、 ϵ (~100)	1.471	1.157002	1.24
10	^{44m}Sc	2.44d	ϵ (1.2) IT (98.8)		1.157002	1.41
11	^{46}Sc	83.8d	β^- (100)	1.475	1.120506	1.09
12	^{47}Sc	3.35d	β^- (100)	0.6	0.159381	0.057
13	^{48}Sc	1.82d	β^- (100)	0.654	1.312087	1.8
14	^{48}V	15.97d	β^+ (51) ϵ (49.61)	0.698	1.312087	1.61
15	^{51}Cr	27.7d	ϵ (100)		0.320032	0.018
16	^{52}Mn	5.59d	β^+ (>28) ϵ (>66)	0.575	1.434056	1.84
17	^{52m}Mn	21.1min	β^+ (>97.22) ϵ (>1.49) IT (~2)	2.631	1.43406	1.3
18	^{54}Mn	312.1d	β^+ (< 8×10^{-5}) ϵ (~100)		0.834827	0.47
19	^{56}Mn	2.58h	β^- (100)	2.838	2.11305	0.89

20	⁵⁶ Co	77.2d	β+ (23.96) ε (77.52)	1.459	2.59858	1.79
21	⁵⁷ Co	271.7d	ε (100)		0.13647	0.096
22	⁵⁸ Co	70.9d	β+ (≥15.5) ε (>84)	0.474	0.810755	0.545
23	⁵⁵ Fe	2.74a	ε (100)			
24	⁵⁹ Fe	44.5d	β- (100)	0.461	1.291564	0.63
25	⁵⁷ Ni	35.6h	β+ (~41) ε (~59)	0.849	1.91943	1.05
26	⁶⁵ Ni	2.52h	β- (100)	2.14	1.48184	0.3
27	⁶⁰ Co	5.27a	β- (100)	0.315	1.33247	1.32
28	⁶⁰ Cu	23.7min	β+ (93) ε (~7)	3.92	1.7916	1.99
29	⁶¹ Cu	3.33h	β+ (~62) ε (~38)	1.205	1.18516	0.52
30	⁶² Cu	9.67min	β+ (97.5) ε (2.5)	2.934	1.17302	0.589
31	⁶⁴ Cu	12.7h	β- (39.6) β+ (19.3) ε (41.1)	0.657	1.3459	0.12
32	⁶⁵ Zn	243.7d	β+ (1.54) ε (98)	0.325	1.1155	0.314

本次评价选取 ²⁴Na 核素作为代表性核素，将结构部件简化为点源。根据《辐射防护手册》第三分册（李德平、潘自强主编，原子能出版社），感生放射性结构部件对运维工作人员的剂量率可用下式计算：

$$D_a = 8.69 \times 10^{-3} \times \frac{A \cdot \Gamma}{r^2} \quad (\text{式 5.2-6})$$

式中：

D_a ——空气吸收剂量率，Gy/h；

A——放射性活度，Ci；

Γ ——照射量率常数， $R m^2 h^{-1} Ci^{-1}$ ；

r——计算点与放射源之间的距离，m，取 r=0.1m。

将参数代入上式，可得感生放射性结构部件对运维工作人员的剂量率为 $2.171 \times 10^{-1} \mu\text{Gy/h}$ 。

(3)对运维工作人员所致剂量估算

估算时，运维工作人员近距离接触感生放射性结构部件的情形如表 5.2-23 所示。

表 5.2-23 运维工作人员近距离接触感生放射性结构部件的情形

活化设备名称	位置	维修周期	每次维修时间
回旋腔体	回旋加速器内	1-2 年	4h
注入反射镜	回旋加速器内	1-2 年	3h
梯度校正磁铁 (GCC)	回旋腔体内	1-2 年	1h
引出 BUMP 磁铁	回旋腔体内	1-2 年	1h
引出偏转板	回旋加速器引出口	1-5 年	3h
引出二极磁铁 (M2)	回旋腔体内	3-5 年	5h
法拉第筒	回旋加速器引出口	3-5 年	2h
真空管道	回旋加速器引出口	3-5 年	5h
真空管道	同步加速器引出口	3-5 年	5h
真空管道	同步加速器注入口	3-5 年	5h
静电偏转板	同步加速器二象限	3-5 年	5h
多叶光栅准直	治疗头	1 个月	0.5h
多叶光栅维护	治疗头	1 年	10h
脊形过滤器	治疗头	1 年	2h
射程移位器	治疗头	1 年	2h

由表 5.2-23，按最短维修周期保守考虑，运维工作人员近距离接触感生放射性结构部件的年最大时间为 41h，以此进行年有效剂量的估算。故由感生放射性结构部件对运维工作人员的外照射所致年有效剂量为 $8.9 \times 10^{-3} \text{mSv/a}$ 。

F 治疗室感生放射性气体对运维工作人员的内外照射影响分析

(1)源项估算

终端治疗室停止出束并以 5 次/h 的换气次数排风 2min 后，运维工

作人员进入治疗室对治疗头进行维修、维护，会受到治疗室感生放射性气体的内外照射影响。

同理，治疗室内此时的感生放射性气体源项如表 5.2-15 所示。5 个治疗室的体积 $V_1=650.3\text{m}^3$ ， $V_2=409.3\text{m}^3$ ， $V_3=377.8\text{m}^3$ ， $V_4=420.5\text{m}^3$ ， $V_{\text{Gantry}}=8755.3\text{m}^3$ ，保守考虑运维工作人员接触的感生放射性气体的最大活度浓度 $A_{0i}=3.342 \times 10^5 \div 377.8=8.846 \times 10^2\text{Bq/m}^3$ 。

(2)对运维工作人员所致剂量估算

根据本报告“3.3.2.1.2”小节所述：本次评价，重离子治疗加速器产生的感生放射性气体仅考虑 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 六种放射性核素。 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 核素考虑烟云浸没外照射途径， ^7Be 、 ^3H 核素考虑烟云浸没外照射和吸入内照射两种途径。

由表 5.2-23，运维工作人员在治疗室内对治疗头进行维修、维护的年最大时间为 20h，以此进行年有效剂量的估算。

同理，根据式 5.2-3 和式 5.2-4，可计算出治疗室感生放射性气体对运维工作人员的内外照射所致有效剂量，结果见表 5.2-24。

表 5.2-24 治疗室感生放射性气体对运维工作人员的内外照射所致有效剂量 (mSv/a)

核素	烟云浸没外照射	吸入内照射	合计
^{11}C	3.114×10^{-3}	/	3.114×10^{-3}
^{13}N	3.121×10^{-3}	/	3.121×10^{-3}
^{15}O	3.127×10^{-3}	/	3.127×10^{-3}
^{41}Ar	4.14×10^{-3}	/	4.14×10^{-3}
^7Be	1.503×10^{-4}	8.482×10^{-4}	9.986×10^{-4}
^3H	2.108×10^{-8}	7.634×10^{-4}	7.634×10^{-4}

由表 5.2-24 可知，由治疗室感生放射性气体对运维工作人员的内外照射所致最大有效剂量为 $4.14 \times 10^{-3}\text{mSv/a}$ 。

5.2.1.2.2 公众受照剂量

A 贯穿辐射、绕迷宫辐射对公众的辐射影响分析

屏蔽墙外公众所受照射剂量与剂量率、加速器出束时间、人员在参考点所处的居留因子有关。本项目重离子治疗加速器相关的公众剂量预测分析如下：

估算时，按重离子治疗加速器年最大治疗 21000 病人次，每次治疗出束时间 5min 计，加速器年最大出束治疗时间为 1750h（共 5 个治疗室，每个 350h）。此处，保守假设每个预测点处公众受照射时间为 1750h，进行年有效剂量的估算。

辐射工作区周围各关注点的居留因子选取根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）附录 A、《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）附录 A 的要求进行，由此可得出贯穿辐射所致各剂量预测点公众照射年有效剂量，见表 5.2-25。

表 5.2-25 贯穿辐射所致各公众剂量预测点位的年有效剂量

序号	保护目标	预测点位置	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)	剂量约束值 (mSv/a)
19	公众	等候室 1	1/20	1.978×10^{-3}	0.1
20	公众	等候室 2	1/20	1.735×10^{-3}	0.1
25	公众	等候室 3	1/20	8.513×10^{-3}	0.1
29	公众	Gantry 等候区	1/20	3.058×10^{-2}	0.1
31	公众	硼中子治疗中心	1	1.1×10^{-2}	0.1
32	公众	铁灶村社区	1	4.563×10^{-2}	0.1
33	公众	伦琴医学影像诊断中心	1	1.175×10^{-3}	0.1

由表 5.2-25 可知，对于 19、20、25、29、31~33 号点位，贯穿辐射所致公众的年有效剂量预测值在 $1.175 \times 10^{-3} \sim 4.563 \times 10^{-2}$ mSv/a 之间。

B 感生放射性流出物对公众的辐射影响分析

B.1 放射性流出物产生量和排放量

B.1.1 放射性气态流出物

项目放射性气态流出物主要为重离子治疗加速器运行期间产生的感生放射性空气。根据本报告“3.3.2.1.2”的 B 小节中感生放射性源项保守计算可知，HIMM 运行期间向空气中排放的总放射性最大为 $2.21 \times 10^{11} \text{Bq/a}$ 。

B.1.2 放射性液态流出物

本项目重离子加速器运行时设备冷却水可能被活化，但在正常情况下设备冷却水循环使用，不外排，无放射性液态流出物。本项目设计有 2 个放射性废水收集池（容量 $4.5 \text{m}^3/\text{个}$ ），以接收由于事故原因误排的设备冷却水。根据设计资料，单次事故产生的放射性废水体积最大为 4.3m^3 ，小于单个放射性废水收集池的容量。

环评要求：重离子加速器的事故及系统检修情况下产生的冷却水若要排放，需满足以下两种条件之一：①采取静置衰变措施，并在排放前进行监测，放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》

（GB18466-2005）表1中限值（总 β 放射性浓度不大于 10Bq/L ），并经审管部门批准后，方可纳入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂；②根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 $1 \text{ALI}_{\text{min}}$ ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录（根据 GB18871-2002 B1.3.4 的公式及表 B3 中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 ^7Be 、 ^3H 核素的 ALI_{min} 分别为 $8.33 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $4.17 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ）。

本项目经过相应处理后，各类放射性流出物的种类、排放浓度、排放总活度、排放方式和最终去向具体见表 5.2-26。

表 5.2-26 项目运行期各类放射性流出物年排放量及排放方式一览表

排放废物种类	排放活度浓度	年排放总活度	排放方式	最终去向
放射性气态流出物	$3 \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$	$2.21 \times 10^{11} \text{Bq/a}$	由通风系统排入周围大气排放	大气环境
放射性液态流出物	/	/	事故及系统检修情况下产生的冷却水若要排放，需满足以下两种条件之一：①采取静置衰变措施，并在排放前进行监测，放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)表1中限值(总 β 放射性浓度不大于10Bq/L)，并经审管部门批准后，方可纳入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂；②根据GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 1ALI_{min} ，并且每次排放后用不少于3倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于10倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录(根据GB18871-2002 B1.3.4的公式及表B3中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 ^7Be 、 ^3H 核素的 ALI_{min} 分别为 $8.33 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $4.17 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$)。	/

B.2 放射性流出物对环境的影响途径

本项目正常运行工况下不向外环境排放放射性液态流出物(即感生放射性冷却水)，感生放射性冷却水净化后，循环使用。

本项目正常运行状态下向环境排放的放射性污染物主要为放射性气态流出物。项目产生的放射性气态流出物经通风系统的7个排气筒(即本项目放射性气态流出物排放口，离地高度为24.6m)排入大气环境。

本次评价中考虑项目在正常运行工况下放射性气态流出物排放对公众造成辐射影响的途径包括：

- (1)烟云浸没外照射；
- (2)放射性气载流出物在地面沉积造成的外照射；
- (3)吸入空气造成的内照射。

放射性气态流出物对公众产生照射的各种途径按如图 5.2-15 所示考虑。

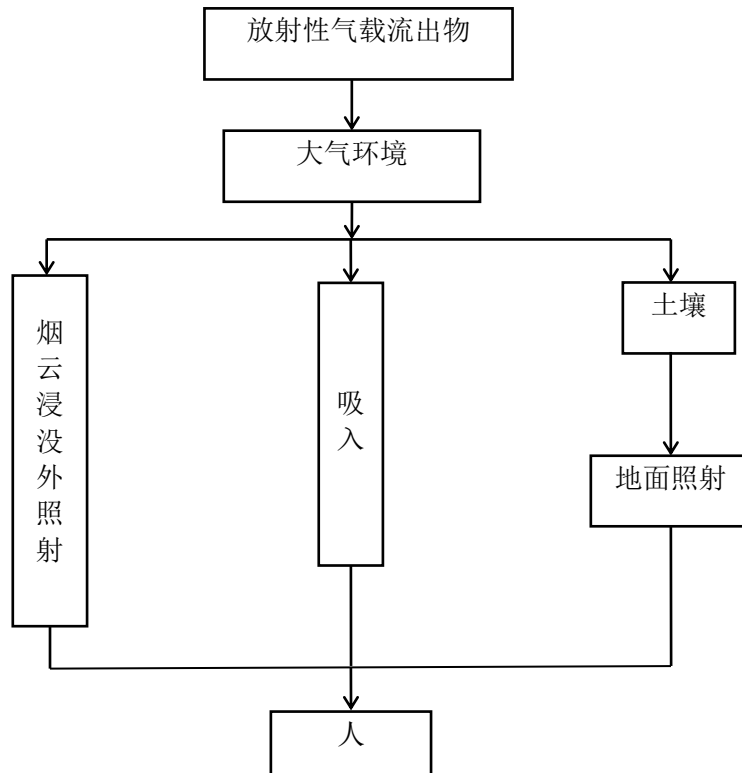


图 5.2-15 气态放射性流出物对人的照射途径

B.3 放射性流出物对环境的辐射影响

本小节考虑项目在正常运行工况下放射性气态流出物排放对外界环境的影响。

本项目重离子加速器在正常运行情况下，加速器大厅不进行通风换气，以使加速器大厅空气中产生的感生放射性核素自然衰变消减，不排入环境；在正常工况下，工作人员也不进入加速器大厅，不会受到空气感生放射性的辐射影响。在进行检修、维护等需要进入加速器大厅的工作时，将先对工作场所进行通风换气以尽量消除感生放射性气体对工作人员的辐射影响，在这种情形下，空气中感生放射性核素将通过气载流出物形式排放进入外环境，对公众产生辐射影响。

(1) 感生放射性气体源项

根据本报告“3.3.2.1.2”小节所述：本次评价，重离子治疗加速器产生的感生放射性气体仅考虑 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 六种放射性核素。根据本报告“3.3.2.1.2”的 B 小节中感生放射性源项保守计算可知：HIMM 向空气中排放的总放射性最大为 $2.21 \times 10^{11}\text{Bq/a}$ 。

本项目 HIMM 的年平均排放速率见表 3.3-16。

(2) 感生放射性气体环境影响预测

本项目感生放射性气态流出物环境辐射影响预测方法如下：

选用国际原子能委员会（IAEA）《Safety Reports Series No.19》“应用于估算放射性物质排入环境所产生的影响的通用模式”中的大气扩散模式，来预测本项目重离子治疗加速器运行所产生的感生放射性气态流出物排入环境对公众的辐射影响。

本项目 HIMM 机房通风系统的排气筒出口设在 HIMM 机房大厅屋顶（排气筒口离地高度约为 24.6m，7 个排气筒等效为 1 个考虑），废气排放高度不大于周围最高建筑物（肿瘤研究中心，高约 60m）高度的 2.5 倍。根据《Safety Reports Series No.19》，选取以下模式估算下风向地面空气中放射性核素浓度。

I. 当 $x \leq 2.5\sqrt{A_B}$ （ x ：下风向距离； A_B ：排放口周围对大气扩散影响最大的建筑物的横截面积）时，对于本项目，排放口周围对大气扩散影响最大的建筑物为肿瘤研究中心，其横截面积约为 7335.6m^2 ， $2.5\sqrt{A_B}$ 约为 214m，即当计算点的距离小于或等于 214m 时，排气筒下风向计算点处地面空气中放射性核素浓度计算模式：

$$C_A = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_B k} \dots\dots\dots \text{（式 5.2-7）}$$

式中：

k —常数 1m；

C_A —在扇形 p 下风向距离为 x 处的地面空气浓度 Bq/m^3 ；

Q_i —放射性核素 i 的平均排放速率 Bq/s, 本项目见表 3.3-16;

u_a —排放口高度的平均风速 m/s, 本项目为 2.9m/s;

P_p —所关注的受体处所在扇形 p 的风频, 一般取 0.25;

H_B —排放口周围影响大气扩散的建筑物高度 m, 本项目为 60m。

II. 当 $x > 2.5\sqrt{A_B}$ 时, 即当计算点的距离大于 214m 时, 排气筒下风向计算点处地面空气中放射性核素浓度计算模式为:

$$C_A = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \dots\dots\dots \text{(式 5.2-8)}$$

$$B = \frac{12}{\sqrt{2\pi^3}} \times \frac{1}{x \sum Z} \dots\dots\dots \text{(式 5.2-9)}$$

$$\sum Z = (\sigma_z^2 + \frac{A_B}{\pi})^{0.5} \dots\dots\dots \text{(式 5.2-10)}$$

式中:

σ_z —下风向距离为 x 处的垂直扩散参数。

式中其它符号意义同前。

$$\sigma_z = 0.06x \div \sqrt{1+0.0015x} \dots\dots\dots \text{(式 5.2-11)}$$

根据以上公式, 本项目 HIMM 运行产生的感生放射性气体排入环境, 所致排气筒下风向不同距离处地面空气中的放射性核素活度浓度的计算结果, 见表 5.2-27。

表 5.2-27 感生放射性核素地面空气中浓度值 单位: Bq/m³

放射性核素 距排气筒 距离(m)	³ H	⁷ Be	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	⁴¹ Ar
20	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
40	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
60	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
80	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
100	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
150	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
200	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
214	9.08E-06	2.29E-04	5.97E-01	1.02E+00	1.55E+00	3.21E+00
215	2.45E-07	6.17E-06	1.61E-02	2.76E-02	4.16E-02	8.65E-02
250	2.09E-07	5.27E-06	1.37E-02	2.35E-02	3.55E-02	7.38E-02
300	1.72E-07	4.34E-06	1.13E-02	1.94E-02	2.92E-02	6.08E-02
350	1.46E-07	3.67E-06	9.56E-03	1.64E-02	2.48E-02	5.15E-02
400	1.26E-07	3.17E-06	8.25E-03	1.42E-02	2.14E-02	4.44E-02
450	1.10E-07	2.78E-06	7.24E-03	1.24E-02	1.87E-02	3.90E-02
500	9.78E-08	2.47E-06	6.42E-03	1.10E-02	1.66E-02	3.46E-02

