

核技术利用建设项目  
兰州泰基离子技术有限公司销售（含建造）和使用小型化  
重离子治疗装置项目环境影响报告书  
（报批版）

兰州泰基离子技术有限公司

2025 年 6 月

生态环境部监制

**核技术利用建设项目**  
**兰州泰基离子技术有限公司销售（含建造）和使用小型化**  
**重离子治疗装置项目环境影响报告书**

**建设单位名称：**兰州泰基离子技术有限公司

**建设单位法人代表（签名或签章）：**马力祯

**通讯地址：**兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号

**邮政编码：**730300

**联系人：**王骏杰

**电子邮箱：**495988200@qq.com **联系电话：**18909311247

# 目录

|           |                         |           |
|-----------|-------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>概述 .....</b>         | <b>1</b>  |
| 1.1       | 项目名称、地点 .....           | 1         |
| 1.2       | 项目概况 .....              | 4         |
| 1.2.1     | 单位概况.....               | 4         |
| 1.2.2     | 项目由来和意义.....            | 11        |
| 1.2.3     | 与原有项目的依托关系.....         | 12        |
| 1.2.4     | 建设规模.....               | 13        |
| 1.2.5     | 产业政策和规划符合性分析.....       | 14        |
| 1.3       | 编制依据 .....              | 15        |
| 1.3.1     | 法律法规.....               | 15        |
| 1.3.2     | 技术导则、标准.....            | 16        |
| 1.3.3     | 其它文件、资料.....            | 17        |
| 1.4       | 评价标准 .....              | 18        |
| 1.4.1     | 剂量限值和剂量约束值.....         | 18        |
| 1.4.2     | 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 ..... | 20        |
| 1.4.3     | 评价范围.....               | 20        |
| 1.4.4     | 环境保护目标.....             | 22        |
| 1.5       | 安全责任划分 .....            | 24        |
| <b>2.</b> | <b>厂址与环境 .....</b>      | <b>26</b> |
| 2.1       | 地理位置 .....              | 26        |
| 2.2       | 自然环境状况 .....            | 27        |
| 2.2.1     | 地形地貌.....               | 27        |
| 2.2.2     | 气候气象.....               | 27        |
| 2.2.3     | 水文特征.....               | 28        |
| 2.2.4     | 地质地震.....               | 28        |
| 2.2.5     | 土壤植被.....               | 29        |
| 2.3       | 社会环境概况 .....            | 29        |
| 2.3.1     | 人口分布.....               | 29        |
| 2.3.2     | 社会发展.....               | 29        |
| 2.3.3     | 文化教育.....               | 30        |
| 2.3.4     | 医疗保障.....               | 30        |
| 2.4       | 辐射环境质量现状调查 .....        | 31        |
| 2.4.1     | 辐射环境质量现状监测与评价 .....     | 31        |
| 2.4.2     | 场址适宜性评价.....            | 39        |
| <b>3.</b> | <b>工程分析与源项 .....</b>    | <b>41</b> |
| 3.1       | 项目规模 .....              | 41        |
| 3.1.1     | 测调中心.....               | 41        |
| 3.1.2     | 用户单位.....               | 50        |
| 3.2       | 装置概况 .....              | 55        |

|           |                                              |            |
|-----------|----------------------------------------------|------------|
| 3.2.1     | 装置组成.....                                    | 55         |
| 3.2.2     | 工作原理.....                                    | 57         |
| 3.3       | 工艺流程与人员配置 .....                              | 66         |
| 3.3.1     | 测调中心内出束调试.....                               | 66         |
| 3.3.2     | 用户单位（小型化重离子治疗装置销售（含建造）、用户单位的安装调试及运行维护） ..... | 68         |
| 3.4       | 污染源项分析 .....                                 | 78         |
| 3.4.1     | 瞬发辐射源.....                                   | 78         |
| 3.4.2     | 小结.....                                      | 93         |
| <b>4.</b> | <b>辐射安全与防护 .....</b>                         | <b>94</b>  |
| 4.1       | 测调中心 .....                                   | 94         |
| 4.1.1     | 辐射工作场所分区.....                                | 94         |
| 4.1.2     | 辐射屏蔽.....                                    | 97         |
| 4.1.3     | 安全联锁系统.....                                  | 107        |
| 4.1.4     | 场所辐射监测系统.....                                | 117        |
| 4.1.5     | 通风系统.....                                    | 119        |
| 4.1.6     | 放射性三废治理.....                                 | 122        |
| 4.2       | 用户单位 .....                                   | 127        |
| 4.2.1     | 辐射工作场所分区.....                                | 127        |
| 4.2.2     | 辐射屏蔽.....                                    | 128        |
| 4.2.3     | 安全联锁系统.....                                  | 136        |
| 4.2.4     | 辐射监测系统.....                                  | 147        |
| 4.2.5     | 通风系统.....                                    | 149        |
| 4.2.6     | 工作人员剂量控制措施.....                              | 150        |
| 4.2.7     | 放射性三废治理.....                                 | 151        |
| <b>5.</b> | <b>环境影响分析 .....</b>                          | <b>154</b> |
| 5.1       | 测调中心 .....                                   | 154        |
| 5.1.1     | 安装期间的环境影响分析 .....                            | 154        |
| 5.1.2     | 正常运行时的环境影响分析.....                            | 154        |
| 5.1.3     | 公众受照剂量估算.....                                | 158        |
| 5.1.4     | 事故工况下的环境影响.....                              | 162        |
| 5.2       | 用户单位 .....                                   | 166        |
| 5.2.1     | 用户单位安装期间的环境影响分析 .....                        | 166        |
| 5.2.2     | 正常运行时的环境影响分析.....                            | 166        |
| 5.2.3     | 事故工况下的环境影响.....                              | 172        |
| 5.3       | 本项目工作人员受照剂量小结.....                           | 172        |
| <b>6.</b> | <b>辐射安全管理 .....</b>                          | <b>174</b> |
| 6.1       | 辐射安全与环境保护管理机构.....                           | 174        |
| 6.2       | 辐射工作人员管理 .....                               | 175        |
| 6.3       | 辐射安全管理制度 .....                               | 176        |
| 6.4       | 辐射监测 .....                                   | 176        |
| 6.4.1     | 测调中心.....                                    | 176        |

|           |                      |            |
|-----------|----------------------|------------|
| 6.4.2     | 用户单位.....            | 179        |
| 6.4.3     | 个人剂量监测.....          | 180        |
| 6.5       | 监测设备 .....           | 180        |
| 6.6       | 环保投资及竣工验收一览表.....    | 181        |
| 6.7       | 申请者从事辐射工作能力评价.....   | 184        |
| 6.7.1     | 辐射安全与环境保护管理.....     | 184        |
| 6.7.2     | 辐射工作人员培训.....        | 185        |
| 6.7.3     | 工作场所的安全防护措施.....     | 185        |
| 6.7.4     | 个人防护用品及监测仪器.....     | 186        |
| 6.7.5     | 规章制度.....            | 187        |
| 6.7.6     | 辐射事故应急预案.....        | 187        |
| 6.7.7     | 对用户单位的要求.....        | 188        |
| 6.7.8     | 辐射工作能力综合评价.....      | 188        |
| <b>7.</b> | <b>利益-代价分析 .....</b> | <b>189</b> |
| 7.1       | 利益分析 .....           | 189        |
| 7.2       | 代价分析 .....           | 189        |
| <b>8.</b> | <b>结论和承诺 .....</b>   | <b>191</b> |
| 8.1       | 结论 .....             | 191        |
| 8.2       | 承诺 .....             | 193        |

## 1. 概述

### 1.1 项目名称、地点

项目名称：兰州泰基离子技术有限公司销售（含建造）和使用小型化重离子治疗装置项目

项目地点：兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号

项目性质：改扩建

项目单位：兰州泰基离子技术有限公司

建设内容：兰州泰基离子技术有限公司（以下简称“兰州泰基”）拟对研发的 HiTS 400S 小型化重离子治疗装置（以下简称“小型化重离子治疗装置”，质子最大能量 230MeV、氦离子最大能量 230MeV/u、碳离子最大能量 430MeV/u、氧离子最大能量 430MeV/u，为 I 类射线装置）进行销售（含建造）、安装调试和运行维护，同时改扩建位于兰州新区的调试厂房作为该型号加速器的调试场所。小型化重离子治疗装置每年最大销售（含建造）量为 4 台。生产方及安装调试、运行维护为兰州泰基离子技术有限公司，后续使用方为用户单位。该装置由离子源、低能传输系统、直线注入器、中能传输系统、同步加速器、高能传输系统、终端组成。

#### 改扩建内容：

（1）本项目位于兰州新区兰州泰基离子技术有限公司所在园区内的测调中心，在其内部将原直线注入器调试厂房改扩建为小型化重离子治疗装置的调试工作场所，原直线注入器调试厂房内调试研发的直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）样品，为小型化重离子治疗整体装置的设计、生产提供试验验证数据。同时，直线注入器设计研发成功，可作为独立的产品进行销售，为国内外相关质子/重离子加速器厂家提供注入器产品。直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）后期将保留生产、销售和使用能力，但其调试转移

至用户（直线注入器使用单位）工作场所进行。现测调中心内小型化重离子治疗装置调试工作场所布局和装置束流参数与原环评进行了相应调整，具体如下：

**表 1-1 工作场所布局和装置束流参数调整前后对照表**

| 序号 | 内容 |         | 调整前                     | 调整后                                                                                                                                                                                                 |
|----|----|---------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 布局 | 离子源     | 测调中心直线注入器调试厂房内，位于测调中心东侧 | 小型化重离子治疗装置工作场所位于测调中心内东侧，原有直线注入器调试厂房屏蔽墙全部拆除，按照现有设计方案重新进行屏蔽块搭设，拆除的部分预制块用于小型化重离子治疗装置整机调试屏蔽区域的东南方向墙体。其中原直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）的位置向西微调 4m，在其后端加入同步加速器、中高能传输系统，而在中高能传输系统末分为两个终端，即 360°旋转束终端和 30°固定束终端。 |
|    |    | 低能传输系统  |                         |                                                                                                                                                                                                     |
|    |    | 直线注入器   |                         |                                                                                                                                                                                                     |
|    |    | 同步加速器   | ——                      |                                                                                                                                                                                                     |
|    |    | 中高能传输系统 | ——                      |                                                                                                                                                                                                     |
|    |    | 终端      | ——                      |                                                                                                                                                                                                     |
| 2  | 参数 | 质子      | 8MeV, 10mA              | 230MeV, $2 \times 10^{11}$ ppm (0.534nA)                                                                                                                                                            |
|    |    | 碳离子     | 7MeV/u, 0.5mA           | 430MeV/u, $9 \times 10^9$ ppm (0.14nA)                                                                                                                                                              |
|    |    | 氧离子     | ——                      | 430MeV/u, $9 \times 10^9$ pp (0.192nA)                                                                                                                                                              |
|    |    | 氦离子     | ——                      | 230MeV/u, $6 \times 10^{10}$ ppm (0.32nA)                                                                                                                                                           |

（2）小型化重离子治疗装置的调试流程与直线注入器的调试过程相比进行了相应变动并增加了耗时。

（3）原测调中心内直线注入器机房屏蔽墙体拆除，直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）的位置向西微调 4m，同时根据同步加速器、中高能束运线及终端的位置新建屏蔽墙体，辐射工作场所分区根据新布局进行划分。

（4）测调中心根据设备布局重新布设了人身安全联锁系统和场所辐射监测系统，重新设置了放射性固体废物暂存间场所和通风系统，沿用原废水暂存池。

（5）原直线注入器年最大销售量 4 台，调整后，HiTS 400S 小型化重离子治疗装置在测调中心调试完成后拆卸运输至用户单位（兰州泰基拟采取的方式是对于短时间内可大幅降低的部件进行优先拆除、转运。另外需较长时间衰变，残余剂量率仍需再下降的部件则先暂时静置，待剂量率水平进一步下降后再开始工作。

工作全程在部件表面设置局部屏蔽措施，人员采用工具与部件的距离拉远，并采取轮班工作减小每名工作人员的工作时间。最大程度的减小工作人员的受照剂量），并在用户单位完成后续安装调试及运行维护。其年最大销售（含建造）、使用数量为 4 台。

（6）用户单位小型化重离子治疗装置的技术参数与测调中心调试的小型化重离子治疗装置一致，生产方及安装调试、运行维护为兰州泰基离子技术有限公司，后续使用方为用户单位。

项目总投资：967.55 万元，环保投资：481 万元，占总投资的 49.71%。

## 1.2 项目概况

### 1.2.1 单位概况

#### 1.2.1.1 单位简介

兰州泰基离子技术有限公司（以下称“兰州泰基”）成立于 2002 年 4 月，是中国科学院近代物理研究所孵化的高新技术企业。

建设单位现有员工近 500 人，主要由本科及以上学历人员构成；是目前国内唯一拥有医用重离子加速器（即碳离子治疗系统）设计、生产、调试、运维资质和能力的企业；建设单位先后通过 ISO9001、13485 质量管理体系认证，并取得Ⅲ类医疗器械生产和经营许可证、I类射线装置辐射安全许可证等相关资质。

经过多年基础积累及技术沉淀，兰州泰基成功研制出我国首台拥有自主知识产权的碳离子治疗系统并投入临床应用，打破了离子放疗领域国外技术壁垒，使我国成为继美国、日本、德国之后，全球第 4 个掌握重离子治癌技术的国家。

目前，兰州泰基研发生产的离子治疗装置在全国已投入运行 4 台，完成建设 1 台，在建 7 台。另外，产品由单一的重离子治疗系统升级为多离子联合治疗系统，自主研发的治疗计划软件和治疗控制软件已投入使用，该软件适用于重离子、质子以及中子治疗系统，完全替代了进口软件，使企业成为世界上唯一一家能自主提供全套离子治疗软硬件产品的公司。

其中，首台国产碳离子治疗系统于 2020 年 3 月上市运行，开机率达 98%，性能及运行效率居世界前列。截至目前，完成治疗并出院患者约 2000 人，治疗患者遍布全国，且有部分患者来自欧洲，治疗病种包括肺癌、肝癌、胰腺癌等 50 余种肿瘤。

2022 年，兰州泰基获批牵头承担国家重点研发计划“诊疗装备与生物医用材料”重点专项 2021 年度“揭榜挂帅”榜单任务“小型化重离子治疗装置研发”项目，联合中国科学院近代物理研究所、国科离子医疗科技有限公司、国科离子（杭州）医疗科技有限公司、先进能源科学与技术广东省实验室、江苏瑞尔医疗科技有限公司、复旦大学附属肿瘤医院、青岛大学附属医院、重庆大学附属肿瘤

医院、福建省肿瘤医院 9 家单位共同参与完成。已研发出结构更紧凑、性能更优越、能耗更低的全新一代小型化重离子治疗系统，切实推动产、学、研、医、检深度融合，生产符合临床要求的高性能医学装备！

严苛的产品质量标准、完整的生产和检测能力，兰州泰基连续多年通过 ISO9001 质量管理体系认证，开发制造的电磁铁、RFQ 等产品品质居于世界领先地位。

凭借强大的设计研发能力，为用户解决了从设计、制造，到安装、调试等各环节的难题，实现“交钥匙工程”，公司为欧洲核子中心、美国密歇根州立大学、德国重离子研究所、瑞士保罗谢勒研究所等国外著名研究机构及国内的北京大学、清华大学、复旦大学、哈尔滨工业大学等顶级高校，中国工程物理研究院、中国科学院近代物理研究所、上海应用物理研究所等各大科研机构提供了性能先进、质量过硬的加速器关联产品，承担并圆满完成了各种类型的高精度电磁铁、RFQ、DTL 及各种谱仪关键零部件的研制任务。

年产量超过 3 台大型离子治疗装置、科研装备超过 300 台套的重离子装备制造产业基地已于 2021 年在兰州新区建成并投产，基地总投资 8.4 亿元，占地面积 237 亩，总建筑面积为 8.4 万平方米，拥有各类制造、检测、试验专业设备，主要承担重离子治疗装置、超导装置的生产制造，大型医疗装置小型化研发、生产制造、检测及设备调试，为重离子技术的产业化发展提供了坚实的支撑。

为了在国际化竞争中占据领先地位，公司坚持以市场为导向、创新为动力、可持续发展为目标，持续加大技术研发投入，力将从大科学工程建造中积累的高新技术实现产业化，成为国内顶级的科学工程非标产品研制和服务基地。

在离子治癌产品方面，依托专业化、规模化的生产制造能力，研发更具核心竞争力和自主知识产权的创新性产品以满足市场需求；提供全链条、全生态的技术、医疗及培训服务，不断促进我国离子治疗事业飞跃式发展，为全球健康事业贡献“中国智慧”与“中国方案”。

#### **1.2.1.1.1 许可种类和范围**

本项目建设单位兰州泰基离子技术有限公司已持有生态环境部颁发的辐射安全许可证（国环辐证[00428]，见附件 1），有效期至 2025 年 12 月 31 日。许

可的种类和范围是：生产、销售、使用 II 类射线装置；销售、使用Ⅲ类射线装置；使用I类射线装置；销售（含建造）I类射线装置。

1.2.1.1.2 已获许可情况

兰州泰基已获许可的射线装置详情如表 1-2 所示。

表 1-2 兰州泰基已获许可的射线装置详情

| 序号 | 辐射活动 场所名称       | 装置名称  | 规格型号  | 类别  | 活动<br>种类 | 数量/台（套） |
|----|-----------------|-------|-------|-----|----------|---------|
| 1  | 兰州新区汉水街 32 60 号 | 直线注入器 | Lin08 | II类 | 生产，销售，使用 | 4       |

除此直线注入器外，兰州泰基离子技术有限公司已完成建设的 5 台重离子治疗装置，型号均为 CY-SY-4400，结构组成为离子源、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、治疗终端组成，引出能量为 120—400MeV/u。该型号重离子治疗装置于 2015 年 9 月获得核技术利用项目环评批复（甘环核发〔2015〕20 号），2015 年 12 月获得《辐射安全许可证》（国环辐证〔00428〕）。首台安装于甘肃省武威市，由甘肃重离子医院股份有限公司运营，我公司于 2015 年 12 月获得生态环境部调试许可，该装置于 2020 年 3 月开业治疗；第二台安装于甘肃省兰州市，由甘肃重离子医院股份有限公司运营，我公司于 2021 年 7 月获得生态环境部调试许可，该装置于 2024 年 11 月开业治疗；第三台安装于福建省莆田市，由福建医科大学附属协和医院运营，我公司于 2022 年 11 月获得生态环境部调试许可，该装置于 2025 年 4 月开业治疗；第四台安装于湖北省武汉市，由武汉经济技术开发区（汉南区）人民医院运营，我公司于 2024 年 1 月获得生态环境部调试许可，武汉经济技术开发区（汉南区）人民医院正在申请《辐射安全许可证》；第五台安装于浙江省杭州市，由浙江省肿瘤医院运营，我公司于 2024 年 4 月获得生态环境部调试许可，该装置于 2025 年 2 月开业治疗。

### 1.2.1.2 审批验收情况

兰州泰基目前已办理的环境审批和竣工环保验收统计情况见表 1-3。目前兰州泰基辐射安全许可证上质已获许可的射线装置已办理了环评手续，后续满足条件后将根据《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》组织对已投入使用的射线装置、放射源和非密封放射性物质工作场所进行了竣工环境保护验收。

表 1-3 兰州泰基现有核技术利用项目环保手续履行情况

| 序号 | 项目名称            | 环评项目内容                                                                                                 | 环评审批机关、批复文号及时间                                 | 验收批复文号及时间                         |
|----|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1  | 生产、销售、使用直线注入器项目 | 开展直线注入器(属II类射线装置)的生产、调试和销售活动，质子最大能量 8MeV、碳束最大能量 7MeV/u 、质子流强 10.0mA、碳束流强 0.5mA。直线注入器年最大销售量和安装调试量为 4 台。 | 兰州新区生态环境局<br>新环审发[2024]62 号<br>2024 年 7 月 16 日 | 目前已取得辐射安全许可，待满足竣工环境保护验收条件后开始验收工作。 |

### **1.2.1.3 辐射安全管理现状**

#### **1.2.1.3.1 辐射安全管理机构**

辐射安全管理委员会是兰州泰基离子技术有限公司辐射安全工作的管理机构，总经理担任主任委员，分管安全的副总经理和总经理助理担任副主任委员，辐射防护负责人由注册核安全工程师担任。

综合办公室安全监管组是辐射安全管理的执行部门，负责全公司辐射安全工作的日常管理。

#### **1.2.1.3.2 辐射安全管理规章制度**

兰州泰基离子技术有限公司制定了《辐射安全与防护管理大纲》、《辐射安全管理制度》、《活化部件检修防护管理制度》、《放射性废物处置管理制度》、《辐射安全与防护设施维护检修制度》、《辐射监测方案》、《调试阶段辐射安全管理制度》、《辐射事故应急预案》、《直线注入器辐射安全管理制度》、《直线注入器辐射监测方案》及《射线装置台账管理制度》等。

#### **1.2.1.3.3 辐射工作人员**

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

目前兰州泰基共 122 名辐射工作人员，包括设计人员、运维人员、管理人员等均通过了生态环境部门认可的辐射安全与防护考核。

同时，按照公司年度培训计划和工作需要，开展了内部辐射安全相关的培训，包括公司辐射安全制度、辐射安全基础知识、职业健康等内容；对新员工进行了安全教育和培训。

#### **1.2.1.3.4 个人剂量监测**

兰州泰基为辐射工作人员配备了个人剂量计，并委托有资质单位进行个人剂量监测，每季度委托监测一次。安排专人负责个人剂量监测，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等。同时在辐射工作中辅以个人剂量报警仪进行监测。

#### **1.2.1.3.5 工作场所及环境监测**

兰州泰基除日常的利用便携式剂量监测仪对工作场所及周围环境进行监测外，每年会委托有资质单位开展辐射工作场所监测和环境监测，监测频次为 1 次/年。

#### **1.2.1.3.6 辐射事故应急管理情况**

兰州泰基依据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关法律法规以及《甘肃省辐射事故应急预案》、《兰州新区突发环境事件应急预案》和用户单位所在地政府部门的辐射事故应急预案制定了《辐射事故应急预案》，应急预案中明确规定兰州泰基有关意外放射事件处理组织机构及其职责、事故报告、信息发布和应急处理程序等内容。

发生辐射事故或者发生可能引发辐射事故的运行故障时，兰州泰基应当立即启动本单位的应急方案，采取应急措施，并在两小时内填写初始报告，向当地人民政府环境保护主管部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向卫生行政部门报告。同时，需进行工作人员的意外事故剂量监测和工作场所及周围环境的应急监测，并做好详细的监测记录。

兰州泰基每年会组织进行 1 次辐射事故应急演练，通过演练，使相关工作人员对实际工作中可能出现的突发事件有了直观清楚的认识，加强了辐射工作人员的辐射安全防护意识和应急处置能力，同时也使得辐射工作人员对辐射事故应急处置的流程更加清楚和熟练。

### 1.2.2 项目由来和意义

兰州泰基离子技术有限公司通过自主设计和多次优化，形成了小型紧凑的重离子治癌装置设计方案。随着重离子治癌装置的国产化，由此衍生出的高端医疗装备及大型科学实验非标装置，比如高精度电磁铁及其电源、超高真空系统及各种真空泵、高频系统、束流诊断和自动控制系统等，对推动我国大型医疗器械装备制造业技术水平的提高，形成新的产业增长点，促进产业繁荣起到积极的作用。在此基础上，依据我国医疗器械装备制造业发展及企业的战略规划需要，兰州泰基投资建设了“重离子应用技术及装备制造产业基地”项目，使企业产品制造规模和生产专业化水平进一步扩大和提高，填补了我国重离子治癌装置产业化的空白。

相比常规放射治疗，重离子束治疗具有照射剂量分布好、对健康组织损伤小、疗程短、治愈率高、毒副作用小等优点。然而现有重离子装置庞大的占地面积严重限制了其推广和应用。超导重离子设备的研发与应用，将大幅缩小重离子设备的占地面积，使得重离子治疗项目的建设和推广更加容易，更好地服务于人民健康。

基于此背景，兰州泰基离子技术有限公司作为牵头单位于 2022 年申报国家重点研发项目“小型化重离子治疗装置研发”，并获得立项批复，文件为《关于国家重点研发计划“诊疗装备与生物医用材料”重点专项 2021 年度“揭榜挂帅”类项目立项的通知》（国科生字〔2022〕42 号）。

小型化重离子治疗装置将采用直线加速器作为注入器；同步加速器则采用组合型的超导磁铁技术，能够有效地缩短整个同步加速器的周长；旋转机架则同样由超导磁铁组成，在减小机架尺寸的同时可大幅降低机架重量；由以上技术集成的小型化重离子治疗设备将大幅减小装置的占地面积。

现阶段为开展小型化重离子治疗装置的性能测试和调试工作，计划在兰州泰基离子技术有限公司兰州新区制造基地测调中心改扩建调试场所，为小型化重离子治疗整体装置的设计、生产提供试验验证数据。待小型化重离子治疗装

置在测调中心完成调试后，将拆卸运输至用户单位完成后续安装调试及运行维护。

### **1.2.3 与原有项目的依托关系**

#### **1.2.3.1 建设地点**

项目建设地点不变，仍位于兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号，仅在测调中心所在厂房中对布局进行改造。

#### **1.2.3.2 人员管理**

本项目所有辐射工作人员均属于兰州泰基，并且在上岗前需通过辐射安全与防护考核，小型化重离子治疗装置的辐射工作人员均来自于原直线注入器的辐射工作人员。同时本项目辐射工作人员存在参与其它建设项目辐射工作场所工作的兼职情况。

#### **1.2.3.3 辐射管理机构及相关规章制度**

兰州泰基已成立辐射安全管理委员会和一系列辐射安全管理规章制度和辐射事故应急预案。本项目的辐射安全管理工作统一由该委员会负责。目前已制定了《辐射安全与防护管理大纲》、《辐射安全管理制度》、《活化部件检修防护管理制度》、《放射性废物处置管理制度》、《辐射安全与防护设施维护检修制度》、《辐射监测方案》、《调试阶段辐射安全管理制度》、《辐射事故应急预案》、《直线注入器辐射安全管理制度》、《直线注入器辐射监测方案》及《射线装置台账管理制度》等。

同时兰州泰基将根据本项目建设内容和特点，制定和完善操作规程、辐射安全防护、辐射工作人员管理考核、设备检修维护、监测方案、辐射事故应急预案、放射性废物处理等相关辐射安全管理制度，确保本项目的辐射安全。

#### **1.2.3.4 辐射监测**

本项目制定了辐射监测计划，根据装置布局变更，调整优化了场所辐射监

测系统，其次所需的便携式辐射监测仪器均为新配。

#### 1.2.3.5 环境保护措施

(1) 辐射工作场所：在原环评基础上，原有直线注入器调试厂房屏蔽墙全部拆除，按照现有设计方案重新进行屏蔽块搭设，拆除的部分预制块用于小型化重离子治疗装置整机调试屏蔽区域的东南方向墙体。并在直线注入器后端接入超导同步加速器、中高能束运线及终端成为完整的工作场所。辐射工作场所分区中控制区由直线注入器机房内部变更为加速器大厅、束流输运隧道、360°旋转束终端、30°固定束终端和放射性固体废物暂存间；

(2) 安全联锁系统：根据装置组成、项目特点及布局对安全联锁系统各部分（束流切断系统、门机联锁、人员出入管理系统、急停清场按钮及声光报警灯）进行了重新布设，均为新增；

(3) 放射性三废处理设施：本项目通风系统根据全新工作场所布局进行了重新布设，废水暂存池沿用原设置，放射性固体废物暂存间在加速器大厅的东南角进行了重新设置。

#### 1.2.4 建设规模

本项目建设内容包括 HiTS 400S 小型化重离子治疗装置的销售（含建造）和使用活动，不包括用户单位小型化重离子治疗装置使用场所的土建施工以及临床使用。

项目涉及到的辐射工作场所有两类，即测调中心和用户单位使用场所。其中：

(1) 测调中心为公司地址，即兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号。测调中心涉及装置的出束调试和销售工作（不涉及出束），装置在测调中心进行出束调试（测调中心内仅进行设备可行的初步出束调试），完成后拆卸运输至用户单位使用场所进行后续工作。

兰州泰基拟采取的方式是对于短时间内可大幅降低的部件进行优先拆除、转运。另外需较长时间衰变，残余剂量率仍需再下降的部件则先暂时静置，待

剂量率水平进一步下降后再开始工作。工作全程在部件表面设置局部屏蔽措施，人员采用工具与部件的距离拉远，并采取轮班工作减小每名工作人员的工作时间。最大程度的减小工作人员的受照剂量。

(2) 装置运至用户单位后，需由兰州泰基的工程师在用户单位工作场所进行安装调试（符合用户要求的精细出束调试）和运行维护，其中调试及运行维护均为出束工作，用户单位调试场所同样为本项目调试地点。

HiTS 400S 小型化重离子治疗装置碳离子最大能量 430MeV/u、质子最大能量 230MeV、氦离子最大能量 230MeV/u、氧离子最大能量 430MeV/u。年最大销售（含建造）4 台。

根据《射线装置分类》的规定，粒子能量大于等于 100 兆电子伏的医用加速器属于 I 类射线装置。根据《中华人民共和国环境影响评价法》、《建设项目环境保护管理条例》和《建设项目环境影响评价分类管理名录》中的相关规定，本项目应进行环境影响评价，编制环境影响报告书。

因此，兰州泰基离子技术有限公司委托中国原子能科学研究院对其“兰州泰基离子技术有限公司销售（含建造）和使用小型化重离子治疗装置项目”进行环境影响评价，编制《兰州泰基离子技术有限公司销售（含建造）和使用小型化重离子治疗装置项目环境影响报告书》，委托书见附件 2。

## 1.2.5 产业政策和规划符合性分析

### 1.2.5.1 产业政策符合性分析

根据中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 7 号（2023 年 12 月 27 日发布）《国家发展改革委关于修改<产业结构调整指导目录（2024 年本）>有关条款的决定》，本项目属其中鼓励类第六项“核能”第 4 条“核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”项目，因此，本项目符合国家产业政策。

### 1.2.5.2 “三线一单”约束性符合性分析

本项目已在 2023 年 1 月 11 日取得了兰州新区生态环境局关于重离子应用技术及装备制造产业基地（二期）项目环境影响报告表的批复（新环承诺发[2023]1 号，见附件 3），作为单独报告其中已对施工期及生态各部分进行了评价，包括了“三线一单”约束性符合性分析。此外报告结论为“本项目按建设项目“三同时”制度要求，逐一落实本报告提出的污染治理项目，并在施工过程中加强环保设施管理，保证各项污染物达标排放，则项目对周围环境影响不明显。因此，从环境保护角度考虑，本项目的建设是合理、可行的。”

因此本节不再赘述“三线一单”约束符合性分析。

## 1.3 编制依据

### 1.3.1 法律法规

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

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

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

（4）《中华人民共和国噪声污染防治法》（全国人民代表大会常务委员会，2022 年 6 月 5 日施行）；

（5）《中华人民共和国水污染防治法》（2017 年 6 月 27 日修订，2018 年 1 月 1 日施行）；

（6）《中华人民共和国大气污染防治法》（2018 年 10 月 26 日修订并实施）；

（7）《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）；

（8）《中华人民共和国土壤污染防治法》（2019 年 1 月 1 日起施行）；

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

（10）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第

20 号，2021 年 1 月 4 日修订版）；

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

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

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

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

（15）《国家发展改革委关于修改<产业结构调整指导目录（2024 年本）>的决定》（2023 年 12 月 27 日）；

（16）《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）；

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

（18）《核技术利用辐射安全考核专业分类参考目录》（2021 年版）；

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

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

（21）《关于发布《放射性废物分类》的公告》（公告 2017 年第 65 号，自 2018 年 1 月 1 日起施行）；

（22）《甘肃省生态环境厅审批环境影响评价文件的建设项目目录（2025 年本）》（甘环环评发[2025]1 号）；

（23）《甘肃省辐射污染防治条例》（甘肃省人民代表大会常务委员会公告第 19 号公布，自 2015 年 1 月 1 日起施行）。

### 1.3.2 技术导则、标准

（1）《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的

内容和格式》（HJ10.1-2016）；

- （2）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- （3）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）；
- （4）《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）；
- （4）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；
- （5）《环境  $\gamma$  辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；
- （6）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；
- （7）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.5-2015）；
- （8）《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）；
- （9）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第一部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）；
- （10）《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）；
- （11）《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；
- （12）《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ2.1-2019）；
- （13）《工业企业厂界噪声排放标准》（GB12348-2008）；
- （14）建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用（HJ1326-2023）。

### 1.3.3 其它文件、资料

- （1）《生产、销售、使用直线注入器项目环境影响报告表》及《兰州新区生态环境局关于兰州科近泰基新技术有限责任公司生产、销售、使用直线注入器项目环境影响报告表的批复》（新环审发[2024]62 号）；
- （2）兰州泰基提供的与本项目相关的管理制度和技术资料等；
- （3）《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）；

(4) NCRP REPORT NO.144 《Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities》；

(5) IAEA Safety Report Series No.19 (2001)；

(6) 《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》(方栋、李红, 辐射防护, 2002 年第 22 卷第 6 期)。

## 1.4 评价标准

### 1.4.1 剂量限值 and 剂量约束值

#### 1.4.1.1 剂量限值

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

表 1-4 个人剂量限值

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

#### 1.4.1.2 本项目剂量约束值

(1) 辐射工作人员年剂量约束值

结合项目特点, 本项目辐射工作人员的年剂量约束值为 5mSv/a。

(2) 公众年剂量约束值

结合项目特点, 本项目对公众造成的辐射影响主要来自设备运行时的瞬时辐射以及停机后的感生放射性, 公众剂量约束值为 0.1mSv/a。

#### 1.4.1.3 放射性废水

放射性废水主要是活化的一次冷却水, 冷却水在排放前取样测量满足《污

水综合排放标准》（GB 8978-1996）中总  $\alpha$ ：1Bq/L、总  $\beta$ ：10Bq/L 的最高允许排放浓度标准后，方可排入污水管网。

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

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

根据 GB18871-2002 中的方法，计算了冷却水中  $^3H$  和  $^7Be$  的单次排放限值  $1ALI_{min}$  和单月排放限值  $10ALI_{min}$ ，见表 1-5。

表 1-5 冷却水感生放射性核素排放限值

| 核素     | 单次排放限值 $1ALI_{min}$ (Bq) | 单月排放限值 $10ALI_{min}$ (Bq) |
|--------|--------------------------|---------------------------|
| $^3H$  | 1.11E+09                 | 1.11E+10                  |
| $^7Be$ | 3.85E+08                 | 3.85E+09                  |

1.4.1.4 放射性固体废物

- 加速器运行期间可能产生的放射性固体废物主要有以下两类：
- （1）离子源和一些易损易活化的靶件，如法拉第筒和其他加速器结构部件等。加速器停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是  $^{54}Mn$ 、 $^{51}Cr$ 、 $^{52}Mn$ 、 $^{57}Co$  和  $^{58}Co$  等半衰期较长的核素。
  - （2）冷却水系统更换下来的离子交换树脂。

本项目运行期间产生的放射性固体废物的清洁解控参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 A 中 A2.1 的规定“任何时间段内在进行实践的场所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”。

对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比的和小于 1 时，方可给予豁免。

表 1-6 放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

| 核素    | 活度浓度,<br>Bq/g | 活度, Bq | 核素    | 活度浓度,<br>Bq/g | 活度, Bq |
|-------|---------------|--------|-------|---------------|--------|
| H-3   | 1E+06         | 1E+09  | Mn-52 | 1E+01         | 1E+05  |
| Be-7  | 1E+03         | 1E+07  | Mn-53 | 1E+04         | 1E+09  |
| F-18  | 1E+01         | 1E+06  | Mn-54 | 1E+01         | 1E+06  |
| Na-24 | 1E+01         | 1E+05  | Mn-56 | 1E+01         | 1E+05  |
| Si-31 | 1E+03         | 1E+06  | Fe-52 | 1E+01         | 1E+06  |
| P-32  | 1E+03         | 1E+05  | Fe-55 | 1E+04         | 1E+06  |
| P-33  | 1E+05         | 1E+08  | Fe-59 | 1E+01         | 1E+06  |
| S-35  | 1E+05         | 1E+08  | Co-55 | 1E+01         | 1E+06  |
| Cl-38 | 1E+01         | 1E+05  | Co-56 | 1E+01         | 1E+05  |
| Ar-37 | 1E+06         | 1E+08  | Co-57 | 1E+02         | 1E+06  |
| K-42  | 1E+02         | 1E+06  | Co-58 | 1E+01         | 1E+06  |
| K-43  | 1E+01         | 1E+06  | Co-60 | 1E+01         | 1E+05  |
| Sc-46 | 1E+01         | 1E+06  | Co-61 | 1E+02         | 1E+06  |
| Sc-47 | 1E+02         | 1E+06  | Ni-59 | 1E+04         | 1E+08  |
| Sc-48 | 1E+01         | 1E+05  | Ni-63 | 1E+05         | 1E+08  |
| Ca-45 | 1E+04         | 1E+07  | Ni-65 | 1E+01         | 1E+06  |
| Ca-47 | 1E+01         | 1E+06  | Cu-64 | 1E+02         | 1E+06  |
| V-48  | 1E+01         | 1E+05  | Zn-65 | 1E+01         | 1E+06  |
| Cr-51 | 1E+03         | 1E+07  | ——    | ——            | ——     |

#### 1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

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

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

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

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

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

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

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

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

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

综上，屏蔽体外的各辐射工作场所剂量率控制水平总结如表 1-7 所示。

表 1-7 屏蔽体外剂量率控制水平

| 场所                                                                                               | 剂量率控制水平              |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 治疗室墙和入口门外表面 $30\text{cm}$ 处、邻近治疗室的关注点、治疗室房顶外的地面附近和楼层，距治疗室顶外表面 $30\text{cm}$ 处和在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处 | 居留因子 $T > 1/2$       | $2.5 \mu\text{Sv/h}$ |
|                                                                                                  | 居留因子 $T \leq 1/2$    | $10 \mu\text{Sv/h}$  |
| 不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 $30 \text{ cm}$ 处                                                  | $100 \mu\text{Sv/h}$ |                      |
| 屏蔽体与土壤交界处*                                                                                       | $5 \text{mSv/h}$     |                      |

