

核技术利用建设项目

**浙江省肿瘤医院重离子治疗系统项目
环境影响报告书**

浙江省肿瘤医院

2021 年 1 月

环境保护部监制

核技术利用建设项目

浙江省肿瘤医院重离子治疗系统项目

环境影响报告书

建设单位名称： 浙江省肿瘤医院

建设单位法人代表（签名或签章）： _____

通讯地址： 杭州市拱墅区半山东路 1 号

邮政编码： 214192 联系人： 薛波

电子邮箱： yiwuke@zjcc.org.cn 联系电话： 0571-88122511

目录

第一章 概述.....	1
1.1 项目名称、地点.....	1
1.2 项目概况.....	1
1.3 编制依据.....	13
1.4 评价标准.....	16
1.5 评价范围和保护目标.....	18
第二章 自然环境与社会环境状况.....	20
2.1 自然环境状况.....	20
2.2 社会经济状况.....	21
2.3 环境质量和辐射现状.....	22
2.4 场址适宜性评价.....	26
第三章 工程分析与源项.....	27
3.1 项目规模与基本参数.....	27
3.2 工程设备与工艺分析.....	30
3.3 污染源项.....	44
3.4 废弃物.....	59
第四章 辐射安全与防护.....	60
4.1 场所布局与屏蔽.....	60
4.2 辐射安全与防护措施.....	64
4.3 三废的治理.....	70
4.4 服务期满后的环境保护措施.....	73
第五章 环境影响分析.....	74
5.1 建设阶段对环境的影响.....	74
5.2 运行阶段对环境的影响.....	76
5.3 事故影响分析.....	88
第六章 辐射安全管理.....	92
6.1 机构与人员.....	92
6.2 辐射安全管理规章制度.....	93
6.3 辐射监测.....	95
6.4 辐射事故应急.....	99
第七章 利益-代价简要分析.....	100
7.1 利益分析.....	100
7.2 代价分析.....	102
7.3 正当性分析.....	103
第八章 结论与建议.....	104
8.1 项目工程概况.....	104
8.2 辐射安全与防护.....	104
8.3 环境影响分析.....	106
8.4 辐射安全管理.....	107
8.5 建议和承诺.....	107

第一章 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：浙江省肿瘤医院重离子治疗系统项目

项目建设单位：浙江省肿瘤医院

项目建设地点：本项目建设地理位置处于杭州市拱墅区半山东路1号，位于浙江省肿瘤医院总院半山院区东侧。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

浙江省肿瘤医院（以下简称“医院”）始建于1963年10月，是新中国成立最早的四所肿瘤医院之一，集肿瘤预防、医疗、科研、教学、康复于一体，承担着国家肿瘤防治重任，是浙江省唯一的一所集临床、科研、教学及培训为一体的三级甲等肿瘤专科医院。2019年5月，浙江省人民政府与中国科学院签署医学合作协议，医院正式挂牌“中国科学院肿瘤与基础医学研究所、中国科学院大学附属肿瘤医院、中国科学院大学杭州临床医学院”。

浙江省肿瘤医院分为总院半山院区（位于杭州市拱墅区半山东路1号）及机场路院区（位于杭州市机场路30号）两个院区，现有总用地面积69890平方米（其中总院半山院区64993平方米、机场路院区4897平方米），总建筑面积149740.35平方米（其中总院半山院区146949.83平方米，机场路院区2790.52平方米），医院核定床位1500张，实际开放床位1982张，共有38个病区。

1.2.2 项目建设背景及意义

1.2.2.1 项目建设背景

2019年5月8日，浙江省政府与中国科学院签订了医学战略合作框架协议，根据协议，省政府与中国科学院将以浙江省肿瘤医院为依托，共建中国科学院肿瘤与基础医学研究所、中国科学院大学附属肿瘤医院和中国科学院大学杭州临床医学院。同时浙江省肿瘤医院也成功入选国家疑难病症诊治能力提升工程项目储备库及“国家肿瘤区域医疗中心”牵头建设单位，牵头建设国家肿瘤区域医疗中心，打造浙江省肿瘤医学高峰，聚力打造国内领先、国际一流的肿瘤公共研究平台、临床实践平台和成果转化平台。

作为牵头单位，为满足发展的需要，医院决定建设重离子医学中心，包括建设重离子大楼基建建设以及配备一套重离子治疗系统，大力发展重离子技术，为国家肿瘤防治科普的进一步推广和普及、放疗技术水平的不断提高，为重离子治癌研究的发展做出应有的贡献，也为浙江省肿瘤医院建设“五个一流”的世界一流医院的目标奠定坚实的基础。

1.2.2.1 项目建设意义

恶性肿瘤作为一种严重威胁人类生命健康的疾病，具有复杂性、多样化、易转移等难以完全克服的特点，已经成为致死的重要杀手。外科手术、化学治疗和放射治疗是当前恶性肿瘤治疗的三大主要手段。根据国际抗癌联盟（UICC）统计，约70%的肿瘤患者需要通过放射治疗达到根治或姑息治疗的目的，或配合手术前、术后和术中放疗。

以X射线、 γ 射线、电子等轻粒子为主的传统放疗对肿瘤和正常脏器组织都有损伤作用，因而在肿瘤被放射控制的同时，也产生了一定程度的急性和后期放射并发症，特别是对那些立体形态较怪异、又与周围正常组织相交错的肿瘤。由于正常组织的放射耐受量有限，因而照射肿瘤的剂量无法提高，射线射入人体后，剂量主要损失在浅层，随着射程增大而逐渐减小，且到达病灶时其剂量并不立即终止，会对病灶后部的正常组织和器官造成伤害。

随着粒子加速器等相关技术的发展，人们发现重离子拥有倒转深度剂量分布、拓展布拉格峰后沿剂量急剧下降、高传能线密度（LET）、高相对生物效应（RBE）、较小的氧增比、可实时剂量验证、准确投射肿瘤靶区等特点。这些特点使得重离子放射治疗相对于传统放疗有很大的优势，它能够更加准确地攻击肿瘤细胞，且对DNA致死性更加复杂，对肿瘤的杀伤作用更大。重离子束辐射敏感性不依赖细胞周期时相，对DNA损伤的可修复性很小，重离子放疗后癌症的再复发更低，根据目前已有的临床表现看，重离子的优势十分明显，肿瘤患者术后三年存活率、五年存活率均高于常规放疗。

重离子是原子序数大于等于2的中性原子的壳层电子被剥离后形成的带电粒子。在放射治疗中所指的重离子多为碳离子（ $^{12}\text{C}^{6+}$ ）。利用加速器将两类带电粒子加速至接近光速而形成的放射线可用于肿瘤的治疗。

由于重离子的质量和体积远远大于X射线和电子，其物理特性导致重离子束具有独特的剂量深度分布曲线——Bragg峰，重离子射线穿透生物体的基本过程如下（如

图1.2-1所示)：在重离子进入人体的大部分射程里，较高的初始能量使其穿过组织速度很快，因而损失的能量较小，形成一个相对低剂量的坪区，因此对入射路径上健康的组织损害很小；而在射程的末端，随着能量的损失，离子运动速度减慢，与靶核核外电子碰撞的几率增大，最终在射程末端形成一个陡峭的高剂量能量损失峰，即Bragg峰，其后剂量迅速跌落。

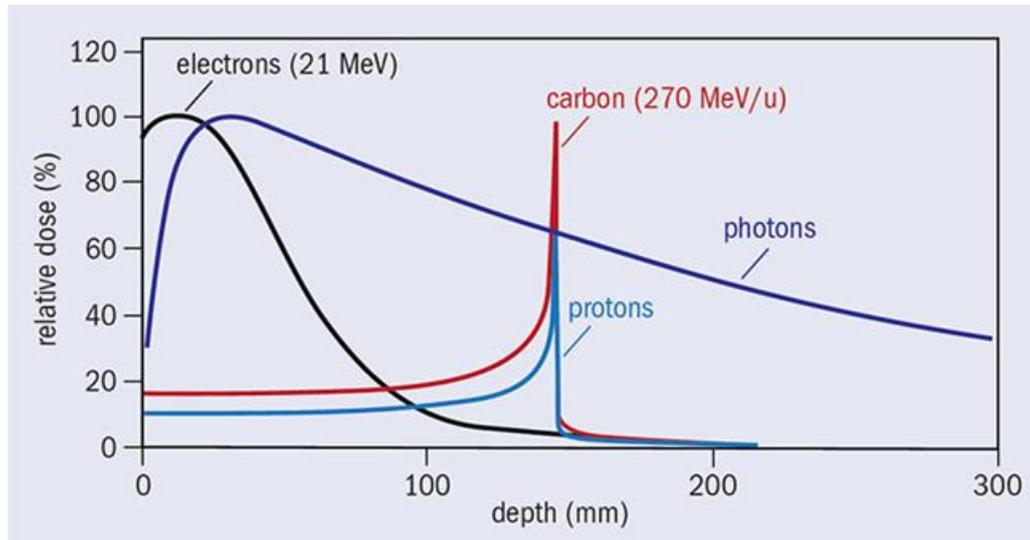


图 1.2-1 光子、电子、质子和碳离子深度剂量分布曲线示意图

(注：photons-光子、eletrons-电子、protons-质子、carbon-碳离子)

基于重离子在物理学上特有的Bragg峰特性，在重离子治疗过程中，如果把展宽的Bragg峰（即扩展Bragg峰，Spread-Out Bragg peak, SOBP）（如图1.2-2所示）精确地调整覆盖在肿瘤靶区，使得离子在靶区的剂量很高，从而可以达到有效杀死肿瘤细胞的同时使肿瘤靶区周围正常组织只受到很少剂量照射的目的。

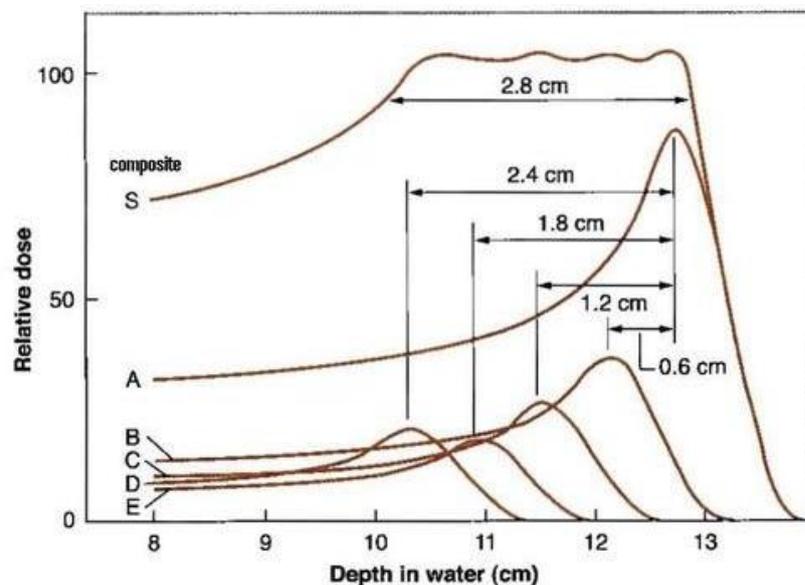


图 1.2-2 扩展布拉格峰的形成原理示意图

重离子治疗主要有如下优势：

(1) 重离子在纵向剂量分布上急剧下降，拥有陡峭的Bragg峰，剂量边缘清晰，分界可达到毫米量级，有利于精确治疗。

(2) 重离子射线的相对生物学效应（RBE）明显。其主要机制为：重离子贯穿靶物质时，在其Bragg峰区形成高能量损失密度，使得局部细胞的DNA产生双链断裂的比率大大增加，有利于高效杀灭靶区的癌细胞，提高治疗的效果；而在非Bragg峰的区域，由于较低的能损密度，大部分造成细胞DNA单链断裂，后期可被自体修复，因此对健康组织损害比较小。重离子射线RBE值一般为2.0~5.0。重离子对肿瘤细胞的DNA分子链造成双链断裂，断裂几率达60%以上（质子约10%，电子/光子低于10%）。这个特点对乏氧肿瘤细胞和抗射线肿瘤细胞的杀灭非常有效，而这是常规放疗、质子治疗所不具备的特点。重离子比质子更适合治疗对常规射线抗拒的肿瘤，如黑色素瘤、脊索瘤、腺样囊性癌、骨肉瘤、软骨瘤、软组织肉瘤等。颅底、骶骨脊索瘤放疗10年的长期随访表明，在局控率方面，碳离子治疗效果更优。直肠癌术后盆腔内复发碳离子放疗的疗效可以媲美甚至优于手术治疗。某些特定类型的肿瘤，如恶性黑色素瘤、胰腺癌，碳离子联合化疗对防止或延迟远处转移的发生有重要意义，可以提高生存期及局控率。

(3) 重离子射线拥有低氧增强比（OER）。OER是指同一射线照射乏氧与有氧细胞，达到相同生物学效应时所需要的物理吸收剂量之比。重离子射线属于高LET射线，主要通过直接作用方式作用于生物大分子，其杀伤力对氧的依赖性小。在Bragg峰区细胞的致死效应几乎不受细胞周期时相的影响，即细胞有丝分裂期的DNA合成(S)期后期辐射抗性消失，表现出同有丝分裂(M)期细胞几乎一样的辐射敏感性等生物学特性。

(4) 高LET值使得碳离子可以提高肿瘤内乏氧细胞的放射敏感性。

(5) 重离子射程歧离与横向散射小，有利于精确的剂量分布。精准定位达到亚毫米级别的剂量边界，最大限度的损伤靶细胞，保护周围的正常组织和关键器官与结构。

(6) 重离子与生物组织的原子核相互作用，产生正电子发射体，更易于外部成像，进而验证照射后体内肿瘤区域及正常组织的剂量分布。

(7) 多粒子联合放射治疗是当前放射治疗研究领域的前沿，选择重离子治疗装置可以很容易进行拓展，在加速器建造上仅需增加多种离子源就能产生如质子、氦离

子、锂离子、铍离子、硼离子，甚至氧离子，从而可以根据肿瘤特异的放射敏感性选择离子种类进行治疗或联合治疗。

(8) 随着加速器建造技术的发展，重离子治疗装置也可以配备旋转机架，结合重离子在物理学及生物学上的优势，若采用旋转重离子调强放射治疗技术，将有望进一步降低周围正常组织的辐射剂量，提高肿瘤靶区剂量。从而使得采用重离子的超低分割放射治疗成为可能，进而使得肿瘤患者无需住院治疗。该技术在日本NIRS对部分非小细胞肺癌已进行相关临床试验。

由于重离子束的以上优点，它被誉为目前最理想的放射治疗用射线。世界上凡是有重离子加速器的国家都倾注了大量的人力和物力进行重离子束治癌基础研究和治疗装置的建造，使得重离子束治癌成为放疗前沿领域的热点。

根据PTCOG（国际离子治疗联合会）日前发布的最新数据，截至2018年底，全球共有221,528例患者接受了离子治疗，其中接受质子治疗的患者190,036例，占总数的85.8%；接受碳离子治疗的患者27,905例，占总数的12.6%；其余患者接受了He离子（2,054例）、Pion离子（1,100例）和其他离子治疗（433例）。从五年局部控制率和患者生存率的数据上看，重离子治疗的优势异常显著。随着病例数的累加，重离子治疗将逐步被广大患者所追捧。鉴于此，日本已经将重离子治疗头颈部肿瘤、前列腺肿瘤、骨/软组织肿瘤纳入了全民医保。

患者在选择治疗方案的时候，会根据其患病类型以及自身的经济承受能力选择对应的治疗方案。重离子治疗在日本的治疗费用大约为20万人民币，目前在国内的治疗费用为27.8万/例（以上海质子重离子医院为例），虽然价格较为高昂，且未纳入社会医疗保险，但由于重离子的独特优势，医院的诊疗量出现“供不应求”的局面。现在已经开始出现一些商业保险涵盖重离子治疗，随着重离子治疗的影响日渐显著，将来会有更多商业保险涵盖重离子治疗，未来很可能纳入社会医疗保险。一旦纳入社保范围，将会极大的促进重离子治疗行业的发展。

当前重离子治疗技术在全球范围内处在大发展时期。重离子肿瘤治疗的物理原理和生物效应优于质子。2002年前因缺乏临床试实验，故重离子没有提上日程。2003年日本HIMAC（千叶县重离子医用加速器中心）和德国GSI（德国亥姆赫兹重离子研究中心）正式公布碳离子治疗的成功事例后，其优良的生物效应，特别是治疗抗阻型和乏氧型肿瘤的优良疗效，引起国内外许多放疗专家和投资者的兴趣，其中日本和欧洲的重离子治疗有取代质子治疗之势。同时随着重离子临床病例的不断增加和相关

经验的不断积累，重离子治疗的优势将进一步凸显。

重离子治疗作为一种新型的肿瘤放疗技术，在疗效和安全性方面与传统的放疗相比都展现出较大的优越性，是目前世界肿瘤放疗领域最先进和有效的肿瘤治疗方法。中国是继美国、德国、日本之后，世界上第四个掌握重离子治疗肿瘤技术的国家，已经具备重离子临床治疗能力和治疗专用装置生产能力。重离子治疗项目是一个技术比较成熟、市场前景广阔的高科技医疗产业项目，也是一项造福百姓、造福社会的德政惠民工程。

1.2.3 建设项目性质及土地性质

建设项目性质：新建

土地性质：医疗卫生用地

1.2.4 项目建设规模

1.2.4.1 项目概况

浙江省肿瘤医院拟拆除医院半山院区用地范围内中医楼并新增院区东侧用地（现为临时地面停车场），新建一栋重离子医学中心大楼，大楼为地下1层（包括1层夹层）、地上2层（局部三层）结构，主要建设内容包括：重离子医学中心大楼主体建筑工程（主要功能包括含一个加速器大厅及其工艺配套、4个治疗室和其他医护及后勤的相关配套用房）、拆除工程、公用工程、室外工程等。项目新增用地面积4057平方米，项目建设不涉及新增床位。拟建建筑总建筑面积为14000平方米，其中地上建筑面积7600平方米，地下6400平方米；大型医疗设备用房6260平方米（含重离子设备用房与附属工艺用房），七项设施用房7740平方米（含保障系统、医技、行政管理等功能）。

项目总投资约96402万元，其中重离子医学中心大楼建设投资约27302万元，重离子治疗系统投资约69100万元，项目所需资金由省级财政补助和医院自有资金统筹解决。

浙江省发展和改革委员会于2020年7月16日对浙江省肿瘤医院重离子医学中心大楼项目建议书做了批复；浙江省肿瘤医院已委托有资质的环评机构对重离子医学中心大楼建设项目（非辐射类）进行环境影响评价。

浙江省肿瘤医院重离子医学中心大楼建设项目辐射部分的建设内容包括：在重离子医学中心大楼内配备1套重离子治疗系统，用于肿瘤的放射治疗；配备4台DR、

2台CT机，用于肿瘤的定位。

1.2.4.2 项目由来

浙江省肿瘤医院重离子治疗项目属于核技术利用项目，为保护环境和公众利益，防止辐射污染，根据《中华人民共和国环境影响评价法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《建设项目环境保护管理条例》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，其应办理核技术应用项目环境影响评价手续。

根据《射线装置分类》（2017年修订版），本项目重离子治疗系统属于I类射线装置，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021年版），本项目属于“五十五 核与辐射”“172 核技术利用建设项目”中“使用I类射线装置的”，应编制环境影响报告书。受浙江省肿瘤医院的委托，江苏辐环环境科技有限公司承担该项目的环评工作。我公司通过资料调研、项目工程分析，并在结合现场勘察、现场检测（由浙江国辐环保科技有限公司检测）等工作的基础上，编制了该核技术利用项目环境影响报告书，本报告为针对重离子治疗系统项目开展的辐射环境影响评价。

根据《射线装置分类》（2017年修订版），重离子医学中心大楼内拟配备的4台DR、2台CT机属于III类射线装置，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021年版），应编制环境影响登记表，项目建成后医院将另行办理建设项目环境影响登记表备案手续，不作为本报告评价对象。

1.2.4.3 射线装置基本情况及主要建设内容

本项目拟使用1套重离子治疗系统(Heavy Ion Medical Machine，简称HIMM)，HIMM主体包括离子源、低能束运线、回旋加速器（后期升级直线注入）、中能束运线、同步加速器（主加速器）、高能束运线和4个治疗终端等。治疗用的粒子是原子序数为6、核子数为12、核外电子全剥离的碳离子（ $^{12}\text{C}^{6+}$ ），具有被动式和主动式两种束流配送方式。4个治疗终端分别是水平治疗终端、水平+垂直治疗终端、水平+45°治疗终端及水平治疗终端（后期升级为Gantry治疗终端，即旋转机架治疗终端）。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约为27cm，可进行全体位照射治疗。

本项目射线装置基本情况见表1.2-1，项目主要建设内容及可能产生的环境问题见表1.2-2。

表1.2-1 项目拟使用的射线装置基本情况表

序号	射线装置名称及型号	数量	类别	束流最大能量 (MeV/u)	流强 (ppp)	工作场所名称	用途	备注
1	重离子治疗系统 (CY-SY-4400)	1	I	400	治疗终端输出最大束流流强为 4.155×10^9	重离子医学中心大楼内加速器大厅、高能线爬升段区、1号治疗室、2号治疗室、3号治疗室、4号治疗室	放射治疗	治疗用的粒子为碳离子 ($^{12}\text{C}^{6+}$)

表1.2-2 项目主要建设内容及可能产生的环境问题一览表

名称	主要建设内容	可能产生的环境问题	
		施工期	营运期
主体工程	<p>加速器大厅：位于负一层，建筑面积约为 2000 平方米，主要放置重离子加速器装置设备；</p> <p>高能线爬升段区：位于首层，建筑面积约为 1350 平方米；</p> <p>治疗室：共设置四个治疗室，均位于负一层。其中 1 号治疗室为水平治疗室；2 号治疗室为水平+垂直治疗室；3 号治疗室为 45 度治疗室；4 号治疗室为水平治疗室，四个治疗室建筑面积共约 900 平方米，并预留日后 4 号治疗室升级为重离子 Gantry 治疗终端的条件；</p> <p>预留 Gantry 设备安装空间：负一层下方和首层,建筑面积约为 700 平方米。</p> <p>拟配备 1 套重离子治疗系统 (HIMM)，型号为 CY-SY-4400，加速离子为 $^{12}\text{C}^{6+}$，治疗终端能量为 120 MeV/u~400 MeV/u，属于 I 类射线装置。</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	中子、 γ 射线、感生放射性废气、感生放射性废水、感生放射性固废
配套工程	重离子治疗系统控制室、电源间、工艺冷却水泵房、工艺空调用房、高低压配电间等重离子设备附属工艺用房。		噪声
辅助工程	影像功能用房（包括 2 间 CT 机房、2 间 MR 机房及相关附属用房）、患者、医护用房及附属用房、二次等候区、咨询室、卫生间等和其他医护及后勤的相关配套用房。		X 射线、生活污水、办公垃圾
公用工程	供水、供电、排污和通讯等公用设施：依托医院现有设施。	/	/
环保工程	<p>感生放射性废气处理措施：加速器大厅、高能线爬升段区、治疗室内均设置机械通风系统，感生放射性废气经通风系统排入外环境；</p> <p>感生放射性废水处理措施：加速器大厅内设置 2 个</p>		感生放射性废气、感生放射性废水、感生放

	<p>事故收集池，为二级衰变池。正常工况下，工艺水系统管路内冷却水循环使用不外排，事故工况下，管路内泄漏的感生放射性废水经排水地沟、地漏汇集到一级衰变池，通过溢流孔排放到二级衰变池，经衰变满足要求后排放至医院污水处理系统；</p> <p>感生放射性固废处理措施：加速器大厅内设置1间放射性固废储存间，感生放射性固废分类收集后暂存于储存间内，经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中解控标准的放射性固废作为一般医疗废物处理，对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。</p>		放射性固废、
--	--	--	--------

1.2.5 产业政策和规划符合性

1.2.5.1 产业政策符合性

本项目属于《产业结构调整指导目录（2019年本）》中第六项“核能”中第6条“同位素、加速器及辐照应用技术开发”，属于国家鼓励类产业，符合国家产业政策。

1.2.5.2 规划符合性

本项目位于浙江省肿瘤医院现有院区内，不新增用地，用地性质为医疗卫生用地，项目建设符合杭州市主体功能区划及土地利用规划。

1.2.6 “三线一单”符合性分析

根据《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），“三线一单”即“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”，项目建设应强化“三线一单”约束作用。

一、与“生态保护红线”的相符性

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。根据《杭州市“三线一单”生态环境分区管控方案》，本项目所在地属于拱墅区拱墅城镇生活重点管控单元（ZH33010520001），对照《浙江省生态保护红线》，本项目不在生态保护红线范围内。

二、与“环境质量底线”的相符性

根据环境质量现状监测结果，本项目拟建场址及周围环境辐射环境质量现状属于正常本底范围。在落实本环评提出的各项污染防治措施后，本项目运行不会对周围环境产生不良影响，能维持周边环境质量现状，满足该区域环境质

量功能要求，因此本项目符合环境质量底线要求。

三、与“资源利用上线”的相符性

医院区内供电由杭州市供电系统10kV双回路供给，目前医院变压器安装容量为18500kVA，本项目供电依托医院供电设施，医院院区变压器安装容量可满足项目供电需求；医院给水由市政给水系统供给，项目给水依托医院现有供水设施，可满足项目供水要求；项目用地为医院用地。整体而言本项目所用资源相对较小，也不占用当地其他自然资源和能源，因此本项目符合资源利用上线的要求。

四、与“环境准入负面清单”的相符性

本项目位于拱墅区拱墅城镇生活重点管控单元，为医院建设项目，满足管控措施，不在环境功能区负面清单内，符合环境准入负面清单的要求。

1.2.7 项目周边环境

浙江省肿瘤医院总院半山院区位于杭州市拱墅区半山东路1号，医院东侧靠近杭州半山国家森林公园，东南侧靠近秋实高架路、浙江建设技师学院，南侧靠近杭州市半山实验小学，西侧与田园公寓相邻，北侧与杭州自富汽车修理有限公司相邻。

本项目位于医院半山院区东侧拟建重离子医学中心大楼内，大楼东侧及东北侧均为院内道路、医院围墙，围墙外为广济支路、杭州半山国家森林公园；东南侧依次为院内道路、医院围墙，围墙外依次为广济路、秋实高架路、浙江建设技师学院（目前已闲置，作为停车场使用）（距重离子医学中心大楼约90m）；南侧依次为院内道路、医院围墙，围墙外为广济路、垃圾站、绿化、秋实高架路；西南侧依次为院内空地、医院围墙，围墙外南侧为广济路、广济路189-1~189-18号商铺，围墙外西侧为道路，路西侧由北向东依次为浙江省肿瘤医院研究所、田园巷、杭州市半山实验小学（重离子医学中心大楼距小学围墙最近约105m，距教学楼最近约144m）；西侧依次为院内道路、门诊楼及病房楼、院内公园；西北侧依次为院内道路、放射影像楼、信息中心、病房楼，北侧依次为院内道路、放射治疗楼、医院围墙，围墙外为广济路186-6号简易建筑（原为毕家商务旅馆，现已闲置）。

项目拟建址及周围环境现状见图1.2-1。



项目拟建址



拟建址东侧围墙外



拟建址东南侧围墙外



拟建址南侧围墙外



拟建址西南侧



图1.2-1 项目拟建址及周围环境现状图

1.2.8 原有核技术利用项目情况

1.2.8.1 医院原有核技术利用项目许可情况

浙江省肿瘤医院已取得《辐射安全许可证》，证书编号：浙环辐证[A0001]；有效期至2022年3月13日；许可的种类和范围：使用III类、V类放射源；使用II类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。

1.2.8.2 原有核技术利用项目环保手续履行情况

医院原已许可射线装置共43台，均已进行履行环境影响评价手续，其中2台定位机、1台CT、1台数字肠胃机和1台ERCP暂未购买安装，其余38台射线装置均已履行环保竣工验收手续。

1.2.8.3 原有核技术利用项目管理情况

(1) 医院以内部文件形式成立了放射防护小组，由分管副院长担任组长、

副组长，相关科室负责人任成员，并明确了各职能科室和相关科室部门的职责和分工，具体放射防护工作由医务科牵头落实；已制订医院放射性同位素与射线装置安全和防护的各项规章制度、放射防护安全的应急预案等综合管理规章制度，同时，各相关科室根据各自特点，制定了相应的操作规程、岗位职责、应急预案、辐射防护制度、设备检修维护制度、台账管理制度等。

医院制定的辐射安全管理规章制度较完备且具有一定的可行性，医院能够按照规章制度对医院的辐射工作进行管理，辐射工作人员也能够按照各项规章制度开展工作。在日后工作中，医院还应根据相关法规和实际工作情况不断对现有的辐射安全管理规章制度进行补充和完善。

(2) 医院现有辐射工作人员均已进行放射防护知识培训并考核合格。

(3) 医院已为所有辐射工作人员配备了个人剂量计，定期送有资质部门进行个人剂量监测，建立了个人剂量档案，并对检测结果有异常的人员及时进行了调查，分析原因，采取措施；已定期组织辐射工作人员进行职业健康体检，并建立了辐射工作人员职业健康监护档案。

(4) 医院每年委托有资质的单位对辐射工作场所和设备性能进行年度监测，根据医院提供的资料，各辐射工作场所监测结果均满足相关标准要求。

(5) 医院已制定《辐射事故应急预案》，每年均定期开展辐射事故应急演练，并对演练结果进行总结，及时对辐射事故应急预案进行完善和修订。经与医院核实，自核技术利用项目开展以来，未发生过辐射事故。

(6) 医院每年编制有《辐射安全和防护状况年度评估报告》，对现有放射性同位素和射线装置辐射工作场所防护状况、人员培训及个人剂量、放射性同位素和射线装置台账、辐射安全与防护制度执行情况、监测仪器情况等进行年度总结和评估，并已及时提交至发证机关。

1.3 编制依据

1.3.1 法律法规

- 《中华人民共和国环境保护法》（修订版），2015年1月1日起施行；
- 《中华人民共和国环境影响评价法》（2018年修正版），2018年12月29日起施行；
- 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003年10月1日起施行；

- 《建设项目环境保护管理条例》(2017年修订版),2017年10月1日起施行;
- 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》(2019年修正版),国务院令第七09号,2019年3月18日起施行;
- 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》(2019年修正本),生态环境部令 第16号,2019年8月22日起施行;
- 《建设项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)》,生态环境部令 第1号,2021年1月1日起施行;
- 《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日起施行;
- 《医疗废物管理条例》,中华人民共和国国务院 第380号令,2003年6月16日起施行;
- 《放射性废物安全管理条例》,国务院令 第612号,2012年3月1日起施行;
- 《射线装置分类》(2017年修订版),环境保护部 国家卫生计生委公告 2017年公告第66号公布,自2017年12月5日起施行;
- 《产业结构调整指导目录(2019年本)》,中华人民共和国国家发展和改革委员会令 第29号,自2020年1月1日起施行;
- 《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、国防科工局公告 2017年公告第65号公布,自2018年1月1日起施行;
- 《医疗卫生机构医疗废物管理办法》(中华人民共和国卫生部 第36号令),自2003年8月14日起施行;
- 《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》,国家环境保护总局文件,环发[2006]145号文
- 《建设项目环境影响报告书(表)编制监督管理办法》,生态环境部令 第9号,2019年11月1日起施行;
- 《关于发布<建设项目环境影响报告书(表)编制监督管理办法>配套文件的公告》,生态环境部公告 2019年 第38号,2019年11月1日起施行;
- 《生态环境部关于启用环境影响评价信用平台的公告》,生态环境部公告 2019年 第39号,2019年10月25日生成;
- 《关于做好2020年核技术利用辐射安全与防护培训考核工作有关事项的通