(3)对公众所致剂量估算

①¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar

由于本项目重离子治疗加速器运行所产生的感生放射性核素 ¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar 的半衰期均较短,为 2.1min~1.8h 之间,因此主要考虑烟云浸没外照射途径所致公众剂量。

根据式 5.2-3 可计算出本项目加速器运行所产生的感生放射性核素 ¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar 排放进入环境所致公众有效剂量,结果见表 5.2-28。

表 5.2-28 本项目 ¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar 所致公众有效剂量 (mSv/a)

核素	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	⁴¹ Ar
公众年有效剂量	9.19×10 ⁻⁴	1.58×10 ⁻³	2.39×10 ⁻³	6.58×10 ⁻³

②⁷Be

本项目重离子治疗加速器运行所产生的感生放射性核素 ⁷Be 的半衰期为 53d,主要考虑烟云浸没外照射、地面沉积外照射、吸入内

照射途径所致公众剂量。

a. 烟云浸没外照射估算模式

如前所述，见式 5.2-3。⁷Be 的 DRF_{im} 为 $2.36 \times 10^{-15} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ (数据引自 Safety Reports Series No.19)。

b. 地面沉积外照射估算模式

$$D_i^{gr} = C_{gr} DF_{gr} O_f \quad (\text{式 5.2-12})$$

$$C_{gr} = \frac{d_i [1 - \exp(-\lambda_E t_b)]}{\lambda_E} \quad (\text{式 5.2-13})$$

$$d_i = (V_d + V_w) C_{Ai} \quad (\text{式 5.2-14})$$

式中：

C_{Ai} ——核素 i 的地面空气浓度，单位 Bq/m^3 ；

DF_{gr} ——地面沉积外照射剂量转换因子，⁷Be 为 $1.54 \times 10^{-9} \text{Sv m}^2 \text{Bq}^{-1} \text{a}^{-1}$ (数据引自 Federal Guidance Report No.12)；

O_f ——每年公众受到地表沉积外照射的时间份额，取值为 1；

λ_E ——核素由地表面清除的有效速率常数， $\lambda_E = \lambda + \lambda_s$ ，单位 s^{-1} ，对于 ⁷Be， $\lambda = 1.51 \times 10^{-7}$ ， $\lambda_s = 0$ (数据引自 Safety Reports Series No.19)；

$V_d + V_w$ ——总沉积速率，保守取 $1000 \text{m}/\text{d}$ ；

t_b ——核素释放时间，单位 d，取值 $1.1 \times 10^4 \text{d}$ 。

c. 吸入内照射估算模式

如前所述，见式 5.2-4。对于成人，⁷Be 的 DF_{inh} 为 $5.0 \times 10^{-11} \text{Sv}/\text{Bq}$ (数据引自 GB18871-2002)。

根据式 5.2-3~4、式 5.2-12~14，可计算出本项目加速器运行所产生的感生放射性核素 ⁷Be 排放进入环境所致公众有效剂量，结果见表 5.2-29。

表 5.2-29 本项目 ^7Be 所致公众有效剂量 (mSv/a)

核素	^7Be
烟云浸没外照射	1.70×10^{-8}
地面沉积外照射	2.71×10^{-5}
吸入内照射	9.63×10^{-8}
合计	2.72×10^{-5}

③ ^3H

本项目重离子治疗加速器运行所产生的感生放射性核素 ^3H 的半衰期为 12.3a，主要考虑烟云浸没外照射、吸入内照射途径所致公众剂量。

a. 烟云浸没外照射估算模式

如前所述，见式 5.2-3。 ^3H 的 DRF_{im} 为 $3.31 \times 10^{-19} \text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ (数据引自 Safety Reports Series No.19)。

b. 吸入内照射估算模式

如前所述，见式 5.2-4。对于成人， ^3H 的 DF_{inh} 为 $4.5 \times 10^{-11} \text{Sv/Bq}$ (数据引自 GB18871-2002)。

根据式 5.2-3~4，可计算出本项目加速器运行所产生的感生放射性核素 ^3H 排放进入环境所致公众有效剂量，结果见表 5.2-30。

表 5.2-30 本项目 ^3H 所致公众有效剂量 (mSv/a)

核素	^3H
烟云浸没外照射	9.47×10^{-14}
吸入内照射	3.43×10^{-9}
合计	3.43×10^{-9}

④ 合计

本项目加速器运行所产生的气态流出物中感生放射性核素 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 排放进入环境所致公众最大年有效剂量，结果见表 5.2-31。

表 5.2-31 气态放射性流出物所致 31~33 号点位公众最大有效剂量

点位号	点位描述	距离 (m)	公众有效剂量 (mSv/a)
31	硼中子治疗中心	25	2.72×10^{-5}
32	铁灶村社区	27	2.72×10^{-5}
33	伦琴医学影像诊断中心	15	2.72×10^{-5}

由表 5.2-31 可知，由气态放射性流出物所致 31~33 号点位的公众最大年有效剂量为 $2.72 \times 10^{-5} \text{mSv/a}$ 。

C 中子天空反射辐射对公众的辐射影响分析

天空反射中子是重离子加速器影响环境的一个因素。大量的实验研究表明，天空反射中子剂量在屏蔽体外可能很小，随着距离的增加而逐渐增大，在约 50~75m 达到最大，然后随着距离的增加迅速减小。根据设计资料，当距离大于 50m 时，其随距离的变化可近似示为：

$$\phi(x) = \frac{\alpha Q}{4\pi x^2} (1 - e^{-x/\mu}) e^{-x/\lambda_a} \quad (\text{式 5.2-15})$$

式中：

$\Phi(x)$ —在离靶 X 距离的 P 点处天空反射引起的中子通量，单位 $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ；

α 、 μ 、 λ_a —有关系数，它们分别可取为： $\alpha=2.8$ ， $\mu=5.6 \times 10^3 \text{cm}$ ，

$\lambda_a=2.67 \times 10^4 \text{cm}$ ；

X — P 点到靶之间的距离，单位 cm ；

Q —射入天空的总中子源强，单位 n/s 。

设 S 为靶室顶部面积，则：

$$Q = \Phi(0) \times S \quad (\text{式 5.2-16})$$

式中：

$\Phi(0)$ —靶室顶部屏蔽层外的平均中子通量。

5 个治疗室的面积 $S_1=1105 \times 1070\text{cm}^2$, $S_2=1363 \times 910\text{cm}^2$, $S_3=1363 \times 840\text{cm}^2$, $S_4=1363 \times 1090\text{cm}^2$, $S_{\text{Gantry}}=2420 \times 1573\text{cm}^2$, 31~33 号点位距 5 个治疗室束流损失点的距离见表 5.2-32。

表 5.2-32 31~33 号点位距 5 个治疗室束流损失点的距离

点位号	点位描述	距离 (cm)				
		1#治疗室	2#治疗室	3#治疗室	4#治疗室	Gantry 治疗室
31	硼中子治疗中心	4938	6621	7032	7424	9054
32	铁灶村社区	9610	7892	7521	7370	7517
33	伦琴医学影像诊断中心	7812	8313	9521	10366	13003

结合表 5.2-5 的重离子治疗中心屋面上方剂量率结果, 年最大出束时间以 1750h, 居留因子以 1 计, 可计算出中子天空反射对周边公众的最大年剂量, 如表 5.2-33 所示。

表 5.2-33 中子天空反射所致 31~33 号点位公众最大年有效剂量

点位号	点位描述	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)					年剂量 (mSv)
		1#治疗室	2#治疗室	3#治疗室	4#治疗室	Gantry 治疗室	
31	硼中子治疗中心	6.566×10^{-5}	5.226×10^{-4}	5.273×10^{-6}	4.66×10^{-6}	1.325×10^{-2}	2.319×10^{-2}
32	铁灶村社区	2.077×10^{-5}	3.822×10^{-4}	4.677×10^{-6}	4.721×10^{-6}	1.877×10^{-2}	3.285×10^{-2}
33	伦琴医学影像诊断中心	3.084×10^{-5}	3.471×10^{-4}	2.995×10^{-6}	2.457×10^{-6}	6.237×10^{-3}	1.091×10^{-2}

由表 5.2-33 可知, 忽略由于中子在空气中多次散射使得其能量降低的效应, 由中子天空反射导致的 31~33 号点位的公众年有效剂量在 $1.091 \times 10^{-2} \sim 3.285 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ 之间。

5.2.1.2.3 小结

综上所述, 重离子加速器对各预测点位医护人员、运维工作人员的年有效剂量见表 5.2-34, 对各预测点位公众的年有效剂量见表

5.2-35。

表 5.2-34 重离子加速器所致医护人员、运维工作人员的年有效剂量

点位号	保护目标	点位描述	各途径所致年有效剂量 (mSv/a)						剂量约束值 (mSv/a)
			贯穿辐射	治疗室感生放射性气体	治疗室治疗结束的患者、水体模	加速器大厅感生放射性气体	感生放射性结构部件	合计	
21	医护人员	前台	3.077×10^{-2}	-	-	-	-	3.077×10^{-2}	5
22	医护人员	咨询	3.397×10^{-3}	-	-	-	-	3.397×10^{-3}	5
23	运维工作人员	中央控制室	2.714×10^{-2}	4.14×10^{-3}	-	1.394×10^{-3}	8.9×10^{-3}	4.157×10^{-2}	5
24	医护人员	护士站	3.307×10^{-1}	-	-	-	-	3.307×10^{-1}	5
26	医护人员	接待室	7.383×10^{-3}	-	-	-	-	7.383×10^{-3}	5
27	运维工作人员	运维办公室	6.116×10^{-4}	4.14×10^{-3}	-	1.394×10^{-3}	8.9×10^{-3}	1.505×10^{-2}	5
28	医护人员	护士办公室	3.249×10^{-1}	-	-	-	-	3.249×10^{-1}	5
30	医护人员	诊室 2	1.179	-	-	-	-	1.179	5
36	医护人员	医护更衣室 1	1.094	-	-	-	-	1.094	5
37	医护人员	医护更衣室 2	1.131	-	-	-	-	1.131	5
38	医护人员	诊室 1	1.176	-	-	-	-	1.176	5
39	医护人员	诊室 3	1.139	-	-	-	-	1.139	5
40	医护人员	诊室 4	1.068	-	-	-	-	1.068	5
41	医护人员	诊室 5	6.747×10^{-1}	-	-	-	-	6.747×10^{-1}	5
42	医护人员	诊室 6	6.624×10^{-1}	-	-	-	-	6.624×10^{-1}	5
43	医护人员	诊室 7	6.458×10^{-1}	-	-	-	-	6.458×10^{-1}	5

44	医护人员	诊室 8	6.090×10^{-1}	-	-	-	-	6.090×10^{-1}	5
45	运维工作人员	重离子工艺变 配电房	1.980×10^{-1}	4.14×10^{-3}	-	1.394×10^{-3}	8.9×10^{-3}	2.124×10^{-1}	5
46	医护人员	会议室	7.980×10^{-3}	-	-	-	-	7.980×10^{-3}	5
②	医护人员	1#治疗室	1.701	4.347×10^{-1}	5.105×10^{-1}	-	-	2.646	5
①+④	医护人员	2#治疗室	6.231×10^{-2}	4.347×10^{-1}	5.105×10^{-1}	-	-	1.008	5
③+⑥	医护人员	3#治疗室	3.29×10^{-1}	4.347×10^{-1}	5.105×10^{-1}	-	-	1.274	5
⑤+⑧	医护人员	4#治疗室	1.77×10^{-1}	4.347×10^{-1}	5.105×10^{-1}	-	-	1.122	5
⑦	医护人员	Gantry 治疗室	3.314×10^{-2}	4.347×10^{-1}	5.105×10^{-1}	-	-	9.783×10^{-1}	5

表 5.2-35 重离子加速器所致公众的年有效剂量

点位号	保护目标	点位描述	各途径所致年有效剂量 (mSv/a)				剂量约束值 (mSv/a)
			贯穿辐射	放射性气态流出物	中子天空反射	合计	
19	公众	等候室 1	1.978×10^{-3}	-	-	1.978×10^{-3}	0.1
20	公众	等候室 2	1.735×10^{-3}	-	-	1.735×10^{-3}	0.1
25	公众	等候室 3	8.513×10^{-3}	-	-	8.513×10^{-3}	0.1
29	公众	Gantry 等候区	3.058×10^{-2}	-	-	3.058×10^{-2}	0.1
31	公众	硼中子治疗中心	1.1×10^{-2}	2.72×10^{-5}	2.319×10^{-2}	3.422×10^{-2}	0.1
32	公众	铁灶村社区	4.563×10^{-2}	2.72×10^{-5}	3.285×10^{-2}	7.851×10^{-2}	0.1
33	公众	伦琴医学影像诊断中心	1.175×10^{-3}	2.72×10^{-5}	1.091×10^{-2}	1.212×10^{-2}	0.1

由表 5.2-34 可知，本项目重离子加速器所致各预测点位医护工作人员年有效剂量在 $3.397 \times 10^{-3} \sim 2.646 \text{mSv/a}$ 之间，运维工作人员年有效剂量在 $1.505 \times 10^{-2} \sim 2.145 \times 10^{-1} \text{mSv/a}$ 之间，均小于其剂量约束值 5mSv/a ，满足评价标准要求。

Gantry 治疗室对应的上人屋面由重离子加速器所致的年剂量最大为 $196.2 \mu\text{Sv}$ ，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中的“穿出机房顶的辐射对偶然到达机房外的人员的照射，以年剂量 $250 \mu\text{Sv}$ 加以控制”的要求。环评要求，建设单位需通过管理手段使公众不能到达此区域，且通过管理手段使工作人员不能到达 2~4 号射线屋顶夹角范围内。

由表 5.2-35 可知，本项目重离子加速器所致各预测点位公众年有效剂量在 $1.735 \times 10^{-3} \sim 7.851 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ 之间，均小于其剂量约束值 0.1mSv/a ，满足评价标准要求。

5.2.2 项目运行期非放射性环境影响

5.2.2.1 离子源微波的电磁辐射环境影响分析

回旋加速器大厅中的离子源利用微波给予电子能量，在此过程中会有微波电磁辐射产生。微波的频率在 $300 \text{MHz} \sim 300 \text{GHz}$ 之间（波长在 0.1mm 到 1m 之间），主要表现为视线传播；本项目 ECR 微波源功率较小，回旋加速器大厅四周的混凝土墙壁、混凝土活动屏蔽构件可以有效屏蔽；因此可不考虑微波造成的电磁辐射环境影响。

5.2.2.2 废气环境影响

(1) 臭氧、氮氧化物

臭氧、氮氧化物的产生与带电粒子的质量关系密切，这在电子加速器的环境影响中是必须考虑的一个因素，由于 C 粒子的质量比电子高 4-5 个量级，因此对于重离子加速器，臭氧及氮氧化化合物的问题可以不

用考虑。

(2)其他非放废气

本项目实施后地下车库设机械供排风系统,换气次数不小于 6 次/h。废气通过排风管在地面排气口应朝向绿化带排放,且高于地面 2.5m 以上排放,汽车尾气排放对外环境影响较小。项目营运期区域内交通量会增加,应通过加强对机动车的管理,控制交通车辆数量,严格执行国家有关汽车尾气污染物排放控制标准,禁止报废车辆和尾气排放不达标的车辆出去区域。

柴油发电机尾气引至硼中子及质子治疗中心顶层高空排放,可以达到《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)中二级标准,对周围环境空气质量影响不大。

5.2.1.3 废水环境影响

本项目所在的妈祖重离子医院生活污水、洗涤废水、医疗污水经化粪池处理后一起经自建的污水处理站进行处理,处理系统采用“厌氧+缺氧+接触氧化+消毒”工艺,处理后水质能够满足《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)中表中的预处理标准及《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T31962-2015)表 1 中的 B 级标准的要求(氨氮 $\leq 45\text{mg/L}$),再通过污水管网排入莆田市港城新区污水处理厂,不会对周边地表水环境造成影响。项目医疗废水和生活污水从水质和水量分析,不会对污水处理厂运行造成影响。

5.2.1.4 固体废物环境影响

本项目所在的妈祖重离子医院设置医疗废物暂存间 1 间,委托具有相关危险废物处置资质的单位负责定期清运、处置;生活垃圾分类收集,可回收的进行回收,不可回收的交由环卫部门集中收集处理。建设单位认真落实各种固体废物的处置措施,可保证各类固体废物得到有效处置。

5.2.1.5 噪声环境影响分析

5.2.1.5.1 内部设备噪声影响分析

(1) 噪声预测模式

根据本项目主要噪声源源强，计算本项目厂界噪声影响值，预测采用如下计算公式：

$$L_p = L_{r_0} - 20\log(r/r_0) \quad (\text{式 5.2-17})$$

式中： L_p ——距声源 $r(\text{m})$ 处的 A 声级，dB(A)；

L_{r_0} ——距声源 $r_0(\text{m})$ 处的 A 声级，dB(A)。

对于同一施工期多台施工机械噪声预测值的能量叠加值，按照下式进行计算：

$$(L_{Aeq})_i = 10 * \lg(10^{0.1(L_{Aeq})_m} + 10^{0.1(L_{Aeq})_n} + 10^{0.1(L_{Aeq})_0} + \dots) \quad (\text{式 5.2-18})$$