注：\*根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于  $5 \text{mSv/h}$  时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“ $5 \text{mSv/h}$ ”作为各辐射工作场所地板外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

### 1.4.3 评价范围

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

本项目小型化重离子治疗装置为 I 类射线装置，其主要的辐射环境影响途径

为调试、运行、维修维护环节时产生瞬发辐射外照射以及排入环境的感生放射性气体对人员造成的照射。参照（HJ10.1-2016）的要求，并考虑到设备自身特点及其辐射污染源种类和大小以及同类型设备的环境影响评价。

测调中心内小型化重离子治疗装置的电离辐射环境影响评价范围取其四周实体屏蔽墙向外 100m 的范围，如图 1-1。

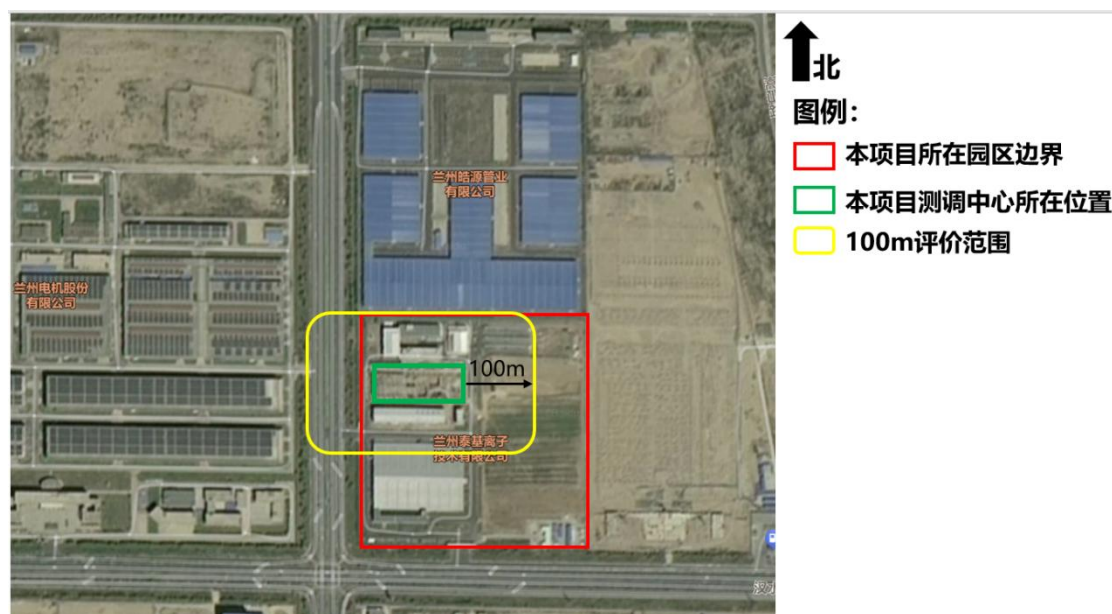


图 1-1 本项目电离辐射评价范围示意图

对于用户单位的小型化重离子治疗装置的销售（含建造）、安装调试和运行维护。销售环节属于纯商务行为，不涉及放射性操作。电离辐射主要来自在用户单位使用场所内的安装调试和运行维护环节。因此小型化重离子治疗装置安装调试、运行维护所在的辐射工作场所为用户单位小型化重离子治疗装置机房，兰州泰基的安装调试和运行维护须在用户单位取得小型化重离子治疗装置的环评批复后方可开展。其次，用户单位小型化重离子治疗装置的评价范围需以其进行环境影响评价时确定的评价范围为准。本次评价以某客户项目（以下简称典型案例）为例进行评价，评价范围取实体屏蔽物边界外 100m。

#### 1.4.4 环境保护目标

本项目评价范围内环境保护目标主要分为园区内及园区外两部分，其中园区内为测调中心内辐射工作人员及园区内其他工作人员，园区外主要包括园区周边道路的流动人员。

对于用户单位小型化重离子治疗装置使用场所，保护目标主要是用户单位使用场所进行安装调试及运行维护工作的辐射工作人员及公众成员，人员保护要求为辐射工作人员按 5mSv/a 进行剂量约束，公众成员按 0.1mSv/a 进行剂量约束。对于公众成员由于用户单位使用场所周围环境的不确定性，以典型案例进行评价，主要考虑非辐射工作人员、患者、陪诊人员和周边道路的流动人员。

表 1-8 本项目电离辐射评价范围内环境保护目标情况

| 方位 | 周围环境情况                |                                          | 与项目边界距离，m | 环境保护目标 | 人数      | 人员保护要求   |
|----|-----------------------|------------------------------------------|-----------|--------|---------|----------|
| 内部 | 控制区                   | 小型化重离子治疗装置内部，包括离子源、直线注入器、同步加速器、中高能束运线、终端 | ——        | 辐射工作人员 | 约 10 人  | 5mSv/a   |
|    | 监督区                   | 控制室和电源间等                                 | 0~10      |        |         |          |
| 内部 | 超导测试间等                |                                          | 0~8       | 公众成员   | 约 10 人  | 0.1mSv/a |
| 东侧 | 园区内道路、大棚              |                                          | 6~100     | 公众成员   | 约 10 人  | 0.1mSv/a |
| 西侧 | 华山路                   |                                          | 65~100    | 公众成员   | 流动人员    | 0.1mSv/a |
| 南侧 | 粗加工厂房、1 号厂房原材料区、3 号厂房 |                                          | 0~100     | 公众成员   | 约 30 人  | 0.1mSv/a |
| 北侧 | 倒班宿舍楼、食堂、报告厅          |                                          | 2.5~100   | 公众成员   | 约 200 人 | 0.1mSv/a |



图 1-2 测调中心周围环境保护目标示意图

## 1.5 安全责任划分

本项目用户单位（医院）与兰州泰基的安全责任划分如下：

### （1）用户单位（医院）

用户单位（医院）作为小型化重离子治疗装置的使用单位，是第一责任人，全面负责小型化重离子治疗装置运行的安全责任，并对小型化重离子治疗装置的调试单位、运维单位履行监管职责。在安装调试阶段，负责提供能够满足小型化重离子治疗装置安装、调试要求及我国法规标准要求的辐射工作场所和安全保卫工作；在正式运营阶段，对运行维保过程中的辐射防护和安全保卫负责；负责正常运行时小型化重离子治疗装置治疗机房治疗区的清场巡检以及临床治疗出束；负责小型化重离子治疗装置投入临床使用时医院方负责区域和医院医护人员和病人的安全责任；负责小型化重离子治疗装置放射性三废处置。

### （2）兰州泰基

兰州泰基作为小型化重离子治疗装置安装调试及后续的维保服务的销售运维商，负责小型化重离子治疗装置安装调试以及维保过程中的辐射安全责任；

负责安装调试、维保过程中小型化重离子治疗装置加速器大厅（包括束流输运隧道）及治疗机房设备区清场巡检以及非临床治疗出束；受到医院的监督管理。

## 2. 厂址与环境

### 2.1 地理位置

兰州新区隶属甘肃省兰州市，位于甘肃省兰州市北部秦王川盆地。介于东经  $103^{\circ}29'22''\sim 103^{\circ}49'56''$ ，北纬  $36^{\circ}17'15''\sim 36^{\circ}43'29''$ 。总面积 1744 平方千米。

本项目位于兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号内测调中心，园区地理坐标为 E:  $103^{\circ}42'14.197''$ ，N:  $36^{\circ}30'24.192''$ 。西临华山路，南临汉水街，北侧是兰州皓源管业有限公司，东侧为空地。

本项目地理位置示意图见图 2-1，项目周边环境示意图见图 2-2。



图 2-1 本项目地理位置示意图

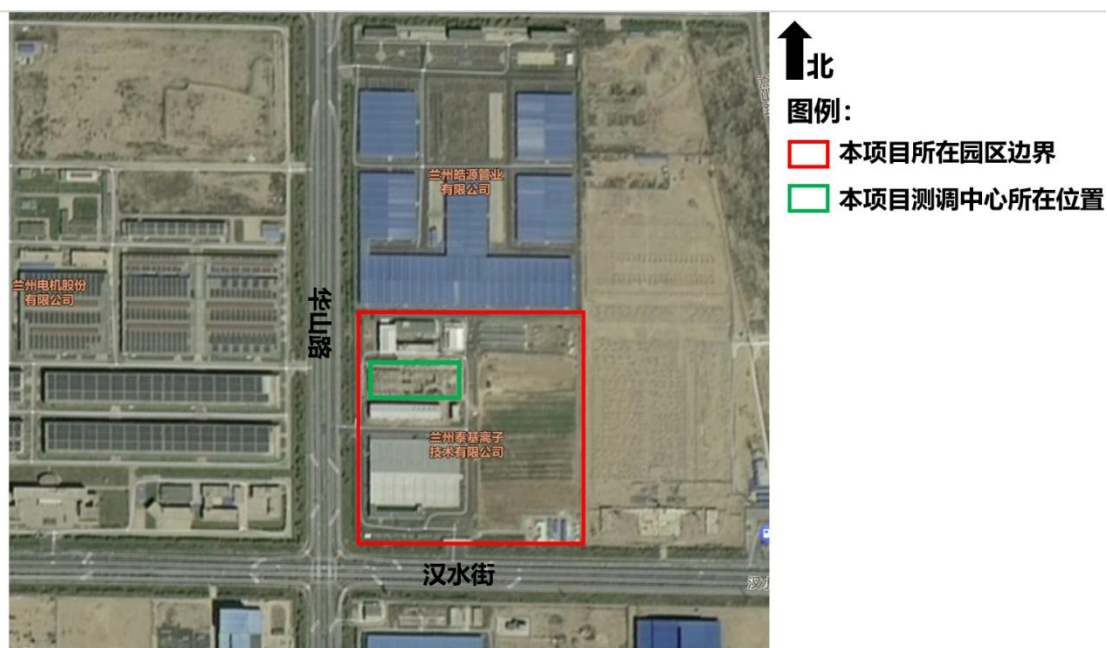


图 2-2 项目周边环境示意图

## 2.2 自然环境状况

### 2.2.1 地形地貌

兰州新区属典型的黄土高原丘陵地貌类型，平川、梁峁、沟壑及河谷地貌发育。整个地域宽阔，地势由西北向东南倾斜，东西两面是低矮黄土山丘，南北长约 60 公里，东西最宽处 21 公里，平均海拔高度 1910 米。区域内主要地貌单元为秦王川盆地，其地势由北向南倾斜，海拔高程 1850~2150 米，地面坡度为 1/80~1/100。盆地内发育有洪积平原、沟谷、低缓黄土丘陵及堆积梁峁丘陵等地貌。

### 2.2.2 气候气象

兰州新区属典型的温带半干旱大陆性气候，四季分明，阳光充足。春季多风少雨，气温逐渐升高，但不稳定，昼夜温差较大；夏季凉爽，平均气温 20.5℃，无酷暑；秋季温凉，天气较为舒适，气温适中；冬季寒冷干燥，平均气温 -7.3℃，降雪相对较少。年平均气温 6.9℃，年平均降水量 300~350 毫米，年蒸发量 1880 毫米，全年平均无霜期 139 天，年日照量 1744~2659 小时，日照

率 60%，最大冻土深度约 1.1 米，主导风向为西北风，年平均风速 2.3 米/秒。在春季，兰州新区较为常见沙尘暴，受上游输入性沙尘影响，新区可能出现浮尘天气；冬季可能出现寒潮天气，气温骤降。近年来，兰州新区的气候趋势也发生了一些变化，近 10 年来平均气温呈上升趋势，与前 30 年相比，平均温度升高 0.3℃，地面温度升高 1.5℃；降水量呈逐年增加趋势，年降水量增加 10 毫米；相对湿度呈逐年增加趋势，相对湿度增加 2%；极端天气逐年减少，极端高温下降 1.5℃，极端低温升高 2℃。这些气候气象特征共同构成了兰州新区独特的自然环境，对当地的生态系统、农业生产、水资源管理以及居民生活等方面都有着重要影响。

### 2.2.3 水文特征

兰州新区地处内陆，属温带半干旱大陆性气候，降水稀少，蒸发强烈，水资源相对匮乏。其水文特征主要表现在地表水资源相对较少，主要河流有庄浪河和大通河，庄浪河流经兰州新区中部，是兰州新区主要的水源之一，为农业灌溉和生态环境提供了一定的水资源支持，大通河位于兰州新区北部，是黄河的一级支流，对兰州新区的生态环境和气候调节具有重要作用。地下水资源相对丰富，但分布不均，根据 2023 年度甘肃省地下水动态监测报告，兰州新区地下水水位整体稳定，局部呈上升趋势，这表明兰州新区在地下水管理和保护方面取得了一定成效，但仍需加强地下水的合理开发和利用，以确保水资源的可持续性。兰州新区有石门沟水库和青土湖等水域，这些湖泊和水库在调节气候、涵养水源、维护生态平衡等方面发挥着重要作用，同时，它们也为兰州新区的农业灌溉、工业用水和居民生活用水提供了重要的水源支持。

### 2.2.4 地质地震

兰州新区位于兰州—民和盆地，地质构造复杂，其秦王川盆地属中川隐伏基底隆起带中近南北向的断陷盆地，形成于中更新世末期，东西两侧丘陵前缘均发育有向盆地逆冲断层。地层自下而上依次为新元古界皋兰群、下侏罗统炭洞沟组、中侏罗统窑街组、上侏罗统享堂组、下白垩统河口群、新近系、第四系，主要被第四系黄土、砂砾石或新近系砂、泥岩覆盖。土壤以黄土母质为主，

包括灰钙土、淡灰钙土、盐化灰钙土、黄绵土和红粘土等亚类，肥力水平较低。兰州新区地处青藏高原东北缘，位于南北地震带与祁连山地震带的复合部位，地震活动较为强烈，周边发育有多条活动断裂带，历史上曾发生多次破坏性地震。

### 2.2.5 土壤植被

兰州新区土壤以黄土母质为主，主要包括灰钙土、淡灰钙土、盐化灰钙土、黄绵土和红粘土等亚类，有机质含量低，肥力水平较低，北部土壤质地较轻，南部粘重。自然植被类型以人工林地和荒漠草原、干旱草原为主，人工林主要分布在中川机场西部及黄河河谷区，由经济植物型和蔬菜作物型组成，如桃树、枣树、梨树等；荒漠草原和干旱草原主要由多年旱生、丛生的禾草、旱生灌木和小半灌木组成，如蒿草针茅、冰草、柠条等。

## 2.3 社会环境概况

### 2.3.1 人口分布

兰州新区的人口分布呈现出显著的增长趋势。根据第七次全国人口普查数据，截至 2020 年 11 月 1 日零时，兰州新区常住人口为 28.82 万人，其中男性占比 54.93%，女性占比 45.07%，性别比为 121.87。年龄结构方面，0-14 岁人口占比 14.71%，15-59 岁人口占比 76.45%，60 岁及以上人口占比 8.84%。城镇人口比重为 57.96%。2021 年末，兰州新区常住人口达到 30 万人，城镇人口比重为 60.03%。2022 年末，兰州新区常住人口为 32.85 万人，人口自然增长率为 0.64‰，城镇人口比重为 60.67%。2023 年，兰州新区常住人口达到 33.93 万人，城镇化率为 68.79%。2024 年，兰州新区实有人口突破 70 万大关，最高峰时达到 72.7 万人。

### 2.3.2 社会发展

兰州新区自 2012 年 8 月 20 日国务院批复设立以来，已经迈入了全方位高质

量发展的新阶段。2011 年至 2023 年，兰州新区地区生产总值增长 75 倍，固定资产投资增长 91 倍，一般公共预算收入增长 79 倍，常住人口增长 6.3 倍，城乡居民人均可支配收入分别增长 5.1 倍、4.7 倍，经济增速连续 7 年领跑国家级新区。新区先后获批国家可持续发展实验区、绿色金融改革创新试验区等重大改革创新试点，获“联合国杰出环境治理工程奖”“中国最具投资营商价值新区”“绿色发展优秀城市”等 20 多项荣誉。

### 2.3.3 文化教育

兰州新区自成立以来，始终将教育摆在优先发展的战略地位，持续增加教育投入，推动各类教育协调均衡优质发展。截至 2023 年，兰州新区已建成中小学校超 100 所，提供学位 8.9 万个，西部最大的科教园区入驻院校 17 所，师生人数超过 10 万人。2024 年，兰州新区第十一小学、甘南实验中学初中部、新苑幼儿园等新学校建成投用，进一步扩增了学位和园位。兰州新区还积极探索教育教学改革，如“学科+思政”教学新模式，推动教育质量逐年提升。在文化方面，兰州新区建成了各类文化场馆和体育场所，承办了多项市级以上体育赛事和高品质文化活动。通过举办春节秦腔惠民演出、太平鼓展演等系列民俗文化活动，兰州新区不仅丰富了群众的精神文化生活，还积极传承和弘扬了优秀传统文化。此外，兰州新区不断创新公共文化服务模式，打造了一批新型公共文化空间，如城市书屋、文化驿站等，满足了人民群众对高品质文化生活的需求。

### 2.3.4 医疗保障

兰州新区近年来在医疗保障方面取得了显著进展。2024 年，兰州新区积极响应国家号召，开展了医共体医保支付方式改革，基层就诊率大幅提升至 74.7%，县域内就诊率达到 88.6%，医保基金使用效率显著提高。兰州新区通过总额预付管理机制和激励约束机制，推动医共体从被动控费向主动控费转变，形成了“节约即收益”的良性循环。此外，兰州新区还积极开展病种向基层下沉行动，优化双向转诊就医管理机制，规范检查检验结果互认，深化多元复合式医保支付改革，为患者提供了更加优质、高效、便捷的医保服务。同时，兰州新区还在建设平急两用公共基础应急保障医院项目及妇幼保健院建设项目，预

计 2027 年 6 月全面建成，这将进一步提升新区的医疗卫生服务体系和应对突发公共卫生事件的能力。

## 2.4 辐射环境质量现状调查

本项目销售（含建造）和使用涉及的辐射工作场所包括测调中心及用户使用场所。测调中心的环境辐射质量现状调查情况已于下文 2.4.1 及 2.4.2 小节列出。根据本项目建设内容，销售环节属于纯商务活动，销售（含建造）过程不涉及放射性操作，不涉及土建。用户单位使用场所内的安装调试和运行维护，涉及到开机出束。

由于用户单位使用场所其周围辐射环境质量现状因用户单位不同而不同。同时，考虑到用户单位在取得使用本装置的资质前，需编制环境影响评价文件，并委托有相关资质的辐射监测机构对装置使用场所进行辐射环境质量现状调查。用户进行的辐射环境质量现状调查与本项目需要进行的辐射环境质量现状是一致的。因此不再单独进行辐射环境质量现状调查。

### 2.4.1 辐射环境质量现状监测与评价

为了解本项目测调中心及周围环境的辐射环境现状，评价单位于 2025 年 4 月 11 日委托甘肃秦州核与辐射安全技术有限公司对项目工作场所及周围环境进行了辐射环境现状调查。之后于 2025 年 6 月 6 日委托长润安测科技有限公司对直线注入器开机工况下（7MeV，400  $\mu$  A）对直线注入器调试厂房周围以及直线注入器停机后 5min 直线注入器内部及热点部件进行了补充监测。具体监测情况如下。

#### 2.4.1.1 监测内容

主要监测内容包括测调中心拟改扩建小型化重离子治疗装置工作场所、已建成的直线注入器调试厂房及周围环境  $\gamma$  辐射剂量率、中子剂量当量率，以及土壤中的 Na-22、Be-7、总  $\alpha$  和总  $\beta$ 。

2.4.1.2 监测设备和监测方法

2.4.1.2.1 监测设备

监测使用主要仪器设备如表 2-1 所示。

表 2-1 仪器设备及性能指标

| 仪器名称               | 仪器型号            | 仪器编号        | 主要技术性能指标                                   | 检定有效日期                |
|--------------------|-----------------|-------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| X-γ 辐射防护剂量仪        | AT1120          | QZHA-YQ053  | 测量范围:10nSv/h~100mSv/h<br>能量响应: 40keV~7MeV  | 2025.02.12~2026.02.11 |
| 中子周围剂量当量仪          | FH40G-X/FHT762  | QZHA-YO-052 | 测量范围:1nSv/h~100mSv/h<br>能量响应: 0.025eV~5GeV | 2024.06.18~2025.06.17 |
| 低本底 α/β 测量仪        | FYFS-400X (单通道) | QZHA-YQ065  | 工作源效率:α: 85.99%;<br>β:51.26%               | 2024.03.22~2026.03.21 |
| 高纯锗 γ 谱仪           | GMX40P4-76      | QZHA-YO-066 | 相对效率:41.0%                                 | 2024.07.16~2025.07.15 |
| 便携式 X、γ 辐射周围剂量当量率仪 | MR-3512         | CR-YQ-160   | 测量范围: 10nGy/h~100mGy/h                     | 有效期至 2025 年 08 月 20 日 |
| 中子剂量监测仪            | RS1128          | CR-YQ-125   | 测量范围: 0.01 μSv/h~1Sv/h                     | 有效期至 2025 年 08 月 28 日 |

2.4.1.2.2 监测方法

监测方法列于表 2-2。

表 2-2 监测方法

| 序号 | 监测对象        | 监测方法           | 标准依据            |
|----|-------------|----------------|-----------------|
| 1  | γ 辐射剂量率     | ——             | HJ1157-2021     |
| 2  | 中子剂量当量率     | ——             |                 |
| 3  | 土壤中 Na-22   | 高纯锗 γ 能谱分析通用方法 | GB/T 11713-2015 |
| 4  | 土壤中 Be-7    | 高纯锗 γ 能谱分析通用方法 | GB/T 11713-2015 |
| 5  | 土壤中总 α 和总 β | 厚源法            | HJ 899-2017     |

2.4.1.3 质量保证措施

本项目的监测质量保证措施包括：

- (1) 监测单位具备所监测项目的资质；
- (2) 合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性；
- (3) 监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗；
- (4) 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用；
- (5) 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；
- (6) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；
- (7) 监测报告编制中数字修约采用“四舍六入五单双”的原则，放化分析结果进行了实验室间比对，严格实行三级审核制度，经过校验、审核，最后由技术总负责审定。

#### **2.4.1.4 监测点位**

在测调中心工作场所周围和内部、直线注入器调试厂房周围和内部、周围环境进行了  $\gamma$  辐射剂量率和中子周围剂量当量率的监测布点；对于土壤，在测调中心的东、西、南、北四侧各取一个取样点。

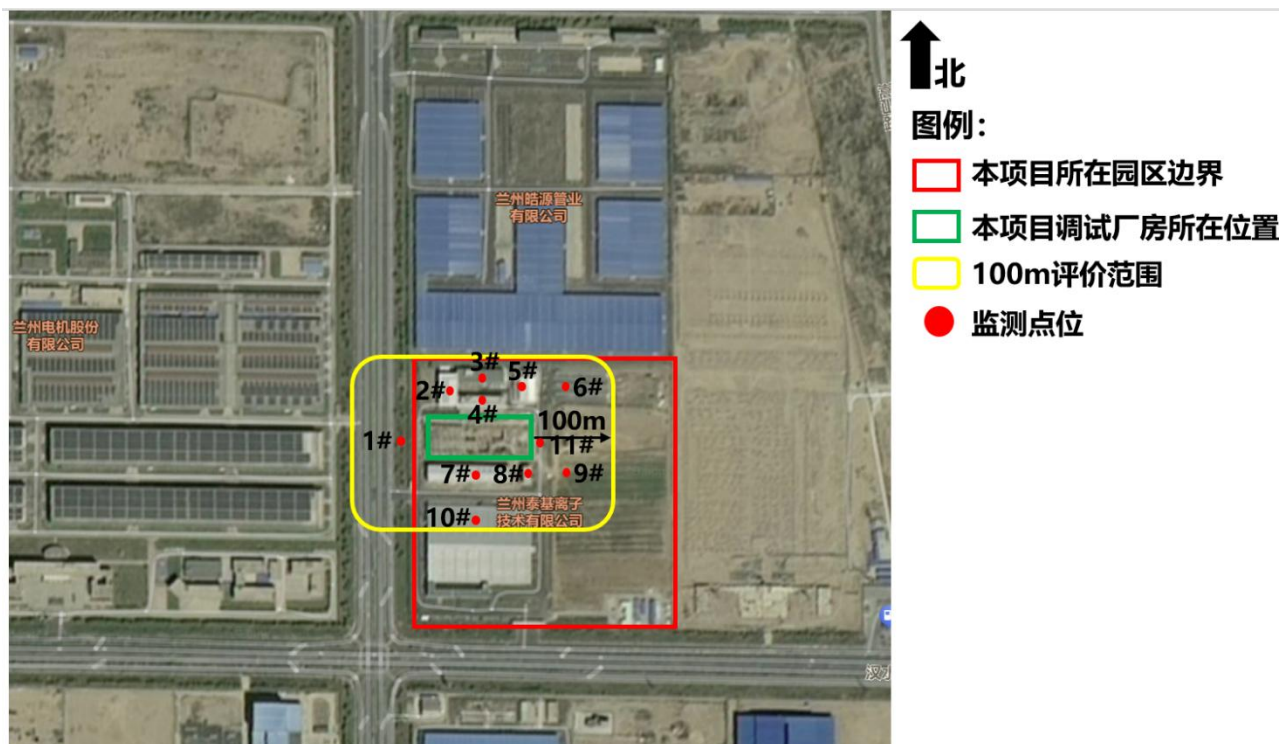


图 2-3 测调中心工作场所周围环境  $\gamma$  辐射剂量率和中子剂量当量率监测点位图

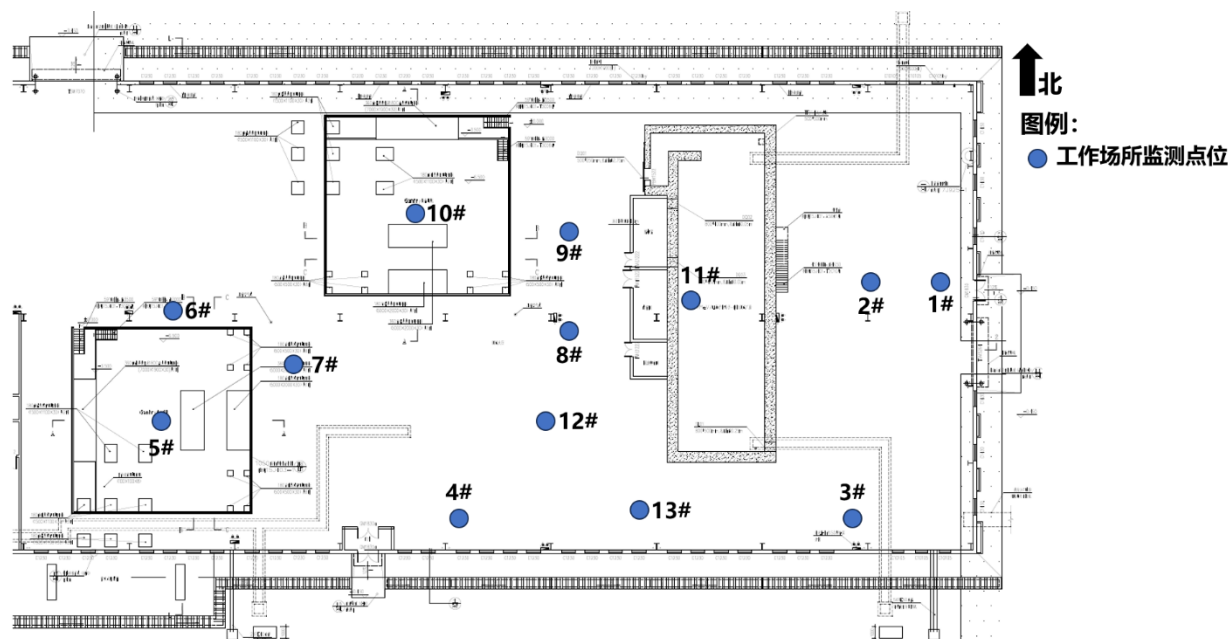


图 2-4 测调中心工作场所内  $\gamma$  辐射剂量率和中子剂量当量率监测点位图

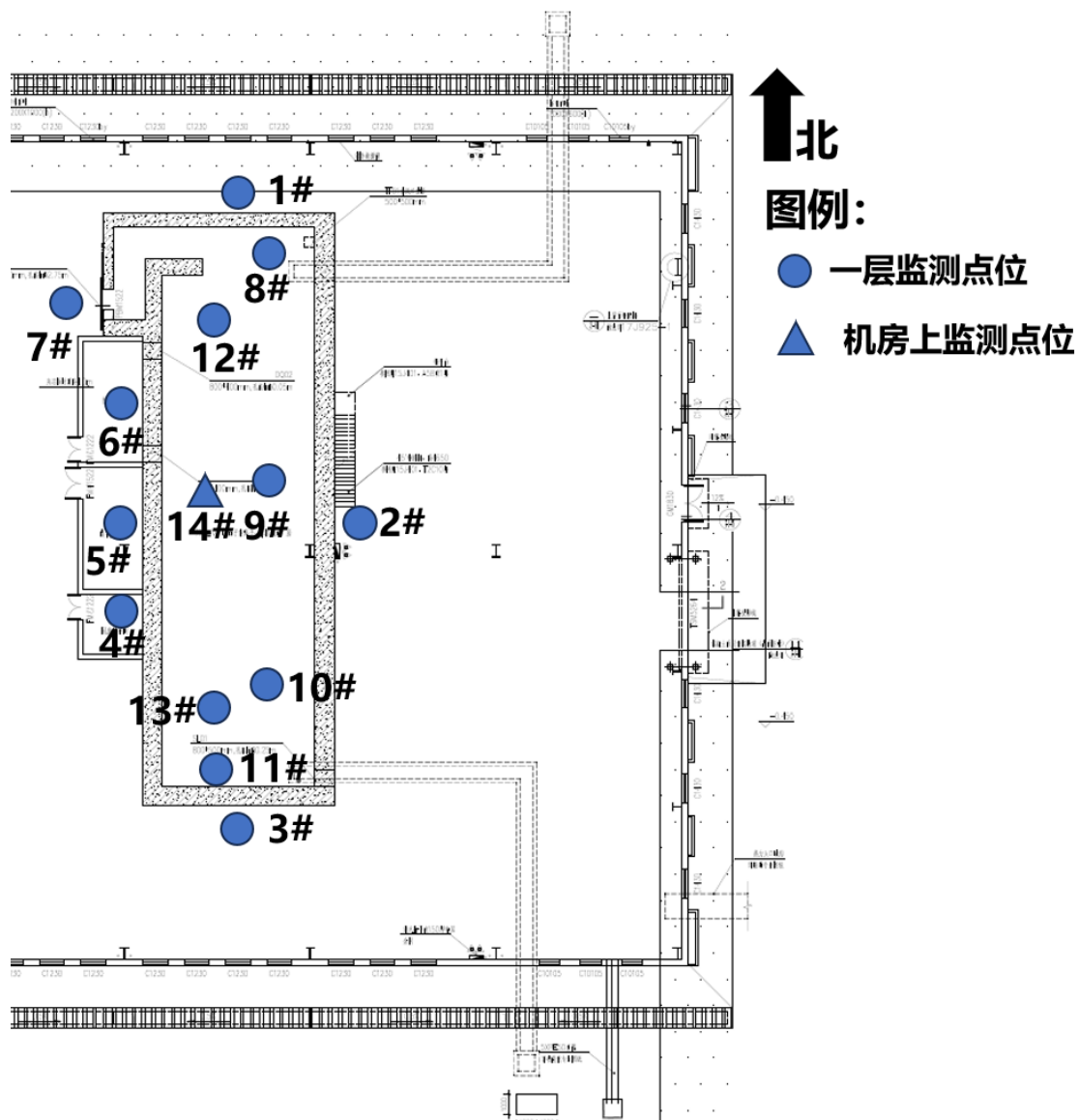


图 2-5 开机及停机 5min 后直线注入器调试厂内部及周围  $\gamma$  辐射剂量率和中子剂量当量率监测点位图

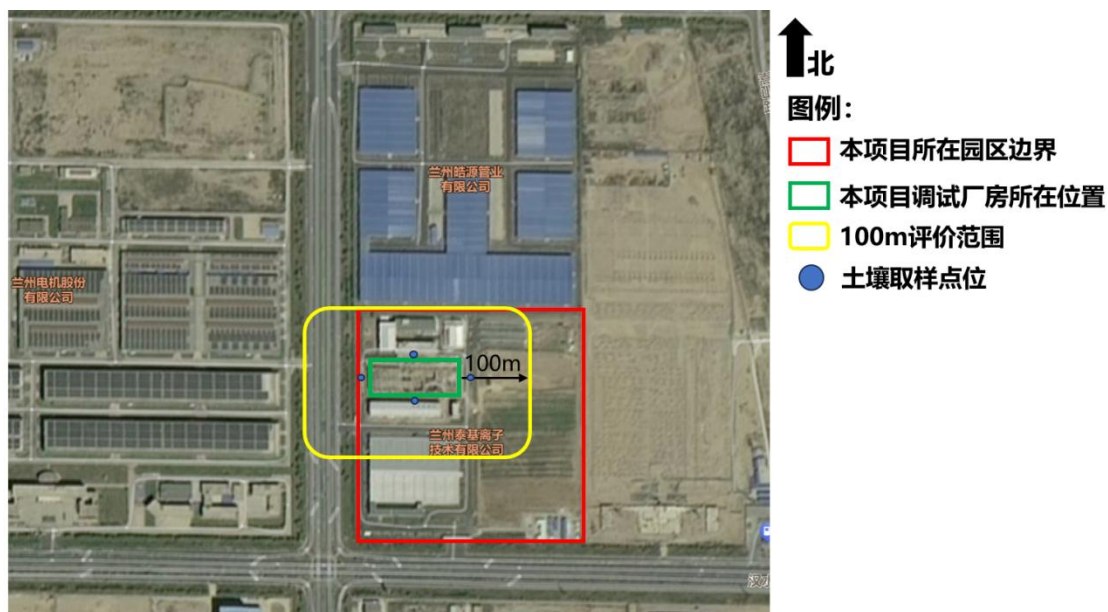


图 2-6 测调中心工作场所周围土壤取样点位图

#### 2.4.1.5 监测结果

##### 2.4.1.5.1 外照射

本项目工作场所内及工作场所周围  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率和中子周围剂量当量率监测结果见下表。

表 2-3 工作场所内  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

| 监测点位 | 点位描述         | $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率 <sup>1</sup> (nGy/h) | 中子周围剂量当量率 <sup>2</sup> (nSv/h) |
|------|--------------|-----------------------------------------|--------------------------------|
| 1    | 拟建电源机柜区 1    | 66.2±1.5                                | 13.0±0.4                       |
| 2    | 拟建同步加速器区     | 60.5±1.7                                | 14.8±0.2                       |
| 3    | 拟建电源机柜区 2    | 63.0±1.4                                | 17.2±0.2                       |
| 4    | 拟建电源机柜区 3    | 62.6±0.8                                | 13.1±0.2                       |
| 5    | 拟建 Gantry 终端 | 52.0±0.8                                | 13.5±0.2                       |
| 6    | 拟建控制室        | 49.0±2.3                                | 14.9±0.2                       |
| 7    | 拟建治疗机柜室      | 49.7±0.8                                | 17.1±0.2                       |
| 8    | 拟建电源机柜区 4    | 63.2±1.2                                | 18.1±0.2                       |
| 9    | 拟建水冷间        | 62.1±1.4                                | 16.8±0.3                       |
| 10   | 拟建 30°固定束终端  | 60.1±0.8                                | 16.5±0.3                       |
| 11   | 直线注入器区       | 107±1                                   | 27.5±0.3                       |
| 12   | 拟建电源机柜区 5    | 58.3±2.1                                | 17.0±0.3                       |
| 13   | 拟建电源机柜区 6    | 65.2±4.3                                | 16.1±0.2                       |

注：1、（1）检测结果已扣除宇宙射线响应值，刘家峡水库(经度:103.268°，纬度:35.865°，海拔:1.697km)宇宙射线响应值为 13.5nGy/h，根据经纬度及海拔修正，建设单位(经度:103.706°，纬度:36.507 海拔:1.936km)宇宙射线响应值为 15.0nGy，建筑物对宇宙射线带电粒子和光子的屏蔽因子，楼房取值为 0.8，平房取值为 0.9，原野、道路取值

为 1。(2) 仪器测量结果为周围剂量当量率(nSv/h), 为便于结果对比评价, 按照《环境  $\gamma$  辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)要求, 换算为辐射空气吸收剂量率(nGy/h)。  
2、检测结果未扣除中子剂量当量(率)仪仪器背景响应值 12.4nSv/h~29.4 nSv/h。

表 2-4 工作场所周围  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

| 监测<br>点位 | 点位描述      | $\gamma$ 辐射空气吸收剂<br>量率 <sup>1</sup> (nGy/h) | 中子周围剂量当<br>量率 <sup>2</sup> (nSv/h) |
|----------|-----------|---------------------------------------------|------------------------------------|
| 1        | 华山路       | 39.4±1.3                                    | 19.7±0.1                           |
| 2        | 报告厅       | 77.6±1.6                                    | 22.8±0.2                           |
| 3        | 倒班宿舍楼(一期) | 48.1±1.4                                    | 20.4±0.2                           |
| 4        | 倒班宿舍楼(二期) | 41.8±1.9                                    | 20.0±0.2                           |
| 5        | 食堂        | 31.9±1.6                                    | 22.7±0.3                           |
| 6        | 大棚        | 39.6±0.6                                    | 21.9±0.1                           |
| 7        | 粗加工厂房     | 35.1±0.6                                    | 16.1±0.3                           |
| 8        | 3 号厂房     | 41.0±1.0                                    | 16.8±0.3                           |
| 9        | 空地        | 49.9±2.1                                    | 19.3±0.3                           |
| 10       | 1 号厂房原材料区 | 63.7±1.5                                    | 16.2±0.3                           |
| 11       | 测调中心东侧道路  | 34.9±0.8                                    | 20.5±0.2                           |