知》，环办辐射函[2019]853号；

- 《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）
- 《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》，国核安发〔2015〕40号
- 《浙江省建设项目环境保护管理办法》，浙江省人民政府令第364号，2018年3月1日起施行；
- 《浙江省辐射环境管理办法》，省政府令第289号，2012年2月1日起施行；
- 《浙江省人民政府办公厅关于印发浙江省辐射事故应急预案的通知》，浙政办发〔2018〕92号，2018年9月18日起施行；
- 《关于开展医疗机构辐射安全许可和放射诊疗许可办事流程优化工作的通知》，浙环函〔2019〕248号；
- 《关于发布浙江省生态保护红线的通知》，浙政发[2018]30号；
- 《杭州市生态环境局关于印发<杭州市“三线一单”生态环境分区管控方案>的通知》，杭环发〔2020〕56号。

1.3.2 技术导则及相关标准

- 《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ2.1-2016）；
- 《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》（HJ10.1-2016）；
- 《辐射环境监测技术规范》（HJ/T61-2001）；
- 《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》（GB/T14583-1993）；
- 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第1部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）；
- 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；
- 《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ133-2009）
- 《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）。

1.3.3 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) 省发展改革委关于浙江省肿瘤医院重离子医学中心大楼项目建议书批复的函；

(3) 医院目前持有的辐射安全许可证正副本复印件；

(4) 医院已许可的核技术利用项目情况一览表；

(5) 建设项目环境现状检测报告；

(6) 《浙江省肿瘤医院重离子医学中心大楼项目建议书》，广州市设计院，2020年5月；

(7) 《杭州重离子治疗装置（HIMM）辐射防护设计报告》，中科院近代物理研究所。

1.4 评价标准

1.4.1 剂量限值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的规定，本项目辐射工作人员和公众的年剂量限值见下表。

表 1.4-1 剂量限值

	剂量限值
职业照射 剂量限值	工作人员所接受的职业照射水平不应超过下述限值： ①由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv； ②任何一年中的有效剂量，50mSv。
公众照射 剂量限值	实践使公众有关关键人群组的成员所受的平均剂量估计值不应超过下述限值： ①年有效剂量，1mSv； ②特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

1.4.2 剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）“剂量约束值通常应在公众照射剂量限值 10%~30%（即 0.1mSv/a~0.3mSv/a）的范围之内。”的规定，同时结合本项目特点，本项目剂量约束值管理目标见下表。

表 1.4-2 剂量约束值

适用范围	剂量约束值
职业照射有效剂量	5mSv/a
公众照射有效剂量	0.1mSv/a

1.4.3 辐射剂量率控制水平

本项目重离子治疗系统辐射工作场所上方为屋面冷却塔和屋面绿化，系统正常运行期间，禁止人员进入；一个治疗室内开展放射治疗时，其相邻治疗室一般无人停留，医生在间隔的治疗室内进行摆位等准备工作，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）中相关规定，本项目辐射剂量率控制水平为：

(1) 4 个治疗室之间隔墙外 30cm、加速器大厅、高能线爬升段区、4 号治疗室顶外 30cm 处辐射剂量率不大于 10 μ Sv/h；

(2) 加速器大厅、高能线爬升段区、4 个治疗室墙体（治疗室之间隔墙除外）、迷道门外 30cm 人员可居留处辐射剂量率不大于 2.5 μ Sv/h。

1.4.4 辐射管理分区

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002），应将辐射工作场所分为控制区、监督区。

对于需要专门防护手段或安全措施的区域划分为控制区，控制区在设备运行时一般不允许任何人员进入；对于未被设定为控制区，不需要专门防护手段或安全措施但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域，划分为监督区，监督区在设备运行时只允许放射工作人员进入。辐射控制区和辐射监督区以外区域对人员活动不限制。

1.4.5 放射性废水

①参考《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）的要求：

表 1.4-3 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值（日均值）

序号	控制项目	排放标准	预处理标准
22	总 α / (Bq/L)	1	1
23	总 β / (Bq/L)	10	10

②根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中相关规定，满足下列条件的低放废液方可直接排入流量大于 10 倍排放量的普通下水道：

a、每月排放的总活度不超过 10ALI_{min}；

b、每次排放的活度不超过 $1ALI_{min}$ ，并且每次排放后不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

1.4.6 放射性固体废物

① 《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ133-2009）

4.4 如果经审管部门确认或批准，凡放射性核素活度浓度小于或等于清洁解控水平推荐值的放射性废物，按免管废物处理。

6.3.3 未知核素的废物活度在其浓度小于等于 $2 \times 10^4 Bq/kg$ 时，可作免管固体废物处理。

② 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）

A2.1 符合以下要求的放射性物质，即任何时间段内在进行实践的场所存在的给定核素的总活度或在实践中使用的给定核素的活度浓度不超过表 A1 所给出的或审管部门所规定的豁免水平；

A2.2 表 A1 给出的放射性核素的豁免活度浓度和豁免活度，是根据某些可能还不足以可无限制使用的照射情景和模式、参数推导得出的，仅可作为申报豁免的基础。考虑豁免时，审管部门应根据实际情况逐例审查，某些情况下，也可以要求采用更为严格的豁免水平。

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

本项目为使用I类射线装置，工作场所位于重离子医学中心大楼内，运行期主要环境影响为电离辐射影响，根据本项目的辐射特点，并结合《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）中：“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”的规定，本项目评价范围确定为重离子治疗系统工作场所（包括加速器大厅、高能线爬升段区、4个治疗室）实体边界外100m范围内的区域。

1.5.2 保护目标

本项目位于浙江省肿瘤医院总院半山院区东侧，本项目 100m 评价范围内，东侧及东北侧均为院内道路、医院围墙，围墙外为广济支路、杭州半山国家森林公园；东南侧依次为院内道路、医院围墙，围墙外依次为广济路、秋实高架路、浙江建设技师学院（目前已闲置，作为停车场使用）（距重离子医学中心大楼约 90m）；南侧依次

为院内道路、医院围墙，围墙外为广济路、垃圾站、绿化、秋实高架路；西南侧依次为院内空地、医院围墙，围墙外南侧为广济路、广济路 189-1~189-18 号商铺，围墙外西侧为道路，路西侧由北向东依次为浙江省肿瘤医院研究所、田园巷；西侧依次为院内道路、门诊楼及病房楼、院内公园；西北侧依次为院内道路、放射影像楼、信息中心、病房楼，北侧依次为院内道路、放射治疗楼。

本项目评价范围内环境敏感点为浙江省肿瘤医院研究所、浙江建设技师学院（已闲置，作为停车场使用），环境保护目标主要是本项目辐射工作人员、医院内的其他医护人员、病患及陪同家属、浙江省肿瘤医院研究所及浙江建设技师学院内的工作人员、广济路 189-1~189-18 号商铺内工作人员及顾客、周边道路上的行人、杭州半山国家森林公园内的游客。

本项目周围环境保护目标分布见表 1.5-1。

表 1.5-1 评价范围内的主要环境保护目标

编号	环境保护目标名称		方位	最近距离	规模及人口分布	保护要求
1	本项目辐射工作人员		西北侧	约0.3m	不少于13人	年有效剂量不超过5mSv/a
2	医院内的其他医护人员	重离子医学中心大楼内	西北侧、楼上	约0.3m	约50人	年有效剂量不超过0.1mSv/a
3		8号门诊楼内	西北侧	约30m	约100人	
4		1号病房楼内		约85m	约600人	
5		6号放射影像楼		约48m	约90人	
6		5号信息中心		约74m	约30人	
7		4号放射治疗楼	北侧	约7m	约110人	
8		院内道路及公园	四周	约0.3m	院内医护人员	
9		病患及陪同家属	院内	四周	约0.3m	
10	浙江省肿瘤医院研究所内工作人员	10号行政科研楼内	西侧	约78m	约468人	
11	田园巷、广济路等医院周边道路上的行人		周围	约7m	流动人群	
12	广济路189-1~189-18号商铺内工作人员及顾客		西南侧	约76m	工作人员约100人，顾客为流动人群	
13	杭州半山国家森林公园内的游客		西侧、西北侧、北侧	约12m	流动人群	
14	浙江建设技师学院内的工作人员		西侧、西南侧	约90m	约2人	

第二章 自然环境与社会环境状况

2.1 自然环境状况

2.1.1 地理位置

杭州地处长江三角洲南翼，杭州湾西端，钱塘江下游，京杭大运河南端，市区中心地理坐标为北纬 30°16'、东经 120°12'。

本项目位于杭州市拱墅区，拱墅区中心位置约在北纬 30°19'15.02"，东经 120°08'14.06"，位于杭州市市区中部。东南接江干区、下城区，西北与西湖区、余杭区相邻。

2.1.2 地形、地貌、地质、地震

拱墅区东北枕半山，京杭大运河纵贯自南而北而入，地势东北高西南低。平地平均海拔 45 米，境东北多山岭，主要有半山、老虎山、青龙山、元宝山（黄鹤山）等，黄鹤山海拔 319.2 米，为本区最高点，境西地势平坦，河道港渠纵横交错，京杭大运河、宦塘河、古新河流经境内；余杭塘河、胜利河、康桥新河等与京杭大运河沟通；上塘河由南而北折东出境。占今杭城诸路水系汇入流经本区京杭大运河。

拱墅区古代系海湾，半山为海岛，周围泥沙淤积逐成陆地，古有江涨之名。

杭州市抗震设防烈度为 6 度。

2.1.3 气象气候

杭州市属北亚热带的季风气候，四季分明，气候温和湿润，光照充足，雨量充沛，无霜期长。夏季常受西太平洋副热带高压控制，冬季则受西伯利亚冷气团影响。春末夏初有一雨量集中期，夏秋季常有干旱和台风的出现。平均年降水量 1500 毫米左右，3~6 月为梅雨季，7~9 月份为台风雨季。年平均气温为 16℃左右。无霜期 250 天，最大冻土深度 5 厘米，平均相对湿度为 82%，多年平均风速 1.91 米/秒，常年地面主导风向 SSW（12.33%）。

2.1.4 水文

拱墅区河道港渠纵横交错，京杭大运河、宦塘河、古新河流经境内；余杭塘河、胜利河、康桥新河等与京杭大运河沟通；上塘河由南而北折东出境。占今杭城诸路水系汇入流经本区京杭大运河。

2.2 社会经济状况

2.2.1 地区经济

拱墅区 2019 年预计实现地区生产总值 650 亿元，按可比价计算增长 8%左右，高于目标任务 1.5 个百分点左右；地方一般公共预算收入 91.2 亿元，增长 8.1%；全社会 R&D 经费支出 6.7 亿元，增长 19.4%，高于目标任务 4.4 个百分点；固定资产投资增长 20%以上；社会消费品零售总额增长 8%左右；节能减排、环境保护、社会事业和民生保障等指标均完成良好。

2.2.2 区划人口

杭州现辖十个城区和三个县(市)，全市面积 16596 平方公里，其中市区面积 3068 平方公里，市区建成区面积 327.45 平方公里；全市户籍人口 666 万，其中市区人口 414 万。

拱墅区总面积约 69.21 平方公里。以境内有拱宸桥、湖墅而得名。现辖半山、康桥、祥符、上塘、米市巷、湖墅、小河、拱宸桥、和睦、大关等 10 个街道，有 97 个社区。2019 年末，全区户籍人口 396799 人，其中男性 195884 人，女性 200915 人。据公安部门统计，全年出生 4635 人，死亡 1688 人，全区人口出生率为 11.68‰，死亡率为 4.25‰，人口自然增长率为 7.43‰。民族以汉族为主，有少数回、满、蒙古、畚、壮、布依、朝鲜、侗、瑶、土家族等。

2.2.3 教育事业

2019 年末，全区共有各级各类学校 123 所，其中高中 3 所，在校学生 1982 人；职高 1 所，在校学生 782 名；初中 17 所，在校学生 14048 名；小学 32 所，在校学生 37169 名；幼儿园 70 所，在园幼儿数 21530 名；特殊教育学校 1 所，其中在校学生 89 人。

2.2.4 卫生事业

全区拥有医疗卫生机构363家，卫计系统所属医疗卫生单位51家，其中：公共卫生单位3家，社区卫生服务中心9家、社区卫生服务站39家；社会办医院22家及门诊部、诊所、卫生站278家，全区医疗机构拥有床位 8321张，每千人拥有床位14.4张，全区拥有卫生工作人员 11283 人，其中卫生技术人员9261人，每千人拥有卫生技术人员16.1人，其中：执业（助理）医师3500人，注册护（士）师 4314人。

2.3 环境质量和辐射现状

2.3.1 区域环境质量

根据《2019年浙江省生态环境状况公报》，2019年，全省单位GDP能耗比上年下降3.2%；水质达到或优于地表水环境质量Ⅲ类标准的省控断面占91.4%；跨行政区域河流交接断面水质达标率96.6%；县级以上集中式饮用水水源地个数达标率为96.7%；全省近岸海域水体总体呈中度富营养化状态；县级以上城市日空气质量优良天数比例平均为93.1%，PM_{2.5}浓度平均为29微克/立方米，设区城市日空气质量优良天数比例平均为88.6%，PM_{2.5}浓度平均为31微克/立方米；区域环境噪声平均值为54.4分贝，道路交通噪声平均值为67.6分贝；辐射环境质量总体良好，环境电离辐射水平处于本底涨落范围内，环境电磁辐射水平低于国家规定的公众曝露控制限值；全省生态环境状况等级为优。

2.3.2 项目拟建址及周围辐射环境质量现状

受建设单位委托，2020年9月-10月，浙江国辐环保科技有限公司对该项目拟建址及周围环境进行了辐射环境质量现状监测，并出具了检测报告。

2.3.2.1 监测目的

了解项目拟建址及周围环境的辐射环境质量现状，为该场所的辐射环境质量现状评价提供基础数据。

2.3.2.2 监测内容

(1) 监测对象和项目

根据国家的规范要求，结合本项目的特点和主要污染因子，监测的对象和项目主要有：

γ辐射：X-γ辐射剂量率；

中子：中子剂量当量率

空气：γ核素分析、总α放射性、总β放射性、空气中¹³¹I、空气中³H

地表水：γ核素分析、³H、总α放射性、总β放射性

土壤：γ核素分析、总α放射性、总β放射性。

(2) 监测点位

γ辐射：根据《辐射环境监测技术规范》（HJ/T 61-2001）有关布点原则进行布点，共计布点12个，重点调查本项目拟建址及评价范围内X-γ辐射剂量率；根据《环境地表γ辐射剂量率测定规范》（GB/T 14583-1993），各测点离地面高

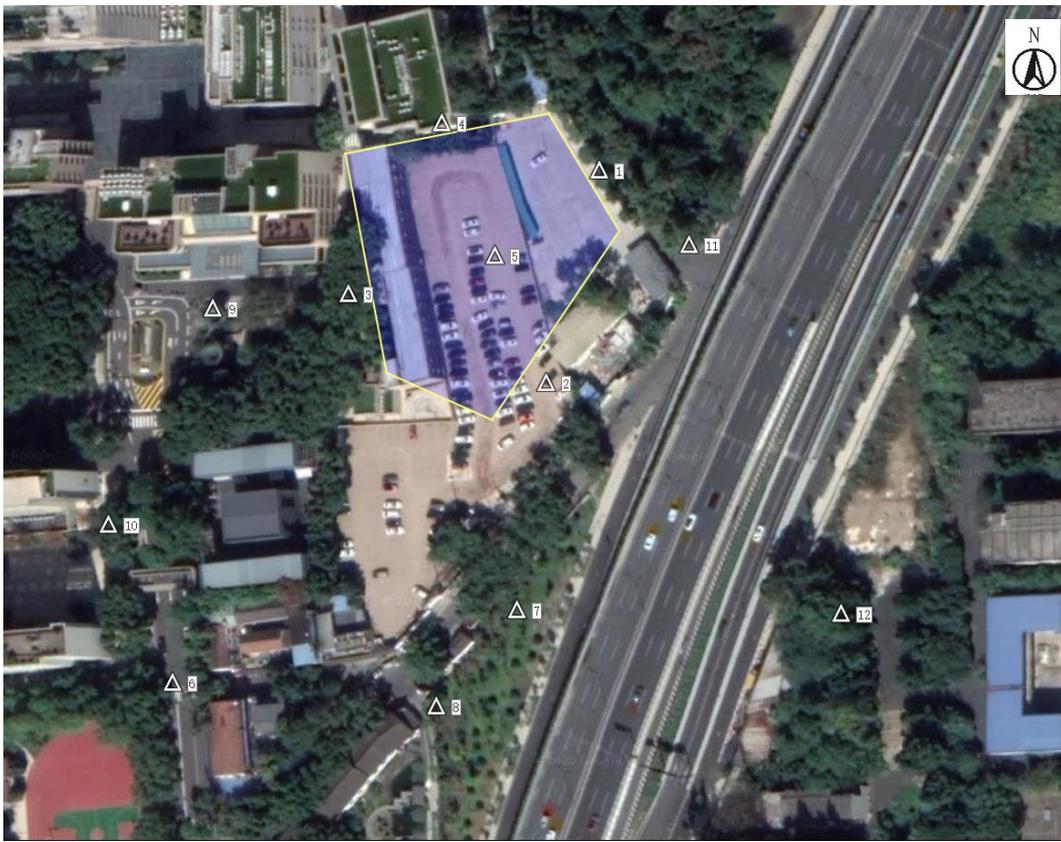
度 1m。现场监测点位见图 2.3-1；

中子：根据《辐射环境监测技术规范》（HJ/T 61-2001）有关布点原则进行布点，共计布点 12 个，重点调查本项目拟建址及评价范围内中子剂量当量率。现场监测点位见图 2.3-1；

空气：项目拟建址（现状中医楼楼顶）；

地表水：项目所在地的地表水主要集中在项目周围的河流和水库，水样监测点位选取为距医院最近的上塘河；

土壤：项目拟建址。



注：△表示现场检测点位。

图 2.3-1 现场监测点位示意图

2.3.2.3 监测仪器、监测和分析测量方法

本次调查所采用的监测、采样与分析测量方法，均按照国家有关的规定执行，本次调查所使用的主要仪器设备情况、所依据的技术文件见检测报告。

2.3.2.4 质量保证措施

- (1) 委托的检测机构已通过计量认证，具备有相应的检测资质和检测能力；
- (2) 委托的检测机构制定有质量体系文件，所有活动均按照质量体系文件要求进行，实施全过程质量控制；

(3) 委托的检测机构所采用的监测设备等均通过计量部门检定合格，并在检定有效期内；

(4) 所有监测人员均通过专业的技术培训和考核；

(5) 检测报告实行三级审核。

2.3.2.5 监测结果与评价

(1) γ 辐射

本项目拟建址及周围环境 X- γ 辐射剂量率监测结果见表 2.3-1。

表 2.3-1 本项目拟建址及周围环境 X- γ 辐射剂量率监测结果

序号	检测点位	测量结果* (nSv/h)	
		平均值	标准差
$\Delta 1$	拟建址东侧	128	6
$\Delta 2$	拟建址南侧	132	3
$\Delta 3$	拟建址西侧 (中医馆)	129	10
$\Delta 4$	拟建址北侧 (放射治疗楼南侧)	128	3
$\Delta 5$	拟建址中央 (停车场)	125	2
$\Delta 6$	杭州市半山实验小学东北侧	120	6
$\Delta 7$	广济路 189-18 号门口	127	4
$\Delta 8$	广济路 189-9 号门口	129	4
$\Delta 9$	门诊大楼南侧	139	5
$\Delta 10$	科研行政楼东侧	130	2
$\Delta 11$	东侧路边	126	5
$\Delta 12$	浙江建设职业技术学院中专部西侧	112	3

注：*未扣除宇宙射线响应值。

根据监测结果可知，本项目拟建址及周围环境 X- γ 辐射剂量率在(112~139) nSv/h 范围内，处于浙江省环境天然贯穿辐射水平范围内。(根据《浙江省环境天然放射性水平调查报告》，杭州市道路上 γ 辐射剂量率的范围为(28~220)nGy/h)

(2) 中子

本项目拟建址及周围环境中子剂量当量率监测结果见表 2.3-2。

表 2.3-2 本项目拟建址及周围环境中子剂量当量率监测结果

序号	检测点位	测量结果 (nSv/h)
△1	拟建址东侧	未检出
△2	拟建址南侧 (放射治疗楼南侧)	未检出
△3	拟建址西侧 (中医馆)	未检出
△4	拟建址北侧	未检出
△5	拟建址中央 (停车场)	未检出
△6	杭州市半山实验小学东北侧	未检出
△7	广济路 189-18 号门口	未检出
△8	广济路 189-9 号门口	未检出
△9	门诊大楼南侧	未检出
△10	科研行政楼东侧	未检出
△11	东侧路边	未检出
△12	浙江建设职业技术学院中专部西侧	未检出

根据监测结果可知, 本项目拟建址及周围环境中子剂量当量率均为未检出。

(3) 空气

本项目气溶胶中放射性分析结果见表 2.3-3, ^{131}I 分析结果见表 2.3-4, ^3H 分析结果见表 2.3-5。

表 2.3-3 本项目气溶胶中放射性分析结果

样品名称	总 α ($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	总 β ($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	核素含量($\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)									
			^7Be	^{40}K	^{95}Zr	^{54}Mn	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs	^{60}Co	^{58}Co	^{144}Ce
气溶胶	0.02	0.54	9.02×10^3	<71.3	<5.47	<2.70	<4.33	<3.26	<3.38	<2.65	<2.96	<18.1

表 2.3-4 空气中 ^{131}I 分析结果

样品名称	核素含量($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	测量日期
气碘	<0.22	2020.10.20

表 2.3-5 空气中 ^3H 分析结果

样品名称	核素含量($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	测量日期
气氚	<12.0	2020.10.16

根据分析结果可知, 本项目拟建址气溶胶中总 α 放射性比活度为 $0.02\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, 总 β 放射性比活度为 $0.54\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, 均处于本底水平, 气溶胶中 ^7Be 、 ^{40}K 等核素

含量以及气碘中 ^{131}I 、气氚中 ^3H 核素含量均未见异常。

2.3.3.4 地表水

本项目地表水中放射性分析结果见表 2.3-6。

表 2.3-6 地表水中放射性分析结果

样品名称	总 α (Bq/L)	总 β (Bq/L)	^3H (Bq/L)	核素含量(mBq/L)										
				^7Be	^{40}K	^{95}Zr	^{65}Zn	^{54}Mn	^{134}Cs	^{137}Cs	^{60}Co	^{58}Co	^{144}Ce	$^{110\text{m}}\text{Ag}$
地表水	<0.03	0.03	<1.0	<9.34	94.0	<1.73	<2.76	<1.05	<1.15	<1.23	<1.32	<1.13	<5.78	<1.05

根据分析结果可知，本项目地表水中总 α 放射性比活度为 <0.03Bq/L，总 β 放射性比活度为 0.03Bq/L，均处于本底水平，地表水中 ^7Be 、 ^{40}K 等核素含量均未见异常。

2.3.3.4 土壤

本项目土壤中放射性分析结果见表 2.3-7。

表 2.3-7 土壤中放射性分析结果

样品名称	总 α (Bq/kg)	总 β (Bq/kg)	核素含量(Bq/kg)									
			^7Be	^{40}K	^{95}Zr	^{65}Zn	^{134}Cs	^{137}Cs	^{60}Co	^{58}Co	^{144}Ce	$^{110\text{m}}\text{Ag}$
土壤	384	780	<1.62	448	<0.34	<0.48	<0.19	<0.22	<0.22	<0.20	<1.07	<0.27

根据分析结果可知，本项目拟建址土壤中总 α 放射性比活度为 384Bq/kg，总 β 放射性比活度为 780Bq/kg，均处于本底水平，土壤中 ^7Be 、 ^{40}K 等核素含量均未见异常。

2.4 场址适宜性评价

本项目位于浙江省肿瘤医院总院半山院区，项目用地为医疗卫生用地，经过以上的自然环境、社会经济状况的调查结果可知，项目所在场址及周边无影响项目安全稳定运行的制约性因素，本项目选址合理；根据本项目的辐射环境现状监测结果可知，本项目拟建址及周围辐射环境现状水平未见异常，均在环境本底水平范围内，本项目场址适宜性良好。

第三章 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

浙江省肿瘤医院拟购置一套重离子治疗系统，该系统将提供能量为 120MeV/u-400MeV/u 的碳离子束，用于肿瘤的放射治疗。

3.1.1 重离子治疗系统简介

产品名称：重离子治疗系统（Heavy Ion Medical Machine, HIMM）

生产厂商：兰州科近泰基新技术有限责任公司

型号规格：CY-SY-4400（回旋注入器+同步加速器+四个治疗室（能量 120MeV/u-400MeV/u））

基本功能：HIMM 提供高能碳离子束用于恶性实体肿瘤的放射治疗（放疗），利用均匀扫描的束流配送模式可实现二维（2D）适形放疗，利用调制扫描的束流配送模式可实现三维适形放疗（3DSS）。

HIMM 是中国科学院近代物理研究所和兰州科近泰基新技术有限责任公司共同研制生产、拥有我国自主知识产权的大型放疗设备，打破了国外同类大型医疗器械产品的专利壁垒，现已获得 60 多项专利授权，其中两项核心发明专利分获第十三、十六届“中国专利优秀奖”。该产品先后获得科学技术部、环境保护部、商务部、国家质量监督检验检疫总局四部委“重点新产品”认定、2013 年度“中国产学研合作创新成果奖”和第十七届中国国际高新技术成果交易会“优秀产品奖”。

HIMM 由加速器系统和治疗系统组成，加速器系统为治疗系统提供能量为 120MeV/u-400MeV/u 的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 束流，在人体组织内最大射程为 270mm；治疗系统通过治疗控制软件控制加速器系统输送治疗所需要的不同能量的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 束流，通过治疗头束流配送系统和束流能量调节系统，形成治疗所需的不同深度及不同靶区形状的均匀照射野，进行适形照射。

加速器系统根据各部分设备在束流的产生过程起到的不同作用，分为不同的二级子系统，包括离子源及低能传输系统、回旋加速器、中能传输系统、同步加速器、高能传输系统等。

治疗系统包括 1 号治疗室（90°治疗头）、2 号治疗室（0°+90°治疗头）、3 号治疗室（45°+90°治疗头）、4 号治疗室（90°治疗头）（后期升级为重离子 Gantry 治疗终端）、物理计划室及共用部分。每个治疗终端根据需求配备治疗头、图像

引导系统、患者支撑系统、呼吸门控、治疗计划系统、激光定位系统、治疗控制系统及治疗室辅助设备。其中调制扫描可实现三维适形放疗（3DSS），均匀扫描可实现二维（2D）适形放疗。1号、3号、4号治疗室配置调制扫描模式，2号治疗室配置均匀扫描模式。HIMM 通过图像引导系统（正交 DR 图像引导或 CT-on-rail 图像引导系统）实现患者定位功能，在患者治疗前做到靶区中心与等中心在一定精度范围内的重合。

HIMM 主要组成示意图如图 3.1-1 所示：

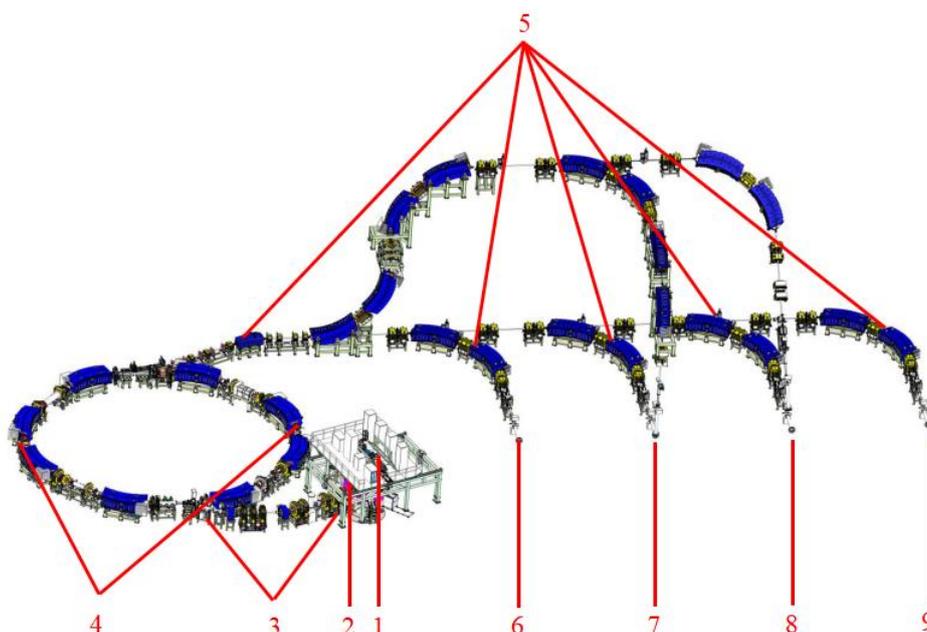


图 3.1-1 HIMM 主要组成示意图

图中：1——离子源及低能传输系统

2——回旋加速器

3——中能传输系统

4——同步加速器

5——高能传输系统

6——1号治疗室，90° 治疗头

7——2号治疗室，0° 和 90° 治疗头

8——3号治疗室，45° 和 90° 治疗头

9——4号治疗室，90° 治疗头（后期升级为重离子 Gantry 治疗终端）

其中 1-5 部分属于加速器系统，6-9 部分属于治疗系统。

HIMM 装置总体布局如图 3.1-2 所示：

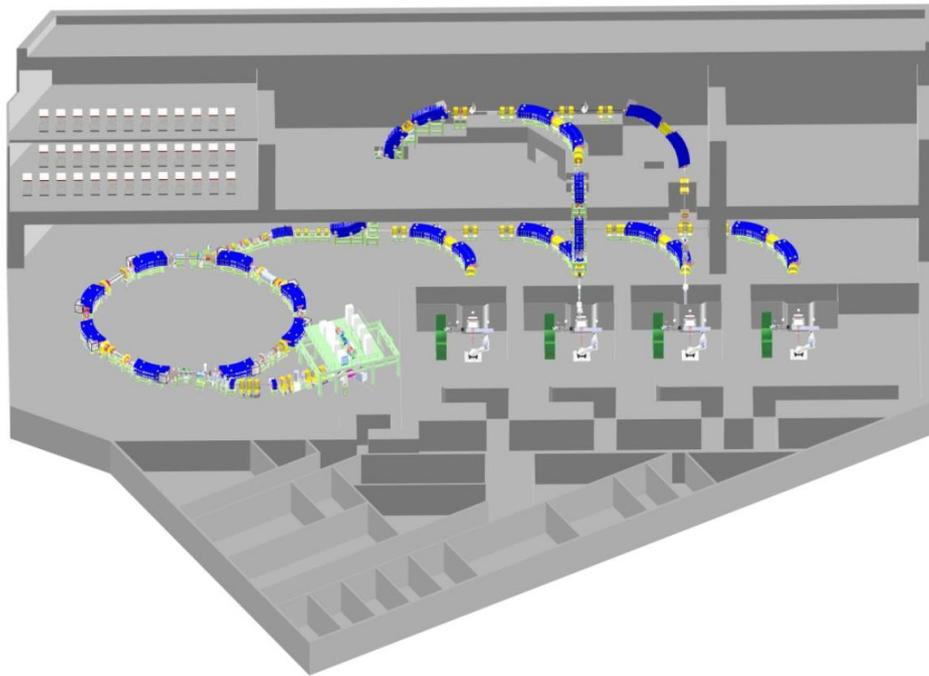


图 3.1-2 HIMM 总体布局图

3.1.2 重离子治疗系统技术指标

HIMM稳定运行时，终端粒子数可达 4.155×10^9 ppp。HIMM基本参数如表 3.1-1所示。

表 3.1-1 HIMM 基本参数

参数	指标
治疗室个数	4
粒子种类	碳离子 $^{12}\text{C}^{6+}$
加速方式	回旋注入器+同步加速器
治疗头（机架）类型	固定治疗头（机架）
固定治疗头（机架）角度	1号治疗室：90°治疗头 2号治疗室：0°治疗头、90°治疗头 3号治疗室：45°治疗头、90°治疗头 4号治疗室：45°治疗头（后期升级 Gantry 治疗头）
束流配送方式	1号治疗室 90°治疗头：扫描束（调制扫描） 2号治疗室 0°治疗头：扫描束（均匀扫描） 2号治疗室 90°治疗头：扫描束（均匀扫描） 3号治疗室：45°治疗头：扫描束（调制扫描） 3号治疗室：90°治疗头：扫描束（调制扫描） 4号治疗室：45°治疗头：扫描束（调制扫描） Gantry 治疗头：扫描束（调制扫描）
不同治疗室切换时间（s）	≤20
能量切换时间(s)	≤20