式中： $(L_{Aeq})_i$ ——不同施工期（施工前期、施工期、施工后期）施工机械噪声预测值的叠加值，dB(A)；

$(L_{Aeq})_m$ 、 $(L_{Aeq})_n$ 、 $(L_{Aeq})_0$ ——分别代表同一施工期不同施工机械的噪声预测值，dB(A)。

(2) 噪声影响分析

项目噪声污染源主要来自风机、水泵等设备，其噪声源的源强为 60-65dB (A)，建设单位对空压机、水泵放置在单独间，其综合噪声源强约为 70dB (A)，根据噪声的传播规律，从噪声源至受声点的噪声衰减量由噪声源到受声点的距离、墙体隔声量、空气吸收和绿化带阻滞及建筑屏障的衰减综合而成。选用点声源衰减模式进行预测，预测仅考虑距离衰减及墙体隔声量。考虑到墙体隔声、减振等衰减噪声值可达 40dB(A)以上。项目噪声衰减预测结果见表 5.2-36。

表 5.2-36 噪声衰减预测结果

源强	墙体隔声量	源强在厂界外不同距离的噪声值				
		1m	4m	6m	8m	10m
70	25	45	33	30	27	25

由表 5.2-36 可知，项目运营期产生的噪声经衰减后，项目四周经约 1m 的距离可衰减到 GB12348-2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》1 类标准要求（昼间 ≤ 55 dB、夜间 ≤ 45 dB）。项目产噪设备布设在地下室，经隔声、减振措施后，噪声对医院、周边声环境的影响很小。

5.2.1.5.2 社会生活噪声影响分析

项目所在区域的人为活动将有所增加，势必会产生一定的社会生活噪声，对区域的声环境会产生一定的影响。通过类比调查其他医院大厅，医院内部昼间社会噪声在 45-54dB(A)之间，可达到《声环境质量标准》（GB3096-2008）1 类标准，基本不会对周边声环境产生影响。

5.3 事故影响分析

本次评价主要对项目拟配置的放射诊疗用射线装置在使用过程中可能发生的辐射事故进行分析，预测其环境影响后果。

5.3.1 事故谱

对本项目重离子治疗加速器的操作使用进行分析，得出项目运行期间可能发生的各类辐射事故见表 5.3-1，同时在表 5.3-1 中简要描述了事故的原因、可能导致的后果以及事故的预防减缓措施。

表 5.3-1 本项目运行期间潜在事故（事件）一览表

序号	事故（事件）描述	可能原因	后果	减缓措施	主要预防措施
1	HIMM 治疗终端误入	①分区管理失效； ②安全连锁装置失效； ③工作人员误操作。	误入人员受到超过年剂量照射，导致急性放射病或死亡发生	①立即停止出束； ②启动辐射事故应急预案； ③划出警戒线，疏散非事故处理人员； ④进行现场辐射环境监测； ⑤对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施。	①加强分区管理和巡察力度； ②定期对安全连锁的有效性进行检查； ③加强工作人员的技能培训与考核； ④严格按照安全操作规程进行操作。
2	HIMM 机房人员误入	①分区管理失效； ②安全连锁装置失效； ③工作人员误操作。	误入人员受到超过年剂量照射。	①立即停止出束； ②启动辐射事故应急预案； ③划出警戒线，疏散非事故处理人员； ④进行现场辐射环境监测； ⑤对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施。	①加强分区管理和巡察力度； ②定期对安全连锁的有效性进行检查； ③加强工作人员的技能培训与考核； ④严格按照安全操作规程进行操作。
3	HIMM 机房通风系统故障	①断电； ②风机故障； ③人员误操作造成停机。	增加工作人员照射	①立即停止出束，对通风系统进行检查、维修； ②检查风机，若发生故障，立即维修或更换。	①加强检查和监测； ②定期对风机进行检查； ③设置备用风机和备用电源； ④加强管理和培训。

续表 5.3-1 本项目运行期间潜在事故（事件）一览表

序号	事故（事件）描述	可能原因	后果	减缓措施	主要预防措施
4	火灾	①供电线路老化； ②供电线路负载过大； ③设备短路。	①人员伤亡； ②设备、设施损坏。	①切断电源； ②灭火； ③检修。	①供电设计留有一定的安全裕量； ②加强易燃易爆物品的管理； ③现场备足灭火器材和消防栓； ④加强供电电缆和用电设备的检查； ⑤加强安全教育。
5	水灾	①强降雨天气，降水超过排水管道负荷； ②下水管道堵塞； ③台风。	设备、设施（含排气筒）损坏。	①切断电源； ②排涝； ③检修。	①排水管道设计留有一定的安全裕量； ②排气筒设计时加固，并备有防雨措施； ③现场备足防涝设备； ④加强安全教育。
6	停电	①供电线路老化； ②供电线路负载过大； ③设备短路。	患者被困于治疗室内。	启动备用的柴油发电机。	①供电设计留有一定的安全裕量； ②加强供电电缆和用电设备的检查； ③加强安全教育。

5.3.2 假想事故的环境影响

对表 5.3-1 所列事故进行分析，综合考虑事故类型、事故所致辐射影响后果等因素，本次评价通过对重离子加速器误入事故进行事故的辐射影响后果预测计算与分析评价，来反映本项目的辐射事故影响。

5.3.2.1 重离子加速器误入事故

5.3.2.1.1 事故情景假设

由于重离子加速器的门-机联锁安全装置失效，有人员在加速器运行期间误入治疗终端或加速器大厅。

5.3.2.1.2 事故后果计算

误入治疗终端的人员可能受到碳离子束流的直接照射，也可能受到碳离子束流损失产生的次级中子的辐射；误入加速器大厅的人员可能会受到碳离子束流损失产生的次级中子的辐射。

(1) 对受到碳离子束直接照射的误入人员的辐射影响分析如下：

误入人员身体局部（或某器官）受到碳离子束流的照射；误入人员位于治疗终端等中心处，受照时间按一次最大治疗照射时间 5min 计；治疗终端等中心处的辐射剂量率按最大 1Gy/min 计；则误入人员身体局部（或某器官）受到的辐射剂量为 5Gy。

(2) 对受到中子辐射的误入人员的辐射影响分析如下：

误入人员处于碳离子束流损失产生的次级中子辐射场中，身体受到全身照射；误入人员位于距碳离子束流损失点 0.5m 处；受照时间按一次最大治疗照射时间 5min 计；由图 5.2-1，保守估算距碳离子束流损失点 0.5m 处中子场辐射剂量为 0.75Gy/h；则误入人员受到的全身照射剂量为 62.5mGy。

5.3.2.1.3 事故后果评价根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 第 709 号）第四十条：根据辐射事故的性质、严

重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级，详见表 5.3-2。

表 5.3-2 辐射事故等级划分表

事故等级	事故情形
特别重大辐射事故	I类、II类放射源丢失、被盗、失控造成大范围严重辐射污染后果，或者放射性同位素失控导致3人以上（含3人）急性死亡。
重大辐射事故	I类、II类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素失控导致2人以下（含2人）急性死亡或者10人以上（含10人）急性重度放射病、局部器官残疾。
较大辐射事故	III类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素失控导致9人以下（9人）急性重度放射病、局部器官残疾。
一般辐射事故	IV类、V类放射源丢失、被盗、失控，或放射性同位素失控导致人员受到超过年剂量限值的照射

根据《实用辐射安全手册》（从慧玲，北京：原子能出版社，2007）急性放射病的发生率以及急性放射病的死亡率与辐射剂量的关系，见表 5.3-3。

表 5.3-3 急性放射病的发生率、死亡率与辐射剂量的关系

辐射剂量 (Gy)	发生率 (%)	辐射剂量 (Gy)	死亡率 (%)
0.70	1	2.00	1
0.90	10	2.50	10
1.00	20	2.80	20
1.05	30	3.00	30
1.10	40	3.20	40
1.20	50	3.50	50
1.25	60	3.60	60
1.35	70	3.75	70
1.40	80	4.00	80
1.60	90	4.50	90
2.00	99	5.50	99

根据《实用辐射安全手册》（从慧玲，北京：原子能出版社，2007）给出的主要组织、器官发生确定性效应的阈剂量水平（见表 5.3-4）。

表 5.3-4 急性放射病的发生率、死亡率与辐射剂量的关系

组织、器官	效应	辐射剂量(Gy)
胎儿	致畸	0.1
骨髓	造血抑制	0.5
	早死	1.0
生殖腺	永久不育	3.0
眼晶体	白内障（视力障碍）	5.0
肺	肺炎（非致死性损伤）	5.0
	死亡	10.0
甲状腺	功能减退、黏液水肿	10.0
皮肤	红斑及脱毛	3.0

本项目若发生重离子治疗加速器误入事故，人员误入治疗室若受到碳离子束直接照射，可能导致人员白内障（视力障碍）、肺炎（非致死性损伤）、皮肤红斑及脱毛、永久不育、骨髓早死及造血抑制、胎儿致畸等后果；人员误入加速器大厅，则可能受到超剂量照射。

根据《放射源同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第七09号）的规定，本项目若发生人员误入治疗终端且受到碳离子束直接照射的情况，根据表 5.3-3，受照剂量达 5Gy 时，急性放射病的死亡率大于 90%；根据表 5.3-4，可能导致人员白内障（视力障碍）、肺炎（非致死性损伤）、皮肤红斑及脱毛、永久不育、骨髓早死及造血抑制、胎儿致畸等后果；在此事故情况下，将至少导致**较大辐射事故**，若发生人员死亡，将导致**重大辐射事故**，误入人数达 3 人，可能将导致**特别重大辐射事故**。

本项目若发生人员误入加速器大厅的情况，根据表 5.3-3，受照剂量达 62.5mGy，急性放射病的死亡率小于 1%；根据表 5.3-4，人员受照剂量不足以导致急性放射病；在此事故情况下，则至少导致**一般辐射事故**。

第六章 辐射安全管理

6.1 机构与人员

6.1.1 辐射安全与环境保护机构

福建中科核医学科技有限公司为了加强妈祖重离子医院辐射工作场所的辐射安全与环境保护管理，根据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《中华人民共和国职业病防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等法律法规、部门规章的要求，结合医院的实际情况，建立了辐射安全与环境保护管理机构——辐射安全防护与环境保护管理领导小组，负责妈祖重离子医院全院包括重离子加速器在内的所有辐射实践活动的辐射安全与环境保护工作。

6.1.1.1 辐射安全防护与环境保护管理领导小组

医院成立了辐射安全防护与环境保护管理领导小组，在院长领导下，具体负责医院辐射工作场所的辐射安全与环境保护管理工作。具体职责如下：

(1)对医院辐射安全和环境保护工作负总责；

(2)宣传、贯彻和执行国家有关安全生产、辐射安全、辐射防护与环境保护的方针政策和安全法规，结合本单位的特点制定、落实安全生产规章制度、辐射安全与环境保护规章制度，并根据国家相关部门发布的最新辐射安全与环境保护法律法规和部门规章，及时组织相关人员修订完善，实现辐射防护最优化；

(3)负责对医院辐射安全和环境保护工作的监督与检查，经常组织相关人员对医院辐射安全和环境保护相关制度、辐射防护措施落实情况等进行检查，并做好相应记录存档；

(4)负责对本单位辐射工作人员进行辐射安全与环境保护相关法律法规和相关管理制度、辐射防护基础知识和操作安全技术的培训与考核；

(5)了解掌握本单位辐射工作场所各种辐射防护设施分布、性能及其使用方法和各项实验的工艺流程，发现问题及时报告相关主管部门，并配合操作人员有效地进行处理；

(6)掌握开展辐射防护监测所用各种辐射防护仪器的正确使用方法，定期检查仪器工作是否正常，加强维护保养，发现故障立即排除或送出修理；

(7)负责医院辐射工作场所的辐射防护监测和监测质量保证管理工作，确保监测结果的真实性和准确性；

(8)会同相关管理部门按有关规定对医院辐射安全和环境保护工作进行检查，并将检查情况及时通报相关人员；

(9)制定本单位辐射事故应急预案。定期组织相关人员进行辐射事故应急处理演练，对应急设备和防护用品进行检查。遇到发生事故时，到现场负责事故应急处理工作；

(10)会同相关管理部门和应急部门按规定处理辐射事故，并对相关人员提出处理意见；

(11)负责监督本单位射线装置、辐射工作场所、放射性“三废”和辐射工作人员健康等方面的管理工作；

(12)负责个人剂量监测和健康监护以及放射诊疗设备的质量控制监测管理，并建立相关的档案管理制度。

6.1.1.2 医院辐射防护负责人

医院辐射防护负责人由医院辐射安全防护与环境保护管理领导小组组长兼任，其职责如下：

(1)贯彻执行国家和上级主管部门有关射线装置管理的法规和规

定；

- (2)负责射线装置在调试、运行、退役过程中的安全管理；
- (3)负责建立重离子治疗中心的台账，并实行动态管理；
- (4)负责制定个人岗位、工序操作规程，并监督落实；
- (5)参与、配合辐射应急事故的调查处理；
- (6)接受上级主管部门的监督和检查。

6.1.2 辐射工作人员配备计划

妈祖重离子医院拟严格按照《放射诊疗管理规定》的第七条(一)的规定，配备：(1)中级以上专业技术职务任职资格的放射肿瘤医师；(2)病理学、医学影像学专业技术人员；(3)大学本科以上学历或中级以上专业技术职务任职资格的医学物理人员；(4)放射治疗技师和设备运维人员。

同时，根据国家核安全局文件《关于发布<注册核安全工程师执业资格关键岗位名录>（第一批）的通知》（国核安发[2010]25号），结合本项目申请的核技术应用类型（有申请使用 I 类射线装置），申请者应至少配备 2 名注册核安全工程师，分别负责核安全综合管理岗位（1 人）和辐射防护岗位（1 人）。

医院拟配置取得《执业医师证书》的放射治疗医师 15 人，其中从事放射治疗专业 10 年以上并取得高级专业职称者 6 人；拟配置从事放射治疗物理专业人员 10 人，其中从事放射治疗专业 5 年以上并取得高级专业职称者 3 人；辐射防护专业技术人员 1 人；设备运维人员由兰州科近泰基新技术有限责任公司负责，共 21 人，现场负责人 1 名，下辖 5 个班组，每班 4 人，24 小时现场值守；注册核安全工程师 2 人；满足开展重离子放射治疗技术临床应用所需的其他相关专业技术人员若干人。

6.2 辐射安全管理规章制度

医院辐射安全防护与环境保护管理领导小组制定了完善的辐射管理制度，主要包括《辐射防护和安全保卫管理制度》、《放射工作人员个人剂量监测管理制度》、《放射工作人员职业健康管理制度》、《放射工作人员培训制度》、《放射设备台帐管理制度》、《放射设备维修、保养制度》、《辐射工作场所监测计划》、《辐射事故应急预案》等。

根据《环境保护部辐射安全与防护监督检查技术程序》的相关要求中的相关规定，建设单位需制定的规章制度见表 6.2-1。

表 6.2-1 建设单位需制定的规章制度

序号	规定的管理制度		落实情况
1	A 综合	辐射安全管理规定	已制定
2		装置运行安全防护操作规程	待落实
3	B 场所	场所分区管理规定	待落实
4		保安管理规定	待落实
5		辐射安全和防护设施维护维修制度	已制定
6	C 监测	监测方案	已制定
7		监测仪表使用与校验管理制度	待落实
8	D 人员	辐射工作人员个人剂量监测管理制度	已制定
9		辐射工作人员培训/再培训管理制度	已制定
10	E 应急	辐射事故/事件应急预案	已制定
11	F 废物	放射性“三废”管理规定	待落实

对照上表，医院仍需完善的规章制度包括：

- ①装置运行安全防护操作规程；
- ②场所分区管理规定；
- ③安全保卫管理规定；
- ④监测仪表使用与校验管理制度；
- ⑤放射性“三废”管理规定；

- ⑥辐射工作人员岗位职责；
- ⑦放射诊疗设备质量控制检测计划；
- ⑧放射诊疗质量保证大纲；
- ⑨放射卫生档案管理制度。

6.3 辐射监测

为了保证本项目运行过程的安全、控制和评价辐射危害，建设单位设置了相应的辐射剂量监测手段，以使工作人员和公众所受照射尽可能低。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)和《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)中的相关规定，本项目监测内容包括：个人剂量监测、工作场所监测、流出物监测、环境监测。

6.3.1 个人剂量监测

本项目重离子治疗加速器工作人员的个人剂量监测系统描述如下。

个人剂量监测系统包括电子式个人剂量计、剂量计读出器、身份磁卡读出器、剂量信息管理系统。进入控制区的人员须先在值班室刷身份卡领取电子式个人剂量计，此时系统将会建立剂量计与人员的对应关系。进入控制区的人员将电子式个人剂量计佩戴在左胸前，依照进入辐射区的程序进入辐射区，剂量计能给出工作人员受照剂量、现场实时剂量率、在控制区内的累计工作时间情况并具有报警功能。待人员出辐射区后，需到值班室归还剂量计，值班人员将会使用读出仪读取剂量计信息并将其储存至个人剂量数据库（包括剂量计编号、身份磁卡号、累积剂量、时间等数据），同时对剂量计进行复位，解除剂量计与人员的对应关系。剂量信息管理系统用于个人剂量的数据库管理，剂量计读出器的剂量信息存入个人剂量档案，同时对超过剂量限值的人员向出入控制系统给出信息。

当人员进入读卡器检测到某个人员的个人剂量档案的数据超过剂量限值后，向安全连锁系统发出报警信息，信息包括人员身份信息和磁卡号，阻止该人员进入辐射区。

环评要求：

①项目建成投运后，保证每名辐射工作人员除电子式个人剂量计外，需同时配备 2 套非直读式个人剂量计。加强检测管理和辐射工作人员职业健康检查管理，保证每名辐射工作人员的 1 套非直读式个人剂量计每个季度送有资质部门检测一次，做到专人专戴，做到定期送检；

②建立个人剂量档案，辐射工作人员调离辐射工作岗位，个人剂量档案终生保存；

③当单个季度个人剂量超过 1mSv 时，建设单位应进行核实和调查，由剂量异常者本人填写《外照射个人剂量异常调查报告》，必要时由相关部门采取措施进行整改；当全年个人剂量超过 5mSv 时，建设单位需进行超标原因调查，并最终形成正式调查报告，经本人签字确认后上报发证机关。

6.3.2 工作场所监测

根据重离子治疗加速器辐射场的特点，工作场所辐射监测系统的设计采用包有慢化体的 ^3He 管和电离室来监测中子、 γ 辐射。

本项目重离子治疗加速器工作场所辐射监测系统监测点分布示意图见图 4.2-3。在加速器的辐射区及周围共布置了 13 个监测点，每个监测点由一台中子探测器和一台 γ 探测器组成。