注：1、(1) 检测结果已扣除宇宙射线响应值, 刘家峡水库(经度:103.268°, 纬度:35.865°, 海拔:1.697km)宇宙射线响应值为 13.5nGy/h, 根据经纬度及海拔修正, 建设单位(经度:103.706°, 纬度:36.507 海拔:1.936km)宇宙射线响应值为 15.0nGy/h, 建筑物对宇宙射线带电粒子和光子的屏蔽因子, 楼房取值为 0.8, 平房取值为 0.9, 原野、道路取值为 1。(2) 仪器测量结果为周围剂量当量率(nSv/h), 为便于结果对比评价, 按照《环境  $\gamma$  辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)要求, 换算为  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率(nGy/h)。  
2、检测结果未扣除中子剂量当量(率)仪仪器背景响应值 12.4nSv/h~29.4 nSv/h。

表 2-5 开机时直线注入器调试厂房周围  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

| 监测<br>点位 | 点位描述                | $\gamma$ 辐射空气吸收剂<br>量率 (nGy/h) | 中子周围剂量当<br>量率 ( $\mu$ Sv/h) |
|----------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1        | 机房北墙外 30cm 处        | 81.0±1.7                       | 0                           |
| 2        | 机房东墙外 30cm 处        | 81.0±0.9                       | 0                           |
| 3        | 机房南墙外 30cm 处        | 81.9±0.8                       | 0.025                       |
| 4        | 机房西墙外 30cm 处(固废暂存间) | 79.5±1.0                       | 0                           |
| 5        | 机房西墙外 30cm 处(设备间)   | 81.7±2.5                       | 0                           |
| 6        | 机房西墙外 30cm 处(中央控制室) | 77.7±2.0                       | 0                           |
| 7        | 机房门外 30cm 处         | 86.3±1.3                       | 0.025                       |
| 8        | 机房楼上 30cm 处         | 84.4±2.0                       | 0                           |

注：1、测量时探头距离地面约 1m;  
2、每个检测点测量 10 个数据取平均值, 以上检测结果均已扣除宇宙射线响应值;  
3、环境  $\gamma$  辐射剂量率测量结果按照公式计算:  
 $D_\gamma = K_1 \times K_2 \times R_\gamma - K_3 \times D_c$  式中:  
 $D_\gamma$ —测点处环境  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率值, nGy/h;  
 $K_1$ —仪器检定/校准因子, 取 0.90;  
 $K_2$ —仪器检验源效率因子, 取 1.2Sv/Gy;  
 $R_\gamma$ —仪器测量读数值均值;

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $K_3$ —建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子, 楼房取 0.8,平房取 0.9,原野、道路取 1;<br>$D_c$ —测点处宇宙射线响应值, 取 18.6nGy/h<br>4、本项目测点的海拔高度(海拔 1934m)、经纬度(东经:103.71, 北纬:36.51)与仪器宇宙射线响应值测点处的海拔高度(海拔 1100m)、经纬度(东经:106.2300, 北纬:38.4700), 不满足海拔高度差别<200m, 经度差别<5°, 纬度差别≤2°, 因此根据 HJ 61—2021《辐射环境监测技术规范》对仪器宇宙射线响应值(13nGy/h)进行修正。 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**表 2-6 停机 5min 后直线注入器调试厂房内部、热点部件周围  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率和中子周围剂量当量率监测结果**

| 监测<br>点位                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 点位描述                 | $\gamma$ 辐射空气吸收剂<br>量率 (nGy/h) | 中子周围剂量当<br>量率 ( $\mu$ Sv/h) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 离子源及注入器前段            | 93.1±2.7                       | 0                           |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 注入器中段                | 88.6±0.8                       | 0                           |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 注入器尾端                | 89.0±2.7                       | 0                           |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 直线注入器南墙内侧            | 99.6±1.4                       | 0                           |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 距法拉第筒(束流闸)<br>30cm 处 | 83.2±2.6                       | 0                           |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 距注入器末端 30cm 处        | 837.8±10.1                     | 0                           |
| 注：1、测量时探头距离地面约 1m;<br>2、每个检测点测量 10 个数据取平均值, 以上检测结果均已扣除宇宙射线响应值;<br>3、环境 $\gamma$ 辐射剂量率测量结果按照公式计算:<br>$D_\gamma = K_1 \times K_2 \times R_\gamma - K_3 \times D_c$ 式中:<br>$D_\gamma$ —测点处环境 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率值, nGy/h;<br>$K_1$ —仪器检定/校准因子, 取 0.90;<br>$K_2$ —仪器检验源效率因子, 取 1.2Sv/Gy;<br>$R_\gamma$ —仪器测量读数值均值;<br>$K_3$ —建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子, 楼房取 0.8,平房取 0.9,原野、道路取 1;<br>$D_c$ —测点处宇宙射线响应值, 取 18.6nGy/h<br>4、本项目测点的海拔高度(海拔 1934m)、经纬度(东经:103.71, 北纬:36.51)与仪器宇宙射线响应值测点处的海拔高度(海拔 1100m)、经纬度(东经:106.2300, 北纬:38.4700), 不满足海拔高度差别<200m, 经度差别<5°, 纬度差别≤2°, 因此根据 HJ 61—2021《辐射环境监测技术规范》对仪器宇宙射线响应值(13nGy/h)进行修正。 |                      |                                |                             |

#### 2.4.1.5.2 土壤

本项目场址周围环境土壤中放射性核素监测结果见下表。

**表 2-7 本项目拟建场址内及周围环境土壤中放射性核素监测结果**

| 样品编号   | 检测项目             | 结果, Bq/kg         |
|--------|------------------|-------------------|
| 测调中心东侧 | 总 $\alpha$       | 579               |
|        | 总 $\beta$        | 792               |
|        | Na <sup>22</sup> | <LLD <sup>1</sup> |
|        | Be <sup>7</sup>  | <LLD <sup>2</sup> |
| 测调中心西侧 | 总 $\alpha$       | 783               |
|        | 总 $\beta$        | 790               |

| 样品编号                                                                                                                   | 检测项目             | 结果, Bq/kg         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------|
|                                                                                                                        | Na <sup>22</sup> | <LLD <sup>3</sup> |
|                                                                                                                        | Be <sup>7</sup>  | 3.23              |
| 测调中心南侧                                                                                                                 | 总 α              | 681               |
|                                                                                                                        | 总 β              | 791               |
|                                                                                                                        | Na <sup>22</sup> | <LLD <sup>4</sup> |
|                                                                                                                        | Be <sup>7</sup>  | <LLD <sup>5</sup> |
| 测调中心北侧                                                                                                                 | 总 α              | 885               |
|                                                                                                                        | 总 β              | 867               |
|                                                                                                                        | Na <sup>22</sup> | <LLD <sup>6</sup> |
|                                                                                                                        | Be <sup>7</sup>  | <LLD <sup>7</sup> |
| 注：1、LLD=0.365Bq/kg；2、LLD=3.20Bq/kg；3、LLD=0.377Bq/kg；4、LLD=0.367Bq/kg；5、LLD=3.11Bq/kg；6、LLD=0.363Bq/kg；7、LLD=3.14Bq/kg。 |                  |                   |

#### 2.4.1.6 结论

直线注入器长时间停机工况下，①测调中心工作场所内 γ 辐射剂量率监测结果：49.0nGy/h~107nGy/h，中子周围剂量当量率监测结果：13.0nSv/h~27.5nSv/h（未扣除仪器背景响应值）；②周围环境 γ 辐射剂量率监测结果：31.9nGy/h~77.6nGy/h，中子周围剂量当量率监测结果：16.1nSv/h~22.8nSv/h（未扣除仪器背景响应值）。

直线注入器开机工况下（7MeV，400 μ A），直线注入器调试厂房周围的 γ 辐射剂量率监测结果：77.7nGy/h~86.3 nGy/h，中子周围剂量当量率监测结果：0~0.025 μ Sv/h。仅略高于本底水平，项目辐射环境质量现状无异常。

直线注入器停机 5min 后，直线注入器调试厂房内部及热点部件的 γ 辐射剂量率监测结果：83.2 nGy/h~837.8 nGy/h，中子周围剂量当量率监测结果均为 0。其中注入器末端靶点略高，除此之外其余热点部件位置以及直线注入器末端正对墙面剂量率结果仅略高于本底水平，对于注入器末端靶点，兰州泰基将延长出束后等待时间，待其表面 30cm 处剂量率下降到可接受水平后再执行相关拆卸或移动操作。

土壤及水样中放射性核素浓度检测结果均未超标。

#### 2.4.2 场址适宜性评价

本项目位于兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号。项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响射线装置稳定运行和安全使用的颠覆性因素。

结合本项目特征辐射污染因子和电离辐射环境影响评价范围，区域周边社会环境相对简单，评价范围内无居民区、学校等敏感目标，条件较好。

环境现状调查结果表明，项目拟建场址及周围环境的辐射环境质量良好，环境电离辐射水平均处于当地天然本底波动范围内。

同时本项目所在地块已取得用地批复，原已建成直线注入器调试机房，并进行了出束调试工作，现依托原场所改造为小型化重离子治疗装置的调试工作场所。

综上所述，本项目选址适宜开展所申请的核技术利用活动。

### 3. 工程分析与源项

#### 3.1 项目规模

##### 3.1.1 测调中心

本项目在原测调中心直线注入器（包括离子源、低能传输系统和直线加速器）的位置上保留直线注入器（包括离子源、低能传输系统和直线加速器）并加入了同步加速器、中高能传输系统及终端组成了小型化重离子治疗装置。

将原有直线注入器调试厂房屏蔽墙全部拆除，按照现有设计方案重新进行屏蔽块搭设，拆除的部分预制块用于小型化整机调试屏蔽区域的东南方向墙体，改造周期约 5.5 个月。直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）后期将保留生产、销售和使用能力，但其调试转移至用户（直线注入器使用单位）工作场所进行。并且已针对直线注入器开机及停机 5min 后的工作场所周围及内部进行了监测，监测结果显示停机 5min 后，机房内部、直线注入器末端墙面及相关热点部件表面均在本底水平范围上下波动，因此在原直线注入器调试厂房拆除、调整过程中对工作人员的辐射影响可忽略。

改扩建前后对比详情见下表。

表 3-1 改扩建前后对比一览表

| 序号 | 变动条目    | 原环评情况                                                                                                                                                                                                                        | 现环评情况                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 变动情况                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 活动种类及范围 | 生产、销售及使 II 类射线装置                                                                                                                                                                                                             | 销售（含建造）和使用 I 类射线装置，生产、销售及使 II 类射线装置                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 新增销售（含建造）和使用 I 类射线装置                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 2  | 人员配置    | 每台直线注入器工作人员共 14 人                                                                                                                                                                                                            | 每台（套）小型化重离子治疗装置辐射工作人员共 10 人（束流调试工程师，2 班 3 倒，每班 5 人）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 小型化重离子治疗装置辐射工作人员均来自于原直线注入器工作人员                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3  | 规模      | <p>直线注入器由依次连接的离子源、射频四极加速器（RFQ）、漂移管直线加速器（DTL-1 与 DTL-2）组成。于测调中心内进行调试，为小型化重离子治疗整体装置的设计、生产提供试验验证数据。同时，直线注入器设计研发成功，可作为独立的产品进行销售，为国内外相关质子/重离子加速器厂家提供注入器产品。质子最大能量 8MeV，碳离子最大能量 7MeV/u，质子流强 10mA，碳离子流强 0.5mA，年最大销售量和安装调试量为 4 台。</p> | <p>原测调中心内直线注入器（包括离子源、低能传输系统和直线加速器）位置为适应小型化重离子治疗装置的布局进行了微调。目前对（包括离子源、低能传输系统和直线加速器）加入了同步加速器、中高能传输系统及终端，组成了小型化重离子治疗装置。并在测调中心内对小型化重离子治疗装置进行出束调试，完成出束调试后拆卸运输至用户单位使用场所进行后续安装调试及运行维护。质子最大能量 230MeV、氦离子最大能量 230MeV/u、碳离子最大能量 430MeV/u、氧离子最大能量 430MeV/u，质子流强 <math>2 \times 10^{11}</math> ppm（0.534nA）、氦离子流强 <math>6 \times 10^{10}</math> ppm（0.32 nA）、碳离子流强 <math>9 \times 10^9</math> ppm（0.14nA）、氧离子流强 <math>9 \times 10^9</math> ppm（0.192nA），年最大销售（含建造）量 4 台。</p> | <p>由原单一直线注入器（包括离子源、低能传输系统和直线加速器）的调试，对其连接了同步加速器、中高能传输系统及终端，组成了小型化重离子治疗装置。并进行出束调试，完成出束调试后拆卸运输至用户单位使用场所进行后续安装调试及运行维护。年最大销售（含建造）量不变仍为 4 台，但直线注入器的调试工作转移至用户（直线注入器使用单位）工作场所进行。兰州泰基拟采取的方式是对于短时间内可大幅降低的部件进行优先拆除、转运。另外需较长时间衰变，残余剂量率仍需再下降的部件则先暂时静置，待剂量率水平进一步下降后再开始工作。工作全程在部件表面设置局部屏蔽措施，人员采用</p> |

|   |             |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                             |
|---|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |             |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                       | 工具与部件的距离拉远，并采取轮班工作减小每名工作人员的工作时间。最大程度的减小工作人员的受照剂量。                                                                                                           |
| 4 | 技术参数        | 质子最大能量 8MeV，碳离子最大能量 7MeV/u，质子流强 10mA，碳离子流强 0.5mA，是粒子能量小于 100 兆电子伏的非医用加速器，属于 II 类射线装置，环评报告类型为环境影响报告表 | 质子流强 $2 \times 10^{11}$ ppm (0.534nA)、氦离子流强 $6 \times 10^{10}$ ppm (0.32nA)、碳离子流强 $9 \times 10^9$ ppm (0.14nA)、氧离子流强 $9 \times 10^9$ ppm (0.192nA)，是粒子能量大于等于 100 兆电子伏的医用加速器，属于 I 类射线装置，环评报告类型为环境影响报告书 | 最大能量、最大流强及粒子类型为适应小型化重离子治疗装置的需要而发生变化，由原质子和碳离子变为质子、氦离子、碳离子和氧离子。流强也根据装置情况发生了变化。束流损失参数见表 3-10~表 3-12。                                                           |
| 5 | 工作场所布局及辐射屏蔽 | 直线注入器调试厂房位于测调中心东侧，四周及顶板屏蔽为 0.3m~1m 混凝土、底板为土层加 0.6m 筏板。                                              | 将原有直线注入器调试厂房屏蔽墙全部拆除，按照现有设计方案重新进行屏蔽块搭设，拆除的部分预制块用于小型化整机调试屏蔽区域的东南方向墙体，直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）的位置向西微调 4m，同时根据同步加速器、中高能束运线及终端的位置新建屏蔽墙体。目前测调中心内小型化重离子治疗装置工作场所四周、顶板及底板厚度为 0.2m~4.6m 混凝土。                   | 将原有直线注入器调试厂房屏蔽墙全部拆除，按照现有设计方案重新进行屏蔽块搭设，拆除的部分预制块用于小型化整机调试屏蔽区域的东南方向墙体，并将直线注入器（包括离子源、低能传输系统和直线加速器）的位置向西微调 4m，后端加入同步加速器、中高能传输系统及中断后，新建屏蔽墙体，组成现小型化重离子治疗装置的调试工作场所。 |
| 6 | 辐射防护措施      | <b>辐射工作场所分区：</b> 控制区：测调中心内直线注入器调试厂房；<br>监督区：直线注入器调试厂房西侧控制室、设备间、固废暂存间及直线注                            | <b>辐射工作场所分区：</b><br><b>控制区：</b> 加速器大厅、束流输运隧道、360°旋转束终端、30°固定束终端和放射性固体废物暂存间；                                                                                                                           | <b>辐射工作场所分区：</b> 辐射工作场所分区中控制区由直线注入器机房内部变更为加速器大厅、束流输运隧道、360°旋转束终端、30°固定束                                                                                     |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>入器调试厂房四周其他区域</p> <p><b>安全联锁系统：</b><br/>直线注入器调试厂房内设置清场按钮、急停按钮、紧急开门按钮、工作状态指示灯并在直线注入器调试厂房迷道口、控制室入口及固废暂存间入口处设置门禁，离子源出口处设置法拉第筒（加速器停机，人员进入前离子源出口法拉第筒在线，加速器开机前巡检完成联锁恢复，法拉第筒允许离线）。</p> <p><b>场所监测系统：</b><br/>直线注入器调试厂房内部设置 1 个辐射监测点。由 中子及 <math>\gamma</math> 探测器组成，测量数据实时上传至辐射监测数据库。</p> <p><b>三废处理措施：</b><br/><b>放射性废气：</b>直线注入器运行期间将产生感生放射性气体，通过通风系统由厂房排入环境，正常运行情况下换气次数 0.5 次/小时，清洁通风换气次数 5 次/小时；<br/><b>放射性废水：</b>直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）调试过程中产生的放射性废液主要是活化的冷却水（冷却水位于主管道中，</p> | <p><b>监督区：</b>上述各控制区屏蔽墙体外四周紧邻的场所，如控制室及设备机房等。</p> <p><b>安全联锁系统：</b><br/>改扩建后小型化重离子治疗装置的工作场所，由于由 II 类射线装置变为了 I 类射线装置，同时工作场所变大，因此安全联锁设施增多，设置了剂量联锁、门机联锁、急停按钮、清场按钮、声光报警灯、工作状态显示装置及束流阻挡器（材质为铜，防止束流进入有人区域。束流阻挡器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），加速器大厅及终端入口处设置出入控制系统，相比原直线注入器机房更加完善。</p> <p><b>场所监测系统：</b><br/>监测点位增加至 10 个，包括加速器大厅和束流输运系统区域设置 5 个监测点位；两终端区域内各设置 1 个监测点位；加速器大厅与两终端防护门外各设置 1 个监测点位。每个监测点由一台 中子探测器和一台 <math>\gamma</math> 探测器组成。</p> <p><b>三废处理措施：</b><br/><b>放射性废气：</b>小型化重离子治疗装置工作场所各区域均设有通风系统，装置运行过程中产生的感生放射性气体最终由测调中心两侧排风机排入环境，正常运行时换气次数为</p> | <p>终端和放射性固体废物暂存间；</p> <p><b>安全联锁系统：</b>由于由 II 类射线装置变为了 I 类射线装置，同时工作场所变大，因此安全联锁设施进行了重新布设。</p> <p><b>场所监测系统：</b>监测点位新增至 10 个，每个监测点由一台 中子探测器和一台 <math>\gamma</math> 探测器组成。</p> <p><b>三废处理措施：</b><br/>放射性三废产量相比原直线注入器是增加的。<br/><b>放射性废气：</b>已根据工作场所布局重新设置了通风系统；<br/><b>放射性废水：</b>沿用原废水暂存池；<br/><b>放射性固体废物：</b>于加速器大厅东南角新增了 1 个放射性固体废物暂存间，原放射性固体废物暂存间随着原工作场所的拆除已取消。</p> |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |  | <p>共 0.8m<sup>3</sup>)。放射性废水通过防倒流地漏、排水沟等进行收集, 汇入厂外收集池(2 个收集池, 分别位于调试厂房东北和西南方, 单个尺寸为长 2.0m×宽 1.0m×高 1.5m), 设置有水样采样口, 随时可对水体进行采样测量;</p> <p><b>放射性固体废物:</b> 产生的主要放射性固体废物为维护维修环节更换下来的一些易损易活化的结构部件、冷却水系统更换下来的离子交换树脂等。建设单位拟在调试厂房内部西南角 2.0m×2.0m 小隔间内暂存放射性固体废物。建设单位根据放射性固体废物的贮存情况进行集中处理, 处理前需对其活度或活度浓度进行分析, 建设单位需对每次放射性固体废物的处理情况进行记录并存档, 具体记录内容包括每次处理的固体废物名称种类、废物量、剂量率监测结果以及最终去向等。</p> | <p>0.5 次/小时, 停机后强排换气次数 5 次/小时, 以满足人员进入的要求。</p> <p><b>放射性废水:</b> 沿用原直线注入器调试厂房设置的废水暂存池, 加速器回路冷却水最大排放量约为 3m<sup>3</sup>。暂存池设置有水样采样口, 随时可对水体进行采样测量, 并在排放前取样检测。检测达标后排放, 测调中心内设置单独的排水系统, 用以收集这些区域的事故排水和检修排水, 与普通生活污水分隔开, 最终于市政管网排放。</p> <p><b>放射性固体废物:</b> 小型化重离子治疗装置可能产生的放射性固体废物主要为不再回收利用的活化部件及维修维护过程中被污染的劳保用品和冷却水系统更换下来的离子交换树脂。年产生量不超过 2.36m<sup>3</sup>, 加速器大厅的东南角设置了放射性固体废物暂存间(尺寸为 2000×2000×2000mm), 放射性固体废物暂存间是用铁栅栏围成的小房间, 物理隔离有门有锁, 出入库部件和废物均需进行记录台账, 需要进行标识粘贴(电离辐射标识及房间标识)。因暂存间位于控制区内, 因此不考虑屏蔽。特殊情况下有临时检修部件存放只需在测量检修部件表面剂量率后用警戒带拉出警戒区域。当放射性固体废物的暂存量接近一定容量时, 委托有资质单位进</p> |  |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

|  |  |  |                |  |
|--|--|--|----------------|--|
|  |  |  | 行集中测量分析，并最终处置。 |  |
|--|--|--|----------------|--|

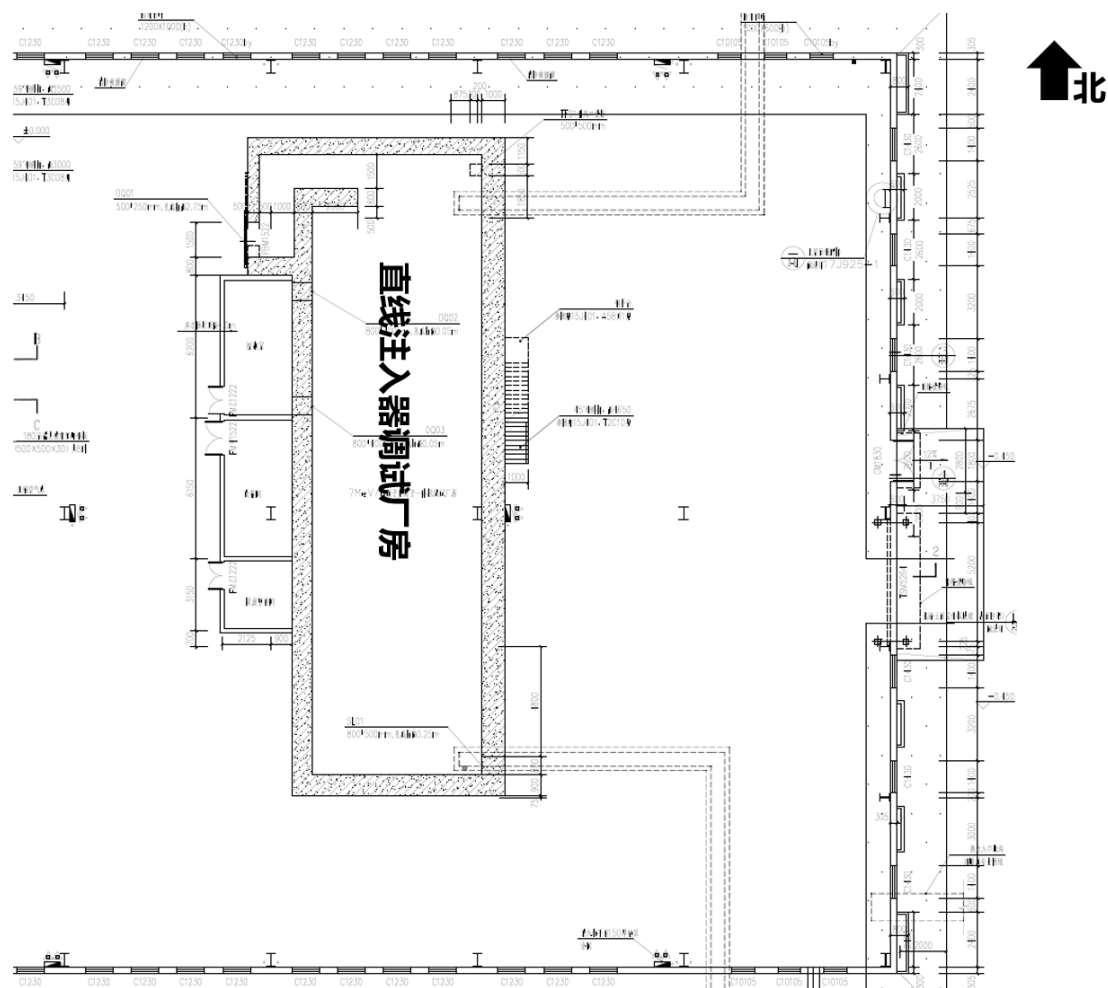


图 3-1 原直线注入器调试厂房布局图

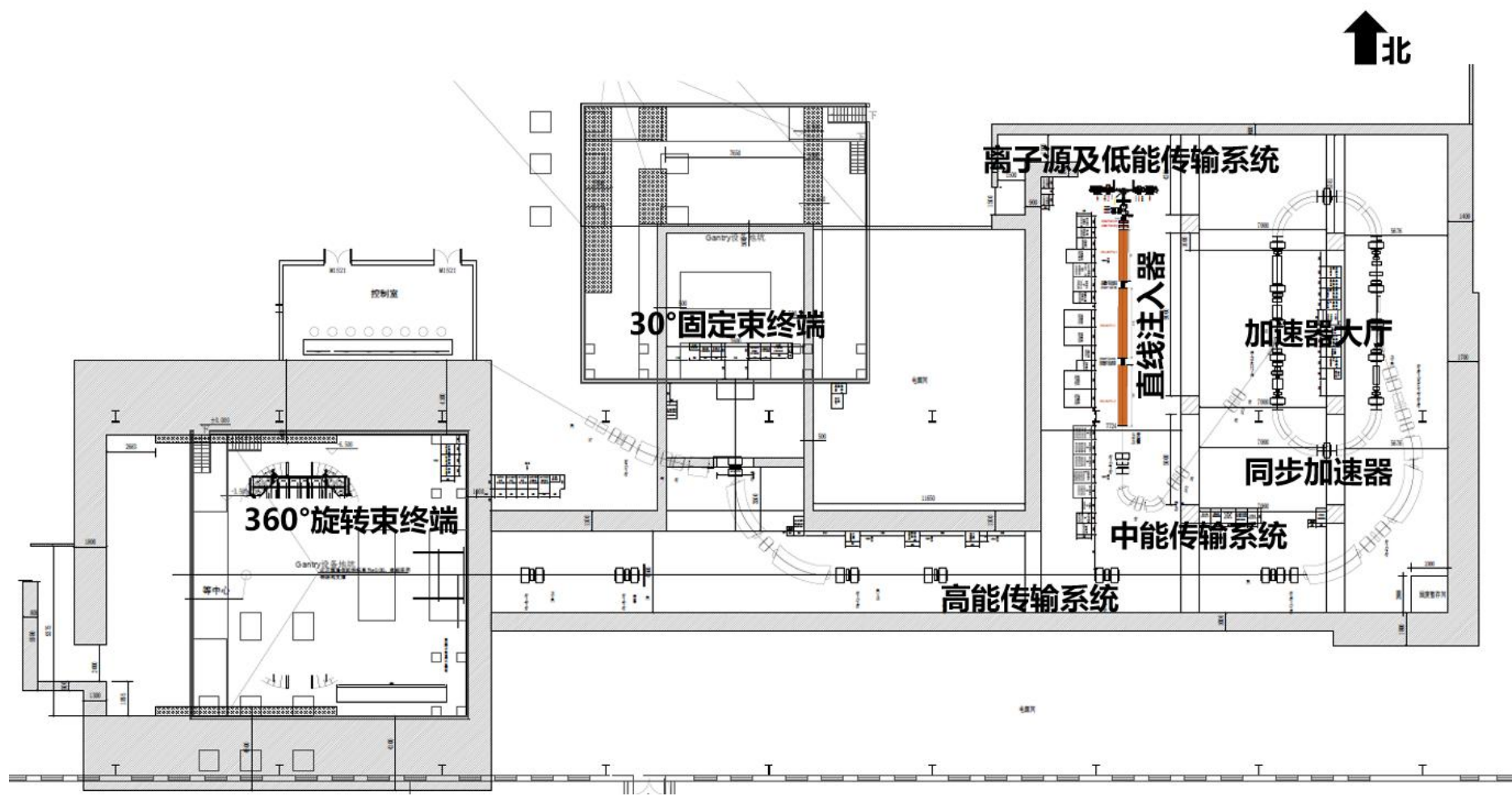


图 3-2 现测调中心内小型化重离子治疗装置平面布局图

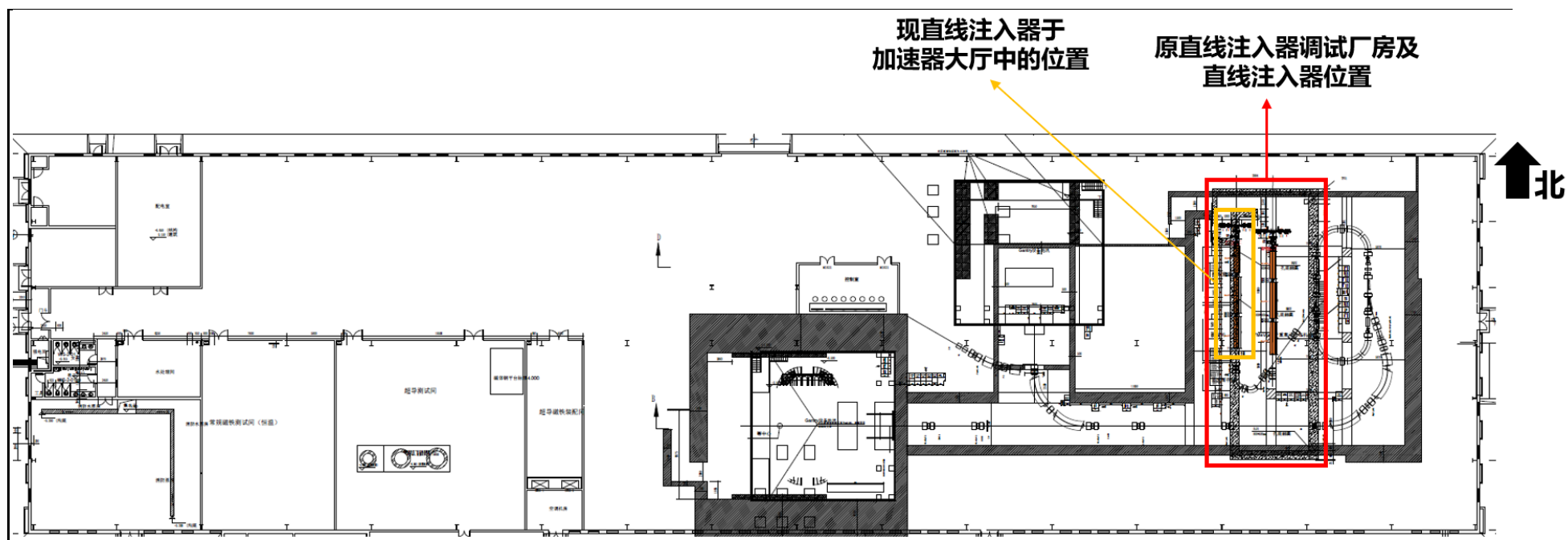


图 3-3 直线注入器前后位置调整平面布局图

### 3.1.2 用户单位

典型案例中小型化重离子治疗装置位于用户单位的重离子治疗中心，共占所在建筑的上下四层。地上一层为加速器大厅、束流输运系统（地上一层部分）、1间科研终端（水平）及4间治疗室（治疗室1：水平+垂直、治疗室2：水平+45°、治疗室3:360°旋转束、治疗室4：360°旋转束）；地上二层为加速器大厅及束流输运系统上空、治疗室3、4的上空；地上三层为束流输运系统（高能爬升区）和治疗室3、4的上空，地上四层为加速器大厅及束流输运系统上方屋面、治疗室3、4的屋面。典型布局图如下所示：