束流引出时间 (s)	2
流强范围	$2 \times 10^7 - 4.155 \times 10^9$ ppp
能量范围	120MeV/u~400MeV/u
射程范围	≤270mm
能量调节步长	≈2MeV/u (对应的布拉格峰位 2mm)
能量调节方式	a) 均匀扫描模式下的调能方式: 不连续射程转换, 射程移位器、脊形过滤器 b) 调制扫描模式下的调能方式: 主动变能, 微型脊形过滤器
照射野	200mm×200mm (调制扫描) 200mm×200mm (均匀扫描)
剂量率	均匀扫描模式标称剂量率: 1GyE/min/L
束斑位置精度	±1mm
虚拟源到设备参考点的距离	虚拟源轴距≥5.4m

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 系统组成

HIMM 主要组成及结构组成见表 3.2-1、3.2-2、3.2-3。

表 3.2-1 HIMM 主要组成

子系统名称	数量
一、加速器系统	
1.1、离子源及低能传输系统	2 套
1.2、回旋加速器	1 套
1.3、中能传输系统	1 套
1.4、同步加速器	1 套
1.5、高能传输系统	1 套
1.6、工艺冷却水系统	1 套
二、治疗系统	
2.1、治疗头	
2.1.1、1 号治疗室 (90°治疗头)	1 套
2.1.2、2 号治疗室 (0°+90°治疗头)	2 套
2.1.3、3 号治疗室 (45°+90°治疗头)	1 套
2.1.4、4 号治疗室 (90°治疗头) (后期升级 Gantry 治疗头)	1 套
2.2、调制方式	
2.2.1、1 号、3 号、4 号治疗室为调制扫描模式; 调制扫描可实现三维	

适形放疗（3DSS）	
2.2.2、2号室为均匀扫描模式，均匀扫描可实现二维（2D）适形放疗	
2.3、正交 DR 图像引导系统	4 套
2.4、CT-on-rail 图像引导系统	2 套
2.5、机械臂治疗床	4 套
2.6、固定式激光灯	4 套
2.7、ciPlan 治疗计划系统	1 套
2.8、RayStation 治疗计划系统	1 套（选配）
2.9、QA 工具	1 批
2.10、治疗室控制系统	1 套
2.11、呼吸门控系统	1 套

表 3.2-2 HIMM 产品结构组成

一级子系统	二级子系统	三级子系统	四级子系统
加速器子系统	注入器系统	离子源系统	束诊单元
			真空单元
			磁铁单元
			电源单元
			离子源单元
			高频单元
			控制单元
		注入器	真空单元
			磁铁单元
			束诊单元
			高频单元
			控制单元
			电源单元
		//	控制单元
		中能传输系统	真空单元
			磁铁单元
			束诊单元
			控制单元
			电源单元

	主加速器系统	同步加速器	真空单元
			磁铁单元
			束诊单元
			控制单元
			电源单元
			高频单元
		高能传输系统	真空单元
			磁铁单元
			束诊单元
			控制单元
	//	//	电源单元
	//	//	束诊单元
	//	//	控制单元
治疗子系统	治疗终端 1	图像引导系统	束流应用单元
		患者支撑系统	束流应用单元
		呼吸门控系统	提供接口
		治疗头	束流应用单元
		激光定位系统	束流应用单元
		治疗控制系统	治疗终端单元
		治疗室辅助设备	治疗终端单元
		//	束流应用单元
		//	束诊单元
		治疗终端 2	图像引导系统
	患者支撑系统		束流应用单元
	呼吸门控系统		呼吸门控
	治疗头 1		束流应用单元
	治疗头 2		束流应用单元
	激光定位系统		束流应用单元
	治疗控制系统		治疗终端单元
	治疗室辅助设备		治疗终端单元
	//		束流应用单元
	//		束诊单元

	治疗终端 3	图像引导系统	束流应用单元
		患者支撑系统	束流应用单元
		呼吸门控系统	提供接口
		治疗头	束流应用单元
		激光定位系统	束流应用单元
		治疗控制系统	治疗终端单元
		治疗室辅助设备	治疗终端单元
		//	束流应用单元
		//	束诊单元
	治疗终端 4	图像引导系统	束流应用单元
		患者支撑系统	束流应用单元
		呼吸门控系统	//
		治疗头	束流应用单元
		激光定位系统	束流应用单元
		治疗控制系统	治疗终端单元
		治疗室辅助设备	治疗终端单元
		//	束流应用单元
		//	束诊单元
	//	//	治疗终端单元
	//	//	治疗终端辅助设备单元
//	//	束流应用单元	
//	//	束诊单元	

表 3.2-3 HIMM 辅助设施组成表

辅助设施	三级子系统	四级子系统
	公共设施系统	
		供气单元
		工艺冷却水系统及统监控单元
辐射防护系统		辐射监测单元
		安全联锁单元

	//	真空泵室
	//	设备支架

3.2.2 重离子治疗系统工作原理

重离子治疗加速器工作原理简述如下：

①碳离子源的产生：通入离子源腔体中 CO_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 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束。

②碳离子源的加速：离子源产生的 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束经低能束运线注入到回旋加速器，在回旋加速器中 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束被加速到 6.2MeV/u 后被引出；通过中能束运线注入到同步加速器，进入同步加速器的 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束首先穿过剥离膜，被剥离成为 $^{12}\text{C}^{6+}$ ，然后被加速到终端所需要的能量（ $120\sim 400\text{MeV/u}$ ）后被引出。

③碳离子用于治疗：被引出的高能 $^{12}\text{C}^{6+}$ 通过高能束线传输到治疗终端，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。

3.2.3 重离子治疗系统主要组成部分相关技术参数、工艺原理

3.2.3.1 HIMM 加速器系统

HIMM 加速器系统主要由离子源及低能传输系统、回旋加速器、中能传输系统、同步加速器、高能传输系统组成。

(1) 离子源及低能传输系统

离子源及低能传输系统使用的离子源为 ECR (Electron Cyclotron Resonance) 离子源。等离子体弧腔内的中性气体原子和这些获得微波能量的自由电子碰撞，原子核外的电子获得能量，当高于其电离能时就可能被电离。这些电离的电子又可能被微波共振加热获得能量而继续碰撞别的原子或离子，原子就被逐步电离至较高电荷态，形成高密度 ECR 等离子体。如果在弧腔上加上几十千伏的正高压，等离子体当中的离子会通过电极被引出而形成很强的离子束。

离子源系统引出的离子束为含有多种质荷比的混合态离子束，利用不同能量质荷比离子束在分析系统末端横向相点位置不同的原理，筛选出回旋加速器需要的 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束，后经横向发射度匹配系统及纵向发射度匹配系统匹配注入回旋加速器。因回旋加速器的后级同步加速器装置只有在注入期间需要来自其前级系统的 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束，为了避免中高能 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束在同步加速器入口大量损失造成

设备损伤，在低能传输系统中增加了斩波器，在同步加速器需要束流时使离子束正常注入下级系统，在同步加速器不需要束流时将离子束偏至低能束运系统的法拉第筒。此外，HIMM回旋加速器系统要求离子源系统为其提供 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束，而 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子是剥离能为 390eV 的中高电荷态离子，离子源采用高磁场、高频率以及较高功率馈入的模式，可有效产生强流 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束。设计的离子源注入磁镜比值 $R>3$ ，引出磁镜比 $R\approx 2$ ，微波频率为 13.75GHz~14.5GHz，馈入功率最大不超过 700W。技术上离子源设计结构简单、紧凑，除采用全永磁结构外，在离子源注入端辅以铁轭来增强轴向磁场注入峰值，整个永磁体离子源体积进一步减小，设备更加紧凑。

低能传输系统采用简单、紧凑及实用的设计理念，其全长不超过 3.5 米，按功能其主要由离子源引出离子束的分析与传输、回旋加速器横向的匹配注入、回旋加速器纵向的匹配注入以及与同步加速器注入同步的斩波器的劈束等四部分组成。

离子源及低能传输系统物理参数如表 3.2-4 所示，结构示意图如图 3.2-1 所示。

表 3.2-4 离子源低能传输系统物理参数

参数	设计指标
离子源类型	ECR
离子种类	$^{12}\text{C}^{5+}$
束流能量	9.29keV/u
束流强度	50-100 μA
工作频率	14.5GHz
束流发射度 (4RMS)	75 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
引出电压	22.32kV
束流占空比	100%
微波功率	<500W

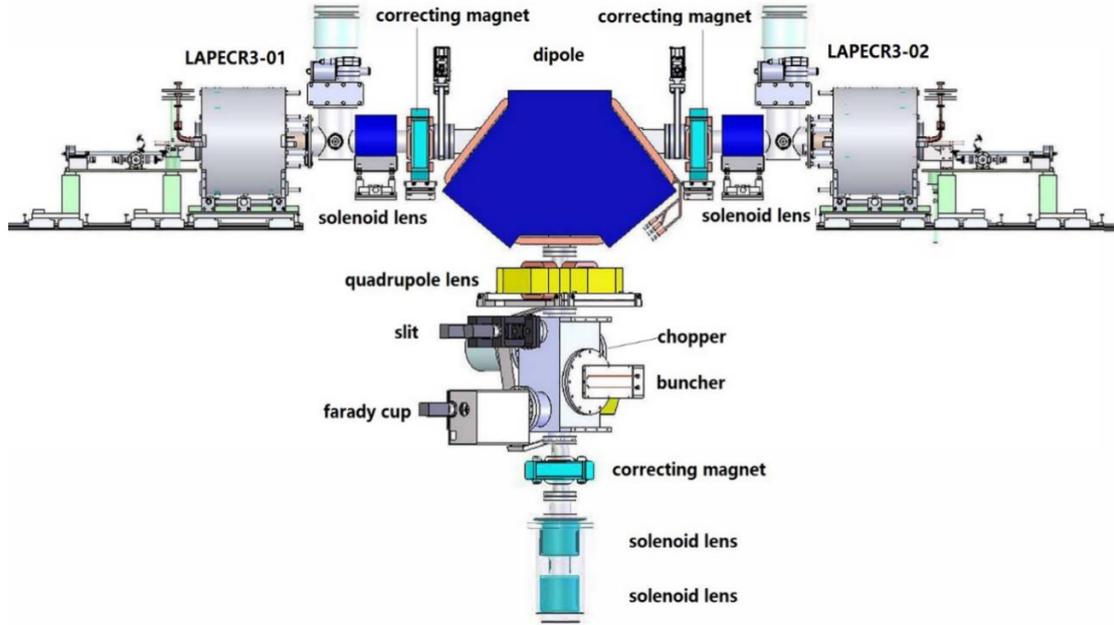


图 3.2-1 离子源及低能传输系统结构示意图

(2) 回旋加速器

回旋加速器作为 HIMM 主加速器——同步加速器的注入器，旨在对束流进行初加速，把从离子源产生并经低能束线输送到回旋加速器中平面的约 9.29keV/u 的低能离子束加速到 6.2MeV/u 的水平。

回旋加速器在加速器总体结构上是直边扇等时性回旋加速器，该加速器仅加速 $^{12}\text{C}^{5+}$ 这一种粒子，其等时性磁场一旦给定就不需要改变，等时性磁场由扇块边缘的形状保证，不需要设计专门的垫补线圈。利用带电粒子在均匀磁场中做圆周运动的原理，把离子源引出的束流 $^{12}\text{C}^{5+}$ 注入到等时场中，通过 D 型盒间的高频高压加速带电粒子，该加速器利用高频电场可将 $^{12}\text{C}^{5+}$ 加速到 6.235MeV/u 以上。通过引出系统将离子束引出到中能传输系统，引出流强大于 5 μA 。回旋加速器物理参数如表 3.2-5 所示，结构示意图如图 3.2-2 所示。

表 3.2-5 回旋加速器物理参数

加速离子种类	$^{12}\text{C}^{5+}$
能量	6.2MeV/u
引出流强	$\geq 5.0\mu\text{A}$
能散	$\leq \pm 1\%$
发射度	$\leq 25\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
引出半径	75 cm
注入半径	2.7 cm

回旋频率	7.755 MHz
加速谐波数	4
注入能量	111.6 keV ($^{12}\text{C}^{5+}$)
中心磁场	1.212 T

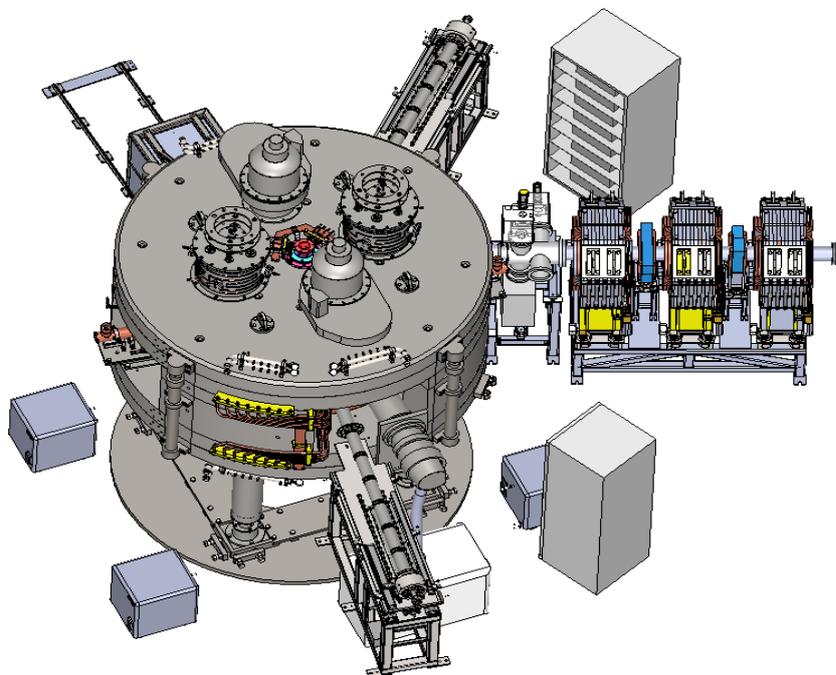


图 3.2-2 回旋加速器结构示意图

(3) 中能传输系统

中能传输系统是利用磁极性交替排列的四极磁铁在水平与垂直方向把束流限定在真空管道内,用分布于四极磁铁之间的二极磁铁把束流导向同步加速器的注入口的束流配送装置。中能传输系统物理参数如表 3.2-6 所示,结构示意图如图 3.2-3 所示。

表 3.2-6 中能传输系统束流参数

离子种类	$^{12}\text{C}^{5+}$
磁刚度	0.90 T·m (对应能量: 6.8MeV/u)
流强	$\geq 5.0\mu\text{A}$
动量分散($\geq 90\%$)	$\leq \pm 5\%$
发射度 ($\pi \text{ mm.mrad}$)	25/25
传输效率	$\geq 95\%$

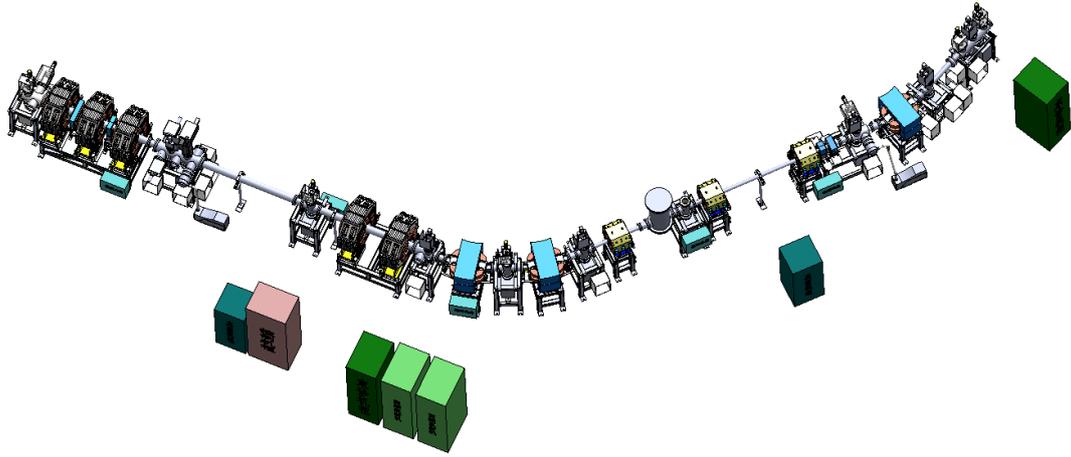


图 3.2-3 中能传输系统结构示意图

(4) 同步加速器

同步加速器是利用高频电场加速带电粒子的环形加速器装置，也是 HIMM 碳离子束的主加速装置，主要用来将从回旋加速器引出并通过中能传输系统传输到同步环的 6.2MeV/u 的碳离子束加速到终端所需的能量并引出至高能传输线。同步加速器包括注入、加速、引出过程。同步加速器经过剥离注入先将碳离子 $^{12}\text{C}^{5+}$ 剥离一个电子变成全裸碳离子 $^{12}\text{C}^{6+}$ ，然后加速碳离子 $^{12}\text{C}^{6+}$ 束到治疗所需能量 120MeV/u - 400MeV/u ，再引出到高能传输系统。

HIMM 同步加速器采用剥离注入方法，即利用凸轨将同步加速器的循环轨道凸起，使注入束流 ($^{12}\text{C}^{5+}$) 轰击碳膜，束流被剥离掉外层电子，得到 $^{12}\text{C}^{6+}$ 粒子。 $^{12}\text{C}^{6+}$ 粒子沿凸轨进入同步加速器循环轨道。随着凸轨高度的降低，束流逐渐填满同步加速器的水平接受度，从而完成束流的注入。同步加速器利用高频电场加速带电粒子，令纵向高频相位为 0，电压逐渐上升，从而将连续束俘获成束团，然后高频频率逐渐增加，同步粒子获得纵向电场作用后，能量得到提升，实现加速。加速过程中，要保证高频频率、同步加速器的磁场上升速度一致。

引出系统采用 RFKO 方式，即将同步加速器的工作点设置在 1.66 附近，然后增加六极磁铁的强度使束流横向相空间发生畸变，再利用横向激励作用于束流，使其发射度增大从而引出。

同步加速器主要参数如表 3.2-7 所示，结构示意图如图 3.2-4 所示，同步加速器运行周期示意图如图 3.2-5 所示。

表 3.2-7 同步加速器主要参数

主参数	
磁刚度 (T.m)	0.76-6.34
加速时间 (s)	≤ 2
运行周期 (s)	≤ 8
束流参数	
离子种类	C
最高能量 (MeV/u)	400 ($^{12}\text{C}^{6+}$)
环内注入离子数 (ppp)	$5 \times 10^8 - 2.0 \times 10^9$
终端粒子数 (p/spill)	$2 \times 10^7 - 6 \times 10^8$
终端动量分散 ($\delta P/P$)	$\pm 1.5 \times 10^{-3}$
终端发射度 ($\pi\text{mm.mrad}$)	5-13
注入束参数	
能量 (MeV/u)	6.2
流强 ($e\mu\text{A}$)	≥ 5 ($^{12}\text{C}^{5+}$)
动量分散 ($\delta P/P$)	$\leq \pm 5 \times 10^{-3}$
发射度 ($\pi\text{mm.mrad}$)	≤ 25 (5σ)
磁聚焦结构	
工作点	$Q_x/Q_y = 1.68/1.23$
有效孔径 (mm^2)	140×60 (B 铁), 150×80 (Q 铁)
接受度	
A_h ($\pi\text{mm.mrad}$)	200 ($\Delta P/P = \pm 0.5\%$)
A_v ($\pi\text{mm.mrad}$)	50
$\Delta P/P$ (%)	+1 ~ -1 ($\epsilon_h = 20 \pi\text{mm.mrad}$)
重要分系统	
磁铁	
B 铁场强 (T)	0.18~1.66 ($\rho=4\text{m}$)
Q 铁场强 (T/m)	0.5~7.5
气隙 (mm)	B 铁气隙 74, Q 铁 Bore 直径 140
高频	
频率范围 (MHz)	0.9~7.8
最高电压 (kV)	≥ 3
真空	
真空度 (mbar)	$\leq 5.0 \times 10^{-9}$

磁铁真空壁 (mm)	1 (B 铁真空壁加筋), 3 (Q 铁真空壁不加筋)
电源	
平台纹波	小于 $\pm 1 \times 10^{-5}$ (120~400MeV/u)
跟踪精度	小于 $\pm 1 \times 10^{-4}$ (环)

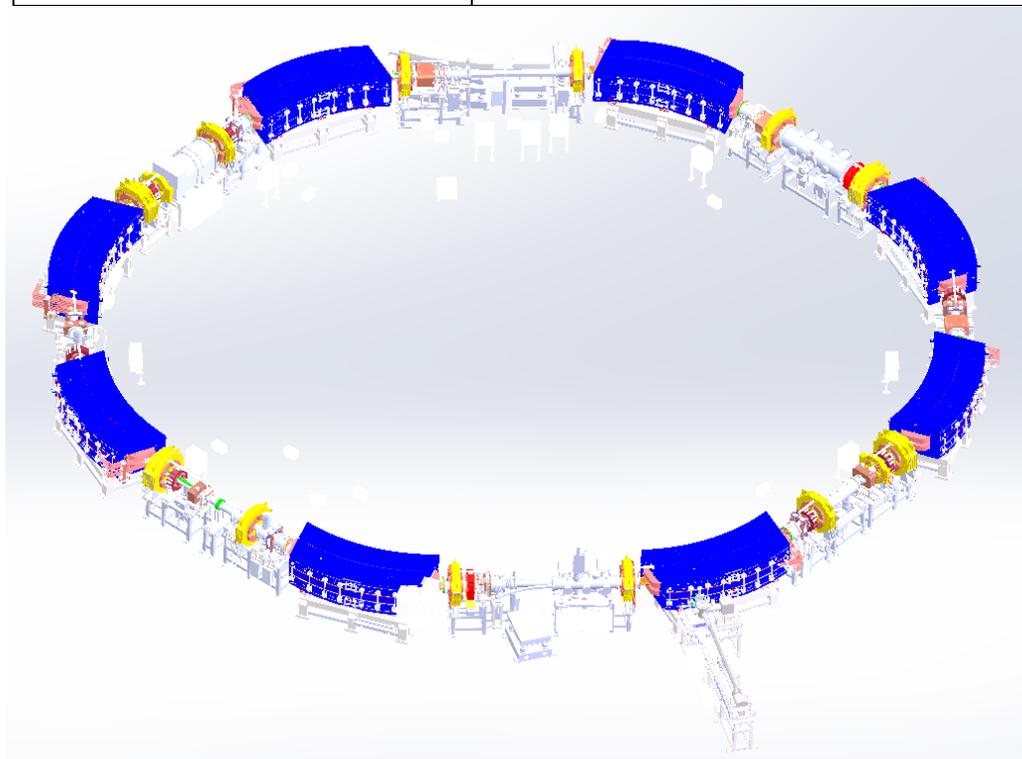


图 3.2-4 同步加速器结构示意图

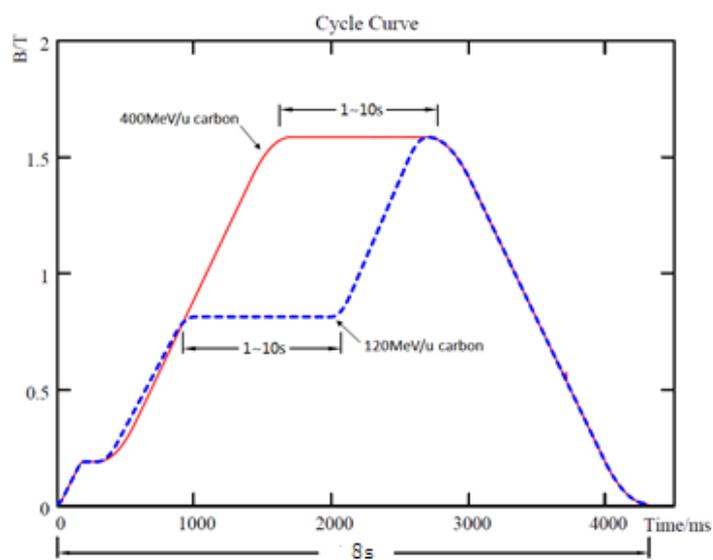


图 3.2-5 同步加速器运行周期示意图

(5) 高能传输系统

高能传输系统是利用磁极性交替排列的四极磁铁在水平与垂直方向把束流

限定在真空管道内,用分布于四极磁铁之间的二极磁铁把束流导向各治疗室的束流配送装置。高能传输系统物理参数如表 3.2-8 所示,结构示意图如图 3.2-6 所示。

表 3.2-8 高能传输系统束流参数

项目	指标
离子种类	$^{12}\text{C}^{6+}$
最高磁刚度 (T·m)	6.343 (对应能量: 400MeV/u)
流强 (ppp)	$\leq 6.0 \times 10^8$
动量分散 ($\geq 90\%$)	$\leq \pm 1.5 \times 10^{-3}$
发射度 ($\pi \text{ mm.mrad}$)	≤ 7.0
传输效率	$\geq 90\%$

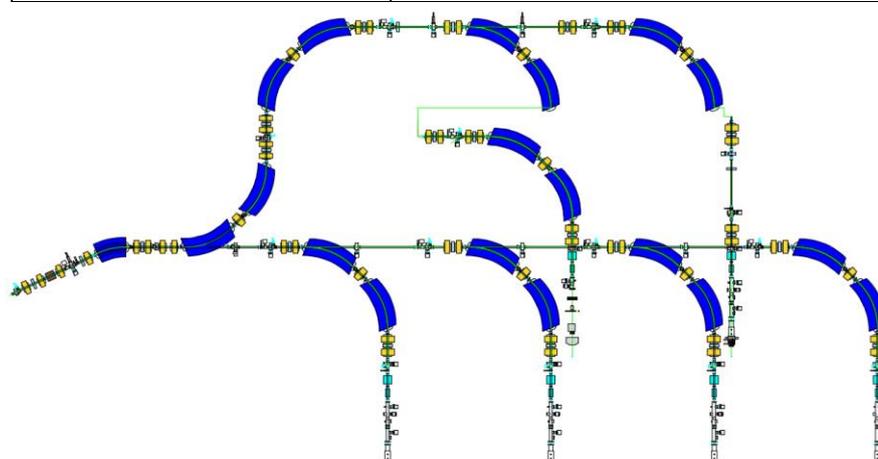


图 3.2-6 高能传输系统结构示意图

3.2.3.2 HIMM 治疗系统

HIMM 治疗系统主要选配被动式束流配送 (均匀扫描) 和主动式束流配送 (调制扫描) 两种治疗模式。

被动式束流配送系统 (均匀扫描) 是对加速器引出的笔形束通过摇摆磁铁使用预定的模式进行连续横向扫描, 从而获得均匀的照射野。经横向展宽的离子束通过脊形过滤器将单能的尖锐 Bragg 峰在纵向进行展宽获得与肿瘤纵向大小一致的展宽 Bragg 峰 (SOBP)。横向上利用多叶光栅将束流截取与 BEV 方向肿瘤的投影外轮廓一致的照射野。为了不伤害肿瘤靶区后方的正常组织, 使离子束停止在靶区后沿, 还需要在体表增加补偿器。均匀扫描示意图如图 3.2-7 所示。

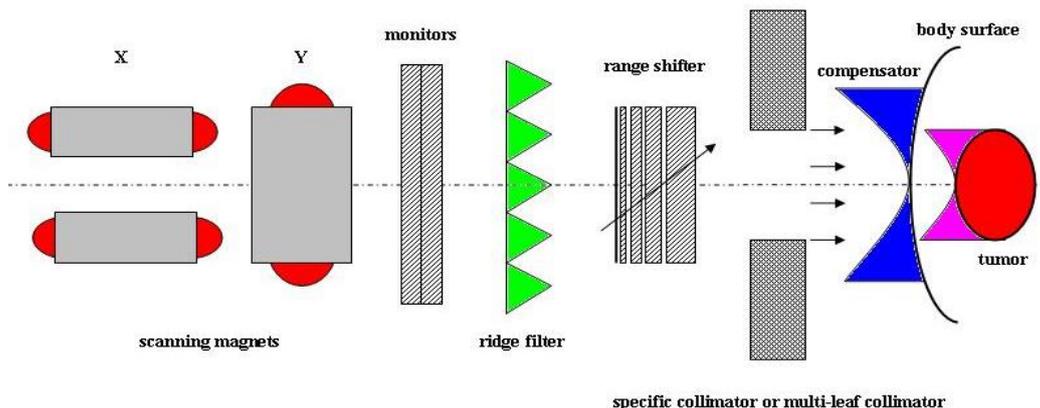


图 3.2-7 均匀扫描示意图

主动式束流配送系统（调制扫描）其特点体现在利用笔形束实现对肿瘤靶区的分层逐点照射，横向上束斑的位置可以由扫描磁铁来控制，纵向上可以通过加速器主动变能的方式实现离子束能量的调节，扫描点在横向上和纵向上相互累加达到计划的均匀剂量分布。该束流配送模式不但提高了靶区的适形度，而且不需要专门为患者制作个体化的补偿器和准直器。调制扫描示意图如图 3.2-8 所示。

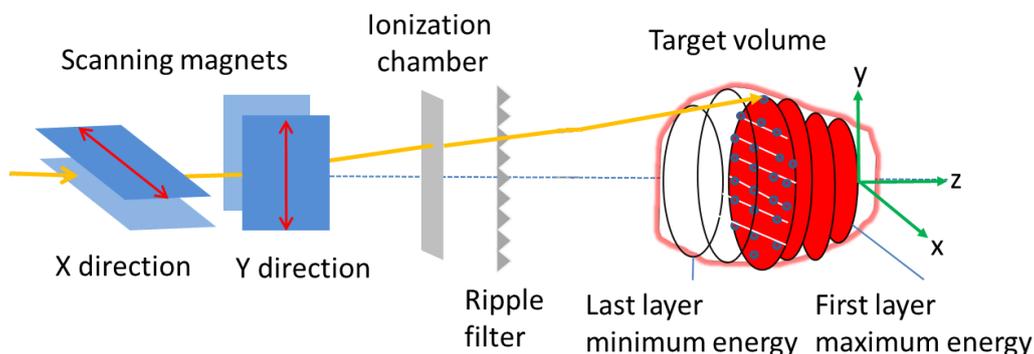


图 3.2-8 调制扫描示意图

3.2.4 重离子治疗系统治疗流程及产污环节

本项目 HIMM 调试完成后，装置即处于正常可用状态，开启离子源，即可提供束流，关闭离子源，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），治疗结束后可切换束流至下个治疗室。一个治疗室内开展放射治疗时，其相邻治疗室一般无人停留，医生在间隔的治疗室内进行摆位等准备工作，