本项目中子探测器采用宽能谱中子探测器。宽能谱中子探测器中子灵敏度为 0.65cps/ $\mu\text{Sv/h}$ ，测量范围 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ ~50000 $\mu\text{Sv/h}$ ，能量范围 0.025eV~1GeV，符合 ICRP 推荐的能量响应曲线。

γ 辐射采用美国 Thermo 公司的 FHT191N 电离室，测量范围

10nSv/h~10Sv/h，能量范围 35keV~7MeV。

辐射监测系统由探测器、数据处理单元、工业以太网、监控计算机、中心管理计算机与辐射防护数据库组成。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，向安全连锁系统提供剂量报警信号；中心管理计算机用于发布监测数据；存储的数据包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型(γ /中子)等实时监测数据。

6.3.3 流出物监测

6.3.3.1 流出物排放监测

(1)气载流出物监测

医院针对本项目制定了气溶胶监测计划。在项目正常运行时，拟设置监测系统，监测气溶胶的排放量和排放浓度，并记录放射性废气的日排放量和年排放量。一旦出现排放浓度异常，应采取措施，记录上报。

①监测对象

项目运行期间的监测对象为气溶胶。

②监测系统描述

项目在排气筒过滤装置后端设置取样口对气溶胶进行取样，医院拟委托有资质的单位，定期对本项目产生的放射性气载流出物进行取样监测、测量分析。

③监测方法

气溶胶：采用取样监测的方式，按照监测计划规定的频率获取气溶胶样品，采用相应仪器对样品进行测量分析，得到向外环境排出的气溶胶的放射性物质的量。

④监测频次

项目运行期间对气溶胶采取样监测，监测频率一季度一次。

(2)液态流出物监测

放射性废水收集池中经过衰变处理的放射性废液在向环境排放前，经检测符合《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）表1中限值（总 β 放射性浓度不大于10Bq/L），并经审管部门批准后，方可排入园区污水管网；或经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 $1ALI_{\min}$ ，并且每次排放后用不少于3倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于10倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录（根据GB18871-2002 B1.3.4的公式及表B3中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 ^7Be 、 ^3H 核素的 ALI_{\min} 分别为 $8.33 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $4.17 \times 10^8 \text{Bq}$ 、 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ）。

6.3.4 环境监测

环境辐射监测主要测量穿过屏蔽后泄露到环境中的中子、 γ 辐射水平。在重离子加速器主体建筑周围设置4个监测站，每个站内设置中子、 γ 探测器各一个，实时测量环境中子、 γ 辐射水平。4个监测站分别设置在重离子加速器治疗机房的东边、北边、西边和南边。监测点位分布示意图见图6.3-1。



图 6.3-1 环境监测点位分布示意图

本项目各辐射工作场所及周围环境的辐射监测方案见表 6.3-1。

表 6.3-1 重离子治疗中心辐射环境监测方案

编号	监测内容	监测频次	监测布点	监测机构
1	γ 辐射剂量率、中子剂量率	连续	主体建筑墙外 4 个监测站（分布图见图 6.3-1）	自行监测
2	γ 辐射剂量率	连续	铁灶村社区、伦琴医学影像诊断中心、硼中子治疗中心	委托有资质的单位进行监测
3	γ 辐射剂量率	1~2/年	主体建筑墙外、楼顶、厂界定点监测，加速器主体建筑墙外 30cm 处开展巡测	委托有资质的单位进行监测
4	中子剂量率	1~2/年	铁灶村社区、伦琴医学影像诊断中心、硼中子治疗中心、主体建筑墙外、楼顶、厂界定点监测；加速器主体建筑墙外 30cm 处开展巡测	委托有资质的单位进行监测
5	空气中的 ³ H	1~2/年	铁灶村社区、伦琴医学影像诊断中心、硼中子治疗中心、加速器主体建筑楼顶	委托有资质的单位进行监测
6	气溶胶中的 ³ H、 ⁷ Be、γ 能谱	1~2 次/年	铁灶村社区、伦琴医学影像诊断中心、硼中子治疗中心建筑楼顶、加速器主体建筑楼顶	委托有资质的单位进行监测
7	土壤中的总 β、 ³ H、 ⁷ Be、γ 能谱	1~2 次/年	铁灶村社区、伦琴医学影像诊断中心、厂界四周	委托有资质的单位进行监测
8	地表水中的总 β、 ³ H、 ⁷ Be、γ 能谱	1~2 次/年	港城新区污水处理厂排污口	委托有资质的单位进行监测
9	地下水中的总 β、 ³ H、 ⁷ Be、γ 能谱	1~2 次/年	地下水监测井（按水文资料，项目西北侧分布 3 口，东南侧 1 口，分布图见图 6.3-2）	委托有资质的单位进行监测
10	生物中的总 β、 ³ H、 ⁷ Be、γ 能谱	1~2 次/年	铁灶村社区	委托有资质的单位进行监测
11	循环冷却水的总 β、 ³ H、 ⁷ Be、γ 能谱	1~2 次/年	循环冷却水取样口	委托有资质的单位进行监测
12	γ 辐射剂量率	1~2 次/年	固体废物外表面	委托有资质的单位进行监测
13	³ H、 ⁷ Be、γ 能谱	收集及送贮时		



图 6.3-2 地下水监测点位分布示意图

本项目辐射工作人员个人剂量监测频次拟定为 1 次/季度，由福建省内有相关资质的机构监测。

6.4 辐射事故应急

为了加强对重离子加速器的安全和防护的监督管理，促进重离子加速器的安全应用，保障人体健康，保护环境，建设单位需根据要求制定《辐射事故应急预案》，同时成立事故应急组织体系，成员包含：技术支持、安全保卫、监测评价与医疗救助助理等。

6.4.1 应急响应机构

6.4.1.1 应急组织机构

本项目辐射事故应急处理组织机构图见图 6.4-1。

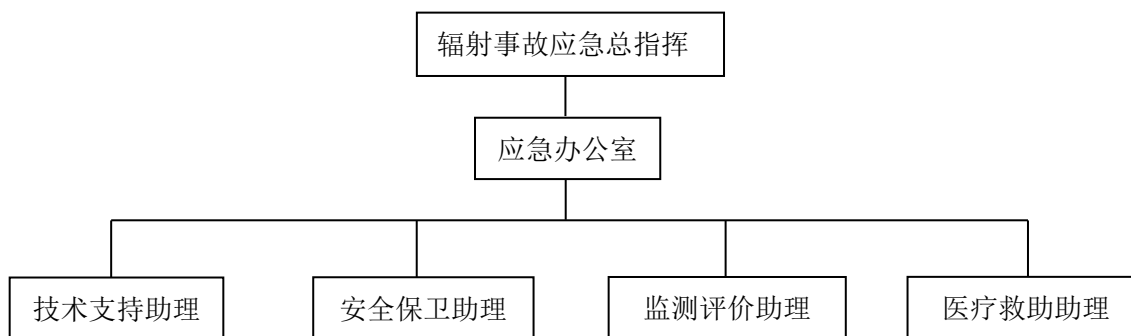


图 6.4-1 辐射事故处理组织机构图

6.4.1.2 应急组织机构职责

(1)辐射应急总指挥：由医院院长担任，统一指挥应急响应行动，宣布应急状态，启动应急组织，决策应急中止，为应急能力保持提供必要条件。

(2)应急办公室：由医院环保部门负责人担任，协调各级、各专业力量实施应急支援行动，向上级主管部门通报事故，组织事故原因调查和经验反馈。

(3)技术支持：由兰州科近泰基新技术有限责任公司重离子治疗系统运维团队担任，提供事故处理措施技术支持。

(4)安全保卫：由医院保卫科人员担任，负责污染区域警戒、控制和交通管制。

(5)监测评价：由兰州科近泰基新技术有限责任公司重离子治疗系统运维团队担任，提供现场辐射监测和环境监测，人员体表污染监测，提供辐射防护建议。

(6)医疗救助：由医院医师担任，负责场内紧急救治，提供应急处置人员医疗防护建议。

6.5.2 应急响应

(1)应急启动

发生辐射事故时，应立即报告应急办公室，并开展现场警戒和处理措施。在接到报告后由应急办公室通知应急总指挥、各相关专业人

员，根据应急总指挥指示启动应急组织。

(2)应急响应行动

技术支持助理根据放射性核素理化性质和放射性危害，提供专业技术支持，以便更好地收集、处理放射性物质与恢复环境。

安全保卫助理建立事故警戒、控制区，人员进入现场须经批准，离开现场须经辐射监测和去污。必要时，建立交通控制通道，保障事故处理人员、设备或物资通畅。

辐射防护人员立即对现场的辐射水平进行监测，检查应急处置人员防护设备，设置环境监测点，开展人员剂量监测和污染监测，根据事故处理进展提供防护建议。

医疗救助人员对有急性照射或摄入核素的人员进行医疗救治或建议送院外专科医院治疗，为现场处理人员提供医疗防护。

(3)应急终止

应急终止需满足以下条件：

- ①事故得到控制，事故影响已经消除；
- ②放射性物质的泄露或释放已降到规定限值以下；
- ③事故现场的各种专业应急处置行动已无继续的必要。

应急总指挥确认终止条件和时机，发布应急终止命令。

应急办公室向应急办公室提交辐射事故初始报告表和后续报告表；组织事故原因调查和经验反馈，改进安全措施。

6.5.3 应急物资与保障

根据应急预案的职责分工，准备好应对辐射事故的人力、物力、车辆、通讯和资金保障工作，主要有：

- (1)便携式 γ 剂量率仪、便携式中子剂量率仪、应急 TLD 等物项；
- (2)人员急救医疗设施等；
- (3)对讲机、专用操作工具、防护用品、隔离带等；

(4)应急救援车辆。

6.5.4 应急培训与演练

6.5.4.1 培训

承担应急任务的人员每年不低于一次培训本项目辐射事故专项应急预案，熟悉事故类型、危害与处置程序，使之正确理解应急响应要求，有效执行应急响应。应急培训应形成记录并保存。

6.5.4.2 演练

(1)每年开展不低于一次的针对医用射线装置辐射事故专项应急预案的应急演练，使相关人员熟悉应急预案、应急处置方案，并能有序、协调配合；

(2)每次演练后，针对演练中发现的问题，及时对应急预案加以必要修改和完善，以提高应对突发辐射异常事故的应急处置能力。

第七章 利益-代价简要分析

7.1 利益分析

7.1.1 社会效益

妈祖重离子医院重离子治疗系统项目的实施符合国家相关政策和福建省“十三五”卫生事业的发展规划需要，本项目建设利用拥有自主知识产权成果和技术的小型医用重离子束治疗肿瘤装置，使重离子治疗肿瘤装置应用于临床。项目的实施将极大地促进我国离子束治疗肿瘤技术的发展，提升我国在这一领域的国际影响力。离子束治疗肿瘤装置的临床应用将使肿瘤患者的治愈率得到突破性提高，提高生存质量，实现我国“健康中国 2030”的战略规划具有重要意义。重离子束治疗肿瘤装置的产业化生产将对我国相关设备制造业的技术进步、产业繁荣起到很好的促进作用。

本项目建成后，将有力的提升莆田市乃至福建省的医疗水平，可满足莆田市及周边乃至全国人民群众的就医需求，对促进社会基础设施建设有着重要而深远的意义，对福建省的医疗卫生事业发展也将起到极大的推动作用，从而提高社会效益。

7.1.2 直接效益

本项目预计的直接经济利益如下：

本项目完成后，收入来源为医疗收入、药品收入、其他收入、财政差额拨款四个部分。其中，医疗收入主要为肿瘤病人治疗费用，预计运营第一年将收治 1200 例肿瘤病人，每例病人年医疗收入为 30 万元，全年共计 3.6 亿元，参照国内类似项目的资料，以后每年按照 5% 的比例增长。

经过财务分析得出，本项目完成后，其全部投资财务内部收益率为 8.01%，投资回收期 16.04 年（税后），财务净现值 56443.60 万元

(税后), 表明该项目具有较好的经济效益, 同时不确定性分析表明该项目具有一定的抗风险能力。

7.1.3 环境效益

本项目建成后, 绿地率为 35%, 满足《城市绿化规划建设指标的规定》(建城[1993]784 号) 中规定医院绿地率不低于 35% 的标准。各建筑掩映在绿树、鲜花、芳香、绿地之中, 形成安静优美的环境, 并达到建筑与绿化的和谐统一, 是一座花园式的绿色医院, 极大地改善了区域景观及生态环境。

7.2 代价分析

7.2.1 社会代价

社会代价主要考虑两个方面, 一是资源, 二是能源。

资源方面, 项目单位在莆田市湄洲湾北岸经济开发区妈祖国际健康城新建妈祖重离子医院重离子治疗系统项目, 主要建筑包括重离子治疗中心一座。规划总用地面积 33354m², 总建筑面积 106700m²。

能源方面, 项目单位运行期间需用水、电等能源, 年耗量见表 7.2-1。

表 7.2-1 项目运行期间能源消耗情况一览表*

名称	年耗量	来源	主要化学成分
电能	112.89 万 kWh	城市供电系统	/
水	120816.6t	城市给水管网	H ₂ O

注: *表中能源消耗量包括了整个妈祖重离子医院的消耗。

7.2.2 经济代价

经济代价主要包括以下三个方面的成本:

- (1) 建筑场地成本;
- (2) 设备投资成本;
- (3) 环保投资: 包含环保设施、环境管理、环境监测及事故防范措施

施等费用，合计投入约 498 万元。本项目拟采取的污染防治（辐射防护）措施及环保投资估算见表 7.2-2。

表 7.2-2 项目拟采取的污染防治（辐射防护）措施及环保投资一览表*

项目	污染物及其防治（辐射防护）措施		投资 (万元)	备注
废水治理	非放射性废水	工作人员生活污水，排入自建污水处理站进行处理	/	/
	放射性液态流出物	感生放射性冷却水，正常工况下离子交换树脂净化处理后，循环使用，不外排；事故及系统检修情况下放射性废水流入同步加速器大厅西侧的放射性废水收集池（两个，尺寸 2m×1.5m×1.5m）	10	
废气治理	非放射性废气	通过各放射性工作场所通风系统外排，进入大气环境	60	
	放射性气态流出物			
噪声治理	噪声	合理布局、建筑墙体隔声和距离衰减	/	纳入工程费用
固体废物处置	非放射性固体废物	工作人员生活垃圾由环卫部门统一集中收集后处理	/	配备垃圾桶，垃圾清运费用纳入年度支出
	放射性固体废物	同步加速器大厅内的东北角设置放射性固体废物暂存间（尺寸 3m×2m×2m），暂存产生的放射性固体废物	10	
其他辐射防护措施	辐射工作人员培训、辐射工作场所管理及公司辐射安全与管理制度的修订完善等管理措施		5	
	辐射工作场所辐射防护分区		10	
	放射性标志		1	
	辐射安全与防护设施：视频监控系统，声光报警系统，门灯连锁及报警装置，防盗门和监控摄像头等		15	
	工作人员辐射防护用品（包括个人剂量计、工作服及劳保用品等）		20	
辐射监测	辐射监测仪器：中子探测器，γ 探测器等。		100	/
	辐射工作场所常规监测		3	纳入年度支出
	辐射环境监测		10	纳入年度支出
环保管家服务	/		224	落实“三同时”制度
风险防范措施	辐射工作场所应急物品：包括应急监测仪器，应急器材，应急警戒、公告用品，应急救护用品和应急通讯工具等		30	/
合计	/		498	/

注：*表中环保投资仅为医院辐射工作场所环保设施投资。

7.2.3 环境代价

妈祖重离子医院重离子治疗系统项目的环境代价主要为项目运行期间向环境排放的放射性气态流出物。项目运行期间产生和向环境排放的放射性气态流出物、放射性液态流出物及放射性固体废物量见表 7.2-3。

表 7.2-3 项目运行期各类放射性废物年产生量和向环境排放量一览表

放射性废物种类	年产生量	年排入环境量
放射性气态流出物	2.21×10 ¹¹ Bq/a	2.21×10 ¹¹ Bq/a
放射性液态流出物	4.52×10 ⁷ Bq/a	重离子加速器的事故及系统检修情况下产生的冷却水若要排放，需满足以下两种条件之一：①采取静置衰变措施，并在排放前进行监测，放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）表 1 中限值（总 β 放射性浓度不大于 10Bq/L），并经审管部门批准后，方可纳入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂；②根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 1ALI _{min} ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录（根据 GB18871-2002 B1.3.4 的公式及表 B3 中的参数，可以计算出 ¹¹ C、 ⁷ Be、 ³ H 核素的 ALI _{min} 分别为 8.33×10 ⁸ Bq、4.17×10 ⁸ Bq、1.11×10 ⁹ Bq）。
放射性固体废物	废树脂： 5.85×10 ⁶ Bq/a， 0.16m ³ /a； 废过滤器： 1.58×10 ⁷ Bq/a 废结构部件： 1.79×10 ⁷ Bq/a	分类收集后暂存于放射性固体废物暂存间，加速器结构部件及靶件暂存一段时间，若可回用则维修后继续使用，若不可回用，则送福建省放射性废物库处置；冷却水交换树脂最终送福建省放射性废物库处置；手套、棉纱和口罩等低放废物暂存一段时间，送福建省放射性废物库处置；废过滤器由厂家人员更换后，最终送福建省放射性废物库处置。

通过理论估算，项目运营期间重离子治疗加速器运行所致评价范围内最大公众剂量为 7.851×10⁻²mSv/a，对公众的辐射影响均很小。

此外，项目运营期间产生的放射性固体废物分类收集后暂存于放射性固体废物间，加速器结构部件及靶件暂存一段时间，若可回用则维修后继续使用，若不可回用，则送福建省放射性废物库处置；冷却

水交换树脂最终送福建省放射性废物库处置；手套、棉纱和口罩等低放废物暂存一段时间，送福建省放射性废物库处置；废过滤器由厂家人员更换后，最终送福建省放射性废物库处置；对项目所在区域环境造成的影响很小。