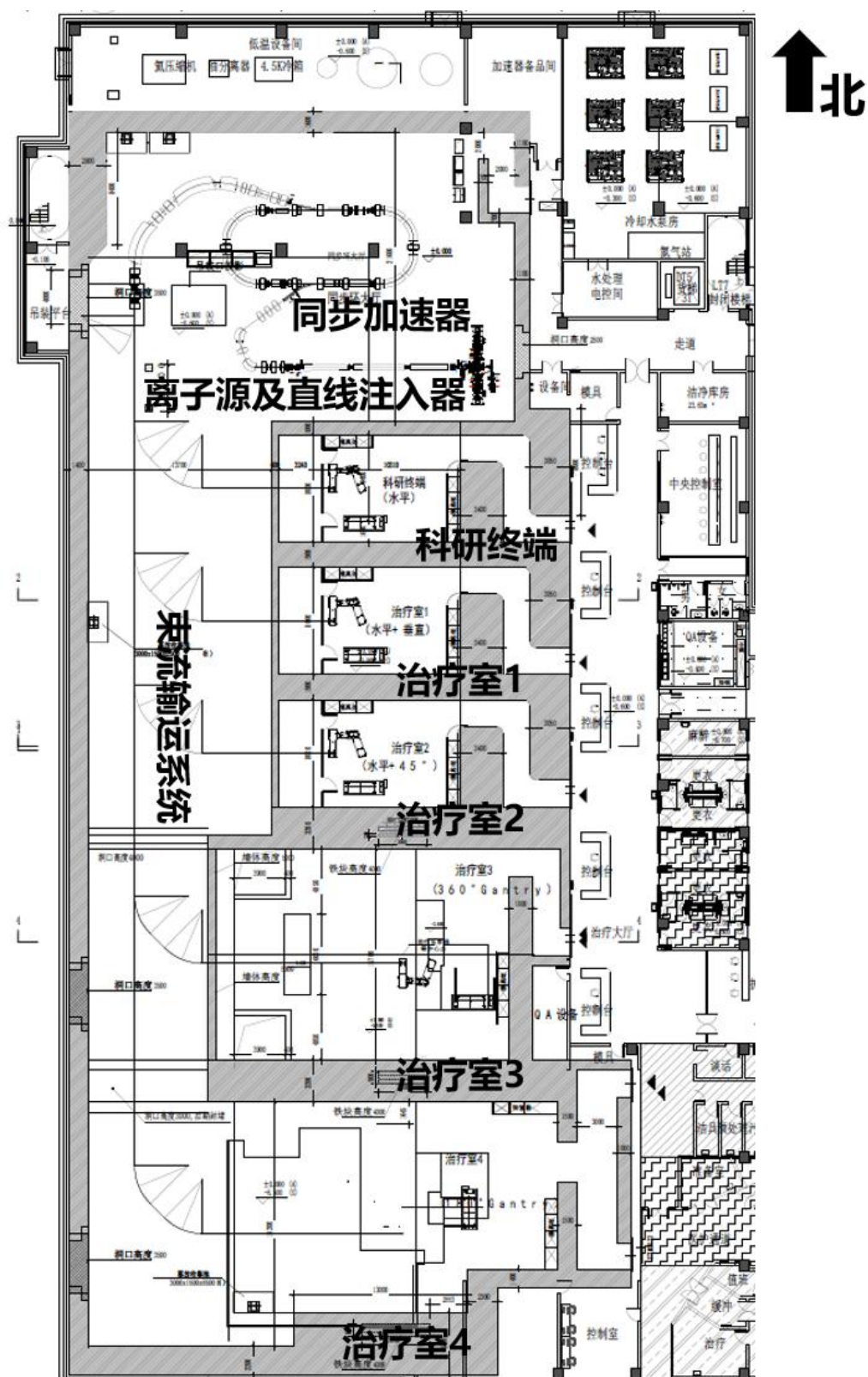


图 3-4 用户单位典型案例小型化重离子治疗装置地上一层平面布局图

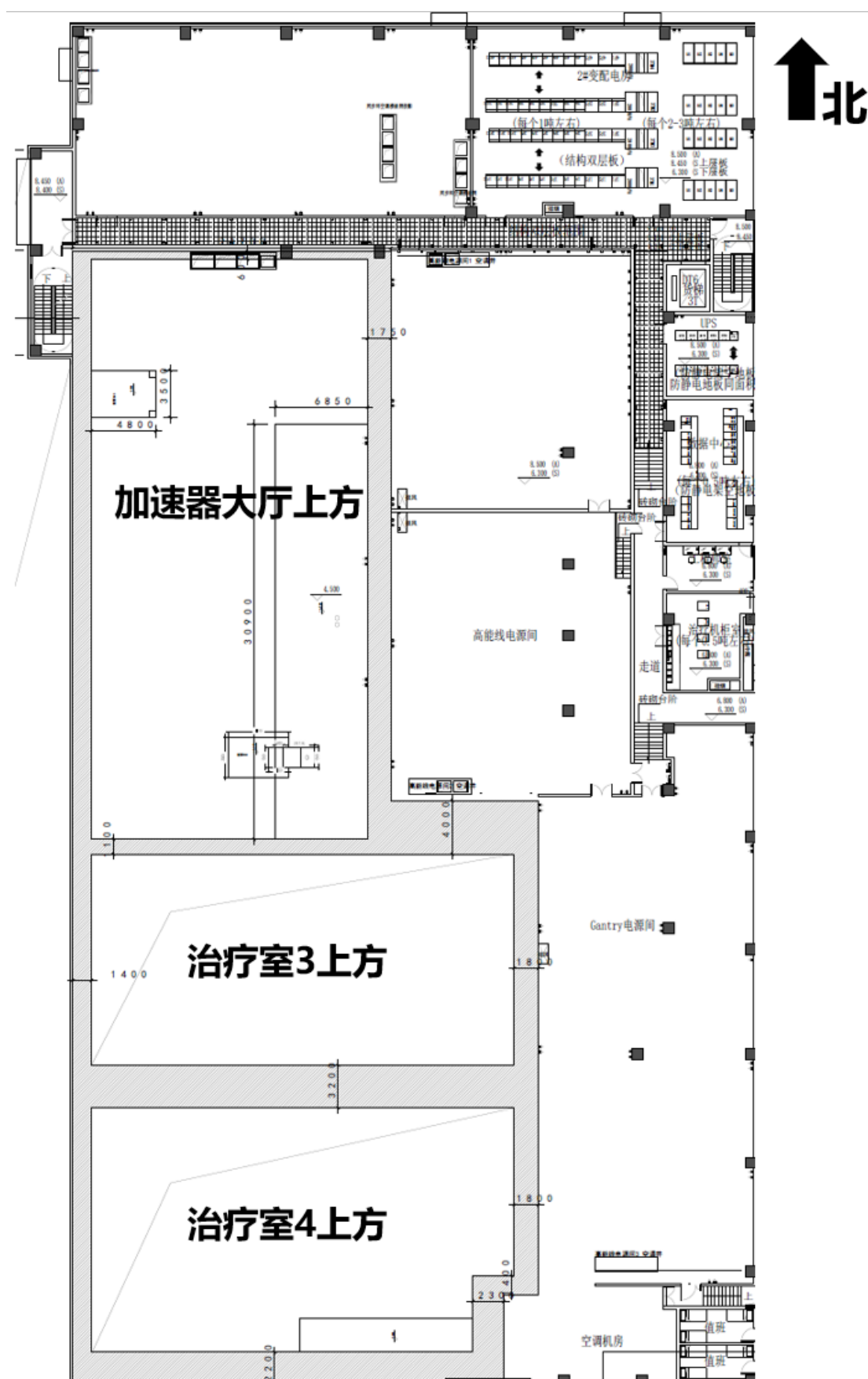


图 3-5 用户单位典型案例小型化重离子治疗装置地上二层平面布局图

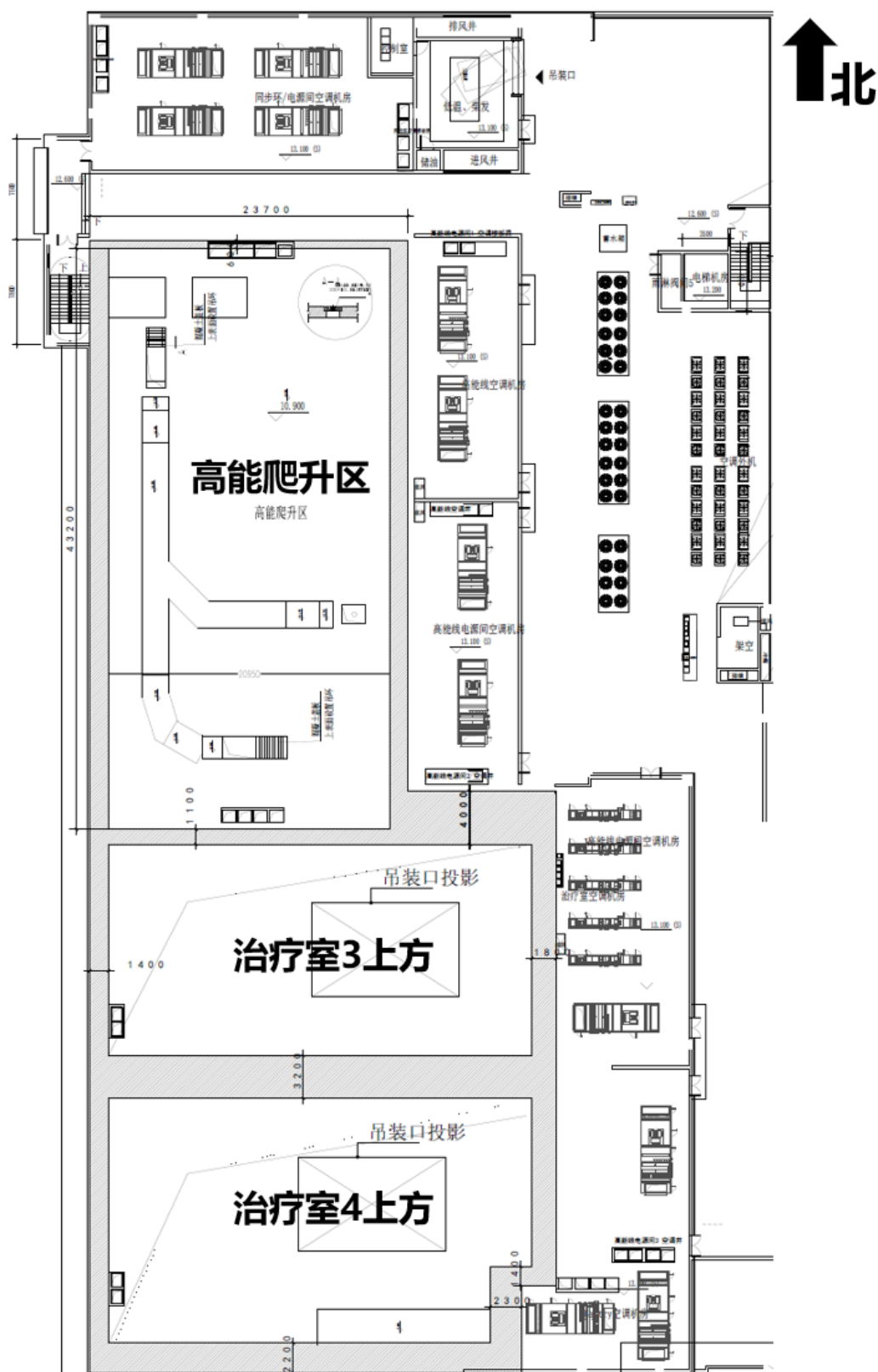


图 3-6 用户单位典型案例小型化重离子治疗装置地上三层平面布局图

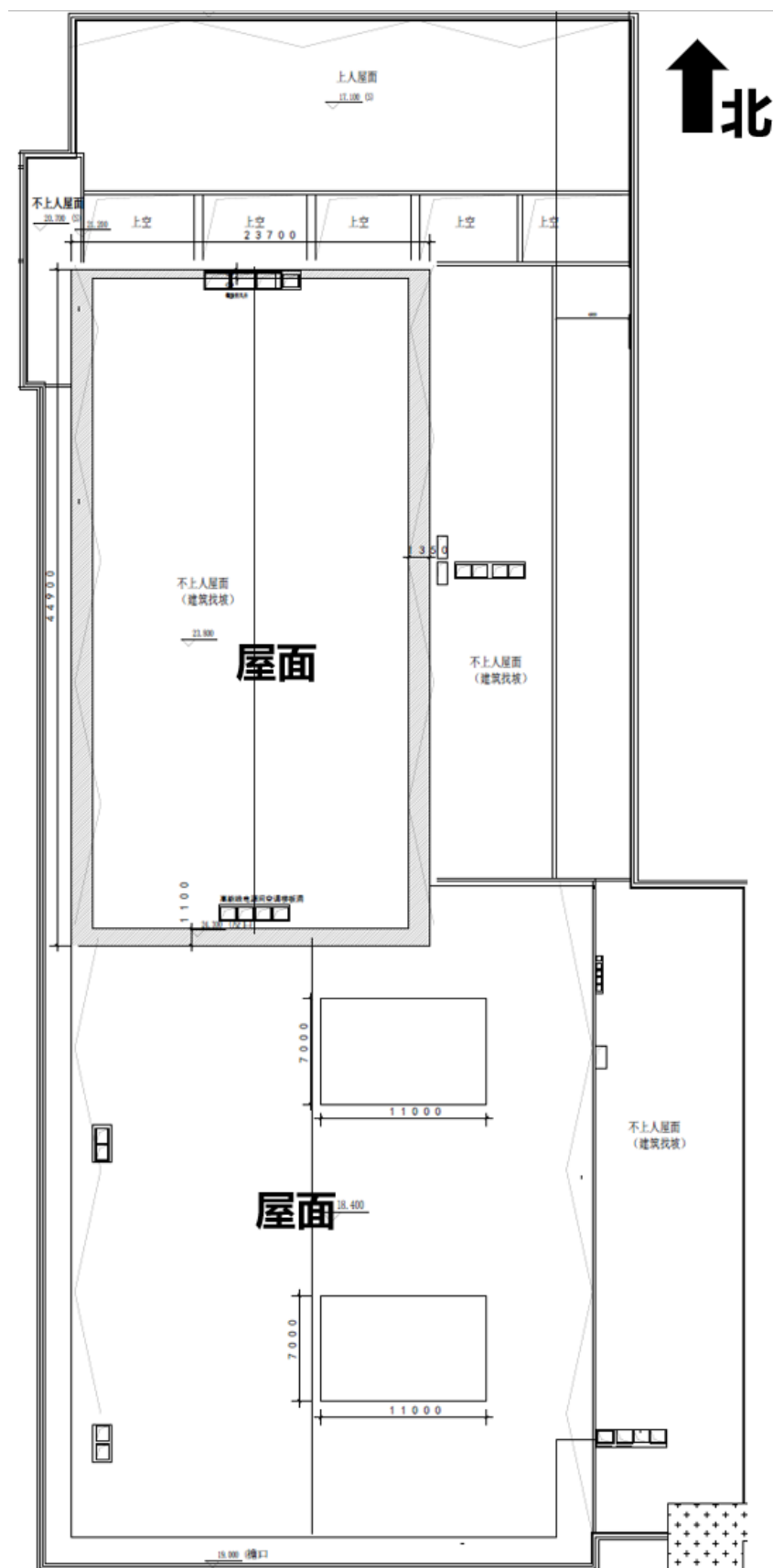


图 3-7 用户单位典型案例小型化重离子治疗装置地上四层平面布局图

小型化重离子治疗装置的推荐配置如下：

360°旋转束治疗室可选择数量不少于 1 间；

固定束治疗室通常可选择种类为：水平+垂直固定束治疗室、水平+45°固定束治疗、水平或垂直治疗室等。可选择数量同样不少于 1 间。

小型化重离子治疗装置的推荐配置清单见表 3-2。

**表 3-2 小型化重离子治疗装置推荐配置清单**

| 治疗室配置<br>(照射方向) | 360°旋转束治疗室 | 固定束治疗室              |
|-----------------|------------|---------------------|
|                 |            | 水平+垂直、水平+45°、水平或垂直等 |
| 治疗室数量           | 不少于 1 间    | 不少于 1 间             |

## 3.2 装置概况

小型化重离子治疗装置主要技术指标情况见表 3-3。

**表 3-3 小型化重离子治疗装置主要技术指标**

| 参数         | 主要指标                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 设备型号       | HiTS 400S                                                                                                                                                                                                                                          |
| 生产厂家       | 兰州泰基离子技术有限公司                                                                                                                                                                                                                                       |
| 粒子种类       | $^{12}\text{C}^{6+}$ 、 $^4\text{He}^{2+}$ 、 $^{16}\text{O}^{8+}$ 、 $\text{H}^+$                                                                                                                                                                    |
| 加速方式       | 高频电场同步加速                                                                                                                                                                                                                                           |
| 束流配送方式     | 调制扫描                                                                                                                                                                                                                                               |
| 终端最高引出束流强度 | $^{12}\text{C}^{6+}$ : $9 \times 10^9 \text{ppm}$ (0.14nA)<br>$^4\text{He}^{2+}$ : $6 \times 10^{10} \text{ppm}$ (0.32nA)<br>$^{16}\text{O}^{8+}$ : $9 \times 10^9 \text{ppm}$ (0.192nA)<br>$\text{H}^+$ : $2 \times 10^{11} \text{ppm}$ (0.534nA) |
| 能量范围       | $^{12}\text{C}^{6+}$ : 7MeV/u~430MeV/u<br>$^4\text{He}^{2+}$ : 7MeV/u~230MeV/u<br>$^{16}\text{O}^{8+}$ : 7MeV/u~430MeV/u<br>$\text{H}^+$ : 7MeV~230MeV                                                                                             |
| 射程范围       | 4-300mm                                                                                                                                                                                                                                            |
| 剂量率        | $\leq 2 \text{Gy/min/L}$                                                                                                                                                                                                                           |
| 束斑位置精度     | $\leq 1 \text{mm}$                                                                                                                                                                                                                                 |

### 3.2.1 装置组成

HiTS 400S 小型化重离子治疗装置由离子源、低能传输系统、直线注入器、中能传输系统、同步加速器、高能传输系统及终端组成，离子源提供的  $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $H^+$ 、 $He^{2+}$  离子束。用户单位 HiTS 400S 小型化重离子治疗装置仅终端种类和数量不同。小型化重离子治疗装置原理示意图如图 3-8 所示：

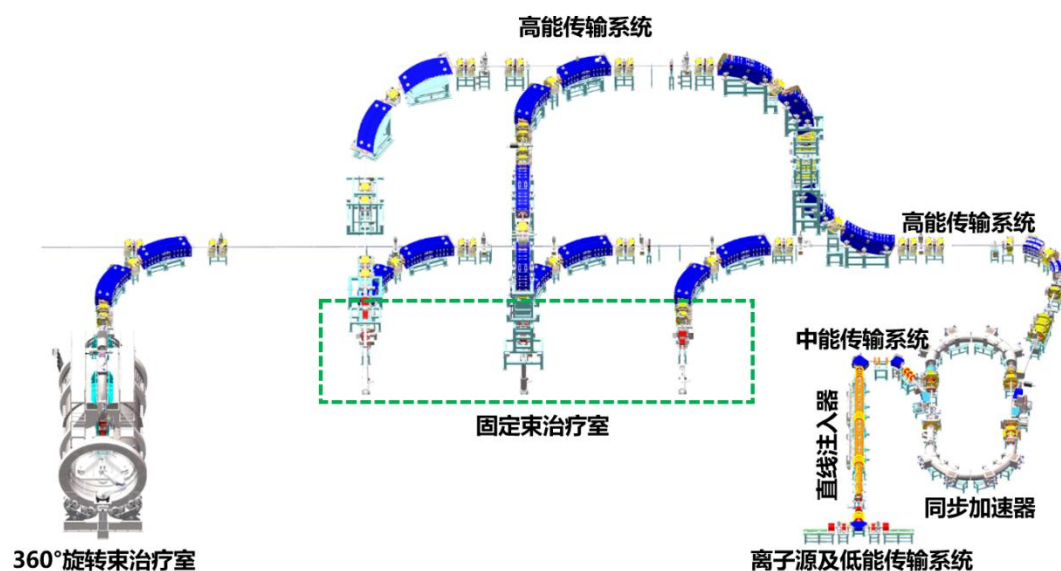


图 3-8 小型化重离子治疗装置原理示意图

### 3.2.2 工作原理

#### 3.1.2.1 离子源及低能传输系统

离子源及低能传输系统中的离子源为 ECR（Electron Cyclotron）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。离子源工作原理如图 3-9 所示。

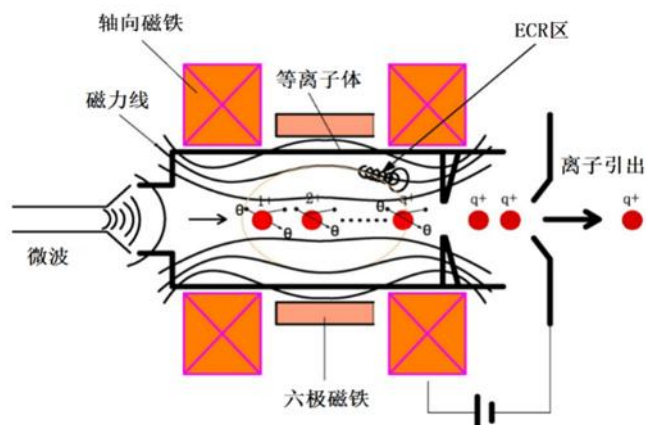


图 3-9 离子源工作原理图

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，首先经低能传输系统前端的离子束分析系统，利用不同能量质荷比离子束在分析系统末端横向相点位置不同的原理，筛选出直线加速器需要的各类离子束，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直线加速器。以碳离子为例，离子源系统产生的离子束为  $^{12}C^{4+}$ ，因直线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  $^{12}C^{4+}$  离子束，为了避免中高能  $^{12}C^{4+}$  离子束在同步加速器入口大量损失造成设备损伤，在低能传输系统中增加了斩波器，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转。离子源及低能传输系统示意图如图 3-10 所示。

法拉第筒用于束流拦截式测量，在束流调试阶段在需求位置的法拉第筒插入在线测量束流强度，在束流引出至终端使用时法拉第筒离线。法拉第筒分别位于离子源出口，直线出口，同步环注入口，法拉第筒主要材质为铜，为高 114mm 的锥形筒状结构，结构示意图见图 3-11。

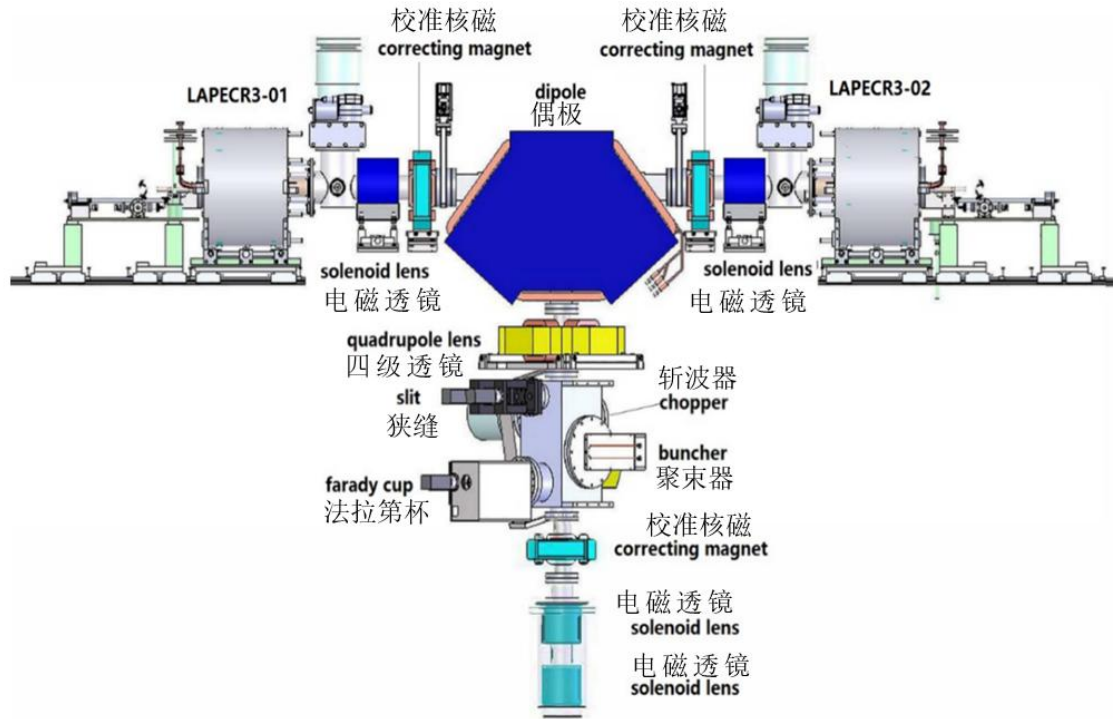


图 3-10 离子源及低能传输系统示意图

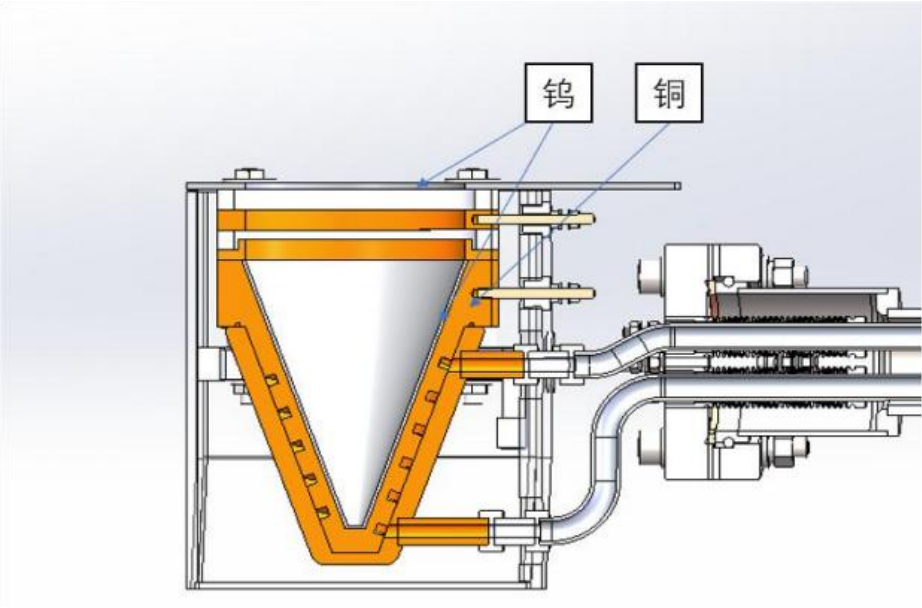


图 3-11 法拉第筒结构示意图

### 3.1.2.2 直线注入器

直线注入器作为重离子治疗装置主加速器的注入器，主要作用是加速由离子源产生并传输至直线注入器入口的低能离子束，为同步加速器提供确定能量、足够流强并具备一定束流品质的中能离子束，以与同步加速器匹配，满足同步加速器设计要求。

直线注入器采用多台离子源提供多种荷质比相等或相近的粒子，包括  $^{12}\text{C}^{4+}$ 、 $^{16}\text{O}^{5+}$ 、 $^4\text{He}^{2+}$ 、 $\text{H}^+$ 。以碳离子为例说明，重离子直线加速器采用射频四极场加速器 RFQ 作为注入器前级，将低能输运线出口的  $10\text{keV/u}$  的低能离子束加速到  $0.6\text{MeV/u}$ ，后接交变相位漂移管加速器 APF-1 将离子束加速到  $4\text{MeV/u}$ ，之后根据实际需求再接交变相位漂移管加速器 APF-2 将离子束加速到  $7\text{MeV/u}$ 。

直线注入器示意图如下所示。

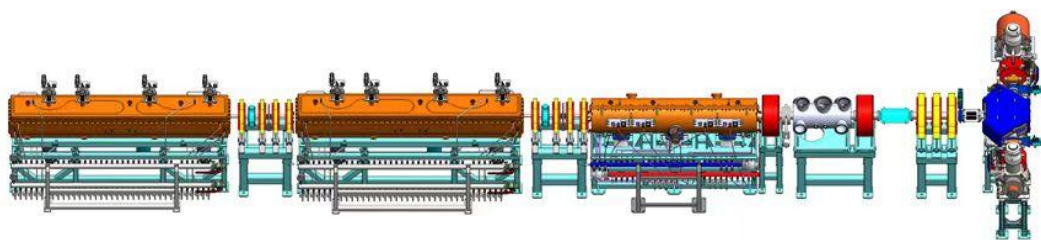


图 3-12 直线注入器布局示意图

在直线注入器的出口处（中能传输系统靠近直线注入器端）剥离膜装置把  $^{12}\text{C}^{4+}$  离子剥离成  $^{12}\text{C}^{6+}$ ，经中能传输系统传输至同步加速器注入口。

### 3.1.2.3 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。中能传输系统结构示意图如图 3-13 所示。



图 3-13 中能传输系统结构示意图

#### 3.1.2.4 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，也是碳离子束的主加速装置，主要用来将从直线加速器引出并通过中能传输系统传输到同步环的  $7\text{MeV/u}$  的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。以  $^{12}\text{C}^{6+}$  离子为例，同步加速器采用多圈注入方式直接注入  $^{12}\text{C}^{6+}$ ，然后加速碳离子  $^{12}\text{C}^{6+}$  束到治疗所需最大能量  $430\text{MeV/u}$ ，再引出到高能传输系统。

同步加速器采用多圈注入的设计。利用凸轨将同步加速器的循环轨道凸起，注入束经过静电偏转板后轨迹与循环轨道重合。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。同步加速器的磁场强度随被加速粒子能量的增加

而增加，从而保持粒子的回旋轨道不变，并通过调节高频频率，来保持粒子持续加速。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 3-4 所示，结构示意如图 3-14 所示。本项目同步加速器由以往常规磁铁同步加速器升级为超导磁铁同步加速器，占地空间变小，原常规磁铁同步加速器总周长 56m，占地 460m<sup>2</sup>，超导同步加速器围绕缩小占地面积展开设计。同步环整体采用二折对称的跑道型结构,这样的设计不仅紧凑，还便于灵活调节元件位置,提高空间利用率。主磁铁采用超导磁铁的方案，显著提高磁场强度，同时减小磁铁尺寸及重量，节省更多空间。现超导磁铁同步加速器总周长 34.95m，占地面积 120m<sup>2</sup>，两种同步加速器的对比示意图如图 3-15 所示。

表 3-4 同步加速器束流参数

| 主参数          |                               |
|--------------|-------------------------------|
| 磁刚度 (T.m)    | 0.76-6.624                    |
| 碳离子束流参数      |                               |
| 离子种类         | <sup>12</sup> C <sup>6+</sup> |
| 最高能量(MeV/u)  | 430                           |
| 环内注入离子数(ppm) | 2.29E+10                      |
| 终端粒子数(ppm)   | 9.0E+09                       |
| 碳离子注入束参数     |                               |
| 能量(MeV/u)    | 7                             |
| 流强(euA)      | 450                           |
| 氧离子束流参数      |                               |
| 离子种类         | <sup>16</sup> O <sup>8+</sup> |
| 最高能量(MeV/u)  | 430                           |
| 环内注入离子数(ppm) | 2.29E+10                      |
| 终端粒子数(ppm)   | 9.0E+09                       |
| 氧离子注入束参数     |                               |
| 能量(MeV/u)    | 7                             |

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| 流强(euA)      | 600                  |
| 氦离子束流参数      |                      |
| 离子种类         | ${}^4\text{He}^{2+}$ |
| 最高能量(MeV/u)  | 230                  |
| 环内注入离子数(ppm) | $1.52\text{E}+11$    |
| 终端粒子数(ppm)   | $6.0\text{E}+10$     |
| 氦离子注入束参数     |                      |
| 能量(MeV/u)    | 7                    |
| 流强(euA)      | 1005                 |
| 质子束流参数       |                      |
| 离子种类         | $\text{H}^+$         |
| 最高能量(MeV)    | 230                  |
| 环内注入离子数(ppm) | $5.08\text{E}+11$    |
| 终端粒子数(ppm)   | $2.0\text{E}+11$     |
| 质子注入束参数      |                      |
| 能量(MeV)      | 7                    |
| 流强(euA)      | 1680                 |

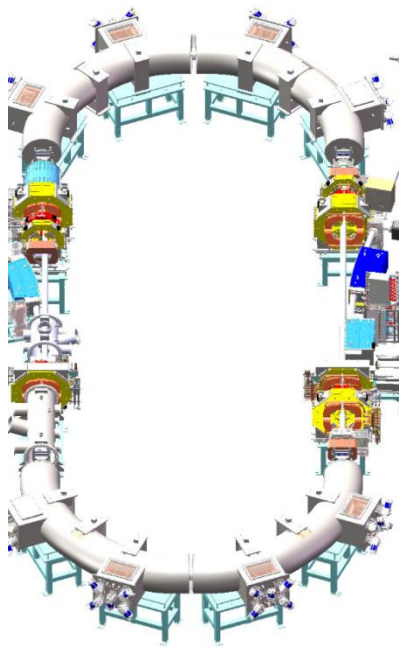


图 3-14 同步加速器结构示意图

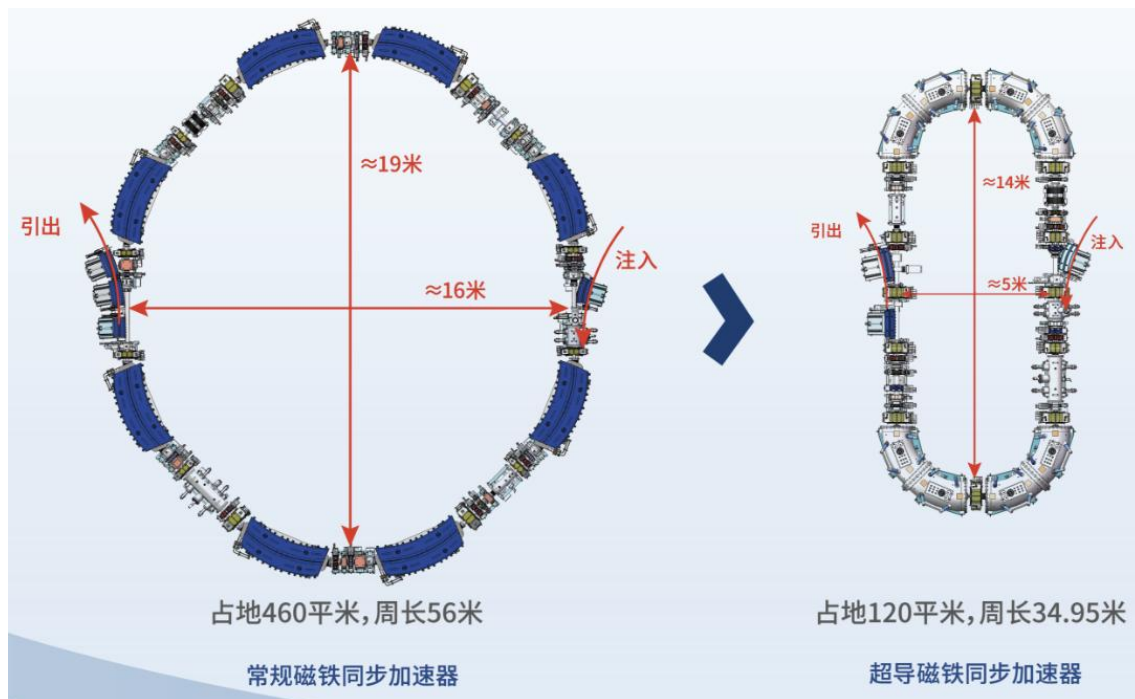


图 3-15 常规磁铁同步加速器与超导磁铁同步加速器布局大小对比示意图

### 3.1.2.5 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。

### 3.1.2.6 终端

测调中心内设置两个终端，分别为 30°固定束终端及 360°旋转束终端。两终端在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一间终端提供束流。由于小型化重离子治疗装置在测调中心初步调试完成，后续将在用户单位进行全面调试。因此测调中心设置两终端并对其进行调试，以确保终端的功能是可用的。以便后续的调试工作能够顺利进行。

用户单位小型化重离子治疗装置使用场所终端类型与数量由用户单位与兰州泰基签订的合同中确定，本次评价中典型案例由 2 间固定束治疗室（治疗室 1：水平+垂直、治疗室 2：水平+45°）、1 间科研终端（水平）及 2 间 360°旋转束治疗室组成。

各终端配置包括：旋转机架（360°旋转束终端内）、照射治疗头、机械臂治

疗床等设备。

①旋转机架（360°旋转束终端）

360 度旋转机架是一个包含束流传输系统末端及可支撑照射治疗头的钢结构，重达 100 吨以上。旋转机架能够环绕卧姿患者进行 360°（±180°）旋转，通过安装在旋转机架上的照射治疗头，可以从多角度进行照射。配合机械臂治疗床进行上下、前后、左右调节，可以实现对肿瘤患者的精确定位和照射。

②照射治疗头

照射治疗头位于两终端束流传输的最末端，主要功能是通过两组磁铁控制重离子束流方向，实现对肿瘤的精确照射。治疗头主要由主剂量监测器、副剂量监测器、迷你脊形过滤器和射程调节器组成，可通过转动治疗头位置，实现引出不同角度的治疗束线。具体结构示意图 3-16。

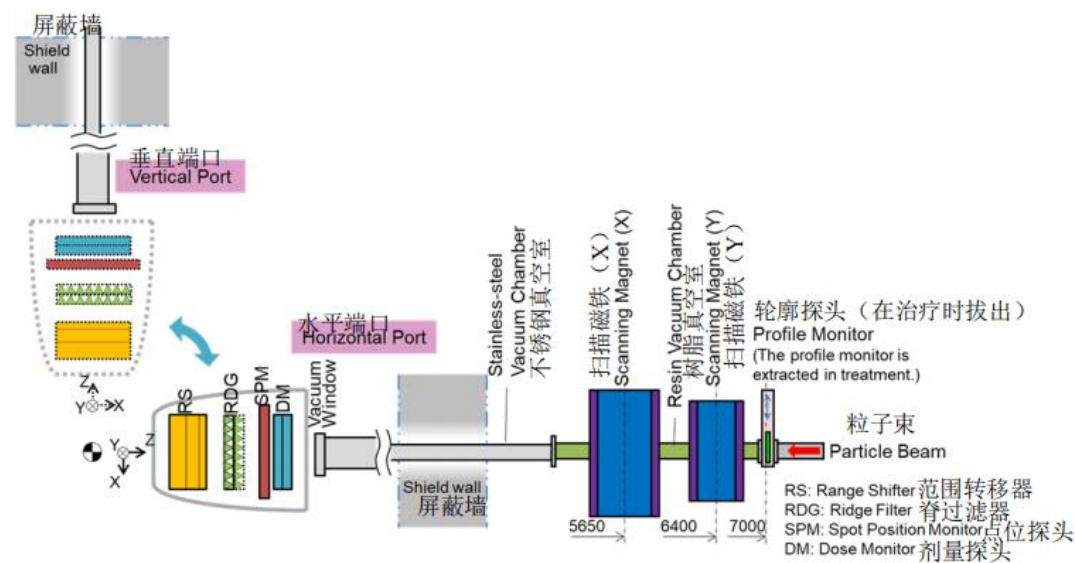


图 3-16 照射治疗头结构示意图

③机械臂治疗床（测调中心内仅设置在 360°旋转束终端内，用户单位设置于科研终端、固定束治疗室及 360°旋转束治疗室内）

治疗床采用具有六个运动自由度（DOF）的摆动式机器人治疗床。患者卧榻由驱动系统，控制器和桌面扩展组成。其主要功能是根据治疗计划系统以准确而有效的方式将患者移动到所需位置。患者治疗床的功能是使患者与 PIAS 计算的治疗位置对准，从而实现患者的精确定位。患者治疗床配有力传感器，以检测治疗

头与患者和/或治疗床之间可能发生的碰撞。卧式推力传感器与治疗头上的触摸传感器结合使用，可消除发生碰撞时对患者造成伤害和对患者治疗床造成伤害的潜在危险。机械臂治疗床的基本结构如图 3-17 所示。

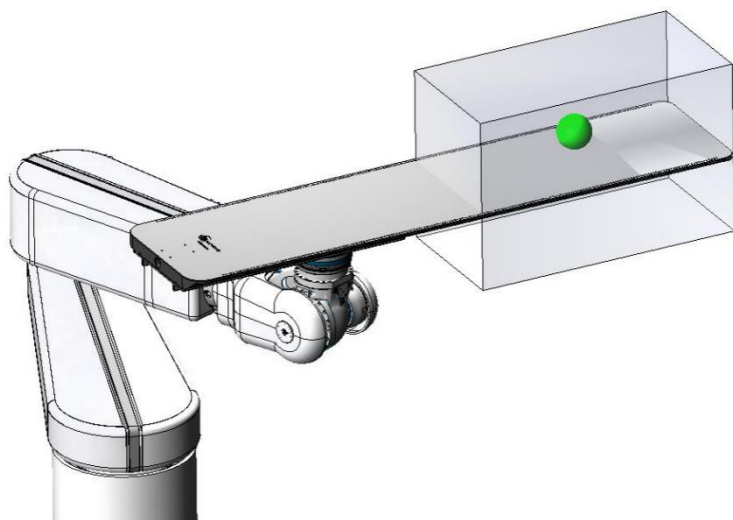


图 3-17 治疗床示意图

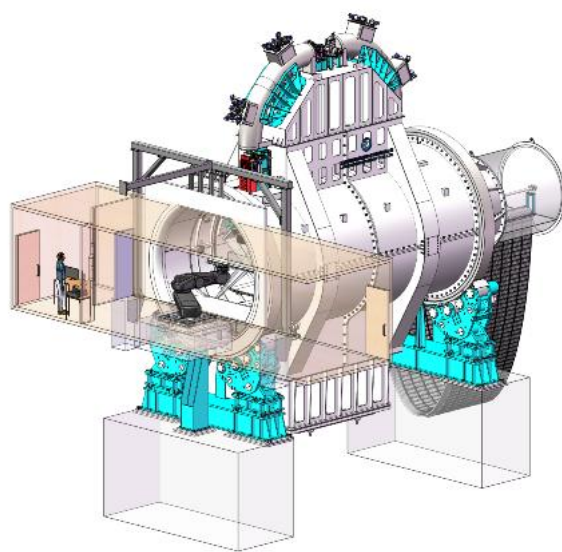


图 3-18 360°旋转束终端示意图

### 3.3 工艺流程与人员配置

小型化重离子治疗装置在测调中心调试完成后将会把各设备拆卸运往用户单位，并在用户单位进行后续的安装调试及运行维护。

#### 3.3.1 测调中心内出束调试

##### 3.3.1.1 出束调试工作流程

测调中心内每台套小型化重离子治疗装置出束调试的出束时长为 2898h。出束调试的四个阶段中注入器与同步加速器部分每班设置 2 名束流调试工程师，30°固定束终端部分每班设置 1 名束流调试工程师，360°旋转束终端阶段的调试部分每班设置 2 名束流调试工程师。各阶段出束时长见表 3-5。

表 3-5 测调中心内每台（套）小型化重离子治疗装置出束时长

| 阶段                    | 工作时间, h |      | 出束时间, h | 工作内容                            | 束流状态              | 每班束流调试工程师配置 |
|-----------------------|---------|------|---------|---------------------------------|-------------------|-------------|
|                       | 早班      | 晚班   |         |                                 |                   |             |
| 注入器束流调试               | 108     | 108  | 150     | 离子源及注入器束流调试                     | 7MeV/u, 低流强       | 2           |
| 同步加速器束流调试             | 588     | 588  | 1000    | 同步加速器束流注入俘获加速引出调试               | 7MeV/u~430MeV/u   |             |
| 30°固定束终端治疗头束流调试和性能测试  | 348     | 348  | 500     | 30°固定束治疗头束流位置、大小、效率调试；性能测试和计划验证 | 120MeV/u~430MeV/u | 1           |
| 360°旋转束终端治疗头束流调试和性能测试 | 1248    | 1248 | 1248    | 360°旋转束终端治疗头束流位置、大小、效率调试；性能测试和  | 120MeV/u~430MeV/u | 2           |

|    |      |      |      |      |  |  |
|----|------|------|------|------|--|--|
|    |      |      |      | 计划验证 |  |  |
| 合计 | 2292 | 2292 | 2898 | \    |  |  |