装置的调试、运行、束流切换操作全部在控制室。运行期间，加速器大厅、高能线爬升段区、开展治疗的治疗室内无工作人员滞留；装置需维护、检修等操

作时，在停束并进行有效通风后，工作人员才进入相关场所进行操作。

本项目 HIMM 治疗流程叙述如下：

(1) 病人确诊需要进行重离子放射治疗，医生向病人告知可能受到的辐射危害；

(2) 使用模拟定位机对病灶部位进行准确定位，进行体表标记；

(3) 根据定位结果制定病人的治疗方案，确定照射位置和剂量等；

(4) 根据肿瘤具体情况，安排病人进入相应治疗室准备（包括摆位、非照射部位的屏蔽防护等），准备好后，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；

(5) 根据治疗方案，在控制室通过控制系统设置照射参数等，开启 HIMM 离子源，对病人实施放射治疗；

(6) 治疗完毕后关闭离子源，病人离开，完成一次放射治疗。

本项目 HIMM 治疗流程及产污环节如图 3.2-9 所示。

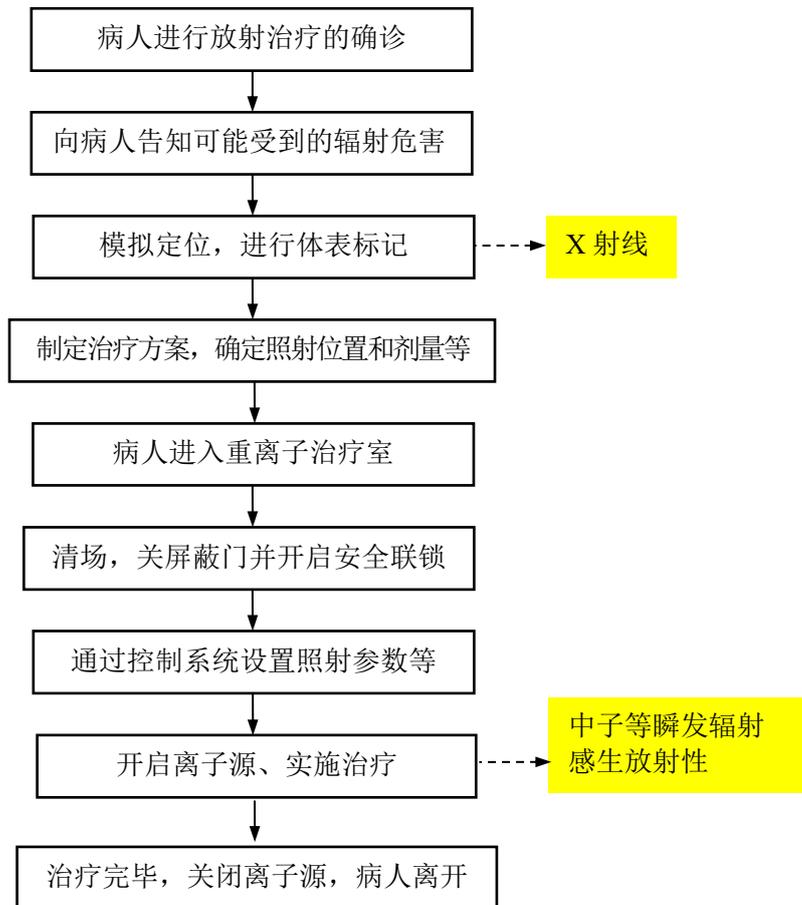


图 3.2-9 重离子治疗加速器的治疗流程及产污环节示意图

3.2.5 项目定员及年工作时间

医院现有辐射工作人员约 340 人，主要分布在放疗科、介入放射科、放射物理科、核医学科的各个岗位上，包括放射治疗医生、物理师、技术员、工程师，介入放射科医生、技师，核医学科医生、技师等放射工作岗位。本项目所需辐射工作人员主要从现有人员中调配，同时将根据需要新增部分辐射工作人员，辐射工作人员配备数量不少于 13 人。

根据医院的治疗计划，本项目保守估计每天最多照射病人 40 人次，每次照射平均时间约 5min，每年工作 250 天，每年照射病人 10000 人次，HIMM 年出束照射时间为 833.4h；此外，HIMM 在非治疗期间会进行调试等工作，综合考虑，保守取 HIMM 年出束照射时间为 1000h。

3.2.6 人流物流路径规划

3.2.6.1 人流路径

医护人员：HIMM 的调试、运行、束流切换操作全部在控制室内进行。运行期间，加速器大厅、高能线爬升段区、正在开展放射治疗的治疗室内无工作人员滞留；正常运行工况下，人员不需要也不进入加速器大厅、高能线爬升段区，只有在维修维护时才从加速器大厅或高能线爬升段区入口进入进行相应操作，操作后从原路退出；医护人员从治疗室入口进入进行摆位等操作，操作后从原路退出。

病人：病人从治疗室入口进入室内接受放疗，放疗结束后从原路离开。

3.2.6.1 物流路径

感生放射性废气：经通风系统排入外环境。

感生放射性废水：正常工况下，工艺水系统管路内冷却水循环使用不外排，不产生感生放射性废水；事故工况下，管路内泄漏的感生放射性废水经室内排水地沟、地漏汇集到衰变池，经两级衰变满足要求后排放至医院污水处理系统。

感生放射性固废：分类收集后暂存在加速器大厅的放射性固废储存间内，达到一定规模后，对放射性固废进行监测，经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中解控标准的放射性固废从加速器大厅出入口送出，作为一般医疗废物处理，对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。

3.3 污染源项

3.3.1 施工期污染源

本项目为新建项目，加速器大厅等建设施工时会产生废气、扬尘、噪声、固

体废物以及废水等污染物。施工期对环境产生的影响均为暂时的、可逆的，且随着施工期结束，固废及废水在施工期间内妥善处置，施工期产生的扬尘、噪声等方面的影响将随着施工结束会自行消除。

3.3.2 运行期正常工况污染源

HIMM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运行状态下，除患者外无人员在加速器大厅、相应治疗室等辐射工作场所内停留，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的辐射影响（空气浸没外照射途径）。

重离子加速器在停机状态下，工作人员因检查、检修而进入加速器大厅或治疗室等辐射工作场所时，有可能受到感生放射性辐射危害。通过通风和延长冷却（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，HIMM 治疗室、加速器大厅等场所的空气在电离辐射作用下可能会产生少量臭氧、氮氧化物等污染空气的有害气体。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 HIMM，臭氧及氮氧化物的问题可以不用考虑。

3.3.2.1 瞬时辐射

3.3.2.1.1 束流损失分布

由 HIMM 离子源提供的 C^{5+} 离子束由低能线注入回旋，受回旋加速器主磁场作用，在回旋加速器腔体内做圆周运动，通过加速电场加速到能量 6.235MeV/u，由引出设备引出到中能传输系统。因此回旋加速器引出的 $^{12}C^{5+}$ 束流经中能传输系统配送到同步加速器注入口，流强经过剥离膜后剥离为 $^{12}C^{6+}$ 注入到同步加速器，在同步加速器内将束流累积到高流强，然后将束流能量从 6.235MeV/u 加速到终端所需要的能量（120MeV/u-400MeV/u），并利用三阶共振方式进行引出，由高能传输系统配送到终端。

束流在产生、输运、注入、加速、引出及治疗过程中，会不可避免地出现束

流损失，从而产生次级辐射。HIMM 装置的束流损失参数如表 3.3-1 所示。

表 3.3-1 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	2.500E+10	95%	1.250E+09	4 MeV/u	均匀损失
同步环环口	2.375E+10	40%	1.425E+10	54MeV/u	集中损失
同步环注入后	9.500E+09				
同步环全环俘获	5.700E+09	60%	3.800E+09	4MeV/u	均匀损失
同步环全环加速	5.130E+09	90%	5.700E+08	120-400MeV/u	均匀损失
慢引出	4.617E+09	90%	5.700E+08	120-400MeV/u	集中损失
高能线	4.155E+09	90%	4.617E+08	120-400MeV/u	均匀损失
终端	4.155E+09			120-400MeV/u	集中损失

注：① ppp: 每个脉冲的离子数；

② 脉冲周期 (pulse): 20s/30s

3.3.2.1.2 重离子打厚靶的次级中子产额、能谱和角分布

虽然离子加速器的辐射场是非常复杂的，但对重离子加速器来说，次级中子起着决定性的作用，其它瞬发辐射如 γ 射线等对屏蔽体外剂量当量的贡献与中子相比可以忽略不计，因此，中子辐射场分布是 HIMM 建筑结构 设计的主要源项

高能重离子核反应出射的次级中子，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。

根据中科院近代物理研究所编制的《杭州重离子治疗装置（HIMM）辐射防护设计报告》，对本项目 HIMM 次级中子辐射场源项估算如下：

一、实验方法确定中子辐射场

1998 年，日本的 Kurosawa 等人做了一项实验，他们用 100 和 180MeV/u 的 ⁴He，100、180 和 400MeV/u 的 ¹²C 轰击不同的厚靶(靶的厚度大于该粒子在靶中的射程)，用飞行时间法来测量中子产额、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；
- (2) 100 和 400MeV/u ¹²C+Cu 反应的次级中子具有相似的谱形。

图 3.3-1 为 Kurosaws 给出的 400MeV/uC+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/uC+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，在计算侧向屏蔽时应当特别谨慎对待中、低能中子。

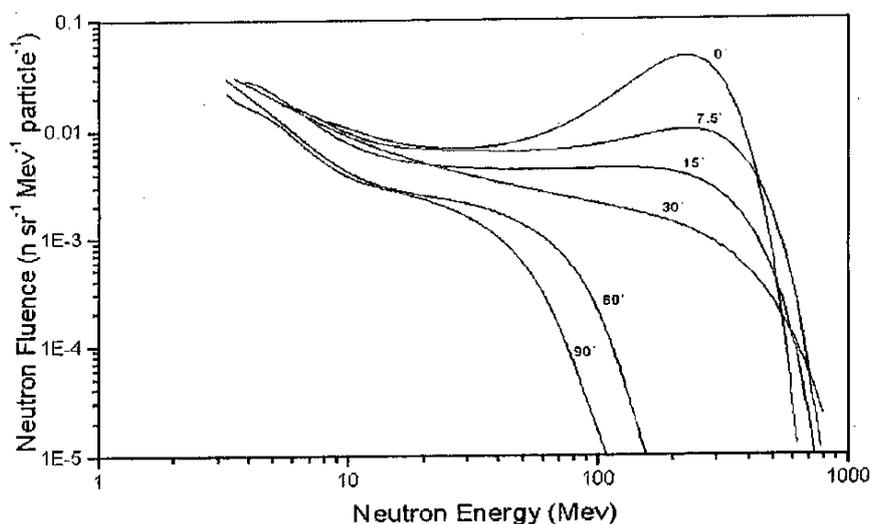


图 3.3-1 400MeV/u C+Cu 次级中子分布

表 3.3-2 给出了根据图 3.3-1 积分得到的中子场分布。

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°
>100MeV	9.33E+00	3.98E-01	2.51E-03	1.32E-04
50<En<100MeV	9.94E-01	3.35E-01	1.79E-01	1.47E-01
10<En<50MeV	3.29E-01	2.09E-01	1.48E-01	1.40E-01
<10MeV	3.57E-02	4.54E-02	6.62E-02	7.69E-02
Total	1.03E+01	7.33E-01	1.82E-01	1.47E-01

二、蒙卡方法确定中子辐射场

FLUKA 是用于粒子输运和粒子与物质相互作用的综合蒙特卡罗模拟程序，

它的应用领域包括：质子和电子加速器的屏蔽、靶设计、热量标定、物质活化、物质活度、探测器设计、ADS、宇宙线，中微子物理和放射性治疗等等。

利用 FLUKA 蒙特卡罗模拟程序，对治癌终端离子打厚靶的次级中子辐射场的进行模拟。参数模拟内容包括：厚靶的形状及尺寸，探测器的放置位置。周围辐射场分布的模拟主要为：中高能中子的通量的角分布以及各自的能谱分布。



图 3.3-2 模拟粒子、靶和探测器的安排

计算模型如图 3.3-2 所示，束流选用 ^{12}C 离子束。探测器在离靶中心位置 1 米处，设置成的圆面探测器，变化不同的探测位置可以得到不同角度的面通量分布。

根据实验常用到的靶和重离子治癌的实际情况，我们选择 Cu, H_2O 作为靶体材料。次级中子的产额会随靶的厚度变化而变化，这是由于高能中子在物质传输过程有个增殖因子，因此在选择靶的厚度时，选取比离子射程稍微大一些作为靶的厚度。

蒙特卡罗计算结果如图 3.3-3 至图 3.3-5 所示：

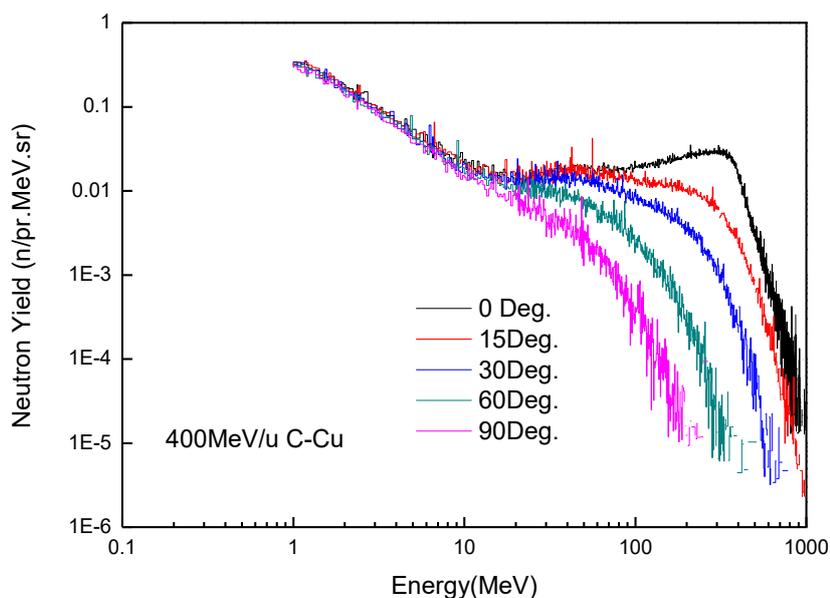


图 3.3-3 400MeV/u C 打 Cu 中子辐射场

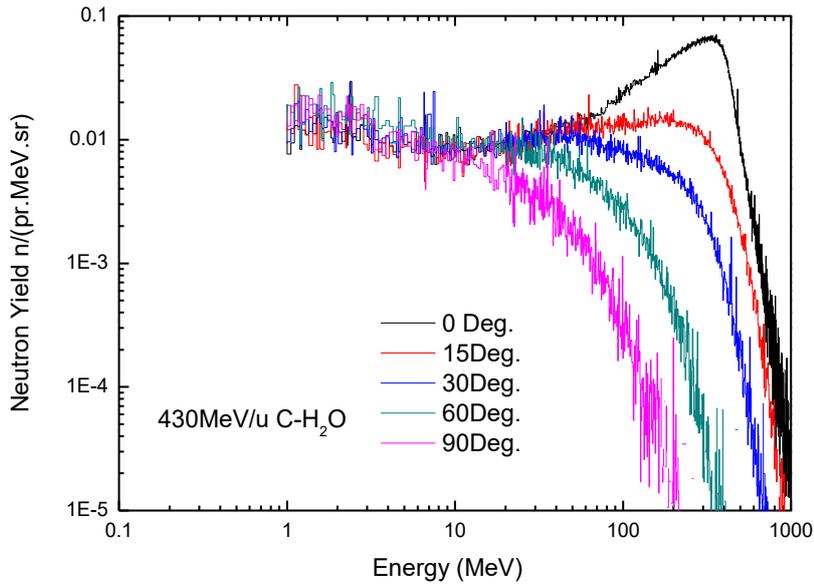


图 3.3-4 430MeV/u C 打 H₂O 中子辐射场

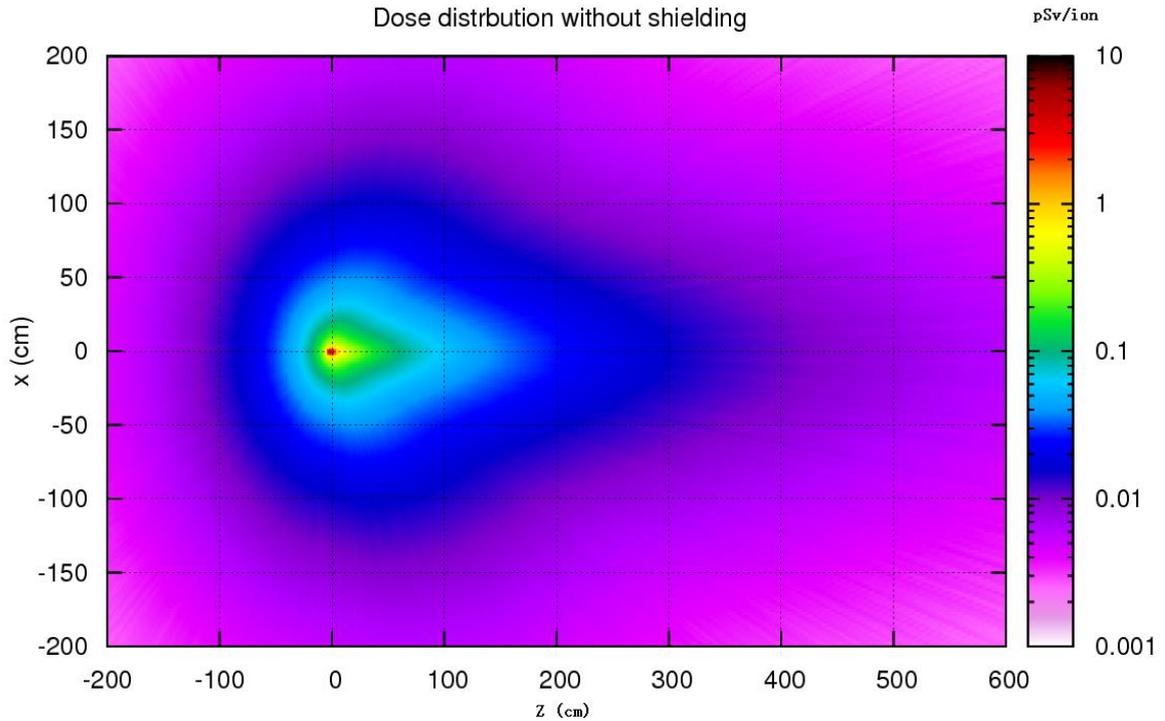


图 3.3-5 400MeV/u C 打厚 Cu 靶周围无屏蔽时周围剂量分布

3.3.2.2 感生放射性

对重离子加速器来说,感生放射性主要是由重离子打靶产生的次级中子引起的。在加速器运行期间,初级粒子或次级粒子与加速器部件、冷却水、加速器室内空气、加速器室内墙壁等相互作用产生感生放射性,其辐射水平取决于加速离子的能量、种类、流强、加速器运行时间、冷却时间和被照材料性质等诸多因素。

3.3.2.2.1 感生放射性分析

一、加速器结构材料的感生放射性

加速器结构材料的感生放射性主要是一些材料受到初级和次级辐射照射发生活化从而产生一些放射性核素，它们发射 γ 或 β 射线。在重离子加速器上，产生的次级中子不论能量如何，都可能使受到中子照射的材料成为感生放射性材料。加速器上可以通过很多种核反应产生感生放射性，例如 (γ, n) 、 (p, xn) 、 (n, xp) 、 (p, pn) 、热中子俘获、散裂或碎裂反应等，从而加速器产生的感生放射性核素的活度和半衰期的范围很宽，但是大多数放射性核素的半衰期比较短。加速器产生的感生放射性核素如表 3.3-3 所示，产生的核素多为丰质子核素，趋向于借正电子发射而衰变。

在加速器运行期间，由于有足够的结构屏蔽，由部件产生的感生放射性不会危害在屏蔽体外的工作人员。但在加速器停机后，工作人员进入加速器厅或靶室进行换靶、调节实验装置或检修加速器等操作时，则可能受到辐射危害。医用重离子加速器的感生放射性衰变比较快，停机后 5~10min 就可减弱到初始值的一半。因此，对感生放射性的有效防护措施之一是等其衰变。

表 3.3-3 在加速器周围受辐照的材料中通鉴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	^7Be	53.6d	钢	^{54}Mn	300d
	^{11}C	20.4min		^{56}Co	77d
杜拉铝	同上加以下		不锈钢	^{57}Co	270d
	^{18}F	110min		^{58}Co	72d
	^{22}Na	2.60y		^{55}Fe	2.94y
钢	^{24}Na	15.0h	铜	^{58}Fe	5.1d
	同上加以下			同上加以下	
	^{42}K	12.47h		^{60}Co	5.27y
	^{43}K	22.4h		^{57}Ni	37h
	^{44}Sc	3.92h		^{60}Cu	2.4min
	$^{44\text{m}}\text{SC}$	2.44d		同上加以下	
	^{46}Sc			^{65}Ni	2.56h
^{47}Sc	3.43d	^{61}Cu	3.33h		

⁴⁹ Sc	1.83d	⁶² Cu	9.80min
⁴⁸ V	16.0d	⁶⁴ Cu	12.82h
⁵¹ Cr	27.8d	⁶³ Zn	38.3min
⁵² Mn	5.55d	⁶⁵ Zn	2.5d
^{52m} Mn	21.3min		

建造加速器的材料不多，最重要的是铁、铜、铝、铝合金及烃类。虽然如此，但在理论上可能产生放射性核素的数目却是很大的。对各种加速器的实验研究表明，加速器关闭后所观察到的辐射场实际上只有少数放射性核素控制（见表 3.3-4），对 γ 剂量率起主要贡献的主要是 ⁵⁴Mn、⁴⁸V、⁵¹Cr、^{52m}Mn、⁵²Mn 和 ⁵⁶Mn，它们的半衰期在 21.12min 至 312d 之间。加速器部件中产生的放射性核素数目很大而且加速器运转又常常很不相同，故总放射性的增长和衰变是时间的一种复杂的函数。加速器辐照的材料产生的剂量率与加速器强度、衰减时间、所考察的核素的宏观产生截面、加速器参数、辐照的粒子谱、衰变产物的自屏蔽、几何条件等因素相关。

表 3.3-4 对 γ 剂量率起主要贡献的核素

放射性核素	半衰期
⁴⁸ V	16.2d
⁵¹ Cr	27.7d
⁵² Mn	5.59d
^{52m} Mn	21.12min
⁵⁴ Mn	312d
⁵⁶ Mn	2.58h

二、空气的感生放射性

加速器运行期间初级粒子或次级粒子与靶室中空气相互作用产生放射性气体。这种空气中的放射性一般是短寿命的，即使产生的放射性达到不能接受的高水平，放射性衰变和放射性空气的稀释都能非常快地使放射性浓度降低到可接受水平。实际上，只有在非常少的情况下才会使空气的放射性水平达到不可接受的水平。其放射性核素主要通过热中子俘获、(n, 2n)、(γ , n)、反应和散裂反应而产生。产生的短寿命核素主要是 ³H、⁷Be、¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar，它们对人体的危害是 β 、 γ 气体浸没外照射和吸入引起的内照射，其对人体的危害途径如图 3.3-6

所示。对由半衰期比 1min 短的放射性核素（如 ^{14}O 、 ^{19}O 、 ^{10}C 、 ^{16}N 、 ^{17}N 等）产生的感生放射性可以不考虑，因为无论是向外排放还是工作人员进入大厅前，它们都会衰变到可以忽略不计。同样对于半衰期长的核素，因为它们的产生率低，也往往不考虑。因此，一般只需考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种放射性核素。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
^3H	12.2y
^7Be	53d
^{11}C	20.5min
^{13}N	10min
^{15}O	2.1min
^{41}Ar	1.8h

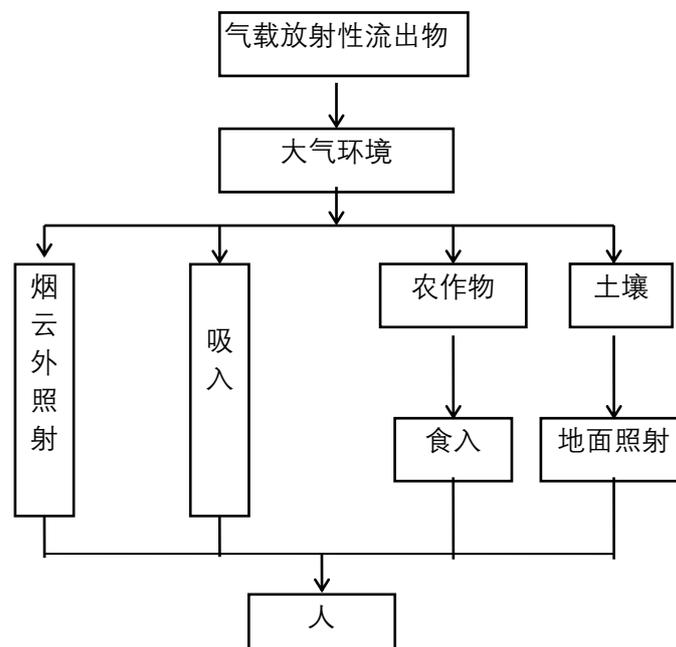


图 3.3-6 气载放射性流出物对人的危害途径

三、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 ^{16}O 的散裂，其产物见表 3.3-6。其中 ^{15}O 、 ^{11}C 和 ^7Be 为最重要的放射性核素，实验研究表明：

- (1) 辐照后 1~5 小时内主要的短寿命核素是 ^{11}C ;
- (2) 半衰期长于 10 小时的唯一长寿命 γ 射线发射体是 ^7Be ;
- (3) 在几种不同条件下受辐照的水样品中 ^3H 和 ^7Be 的饱和放射性之比在 1.3—5.8 之间。

表 3.3-6 ^{16}O 的散裂产物

放射性核素	半衰期
^{10}C	19s
^{14}O	71s
^{15}O	124s
^{13}N	10min
^{11}C	20.5min
^7Be	53d
^3H	12.2y

3.3.2.2.2 感生放射性计算

HIMM 在运行期间大厅密闭不通风，停束后通风换气。由于只有治疗的时候才会造成较大的环境影响，作为保守考虑把每年治疗的时间取为 1000h，在计算产生对环境影响的每年运行的次数为 7 次。

为了计算整个靶室的空气的放射性总活度，作以下等效考虑：靶室尺寸为 $(8 \times 6 \times 4) \text{ m}^3$ 。在模拟过程中采用 FLUKA 蒙卡程序包，模拟过程中采用的粒子种类为 ^{12}C ，能量为 400MeV/u，流强为 $1.385 \times 10^8 \text{ pps}$ （终端束流强度 $4.155 \times 10^9 \text{ ppp}$ ，脉冲周期取 30s），近似考虑入射粒子全部损失在厚铜靶中，尺寸为 $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ 。在靶的后面为一个矩形水靶和 191989902 cm^3 空气靶。入射束流考虑连续运行 1 个月（ $2.592 \times 10^6 \text{ s}$ 程序中以秒为单位），计算的总活度和比活度是照射停止后和冷却 2h 后的结果。

一、加速器结构材料的感生放射性

停止照射后各元素的比活度见图 3.3-7，停止照射 2h 后各元素的比活度见图 3.3-8，铜靶的计算结果表明，停止照射后的总感生放射性活度为 $6.11 \times 10^9 \text{ Bq}$ ，平均比活度 $6.11 \times 10^6 \text{ Bq/cm}^3$ ；停止照射 2 小时后的总活度为 $2.85 \times 10^9 \text{ Bq}$ ，平均比活度 $2.85 \times 10^6 \text{ Bq/cm}^3$ 。

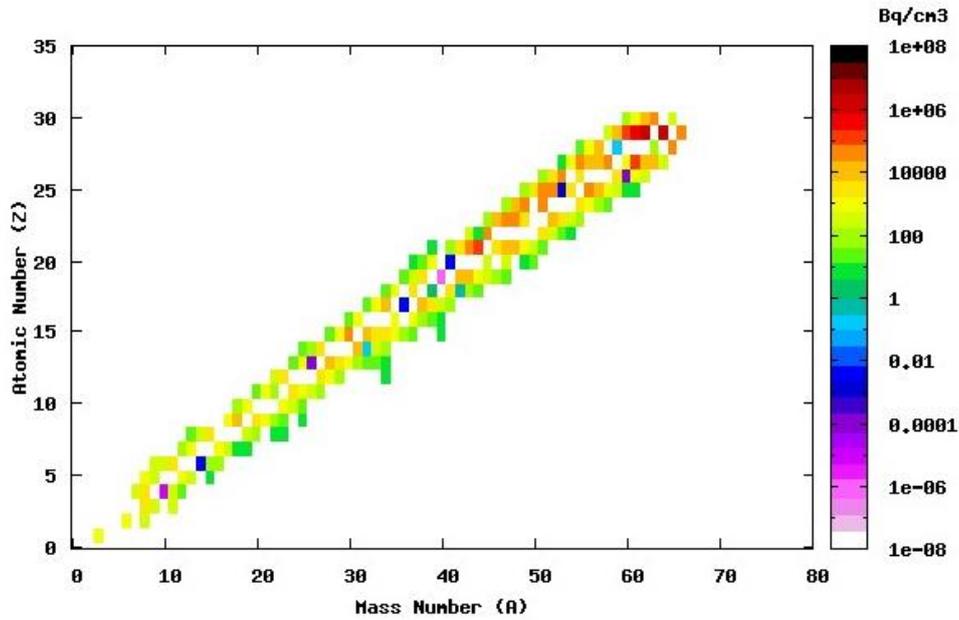


图 3.3-7 停止照射后各元素的比活度

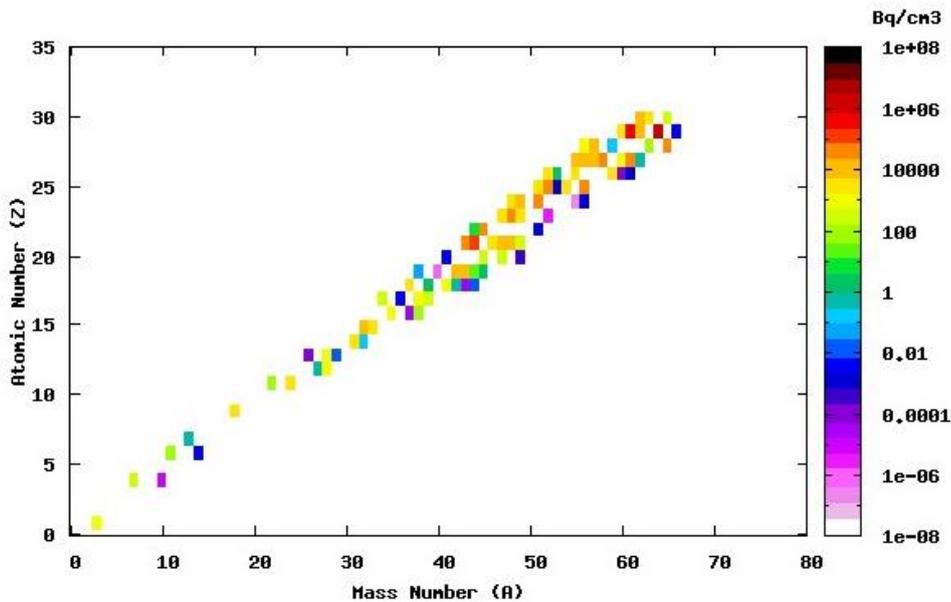


图 3.3-8 停止照射 2 小时后各元素的比活度

二、空气的感生放射性

停止照射后各种核素的比活度见图 3.3-9，主要核素的活度见表 3.3-7；停止照射 2h 后各种核素的比活度见图 3.3-10，主要核素的活度见表 3.3-8。