7.3 正当性分析

综上所述，本项目有很好的经济效益和社会效益，扣除一定的环境负面影响成本后，项目的综合效益是正的。因此本项目的实施是正当的。

第八章 结论与建议

8.1 项目工程概况

福建中科核医学科技有限公司拟在福建省莆田市湄洲湾北岸经济开发区山亭镇新建妈祖重离子医院重离子治疗系统项目，医院规划用地 33354m²，设计规划总建筑面积 106700m²。项目拟配置放射诊疗设备重离子治疗加速器 1 台（含 1 台重离子加速器，离子能量：120MeV/u~400MeV/u，最大束流强度 1.017×10⁸pps），属于 I 类射线装置。项目总投资 48.357 亿元，环保投资 498 万元。

本项目的工艺流程简述如下：离子源产生的 ¹²C⁵⁺ 离子束经低能束运线配送到回旋加速器，通过加速电场将离子束加速到能量 6.2MeV/u 并引出，经中能传输系统配送到同步加速器，通过剥离膜剥离为 ¹²C⁶⁺，将束流累积到高流强，然后将束流能量加速到 120MeV/u-400MeV/u 并引出，经高能传输系统将束流配送到 4 个治疗终端（水平、水平+垂直、垂直、45°）和 1 个 Gantry 治疗终端（360°）。重离子治疗加速器的工程设备包括离子源、低能束运线、回旋加速器、中能束运线、同步加速器（主加速器）、高能束运线和 5 个治疗终端。

本项目主要的污染源项为放射性气态流出物和放射性固体废物。放射性气体流出物主要为重离子加速器运行过程中产生的感生放射性气体，活度为 2.21×10¹¹Bq/a；放射性固体废物主要为感生放射性加速器结构部件及靶件、冷却水系统的废树脂、检修时产生的废劳保用品、通风系统的废过滤器等。

8.2 辐射安全与防护

项目设计有重离子加速器大厅、5 个重离子治疗室及相关工艺设备用房来实现辐射屏蔽，相关房间的屏蔽设计满足相关标准要求，可使对操作人员及公众的辐射影响满足国家标准要求并达较低水平；工作场所合理划定控制区与监督区进行管理，人流与物流路径分离，可

尽量限制放射性污染范围。

本项目运行期产生的放射性气态流出物经排风系统，由重离子治疗中心屋顶高 24.6m 的 7 个排气筒排入大气环境，该措施可使放射性废气能得到较好的净化处理，确保通过流出物途径进入环境的放射性物质尽可能的少，对公众的辐射影响 ($2.72 \times 10^{-5} \text{mSv/a}$) 满足国家标准要求并达相当低的水平。

本项目运行期所用冷却水为去离子水，冷却水循环使用，不外排。事故及系统检修情况下，冷却水流入位于同步加速器大厅西侧的放射性废水收集池，若要排放，需满足以下两种条件之一：①采取静置衰变措施，并在排放前进行监测，放射性指标监测数据满足《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005) 表 1 中限值 (总 β 放射性浓度不大于 10Bq/L)，并经审管部门批准后，方可纳入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂；②根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》8.6.2，经审管部门确认，满足每一次排放的活度不超过 1ALI_{min} ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并对每次排放做好记录 (根据 GB18871-2002 B1.3.4 的公式及表 B3 中的参数，可以计算出 ^{11}C 、 ^7Be 、 ^3H 核素的 ALI_{min} 分别为 $8.33 \times 10^8\text{Bq}$ 、 $4.17 \times 10^8\text{Bq}$ 、 $1.11 \times 10^9\text{Bq}$)。

本项目运行期产生的放射性固体废物包括检修更换下来的如束流装置、靶件等含感生放射性的结构部件、失效的冷却水净化树脂、加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等，均分类暂存于放射性固体废物暂存间内。加速器结构部件及靶件暂存一段时间，若可回用则维修后继续使用，若不可回用，则送福建省放射性废物库处置；冷却水交换树脂最终送福建省放射性废物库处置；手套、棉纱和口罩之类的低放废物暂存一段时间，最终送福建省放射性废物库处置；废过滤器

由厂家人员更换后，最终送福建省放射性废物库处置。

以上辐射防护、运行期三废治理控制措施、环境监测设施可确保放射性废物不释入环境产生辐射危害，本项目拟采取的辐射安全与防护措施是可行的。

8.3 环境影响分析

(1) 施工期环境影响分析

本项目建设阶段对环境的影响已由《妈祖重离子医院项目环境影响报告表》评价，该报告表已获得莆田市生态环境局批复，本报告不再赘述。

(2) 运行期环境影响分析

① 辐射环境影响评价结论

通过理论预测，本项目运行所致工作人员职业照射剂量最大为 2.646mSv/a，所致公众照射的有效剂量最大为 7.851×10^{-2} mSv/a，小于满足 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》规定的 20mSv/a 的职业照射有效剂量基本限值和 1mSv/a 的公众照射有效剂量基本限值。也低于 HJ1198-2021《放射治疗辐射安全与防护要求》规定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

② 非放环境影响评价结论

本项目运行期非放射性废气污染源主要为汽车尾气、柴油发电机废气。机动车尾气经空气流动自然稀释扩散；柴油发电机废气通过采用轻质燃油添加催化剂使燃烧彻底，建设单位委托专业环保公司进行尾气治理，并通过排气筒引至顶层排放。

本项目运行期非放射性废水主要为医疗废水和生活污水，采取厌氧+缺氧+接触氧化+消毒工艺处理后，排入市政污水管网，后排入莆田市港城新区污水处理厂。

本项目运行期主要噪声为冷水机组噪声等，拟采用：选用低噪声设备、高噪声设备置于封闭隔间、安装减振垫、管道柔性连接、风机风口设消声器等噪声防治工程措施，以及加强设备维护保养，并定期检修，保证设备处于良好的运行状态。

本项目运行期非放射性固体废物主要是医疗垃圾、生活垃圾。生活垃圾分类收集，统一由环卫部门及时清运；医疗垃圾收集并分类管理后，临时存放在医疗废物暂存间，然后由具有资质的相关部门负责及时清运，集中处置，常温下存储时间不超过 24h，于 5℃ 以下冷藏的，不得超过 7 天。

项目运行产生的非放射性废气、废水、噪声等均可实现达标排放，对项目所在区域的空气、水和声环境影响小；项目运行产生的固体废物均可得到妥善处置，对周围环境无影响。

8.4 辐射安全管理

本项目建设单位建立有辐射安全与环境保护管理机构，制定有一系列辐射安全管理规章制度，制定有完备的辐射事故应急预案，辐射工作人员、辐射监测方案等满足项目需要。

在按照项目设计方案以及本次环评所提出的各项要求实施完善后，项目单位满足中华人民共和国生态环境部令第 7 号《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》相关条款之规定，具备从事所申请的核技术应用活动（医疗使用 I 类射线装置）的能力。

8.5 公众参与结论

建设单位在莆田市湄洲湾北岸经济开发区官网、莆田市湄洲湾北岸经济开发区城市建设投资集团有限公司官网上就项目情况进行了第一次公示。形成公示本后，建设单位在莆田市湄洲湾北岸经济开发区官网上就项目情况进行了网上公示；同时在项目拟建场址、铁灶村就项目情况进行了现场公示；公示期间两次在《湄洲日报》上进行了

媒体公示。公示期间，未收到任何反馈信息。因此，本项目符合公众愿望，项目实施可行。项目实施过程中，应按照环评有关预防、减缓、消除不利于环境影响的措施及建议进行，确保公众所关心的环境问题能得到妥善解决。

8.6 结论

本项目符合国家产业政策，符合当地城市建设与产业发展规划；综合考虑项目的经济、社会和环境等方面的利益与代价，实施本项目具有正当性；项目设计采取的放射性污染防治措施和非放射性污染防治措施有效合理，可确保项目运行产生的各项污染物达标排放；项目建成后运行对公众和工作人员的辐射影响很小，满足评价标准要求，是可接受的；项目运行产生的非放射性废气、废水、噪声等对周围环境影响很小。项目的建设在严格遵守国家有关法律法规要求、严格按照建设项目“三同时”制度要求、贯彻落实本环境影响报告书提出的各项环境保护（包括防治放射性污染）措施和风险防范措施并加强管理的前提下，从环境保护角度而言是可行的。

8.7 建议与承诺

(1)项目单位应按要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员；按要求对拟从事辐射的工作人员进行辐射安全与防护方面的专业培训，通过考核后持证上岗。

(2)项目单位应在运行前组织制订完善的辐射防护与安全管理制度，装置运行安全防护操作规程、场所分区管理规定、保安管理规定、监测仪表使用与校验管理制度、放射性“三废”管理规定等。

(3)项目单位应做好放射性固体废物的分类收集、包装、存放和送贮（处）。

(4)项目单位应按照生态环境部令第7号《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第四十二条之规定编写放射性同位素安全与防

护状况年度评估报告，每年 1 月 31 日前报送辐射安全许可证发证机关。

附录 项目竣工环境保护验收一览表

项目竣工环境保护验收一览表

项目名称	内 容	
妈祖重离子医院重离子治疗系统项目	辐射安全与防护管理制度	①装置运行安全防护操作规程； ②场所分区管理规定； ③安全保卫管理规定； ④监测仪表使用与校验管理制度； ⑤放射性“三废”管理规定； ⑥辐射工作人员岗位职责； ⑦放射诊疗设备质量控制检测计划； ⑧放射诊疗质量保证大纲； ⑨放射卫生档案管理制度。
	辐射防护措施	实体屏蔽 各辐射工作场所射线装置所在机房和各个治疗室的屏蔽效果满足辐射防护要求，确保对机房外的工作人员和公众的照射剂量满足国家标准要求。
	辐射防护措施	对于放射诊断，应根据 GB18871-2002 附录 G 规定的放射诊断医疗照射指导水平进行优化，确保患者受到的照射剂量是达到预期诊断目标的最小照射剂量；对放射治疗，在对计划照射的靶体积施以所需要的剂量的同时，使正常组织在放射治疗期间所受到的照射控制在可合理达到的尽量低水平。
辐射安全措施	重离子治疗加速器 ①安全连锁：a.门机连锁：重离子治疗加速器采用“束流闸”与辐射区的门连锁；b.剂量连锁：进入辐射区域的门与现场剂量监测信号和个人剂量连锁； ②紧急停机：重离子治疗加速器在加速器大厅等场所的方便位置均匀布设“紧急停机按钮”； ③“清场”确认按钮； ④警告警示装置：重离子治疗加速器在人员通道、辐射区域门口、控制室等地方设置辐射标志牌、运行状态显示灯、大型荧光显示等警告警示装置； ⑤监视和对讲设备。	

项目竣工环境保护验收一览表（续）

项目名称	内 容	
妈祖重离子医院项目	放射性废气处理措施	治疗室始终保持负压通风状态，及时排出产生的感生放射性气体；同步环大厅和回旋加速器大厅空调通风系统处于封闭循环状态，并保持装置区在一定的负压状态，以防止活化空气的泄漏；当加速器停机后以上区域才通风换气，以尽量减少放射性核素的排出。
	放射性固体废物处理措施	重离子治疗加速器运行将产生的感生放射性的结构部件、失效的冷却水净化树脂、手套、棉纱和口罩等含放射性的固体废物，分类暂存在重离子治疗加速器大厅的放射性固体废物暂存间内。对于加速器结构部件及靶件，暂存一段时间，若可回用则维修后继续使用，若不可回用，则送福建省放射性废物库处置；冷却水交换树脂最终送福建省放射性废物库处置；加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩之类的低放废物暂存一段时间，最终送福建省放射性废物库处置；废过滤器由厂家人员更换后，最终送福建省放射性废物库处置。
	放射性废水处理措施	本项目重离子治疗加速器所用冷却水为去离子水，冷却水循环使用，不外排。
妈祖重离子医院项目	辐射工作场所分区管理	<p>按照 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的规定，将辐射工作场所分为控制区和监督区。</p> <p>①控制区：加速器大厅、同步环大厅、5 个治疗室、高能束运线爬升区；</p> <p>②监督区：候诊区，控制室；</p> <p>③采用实体边界划定控制区和监督区，在控制区的进出口及其他适当位置处设有醒目的、符合规定的警告标志，并给出相应的辐射水平指示；在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌。</p>
妈祖重离子医院项目	辐射防护监测	<p>工作场所辐射水平监测</p> <p>配备 ^3He 正比计数管和电离室监测中子、γ 辐射。其中，中子探测器为宽能谱中子探测器。</p> <p>在重离子治疗加速器的辐射区及周围共布置了 13 个监测点，每个监测点由一台中子探测器和一台 γ 探测器组成。</p>
	辐射防护监测	<p>辐射工作人员个人剂量监测</p> <p>配置个人剂量监测系统，包括：电子式个人剂量计、剂量计读出器、身份磁卡读出器、剂量信息管理系统。</p>
	辐射防护监测	<p>环境辐射监测</p> <p>在重离子治疗中心东、南、西、北侧各设置 1 个监测站，每个站内设置中子、γ 探测器各一个，实时测量辐射环境水平。</p>