小型化重离子治疗装置出束调试用于设备各部分的初步调试，以确保设备的可用性。其工作流程图见图 3-19。

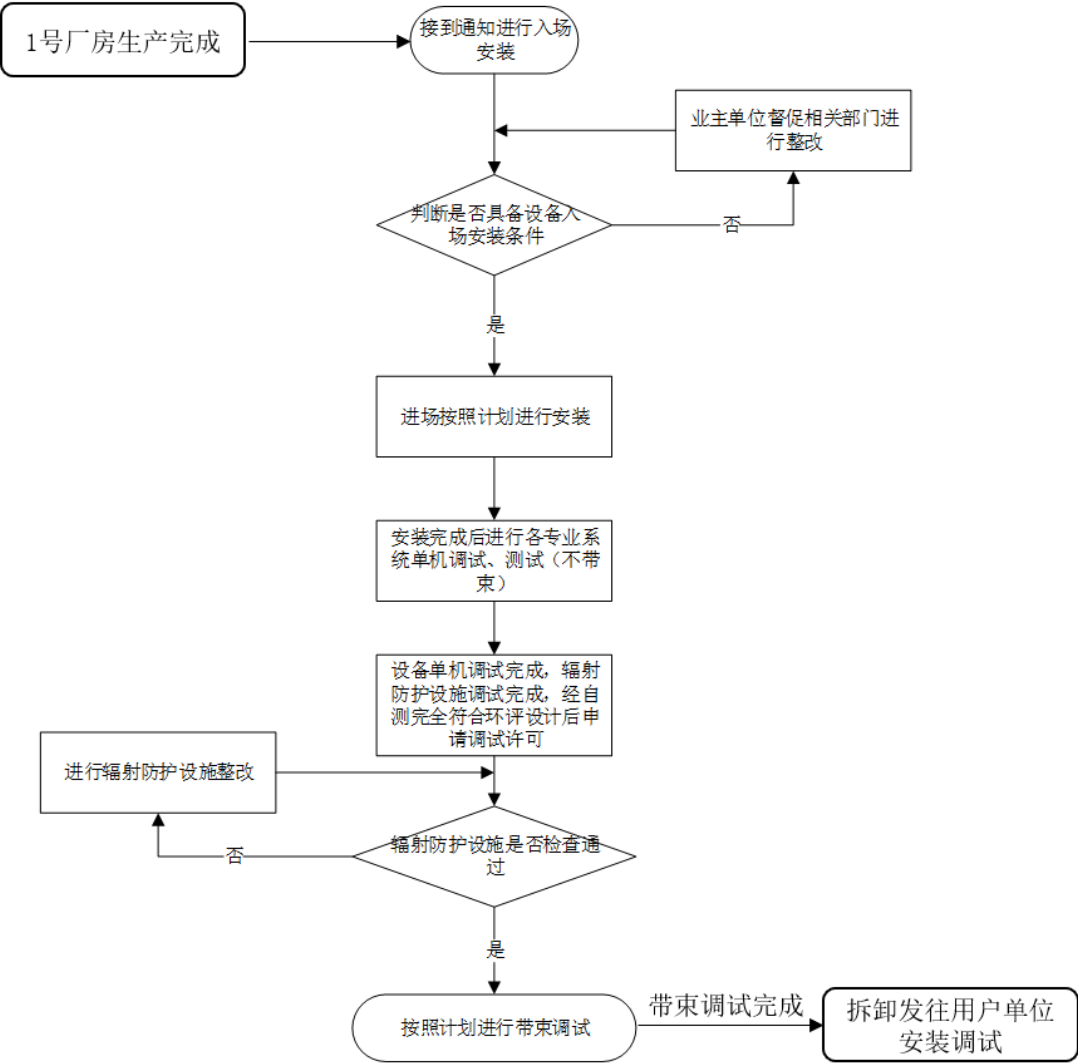


图 3-19 测调中心内小型化重离子治疗装置出束调试工作流程

### 3.3.1.2 出束调试工作人员配备

测调中心内小型化重离子治疗装置出束调试过程中人员配置如表 3-6 所示。

**表 3-6 测调中心内出束调试过程中工作人员配置、工作内容及工作时间汇总**

| 工作人员类别  | 岗位职责                                                                                                                  | 工作内容              | 工作负荷                 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|
| 束流调试工程师 | ①总体负责加速器束流调试、测试、设备远程控制、软件维护与运行。<br>②负责配套系统（水冷、通风与配电等）、电源及高频系统等设备日常巡检、维护与运行。<br>③负责加速器停机后在线设备现场巡检、故障记录与判断、更换电子学及备品备件等。 | 运行加速器             | 每班 12h，每天<br>2 班 3 倒 |
|         |                                                                                                                       | 停机巡视              |                      |
|         |                                                                                                                       | 现场设备故障<br>排查、更换零件 |                      |
| 总计      |                                                                                                                       |                   | 5 人/班                |

### 3.3.2 用户单位（小型化重离子治疗装置销售（含建造）、用户单位的安装调试及运行维护）

用户单位使用场所进行小型化重离子治疗装置的安装调试和运行维护团队均来自于兰州泰基于兰州新区测调中心的的调试团队。

#### 3.3.2.1 生产

##### 3.3.2.1.1 生产流程

经过研发设计后采购，小型化重离子治疗装置的部件于兰州泰基的测调中心（兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号）生产并安装，并在测调中心完成调试后拆卸发货至用户单位进行后续安装调试及运行维护。此环节中生产安装不产生辐射影响，测调中心中出束调试的辐射影响已在 5.1 小节进行评价。

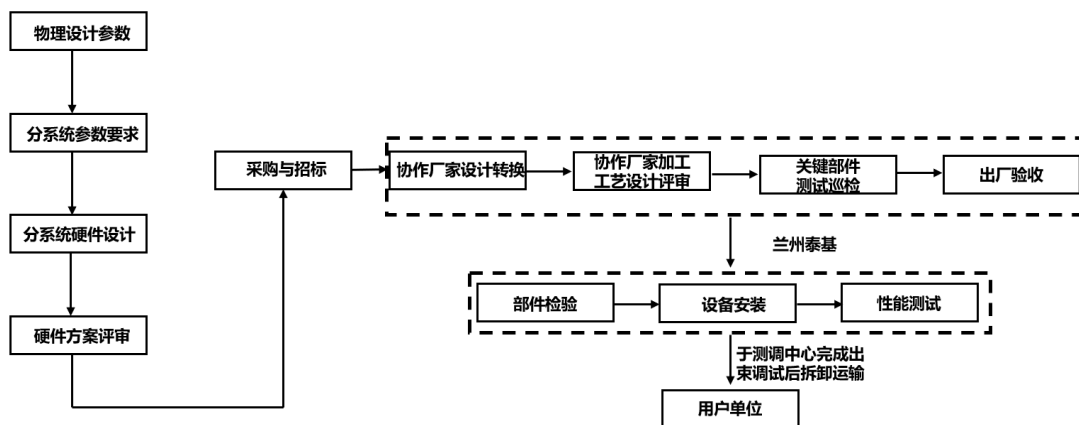


图 3-20 小型化重离子治疗装置生产流程图

### 3.3.2.1.2 生产阶段工作人员配备

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

### 3.3.2.2 销售

#### 3.3.2.2.1 销售流程

小型化重离子治疗装置的销售流程如下：

##### （1）小型化重离子治疗装置合同签订

经过公开招标或者商业谈判，用户确认选择兰州泰基作为合作伙伴后，兰州泰基与用户单位进行合同谈判。谈判过程中兰州泰基将告知用户单位在取得相应的环评批复后，方可进行小型化重离子治疗装置的安装调试活动。在完成合同谈判，落实产品配置、价格、安装调试验收的相关条件等信息后，双方签订合同。兰州泰基将严格按照《辐射安全许可证》允许的种类和范围开展销售活动，不会超出许可的范围和种类开展活动。

##### （2）小型化重离子治疗装置使用场所建造

用户将通过公开招标或者商业谈判选定小型化重离子治疗装置的使用场所以

及相应配套设施的建筑设计单位、辐射防护设计单位、施工单位、监理单位。兰州泰基将提供产品与建筑需求信息，以支持用户选定的辐射防护设计与建筑设计单位，共同设计符合我国辐射安全标准的使用场所和配套设施。在完成设计进入工程建造后，兰州泰基将确认是否满足使用场所和配套设施符合设备的安装要求，但不参与场所建造。

### **(3) 小型化重离子治疗装置发货、运输**

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

### **(4) 小型化重离子治疗装置安装、调试、验收**

兰州泰基将派出工作人员负责小型化重离子治疗装置安装调试工作，安装调试完成后将与用户单位共同进行设备验收。用户单位认可小型化重离子治疗装置符合合同约定的各项验收标准后签署系统验收报告，完成销售合同，交付用户单位，兰州泰基转入售后服务阶段。

#### **3.3.2.2.2 销售阶段工作人员配备**

本项目销售阶段的工作人员主要为兰州泰基的销售人员，本阶段仅涉及商务谈判和财务结算，对周围环境和相关人员不会产生辐射类的危害和影响，销售人员不属于辐射工作人员。

#### **3.3.2.3 安装调试**

##### **3.3.2.3.1 安装调试的前提条件**

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

(1) 用户单位取得使用小型化重离子治疗装置的环评批复，生态环境监管部门对用户单位使用场所进行了辐射安全措施的检查调试许可后，方可开始调试；

(2) 建筑设施满足兰州泰基提出的工艺接口要求；

(3) 小型化重离子治疗装置安装调试场所水、风、电齐备，场地和墙面整洁、设备起吊与运输顺畅；

(4) 用户单位应为安装场所提供必要的安防措施，特别是消防措施。

设备安装完成后，兰州泰基需确认满足以下条件后方可进行小型化重离子治疗装置的束束调试：

1) 该调试阶段所需的辐射防护设施已完成建设；

2) 通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成；

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

4) 用户单位应为调试场所提供必要的安防措施；

5) 所有从事小型化重离子治疗装置调试的工作人员须通过核技术利用辐射安全与防护考核；

6) 对于外来参观人员，加速器停止运行后，由现场工作人员带领参观，参观过程中，领队人员须佩戴直读式个人剂量报警仪。

#### **3.3.2.3.2 安装调试步骤和周期**

出束调试按照直线注入器（包括离子源）、同步加速器（包括束流输运线）及治疗终端的顺序分阶段开展，工作内容主要是对加速器各子系统以及整机束流参数进行调试。

在出束调试开始之前需要小型化重离子治疗装置的各部分安装工作全部完成，

且人身安全连锁系统（测试对离子源高压电源、和束流阻挡器闭合的连锁功能）以及场所监测系统调试完毕。连锁及监测系统调试过程无辐射影响。

根据以往项目经验及典型案例分析，每台（套）小型化重离子治疗装置现场安装调试的步骤和预计出束时间如表 3-7 所示。安装调试流程图如图 3-21 所示。

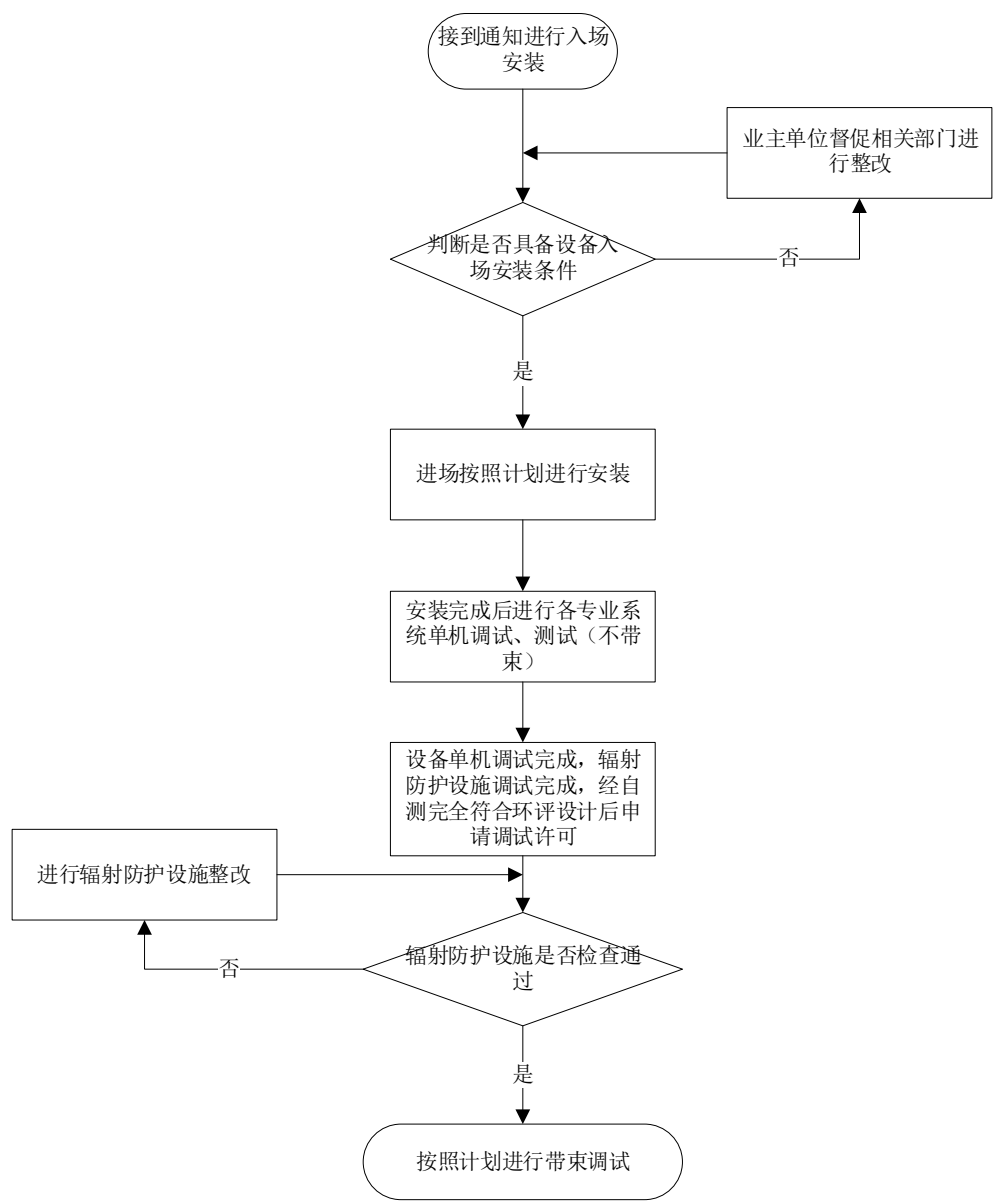


图 3-21 用户单位小型化重离子治疗装置安装调试流程图

表 3-7 用户单位每台（套）小型化重离子治疗装置安装调试阶段出束时间

| 阶段 | 工作时间，h |    | 出束时间，h | 工作内容 | 束流状态 | 每班束流调试工作人员配置 |
|----|--------|----|--------|------|------|--------------|
|    | 早班     | 晚班 |        |      |      |              |

|                 |      |      |      |                              |                   |   |
|-----------------|------|------|------|------------------------------|-------------------|---|
| 注入器束流调试         | 48   | 48   | 67   | 离子源及注入器束流调试                  | 7MeV/u, 低流强       | 2 |
| 同步加速器束流调试       | 144  | 144  | 250  | 同步加速器束流注入俘获加速引出调试            | 7MeV/u~430MeV/u   |   |
| 固定束治疗头束流调试和性能测试 | 444  | 444  | 620  | 固定束治疗头束流位置、大小、效率调试；性能测试和计划验证 | 120MeV/u~430MeV/u | 1 |
| 旋转束治疗头束流调试和性能测试 | 648  | 648  | 650  | 旋转束治疗头束流位置、大小、效率调试；性能测试和计划验证 | 120MeV/u~430MeV/u | 2 |
| 合计              | 1764 | 1284 | 1627 | \                            |                   |   |

安装调试完成后，兰州泰基和用户单位共同对小型化重离子治疗装置进行验收，依据合同签署时的验收条款对设备参数逐一测试，目的是验证交付的设备符合客户的要求，该环节为出束操作。

待用户取得辐射安全许可后，设备交付给用户单位使用，完成整个安装调试的过程。临床使用时的调试由用户单位执行，兰州泰基根据与用户单位的合同进行必要的支持。

### 3.3.2.3.3 安装调试工作人员配备

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

### (1) 安装工程师

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

### (2) 束流调试工程师

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

**表 3-8 用户单位每台小型化重离子治疗装置安装调试期间工作人员配置**

| 工作人员类别    | 岗位职责                                                                                                                  | 工作内容              | 工作负荷                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|
| 束流调试测试工程师 | ①总体负责加速器束流调试、测试、设备远程控制、软件维护与运行。<br>②负责配套系统（水冷、通风与配电等）、电源及高频系统等设备日常巡检、维护与运行。<br>③负责加速器停机后在线设备现场巡检、故障记录与判断、更换电子学及备品备件等。 | 运行加速器             | 每班 12h，每天<br>2 班 3 倒 |
|           |                                                                                                                       | 停机巡视              |                      |
|           |                                                                                                                       | 现场设备故障<br>排查、更换零件 |                      |
| 总计        |                                                                                                                       |                   | 5 人/班                |

3.3.2.4 运行维护

小型化重离子治疗装置交付用户后，兰州泰基转入运维阶段，主要负责加速器的日常运行、维护和故障检修。

其中运行部分为日常设备开关机、巡检等工作，此外还会对用户单位进行小型化重离子治疗装置的操作培训，培训仅为理论培训，无辐射影响。

表 3-9 用户单位每台小型化重离子治疗装置维护期间工作人员配置

| 工作人员类别      |                                       | 岗位职责                                    | 工作内容             | 工作位置  | 人员配置<br>(人) | 工作负荷                  |
|-------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|-------|-------------|-----------------------|
| 现场服务<br>工程师 | 物理运行<br>工程师                           | 总体负责加速器设备远程控制、软件维护与运行。                  | 运行加速器            | 中央控制室 | 4           | 每班 8h，<br>每天 3 班倒     |
|             | 停机巡视                                  |                                         | 控制区              |       |             |                       |
|             | 配套及电气系统维护工程师                          | 负责配套系统（水冷、通风与配电等）、电源及高频系统等设备日常巡检、维护与运行。 | 现场设备故障排查、更换零件与调试 | 监督区   | 1           | 常白班 8h，当出现紧急故障时随时待命检修 |
| 在线设备维护工程师   | 负责加速器停机后在线设备现场巡检、故障记录与判断、更换电子学及备品备件等。 | 控制区                                     |                  | 1     |             |                       |
| 总计          |                                       |                                         |                  |       | 6 人         |                       |

运行维护部分则是依照用户单位与兰州泰基签署合同约定来进行。运行维护人员为本项目专职人员。用户单位负责提供工作场所和协调前期相关准备工作。运行维护工作的流程图如图 3-22 所示。

工作流程如下：

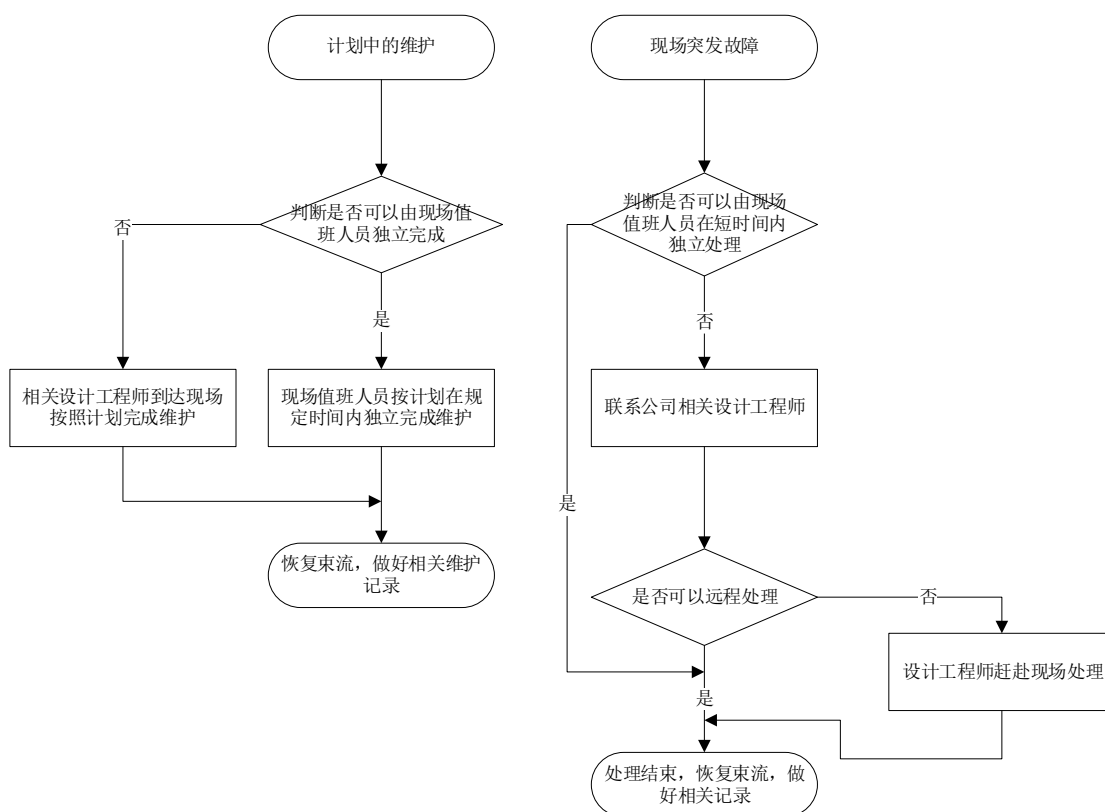


图 3-22 用户单位小型化重离子治疗装置运行维护工作流程图

（1）用户单位针对小型化重离子治疗装置运行期间出现的故障，提交维修请求。兰州泰基驻点工作人员将根据故障情况进行现场维修。若现场维修未能解决问题，则进一步上报兰州泰基售后管理部门。

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

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

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

（5）工程师在进入治疗机房内部前，需检查个人剂量计是否完好并随身携带，并携带个人剂量报警仪。在工作开始前，工程师需根据工作内容核实现场是否满足下表所列的条件。对于束流直接照射的加速器部件，在进行接触性维修维护作业前，需要使用 $\gamma$ 巡检仪确认检修部位的剂量率水平。

（6）若需要更换零部件，工程师与兰州泰基售后管理部门联系发送零部件更换申请。

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

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

### 3.4 污染源项分析

小型化重离子治疗装置测调中心内出束调试，用户单位安装调试及运行维护的主要污染源项包括加速器开机出束产生的瞬发辐射对工作人员造成的外照射，以及停机后控制区内感生放射性对工作人员产生的辐射影响。

因测调中心终端设置考虑了用户单位使用场所可能使用到的固定束终端及旋转束终端，且测调中心内小型化重离子治疗装置的束流损失参数与用户单位一致，因此拟销售（含建造）的小型化重离子治疗装置主要污染源项参照测调中心的污染源项。

#### 3.4.1 瞬发辐射源

##### 3.4.1.1 瞬发辐射场分析

小型化重离子治疗装置，在粒子束加速、注入、传输、引出等过程中都会发生束流的损失。尤其是高能区的束流与物质的相互作用以原子的电离和激发为主，同时会穿过原子核的库仑势垒，进入原子核内，发生核内级联，通过核反应产生瞬发次级粒子。在产生的次级粒子中，带电粒子因电离作用迅速停止， $\pi$  介子等又因产生截面很小可以忽略，因此从靶中出来的主要是次级中子和  $\gamma$ 。其中产生的次级中子能量由低到高可分为热中子、蒸发中子和级联中子三部分。在屏蔽材料的作用下，初始的热中子、蒸发中子和  $\gamma$  的数量迅速减少，级联中子成为穿透屏蔽的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数目，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过  $(n, \gamma)$  反应等转化成了光子，使得达到一定屏蔽深度，中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变，形成“平衡谱”。最终屏蔽内、外的瞬发辐射场都成为中子、光子的混合场。

##### 3.4.1.1.1 辐射场源项估算

###### 3.4.1.1.1.1 FLUKA 程序

本次评价中，在对辐射场源项进行估算时，主要采用 FLUKA 程序，通过该

程序模拟不同能量的重离子与不同材质的靶体作用的中子和光子能谱及其角分布。

FLUKA 程序是由 20 世纪 60 年代由欧洲核子研究中心（CERN）主导开发的，是用于计算粒子输运和与物质相互作用的通用工具。主要应用于质子、重离子和电子加速器及靶站的设计、量热学、辐射活化、辐射剂量学、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理、高能物理模拟、放射治疗等领域。可模拟包括中子、电子、质子、重离子在内的 60 余种不同的粒子及重离子，其中子能量范围从  $10^{-5}\text{eV}$  到  $20\text{TeV}$ ，光子能量范围从  $100\text{eV}$  到  $10000\text{TeV}$ ，电子从  $1\text{keV}$  到  $1000\text{TeV}$ ，带电粒子及其反粒子为  $1\text{keV}$  到  $20\text{TeV}$ ，重离子为  $<1000\text{TeV/n}$ 。该程序还可以传输偏振光子（如同步辐射）和光学光子，在线进行不稳定剩余核辐射的时间演化和跟踪。FLUKA 还可以处理非常复杂的几何图形，能正确跟踪带电粒子，还提供各种可视化和调试工具。

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

#### 3.4.1.1.2 中子能谱

1998 年，日本的 Kurosawa 等人做了一项实验，他们用  $100$ 、 $180\text{ MeV/u}$  的  $^4\text{He}$ ， $100$ 、 $180$ 、 $400\text{ MeV/u}$  的  $^{12}\text{C}$  轰击不同的厚靶，用时间飞行方法测量中子产额、角分布和能量分布，其中  $400\text{ MeV/u}$  的  $^{12}\text{C}$  轰击铜靶的中子分布见图 3-23。实验人员根据重离子治癌的实际情况，采用 FLUKA 对高能碳离子轰击厚铜、水靶的次级中子辐射场的能量分布及空间分布进行了模拟计算（见图 3-24）。综合来看，中高能重离子轰击厚靶所产生的次级中子场有如下特征：

- （1）不同能量的入射粒子与靶作用产生的次级中子具有相似的谱形；
- （2）在  $0^\circ$  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  $E_u$  的  $2/3$  左右；
- （3）中子最高能量可达入射离子能量  $E_u$  的 2 倍；
- （4）在前向， $E_n > 100\text{ MeV}$  的中子占绝对优势，而  $E_n < 100\text{ MeV}$  的中子仅

占 1/10 左右；

(5) 在大角方向，情况正好相反， $E_n$  小于 100 MeV 的中子占绝对优势。

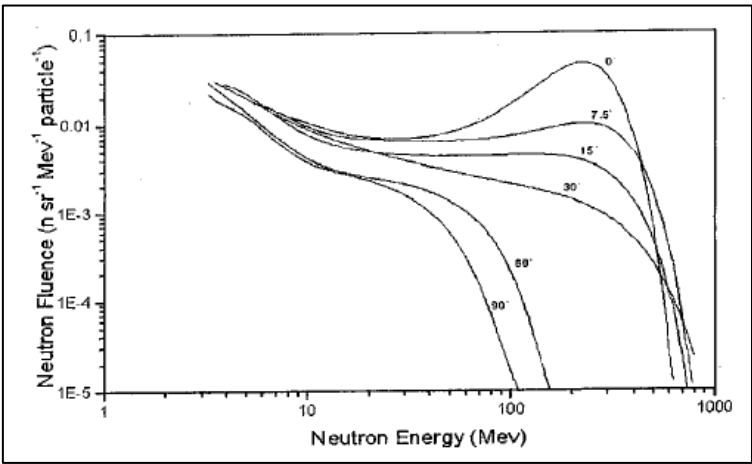


图 3-23 400 MeV/u C+Cu 的次级中子分布

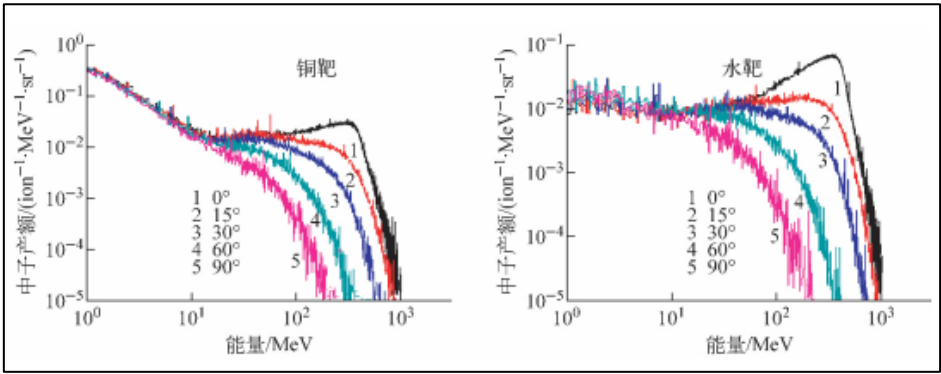


图 3-24 400 MeV/u 的 C 束轰击铜靶、水靶的次级中子能谱

3.4.1.1.1.3 光子能谱

以碳离子为例，本次评价利用 FLUKA 程序模拟了 430MeV/u 碳离子打铁靶和水靶产生的光子能谱，如图 3-25 和图 3-26。从角分布来看，光子几乎是各向同性的。

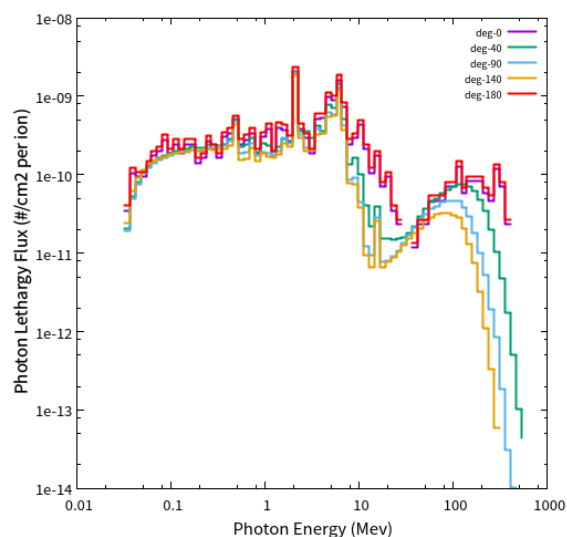


图 3-25 430MeV/u 碳离子打水靶的光子能谱

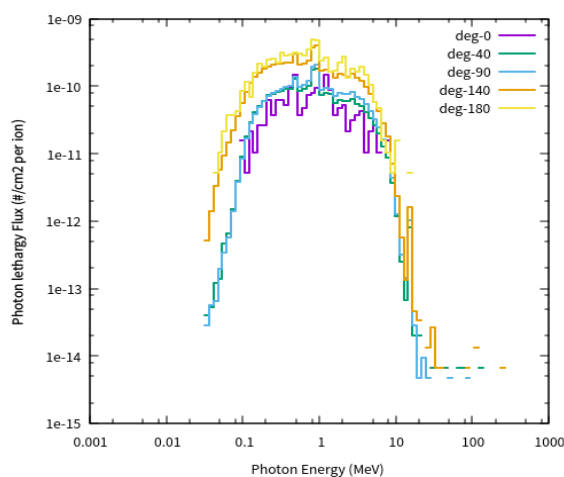


图 3-26 430MeV/u 碳离子打铁靶的光子能谱

### 3.4.1.1.2 各环节束流损失分析

本项目离子源提供的碳离子 ( $C^{4+}$ )、氧离子 ( $O^{5+}$ )、质子 ( $H^+$ )、氦离子 ( $He^{2+}$ ) 束，束流在产生、输运、注入、俘获、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。

束流损失点即是瞬发辐射源点，小型化重离子治疗装置主要的束流损失点位主要分布在同步环环口、慢引出及终端，如表 3-10~表 3-12 所示。

表 3-10 各阶段束流损失参数（碳离子/氧离子）

| 阶段      | 束流强度<br>(ppm) | 传输效率   | 束流损失<br>(ppm) | 能量       | 损失方式 | 靶材料      |
|---------|---------------|--------|---------------|----------|------|----------|
| 同步环注入线  | 6.02E+10      | 95%    | 3.01E+09      | 7MeV/u   | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 同步环环口   | 5.72E+10      | 40%    | 3.43E+10      | 7MeV/u   | 集中损失 | 不锈钢      |
| 同步环全环俘获 | 2.29E+10      | 54.60% | 1.04E+10      | 430MeV/u | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 同步环全环加速 | 1.25E+10      | 90%    | 1.25E+09      | 430MeV/u | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 慢引出     | 1.12E+10      | 90%    | 1.12E+09      | 430MeV/u | 集中损失 | 不锈钢/铜    |
| 高能线     | 1.01E+10      | 89%    | 1.11E+09      | 430MeV/u | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 终端      | 9.00E+09      | 0      | 9.00E+09      | 430MeV/u | 集中损失 | 水/组织等效材料 |

表 3-11 各阶段束流损失参数（质子）

| 阶段      | 束流强度<br>(ppm) | 传输效率   | 束流损失<br>(ppm) | 能量     | 损失方式 | 靶材料      |
|---------|---------------|--------|---------------|--------|------|----------|
| 同步环注入线  | 1.34E+12      | 95%    | 6.69E+10      | 7MeV   | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 同步环环口   | 1.27E+12      | 40%    | 7.62E+11      | 7MeV   | 集中损失 | 不锈钢      |
| 同步环全环俘获 | 5.08E+11      | 54.60% | 2.31E+11      | 230MeV | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 同步环全环加速 | 2.77E+11      | 90%    | 2.77E+10      | 230MeV | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 慢引出     | 2.50E+11      | 90%    | 2.50E+10      | 230MeV | 集中损失 | 不锈钢/铜    |
| 高能线     | 2.25E+11      | 89%    | 2.47E+10      | 230MeV | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 终端      | 2.00E+11      | 0      | 2.00E+11      | 230MeV | 集中损失 | 水/组织等效材料 |

表 3-12 各阶段束流损失参数（氦离子）

| 阶段      | 束流强度<br>(ppm) | 传输效率   | 束流损失<br>(ppm) | 能量       | 损失方式 | 靶材料   |
|---------|---------------|--------|---------------|----------|------|-------|
| 同步环注入线  | 4.01E+11      | 95%    | 2.01E+10      | 7MeV/u   | 均匀损失 | 不锈钢   |
| 同步环环口   | 3.81E+11      | 40%    | 2.29E+11      | 7MeV/u   | 集中损失 | 不锈钢   |
| 同步环全环俘获 | 1.52E+11      | 54.60% | 6.92E+10      | 230MeV/u | 均匀损失 | 不锈钢   |
| 同步环全环加速 | 8.32E+10      | 90%    | 8.32E+09      | 230MeV/u | 均匀损失 | 不锈钢   |
| 慢引出     | 7.49E+10      | 90%    | 7.49E+09      | 230MeV/u | 集中损失 | 不锈钢/铜 |

|     |          |     |          |          |      |          |
|-----|----------|-----|----------|----------|------|----------|
| 高能线 | 6.74E+10 | 89% | 7.42E+09 | 230MeV/u | 均匀损失 | 不锈钢      |
| 终端  | 6.00E+10 | 0   | 6.00E+10 | 230MeV/u | 集中损失 | 水/组织等效材料 |

备注：ppm 为一分钟粒子数，加速器每分钟配送的粒子数是固定的

### 3.4.1.2 天空反散射

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

透过屏蔽墙的快中子以及少量残存的高能中子在空气中不能被有效地阻止，在空气中发生一次次散射，低能中子被散射回地面。这些中子就是天空散射辐射的来源。天空反散射随加速器开机产生，加速器停机便立刻消失。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。本项目重离子治疗系统各区域顶板屏蔽体外剂量率列于表 3-13。

表 3-13 测调中心小型化重离子治疗装置各区域顶板外剂量率结果

| 关注点 | 区域描述         | 剂量率计算结果， $\mu\text{Sv/h}$ |
|-----|--------------|---------------------------|
| 27  | 30°固定束终端屋面上  | 43                        |
| 30  | 360°旋转束终端屋面上 | 28                        |
| 31  | 加速器大厅屋面上     | 25                        |

由计算结果可知，3 号旋转束治疗室顶板外的剂量率高于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，需要考虑中子天空反散射的影响。本次评价利用 NCRP NO.144 报告 P331 页 Stapleton 公式对上述区域的中子天空反散射进行计算，具体见公式 3-1 和公式 3-2。各计算参数的取值列于表 3-14，计算结果列于表 3-15。

$$H(r) = Q \frac{\kappa'}{(h+r)^2} e^{-r/\lambda} \quad (3-1)$$

$$Q = \frac{d^2}{g} H(d, t) \Omega \quad (3-2)$$

$$\Omega=2\pi(1-\cos\theta) \quad (3-3)$$

式中，

$\kappa'$  为常数，取值  $2 \times 10^{-15} \text{Sv} \cdot \text{m}^2$ ；

$h$  为常数，取值 40m；

$r$  为源到关注点的距离，m；

$\lambda$  为与中子能量上限对应的空气的中子有效吸收长度，m；

$Q$  为穿透屋顶屏蔽达到顶板外表面的中子个数， $n/h$ ；

$d$  为源到顶板外表面的距离，m；

$g$  为单位中子通量的剂量当量， $\text{Sv} \cdot \text{m}^2$ ；

$H(d,t)$  为顶板屏蔽体外表面的剂量率， $\text{Sv/h}$ ，由于  $360^\circ$  旋转束终端距离超导测试间的距离最接近，因此取  $360^\circ$  旋转束终端的顶板屏蔽体外剂量率作为计算依据；

$\Omega$  为源从顶屏蔽辐射出的立体角。

**表 3-14 中子天空反散射计算参数**

| 参数                              | 取值                | 来源                                                                                                                                                |
|---------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\lambda, \text{m}$             | 630               | NCRP NO.144 报告图 6.5，能量按 400MeV 考虑                                                                                                                 |
| $d, \text{m}$                   | 4.97              | CAD 图纸测量                                                                                                                                          |
| $g, \text{Sv} \cdot \text{m}^2$ | $2.45\text{E}-14$ | 文献《ACCELERATOR SKYSHINE:TYGER,TYGER,BURNING BRIGHT》(Particle Accelerator,1994,vol.44(1),pp1-15,GEOFFREY B.STAPLETON)表 4，保守取碳离子能量 400MeV，利用内插法计算得出 |
| $\Omega, \text{sr}$             | 6.28              | $\theta$ 保守取值 $90^\circ$                                                                                                                          |
| $H(d,t), \text{Sv/h}$           | $2.8\text{E}-05$  | FLUKA 程序计算（表 4-2 中关注点 27， $30^\circ$ 固定束终端屋面上）                                                                                                    |