空气的感生放射性计算结果表明，停止照射后主要核素的总活度为 $7.91 \times 10^5 \text{Bq}$ ，平均比活度为 $4.08 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^3$ ，停止照射 2 小时后的总活度为 $9.86 \times 10^4 \text{Bq}$ ，平均比活度 $5.14 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$ 。停机后如果 2 小时换气一次，则连续运行一个月后向空气中排放的总放射性在 9.86×10^4 至 $7.91 \times 10^5 \text{Bq}$ 之间。

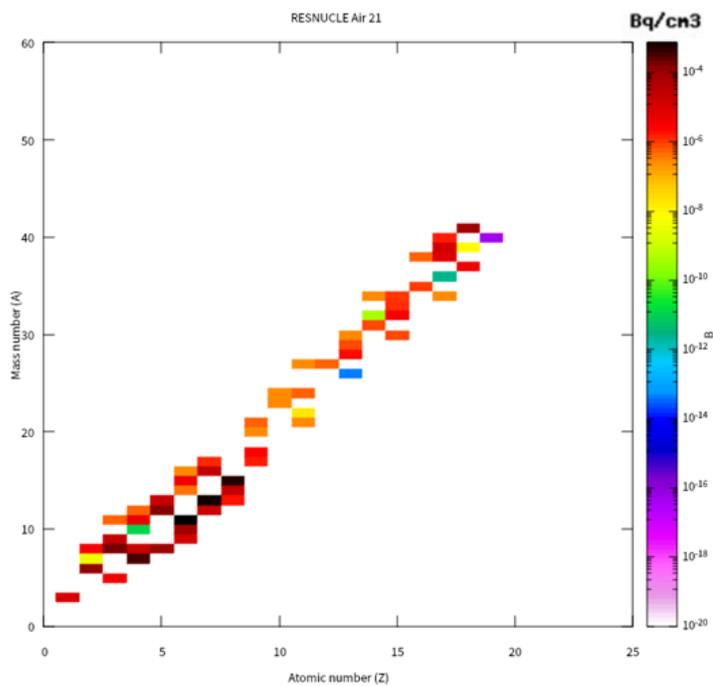


图 3.3-9 停止照射后各种核素的比活度

表 3.3-7 停止照射后主要核素的活度

编号	核素种类	活度 (Bq)
1	^{41}Ar	2.27×10^4
2	^{15}O	1.25×10^5
3	^{13}N	1.59×10^5
4	^{12}B	3.62×10^4
5	^{11}C	1.97×10^5
6	^{10}C	2.19×10^4
7	^8Li	4.19×10^4
8	^8B	2.23×10^4
9	^7Be	7.80×10^4
10	^6He	2.95×10^4
11	^3H	2741
12	其它	4.61×10^4
13	总量	7.91×10^5

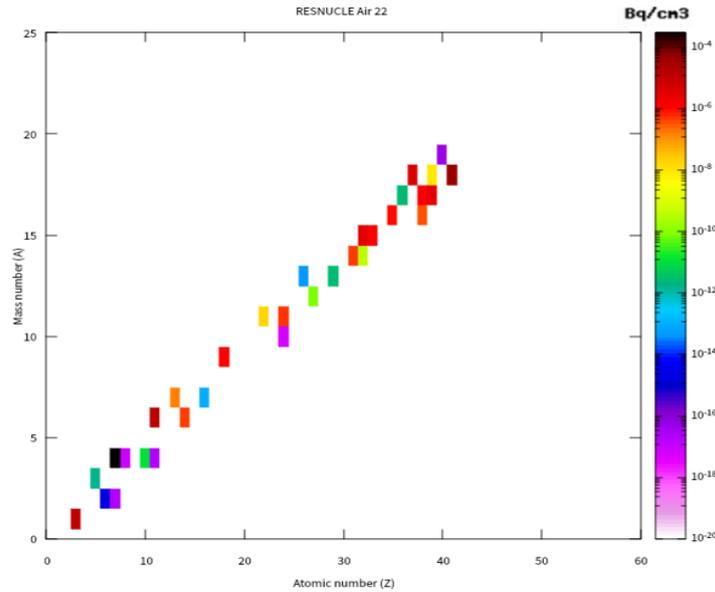


图 3.3-10 停止照射 2h 后各种核素的比活度

表 3.3-8 停止照射 2h 后主要核素的活度

编号	核素种类	活度 (Bq)
1	^{41}Ar	1.07×10^4
2	^7Be	7.78×10^4
3	^3H	2741
4	其它	7485
5	总量	9.87×10^4

三、冷却水的感生放射性

设备冷却水的活化来自多种中子源，其中最重要的中子源产生在打外靶。打靶产生的中子引起 H_2O 中 ^{16}O 的散裂，产生的最重要的放射性核素为 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{14}C 、 ^7Be 。经过离子交换树脂时， ^7Be 可迅速被吸收。冷却水在不停地循环，计算时采用静态的水靶，最后在归一到总体的水靶中。下面的计算结果是以 10L 水作为水靶，计算的总活度和比活度是停止照射后和停止照射 2h 后的结果。停止照射后各种核素的比活度见图 3.3-11，主要核素的活度见表 3.3-9；停止照射 2h 后各种核素的比活度见图 3.3-12，主要核素的活度见表 3.3-10。

冷却水的感生放射性计算结果表明，停止照射后主要核素的总活度为 $5.54 \times 10^7 \text{Bq}$ ，平均比活度为 $5.54 \times 10^3 \text{Bq/cm}^3$ 。停止照射 2 小时后主要核素的总活度为 $3.18 \times 10^6 \text{Bq}$ ，平均比活度 $3.18 \times 10^2 \text{Bq/cm}^3$ 。连续照射一个月时 ^7Be 和 ^3H 的总活度为 $2.76 \times 10^6 \text{Bq}$ 和 $1.31 \times 10^5 \text{Bq}$ ，停止照射 2 小时后， ^7Be 和 ^3H 的总活度为

$2.76 \times 10^6 \text{Bq}$ 和 $1.31 \times 10^5 \text{Bq}$ 。

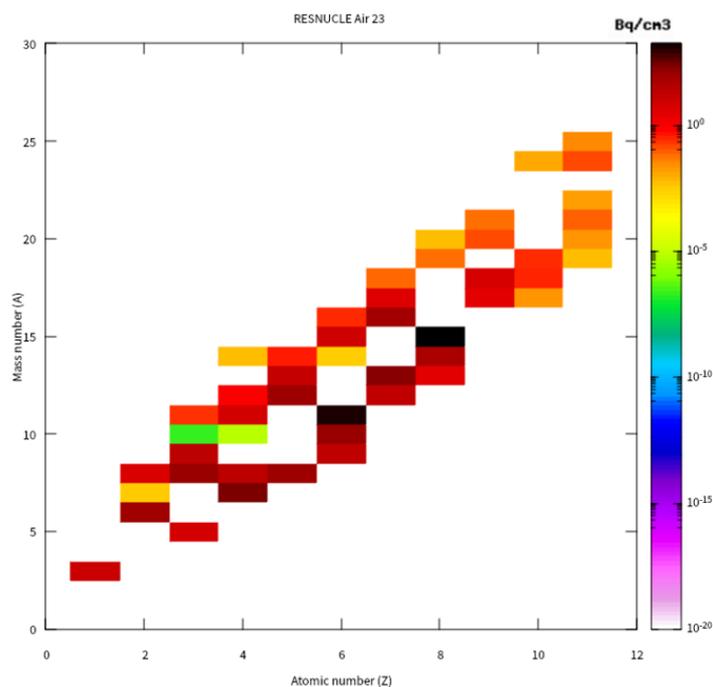


图 3.3-11 停止照射后各种核素的比活度

表 3.3-9 停止照射后主要核素的活度

编号	核素种类	活度 (Bq)
1	^{16}N	1.04×10^6
2	^{15}O	2.42×10^7
3	^{14}O	6.51×10^5
4	^{13}B	1.69×10^5
5	^{13}N	2.20×10^6
6	^{12}B	1.28×10^6
7	^{12}N	2.14×10^5
8	^{11}C	1.55×10^7
9	^{10}C	1.71×10^6
10	^9Li	2.46×10^5
11	^9C	2.34×10^5
12	^8Li	1.65×10^6
13	^8Be	2.69×10^5

14	^8B	1.26×10^6
15	^7Be	2.76×10^6
16	^6He	1.18×10^6
17	^3H	1.31×10^5
18	其它	6.80×10^5
19	总量	5.54×10^7

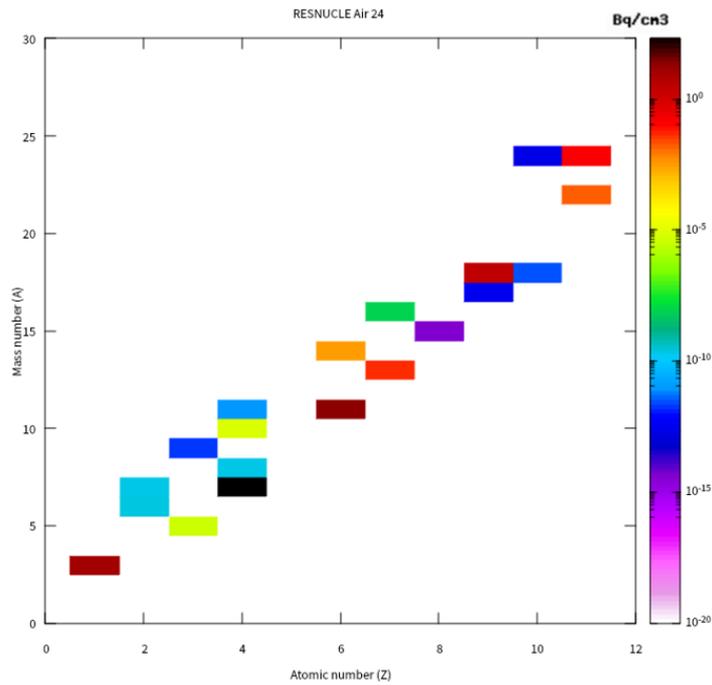


图 3.3-12 停止照射 2 小时后各种核素的活度

表 3.3-10 停止照射 2 小时后主要核素的活度

编号	核素种类	活度 (Bq)
1	^{18}F	3.23×10^4
2	^{11}C	2.61×10^5
3	^7Be	2.76×10^6
4	^3H	1.31×10^5
5	其它	1.36×10^4
6	总量	3.18×10^6

3.3.3 运行期事故工况污染源

本项目为使用 I 类射线装置，事故工况下产生的污染源与正常工况下基本相

同。

3.4 废弃物

HIMM 在运行期间,会产生感生放射性废气、放射性废水和放射性固体废物,各种含放射性的废弃物的种类、来源、活度浓度、排放总量、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等一览表

废物种类	来源	活度浓度	排放总量	排放或处理方式
放射性废气	初级粒子或次级粒子与靶室中空气相互作用	不大于 $4.08 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^3$	不大于 $7.91 \times 10^5 \text{Bq/m}$, 不大于 $5.537 \times 10^6 \text{Bq/a}$	经通风系统,直接排入外环境
放射性废水	事故工况下泄漏的冷却水	不大于 $5.54 \times 10^3 \text{Bq/cm}^3$	/	经排水地沟、地漏汇集到两级衰变池,经衰变满足要求后排放至医院污水处理系统
放射性固体废物	废弃的加速器结构部件等	不大于 $6.11 \times 10^6 \text{Bq/cm}^3$	/	分类收集后暂存于放射性固废储存间,经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中解控标准的放射性固废作为一般医疗废物处理,对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。

第四章 辐射安全与防护

4.1 场所布局与屏蔽

4.1.1 场所布局与分区

本项目位于医院半山院区东侧拟建重离子医学中心大楼内，HIMM 辐射工作场所包括：加速器大厅、高能线爬升段区、1 号治疗室、2 号治疗室、3 号治疗室、4 号治疗室，分布涉及负一层、负一层夹层、地上一层、地上二层，同时配套设置控制室、冷却水泵房、治疗室空调机房等辅房。

加速器大厅主要用于放置重离子加速器装置设备，高能线爬升段区主要用于束线爬升，4 间治疗室主要用于病人的放射治疗，各功能部分均相互独立，控制室等辅房均位于 HIMM 机房外部，满足《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）中“治疗装置控制室应与治疗机房分离。治疗装置辅助机械、电器、水冷设备，凡是可以与治疗装置分离的，应尽可能设置于治疗机房外”的要求，也能满足本项目治疗系统的布局要求，本项目工作场所布局合理。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中 6.4.1.1“应把需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区”、6.4.2.1“应将下述区域定为监督区：这种区域未被定为控制区，在其中通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价”，本项目工作场所按其功能拟划分为控制区和监督区，并实施分区管理，控制区包括：加速器大厅、高能线爬升段大厅、1 号治疗室、2 号治疗室、3 号治疗室、4 号治疗室，系统开机出束期间禁止任何人员进入；监督区包括：控制室、冷却水泵房、治疗室空调机房等辅房，系统开机出束期间禁止非辐射工作人员进入，本项目拟采取的分区措施满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中 6.4 的要求。

4.1.2 场所屏蔽

HIMM 机房屏蔽主体为混凝土，局部使用铁进行增强屏蔽，具体屏蔽设计参数见表 4.1-1 和图 4.1-1。

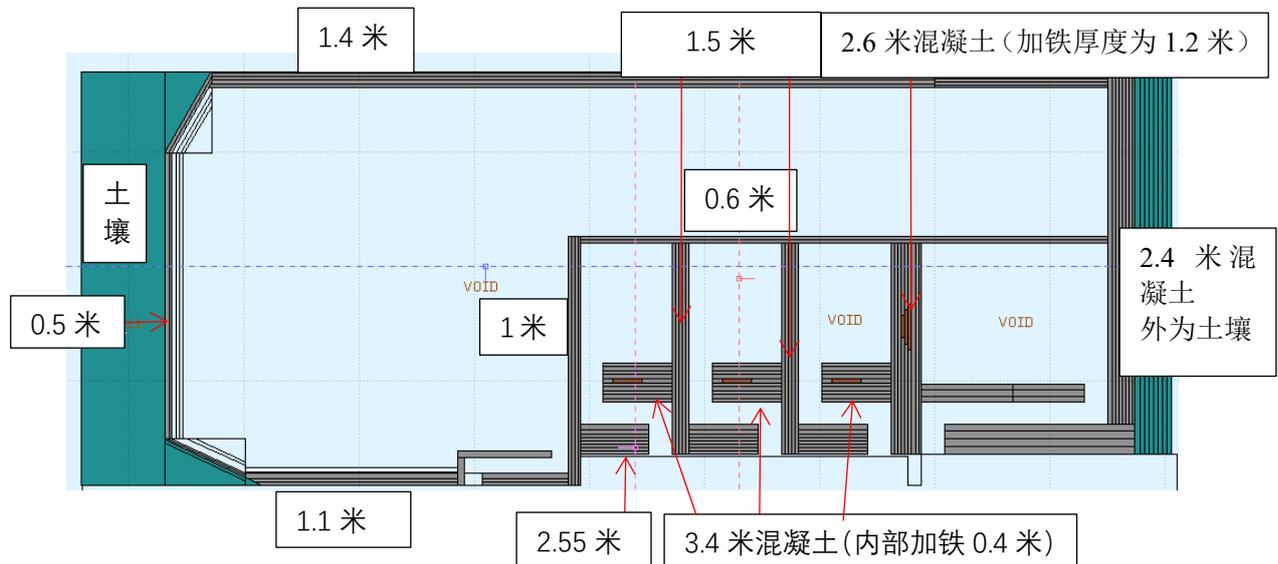
表 4.1-1 本项目机房屏蔽情况一览表

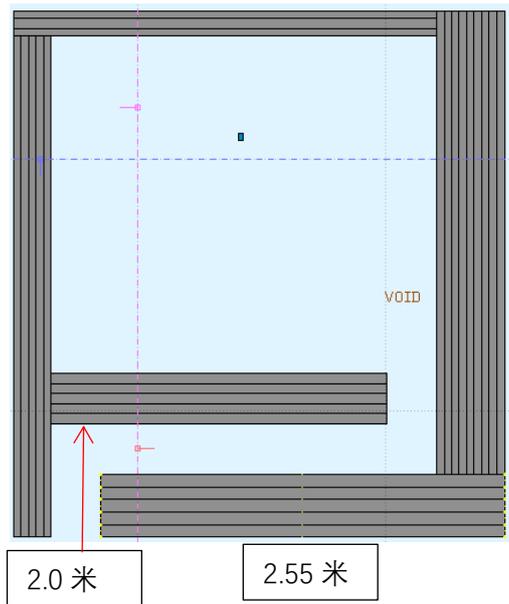
名称	屏蔽区域	材料	屏蔽厚度
加速器大厅	防护门	普通防盗门	未添加特殊材料
	东墙	混凝土	1.4m
	南墙	混凝土	2.4m
	西墙	混凝土	1.1（迷道墙 0.6m）
	北墙	混凝土	0.5m
	天花板	混凝土	0.8m
	地板	混凝土	1.5m（回旋加速器安装区 50cm~130cm）
高能线爬升段区	防护门	普通防盗门	未添加特殊材料
	东墙	混凝土	1.4m
	南墙	混凝土	1m
	西墙	混凝土	1.5m（迷道墙 1.1m）
	北墙	混凝土	0.6m
	天花板	混凝土	0.6m
	地板	混凝土	0.8m
1号治疗室 (90°治疗头)	防护门	铅、聚乙烯	铅：3mm，聚乙烯：5cm
	东墙	混凝土	0.6m
	南墙	混凝土	1.5m
	西墙	混凝土	2.55m（迷道墙 3.4，局部内嵌 40cm 铁，长高为 2.5m×4.75m）
	北墙	混凝土	1m
	天花板	混凝土	0.8m
	地板	混凝土	1.5m
2号治疗室 (0°+90°治疗头)	防护门	铅、聚乙烯	铅：3mm，聚乙烯：5cm
	东墙	混凝土	0.6m
	南墙	混凝土	1.5m
	西墙	混凝土	2.55m（迷道墙 340cm，局部内嵌 40cm 铁，长高为 2.5m×4.75m）
	北墙	混凝土	1.5m
	天花板	混凝土	0.8m
	地板	混凝土	1.5m，局部 1.7m
3号治疗室 (45°+90°治疗头)	防护门	铅、聚乙烯	铅：3mm，聚乙烯：5cm
	东墙	混凝土	0.6m
	南墙	混凝土	混凝土：260cm，局部内嵌三层均为 40cm 的铁，长高分别为 4m×4.75m、3m×4.75m、

			2m×4.75m)
	西墙	混凝土	2.55m (迷道墙 340cm, 局部内嵌 40cm 铁, 长高为 2.5m×4.75m)
	北墙	混凝土	1.5m
	天花板	混凝土	0.8m
	地板	混凝土	1.5m
4 号治疗室 (90°治疗 头)(后期升 级为重离子 Gantry 治疗终 端)	防护门	铅、聚乙烯	铅: 3mm, 聚乙烯: 5cm
	东墙	混凝土	0.6m (升级后 1.4m)
	南墙	混凝土	2.4m
	西墙	混凝土	2.55 (迷道墙 2m)
	北墙	混凝土	混凝土: 260cm, 局部内嵌三层均为 40cm 的铁, 长高分别为 4m×4.75m、3m×4.75m、2m×4.75m)
	天花板	混凝土	3.2m (局部增强屏蔽)
	地板	混凝土	1.5m

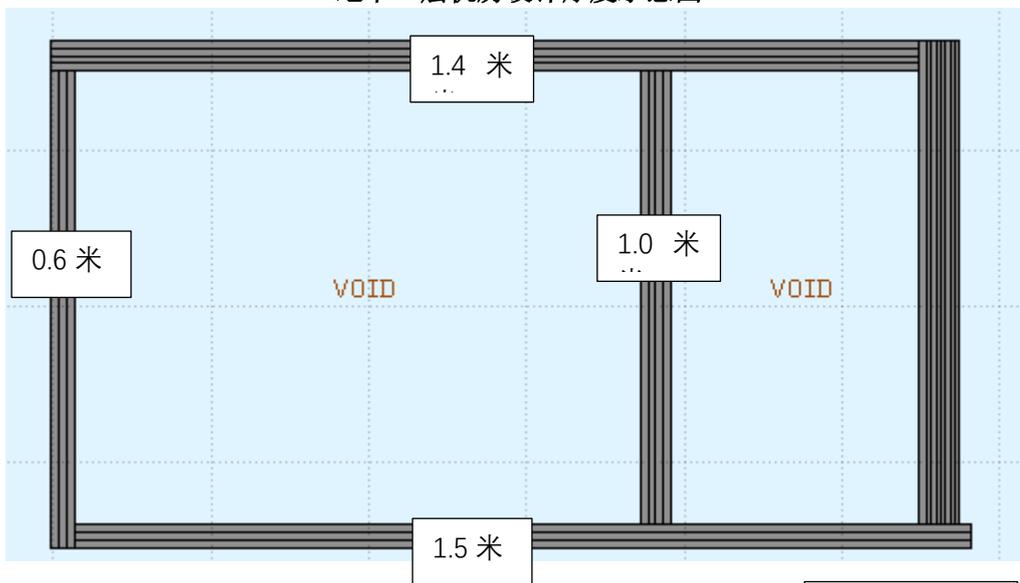
注: 混凝土密度为不低于 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$, 铁的密度为 $7.9\text{g}/\text{cm}^3$ 。

为了避免辐射泄漏过大, 机房防护门设计安装时, 应尽量减小防护门与搭接墙体之间的缝隙, 防护门与屏蔽墙、地面之间的搭接宽度至少应为门缝的十倍; 穿过机房屏蔽墙的各种管道和电缆线应弯成 S 形或 U 形, 其开口应避开辐射源和工作人员经常停留的地点。

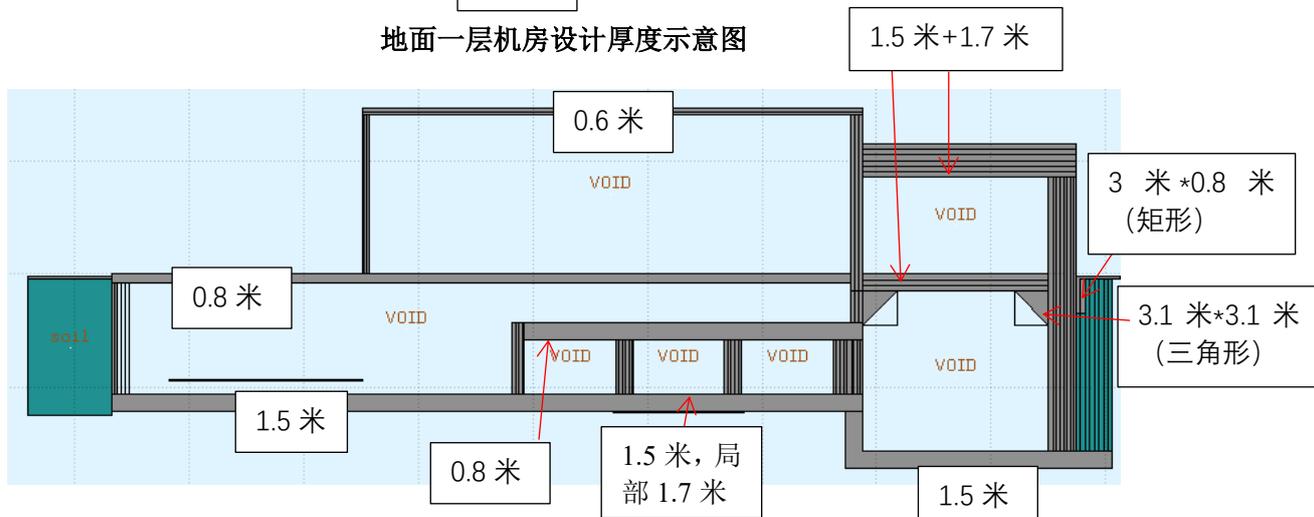




地下一层机房设计厚度示意图



地面一层机房设计厚度示意图



机房垂直方向设计厚度示意图

图 4.1-1 HIMM 机房屏蔽设计参数示意图

4.2 辐射安全与防护措施

4.2.1 人身安全联锁系统

HIMM 设置人身安全联锁系统的主要目的是保护工作人员、患者及参观者等免受无故的过量照射。

人身安全联锁系统通过 PLC 控制系统，建立加速器运行状态、人员出入情况及各联锁部件之间的逻辑关系。在加速器运行时，任一可能引起辐射事故的联锁条件改变都将产生一个中断加速器束流的联锁信号，中断所在区域的束流，避免产生误照射。

4.2.1.1 设计准则

人身安全联锁系统的设计准则如下：

(1) 分区联锁：根据 HIMM 运行模式，利用实体屏蔽及“束流闸”（Beam Stopper）将整个加速器辐射区分为控制区和监督区。按工艺要求，在束流上流区域有束流时，可以允许下流无束流区域人员进入工作；利用“束流闸”保证束流不会被送到有人区域。

(2) 实现辐射区门与区域内辐射剂量的双重联锁，即某一区域有束流时，工作人员不能进入该区域；而在某一区域有人时，束流不能被送到相应区域。此外，辐射监测信号也将作为安全联锁信号，当一区域辐射剂量超过所设阈值时即便在无束流的状态也不允许人员进入，保障工作人员安全。

(3) “冗余”设计及独立性：隔离区的每个门都有三重联锁：一为限位开关；二为身份识别卡，可对进入隔离区的人员确认其身份，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中；三为钥匙箱，确保在钥匙箱上的钥匙没有全部归还的情况下束流闸不会被打开。采用冗余设计的多套联锁设施相互独立，不会因为一套系统的实效而影响到其它系统的安全性。

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

(5) 失效保护：所有的线路、气动装置、电动装置均采用失效保护设计。

4.2.1.2 主要组成部分及功能

HIMM 的人身安全联锁系统主要由 PLC 逻辑控制、剂量（场所、个人）控制、出入控制、人员移动探测及其他安全联锁设施等部分组成。其相互关系示意图见图 4.2-1。

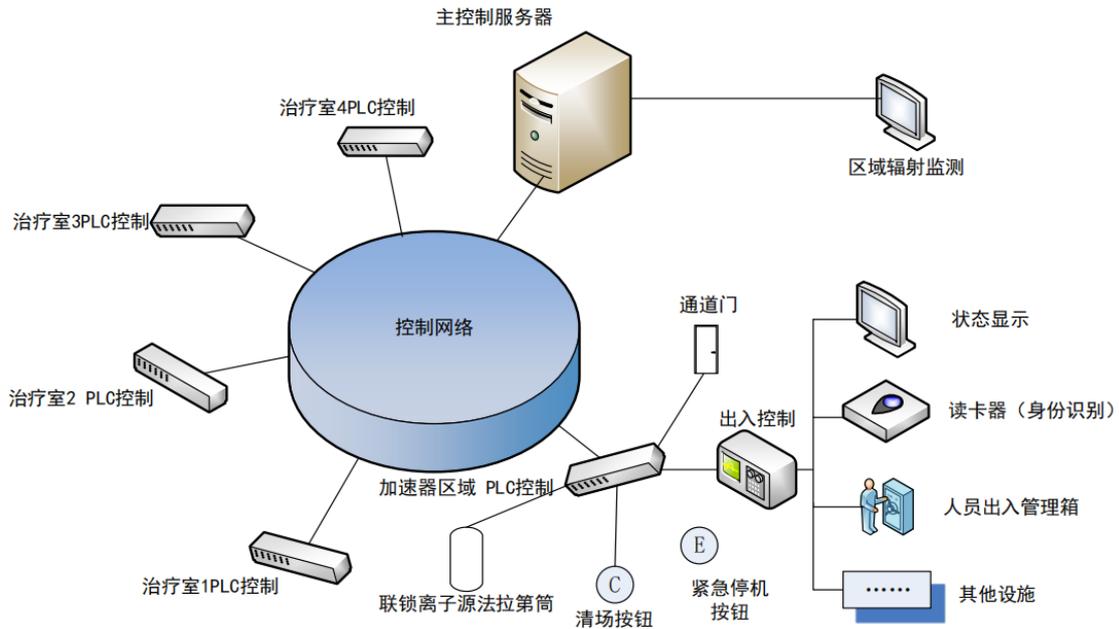


图 4.2-1 HIMM 人身安全联锁系统设施示意图

4.2.1.2.1 主控制服务器及软件

主控制服务器及其软件是人身安全联锁系统的核心，其将各子系统有机联系起来。它不仅是一个管理平台，同时它还构成了系统信息交换平台，通过对各子系统相关信息的采集和分析来完成系统信息管理工作、实现平台的核心功能，并据此完成对加速器辐射安全做出评价。

4.2.1.2.2 PLC 逻辑控制

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将加速器束流闸、通道门、区域剂量及紧急停机按钮等设施或信号进行联锁，规定了人身安全联锁各子系统的联锁逻辑关系，并在联锁动作发生时执行这些联锁关系，以此来保障加速器的安全运行及工作人员的人身安全。图 4.2-2 为 HIMM 人身安全联锁系统的主要联锁逻辑。

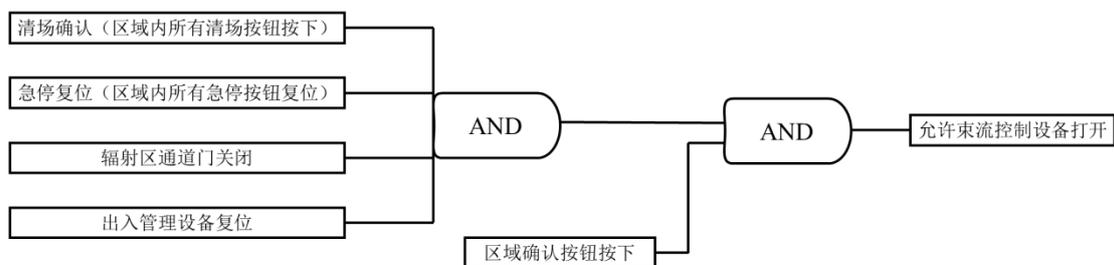


图 4.2-2 人身安全联锁系统主要联锁逻辑

4.2.1.2.3 剂量联锁

这一部分包括现场剂量联锁与个人剂量联锁。现场剂量联锁的主要功能一是保障在加速器停机后，人员不会进入有较高残余放射性的区域；二是若某一治疗室处于没有清场的状态，也就是人员可能仍在治疗室内，此时若该治疗室监测到超过阈值的辐射剂量率，则联锁系统启动，切断更上一级的加速器区域的束流（通过同步加速器出口的束流阻挡器切断束流）。个人剂量联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。