莆田市地图

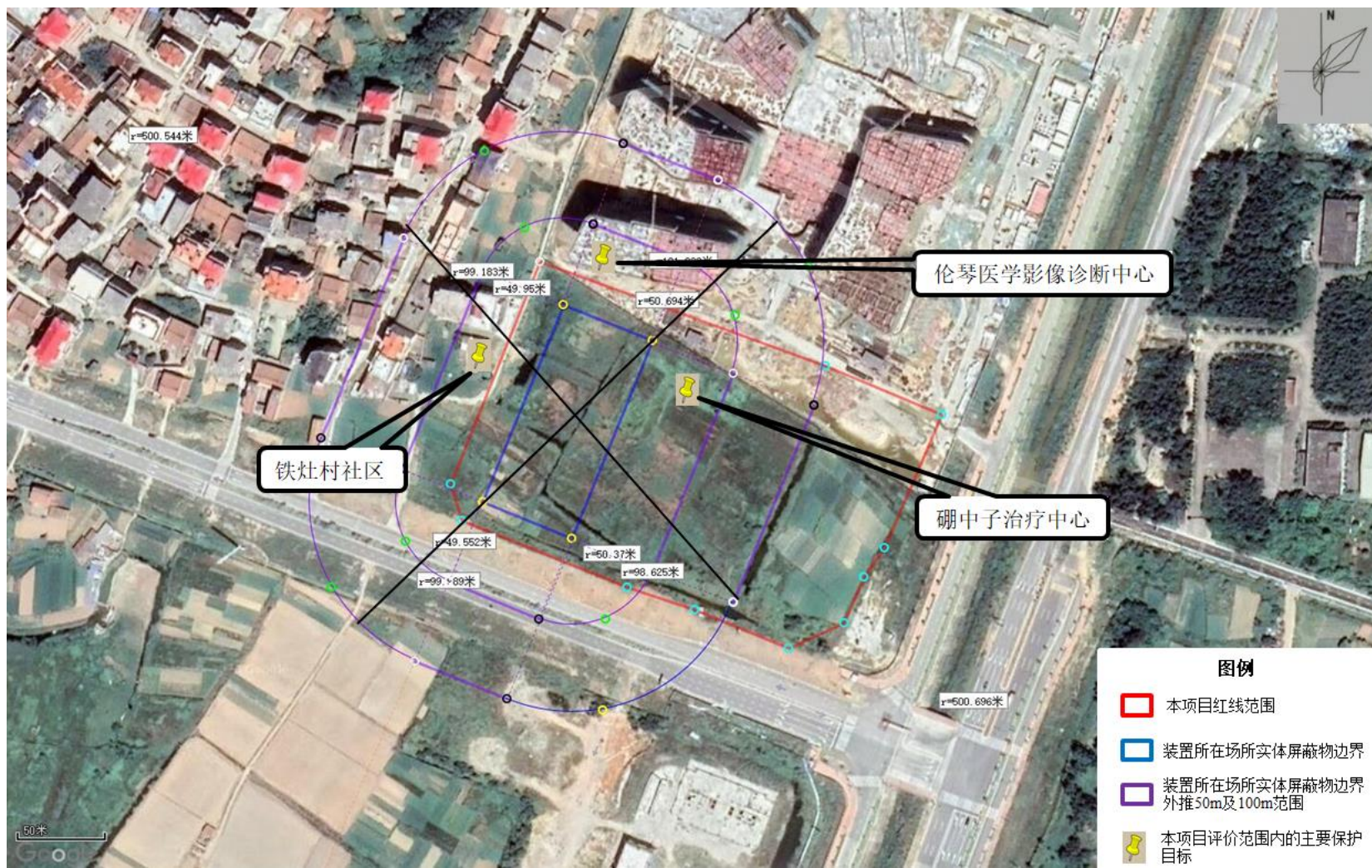
行政区域版



审图号：闽S(2018)46号

福建省测绘地理信息局 监制

附图1 项目地理位置图



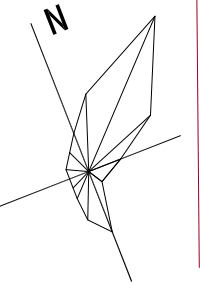
附图2 项目拟建地周边环境及敏感目标图

莆田市忠门南分区(350305-27)单元妈祖医疗健康城启动区地块一控制性详细规划

土地利用规划图



附图 3 项目所在地块控制性规划图



1:750

伦琴医学影像诊断中心

重离子治疗中心

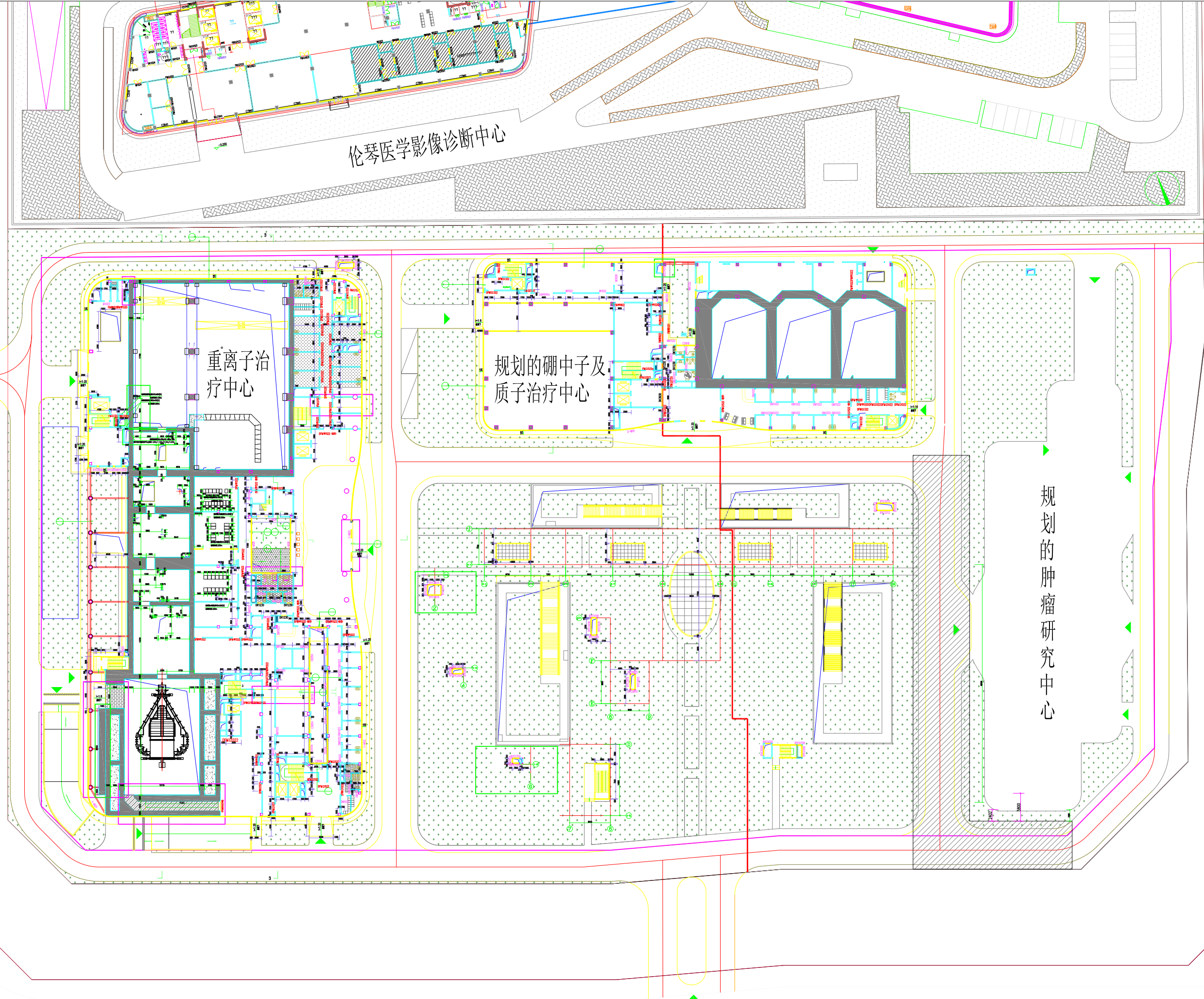
规划的硼中子及
质子治疗中心

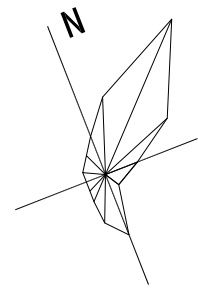
规划的肿瘤研究中心

荔港大道

东吴大道

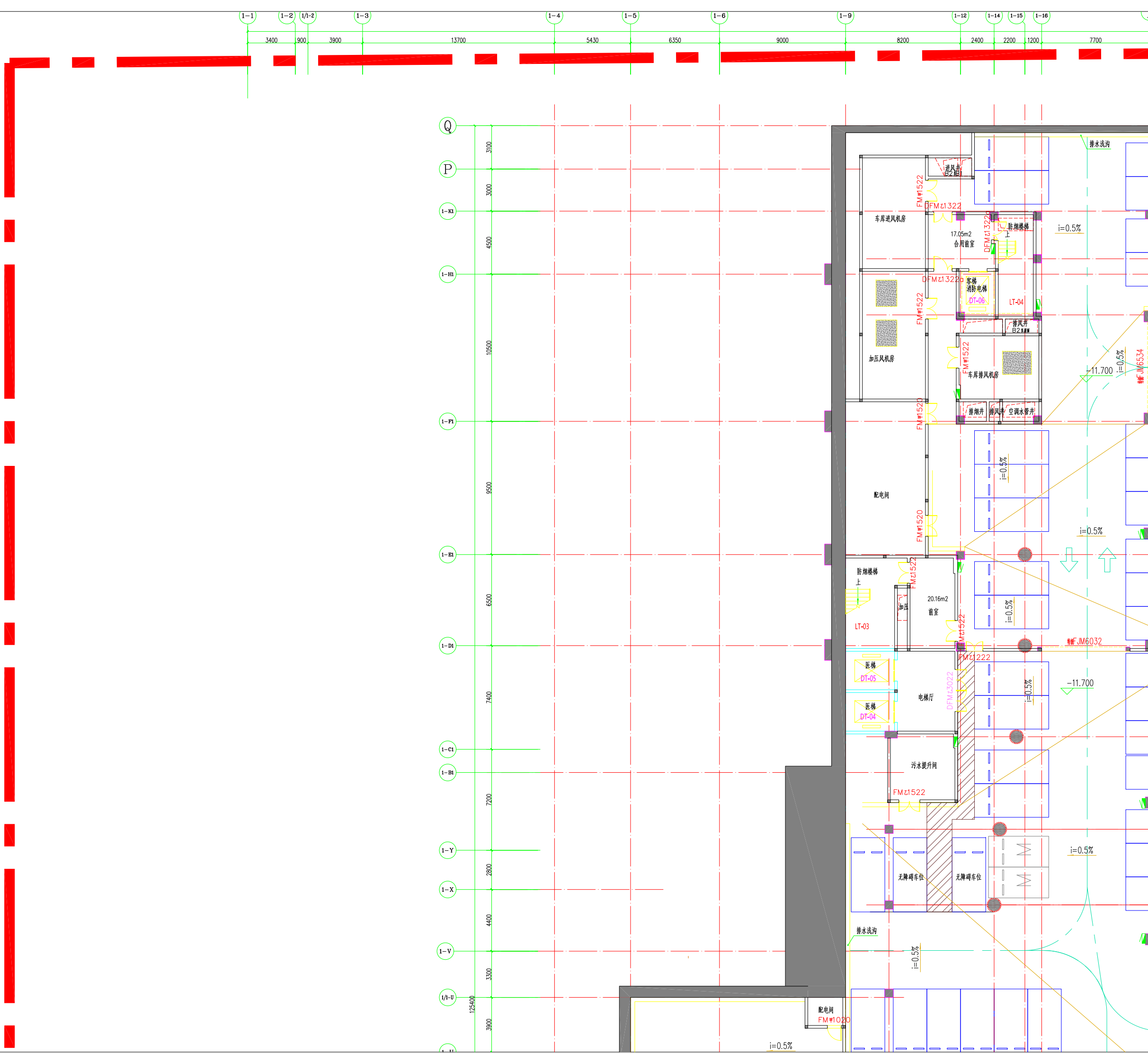
附图4 医院规划总平面布置图

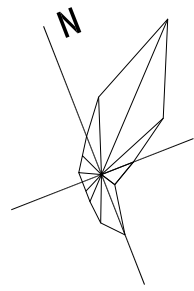




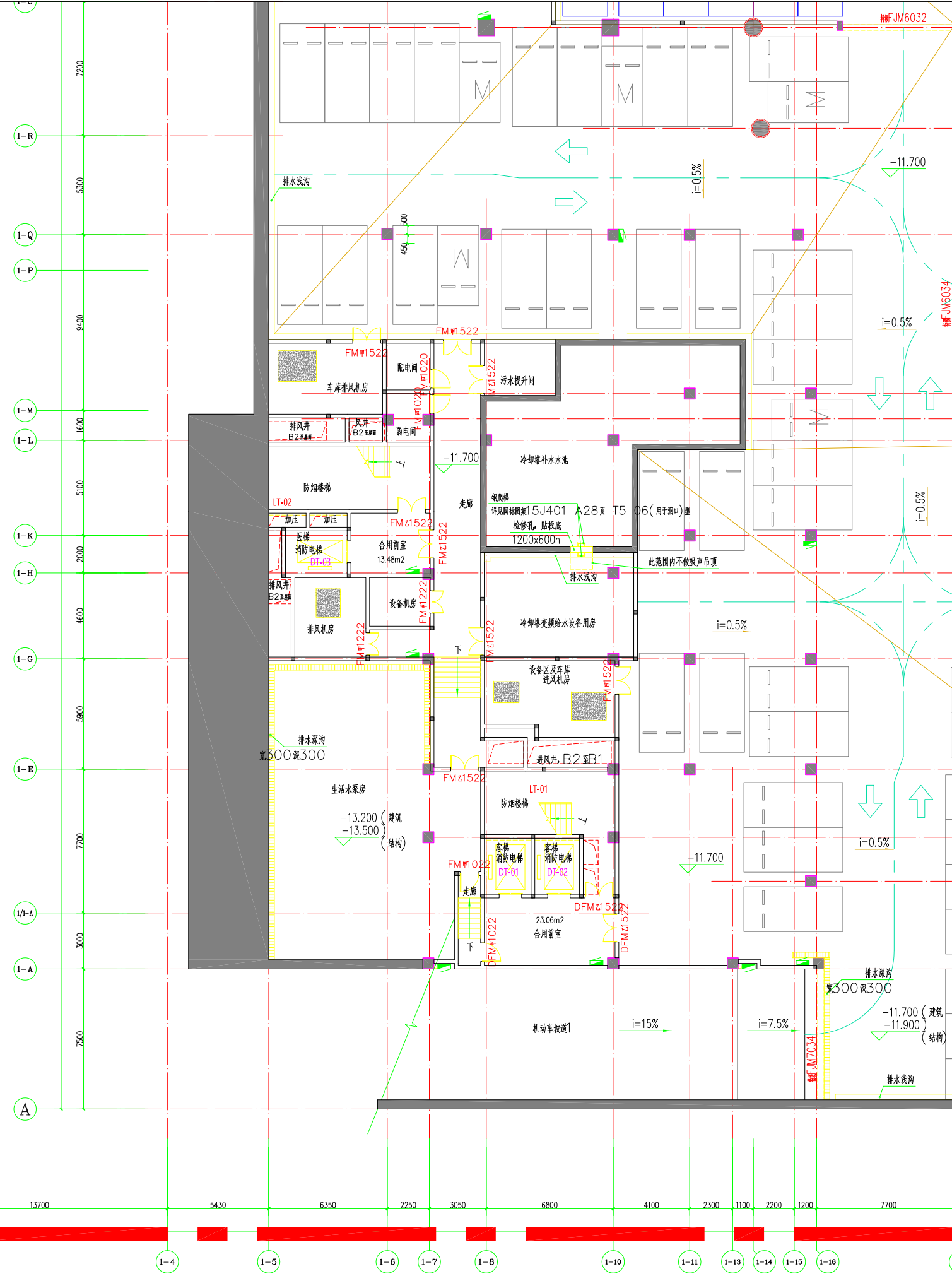
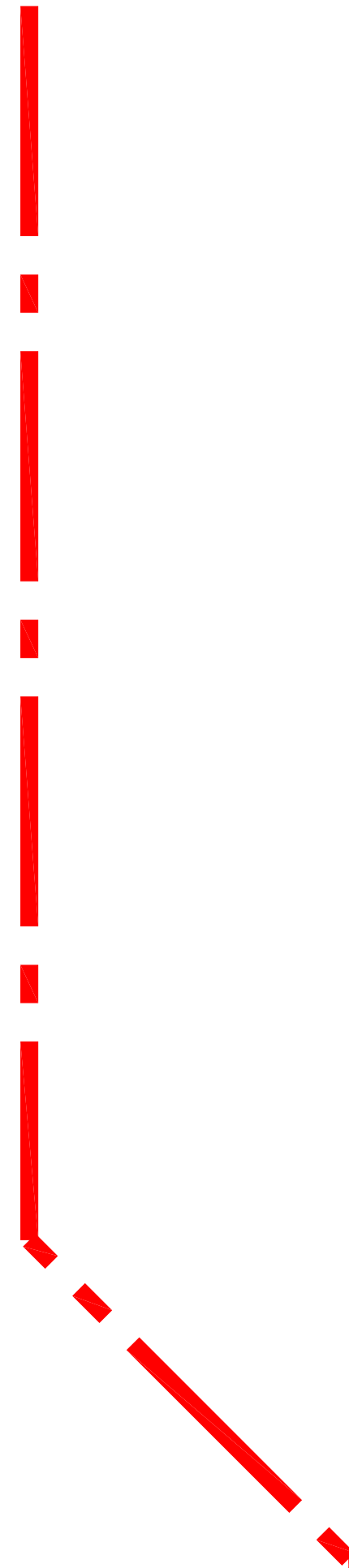
1:250

附图5-1 医院平面布置图
[负二层北侧]

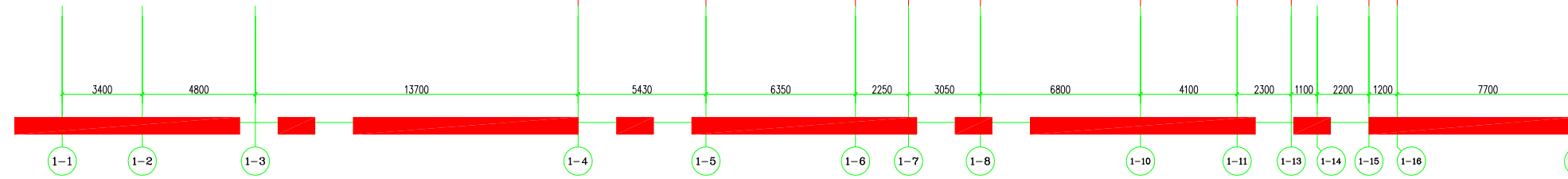


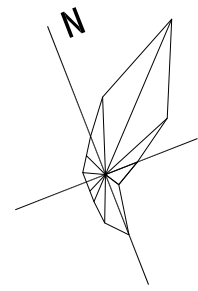


1:250

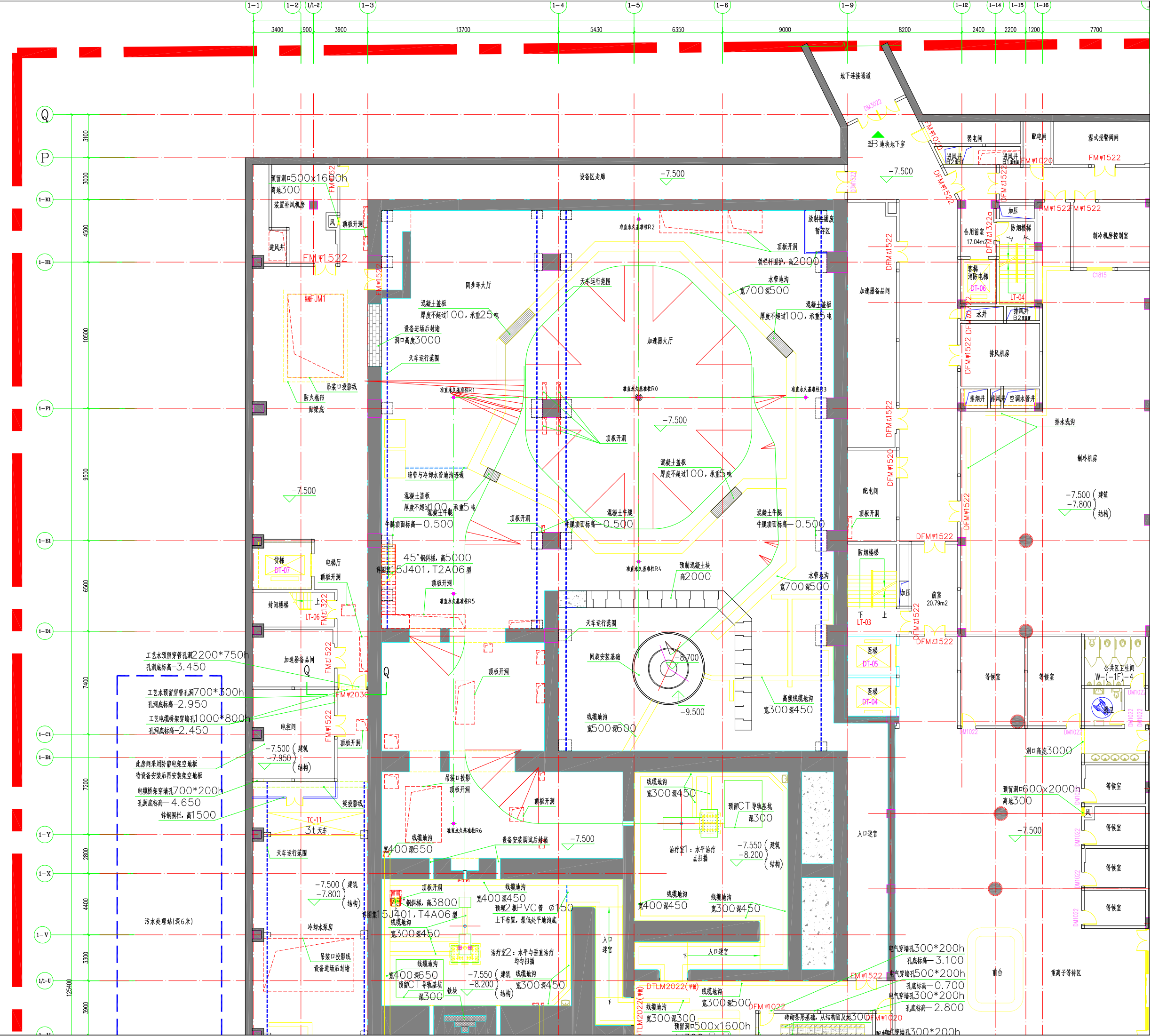


附图5-2 医院平面布置图
[负二层南侧]