**表 3-15 不同距离  $r$  处天空反散射造成的剂量率**

| 距离 $r, \text{m}$ | $H(r), \text{Sv/h}$ |
|------------------|---------------------|
| 5                | $7.04\text{E}-07$   |
| 10               | $5.65\text{E}-07$   |
| 20               | $3.86\text{E}-07$   |
| 50               | $1.64\text{E}-07$   |
| 100              | $6.25\text{E}-08$   |
| 200              | $1.82\text{E}-08$   |

由于小型化重离子治疗装置位于测调中心内，天空反散射影响的人员主要为测调中心内其他项目的工作人员，根据计算结果可知，在距离 5m 处，天空反

散射造成的剂量率最高也仅有  $7.04\text{E-}07\text{Sv/h}$ ，与本项目  $360^\circ$  旋转束终端距离最近的超导测试间（测调中心内其他工作人员工作区域）为  $20\text{m}$ ，因此以  $20\text{m}$  处剂量率进行估算，居留因子取  $1/4$ ，测调中心每台（套）小型化重离子治疗装置出束  $2898\text{h}$ ，因此测调中心内超导测试间的工作人员所受天空反散射的受照剂量为  $2.80\text{E-}02\text{mSv}$ 。

3.4.1.3 感生放射性

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

小型化重离子治疗装置产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响对象是对停机后，需要进入加速器大厅和终端内工作的工程师。本次评价主要对小型化重离子治疗装置对空气、冷却水、结构部件及土壤和地下水的感生放射性进行分析评价。

3.4.1.3.1 空气的感生放射性

小型化重离子治疗装置运行期间初级粒子或次级粒子与空气中的  $\text{H}$ 、 $\text{N}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{Ar}$  等通过热中子俘获、 $(\gamma, n)$  反应和高能中子散裂反应等产生  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$  等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素如  $^3\text{H}$  和  $^7\text{Be}$ ，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$  四种核素，具体见表 3-16。

表 3-16 空气活化产生的主要放射性核素

| 放射性核素           | 半衰期      | 母核 | 空气中母核的质量<br>份额       | 产生机制                 | 活化反应截面<br>$\sigma^2$ , mb |
|-----------------|----------|----|----------------------|----------------------|---------------------------|
| $^{11}\text{C}$ | 20.39min | N  | $7.55\times 10^{-1}$ | $(\gamma, T)$        | 0.7                       |
|                 |          | N  | $7.55\times 10^{-1}$ | 散裂反应                 | 10                        |
|                 |          | O  | $2.3\times 10^{-1}$  | $(\gamma, \alpha n)$ | 0.7                       |
|                 |          | O  | $2.3\times 10^{-1}$  | 散裂反应                 | 5                         |
| $^{13}\text{N}$ | 9.96min  | N  | $7.55\times 10^{-1}$ | 散裂反应                 | 10                        |
|                 |          | N  | $7.55\times 10^{-1}$ | $(\gamma, n)$ 反应     | 9                         |
|                 |          | O  | $2.3\times 10^{-1}$  | 散裂反应                 | 9                         |
| $^{15}\text{O}$ | 2.04min  | O  | $2.3\times 10^{-1}$  | 散裂反应                 | 40                        |

|                  |       |    |                      |                    |     |
|------------------|-------|----|----------------------|--------------------|-----|
|                  |       | O  | $2.3 \times 10^{-1}$ | ( $\gamma$ , n) 反应 | 17  |
| $^{41}\text{Ar}$ | 1.83h | Ar | $1.3 \times 10^{-2}$ | 热中子俘获              | 610 |

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告。

#### 3.4.1.3.1.1 空气感生放射性静态饱和浓度

利用表 3-10~表 3-12 中的束流参数并结合 FLUKA 保守计算了连续运行 5000h 后四种粒子在同步加速器大厅所产生的空气感生放射性活度，具体见表 3-17。经过计算比较，碳离子束流损失导致空气感生放射性最强，因此下文选取碳离子空气感生放射性进行评价分析。

表 3-17 四种粒子在加速器大厅产生空气感生放射性活度浓度，Bq/cm<sup>3</sup>

| 冷却时间/s | 质子       | 氦离子      | 碳离子      | 氧离子      |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 10     | 1.64E-02 | 1.42E-02 | 3.0E-02  | 2.66E-02 |
| 300    | 1.13E-02 | 1.27E-02 | 2.74E-02 | 2.15E-02 |
| 7200   | 8.02E-03 | 9.21E-03 | 2.07E-02 | 2.15E-02 |

本次评价利用 FLUKA 程序计算了不考虑通风的情况下，小型化重离子治疗装置连续运行 2000h 后各辐射工作场所内空气感生放射性的静态饱和浓度。计算时，将小型化重离子治疗装置工作场所划分为加速器大厅（包含低能、中高能传输系统区域）和终端，计算结果列于表 3-18。

表 3-18 测调中心各区域空气感生放射性静态饱和浓度计算结果，Bq/m<sup>3</sup>

| 核素               | 加速器大厅    | 终端       |
|------------------|----------|----------|
| $^{11}\text{C}$  | 6.37E+01 | 8.55E+02 |
| $^{13}\text{N}$  | 7.33E+02 | 7.25E+02 |
| $^{15}\text{O}$  | 3.63E+03 | 5.44E+02 |
| $^{41}\text{Ar}$ | 2.69E+01 | 8.00E+01 |
| 总计               | 4.45E+03 | 2.20E+03 |

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

小型化重离子治疗装置运行期间，加速器大厅、束流传输系统区域以及出束中的终端均保持通风系统开启状态。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻各场所内空气感生放射性动态饱和浓度可由下式 3-4 计算。计算结果列表 3-20~表 3-21，分为测调中心及用户单位。

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

式中，

$C_t$  为考虑通风的情况下，装置运行  $t$  时间后，停机时刻房间内空气中感生放射性动态浓度， $Bq/m^3$ ；

$C_{sat}$  为不考虑通风的情况下，装置运行  $t$  时间，停机时刻房间内空气中感生放射性的饱和浓度， $Bq/m^3$ ，见表 3-18；

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

$r_l$  为正常运行时房间内的换气次数， $s^{-1}$ ，0.5 次/h=0.5/3600=1.39E-04 $s^{-1}$ ，5 次/h=5/3600=1.39E-03 $s^{-1}$ ，小型化重离子治疗装置各区域通风系统设计情况见表 3-19。

**表 3-19 测调中心小型化重离子治疗装置各区域通风系统设计情况**

| 序号 | 区域名称           | 体积， $m^3$ | 事故排风量， $m^3/h$ | 正常排风量， $m^3/h$ | 换气次数                    |
|----|----------------|-----------|----------------|----------------|-------------------------|
| 1  | 加速器大厅及束流输运隧道区域 | 2400      | 15000          | 1200           | 停机强排 5 次/h，正常排风 0.5 次/h |
| 2  | 360°旋转束终端区域    | 7000      | 35000          | 3500           | 停机强排 5 次/h，正常排风 0.5 次/h |
| 3  | 30°固定束终端       | 1000      | 5000           | 500            | 停机强排 5 次/h，正常排风 0.5 次/h |

**表 3-20 考虑通风的情况下，正常运行期间测调中心各区域空气感生放射性动态饱和浓度计算结果， $Bq/m^3$**

| 核素        | 加速器大厅    | 终端       |
|-----------|----------|----------|
| $^{11}C$  | 5.11E+01 | 6.87E+02 |
| $^{13}N$  | 6.55E+02 | 6.47E+02 |
| $^{15}O$  | 3.54E+03 | 5.31E+02 |
| $^{41}Ar$ | 1.17E+01 | 3.48E+01 |
| 总计        | 4.26E+03 | 1.90E+03 |

**表 3-21 考虑通风的情况下，正常运行期间用户单位各区域空气感生放射性**

动态饱和浓度计算结果（换气次数取 4 次/h），Bq/m<sup>3</sup>

| 核素               | 加速器大厅    | 终端       |
|------------------|----------|----------|
| <sup>11</sup> C  | 2.15E+01 | 2.89E+02 |
| <sup>13</sup> N  | 3.74E+02 | 3.70E+02 |
| <sup>15</sup> O  | 3.02E+03 | 4.53E+02 |
| <sup>41</sup> Ar | 2.36E+00 | 7.03E+00 |
| 总计               | 3.42E+03 | 1.12E+03 |

#### 3.4.1.3.1.3 排入环境的空气感生放射性核素量

$$Q_t = \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} (1 - e^{-(\lambda+r_1)t}) R_t dt = \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t \int_0^t (1 - e^{-(\lambda+r_1)t}) dt = \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t (t - \frac{1}{\lambda+r_1} + \frac{e^{-(\lambda+r_1)t}}{\lambda+r_1}) \quad (3-5)$$

$$Q_{t_c} = \int_0^{t_c} C_{t_c} R_{t_c} dt = \int_0^{t_c} C_t e^{-(\lambda+r_2)t_c} R_{t_c} dt = C_t R_{t_c} \int_0^{t_c} e^{-(\lambda+r_2)t_c} dt = C_t R_{t_c} \frac{1 - e^{-(\lambda+r_2)t_c}}{\lambda+r_2} \quad (3-6)$$

式中，

$Q_t$  和  $Q_{t_c}$  分别小型化重离子治疗装置运行  $t$  时间和停机排放  $t_c$  时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度，Bq；测调中心内小型化重离子治疗装置每年运行通风时间为 2898h，停机通风时间按照每一天一次例行 5min 巡检，并且每月平均两次处理故障（单次 5min），因此每年停机通风时间为  $365 \times 5 + 12 \times 2 \times 5 = 1945 \text{min} = 32.42 \text{h}$ ；

$R_t$  和  $R_{t_c}$  分别为小型化重离子治疗装置正常运行和停机通风状态下的通风速率，m<sup>3</sup>/s；具体见表 3-19。

由此可计算得出小型化重离子治疗装置运行、停机期间每年排入环境的空气感生放射性核素量和年均排放速率，列于表 3-22。

表 3-22 测调中心小型化重离子治疗装置运行、停机期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率

| 核素               | 年排放量，Bq  | 年平均排放速率，Bq/s |
|------------------|----------|--------------|
| <sup>11</sup> C  | 2.17E+09 | 6.88E+01     |
| <sup>13</sup> N  | 4.15E+09 | 1.32E+02     |
| <sup>15</sup> O  | 1.38E+10 | 4.39E+02     |
| <sup>41</sup> Ar | 1.41E+08 | 4.49E+00     |

|    |          |          |
|----|----------|----------|
| 总计 | 2.03E+10 | 6.44E+02 |
|----|----------|----------|

### 3.4.1.3.2 冷却水的感生放射性

小型化重离子治疗装置设有独立的主冷却水回路，分别用于冷却同步加速器、束流线上的磁铁等需冷却的设备和部件。其中，只有用于冷却加速器的冷却水，在束流损失处产生的中子辐射场的照射下会被活化，最大排放量为  $3\text{m}^3$ 。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯），高能中子与冷却水中的氧发生散裂反应，主要产生  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  等放射性核素，各放射性核素的参数见表 3-23。其中， $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  的半衰期很短，装置停机后，这些核素将迅速衰变，浓度也会很快降低。因此，冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的  $^3\text{H}$  和  $^7\text{Be}$ 。

表 3-23 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

| 核素              | 半衰期 $T_{1/2}$ | 衰变常数, $\text{s}^{-1}$ |
|-----------------|---------------|-----------------------|
| $^3\text{H}$    | 12.3a         | 1.78E-09              |
| $^7\text{Be}$   | 53.1d         | 1.51E-07              |
| $^{11}\text{C}$ | 20.4min       | 5.67E-04              |
| $^{13}\text{N}$ | 9.97min       | 1.16E-03              |
| $^{15}\text{O}$ | 2.04min       | 5.67E-03              |

利用表 3-10~表 3-12 中的束流参数并结合 FLUKA 保守计算了连续运行 5000h 后四种粒子所致冷却水感生放射性活度，具体见表 3-24。由计算结果可知碳离子引发冷却水感生放射性最强，因此选取碳离子的冷却水感生放射性进行评价分析。

表 3-24 四种粒子所致冷却水感生放射性活度，Bq

| 冷却时间/s | 质子       | 氦离子      | 碳离子      | 氧离子      |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 10     | 5.36E+02 | 1.09E+03 | 1.78E+03 | 1.53E+03 |
| 300    | 2.16E+02 | 4.64E+02 | 1.03E+03 | 6.83E+02 |
| 7200   | 8.31E+01 | 1.63E+02 | 2.49E+02 | 5.84E+01 |

本次评价利用 FLUKA 程序对同步加速器冷却水回路中的感生放射性进行了模拟计算，计算时使用的参数如下：

（1）束流损失：采用表 3-10~表 3-12 中的束损参数，连续照射约 2000h，停机 10s、5min、2h；

（2）模型简化：加速器束流管道厚 0.4cm，长 10cm；磁体厚 15cm，长

10cm；冷却水直径 3cm，长 10cm，具体如图 3-27 所示。

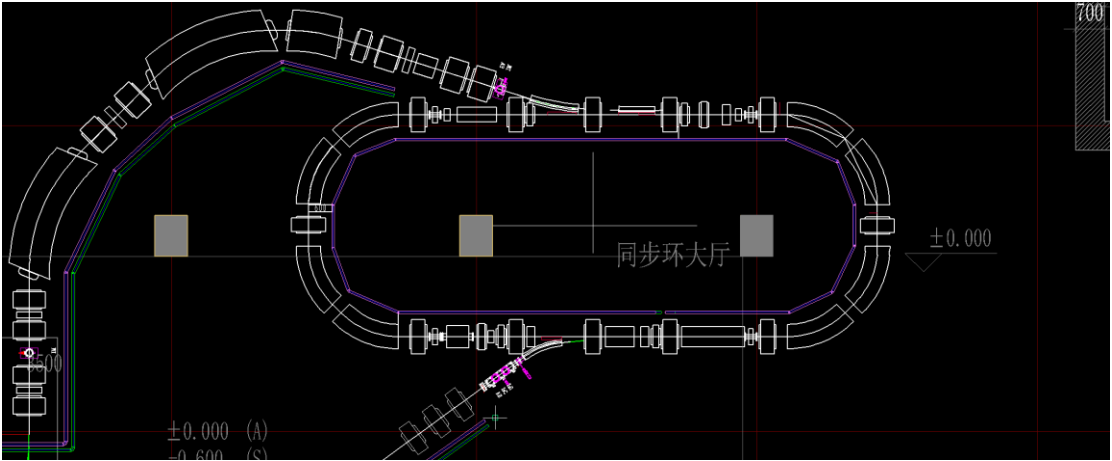


图 3-27 同步加速器冷却水回路活化计算模型示意图

计算结果列于表 3-25。由此可知，停机 10s 后，放射性核素  $^3\text{H}$  和  $^7\text{Be}$  的感生放射性活度分别为  $2.22\text{E}+01\text{Bq}$  和  $9.20\text{E}+01\text{Bq}$ ，远低于其单次排放限值  $1\text{ALI}_{\min}$ 。

表 3-25 冷却水感生放射性计算结果

| 冷却时间 | 核素            | 放射性活度, Bq         | 放射性活度浓度, Bq/m <sup>3</sup> |
|------|---------------|-------------------|----------------------------|
| 10s  | $^7\text{Be}$ | $9.20\text{E}+01$ | $3.07\text{E}+01$          |
|      | $^3\text{H}$  | $2.22\text{E}+01$ | $7.40\text{E}+00$          |
| 5min | $^7\text{Be}$ | $9.20\text{E}+01$ | $3.07\text{E}+01$          |
|      | $^3\text{H}$  | $2.22\text{E}+01$ | $7.40\text{E}+00$          |
| 2h   | $^7\text{Be}$ | $2.22\text{E}+01$ | $7.40\text{E}+00$          |
|      | $^3\text{H}$  | $4.67\text{E}+00$ | $1.56\text{E}+00$          |

3.4.1.3.3 结构部件的感生放射性

结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。小型化重离子治疗装置产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如法拉第筒、偏转磁铁等，其主要材料为铜、铁、石墨。相关实验研究表明，停机后被活化部件中的核素主要是  $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{52}\text{Mn}$  和  $^{60}\text{Co}$  等半衰期较长的核素。

利用表 3-10~表 3-12 中的束流参数并结合 FLUKA 保守计算了连续运行 5000h 后四种粒子所致结构部件的感生放射性活度，具体见表 3-26。由此可知，质子束流损失引发结构部件感生放射性最强，故选取质子的计算结果进行评价分析。

表 3-26 四种离子所致活化部件感生放射性活度，Bq

| 冷却时间/s | 质子       | 氦离子      | 碳离子      | 氧离子      |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 10     | 1.74E+06 | 7.69E+04 | 1.21E+06 | 1.13E+06 |
| 300    | 1.68E+06 | 7.62E+04 | 1.17E+06 | 1.08E+06 |
| 7200   | 1.52E+06 | 7.31E+04 | 1.04E+06 | 9.69E+05 |

根据小型化重离子治疗装置的主要的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序，计算了小型化重离子治疗装置连续运行 2000h、停机 10s、5min 及 2h 后，主要束流损失部位同步环（不锈钢）、偏转磁铁（铁）及法拉第筒（铜）的感生放射性饱和活度。

对于出束调试期间使用的水箱，因其内部介质为水，因此碳离子束流损失所致感生放射性影响最大，水箱几何模型为 675mm×645mm×560mm(长×宽×高)，壁厚 15mm，水箱壁材料:丙烯酸；水箱内:水。根据表 3-10~表 3-12 中的束流参数并结合 FLUKA，计算的水箱表面 1m 处的残余剂量率水平。计算结果见表 3-34。

同步环、偏转磁铁及法拉第筒等结构部件感生放射性饱和活度的计算结果列于表 3-27~表 3-29。由计算结果可知，停机后感生放射性主要来自  $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{56}\text{Co}$ 、 $^{52}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Mn}$ 、 $^{52\text{m}}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Mn}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{63}\text{Zn}$  及  $^{64}\text{Cu}$  等半衰期在月级别的中长寿命放射性核素，这些核素的饱和活度基本都高于其豁免活度，其余大部分核素的饱和活度均低于其豁免活度。不同冷却时间下距离同步环、偏转磁铁及法拉第筒表面 5cm、30cm、100cm 位置处残余剂量率结果见表 3-30~

表 3-32。

表 3-27 冷却 10s、5min 及 2h 后同步环的感生放射性计算结果，Bq

| 核素                | 冷却 10s   | 冷却 5min  | 冷却 2h    | 豁免活度  |
|-------------------|----------|----------|----------|-------|
| <sup>55</sup> Fe  | 4.46E+05 | 4.46E+05 | 4.46E+05 | 1E+06 |
| <sup>54</sup> Mn  | 2.71E+05 | 2.71E+05 | 2.71E+05 | 1E+06 |
| <sup>51</sup> Cr  | 1.24E+05 | 1.24E+05 | 1.28E+05 | 1E+07 |
| <sup>56</sup> Co  | 1.12E+05 | 1.12E+05 | 1.12E+05 | 1E+05 |
| <sup>54</sup> Fe  | 7.26E+04 | 5.88E+04 | 5.82E+04 | 1E+05 |
| <sup>52</sup> Mn  | 5.88E+04 | 5.51E+04 | 3.25E+04 | ——    |
| <sup>56</sup> Mn  | 5.44E+04 | 5.32E+04 | 3.18E+04 | 1E+05 |
| <sup>52m</sup> Mn | 5.28E+04 | 4.50E+04 | 2.66E+04 | 1E+05 |
| <sup>53m</sup> Fe | 3.49E+04 | 3.25E+04 | 1.24E+05 | ——    |
| <sup>49</sup> V   | 3.25E+04 | 2.87E+04 | 1.12E+05 | 1E+06 |
| <sup>55</sup> Co  | 2.88E+04 | 1.64E+04 | 5.82E+04 | 1E+05 |
| <sup>51</sup> Mn  | 1.76E+04 | 4.46E+05 | ——       | 1E+06 |

表 3-28 冷却 10s、5min 及 2h 后偏转磁铁的感生放射性计算结果，Bq

| 核素               | 冷却 10s   | 冷却 5min  | 冷却 2h    | 豁免活度  |
|------------------|----------|----------|----------|-------|
| <sup>55</sup> Fe | 3.27E+07 | 3.27E+07 | 3.27E+07 | 1E+06 |
| <sup>54</sup> Mn | 1.95E+07 | 1.95E+07 | 1.95E+07 | 1E+06 |
| <sup>51</sup> Cr | 1.29E+07 | 1.29E+07 | 1.29E+07 | 1E+07 |
| <sup>49</sup> V  | 7.27E+06 | 7.27E+06 | 7.27E+06 | ——    |
| <sup>52</sup> Mn | 4.80E+06 | 4.79E+06 | 4.76E+06 | 1E+05 |
| <sup>48</sup> V  | 4.17E+06 | 4.17E+06 | 4.16E+06 | 1E+05 |
| <sup>56</sup> Mn | 4.16E+06 | 4.07E+06 | 2.43E+06 | 1E+05 |
| <sup>53</sup> Fe | 4.09E+06 | 3.59E+06 | 1.99E+06 | 1E+05 |
| <sup>51</sup> Mn | 2.09E+06 | 3.10E+06 | 3.27E+07 | ——    |
| <sup>56</sup> Co | 1.99E+06 | 1.99E+06 | 1.95E+07 | 1E+05 |
| <sup>49</sup> Cr | 1.97E+06 | 1.95E+06 | 1.29E+07 | 1E+05 |

表 3-29 冷却 10s、5min 及 2h 后法拉第筒的感生放射性计算结果，Bq

| 核素               | 冷却 10s   | 冷却 5min  | 冷却 2h    | 豁免活度  |
|------------------|----------|----------|----------|-------|
| <sup>65</sup> Zn | 9.91E+05 | 9.91E+05 | 9.91E+05 | 1E+06 |
| <sup>63</sup> Zn | 6.55E+05 | 6.01E+05 | 7.56E+04 | ——    |
| <sup>64</sup> Cu | 2.86E+03 | 2.84E+03 | 2.56E+03 | 1E+06 |

表 3-30 不同冷却时间下距离同步环表面 5cm、30cm、100cm 位置处感生剂量率，μSv/h

| 冷却时间/s | 距离表面 5cm | 距离表面 30cm | 距离表面 100cm |
|--------|----------|-----------|------------|
| 10     | 4.72E-02 | 5.63E-02  | 5.16E-02   |
| 300    | 3.60E-02 | 4.33E-02  | 3.93E-02   |
| 7200   | 2.70E-02 | 3.09E-02  | 2.76E-02   |

**表 3-31 不同冷却时间下距离偏转磁铁表面 5cm、30cm、100cm 位置处感生剂量率,  $\mu\text{Sv/h}$**

| 冷却时间/s | 距离表面 5cm | 距离表面 30cm | 距离表面 100cm |
|--------|----------|-----------|------------|
| 10     | 19.84    | 9.88      | 2.83       |
| 300    | 17.68    | 8.77      | 2.49       |
| 7200   | 13.14    | 6.51      | 1.84       |

**表 3-32 不同冷却时间下距离法拉第筒表面 5cm、30cm、100cm 位置处感生剂量率， $\mu\text{Sv/h}$**

| 冷却时间/s | 距离表面 5cm | 距离表面 30cm | 距离表面 100cm |
|--------|----------|-----------|------------|
| 10     | 6.25     | 1.33      | 0.20       |
| 300    | 6.02     | 1.28      | 0.19       |
| 7200   | 3.75     | 0.75      | 0.01       |

**表 3-33 不同冷却时间下距离水箱表面 1m 位置处感生剂量率**

| 停机时间  | 水箱表面 1m 处感生剂量率水平， $\mu\text{Sv/h}$ |
|-------|------------------------------------|
| 5min  | 0.83                               |
| 10min | 0.23                               |
| 20min | 1.17E-01                           |
| 30min | 8.42E-02                           |
| 1h    | 1.85E-02                           |

#### 3.4.1.3.4 土壤和地下水的感生放射性

根据表 4-2 得出测调中心小型化重离子治疗装置各区域底部土壤剂量率结果，如下所示。

**表 3-34 测调中心小型化重离子治疗装置各区域底部土壤剂量率结果**

| 关注点 | 区域描述         | 剂量率计算结果， $\mu\text{Sv/h}$ |
|-----|--------------|---------------------------|
| 28  | 30°固定束终端底板下  | 320                       |
| 29  | 360°旋转束终端底板下 | 2000                      |
| 32  | 加速器大厅底板下     | 89                        |

由表 3-34 中各关注点剂量率计算结果可知，关注点为各区域所致土壤中的剂量率水平，其中最高为  $2000\mu\text{Sv/h}$ ，小于  $5\text{mSv/h}$ ，因此本项目小型化重离子治疗装置的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

### 3.4.2 小结

测调中心内小型化重离子治疗装置出束调试及用户单位小型化重离子治疗装置安装调试及运行维护过程中主要的污染源为加速器开机出束产生的瞬发辐射对工作人员造成的外照射。此外，辐射工作人员在停机后进入控制区内，感生放射性气体和活化部件也会对工作人员产生辐射影响。

## 4. 辐射安全与防护

安装调试及维修情况下，任何联锁旁路应通过兰州泰基（用户单位调试时还需通过用户单位辐射安全管理机构的批准和见证）辐射安全管理机构的批准与见证，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。小型化重离子治疗装置安装调试阶段，应在最大工况下，由辐射工作人员进行全面的辐射监测，评估辐射安全状况，确保辐射水平达标。检修人员进入加速器大厅和束流输运区域前，应先进行工作场所辐射监测，在兰州泰基（用户单位调试时还需通过用户单位辐射安全管理机构的批准和见证）辐射安全管理机构批准后方可进入。进入加速器大厅和束流输运区域的参观人员须在兰州泰基辐射工作人员带领下进入。加速器调试、检修期间，应对进入加速器大厅和束流输运区域、治疗室区域的人员加强管理。在设备出束的情况下严禁调试、检修人员滞留在控制区。同时加速器在调试、运维期间，控制室一直须工作人员值守。

### 4.1 测调中心

#### 4.1.1 辐射工作场所分区

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

测调中心内小型化重离子治疗装置的辐射工作场所分区见图 4-1，具体如下：

（1）控制区：加速器大厅、束流输运隧道、360°旋转束终端、30°固定束终端和放射性固体废物暂存间；

辐射工作场所分区中控制区由直线注入器机房内部变更为加速器大厅、束流输运隧道、360°旋转束终端、30°固定束终端和放射性固体废物暂存间。

（2）监督区：上述各控制区屏蔽墙体外四周紧邻的场所，如控制室及设备

机房等。

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

监督区管理要求：监督区入口处设置标识表明监督区，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

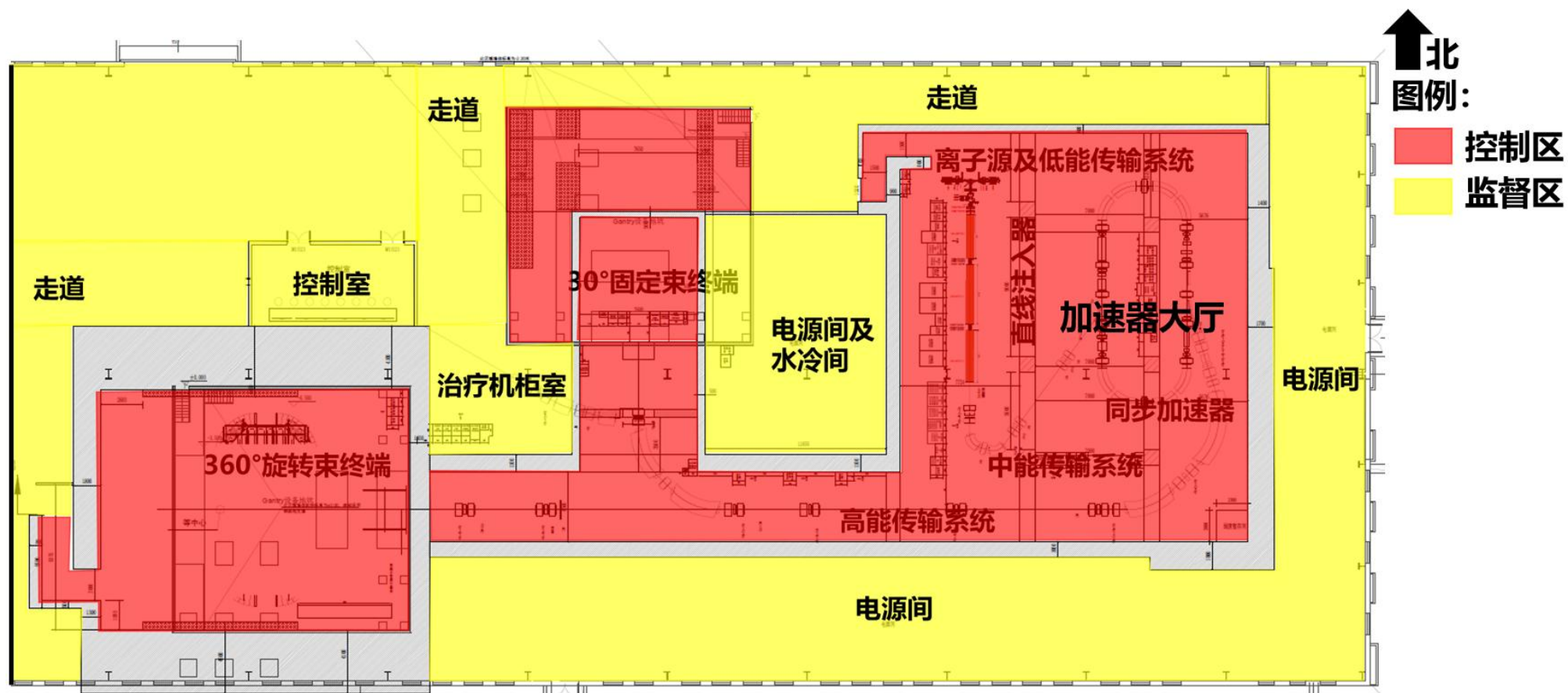


图 4-1 测调中心小型化重离子治疗装置工作场所分区示意图

## 4.1.2 辐射屏蔽

### 4.1.2.1 设计标准

#### 4.1.2.1.1 剂量限值

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

##### （1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv。

##### （2）公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：年有效剂量，1mSv。

#### 4.1.2.1.2 年剂量约束值

##### （1）辐射工作人员年剂量约束值

结合项目特点，本项目辐射工作人员的年剂量约束值不超过 5mSv/a。

##### （2）公众年剂量约束值

本项目的公众剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

#### 4.1.2.1.3 屏蔽体外剂量率控制水平

本项目辐射工作场所屏蔽体外关注点处剂量率控制水平见错误!未找到引用源。。

### 4.1.2.2 屏蔽设计

小型化重离子治疗装置辐射工作场所辐射屏蔽设计如表 4-1 所示，其中：

加速器大厅、束流传输系统以及各终端墙体采用密度不低于  $2.35\text{g/cm}^3$  的混凝土作为主屏蔽；

表 4-1 测调中心小型化重离子治疗装置屏蔽设计

| 场所名称      |      | 位置  | 墙体屏蔽厚度和材料                                       |
|-----------|------|-----|-------------------------------------------------|
| 加速器大厅     |      | 东墙  | 1.4m~1.7m 混凝土                                   |
|           |      | 西墙  | 0.3m~0.9 混凝土<br>迷道内墙：0.9m 混凝土<br>迷道外墙：0.3m 混凝土  |
|           |      | 南墙  | 1m~1.8m 混凝土                                     |
|           |      | 北墙  | 1.4m 混凝土                                        |
|           |      | 顶板  | 0.3m 混凝土                                        |
|           |      | 底板  | 1m 混凝土                                          |
| 束流传输系统    |      | 东墙  | 1.4m~1.7m 混凝土                                   |
|           |      | 西墙  | 1.4m 混凝土                                        |
|           |      | 南墙  | 1m 混凝土                                          |
|           |      | 北墙  | 1.1m 混凝土                                        |
|           |      | 顶板  | 0.3m 混凝土                                        |
|           |      | 底板  | 1m 混凝土                                          |
| 30°固定束终端  | 地上部分 | 西墙  | 内墙：1.5m 混凝土<br>外墙：1.92m 混凝土                     |
|           |      | 东墙  | 内墙：1m 混凝土<br>外墙：1.55m 混凝土                       |
|           |      | 顶板  | 0.3m 混凝土                                        |
|           |      | 防护门 | 3mmPb                                           |
|           | 地下部分 | 南墙  | 3.2m 混凝土                                        |
|           |      | 北墙  | 3.06m~4.96m 混凝土                                 |
|           |      | 底板  | 0.5m 混凝土                                        |
| 360°旋转束终端 | 地上部分 | 东墙  | 1.4m 混凝土                                        |
|           |      | 西墙  | 1.3m~1.8m 混凝土<br>迷道内墙：1.8m 混凝土<br>迷道外墙：0.8m 混凝土 |
|           |      | 南墙  | 4.6m 混凝土                                        |
|           |      | 北墙  | 4.6m 混凝土                                        |
|           |      | 顶板  | 3.3m 混凝土                                        |
|           | 地下部分 | 东墙  | 2.45m 混凝土                                       |
|           |      | 西墙  | 0.4~2.3m 混凝土                                    |
|           |      | 南墙  | 4.1m 混凝土                                        |
|           |      | 北墙  | 2.03m 混凝土                                       |
|           |      | 底板  | 0.5m 混凝土                                        |

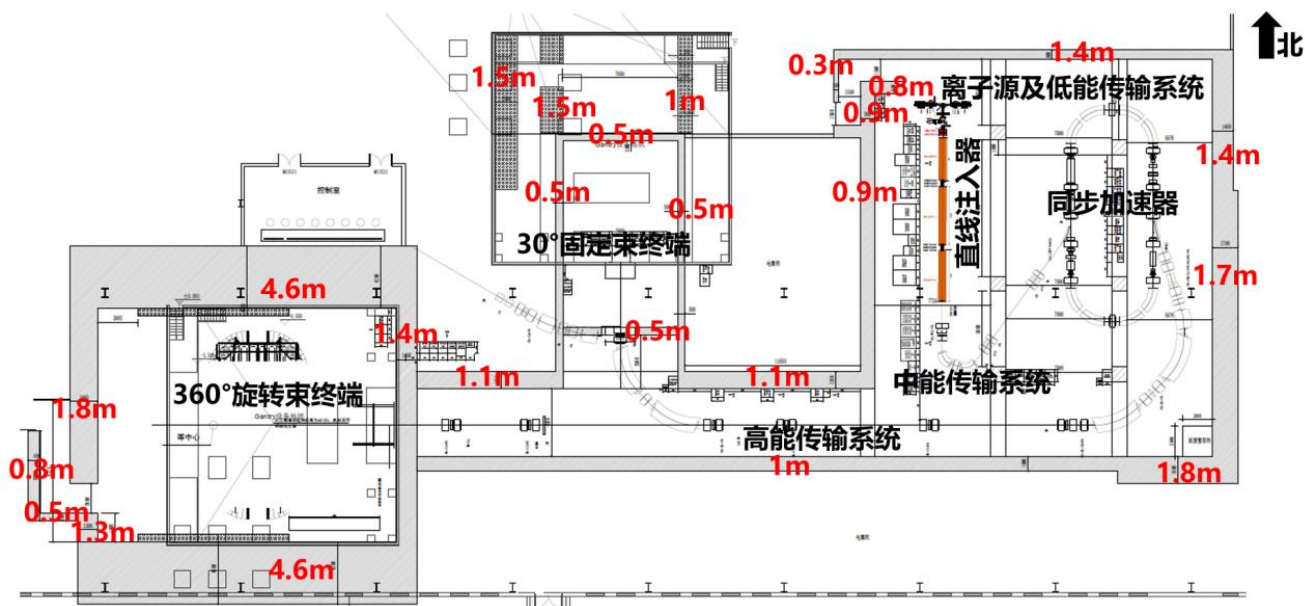


图 4-2 测调中心小型化重离子治疗装置辐射屏蔽设计平面示意图

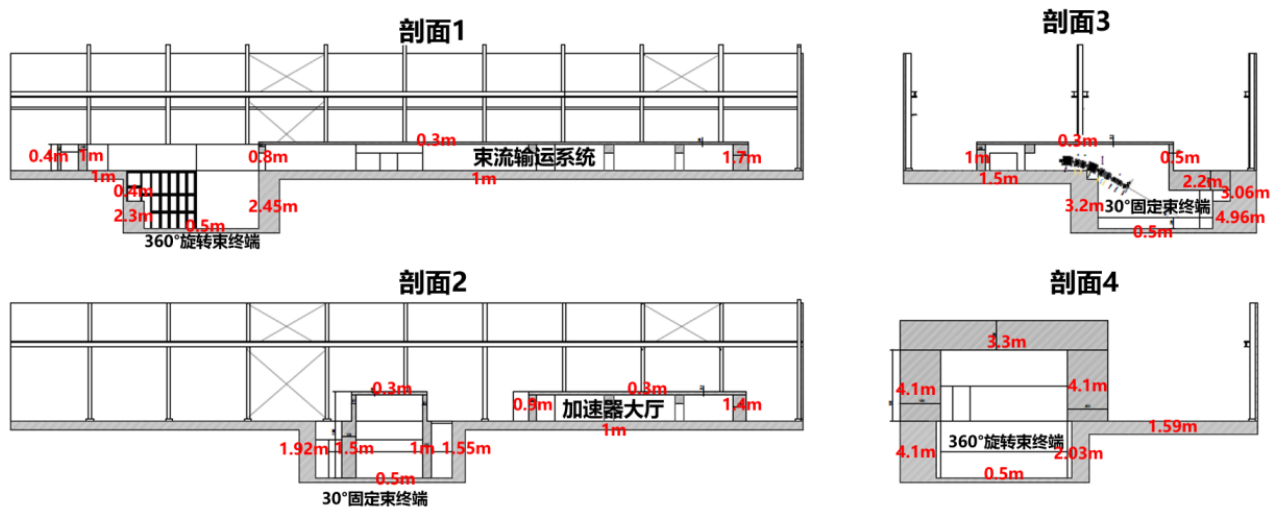


图 4-3 测调中心小型化重离子治疗装置辐射屏蔽设计剖面示意图

#### 4.1.2.3 屏蔽体外剂量率计算

##### 4.1.2.3.1 计算时使用的源项

本次评价采用目前国内外通用的FLUKA程序计算测调中心小型化重离子治疗装置辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平。