4.2.1.2.4 出入控制系统

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

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

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

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

治疗室区域由于医生和患者需要频繁进出治疗室，所以设计一人一卡的人员出入控制系统不符合实践需求。治疗室内需要供束时，对治疗室进行巡检后由医护人员在医生控制台采用刷卡启动束流闸的控制方式，且授权钥匙由专人保管。治疗室需要进入时在医生控制台拍下急停按钮，然后等待治疗室内剂量降到管理

水平以下后方可进入。

4.2.1.2.5 “清场”/急停按钮及声光警示

紧急停机按钮及“清场”确认按钮均匀分布于加速器大厅及治疗室中，主要功能是实现加速器开机前的清场功能，在清场开始后发出声光警示，提醒加速器联锁区域内未离开人员迅速撤离。万一在加速器开机之后仍有工作人员在大厅或治疗室内，可按下室内设置的紧急停机按钮来切断加速器运行，待确认联锁区域内没有工作人员并压下“清场”确认按钮后可重新进行开机操作。

4.2.1.2.6 束流闸

根据“硬件最可靠”这一联锁原则，每个辐射分区前都有一个束流闸，其主要作用是防止误操作，保证有人区域为绝对的封闭区间。束流闸只有当下游的联锁逻辑符合条件时才可打开，束流方可进入下游区域。HIMM 共需束流闸 7 个，其位置分布如图 4.2-3 所示。

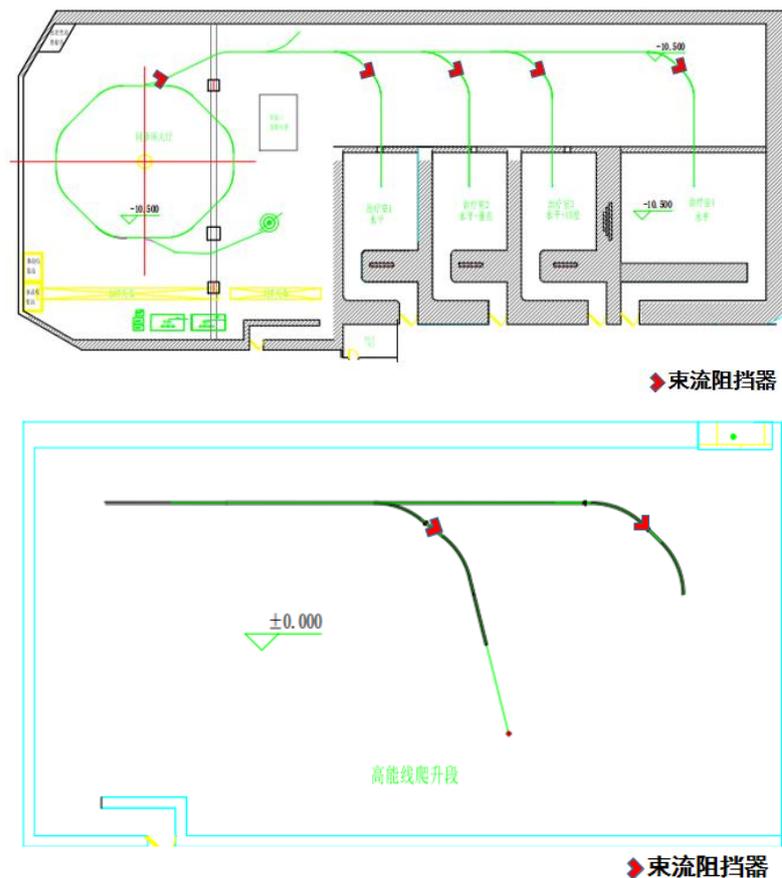


图 4.2-3 HIMM 束流闸位置分布示意图

4.2.1.3 HIMM 安全联锁系统的工作流程

图 4.2-4 给出了 HIMM 安全联锁系统工作流程图。

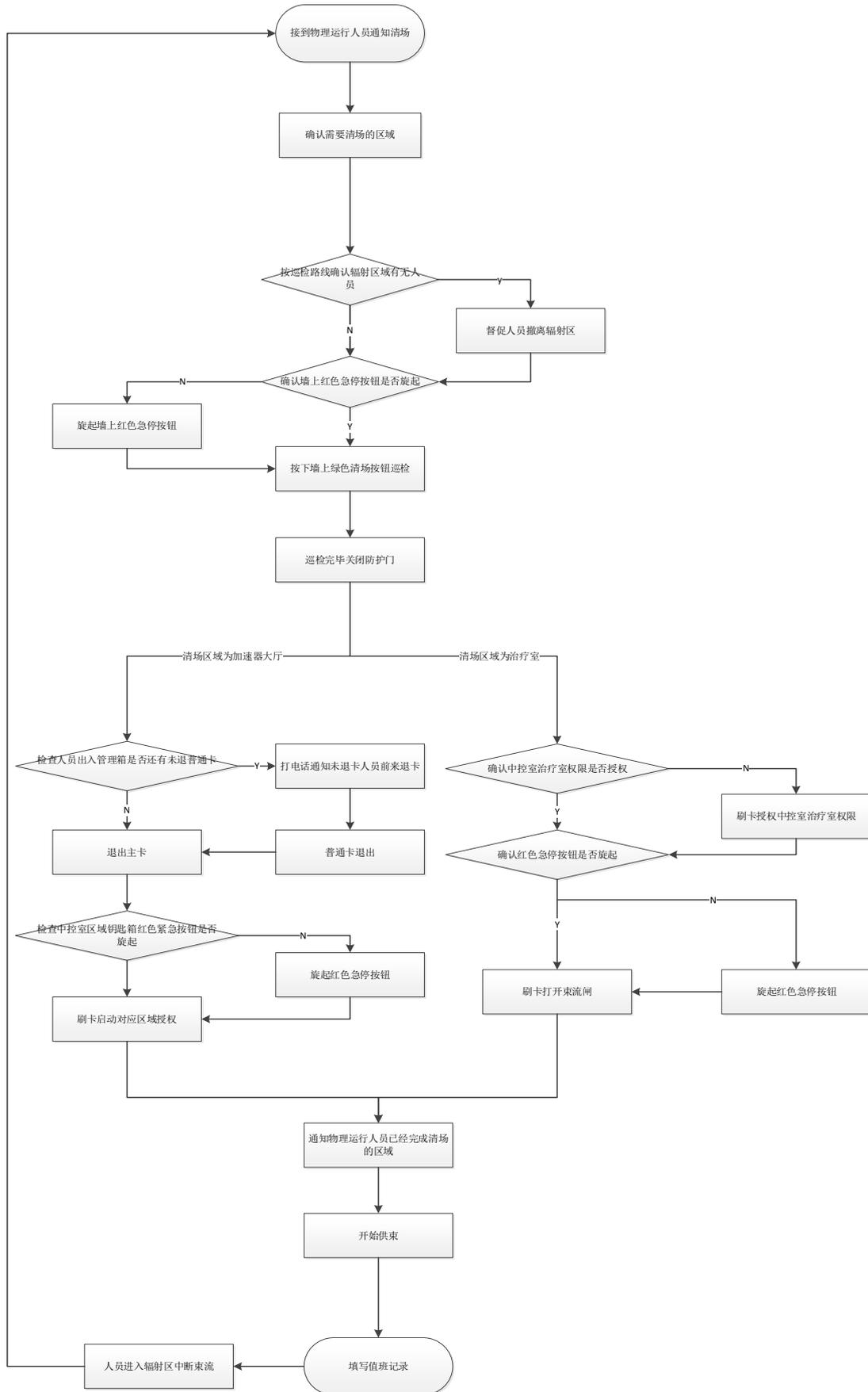


图 4.2-4 HIMM 安全联锁系统工作流程

4.2.2 其他安全措施

4.2.2.1 工作场所的分区和标志

HIMM 工作区划分两个区域: 一般工作区和放射性工作区, 其中, 放射性工作区根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 划分为监督区和控制区。监督区边界设置醒目标志; 控制区的辐射场要进行连续监测, 当剂量率超过所设阈值时, 就地给出声、光报警信号。控制区入口设置醒目的电离辐射警告标志, 并设安全联锁装置, 自动记录进、出该区域的人数, 当该区域内有人时无法开机。

4.2.2.2 警报装置

警报装置由辐射标志牌、运行状态显示屏、广播音响等组成。各辐射区通道防护门上均有电离辐射警告标志, 加速器大厅入口处及各治疗室入口处均有运行状态显示屏, 可直观、明显地显示加速器的工作状态、束流走向和工作模式。加速器大厅、高能线爬升段区、各治疗室内主要位置安装剂量探头, 在治疗室入口处、控制室内安装剂量显示屏幕, 可以实时显示各区域剂量监测系统监测到的实时剂量率水平, 起到一定的警示作用。

4.2.2.3 通风系统

HIMM 辐射区拟采取负压通风的方式。加速器运行时, 加速器大厅、高能线爬升段区不通风, 当加速器停机后才通风, 正常情况下通风 5 分钟后工作人员才进入。治疗室始终保持负压通风的状态, 所有的新风入口均拟安装过滤膜, 以去除空气中的气溶胶; 排风均拟通过两级过滤后经高位烟囱进行排放。

4.2.2.4 观察装置

加速器大厅、高能线爬升段区、各治疗室内主要位置及出入口均拟设置监控探头, 利用监控探头监控辐射区内人员滞留状况, 观察设备运行状态。

4.2.3 防护系统需要同其他系统的接口

辐射安全与防护防护系统需要同其他系统的接口如下:

(1) 加速器大厅通风系统: 由于加速器运行期间不允许向外排风, 且加速器长时间运行后需通风 5 分钟方可允许人员进入, 因此通风系统需要与安全联锁系统相互通信。

(2) 束流闸: 束流闸是联锁系统的重要设施, 应能在接收到联锁信号后迅速动作。束流闸应遵循“失效保护”原则, 即束流闸的默认状态应为“降下”, 且当

其驱动装置发生故障时，束流闸会自动降下。为防止误操作，束流闸状态因与束流触发系统联锁，保障人员人身安全。

(3) 离子源：束流从离子源引出至到同步环为一个辐射区，所以这个辐射区的联锁点应在产生辐射最小的源头离子源。离子源在接收到联锁系统给出的信号后能采取相应措施切断束流。

4.3 三废的治理

4.3.1 放射性固体废物处理措施

本项目 HIMM 运行过程中将产生感生放射性固体废物，主要包括加速器维护维修时产生的废弃的加速器结构部件等。医院拟在加速器大厅内东北角设置放射性固废储存间，感生放射性固废分类收集后暂存于放射性固废储存间，经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中解控标准的放射性固废作为一般医疗废物处理，对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。

根据《医用放射性废物的卫生防护管理》(GBZ 133-2009)中相关要求，本项目放射性固废在加速器大厅内临时贮存期间，应采取以下辐射安全和管理措施：

①放射性固废储存间建造结构应符合放射卫生防护要求，且具有自然通风或安装通风设备，出入口应设置电离辐射警告标志；

②废物袋、废物桶及其他存放废物的容器应安全可靠，并应在显著位置标有废物类型、核素种类，比活度水平和存放日期等说明；

③应对废物包装体外表面的污染控制水平进行监测，确保 $\alpha < 0.04 \text{Bq/cm}^2$ ， $\beta < 0.4 \text{Bq/cm}^2$ ；

④临时贮存期满前应及时按要求对放射性废物进行处理；

⑤医院应配备专(或兼)职人员负责管理废物的分类收集、存放和处理。废物管理人员应熟悉国家有关放射性废物管理法律法规，具备掌握放射防护和剂量监测专业技术的安全文化素养；

⑥放射性固废储存间出入口门应采取双人双锁管理，门外应设置视频监控，应采购正规厂家生产的含铅废物桶等，同时应设置灭火器，以防发生废物丢失、被盗、容器破损和灾害事故；医院应建立废物档案和出入储存间登记与双人双锁管理制度；

⑦应设置废物贮存登记卡，废物主要特性和处理过程应记录在卡片上，并留档备案，登记卡格式参见 GBZ 133-2009 附录 C；

⑧接触放射性废物的工作人员必须使用个人防护用具或屏蔽防护设施，并佩戴个人剂量计。

以上措施认真落实后，本项目放射性固废处置措施能够满足《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ 133-2009）等标准中相关要求，可避免放射性固废对工作人员和公众造成不必要的照射。

4.3.2 放射性废水处理措施

HIMM 正常运行工况下，工艺水系统管路内冷却水循环使用不外排，不产生感生放射性废水。事故工况下，若管路泄漏，将产生感生放射性废水。

加速器大厅内拟设置排水地沟和防倒流地漏，大厅内西北角拟设置 2 个事故收集池，该收集池为连续推流式，分 2 级串联工作，单池有效容积为 6.0m^3 ，池底和池壁拟采用钢筋混凝土结构并做防水防腐处理，池顶拟采用 5mm 厚钢盖板。泄漏的感生放射性废水将按 1%坡度通过排水地沟、地漏通过自留的方式汇集到一级收集池，通过溢流孔排放到二级收集池，经衰变满足要求后通过污水提升装置排放至医院污水处理系统。

放射区冷却水的总体积为 4.32m^3 ，整个循环水系统为一条主供水管道，分成同步环区域与高能线区域两部分，放射区域即磁铁装置区由 93 条并联支路组成，最大的一条支路设计水循环量为 1.4L/s ，系统设置有防漏水监测系统和水冷监测系统，若循环水系统发生漏水可通过监测系统即时发现，保守假设事故时放射区冷却水全部泄漏至事故收集池，即 4.32m^3 的冷却水全部排放至事故收集池，事故收集池的容量能够满足最大冷却水单元泄漏的收集暂存需求。

根据 3.3-9、3.3-10 估算结果，排放的冷却水经一定时间暂存后，短半衰期核素的活度将很快降低，需考虑的主要是半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 核素，本项目感生放射性废水在排放前应进行监测，经监测满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）中总 α 不大于 1Bq/L 、总 β 不大于 10Bq/L 要求后，方能按要求排放至医院污水管网。

4.3.3 放射性废气处理措施

HIMM 运行过程中将会产生感生放射性气体，其中大部分为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。根据表 3.3-7 估算结果，HIMM 连续运行一个月停止照射后空气中主要核素的总活度为 $7.91 \times 10^5\text{Bq}$ ，其中 ^{41}Ar 、 ^{15}O 、 ^7Be 、 ^3H 核素的活度分别为 $2.27 \times 10^4\text{Bq}$ 、 $1.25 \times 10^5\text{Bq}$ 、 $7.80 \times 10^4\text{Bq}$ 、 2741Bq ；停

止照射 2h 后空气中主要核素的总活度为 $9.87 \times 10^4 \text{Bq}$ ，其中 ^{41}Ar 、 ^7Be 、 ^3H 核素的活度分别为 $1.07 \times 10^4 \text{Bq}$ 、 $7.78 \times 10^4 \text{Bq}$ 、 2741Bq ；根据 GB18871-2002 表 A1， ^{41}Ar 、 ^{15}O 、 ^3H 核素的豁免活度均为 $1 \times 10^9 \text{Bq}$ ， ^7Be 核素的豁免活度为 $1 \times 10^7 \text{Bq}$ ，本项目产生的感生放射性废气中 ^{41}Ar 、 ^{15}O 、 ^7Be 、 ^3H 核素的活度均小于其豁免活度，各核素活度与豁免活度比值之和小于 1，本项目感生放射性废气的排放对环境影响较小。

加速器大厅、高能线爬升段区、4 个治疗室均拟设置独立的空调通风系统：

1、加速器大厅采用一套全空气系统，空调机组设置于屋面专用空调机房内。空气处理机组采用组合式，功能段包含新回风混合段、粗效过滤器、中高效过滤器、表冷段、加热段、电加热段、送风段等。

2、高能线爬升段区采用一套全空气系统，空调机组设置于屋面专用空调机房内。空气处理机组采用组合式，功能段包含新回风混合段、粗效过滤器、中高效过滤器、表冷段、加热段、电加热段、送风段等。

3、治疗室采用温湿分控空调系统，新风系统独立设置，主控治疗室相对湿度，新风换气次数为 4 次/h，新风处理机设置于首层专用空调机房内。新风处理机组采用组合式，功能段包含进风段、粗效过滤器、中高效过滤器、表冷段、加热段、电加热段、送风段等。每个治疗室设置四面出风型多联机室内机，主控室内温度。

装置区及治疗区设立负压工作环境（或静态封闭）避免放射性物质的扩散。尽量降低空气中放射性粉尘或放射性气溶胶的浓度。所有放射性区域的排风均需通过初效（G4）、中效（F8）两级过滤进行过滤后，在相对集中位置经高位烟囱（高出所在屋面 2m，离地高度约 22m）在下风向处排放。空调、新风系统均采用初效（G4）、中效（F8）两级过滤，减少排风中放射性污染物的处理量，以达到放射性物质减量处理的目的。

通风空调系统按工艺运行、卫生、环保和室内环境要求，通风空调系统按三种工况运行：即正常运行工况、清洁通风工况、值班工况。

通风空调工况和工艺运行模式对应表如下：

表 4.3-1 通风空调工况和工艺运行模式对应表

工艺运行模式	装置运行	过渡期运行， 停机时间>0.5h	人员进入
空调通风工况	正常运行	清洁通风	正常运行

装置正常运行模式——为禁入区，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。

清洁通风模式（兼事故排风模式）——从加速器停止运行，经适当延时衰减后，采取大风量排风，换气次数设计为 5 次/h，置换装置区中的空气，以满足人员进入的要求。

值班模式——装置停止运行，人员可进入。此时，可根据实际需要，采取正常运行，提高新风比到 0.9~1.5ACH。

4.4 服务期满后的环境保护措施

根据法律法规要求，本项目退役前应办理退役环保手续。

HIMM 退役的辐射防护问题主要是由于感生放射性引起的，加速器产生的感生放射性的特点是短寿命核素较多，研究表明经过几十年后对环境有影响的唯一长寿命核素为 ^{60}Co ，半衰期 5.3 年，其它核素的影响几乎可以忽略不计。而 ^{60}Co 主要存在于受束流直接照射的铜、不锈钢等加速器部件材料中，相对集中形成一个个“热点”。因此对加速器退役的初步设想是首先封存冷却一段时间，然后进行“热点”清除，加速器设备经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中解控标准的作为一般医疗废物处理或进行回收利用，对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。

第五章 环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

本项目为新建项目，建设施工时对环境可能产生的影响及医院拟采取的治理措施如下：

1、水污染影响及治理措施

施工期产生的废水主要为各种施工机械设备运转的冷却水及洗涤用水和施工现场清洗、建材清洗、混凝土养护、设备水压试验等产生的废水，这部分的废水含有一定的油污和泥沙。另外还有一部分建设期施工人员的生活污水。

其防治措施主要有：

(1) 施工现场搅拌站废水、现制水磨石的污水、电石(碳化钙)的污水须经沉淀后再排入城市污水管道或河流，最好将沉淀水用于工地洒水降尘或采取措施回收利用。上述污水未经处理严禁直接排入城市污水管道或河流中去。

(2) 现场存放油料，必须对库房地面进行防渗处理，如采用防渗混凝土地面、铺油毡等。使用时，要采取措施，防止油料跑、冒、滴、漏，污染水体。

(3) 施工现场 100 人以上的临时食堂，污水排放时可设置简易有效的隔油池，定期掏油和杂物，防止污染。

(4) 工地临时厕所、化粪池应采取防渗漏措施，可采用水冲式厕所，蹲坑上加盖，并有防蝇、灭蝇措施，防止污染水体和环境。

2、大气污染影响及治理措施

施工期的主要大气污染物有废气和粉尘。废气主要来源于施工机械驱动设备（如柴油机等）和运输及施工车辆所排放的废气，排放的主要污染物为 NO_x、CO、烃类物等，此外，还有施工队伍因生活需要使用燃料而排放的废气等；施工期间的粉尘污染主要取决于施工作业方式、材料的堆放以及风力因素，其中受风力因素影响最大。随着风速的增加，施工扬尘产生的污染程度和超标范围也将随之增强或扩大。

主要治理措施有：

(1) 施工现场道路采用焦渣、级配砂石、粉煤灰级配砂石、沥青混凝土或水泥混凝土等，有条件的可利用永久性道路，并指定专人定期洒水清扫，形成制度，防止道路扬尘。

(2) 施工现场垃圾渣土要及时清理出现场。建筑物清理施工垃圾时，要搭设封闭式专用垃圾道，采用容器吊运或永久性垃圾道随结构安装好以供施工使用，严禁随意抛撒。

(3) 袋装水泥、白灰、粉煤灰等易飞扬的细颗粒体材料，应库内存放。若室外临时露天存放时，必须下垫上盖，严密遮盖防止扬尘。

(4) 必须设置围墙或围挡将工地与外界分隔开，并在出入口设置冲洗台和冲洗设施，同时设专人清洗车轮、车帮及清扫出入口卫生，确保车辆不带泥上路，车辆运输时应文明装卸。

(5) 机动车都要安装 PVC 阀，对那些尾气排放超标的车辆要安装净化消声器，确保不冒黑烟。

(6) 工地上的茶炉、大灶、锅炉尽量采用消烟除尘型茶炉、锅炉和消烟节能回风灶，烟尘降至允许排放量为止。

(7) 工地搅拌站除尘是治理的重点，有条件可修建集中搅拌站，由计算机控制进料、搅拌、输送全过程，在进料仓上方安装除尘器，可使水泥、砂、石中的粉尘降至 99% 以上。采用现代化先进设备是解决工地粉尘污染的根本途径。

3、噪声污染影响及治理措施

噪声是施工期的主要污染因子，施工过程中使用的运输车辆及各种施工机械，如挖掘机、推土机、混凝土搅拌机等都是噪声的产生源。由于现场施工机械设备噪声很高，而且实际施工过程中，往往是多种机械同时工作，各种噪声源辐射的相互叠加，噪声级将更高，辐射范围也更大。

对建设施工噪声可从以下几个方面加以控制和管理：

(1) 建设中采用低噪声的施工工艺，如用液压打桩代替冲击打桩，用低噪声施工设备代替传统的高噪声设备。

(2) 对一些固定的高噪声设备采用噪声控制措施，如搅拌机、木工机械、线材切割机等设备应放置在远离居民住宅处，并采取一些噪声屏蔽措施。

(3) 加强对施工工地的管理和施工人员的环境意识教育。

(4) 必须加强施工管理，合理安排施工时间，严禁夜间进行强噪声作业。如因工艺特殊情况要求，需在夜间施工而产生环境噪声污染时，按《中华人民共和国环境噪声污染防治法》的规定，需取得当地人民政府或有关主管部门的证明，并公告附近居民。

4、固废污染影响及治理措施

施工垃圾主要来源于施工所产生的建筑垃圾和施工队伍产生的生活垃圾。施工期间将涉及到土地开挖、管道敷设、材料运输、基础工程、房屋建筑等工程，在此期间将有一定量的废弃建筑材料如砂石、石灰、混凝土、废砖、土石方等；本项目施工前后必然要有大量的施工人员工作和生活在施工现场，其日常生活将产生一定数量的生活垃圾。

对施工现场的建筑垃圾要及时清运、加以利用，防止其因长期堆放而产生扬尘。施工过程中产生的生活垃圾如不及时清运处理，会腐败变质，滋生蚊蝇，产生恶臭，传播疾病，从而对周围环境和作业人员健康带来不利影响。所以本项目建设期间对生活垃圾要进行专门分类收集，环卫所定期运往垃圾场进行合理处置，严禁乱堆乱放，防止二次污染。

医院在施工阶段计划采取上述污染防治措施，将施工期的影响控制在院内局部区域，对周围环境影响较小。

5.2 运行阶段对环境的影响

5.2.1 HIMM 辐射影响分析

5.2.1.1 场所辐射水平

评估过程中主要考虑了同步加速过程的均匀损失、同步引出的集中损失、高能输运的均匀损失以及治疗终端的集中损失。计算工具采用 FLUKA 程序，版本是 V2020.0；粒子种类设置为 $^{12}\text{C}^{6+}$ ；同步加速过程损失的粒子能量为 200MeV/u，同步引出、高能输运及治疗室损失的粒子能量为 400MeV/u；同步加速过程束流流强为 $1.97 \times 10^7 \text{pps}$ ($5.7 \times 10^8 \text{ppp}$ 除以 30s)，同步引出集中损失流强为 $1.97 \times 10^7 \text{pps}$ ($5.7 \times 10^8 \text{ppp}$ 除以 30s)，高能输运线均匀损失流强为 $3.85 \times 10^5 \text{pps/m}$ ($4.617 \times 10^8 \text{ppp}$ 除以 30s 再除以 40m)，治疗终端集中损失流强为 $1.385 \times 10^8 \text{pps}$ ($4.155 \times 10^9 \text{ppp}$ 除以 30s)。

本次计算考虑了以下集中束流损失工况：

(1) 同步加速损失、同步引出损失、高能输运的均匀损失以及 1 号治疗室的水平方向损失；

(2) 2 号治疗室的水平方向损失；

(3) 3 号治疗室的水平方向损失；

(4) 4 号治疗室的水平方向损失；

- (5) Gantry 治疗室（4 号治疗室升级后）向左的束流损失；
- (6) Gantry 治疗室（4 号治疗室升级后）向右的束流损失；
- (7) Gantry 治疗室（4 号治疗室升级后）向顶的束流损失；
- (8) Gantry 治疗室（4 号治疗室升级后）向顶向右侧的束流损失；
- (9) Gantry 治疗室（4 号治疗室升级后）向顶向左侧的束流损失；
- (10) 爬升段高能束运线的均匀损失。