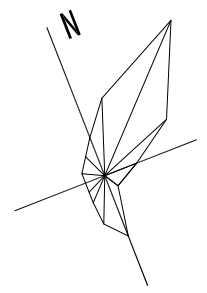


1:250

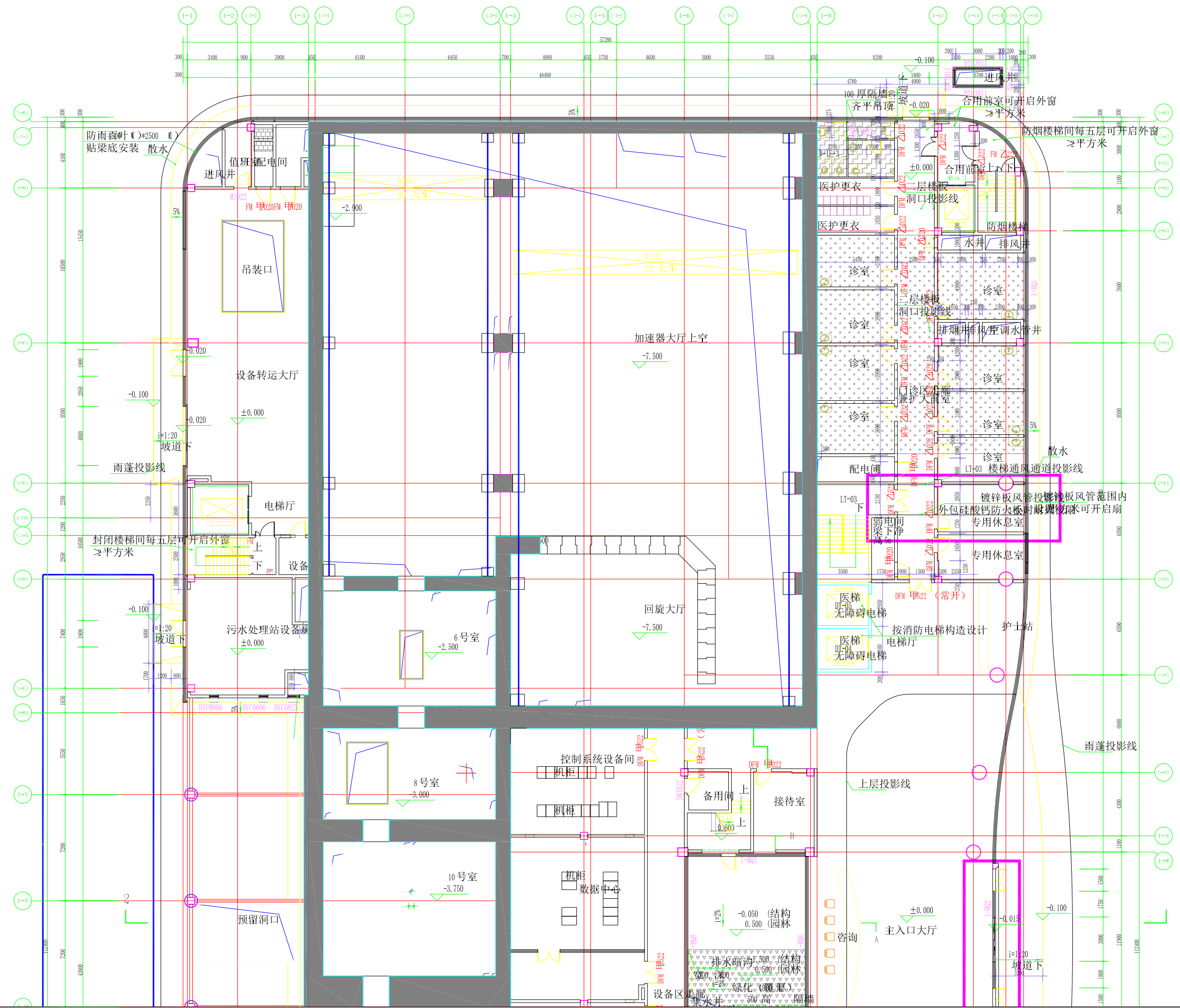


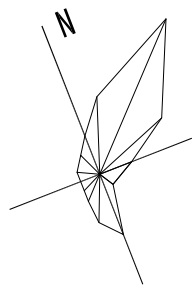
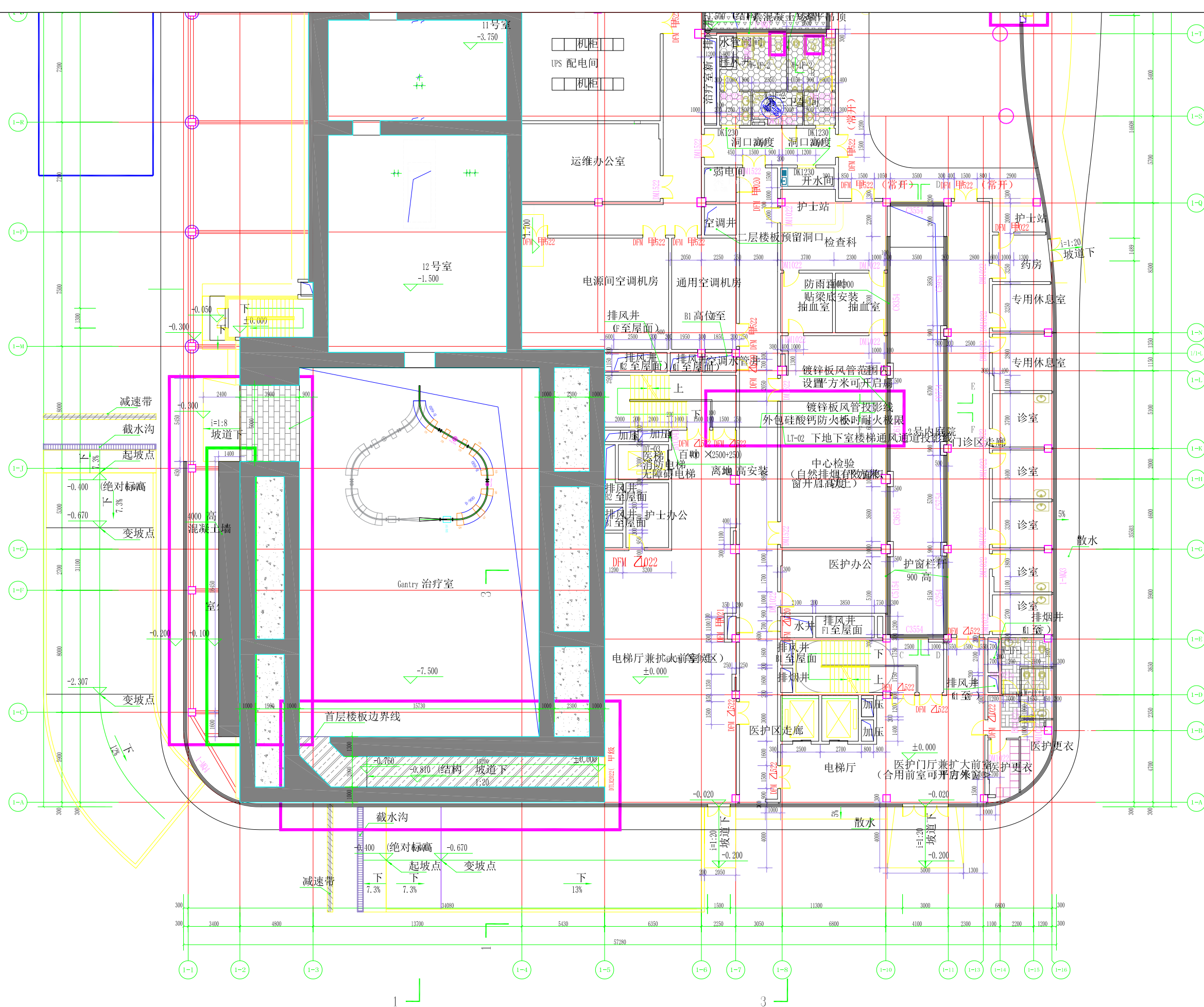
附图6-1 医院平面布置图
[负一层北侧]

附图7-1 重离子治疗中心平面布置图[一层北侧]



1:250

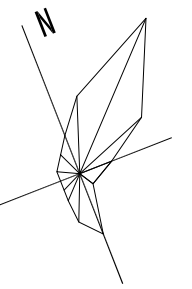




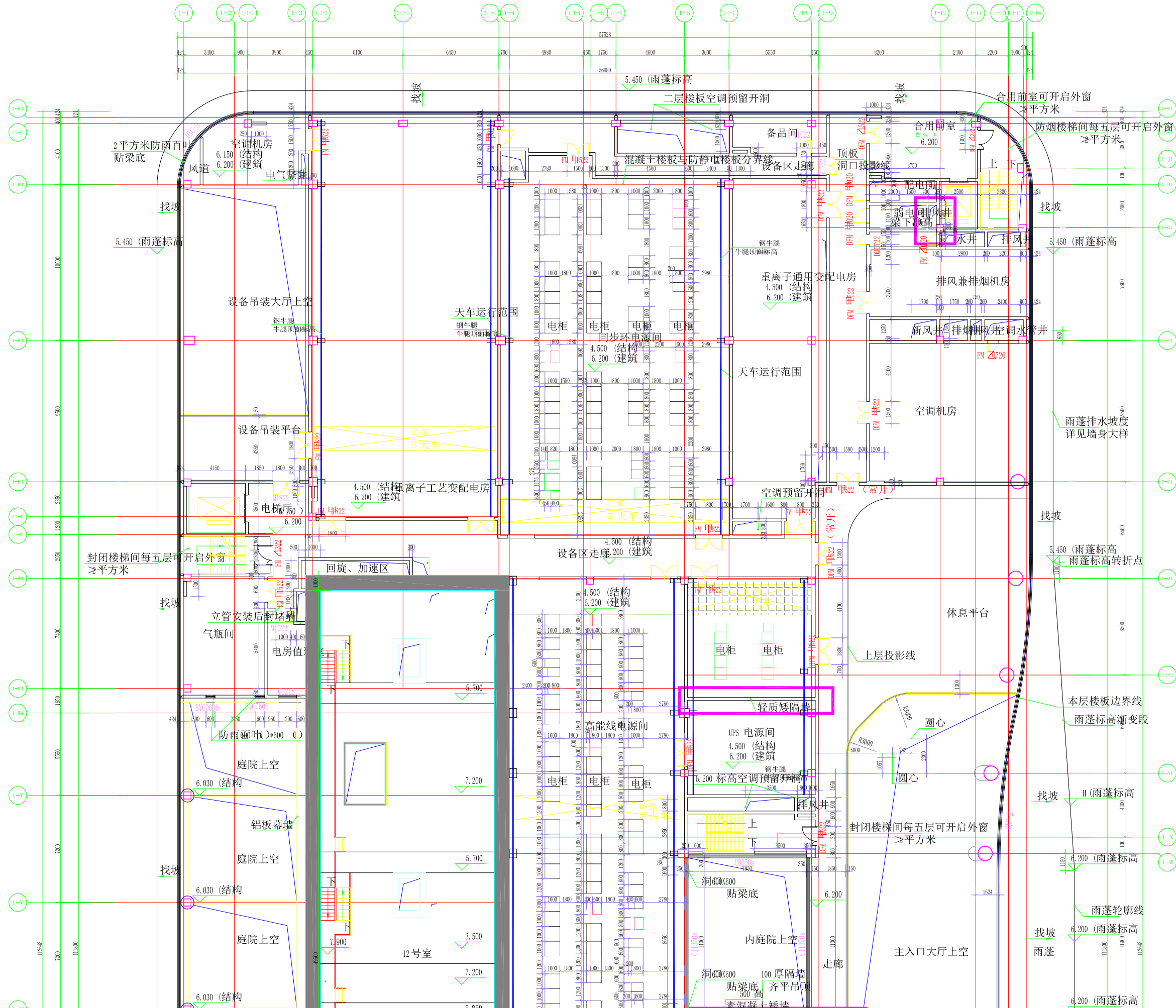
1:250

附图7-2 重离子治疗中心平面布置图[一层南侧]

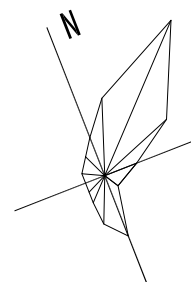
附图8-1 重离子治疗中心平面布置图[二层北侧]



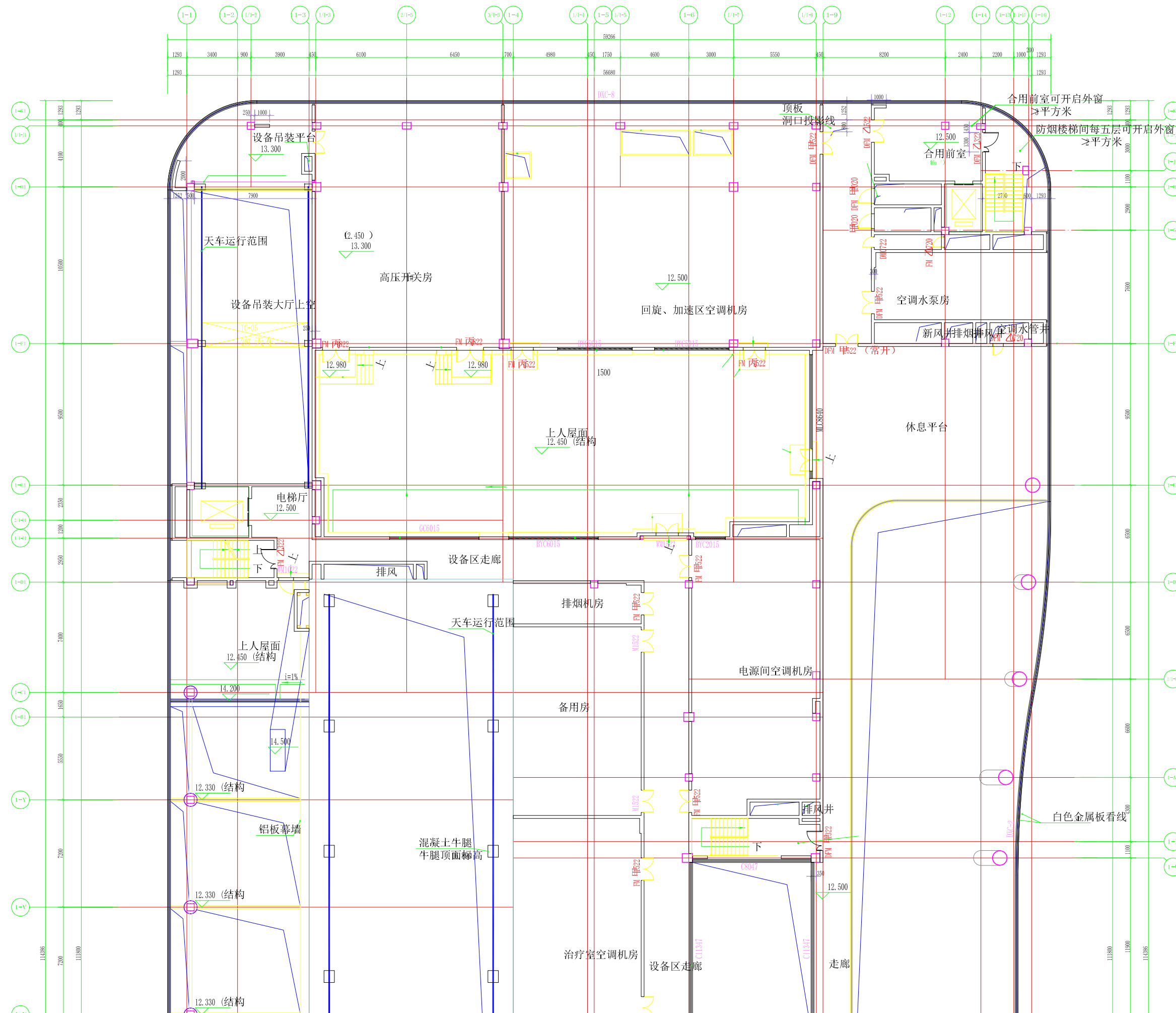
1:250

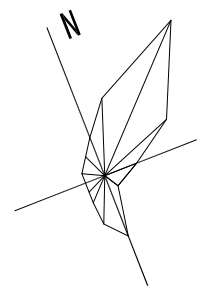
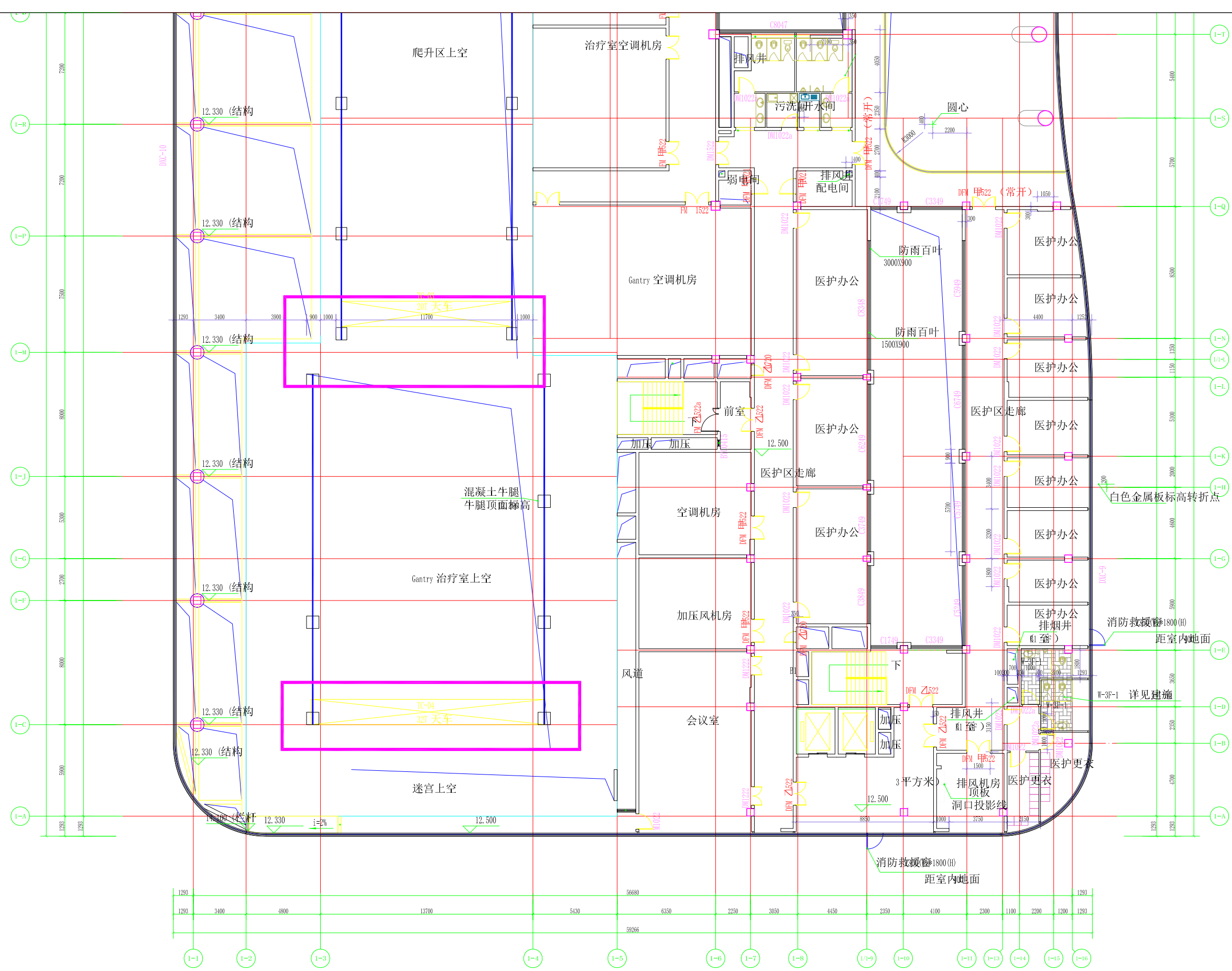