FLUKA 程序是一种基于蒙特卡罗模拟的粒子物理计算程序，它包含了详细

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

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

根据兰州泰基类似项目的四种离子辐射影响的比较结果,结果显示  $^{12}\text{C}^{6+} > ^{16}\text{O}^{8+} > ^4\text{He}^{2+} > \text{H}^+$ , 束流损失参数见表 3-10~表 3-12,因此整个装置剂量率评估以碳离子束流损失进行评价;主要考虑了直线加速器注入的低能集中损失、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。

同步加速过程损失的粒子能量为 200MeV/u,同步引出、高能输运及终端损失的粒子能量为 430MeV/u;同步加速过程束流损失流强为  $2.08\text{E}+07\text{pps}$  ( $1.25\text{E}+09\text{ppm} \div 60\text{s}$ ),同步引出集中损失流强为  $1.87\text{E}+07\text{pps}$  ( $1.12\text{E}+09\text{ppm} \div 60\text{s}$ ),高能输运线均匀损失流强为  $2.32\text{E}+05\text{pps/m}$ ,终端集中损失流强为  $1.5\text{E}+08\text{pps}$  ( $9.0\text{E}+9\text{ppm} \div 60\text{s}$ )。

图 4-5~图 4-13 分别给出了各部分辐射剂量率分布图。

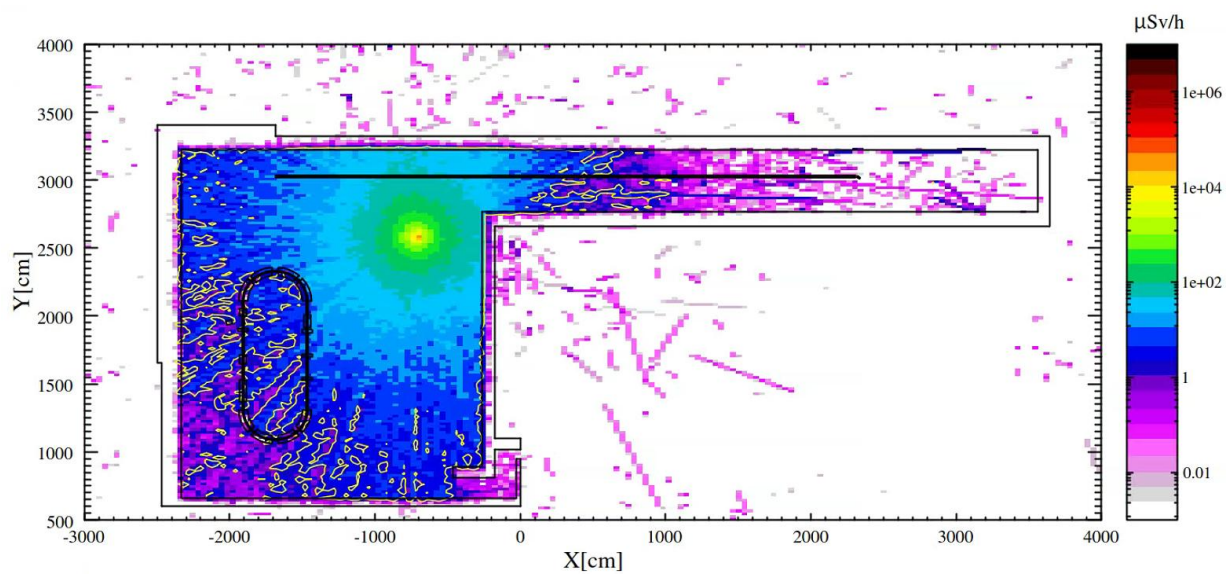


图 4-4 改造后直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）运行所致剂量率分布图（平面）

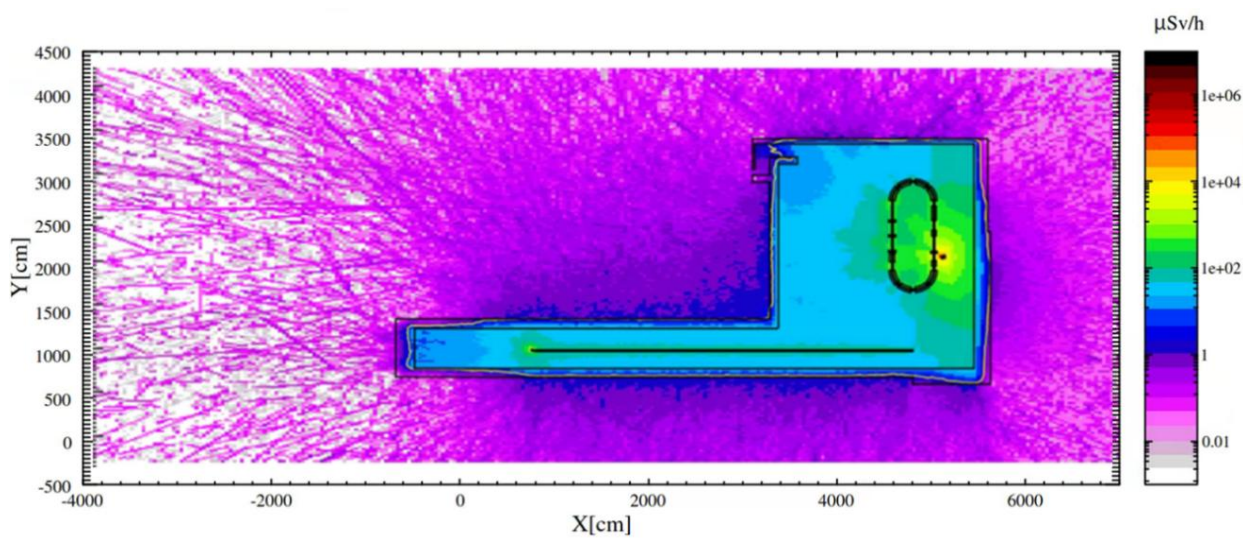


图 4-5 测调中心加速器大厅剂量率分布图（平面）

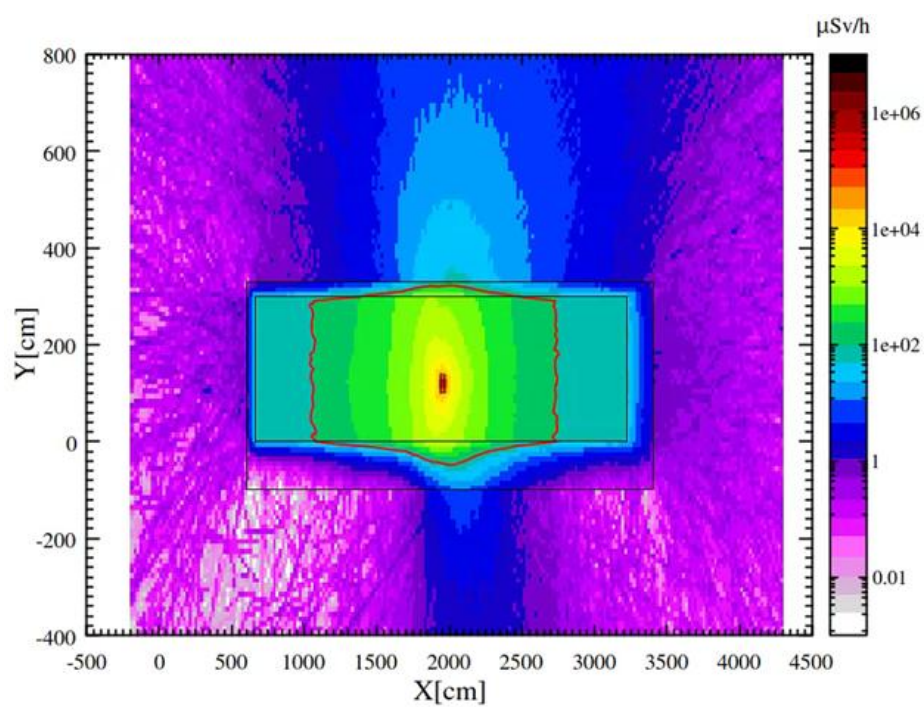


图 4-6 测调中心加速器大厅剂量率分布图（剖面）

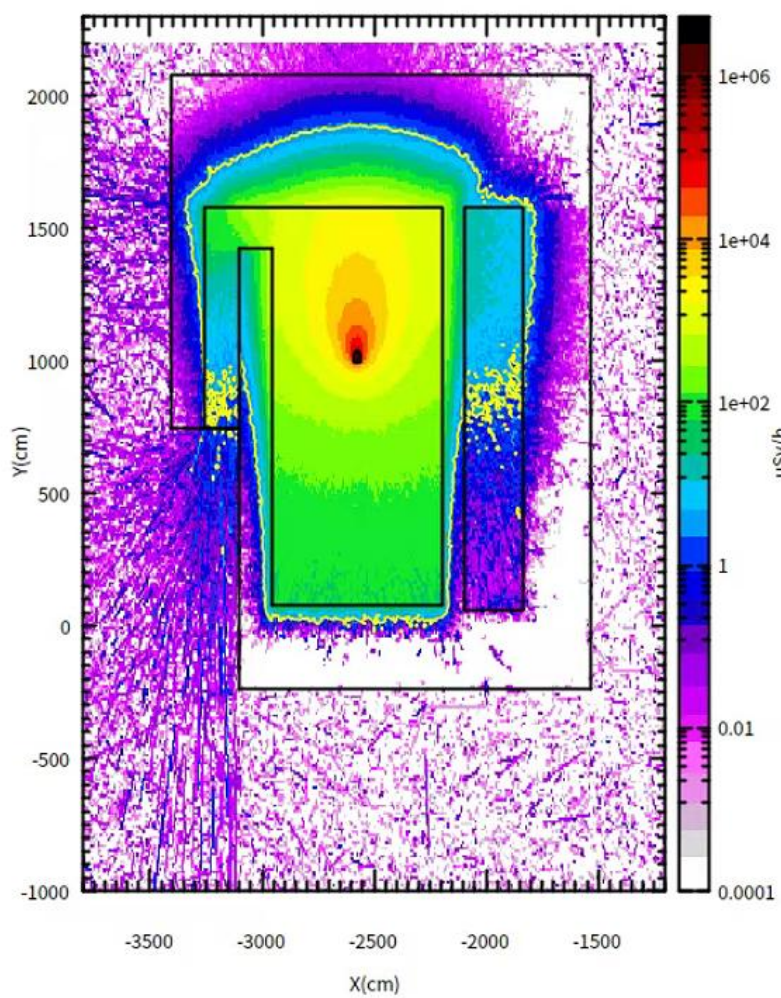


图 4-7 测调中心 30°固定束终端剂量率分布图（平面地下）

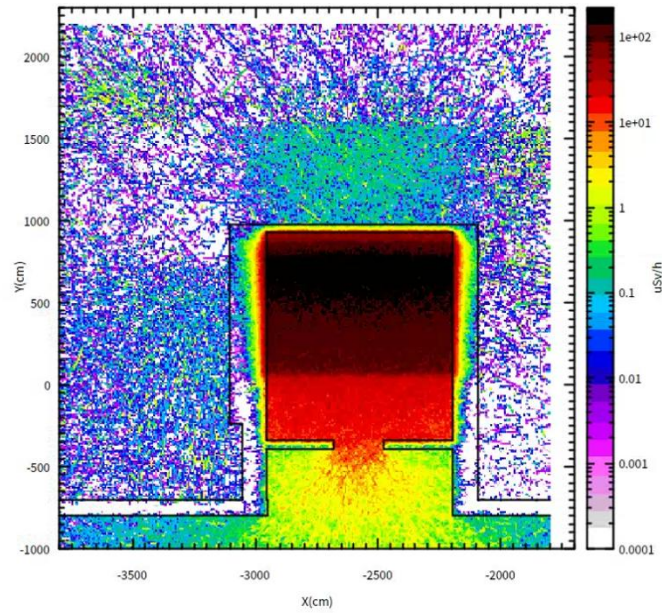


图 4-8 测调中心 30°固定束终端剂量率分布图（平面地上）

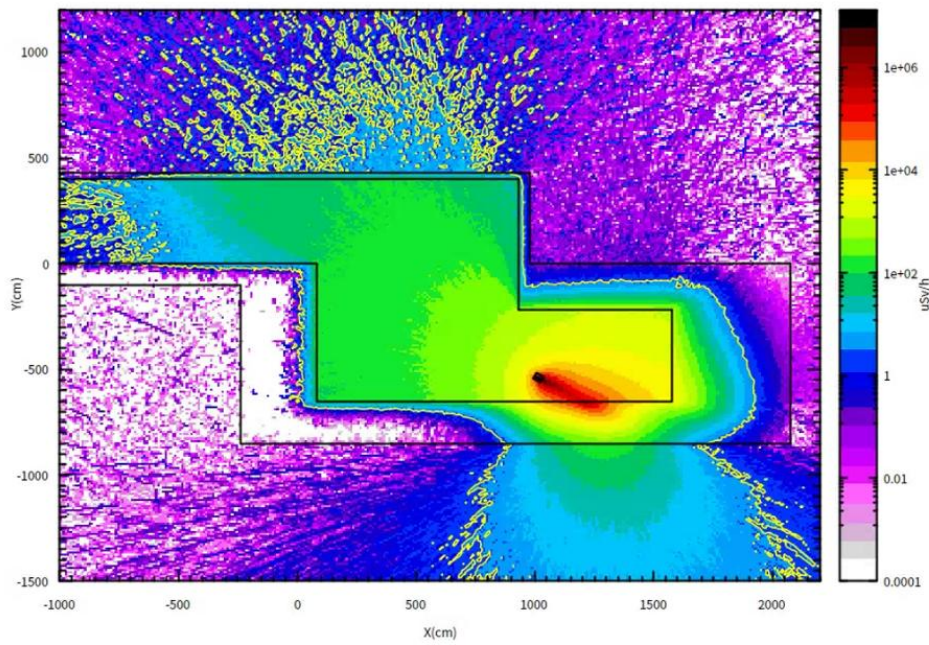


图 4-9 测调中心 30°固定束终端剂量率分布图（剖面 1）

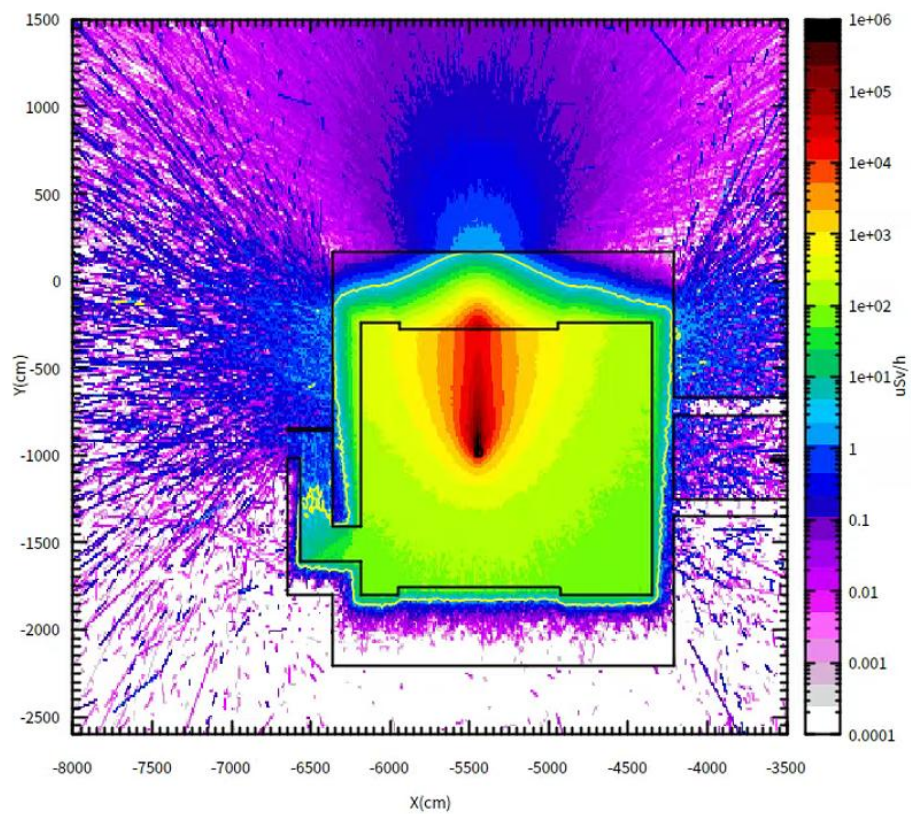


图 4-10 测调中心 360°旋转束终端剂量率分布图（向北）

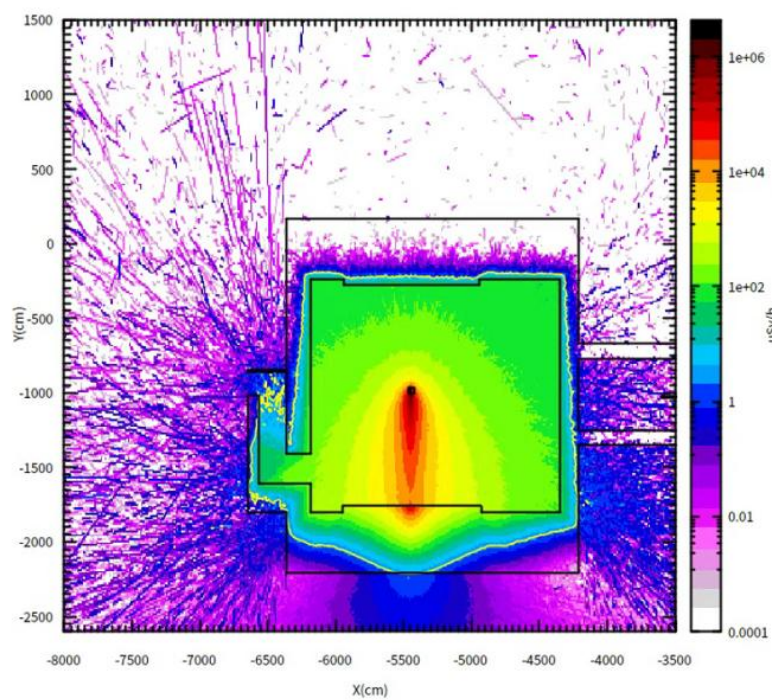


图 4-11 测调中心 360°旋转束终端剂量率分布图（向南）

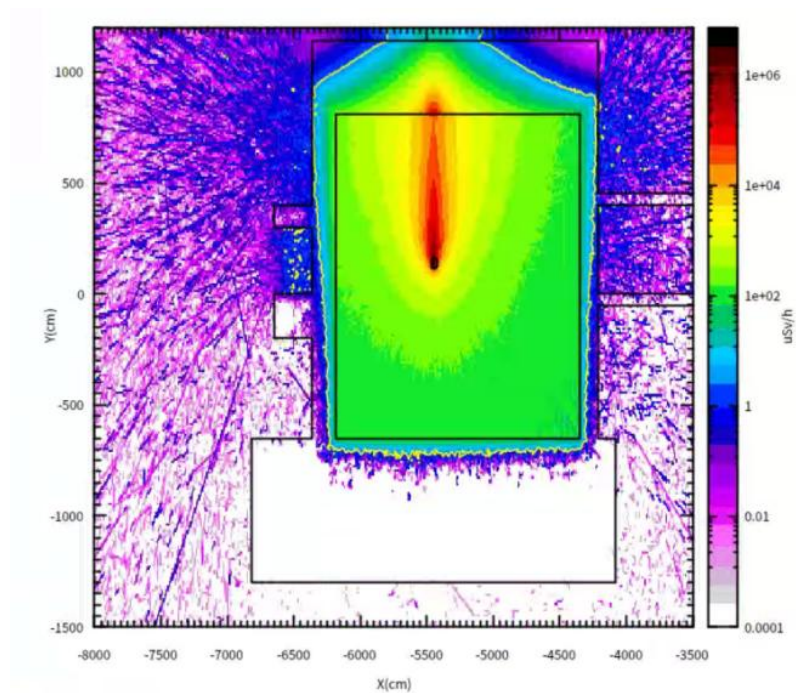


图 4-12 测调中心 360°旋转束终端剂量率分布图（向上）

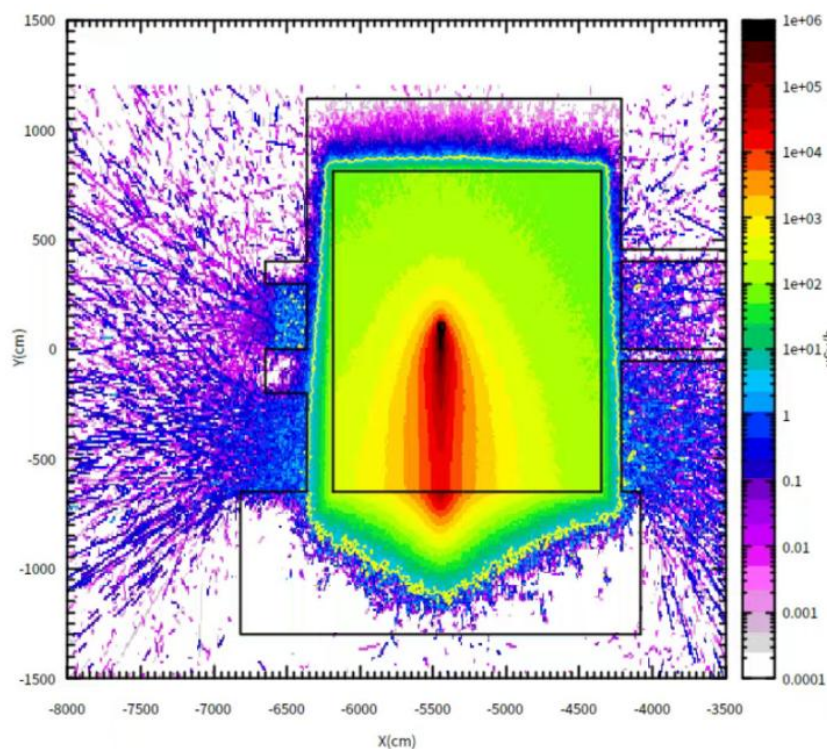


图 4-13 测调中心 360°旋转束终端剂量率分布图（向下）

#### 4.1.2.3.2 关注点设置及计算结果

根据测调中心小型化重离子治疗装置的平面布置及周围环境情况设置了关注点，屏蔽体外关注点剂量率水平见表 4-2，各关注点位置示意图见图 4-14~图

4-15。

由计算结果可知，测调中心小型化重离子治疗装置屏蔽体外关注点剂量率水平平均低于错误!未找到引用源。中的限值。

同时根据图 4-4 可知，改造后的屏蔽墙体在直线注入器（包含离子源、低能传输系统及直线加速器）运行时屏蔽体外剂量率水平未超过限值。

**表 4-2 测调中心小型化重离子治疗装置屏蔽体外关注点剂量率水平**

| 序号 | 关注点位置               | 剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$ |
|----|---------------------|-------------------------|
| 1  | 加速器大厅东侧电源间北部        | 1.4                     |
| 2  | 加速器大厅东侧电源间中间        | 1.9                     |
| 3  | 加速器大厅东侧电源间南部        | 0.8                     |
| 4  | 加速器大厅南侧电源间东部        | 0.9                     |
| 5  | 加速器大厅南侧电源间中间        | 2                       |
| 6  | 加速器大厅南侧电源间西部        | 2                       |
| 7  | 360°旋转束终端迷道口        | 0.8                     |
| 8  | 360°旋转束终端西墙外        | 1.8                     |
| 9  | 360°旋转束终端北墙外        | 1                       |
| 10 | 控制室工作台              | 0.08                    |
| 11 | 治疗机柜室               | 1.1                     |
| 12 | 30°固定束终端迷道口         | 2.1                     |
| 13 | 30°固定束终端西墙外         | 0.15                    |
| 14 | 30°固定束终端北墙外         | 0.08                    |
| 15 | 30°固定束终端东墙外         | 0.07                    |
| 16 | 加速器大厅迷道口            | 1.1                     |
| 17 | 水冷间                 | 2.3                     |
| 18 | 加速器大厅北侧西部           | 1.6                     |
| 19 | 加速器大厅北侧东部           | 0.8                     |
| 20 | 测调中心北墙外东部           | 0.06                    |
| 21 | 测调中心北侧门             | 0.02                    |
| 22 | 测调中心南侧（360°旋转束终端南侧） | 1.0                     |
| 23 | 测调中心南侧门             | 0.11                    |
| 24 | 测调中心南侧东部            | 0.18                    |
| 25 | 测调中心东侧门             | 0.22                    |
| 26 | 超导测试间               | 0.05                    |
| 27 | 30°固定束终端屋面上         | 43                      |
| 28 | 30°固定束终端底板下         | 320                     |
| 29 | 360°旋转束终端底板下        | 2000                    |
| 30 | 360°旋转束终端屋面上        | 28                      |
| 31 | 加速器大厅屋面上            | 25                      |
| 32 | 加速器大厅底板下            | 89                      |

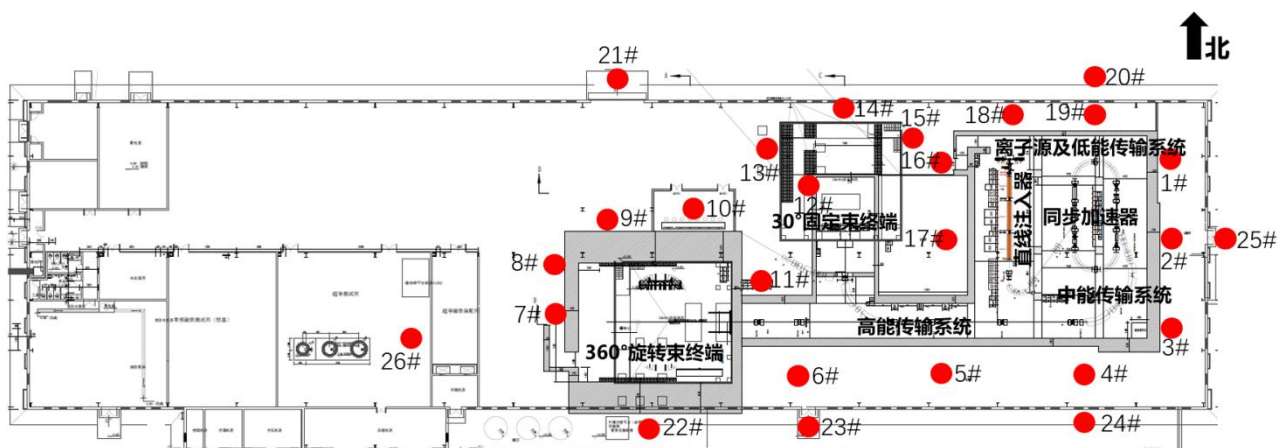


图 4-14 测调中心小型化重离子治疗装置关注点平面示意图

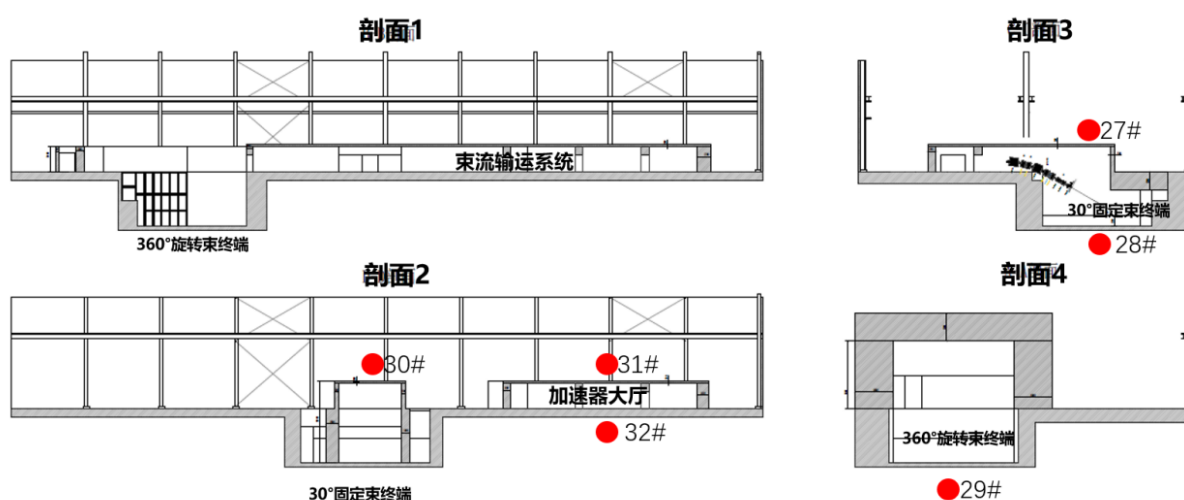


图 4-15 测调中心小型化重离子治疗装置关注点剖面示意图

### 4.1.3 安全联锁系统

对于测调中心内小型化重离子治疗装置的安全联锁系统兰州泰基已在原环评的基础上做出了优化，详见 4.1.3.2 小节。根据装置组成、项目特点及布局对安全联锁系统各部分（束流切断系统、门机联锁、人员出入管理系统、急停清场按钮及声光报警灯）进行了重新布设，均为新增。

急停清场盒距地面高度 1.4 米、急停按钮，紧急开门按钮距地面高度 1.4 米、声光报警灯，红外网络摄像机距地面高度 3.5 米、区域辐射监测仪距地面高度 2.3 米、人员出入管理箱距地面高度 1.5 米、束流状态显示装置（加速器大厅为门正上方、治疗室距地面高度 1.2 米）。

#### 4.1.3.1 系统设计准则

人身安全联锁系统的设计准则如下：

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

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

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

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

#### 4.1.3.2 系统组成

人身安全联锁系统是测调中心内出束调试工作期间最重要的辐射安全与防护措施，用以保障工作人员的安全。

小型化重离子治疗装置的人身安全联锁系统主要由 PLC、出入管理系统、门机联锁、急停按钮、清场按钮等组成。PLC 可以与各联锁装置通信，能够实时获取其联锁状态，一旦出现与安全逻辑相冲突的事件，PLC 就触发联锁来停止束流，防止人员受到误照射。

4.1.3.2.1 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。它不但是一个管理平台，同时它还构成了系统信息交换平台，通过对各子系统相关信息的采集和分析来完成系统信息管理工作。

4.1.3.2.2 PLC 逻辑控制

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将束流阻挡器、通道门（防护门）、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 4-16 为人身安全联锁系统的主要联锁逻辑。

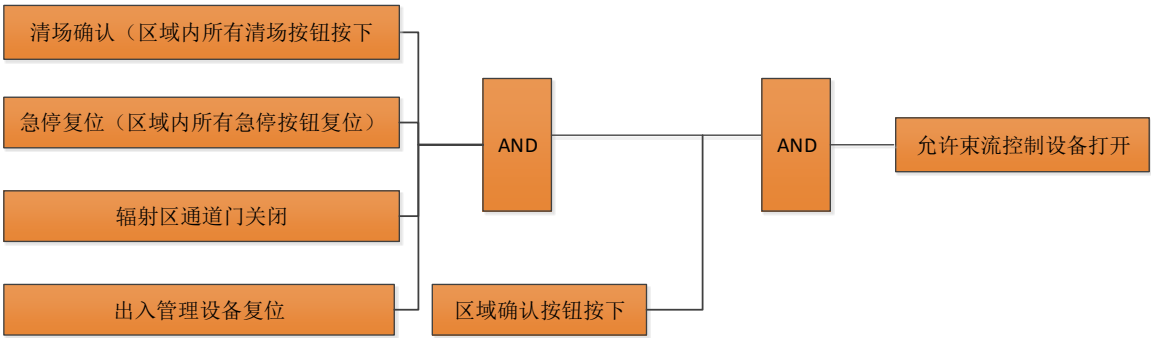


图 4-16 人身安全联锁系统主要联锁逻辑。

4.1.3.2.3 剂量联锁

剂量联锁通过固定式监测仪器进行监测。剂量联锁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是保障在加速器停机后，人员无法进入有较高残余放射性的区域，剂量阈值设定为 2.5 $\mu$ Sv/h。个人剂量联锁可以保障受照剂量超过年剂量限值（5mSv）的工作人员不能进入辐射工作区域。

#### 4.1.3.2.4 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，完成对进出加速器大厅区域和终端区域的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（超过  $5\text{mSv/a}$ ）时，不允许进入辐射区域。对进入加速器区域和终端的人员确认其身份，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，不允许进入加速器大厅和终端区域，以保证人员的安全。

IC 卡与个人剂量计通过自研软件进行绑定；本部分使用个人剂量计为电子式直读个人剂量计。工作人员每次进入加速器时在防护门门口人员出入管理箱刷电子式直读个人剂量计，然后防护门打开进入工作，系统算法同时将上次刷个人剂量计与本次刷个人剂量计的累积的差值上传个人剂量管理系统，超出安全阈值后禁止进入加速器大厅和终端区域等功能。

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，放置在加速器大厅入口，终端入口处为束流闸控制箱。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个人授权卡（或个人剂量计）后系统才能够随机分配一个按钮，按钮灯闪烁提示，按下按钮后开门指令会发送至 PLC 内，控制防护门打开。个人授权卡和个人剂量计进行绑定，一张个人授权卡或绑定的个人剂量计只能分配一次按钮，个人授权卡和个人剂量计互斥。此外人员出入管理箱自身的状态分为“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 监测人员出入管理箱上的按钮的状态，工作人员出门后需刷个人授权卡并且将按钮复位，出入管理箱才会处于“全部在位”状态，若工作人员未完成以上步骤出入管理箱则处于“非在位”状态，此时束流阻挡器不会被打开，确保在辐射区内有人的情况下束流不会进入该区域。

人员离开加速器大厅或终端区域时，按下防护门内侧的开门按钮（无条件开门，此按钮同样为紧急开门按钮），防护门会自动打开。紧急开门按钮位置示意图见图 4-17。

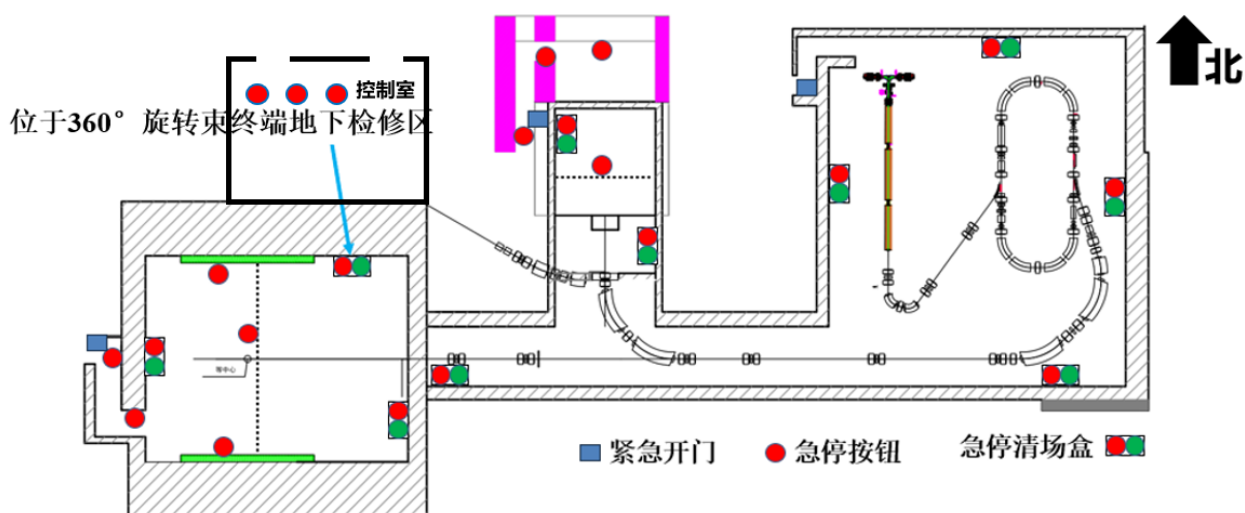


图 4-17 测调中心紧急开门按钮、急停按钮及清场按钮位置示意图

#### 4.1.3.2.5 门机联锁

小型化重离子治疗装置各防护门都设有位置开关。门开关状态在控制室联锁软件中实时显示。防护门处于打开状态时，小型化重离子治疗装置无法出束。若小型化重离子治疗装置出束期间某一防护门被打开，则会触发人身安全联锁系统，切断所在联锁区域束流。

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

#### 4.1.3.2.6 急停、清场按钮及警报装置

急停按钮及清场按钮均匀分布于加速器大厅（包括束流输运系统区域）及终端中。

##### （1）急停按钮

急停按钮设计为红色和文字显示，使其位置比较醒目。发生紧急情况时，联锁子区内人员可按下急停按钮、关闭该子区内的联锁装置切断该子区的束流。急停按钮有手动复位功能，在未经手动复位时，在其他地方无法复位此处被按下的按钮。只有当引发急停事件的按钮被复位后，才有可能使设备重新运行。

##### （2）清场按钮

清场搜索是在开机前按照规定顺序按下清场按钮，完成各联锁子区的清场搜索，各子区清场搜索设定了清场时限，当按下第一个清场按钮后在时限内未完成该子区的清场搜索，则需重新进行。其中加速器大厅（包括束流输运系统区域）10 分钟；各终端 3 分钟。清场巡检完成的信号作为开机出束的必要前提条件之一，从而确保在开机出束前无人员滞留在辐射区。

急停按钮及清场按钮设置位置见图 4-17。清场搜索路线见图 4-18。

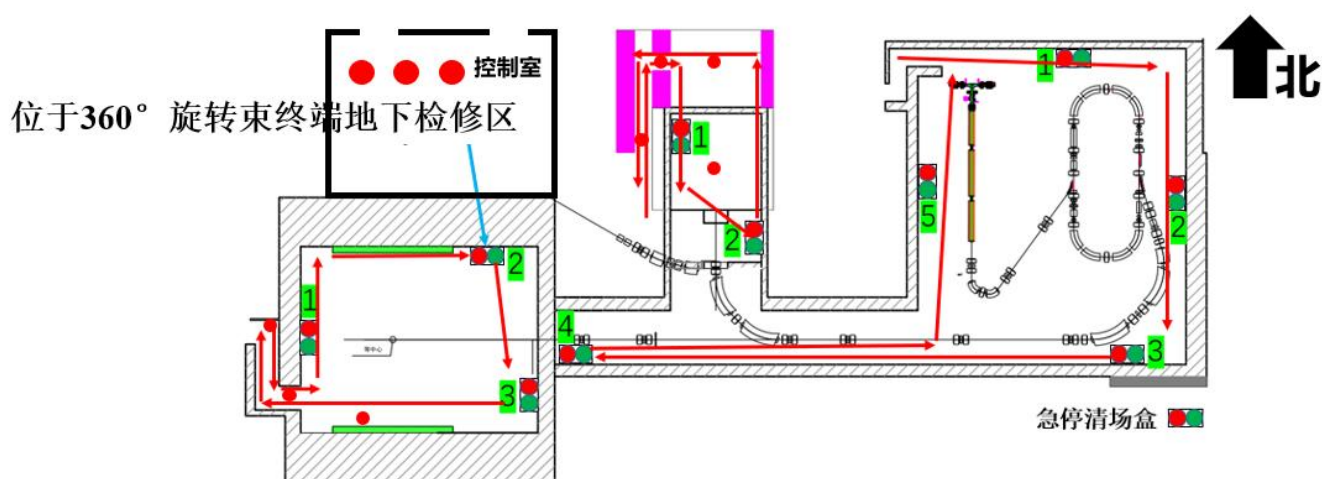


图 4-18 测调中心各区域清场搜索路线示意图

### (3) 警报装置

在加速器大厅区域按下清场按钮后对应警报装置发出声音警示，提醒加速器联锁区域内人员离开该区域。若遇紧急情况，可按下加速器大厅（包括束流输运系统区域）及终端内设置的急停按钮来切断束流。