图 5.2-1 至图 5.2-10 分别给出了不同束流损失工况下的辐射剂量率分布图。

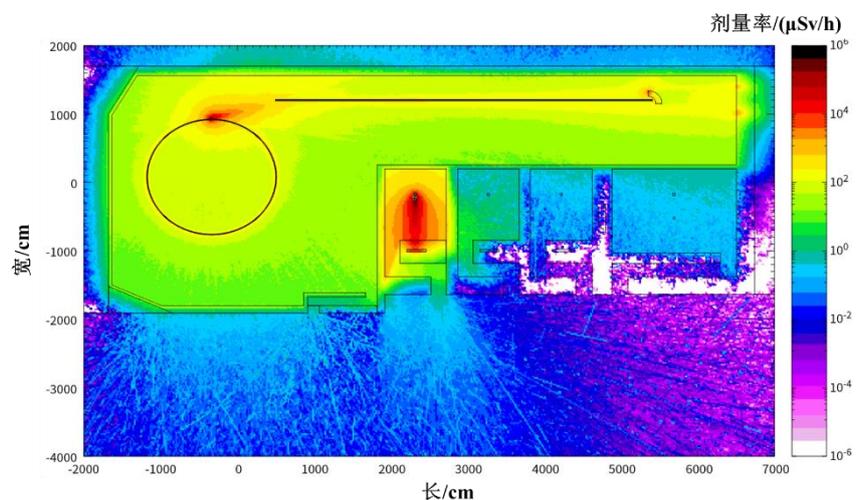


图 5.2-1 同步加速、同步引出、高能输运及 1 号治疗室水平方向同时发生损失的剂量率分布图

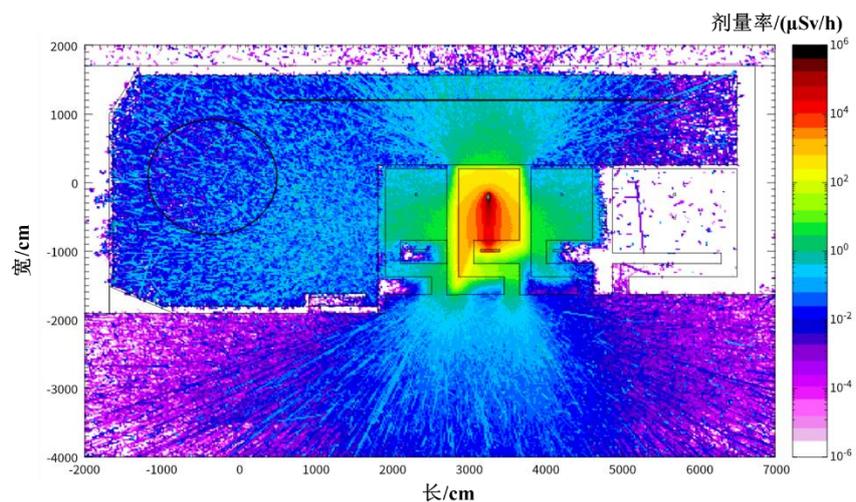


图 5.2-2 2 号治疗室水平方向治疗时的剂量率分布图

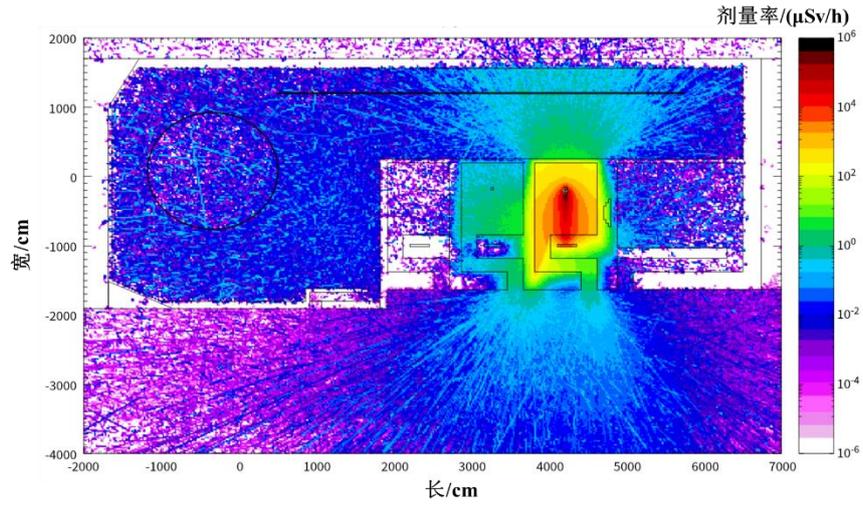


图 5.2-3 3号治疗室水平方向治疗时的剂量率分布图

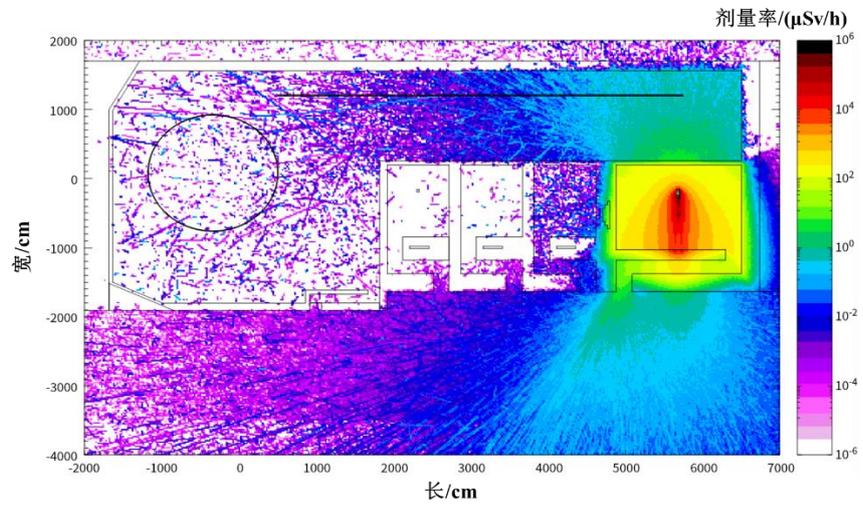


图 5.2-4 4号治疗室水平方向治疗时的剂量率分布图

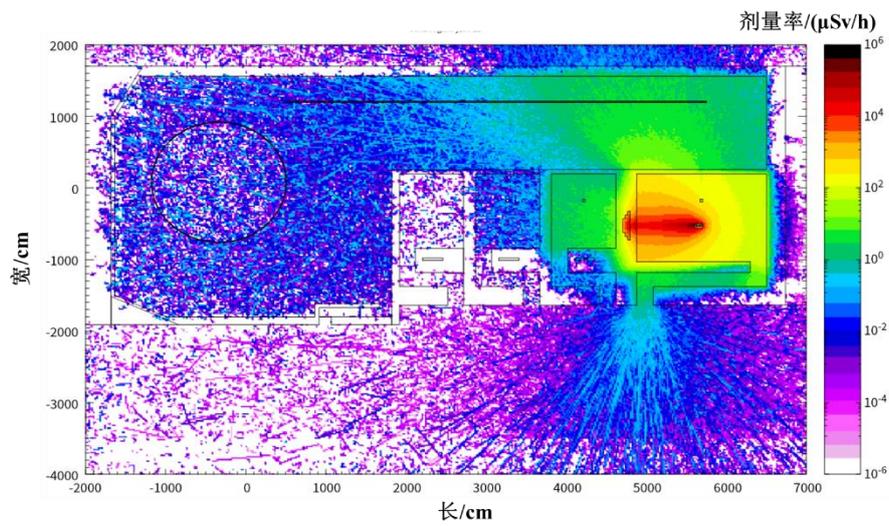


图 5.2-5 Gantry 治疗室左向治疗时的剂量率分布图

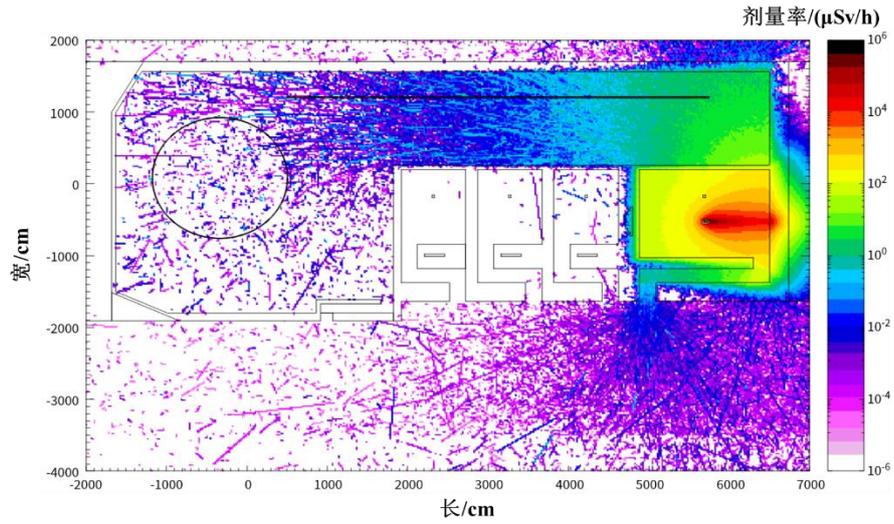


图 5.2-6 Gantry 治疗室右向治疗时的剂量率分布图

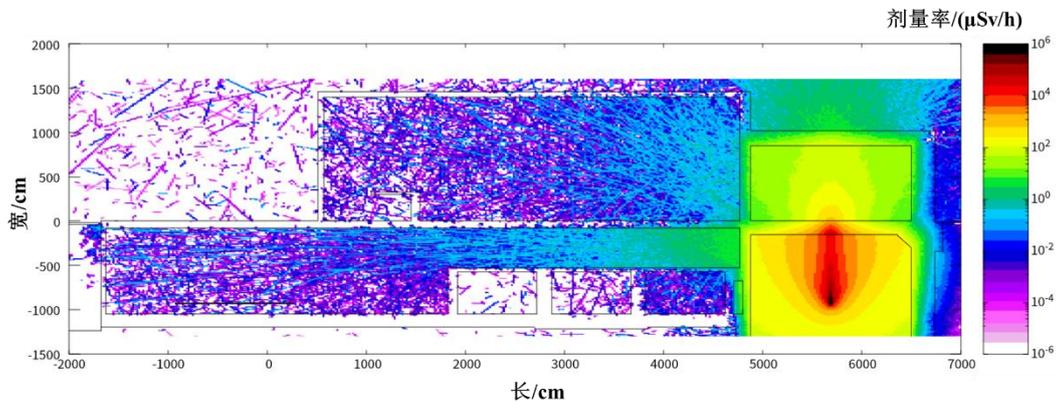


图 5.2-7 Gantry 治疗室顶向治疗时的剂量率分布图

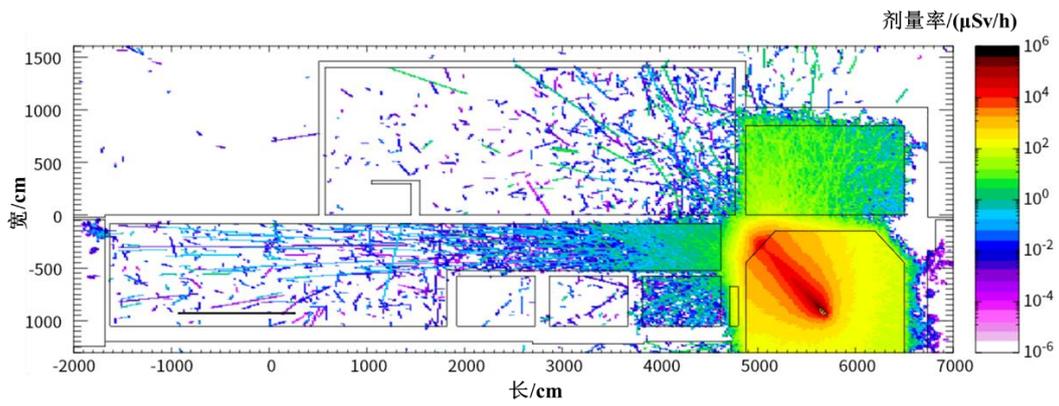


图 5.2-8 Gantry 治疗室顶向左侧治疗时的剂量率分布图

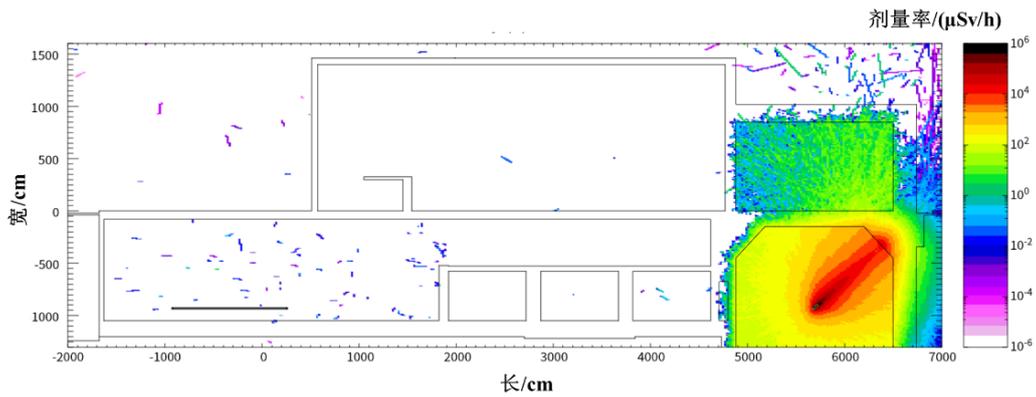


图 5.2-9 Gantry 治疗室顶向右侧治疗时的剂量率分布图

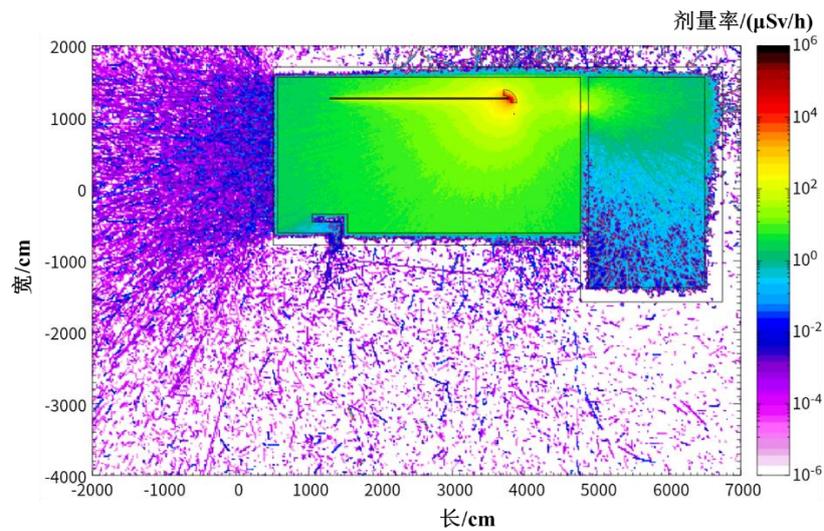


图 5.2-10 爬升段高能束运线损失的剂量率分布图

根据 HIMM 加速器大厅、高能线爬升段区、4 个治疗室的布局情况，环评给出了各辐射工作场所外典型参考点的辐射剂量率估算结果，各参考点的剂量率估算结果都是不同束流损失工况下该位置的最大剂量率，其中迷道入口外剂量率估算结果均为假设无防护门情况，参考点主要包括：辐射工作场所四周墙体、顶板外 30cm，紧贴土壤的屏蔽体外，机房外辐射工作人员或较近公众的典型长居留场所。束流损失工况及对应参考点的剂量率估算结果如表 5.2-1 所示。

表 5.2-1 各束流损失工况下对应参考点的剂量率水平一览表

束流工况	参考点序号(上)																剂量率(下)	
	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	31	32
同步加速、同步引出、高能输运线、1号治疗室水平	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	2.5	0.3	0.25	0.4	0.1	7	3.1	0.5	0.45	0.12	0.17	0.8	1.1	1	8	0.1	0.08
	序号	16	17	18	19	30												
2号水平	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	1.1	1	8	8	0.18												
	序号	20	21	22	23	24												
3号水平	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	1.1	1	0.1	0.08	8												
	序号	25	26	37														
4号水平	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	2.5	0.15	0.1														
	序号	28	29															
Gantry左向	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	9	7															
	序号	27																
Gantry右向	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	200																
	序号	39	48	53	54	55												
Gantry顶向	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	≤ 0.01	0.08	2	8.1	0.17												
	序号	38																
Gantry右斜向	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	0.1																
	序号	36	50															
Gantry左斜向	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	0.18	0.2															
	序号	33	34	35	39	40	41	42	43	44	45	46	47	49	51	52		
高能线	剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	0.02	0.05	0.02	0.05	0.06	0.04	0.1	≤ 0.01	0.05	≤ 0.01							
	序号																	

根据表 5.2-1 估算结果可知：

(1) 4 个治疗室之间隔墙外 30cm 处辐射剂量率最大为 $9\mu\text{Sv/h}$ (参考点 15、18-19、22-24、28-29)，加速器大厅、高能线爬升段区、4 个治疗室顶外 30cm 处辐射剂量率最大为 $8.1\mu\text{Sv/h}$ (参考点 43、52-54)，满足本项目辐射剂量率控制目标中“4 个治疗室之间隔墙外 30cm、加速器大厅、高能线爬升段区、4 号治疗室顶外 30cm 处辐射剂量率不大于 $10\mu\text{Sv/h}$ ”的要求；

(2) 对于紧贴土壤的屏蔽体，屏蔽体外的辐射剂量率最大为 $200\mu\text{Sv/h}$ (参考点 1、6-12、27)，参考日本 J-PARC 的相关设计，对于紧贴土壤的屏蔽体，若屏蔽体外剂量率不大于 5mSv/h ，可不考虑其对土壤、地下水的活化影响；

(3) 加速器大厅、高能线爬升段区、4 个治疗室墙体 (治疗室之间隔墙除外) 外 30cm 人员可居留处辐射剂量率最大为 $1.1\mu\text{Sv/h}$ (参考点 2-3、5、13、16、20、26、33、35-42、48-51)，满足本项目辐射剂量率控制目标中“人员可居留处辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ”的要求；

(4) 加速器大厅、高能线爬升段区、4 个治疗室迷道入口外 30cm 处辐射剂量率估算结果如下：

表 5.2-2 HIMM 机房迷道入口外 30cm 处辐射剂量率估算结果

辐射工作场所	参考点序号	辐射剂量率估算结果 ($\mu\text{Sv/h}$)
加速器大厅	4	0.4
1 号治疗室	14	1
2 号治疗室	17	1

3号治疗室	21	1
4号治疗室	25	2.5
高能线爬升段区	34	0.05

本项目加速器大厅、高能线爬升段区迷道门拟设置为普通防盗门，门内不添加铅等特殊材料，根据估算结果可知，加速器大厅、高能线爬升段区迷道门外30cm处辐射剂量率分别为0.4μSv/h、0.05μSv/h。

4个治疗室迷道门拟设置为3mmPb+50mm聚乙烯。参考《辐射防护手册》（第一分册）“10.5 同位素中子源屏蔽”相关计算方法，中子减弱因子可用（式5.2-1）进行计算。

$$f = e^{-[0.11(\text{材料氢原子密度/水氢原子密度}) \cdot t_1 + \sum_R \cdot t]} \quad \dots\dots \text{（式 5.2-1）}$$

式中，t为重材料厚度（cm），t₁为聚乙烯材料厚度（cm），∑_R为有效分出截面（cm⁻¹）。

通过计算可得出，中子减弱因子为0.525。因此，可进一步估算得出本项目HIMM终端4个治疗室迷道门外的辐射剂量率为0.525μSv/h~1.312μSv/h之间。

根据估算结果可知，加速器大厅、高能线爬升段区、4个治疗室迷道门外30cm处辐射剂量率最大为1.312μSv/h，满足本项目辐射剂量率控制目标中“人员可居留处辐射剂量率不大于2.5μSv/h”的要求。

5.2.1.2 人员受照剂量

辐射工作人员和公众的年有效剂量可用（式5.2-2）进行计算：

$$E_{eff} = D \cdot t \cdot T \cdot U \quad \dots\dots \text{（式 5.2-2）}$$

式中：E_{eff}——人员有效剂量。

t——年照射时间，单位h；

T——居留因子，根据GBZ/T 201.1-2007附录A取值；

U——使用因子，本项目U取1。

根据表5.2-1估算结果和式5.2-2可估算得出机房外各关注点（人员可居留处）年有效剂量，具体计算参数和计算结果见表5.2-3。

表 5.2-3 HIMM 机房外各关注点（人员可居留处）年有效剂量估算表

参考点序号	参考点位置	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	居留场所	居留因子	年照射时间 (h)	年有效剂量估算结果 (mSv)	保护目标	
2	加速器大厅西墙 外 30cm	0.3	冷却塔补水水池	1/40	1000	<0.01	公众	
3		0.25	QA 设备 储存	1/40		<0.01		
4	加速器大厅迷道 门外 30cm	0.4	走廊	1/5		0.08		
5	加速器大厅迷道 墙外 30cm	0.1	治疗区女 卫	1/20		<0.01		
13	1 号治疗室迷道 墙外 30cm	1.1	治疗区男 卫	1/20	250	0.01		
14	1 号治疗室迷道 门外 30cm	0.525	走廊	1/5		0.03		
16	2 号治疗室迷道 墙外 30cm	1.1				0.06		
17	2 号治疗室迷道 门外 30cm	0.525				0.03		
20	3 号治疗室迷道 墙外 30cm	1.1				0.06		
21	3 号治疗室迷道 门外 30cm	0.525				0.03		
25	4 号治疗室迷道 门外 30cm	1.312				0.07		
28	4 号治疗室北墙 外 30cm	9			3 号治疗 室	1/16		250
30	2 号治疗室西墙 外约 3.4m	0.18	治疗控制 机柜	1	1000	0.18		
31	1 号治疗室西墙 外约 7.5m	0.1	中央控制 室	1		0.1		
32	加速器大厅西墙 外约 14.5m	0.08	医护办公 室	1	1000	0.08	公众	
33	高能线爬升段区 迷道墙外 30cm	0.02	医护女卫	1/20		<0.01		
34	高能线爬升段区 迷道门外 30cm	0.05	走廊	1/5		0.01		
35	高能线爬升段区 西墙外 30cm	0.02	CT 操作 间	1		0.02		
36	4 号治疗室北墙 外 30cm	0.18	女卫	1/20		250		<0.01
37	4 号治疗室西墙 外 30cm	0.1	通道	1/5				<0.01
38	4 号治疗室南墙 外 30cm	0.1	室外绿化	1/40				<0.01
39	4 号治疗室东墙 外 30cm	0.05						<0.01

40		高能线爬升段区	0.06			1000	<0.01	
41		东墙外 30cm	0.04				<0.01	
42		高能线爬升段区	0.1	电源间	1/40		<0.01	
43		加速器大厅顶外	≤0.01	模具制作	1		≤0.01	
44		30cm	≤0.01	室外绿化	1/40		<0.01	
46		重离子医学大楼	≤0.01	CT 室	1/2		<0.01	
47		北墙外 4m	≤0.01	咨询办公	1		<0.01	
48	二层	4 号治疗室北侧	≤0.01			250	<0.01	
48		6.8m	≤0.01				<0.01	
48		4 号治疗室西墙	0.08	走廊	1/5	<0.01		
48		外 30cm	0.08	走廊	1/5	<0.01		
49		高能线爬升段区	≤0.01	电源间	1/40	1000	<0.01	
49		西墙外 30cm	≤0.01	电源间	1/40	1000	<0.01	
50		4 号治疗室北墙	0.2	空调机房	1/40	250	<0.01	
50		外 30cm	0.2	空调机房	1/40	250	<0.01	
51		高能线爬升段区	0.05	工艺高低	1/40	1000	<0.01	
51		北墙外 30cm	0.05	压配电间	1/40		<0.01	
52		高能线爬升段区	≤0.01	屋外冷却	1/20	1000	<0.01	
52		顶外 30cm	≤0.01	塔	1/20	1000	<0.01	
53	屋面层	4 号治疗室顶外	2	屋面绿化	1/20	250	0.03	/
53		30cm	2				0.10	/
54			8.1					
55		4 号治疗室顶外	0.17	走廊	1/4		0.01	公众
55		西侧	0.17	走廊	1/4		0.01	公众

注：①加速器大厅、高能线爬升段区总照射时间最大为 1000h，共 4 个治疗室，每间治疗室照射时间约 250h；

②点位 15、18-19、22-24、28-29 均为一个治疗室对另一个治疗室的辐射剂量关注点，这些点位中剂量率最大的为点位 29，理论估算时选取该点位为代表进行估算；

③一个治疗室内开展放射治疗时，其相邻治疗室一般无人停留，医生在间隔的治疗室内进行摆位等准备工作，居留因子取 1/16。

根据表 5.2-3 估算结果可知，本项目 HIMM 正常运行所致辐射工作人员最大年有效剂量为 0.18mSv，所致公众最大年有效剂量为 0.08mSv，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和本项目管理目标（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）的剂量限值要求。

5.2.2 放射性流出物辐射影响分析

5.2.1.1 感生放射性气体

本次评价中仅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 HIMM 在正常运行情况下，加速器大厅、高能线爬升段区不进行通

风换气，以使加速器大厅、高能线爬升段区空气中产生的感生放射性核素自然衰变消减，不排入外环境；在正常工况下，工作人员也不进入加速器大厅、高能线爬升段区，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；4间治疗室在正常工况下，将持续通风，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。

根据本报告 3.3.2.2 章节，感生放射性废气对人体的危害主要考虑 β 、 γ 气体浸没外照射和吸入引起的内照射，一般只需考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种放射性核素的辐射影响。

(1) 感生放射性气体源项

根据本报告 3.3.2.2 章节中感生放射性源项保守计算可知：HIMM 连续运行一个月后，空气中的感生放射性在加速器停机后总活度为 $7.91 \times 10^5 \text{Bq}$ ，平均比活度为 $4.08 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^3$ 。作为保守估算，一年运行 7 次，每次连续运行一个月，则一年向空气中排放的总放射性最大为 $5.537 \times 10^6 \text{Bq}$ 。

根据保守假设，本项目 HIMM 每年最大束流时间为 5040h，假设加速器运行时机房内生成的感生放射性核素由机房通风系统全部排入外环境，保守不考虑核素的放射性衰变，则本项目放射性核素的年平均排放速率为 0.305Bq/s ，理论估算时保守假设排放的放射性核素均为 ^{11}C 或 ^{13}N 或 ^{15}O 或 ^{41}Ar 。

(2) 感生放射性气体环境影响预测

为了评价该部分气体外排对外环境的辐射影响，本报告使用《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》中简单稀释模式进行预测，该模式适用于小型核设施或核技术应用实验室。

本项目 HIMM 机房通风系统的排气筒出口拟高出所在建筑物屋顶 2m（排气筒口离地高度 H 约为 22m），废气排放高度不大于周围最高建筑物（医院 2 号病房大楼，高约 59.38m）高度的 2.5 倍，且接收点不在释放点所在建筑物表面。根据《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》，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

筑物的最大截面积)。对于本项目, 排放口周围对大气扩散影响最大的建筑物为项目西北侧约 125m 处的医院 2 号病房大楼, 其最大截面积约为 7642m^2 , $2.5\sqrt{A_B}$ 约为 218m, 即当计算点的距离小于或等于 218m 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如下:

$$C_A = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_B k} \quad \dots\dots (\text{式 } 5.2-3)$$

式中:

C_A —下风向 x (m) 距离处的核素的地面空气浓度, Bq/m^3 ;

P_p —一年中风吹向接收点所在扇形方位 p 的时间份额, 无量纲, 参考《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式的参数》取 0.25;

Q_i —放射性核素 i 的年均排放率, Bq/s , 本项目取 $0.305\text{Bq}/\text{s}$;

u_a —在释放高度上年平均风速, m/s , 参考《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式的参数》取 $2.0\text{m}/\text{s}$;

H_B —邻近最高建筑物的高度, m , 本项目为 59.38m ;

K —经验常数, m , 取 $K=1\text{m}$ 。

II. 当 $x > 2.5\sqrt{A_B}$ 时, 即当计算点的距离大于 218m 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:

$$C_A = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \quad \dots\dots (\text{式 } 5.2-4)$$

$$B = \frac{12}{\sqrt{2\pi^3}} \times \frac{1}{x \sum Z} \quad \dots\dots (\text{式 } 5.2-5)$$

$$\sum Z = (\sigma_z^2 + \frac{A_B}{\pi})^{0.5} \quad \dots\dots (\text{式 } 5.2-6)$$

式中:

B —在下风距离 x 处的高斯扩散因子, $1/\text{m}^2$;

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。

本项目 H 为约 22m , 参考《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式的参数》, 当 $H \leq 45\text{m}$ 时, 扩散参数 $\sigma_z = 0.06x / (1 + 0.0015x)^{0.5}$

根据以上公式, 本项目 HMM 运行产生的感生放射性气体排入外环境, 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 5.2-4。

表 5.2-4 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)	¹¹ C、 ¹³ N、 ¹⁵ O、 ⁴¹ Ar
≤218	2.04×10 ⁻⁴
220	5.22×10 ⁻⁶
250	4.56×10 ⁻⁶
300	3.76×10 ⁻⁶
350	3.18×10 ⁻⁶
400	2.75×10 ⁻⁶
450	2.41×10 ⁻⁶
500	2.14×10 ⁻⁶
550	1.92×10 ⁻⁶
600	1.73×10 ⁻⁶

(3) 对公众所致剂量估算

由于本项目 HMM 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，因此主要考虑空气浸没外照射途径所致公众剂量。

空气浸没外照射剂量按下式估算：

$$D_s^{im}(x) = T \cdot C_s(x) \cdot DRF_{im} \quad \dots\dots \text{(式 5.2-7)}$$

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 5040h，即 1.8×10^7 s；

$C_s(x)$ —S 风向、下风距离 x 处扇形段平均地面浓度(Bq/m³)

DRF_{im} —放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，¹¹C 为 4.89×10^{-14} Sv·m³/(Bq·s)、¹³N 为 4.90×10^{-14} Sv·m³/(Bq·s)、¹⁵O 为 4.91×10^{-14} Sv·m³/(Bq·s)、⁴¹Ar 为 6.50×10^{-14} Sv·m³/(Bq·s)

根据上式可计算出本项目 HMM 运行所产生的感生放射性核素 ¹¹C、¹³N、

^{15}O 和 ^{41}Ar 排放进入环境所致公众最大剂量为 $2.39 \times 10^{-7} \text{mSv/a}$ ，对公众的辐射影响很小。

5.2.1.2 感生放射性废水

HIMM 正常运行工况下，工艺水系统管路内冷却水循环使用不外排，不产生感生放射性废水。事故工况下，若管路泄漏，将产生感生放射性废水。

泄漏的感生放射性废水将按 1% 坡度通过排水地沟、地漏通过自留的方式汇集到一级收集池，通过溢流孔排放到二级收集池，经衰变满足要求后通过污水提升装置排放至医院污水处理系统。

本项目事故收集池的容量能够满足最大冷却水单元泄漏的收集暂存需求。

根据 3.3-9、3.3-10 估算结果，排放的冷却水经一定时间暂存后，短半衰期核素的活度将很快降低，需考虑的主要是半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 核素，本项目感生放射性废水在排放前应进行监测，经监测满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）中总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10Bq/L 要求后，方能按要求排放至医院污水管网。落实后，放射性废水排放对周围环境影响较小。

5.2.1.3 感生放射性固废

本项目 HIMM 运行过程中产生的感生放射性固废分类收集后暂存于放射性固废储存间，经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中解控标准的放射性固废作为一般医疗废物处理，对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。

根据《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ 133-2009）中相关要求，本项目放射性固废在加速器大厅内临时贮存期间应按照《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ 133-2009）中相关要求采取相应的辐射安全和管理措施，经认真落实后，本项目放射性固废处置措施能够满足处理处置要求，可避免放射性固废对工作人员和公众造成不必要的照射。

5.3 事故影响分析

5.3.1 可能发生的风险事件

根据本项目 HIMM 的工作原理、工作流程等，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 HIMM 工作过程中潜在事故（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	人员误入正在开展治疗的治疗室	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	人员误入正在运行的加速器大厅或高能线爬升段区	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	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。	增加工作人员和公众不必要的照射	①立即停止出束，对通风系统进行检查、维修； ②检查风机，若发生故障，立即维修或更换。	①加强检查和监测； ②定期对风机进行检查； ③设置备用风机和备用电源； ④加强管理和培训。
4	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余量； 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。

5.3.2 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，通过对 HIMM 机房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。

(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等辐射工作场所。

(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、高能线爬升段区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。

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；误入人员距治疗终端等中心处 3m，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（医疗照射时最大剂量率为 1Gy/min）；则误入人员身体局部（或某器官）受到的辐射剂量为约 0.6Gy。

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；受照时间按一次治疗照射时间 5min 计；距碳离子束流损失点 0.5m 处中子场辐射剂量按最大 0.31Gy/h 计；则误入人员受到的全身照射剂量为 25.8mGy。

(3) 事故后果评价

本项目若发生误入事故，人员误入治疗室或误入加速器大厅或误入高能线爬升段区，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》的规定，本项目若发生重离子治疗加速器治疗终端误入的情况，可导致发生重大辐射事故；误入加速器大厅或高能线爬升段区，则可能发生一般辐射事故。

5.3.3 应急响应

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》、《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》等相关规

定，项目单位应根据可能发生的辐射事故风险，制订完善的辐射事故应急预案。

浙江省肿瘤医院应补充完善现有辐射事故应急预案，主要内容应包括：目的、适用范围、事故分级、组织体系、预警工作、信息报送、应急响应、应急监测、应急通报、应急通信、后期处置和应急保障等。

第六章 辐射安全管理

6.1 机构与人员

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规要求，使用 I 类射线装置的单位应设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作；辐射工作人员必须通过辐射防护和安全专业知识及相关法律法规的培训和考核。

医院目前已成立专门的辐射安全管理委员会，并以文件形式明确了管理人员职责。

辐射安全和防护管理领导小组的主要职责是：

(1) 根据国家法律、行业规范、医院概况与发展要求，审核医院辐射安全管理工作计划；

(2) 审核医院辐射安全管理各部门分工职责；审核医院辐射安全管理各项工作制度和流程；

(3) 协调和完善各部门（科室）辐射安全管理工作；

(4) 监督委员会年度工作计划的落实；

(5) 接受卫生健康、生态环境等监管部门的督查，对督查结果进行总结反馈，落实整改及持续改进工作。

医院现有辐射工作人员 340 人，主要分布在放疗科、介入放射科、放射物理科、核医学科的各个岗位上，包括放射治疗医生、物理师、技术员、工程师，介入放射科医生、技师，核医学科医生、技师等放射工作岗位。本项目所需辐射工作人员主要从现有人员中调配，同时将根据需要新增部分辐射工作人员。现有辐射工作人员均参加了放射诊疗培训，考核合格后持证上岗，新增人员上岗前均应按照法律法规要求参加辐射防护和安全专业知识及相关法律法规的培训和考核，考核合格后上岗。根据《关于开展医疗机构辐射安全许可和放射诊疗许可办事流程优化工作的通知》（浙环函〔2019〕248 号），各单位对辐射工作人员的辐射安全与防护培训或放射诊疗培训互相认可，医院辐射工作人员可无需重复培训。

根据《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》，使用 I 类射线装置单位，应设置辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，最

少在岗人数 1 名,浙江省肿瘤医院应配备至少 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人。

实际工作过程中,医院应不断加强对辐射工作人员有关专业技能和辐射安全与防护知识的再学习或教育,进一步提高工作过程中的辐射安全意识。环评建议医院配备部分有相关工作经验的辐射工作人员以老带新,防止出现辐射事故。

6.2 辐射安全管理规章制度

浙江省肿瘤医院已制订医院现有放射性同位素与射线装置安全和防护的各项规章制度、放射防护安全的应急预案等综合管理规章制度,同时,各相关科室根据各自特点,制定了相应的操作规程、岗位职责、应急预案、辐射防护制度、设备检修维护制度、台账管理制度等。

医院制定的辐射安全管理规章制度较完备且具有一定的可行性,医院能够按照规章制度对医院的辐射工作进行管理,辐射工作人员也能够按照各项规章制度开展工作。

浙江省肿瘤医院应根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等相关法律法规要求,针对本项目特点,对现有的辐射安全管理制度进行补充和完善,使其具有较强的针对性和可操作性,现对医院应补充和完善的辐射安全管理制度的重点总结如下:

(1) 重离子治疗系统安全操作规程

补充制定《重离子治疗系统安全操作规程》,应包括加速器系统、治疗系统等项目相关的具体安全操作规程,明确项目辐射工作人员的资质条件要求、操作过程中应采取的具体防护措施及具体操作步骤,操作人员必须按操作规程进行操作,并做好个人防护,操作规程张贴在操作人员可看到的显眼位置。

(2) 辐射防护和安全保卫制度

根据本项目的具体情况补充完善辐射防护和安全保卫制度,重点是:①定期检查相关的辐射安全装置及检测仪器,发现问题及时修理或更换,确保辐射安全装置、个人剂量报警仪、环境辐射剂量监测仪等保持良好工作状态;②辐射工作人员定期开展个人剂量检测和职业健康监护,并建立个人剂量档案;③指定专人负责放射性药物的交接工作,防止放射性药物被盗、丢失;④做好辐射工作场所的安全保卫工作,并定期检查。

(3) 设备检修维护制度

补充完善设备检修维护制度，重点是：明确设备检修维护具体人员，补充本项目相关辐射安全与防护设施以及辐射监测设备维修计划、维修的记录、在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施等，确保辐射安全与防护设施以及剂量报警仪等仪器设备保持良好工作状态。