附图9-1 重离子治疗中心平面布置图[三层北侧]



1:250

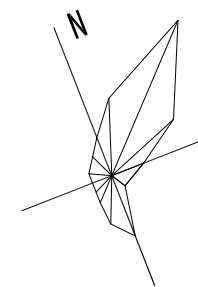




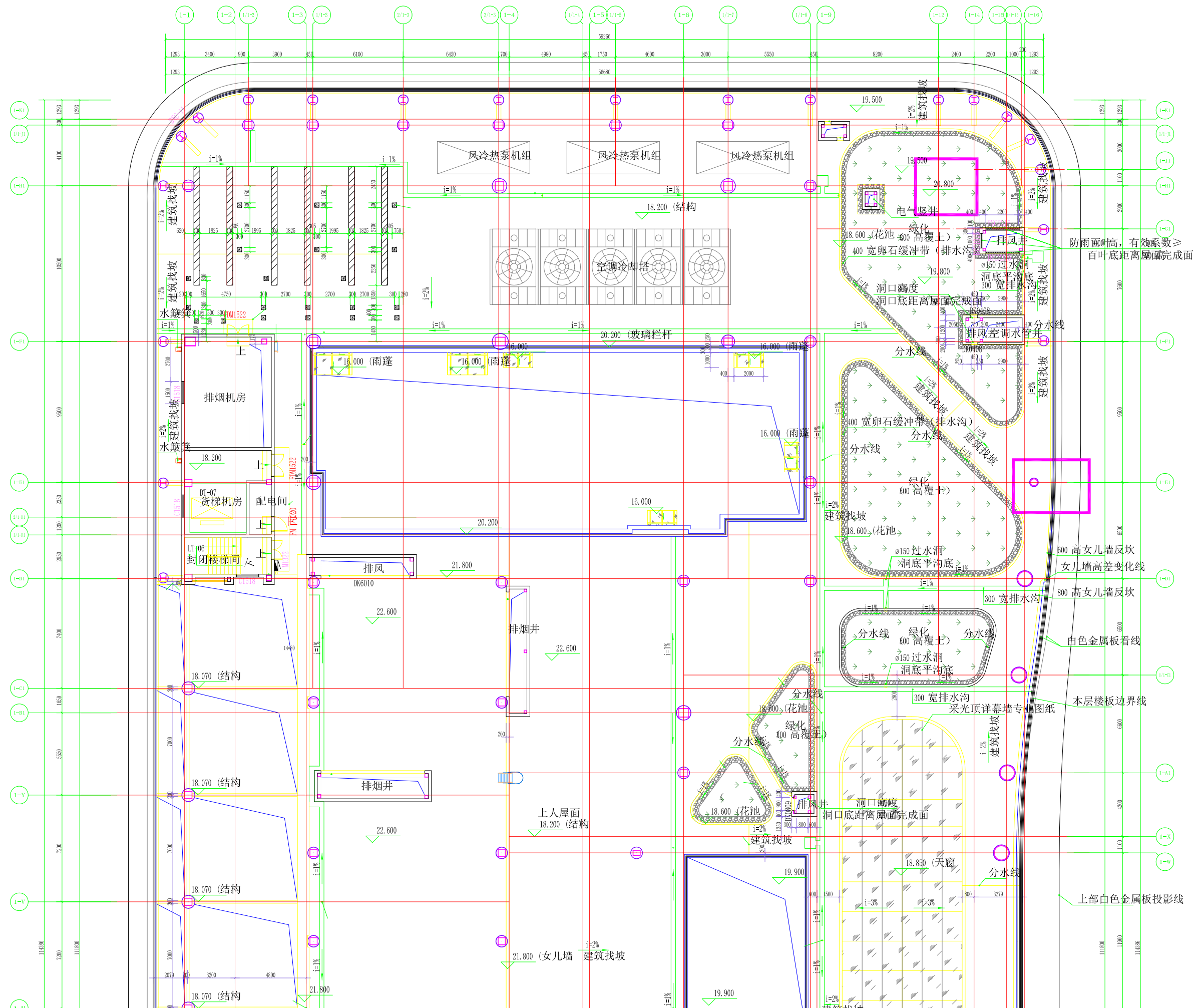
1:250

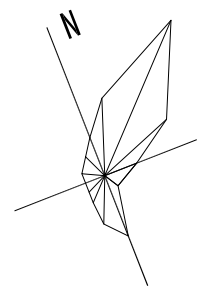
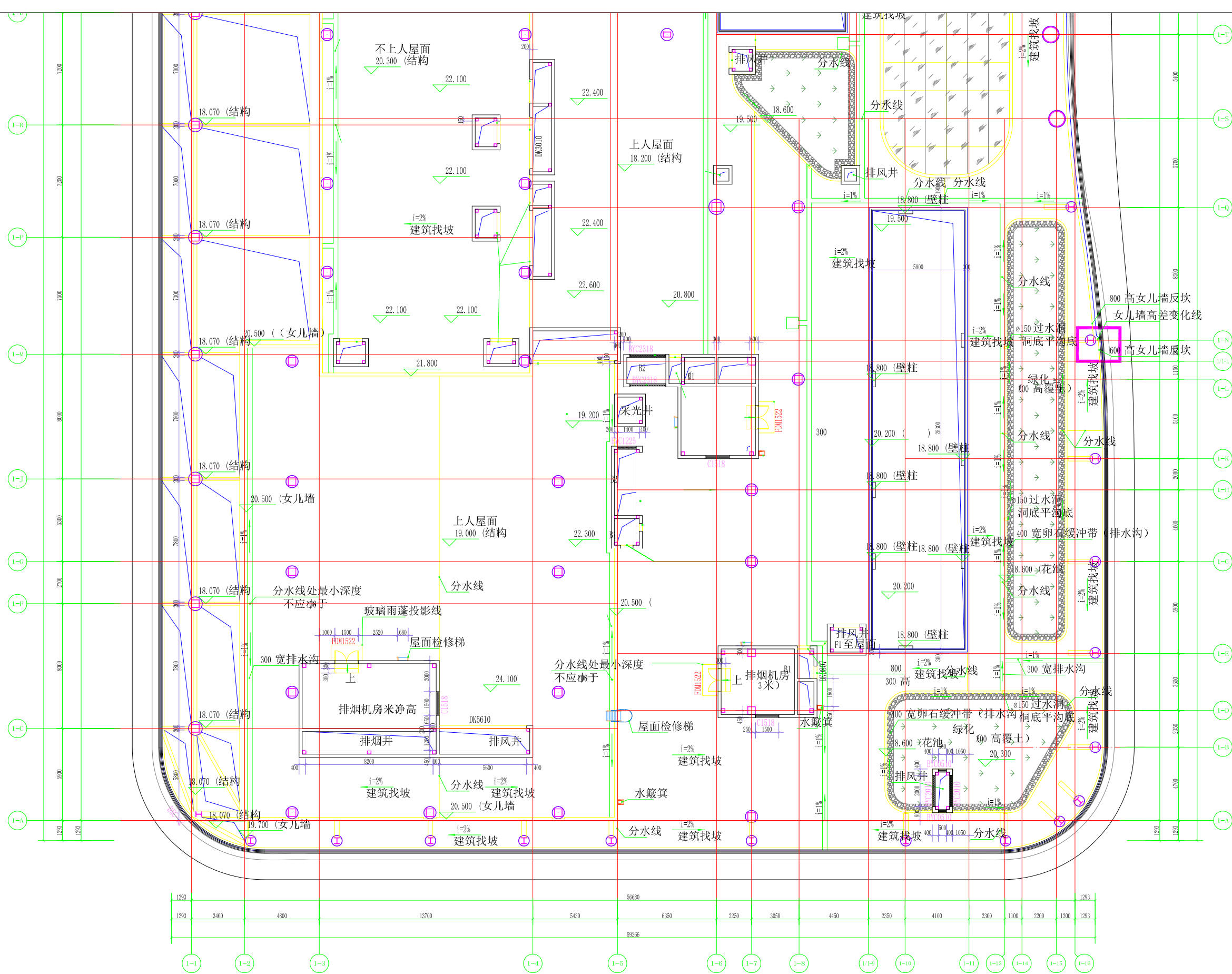
附图9-2 重离子治疗中心平面布置图[三层南侧]

附图10-1 重离子治疗中心平面布置图[屋顶层北侧]



1:250

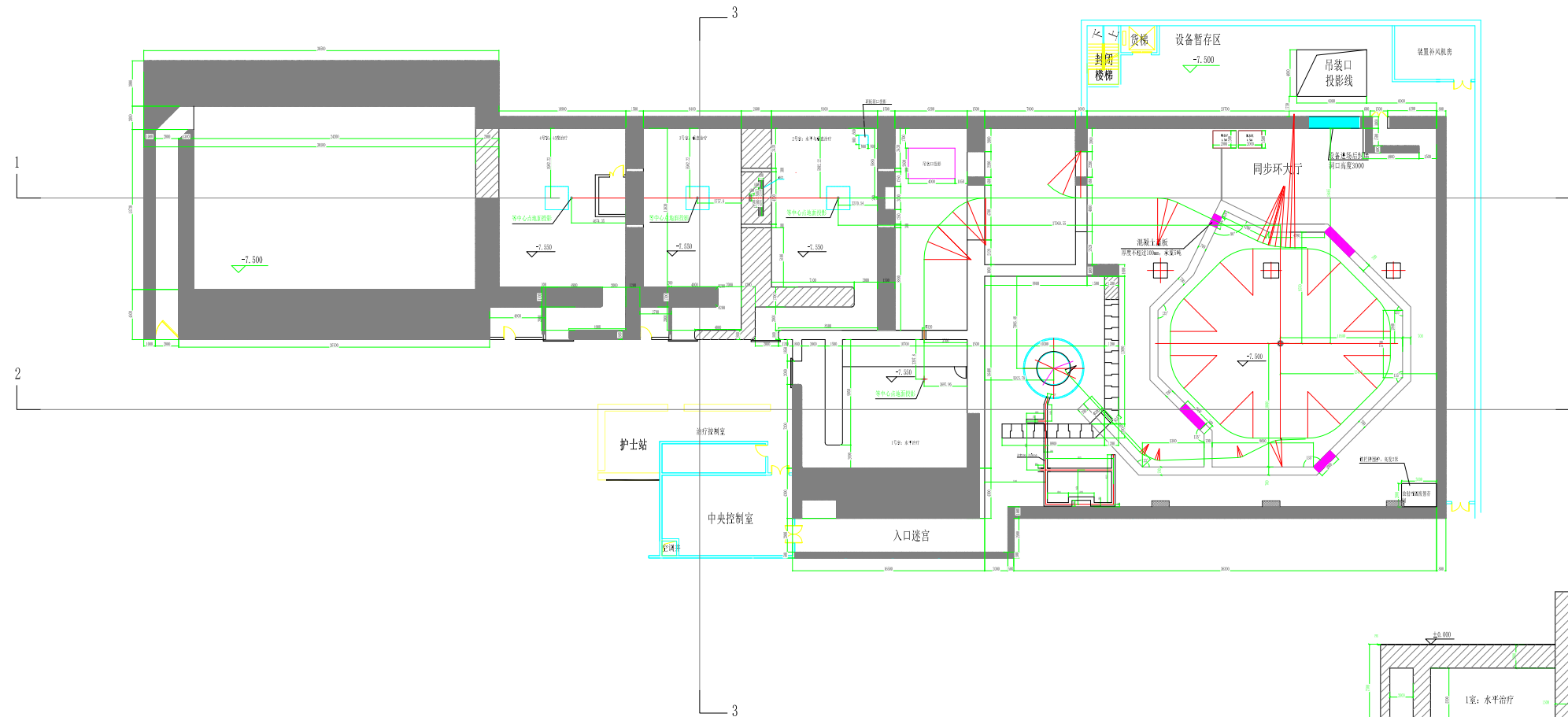
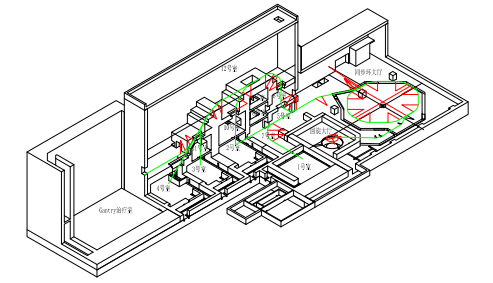
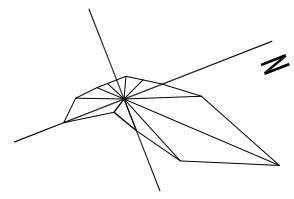




1:250

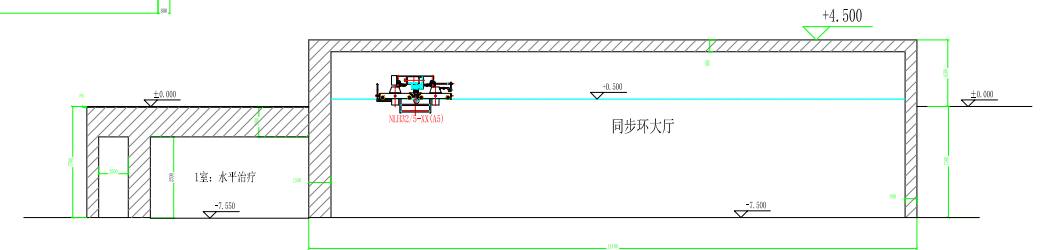
附图10-2 重离子治疗中心平面布置图[屋顶层南侧]

-7.500米平面图

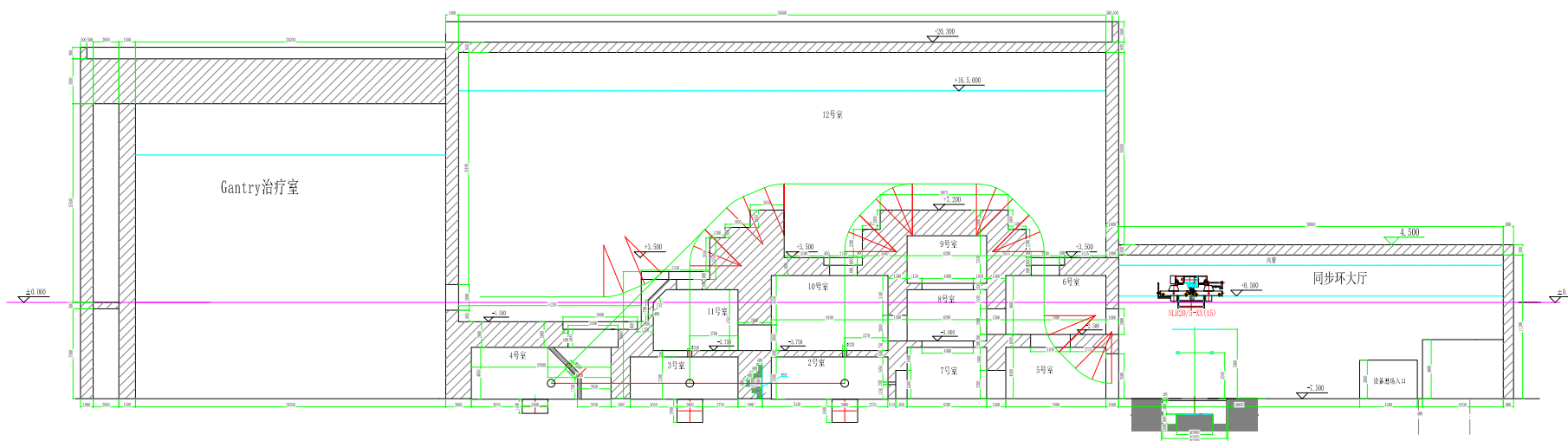
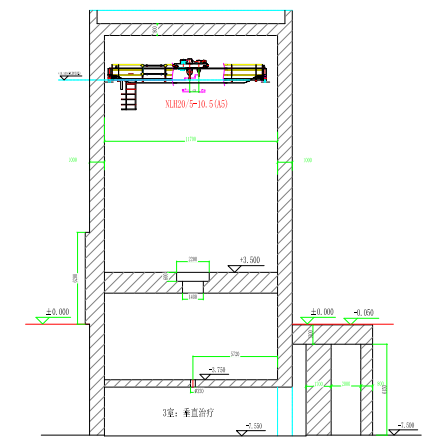


1-1剖面

2-2剖面



3-3剖面



附图11 重离子治疗加速器机房及治疗室平面及剖面图

						 兰州科近泰嘉新技术有限责任公司 LANZHOU KEJIN TAIJIAO TECHNOLOGY CO., LTD.	
						-7.5米平面图	
标	记	处	分	区	更改文件号	签名	年、月、日
设计					标准化		
制图					工艺		
校对					会签		
审核					批准		
						数量	重量
						比例	图幅
						1:250	A1
						第 页	共 页