(4) 射线装置使用登记制度

补充完善射线装置使用登记制度，建立本项目射线装置的档案、台账，使用射线装置均应进行登记、检查，做到帐物相符。

(5) 人员培训计划

补充完善人员培训计划，进一步明确培训对象、内容、周期、方式以及考核的办法等内容，并强调对培训档案的管理，做到有据可查。

(6) 岗位职责

补充完善岗位职责，明确设置辐射安全关键岗位一个，应配备至少 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，并明确其管理职责；明确本项目管理人员、辐射工作人员、维修维护人员等相关人员的岗位责任，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任，并层层落实。

(7) 个人剂量监测方案

补充完善个人剂量监测方案，进一步明确辐射工作人员开展辐射工作时均应佩戴个人剂量计，个人剂量计定期送有资质部门进行监测，医院明确个人剂量计的佩戴和监测周期，个人剂量监测结果及时告知辐射工作人员，使其了解其个人剂量情况，以个人剂量检测报告为依据，严格控制职业人员受照剂量，防止个人剂量超标；明确辐射工作人员进行职业健康体检的周期，医院建立个人累积剂量和职业健康体检档案。

(8) 辐射环境监测方案

补充完善辐射环境监测方案，针对本项目辐射监测需要，补充购置监测设备，明确日常工作的监测项目和监测频次，监测结果应妥善保存并记录档案。此外，根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》中相关要求，本项目运行后，医院应当编写包括本项目射线装置使用的安全和防护状况年度评估报告，于每年 1 月 31 日前提交上一年度的评估报告。

(9) 放射性三废管理制度

针对本项目可能产生的感生放射性三废，补充制定放射性三废管理制度，重

点是：①应针对感生放射性固废，制定废物档案和出入放射性固废储存间登记与双人双锁管理制度；②明确放射性三废的收集、暂存、处理等应严格按照《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ 133-2009）要求进行。

（10）质量保证大纲和质量控制检测制度

针对本项目重离子治疗系统制定项目质量保证大纲和质量控制检测制度，配备质量控制检测设备，制定相应的质量保证大纲和质量控制检测计划，至少有一名医用物理人员负责质量保证与质量控制检测工作。

6.3 辐射监测

HIMM 装置在运行过程中，束流损失使重离子与物质相互作用，通过低能、中能核反应以及高能核反应产生中子。由于以上反应机制和带电粒子束流以脉冲形式加速，加速器周围的辐射具有以下特征：（1）是一个脉冲辐射场。由于带电粒子束流以脉冲形式加速的，在其周围形成一个脉冲辐射场。无论是在屏蔽内还是在屏蔽外，其辐射场的时间结构都与初级束流的时间特性密切相关，它的特性决定于束流的占空比。（2）具有能量大于 20MeV 的中子和光子，产生的中子最高能量可达 800MeV。（3）周围环境中的杂散辐射剂量中主要贡献是中子，其次是 γ 射线，中子在辐射场中的贡献比 γ 射线高一个数量级以上。（4）是一个瞬发中子、光子以及其他粒子构成的混合辐射场。加速器运行过程中产生的中子和 γ 射线，是辐射屏蔽的主要对象，也是加速器对环境造成影响的主要来源。加速器停机后的主要辐射是材料活化后产生的 γ 射线，能量比较低，这些感生放射性是工作人员所受辐射的主要来源。

辐射监测系统的主要功能是确定参考点的辐射水平，测定加速器的工作场所和周围环境中的辐射水平，保证工作人员和公众的安全，并为安全连锁系统提供辐射水平信号；验证屏蔽措施的可靠性，防治辐射泄露造成环境污染。其监测内容包括工作场所监测、环境辐射监测，个人剂量监测三方面。

6.3.1 工作场所辐射监测系统

在加速器辐射剂量监测中，要求探测器对脉冲辐射场性能良好、能实时监测、同时稳定可靠。中子监测器采用包裹了慢化体的 $\text{He}3$ 中子探测器（宽能中子蕾姆仪），伽马监测器采用圆柱形电离室作为探测器。根据 HIMM 辐射场的特点，本项目拟设置工作场所辐射监测系统，其系统结构如图 6.3-1 所示。

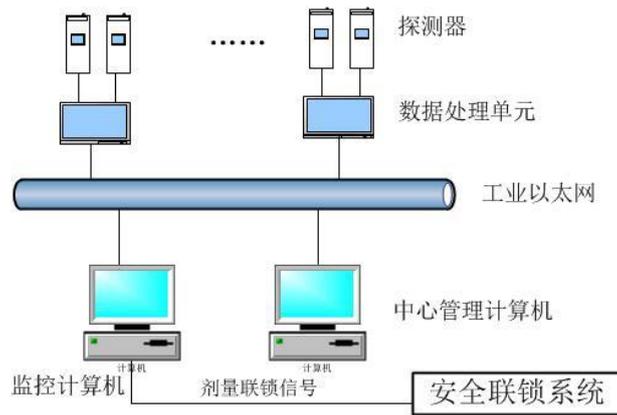
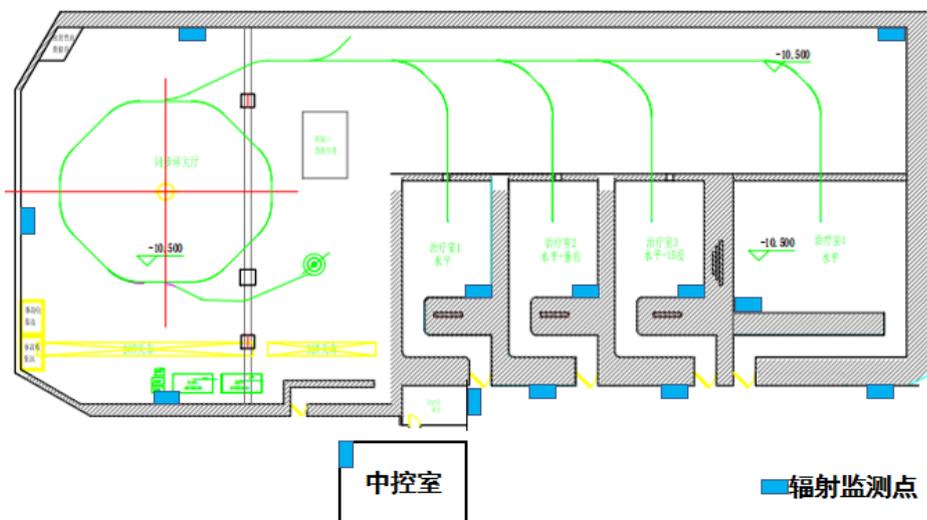


图 6.3-1 HIMM 工作场所辐射监测系统结构

根据加速器的辐射分区及特征拟布置 14 个辐射监测点，如图 6.3-2 所示。每个监测点由一台中子探测器和一台 γ 探测器组成。根据各监测点剂量水平和中子能量选择不同灵敏度的辐射探测器。设置工作场所辐射监测系统

区域辐射监测系统由探测器、数据采集单元、内部局域网、监控计算机、中心管理计算机与辐射防护数据库组成。探测器用于测量辐射水平；数据采集单元用于采集探测器的输出信号和完成信号的加权处理、剂量率显示、本地报警及通讯；内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；监控计算机用于完成监测数据的日常分析与管理，监管探测器的工作状态，向辐射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剂量监测数据；辐射防护数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据，包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型(γ /中子)。



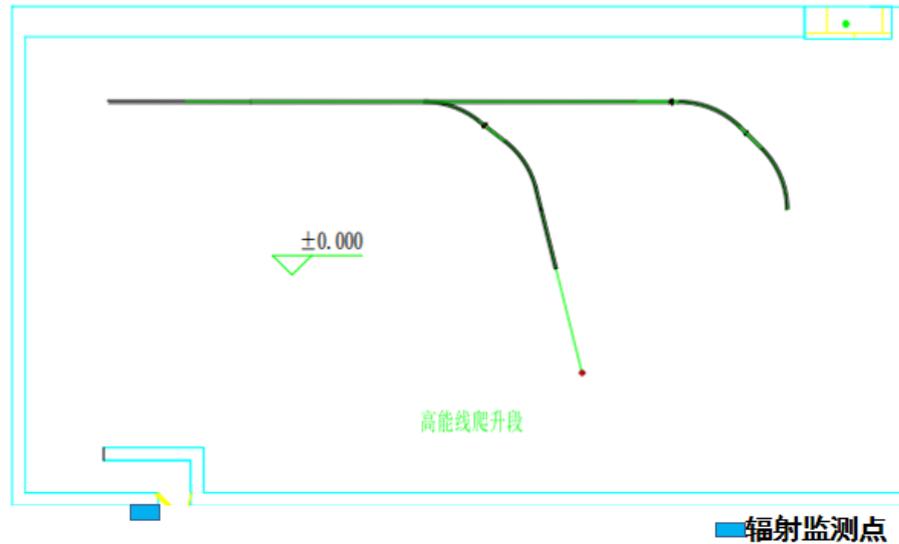


图 6.3-2 区域辐射监测点分布图

区域辐射监测系统软件具有以下功能：

- (1) 数据保存功能：对监测数据在数据库中长期保存；
- (2) 数据查询功能：对监测数据以时间区间可查询；
- (3) 数据统计功能：对各通道的剂量监测数据进行周、月、年的累积剂量、平均剂量率、最大值、最小值等信息的统计报表；
- (4) 实时显示功能：各通道的剂量实时显示；
- (5) 作图功能：以曲线图形直观地显示各个探测器的剂量率随时间的变化；
- (6) 参数设置：设置各个探测器的刻度系数和报警阈值；
- (7) 报警功能：对超过报警阈值的监测点在显示界面给出颜色提示。

6.3.2 环境辐射监测系统

环境辐射监测系统用于测量穿过屏蔽后泄漏到环境中的中子、 γ 辐射水平。在加速器主体建筑周围拟设置若干监测站，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。

环境辐射监测系统的组成如图 6.3-3 所示，系统由若干现场监测子站和一个数据处理服务器组成。现场监测子站的主要任务包括：对环境 γ 辐射剂量率进行连续监测；存储监测数据；通过有线或无线通讯设备向数据处理中心实时传输数据。数据处理服务器的主要任务包括：收集各现场监测子站的监测数据和设备工作状态信息，并对所收取得监测数据进行判别、检查和存储；对采集的监测数据进行统计处理、分析、显示、报表；向上级数据处理中心发送监测数据。现场监测子站主要是由辐射监测仪器、气象仪器、就地二次仪表、数据传输设备及其配

套设备等组成。

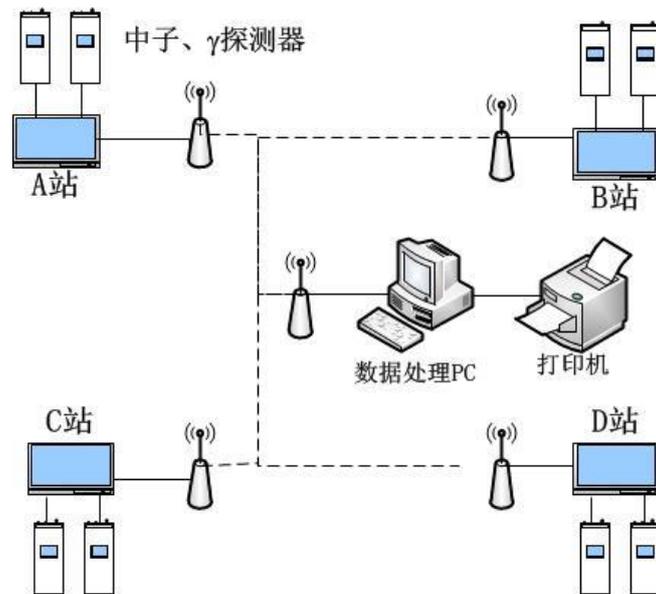


图 6.3-3 环境辐射监测系统组成

此外，医院将定期（不少于 1 次/年）委托有资质单位对本项目辐射工作场所周围环境 neutrons 和 γ 辐射水平进行年度监测。

6.3.3 个人剂量监测系统

个人剂量监测分为两部分，一部分是与出入控制系统相联系的个人剂量监测，也即每次人员从辐射区内出来时自动读取此次在辐射区逗留期间所受剂量。另一部分是辐射工作人员的热释光个人剂量监测，这项监测将委托有资质的机构完成，检测周期为不低于 1 次/三个月。与出入控制系统联系的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。进入加速器大厅的人员将电子式个人剂量计佩戴在胸前，它能给出工作人员受照剂量及在控制区内的累计工作时间情况。人员进入时剂量计读出器可对剂量计进行初始化（将剂量计复位到零），储存复位后的剂量计信息，包括身份磁卡号、剂量计号；人员离开时剂量计读出器读取并存储剂量计信息，包括剂量计编号、身份磁卡号、累积剂量、时间等数据信息。身份磁卡读出器用于人员身份的识别。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。

6.3.4 辐射监测系统与安全联锁系统的接口

辐射监测系统与安全联锁系统的接口包括工作场所辐射监测系统与安全联锁系统的接口和个人剂量监测系统与安全联锁系统的接口。相关的接口主要由软

件完成，包括通讯协议。信息的通信在内部控制网上进行。

当辐射控制区相关大厅内的探测器超过给定阈值后，向安全连锁系统发出报警信息，信息包括探测器位置编号和大厅编号，由安全连锁系统阻止人员进入相关辐射区。

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。

6.3.5 监测质量保证

①制定监测仪表使用、校验管理制度，并利用监测部门的监测数据与本单位监测仪器的监测数据进行比对，建立监测仪器比对档案；也可到有资质的单位对监测仪器进行校核；

②采用的国家颁布的标准方法或推荐方法，其中自我监测可参照有资质的监测机构出具的监测报告中的方法；

③制定辐射环境监测管理制度和方案。

此外，医院需定期和不定期对辐射工作场所进行监测，随时掌握辐射工作场所剂量变化情况，发现问题及时维护、整改。做好监测数据的审核，制定相应的报送程序，监测数据及报送情况存档备查。

6.4 辐射事故应急

浙江省肿瘤医院已成立放射防护委员会作为放射事故应急处理组织，委员会主要负责放射安全和防护工作，确保项目安全运行；已针对现有核技术利用项目制订辐射事故应急预案，其还应针对本项目特点以及可能发生的辐射事故，对现有应急预案进行补充完善，明确本项目辐射事故类型、事故应急响应程序、事故上报、应急终止及后续改进、应急培训演练、应急预案修订等方面内容；同时医院应加强管理，加强职工辐射防护知识的培训，学习结束后应进行总结，积极开展辐射应急演习，发现问题及时解决，并在实际工作中不断完善辐射安全管理制度，尽可能避免辐射事故的发生，还应经常监测辐射工作场所的环境辐射剂量率等，确保辐射工作安全有效运转。

当发生或发现辐射事故后，医院应立即启动本单位的辐射事故应急措施，采取必要防范措施，并在规定时间内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门和卫生健康主管部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。

第七章 利益-代价简要分析

7.1 利益分析

7.1.1 社会效益

重离子治癌的优势不仅仅在于疗效高、副作用小、节约了社会医疗总支出，还在于重离子为以神经系统肿瘤、复发性肿瘤等为代表的很多绝境癌症患者提供了生存乃至治愈的可能，大力推广重离子治疗应用，有望多挽救数百万患者的生命。可见，有无重离子，关系学术、技术和经济，更关乎家庭和谐、社会稳定，具有广泛的社会效益。是践行“四个有利于”指示的直接体现。

医用重离子源可直接协同国家战略 ADS 嬗变系统，带动能源、医疗、生物、电子、信息、影像等众多高新科技学科发展乃至变革，贡献国防与国民经济重大基础。尤其在当前复杂多变的国际政治经济格局下，以重离子医疗引领的多维度创新，是全方位打破国际垄断、增强国家实力、提升我国国际竞争力的绝佳助力。

项目影响杭州市各级政府及广大的肿瘤及癌症患者是项目的直接受益者，项目影响区域疾病预防和控制的状况将得到极大的改善，有利于社会与经济的发展，有利于提高项目影响区域人民的生活水平，改善人民的生活环境和区域的投资环境，因此，得到省、市、县、乡镇各级政府的积极支持，当地居民积极的参与项目的实施，项目所在地的社会环境、人文条件适应项目的建设与发展。

该项目社会效益极其显著，有利于繁荣地方经济，取得较大的社会经济效益，有利于扩大就业，促进社会综合事业的发展，有利于提高项目影响区域人民群众的身体健康，改善人民的生活环境，有利于改善当地人文环境，提高文化教育水平和当地人民卫生事业健康水平，有效控制人口增长，使项目影响区域广大群众和四级地方政府直接受益。项目在施工中和运营中对环境带来的一定污染，采取积极有效的措施后是可以得到妥善解决的。项目所在地的社会环境、人文条件适应项目的建设与发展，项目的社会效益良好。

7.1.2 经济效益

(1) 收入分析

重离子中心收费暂定按 27.8 万元/例计算（固定），满负荷床位保守按 800 例/年计算，计算期内第 1 年按 70%比例的床位计算，第 2 年按 80%比例的床位计算，第 3 年按 90%比例的床位计算，第 4 年及以后按 98%比例的床位计算。

根据以上数据，重离子中心第 1 年收入为 15568 万元，第 2 年收入为 17792 万元，第 3 年收入为 20016 万元，第 4 年及以后每年收入为 21795.2 万元。

(2) 成本分析

①年运营费用：当年总收入的 15%计算。年运营费用包括的水电费、维修费、不可预见费用（包括医疗风险基金等其它费用）。

②人员工资及福利费：按当年收入的 3%计算。

③折旧费：据财务制度规定，项目固定资产折旧采用平均年限法计算，建筑物和公用工程按 30 年折旧，设备按 10 年折旧，残值率均为 5%。

(3) 税金及附加

①房产税税率：1.2%。

②所得税税率：25%。

③城市维护建设税：7%。

④教育费附加及地方教育附加：5%。

⑤交易印花税：5%。

(4) 经济效益分析结论

依据上述分析数据，看完推断出本项目的经济效益基本情况，详见下表：

表 7.1-1 经济效益分析表 单位：万元

费用	计算期第 1 年	计算期第 2 年	计算期第 3 年	计算期第 4 年	计算期第 5 年
收入	15568.00	17792.00	20016.00	21795.20	21795.20
年运营费用	2335.20	2668.80	3002.40	3269.30	3269.30
工资福利	467.04	533.76	600.48	653.86	653.86
增值税	0.00	0.00	112.10	1048.60	1985.10
城市维护建设税	0.00	0.00	7.80	73.40	139.00
教育费附加及地方教育附加	0.00	0.00	5.60	52.40	99.30
交易印花税	778.40	889.60	1000.80	1089.80	1089.80
房产税	185.00	185.00	185.00	185.00	185.00
企业所得税	0.00	0.00	3681.20	4019.20	3756.90

折旧	697.60	697.60	697.60	697.60	697.60
净利润	11104.76	12817.24	10723.02	10706.04	9919.34

经测算，项目每年有结余的净利润，项目本身能够维持正常运营。因此，项目财务上是可行的。

7.1.3 环境效益

本项目重离子医学中心大楼立面设计统一考虑材质和色调，注重普通材料的运用和处理，挖掘普通材料的个性和特点，既追求品位又考虑经济性，既节约投资又不失独特性。建筑风格简洁大方，体现医疗建筑的现代感和科技感，同时考虑与院区建筑及周边绿化环境协调统一，相互映衬，形成良好的医院整体形象。

总体立面统一考虑材质和色调，注重普通材料的运用和处理，挖掘普通材料的个性和特点，既追求品位又考虑经济性，既节约投资又不失独特性。建筑风格简洁大方，又不失时代感，与院区已经建成的一期、即将建设的二期及周边绿化环境融为一体，相互映衬，形成美好的建筑整体形象。在立面上秉承和谐建筑的总体构思，建筑群体高低错落，强调水平和竖向关系对比。

院区内绿化景观设计注重生态环境和环境保护，突出以人为本的思想，树立良好的社会形象。总体布局体现内涵丰富的文化底蕴和内涵，处处透露以人为本的风格，设计力求多层次、高品位，从耐看、可评、有趣多方面展开，共同构筑景观架构。尽量保留现有树木，搭配四季皆有景的花草乔灌木，形成高品质兼具观赏性和活动性的园林式工作环境。建筑屋顶部分区域设置屋面绿化，在不同层次上美化医院环境，具有一定的环境效益。

7.2 代价分析

7.2.1 社会代价

社会代价主要考虑三个方面，一是占用一定的土地资源；二是消耗一定量的能源；三是产生一定量的污染物进入周围环境。

本项目的建设地点位于浙江省肿瘤医院总院半山院区内，为院内医疗用地，不新增外部用地；项目建成后，由于人员和患者的增加，公共用水、用电、生活污水、医疗废水、废气的排放以及生活垃圾的产生等，都需要付出一定的社会代价。

本项目运行后，主要的环境影响为电离辐射影响、放射性三废排放影响，根

据理论估算可知，这些对环境造成的影响均低于国家标准中规定的限值，对环境现状基本无附加影响，其影响是可以接受的。

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等费用，合计投入约 5000 万元。

7.2.3 环境代价

本项目感生放射性废水经暂存衰变满足要求后作为医疗废水处理，感生放射性固废经暂存后，根据监测结果作为一般医疗固废或送有资质单位处理，对周围区域环境基本不造成影响；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。

通过模拟估算，项目运营期间所产生的感生放射性核素排放进入环境所致公众最大剂量为 $2.39 \times 10^{-7} \text{mSv/a}$ ，对公众的辐射影响很小。

7.3 正当性分析

本项目拟配置的重离子治疗系统，设计建造完善的辐射防护与安全设施来尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响完全满足国家相关标准要求，项目的建设目的是为肿瘤患者提供更优良的治疗手段，减轻患者痛苦，提高肿瘤的治愈率，最终达到治病救人的目的。本项目的建设对患者和社会所带来的利益（主要是患者的健康有利）是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术应用实施活动是正当的。

第八章 结论与建议

8.1 项目工程概况

8.1.1 建设项目规模

为满足患者的就医需求，浙江省肿瘤医院拟在总院半山院区东侧新建一栋重离子医学中心大楼，在大楼内配备1套重离子治疗系统（简称HIMM），用于肿瘤的放射治疗。该系统型号为CY-SY-4400，加速离子为 $^{12}\text{C}^{6+}$ ，治疗终端能量为120MeV/u~400 MeV/u，属于I类射线装置。

8.1.2 工艺流程

加速器系统采用全永磁结构、电子回旋共振（ECR）离子源来提供稳定可靠的 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束流，以回旋加速器作为注入器，将ECR离子源提供的 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子束能量提高到6.2MeV/u，经中能传输系统传输到同步加速器注入口，通过剥离注入，把束流剥离为 $^{12}\text{C}^{6+}$ 注入到同步加速器，然后将束流能量从6.2MeV/u加速到终端所需要的能量，引出到高能传输系统，由高能传输系统配送到终端。

8.1.3 工程设备

HIMM主要由离子源及低能传输系统、回旋加速器、中能传输系统、同步加速器、高能传输系统组成，治疗用的粒子是原子序数为6、核子数为12、核外电子全剥离的碳离子（ $^{12}\text{C}^{6+}$ ），具有被动式和主动式两种束流配送方式。配备4个治疗室，治疗终端分别是水平治疗终端、水平+垂直治疗终端、水平+45°治疗终端及水平治疗终端（后期升级为Gantry治疗终端，即旋转机架治疗终端）。

8.1.4 污染源项

HIMM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，感生放射性主要是由重离子打靶产生的次级中子引起的。在加速器运行期间，初级粒子或次级粒子与加速器部件、冷却水、加速器室内空气、加速器室内墙壁等相互作用将产生感生放射性。

8.2 辐射安全与防护

8.2.1 选址、布局合理性评价

本项目位于浙江省肿瘤医院总院半山院区，项目用地为医疗卫生用地，经过以上的自然环境、社会经济状况的调查结果可知，项目所在场址及周边无影响

项目安全稳定运行的制约性因素，本项目选址合理。

HIMM 辐射工作场所包括：加速器大厅、高能线爬升段区、1 号治疗室、2 号治疗室、3 号治疗室、4 号治疗室，各功能部分均相互独立，控制室等辅房均位于 HIMM 机房外部，满足《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）中相关要求，也能满足本项目治疗系统的布局要求，项目工作场所布局合理。

本项目工作场所按其功能拟划分为控制区和监督区，并实施分区管理，项目拟采取的分区措施满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中6.4的要求。

8.2.2 辐射防护措施评价

HIMM机房屏蔽主体为混凝土，局部使用铁进行增强屏蔽，根据理论估算可知，本项目采取的辐射防护措施能够满足辐射防护要求。

8.2.3 运行期放射性三废的治理和控制

HIMM 运行过程中将产生的感生放射性固体废物分类收集后暂存于放射性固废储存间，经监测满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中解控标准的放射性固废作为一般医疗废物处理，对于不满足解控要求的固废送有资质单位处理。

HIMM 正常运行工况下，工艺水系统管路内冷却水循环使用不外排，不产生感生放射性废水。事故工况下，若管路泄漏，将产生感生放射性废水。泄漏的感生放射性废水将按 1%坡度通过排水地沟、地漏通过自留的方式汇集到一级收集池，通过溢流孔排放到二级收集池，经衰变满足要求后通过污水提升装置排放至医院污水处理系统。

HIMM运行过程中产生的感生放射性气体，均需通过通风系统初效（G4）、中效（F8）两级过滤进行过滤后，在相对集中位置经高位烟囱（高出所在屋面2m，离地高度约22m）在下风向处排放。

本项目放射性废物收集和处理方法基本合理，放射性废物处置得当，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ133-2009）中相关要求。

通过模拟估算，项目运营期间所产生的感生放射性核素排放进入环境所致公众最大剂量为 $2.39 \times 10^{-7} \text{mSv/a}$ ，对公众的辐射影响很小。

8.2.4 施工期污染防治措施

本项目为新建项目，加速器大厅等建设施工时会产生废气、扬尘、噪声、固体废物以及废水等污染物。医院应采取相应的防治措施，如：对施工现场搅拌站废水等经沉淀后排放或回收利用、设置围墙或围挡将工地与外界分隔开、建设中采用低噪声的施工工艺、对施工现场的建筑垃圾及时清运并加以利用等等，医院在施工阶段经采取相关污染防治措施后，施工期对周围环境影响较小。

施工期对环境产生的影响均为暂时的、可逆的，且随着施工期结束，固废及废水在施工期间内妥善处置，施工期产生的扬尘、噪声等方面的影响将随着施工结束会自行消除。

8.2.5 辐射安全措施评价

本项目拟设置人身安全联锁系统，通过PLC控制系统，建立加速器运行状态、人员出入情况及各联锁部件之间的逻辑关系。在加速器运行时，任一可能引起辐射事故的联锁条件改变都将产生一个中断加速器束流的联锁信号，中断所在区域的束流，避免产生误照射；同时拟设置警报装置、通风系统、观察装置等其他辐射安全措施，项目拟设置的辐射安全措施能够满足本项目的辐射安全需要。

8.3 环境影响分析

8.3.1 辐射环境影响分析

根据理论预测可知，4个治疗室之间隔墙外30cm处辐射剂量率最大为 $9\mu\text{Sv/h}$ ，加速器大厅、高能线爬升段区、4个治疗室顶外30cm处辐射剂量率最大为 $8.1\mu\text{Sv/h}$ ，加速器大厅、高能线爬升段区、4个治疗室墙体（治疗室之间隔墙除外）及迷道门外30cm人员可居留处辐射剂量率最大为 $1.312\mu\text{Sv/h}$ ，能够满足本项目辐射剂量率控制目标要求。

根据理论估算结果可知，医院在做好安全防护措施的情况下，本项目投入运行后辐射工作人员和周围公众年有效剂量能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和本项目管理目标（职业人员年有效剂量不超过 5mSv ，公众年有效剂量不超过 0.1mSv ）的剂量限值要求。

对于紧贴土壤的屏蔽体，屏蔽体外的辐射剂量率最大为 $200\mu\text{Sv/h}$ ，参考日本J-PARC的相关设计，对于紧贴土壤的屏蔽体，若屏蔽体外剂量率不大于 5mSv/h ，可不考虑其对土壤、地下水的活化影响。

8.3.2 非放环境影响分析

与辐射相关的非放射性污染因素方面，主要考虑HIMM辐射工作场所的空气在电离辐射作用下可能会产生的少量臭氧、氮氧化物等污染空气的有害气体。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HIMM，臭氧及氮氧化物的问题可以不用考虑。

此外，医院已委托有资质的环评机构对重离子医学中心大楼建设项目（非辐射类）进行环境影响评价，本报告不再重复评价与辐射无关的非放环境影响。

8.4 辐射安全管理

医院目前已成立专门的辐射安全管理委员会，并以文件形式明确了管理人员职责；医院现有辐射工作人员均参加了辐射安全和防护知识培训，考核合格后持证上岗，新增人员上岗前均拟按照法律法规要求参加辐射防护和安全专业知识及相关法律法规的培训和考核，考核合格后上岗；浙江省肿瘤医院还应配备至少1名注册核安全工程师作为辐射防护负责人；医院已针对现有核技术利用项目制定相关的辐射安全管理制度和辐射事故应急预案，其还应针对本项目对制度进行补充完善，在之后的实际工作中还应不断根据法律法规及实际情况对各管理制度和应急预案进行补充和完善。

本项目辐射监测主要分为场所、环境、个人剂量监测。场所监测主要包括设置工作场所辐射监测系统，每个监测点设置中子、 γ 探测器各一个；环境监测主要包括在加速器主体建筑周围设置若干监测站，每个站内设置中子、 γ 探测器各一个，同时医院将定期（不少于1次/年）委托有资质单位对本项目辐射工作场所周围环境中和 γ 辐射水平进行年度监测；个人剂量监测分为两部分，一部分是与出入控制系统相联系的个人剂量监测，也即每次人员从辐射区内出来时自动读取此次在辐射区逗留期间所受剂量，另一部分是辐射工作人员的热释光个人剂量监测，这项监测将委托有资质的机构完成，检测周期为不低于1次/三个月。

本项目辐射安全管理措施经落实后，能够满足项目的辐射安全管理需要。

8.5 建议和承诺

（1）项目在建造和运行过程中必须严格落实项目设计及本报告表中提出的安全防护措施和相关管理要求。

(2) 所有设备资料、射线装置台帐和监测资料等均应妥善保管, 存档备案。

(3) 项目运行中, 应严格遵循操作规程, 加强对医务人员的培训, 杜绝麻痹大意思想, 以避免意外事故造成对公众和职业人员的附加影响, 使对环境的影响降到最低。

(4) 环境影响评价文件审批完成后, 应根据有关规定及时重新申领辐射安全许可证。

(5) 建设项目竣工后, 医院应按照国务院生态环境行政主管部门规定的程序和标准, 组织对配套建设的环境保护设施进行验收, 编制验收报告, 公开相关信息, 接受社会监督, 确保建设项目需要配套建设的环境保护设施与主体工程同时投产或者使用, 并对验收内容、结论和所公开信息的真实性、准确性和完整性负责, 不得在验收过程中弄虚作假。

除需要取得排污许可证的水和大气污染防治设施外, 其他环境保护设施的验收期限一般不超过 3 个月; 需要对该类环境保护设施进行调试或者整改的, 验收期限可以适当延期, 但最长不超过 12 个月。

验收期限是指自建设项目环境保护设施竣工之日起至建设单位向社会公开验收报告之日止的时间。