#### 4.1.3.2.7 工作状态显示装置

各控制区防护门上均有电离辐射警告标志，加速器大厅入口处及各终端入口处均有装置状态显示装置，可直观、明显地显示加速器的工作状态。安装位置见图 4-19。

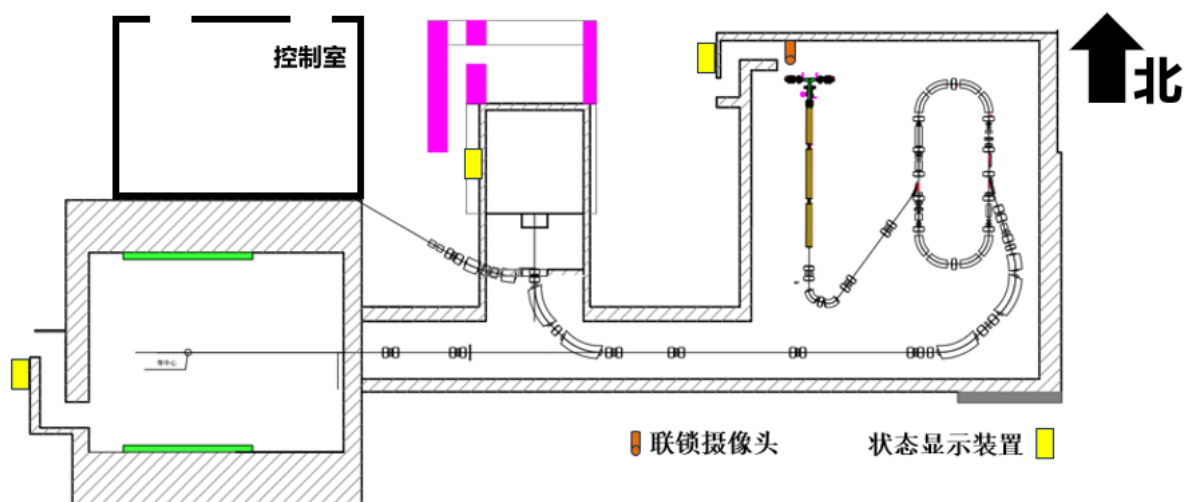


图 4-19 测调中心工作状态指示灯安装位置

#### 4.1.3.2.8 束流阻挡器

同步加速器引出、30°固定束终端前及360°旋转束终端前都有一个束流阻挡器（材质为铜），其主要作用是防止束流进入有人区域。束流阻挡器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。束流阻挡器安装位置如图 4-20 所示。

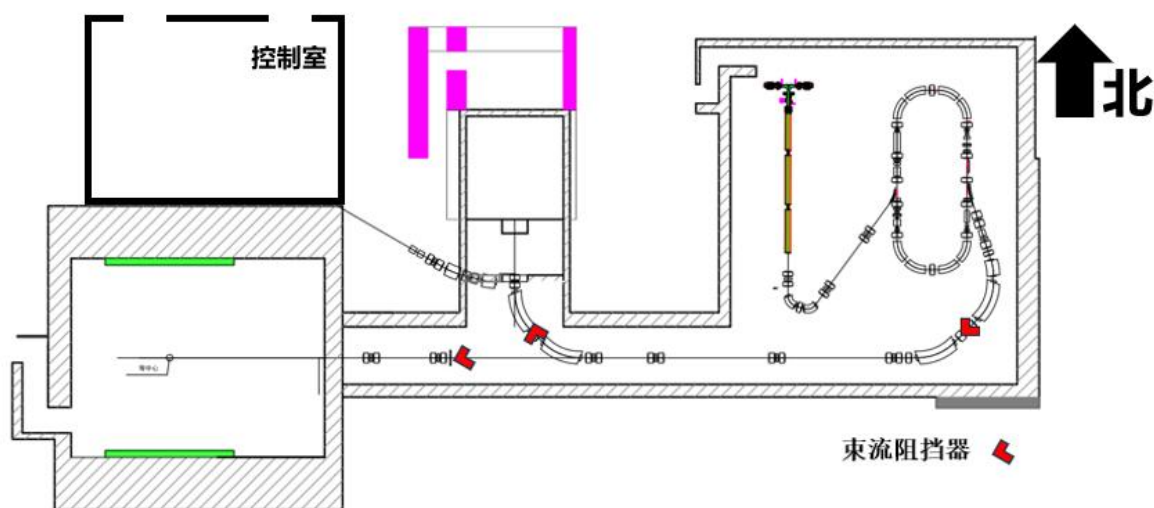


图 4-20 测调中心束流阻挡器位置示意图

#### 4.1.3.2.9 人身安全联锁系统逻辑

图 4-21 给出了测调中心内小型化重离子治疗装置安全联锁系统逻辑图，图中“主卡”即主管人员在人员出入管理箱刷过主卡后，其余工作人员才可在人员出入管理箱进行个人授权卡（“普通卡”）刷卡或刷个人剂量计开门；“普通卡”即个人授权卡；“中控室区域总钥匙”为中控室内加速器大厅最终联锁确认的按钮。

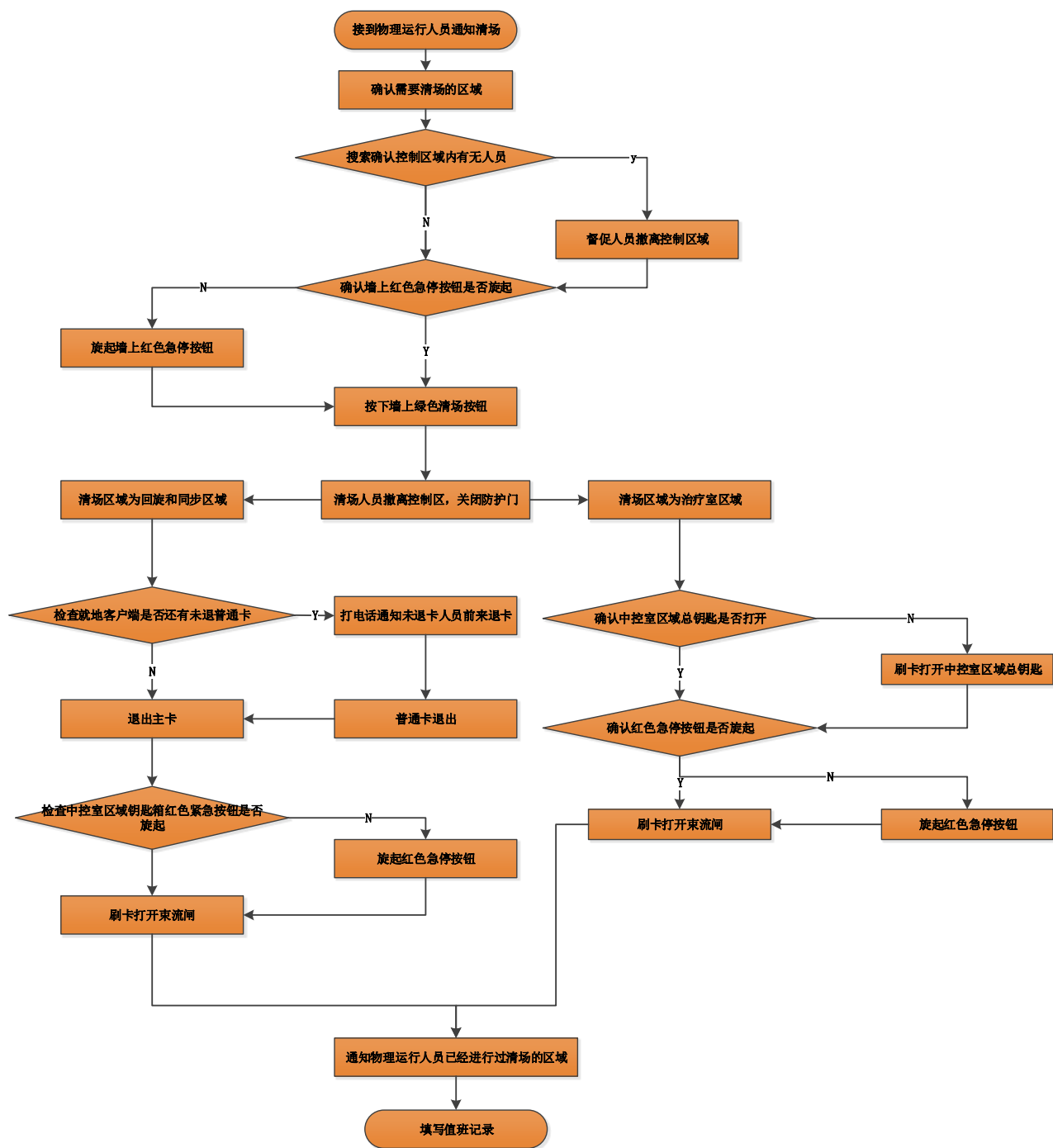


图 4-21 测调中心内小型化重离子治疗装置安全联锁系统逻辑图

加速器大厅和终端区域内安全联锁设施包括 19 个紧急按钮，10 个清场按钮及 3 个人员出入管理装置（人员出入管理箱为加速器大厅出入口前设置，终端前设置束流闸控制箱）和 3 个防护门，3 个区域确认按钮。加速器大厅出束前，必须满足大厅内所有急停按钮复位，清场搜索人员按照固定巡检路线按下所有清场按钮后退出加速器大厅，等加速器大厅通道门关闭后，归还人员出入管理箱上所有门禁卡，前往控制室按下区域确认按钮后，加速器运行人员（物理运行人员）方可开启离子源（ECR）出束。

终端区域的安全联锁设施包括急停按钮、清场按钮、防护门、区域确认按钮。终端出束的前提条件是加速器大厅首先建立联锁、满足供束条件，辐射工作人员进入终端区域确认急停按钮复位，巡检终端区域内无人员滞留后按下清场按钮，退出并关闭终端通道门，最后和控制室确认可以供束后，按下区域确认按钮，使联锁束流阻挡器离线，此时终端方可出束。

#### 4.1.4 场所辐射监测系统

测调中心内小型化重离子治疗装置的区域辐射监测系统主要负责工作场所的监测，由固定安装探测器、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，如图 4-22 所示。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；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（ $\gamma$ /中子）。

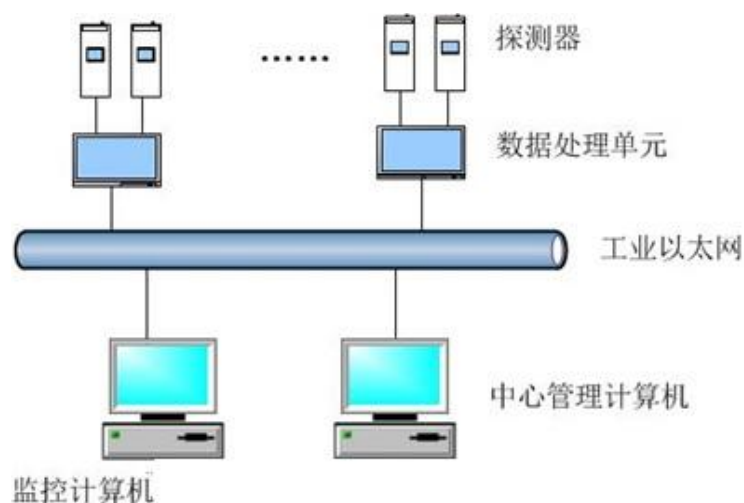


图 4-22 小型化重离子治疗装置场所辐射监测系统结构

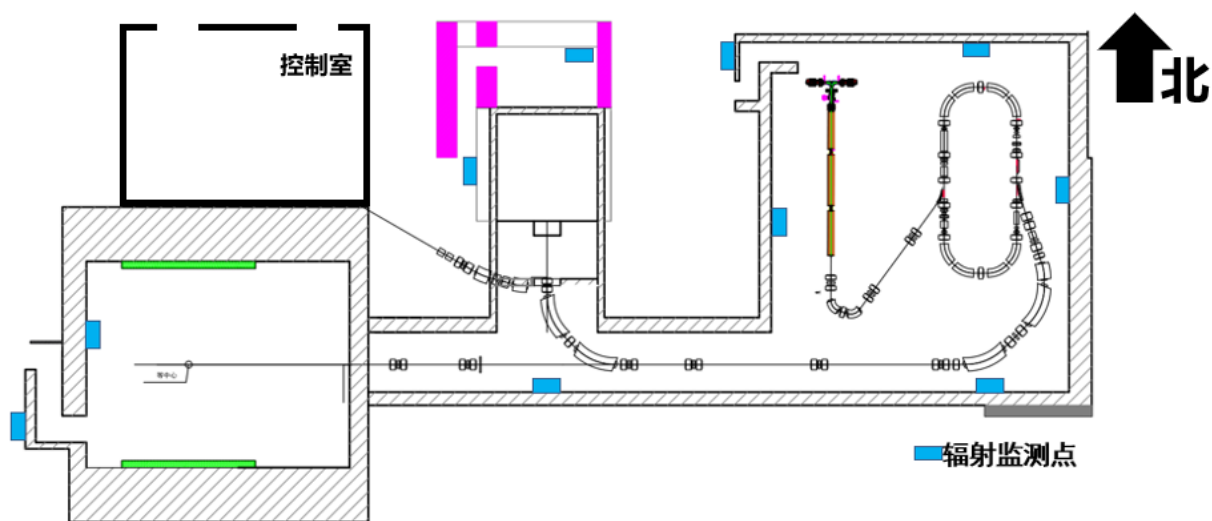


图 4-23 测调中心场所监测系统布置点位示意图

辐射监测点位如图 4-23 所示，每个监测点由一台 neutron 探测器和  $\gamma$  探测器组成。具体的点位设置如下：

- (1) 加速器大厅和束流输运系统区域共设置 5 个监测点位；
- (2) 两终端区域内各设置 1 个监测点位；
- (3) 加速器大厅与两终端防护门外各设置 1 个监测点位。

#### 4.1.4.1 探测器性能

##### 4.1.4.1.1 区域中子探测器

本项目测调中心内使用的区域中子探测器性能指标见下表：

表 4-3 区域中子探测器性能指标

| 序号 | 性能指标 | 参数                             |
|----|------|--------------------------------|
| 1  | 灵敏度  | 0.65cps/ $\mu$ Sv/h            |
| 2  | 测量范围 | 0.1~100000 $\mu$ Sv/h          |
| 3  | 能量响应 | 0.025eV~1GeV 符合 ICRP 推荐的能量响应曲线 |

#### 4.1.4.1.2 区域 $\gamma$ 探测器

本项目测调中心内使用的区域 $\gamma$ 探测器性能指标见下表：

表 4-4 区域 $\gamma$ 探测器性能指标

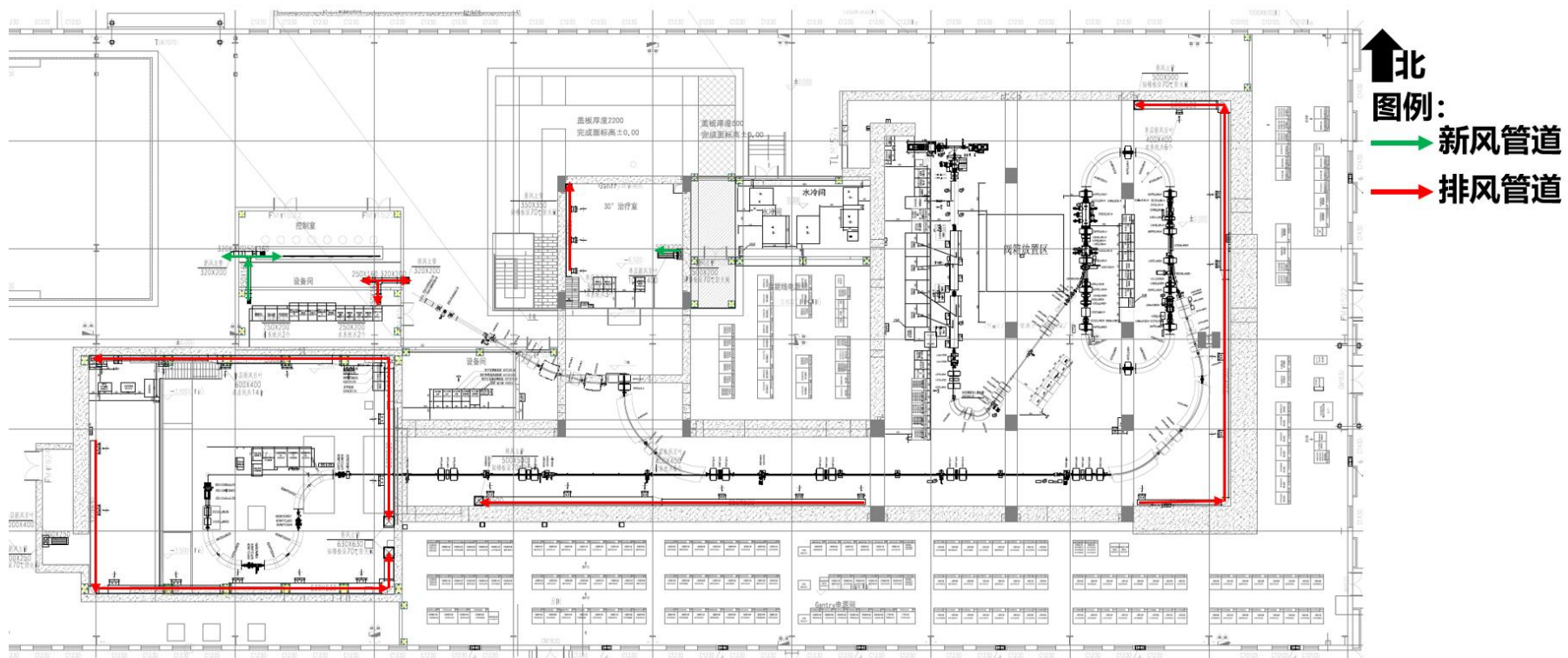
| 序号 | 性能指标 | 参数             |
|----|------|----------------|
| 1  | 灵敏度  | 好于每脉冲 0.150nSv |
| 2  | 测量范围 | 10nSv~10Sv/h   |
| 3  | 能量响应 | 80KeV~3MeV     |

#### 4.1.5 通风系统

测调中心屋面处设置多个排风口，排风口位置见图 4-25，小型化重离子治疗装置调试工作场所各区域内设置独立通风系统，新风为自然进风，采用上送下排，控制区内部为负压状态，排风管道通过排风口向上到达测调中心屋面，并通过排风机进行排放，排风高度为 12m。小型化重离子治疗装置正常运行时换气次数为 0.5 次/h，当停机时进行强排，换气次数为 5 次/h。加速器区域停机后需强制通风 5 分钟后，方可允许工作人员进入。

表 4-5 测调中心小型化治疗装置通风系统设计参数

| 序号 | 区域名称           | 体积, m <sup>3</sup> | 事故排风量, m <sup>3</sup> /h | 正常排风量, m <sup>3</sup> /h | 换气次数                        |
|----|----------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1  | 加速器大厅及束流输运隧道区域 | 2400               | 15000                    | 1200                     | 停机强排 5 次/h，<br>正常排风 0.5 次/h |
| 2  | 360°旋转束终端区域    | 7000               | 35000                    | 3500                     | 停机强排 5 次/h，<br>正常排风 0.5 次/h |
| 3  | 30°固定束终端       | 1000               | 5000                     | 500                      | 停机强排 5 次/h，<br>正常排风 0.5 次/h |



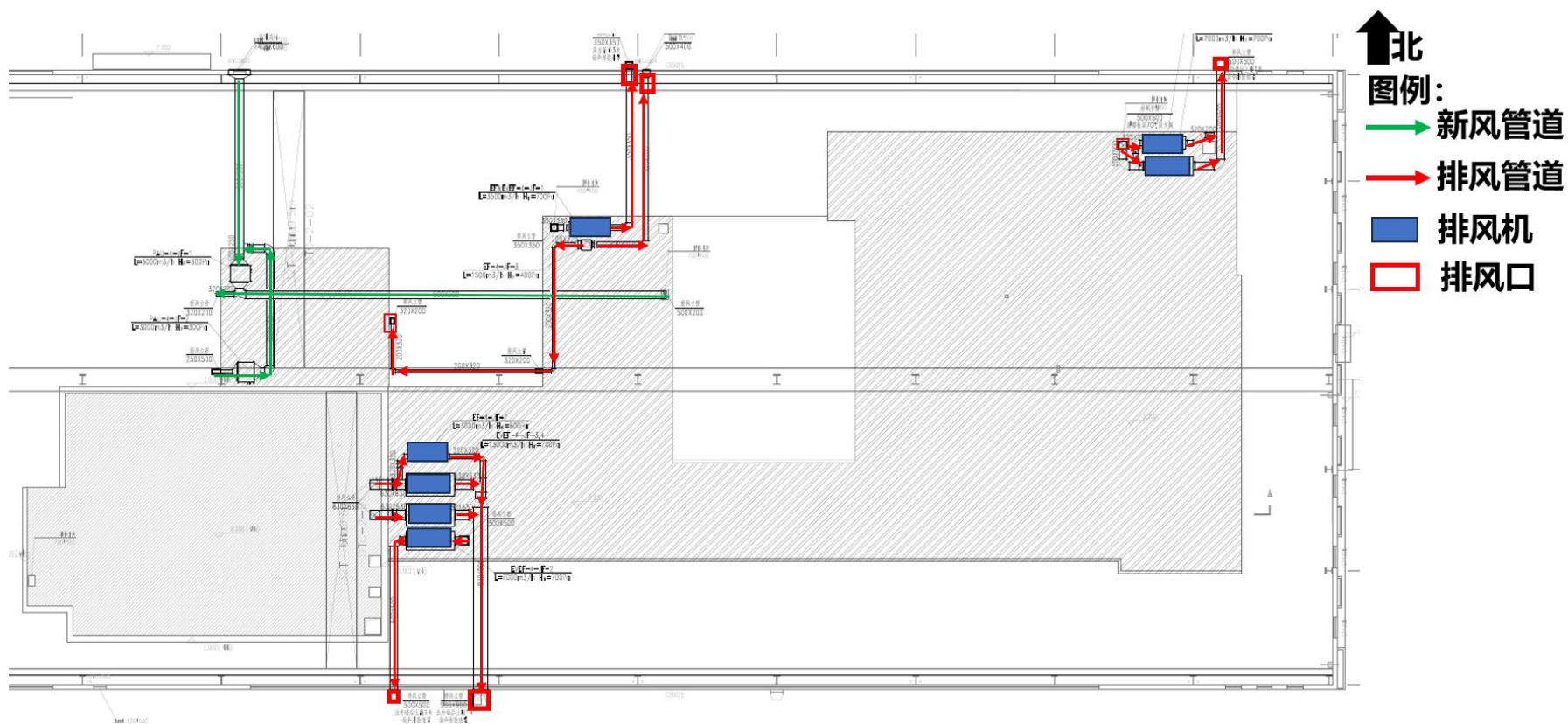


图 4-25 测调中心小型化重离子治疗装置屋面通风系统设计

## 4.1.6 放射性三废治理

### 4.1.6.1.1 放射性废气来源及处理措施

#### (1) 来源

根据第三章的分析，小型化重离子治疗装置运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为  $^{13}\text{N}$  ( $T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$ )、 $^{15}\text{O}$  ( $T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$ )、 $^{11}\text{C}$  ( $T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$ ) 和  $^{41}\text{Ar}$  ( $T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$ )，年排放量见表 3-22。

#### (2) 处理措施

小型化重离子治疗装置运行产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。小型化重离子治疗装置工作场所各区域均设有通风系统，装置运行过程中产生的感生放射性气体最终由测调中心两侧排风机排入环境。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，结合第五章的计算结果，其对环境的影响很小。

### 4.1.6.1.2 放射性废水来源及处理措施

小型化重离子治疗装置运行期间可能产生的放射性废液主要是活化的冷却水。冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于  $^{16}\text{O}$  散裂反应可能形成的放射性核素列于表 3-23。除  $^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}$  外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间可自行衰变至较低水平。排放前必须委托有资质单位取样分析，满足“1.4.1.3 节”所列中放射性废水排放标准后方可按一般废水排放。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修或发生冷却水泄漏事故的情况下才需要排放。加速器回路冷却水最大排放量约为  $3\text{m}^3$ ，具体排放方式和途径如下：

测调中心设置了 2 个冷却水暂存池，暂存池位置及收集方式如图 4-26 所示。分别位于测调中心东北和西南，单个尺寸为长  $2.0\text{m}$ ×宽  $1.0\text{m}$ ×高  $1.5\text{m}$ ，潜水泵一

用一备。池体采用钢筋混凝土建造，池底和池壁均做环氧防水防腐处理。

活化冷却水通过防倒流地漏、排水沟等进行收集，其收集管道采用无缝钢管，收集的活化冷却水按 0.1%坡度通过自流的方式汇入测调中心外冷却水暂存池。暂存池设置有水样采样口，随时可对水体进行采样测量，并在排放前取样检测。检测达标后排放，测调中心内设置单独的排水系统，用以收集这些区域事故排水和检修排水，与普通生活污水分隔开，最终于市政管网排放。

综上所述，小型化重离子治疗装置正常运行时不会产生放射性废水，检修或发生泄漏的情况下可能排放的冷却水中核素活度远低于其豁免水平。因此，放射性废液对环境的影响很小。

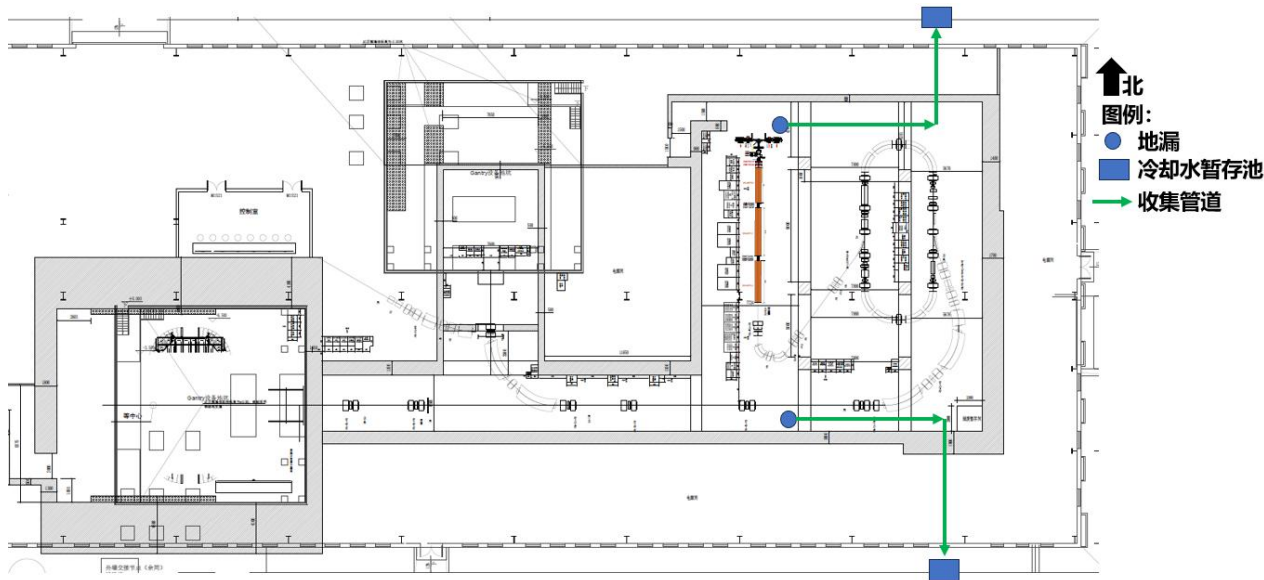


图 4-26 测调中心小型化重离子治疗装置暂存池位置及收集方式示意图

#### 4.1.6.1.3 放射性固体废物来源及处理措施

小型化重离子治疗装置运行期间可能产生的放射性固体废物主要有以下两类：

(1) 不再回收利用的活化部件及维修维护过程中被污染的劳保用品。参考同类设备运行经验，预计每年放射性固体废物产生量不会超过 2m<sup>3</sup>，见表 4-6。这些放射性固体废物的主要材料是铁和铜等，其主要的感生放射性核素及其半衰期列于表 4-7。装置停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是 <sup>64</sup>Cu、<sup>58</sup>Co、<sup>61</sup>Cu、<sup>51</sup>Cr、<sup>48</sup>V、<sup>7</sup>Be、<sup>54</sup>Mn 和 <sup>52</sup>Mn 等半衰期较长的核素。

(2) 冷却水系统更换下来的离子交换树脂，年产生量不超过 0.36m<sup>3</sup>。

表 4-6 重离子治疗装系统运行期间产生的放射性固体废物种类及年产生量

| 种类                         | 年产生量，m <sup>3</sup> |
|----------------------------|---------------------|
| 不再回收利用的活化部件过程中被污染的<br>劳保用品 | 2                   |
| 废离子交换树脂                    | 0.36                |
| 总计                         | 2.36                |

表 4-7 结构部件主要感生放射性核素及其半衰期

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

|  |                  |        |  |                  |         |
|--|------------------|--------|--|------------------|---------|
|  | <sup>47</sup> Sc | 3.43d  |  | <sup>62</sup> Cu | 9.80min |
|  | <sup>49</sup> Sc | 0.956h |  | <sup>64</sup> Cu | 12.82h  |
|  | <sup>48</sup> V  | 16.0d  |  | <sup>63</sup> Zn | 38.3min |
|  | <sup>51</sup> Cr | 27.8d  |  | <sup>65</sup> Zn | 244d    |

#### 4.1.6.1.3.1 处理措施

本项目在测调中心内加速器大厅的东南角设置了放射性固体废物暂存间（尺寸为 2000×2000×2000mm），位置如图 4-27 所示，用于存放小型化重离子治疗装置运行期间产生的活化结构部件。放射性固体废物暂存间是用铁栅栏围成的一个小房间，物理隔离有门有锁，出入库部件和废物均需进行记录台账，需要进行标识粘贴（电离辐射标识及房间标识）。因暂存间位于控制区内，因此不考虑屏蔽。特殊情况下有临时检修部件存放只需在测量检修部件表面剂量率后用警戒带拉出警戒区域。

当暂存间内废物暂存量接近容积的 2/3 时，由兰州泰基委托有资质单位进行检测分析：

清洁解控参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中 A2.1 的规定“任何时间段内在进行实践的场所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”执行。对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比之和小于 1 时，方可给予豁免。放射性固体废物经监测后低于豁免水平的方可作为一般固体废物处理。

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

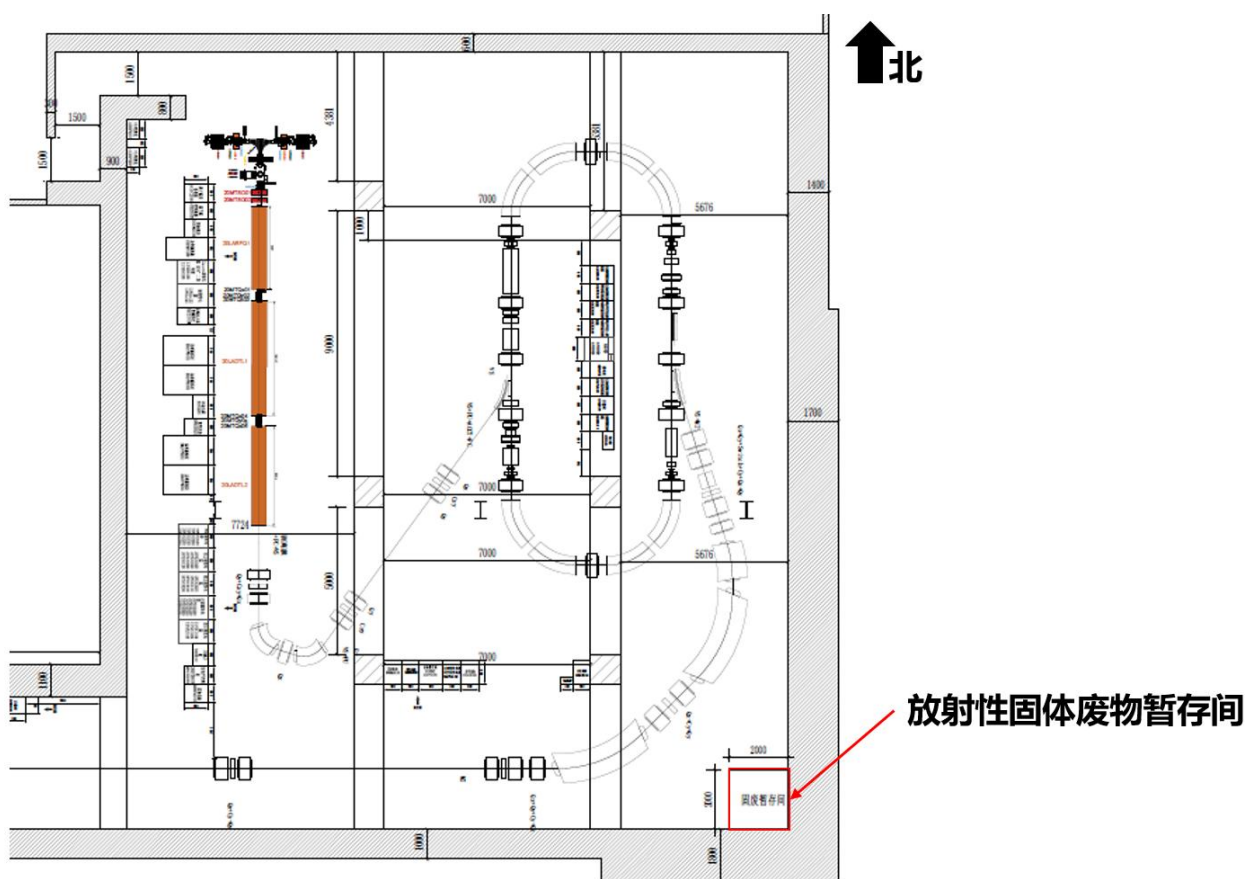


图 4-27 测调中心小型化重离子治疗装置放射性固废暂存间位置

## 4.2 用户单位

用户单位小型化重离子治疗装置的辐射安全与防护评价内容以建设单位的典型案例进行评价。

### 4.2.1 辐射工作场所分区

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

不同用户单位配置终端不同且布局不同，因此本次评价参照典型案例，对于本项目拟销售（含建造）的小型化重离子治疗装置，兰州泰基推荐的典型辐射工作场所分区如下：

（1）控制区：加速器大厅、束流输运系统、科研终端、治疗室；

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

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

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

4.2.2 辐射屏蔽

4.2.2.1 设计标准

4.2.2.1.1 剂量限值

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

（1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），  
20mSv。

（2）公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：  
年有效剂量，1mSv。

4.2.2.1.2 年剂量约束值

（1）辐射工作人员年剂量约束值

结合项目特点，本项目辐射工作人员的年剂量约束值不超过 5mSv/a。

（2）公众年剂量约束值

本项目的公众剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

4.2.2.1.3 屏蔽体外剂量率控制水平

本项目辐射工作场所屏蔽体外关注点处剂量率控制水平见错误!未找到引用  
源。。屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能，符合最优化要求。

表 4-8 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

| 工作场所 | 位置 | 剂量率控制水平 |
|------|----|---------|
|------|----|---------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                           |                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 小型化重离子治疗装置工作场所                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 居留因子 $T > 1/2$            | $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 居留因子 $T \leq 1/2$         | $\leq 10\mu\text{Sv/h}$  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 屏蔽体外土壤 1m 处 <sup>a)</sup> | $\leq 5\text{mSv/h}$     |
| 备注：a) 参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 $5\text{mSv/h}$ 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“ $5\text{mSv/h}$ ”作为各辐射工作场所底板与土壤交界处的剂量率控制水平。数据结果来自于 GB18871-2002 的豁免浓度推算。<br>b) 居留因子 $T > 1/2$ 剂量率控制水平分为两种情况，①小型化重离子治疗装置中控室、控制台及设备机房等辐射工作人员所在区域按照 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ 进行控制；②用户单位位于小型化重离子治疗装置周围的公众区域按照 $\leq 1\mu\text{Sv/h}$ 进行控制。 |                           |                          |

#### 4.2.2.2 屏蔽设计

典型案例小型化重离子治疗装置辐射工作场所辐射屏蔽设计如所示，其中：

加速器大厅、束流输运系统以及科研终端及治疗室墙体采用密度不低于  $2.35\text{g/cm}^3$  的混凝土作为主屏蔽；局部采用密度不低于  $7.8\text{g/cm}^3$  的铁作为屏蔽体。

表 4-9 典型案例小型化重离子治疗装置屏蔽设计

| 场所名称   | 位置   | 墙体屏蔽厚度和材料                                        |
|--------|------|--------------------------------------------------|
| 加速器大厅  | 地上一层 | 东墙<br>1.1m 混凝土<br>迷道内墙：0.7m 混凝土<br>迷道外墙：1.1m 混凝土 |
|        |      | 西墙<br>1.4m~2.8m 混凝土                              |
|        |      | 南墙<br>1m 混凝土（科研终端北墙）                             |
|        |      | 北墙<br>1.6m 混凝土                                   |
|        |      | 顶板<br>1m 混凝土                                     |
|        |      | 底板<br>1.5m 混凝土                                   |
| 束流传输系统 | 地上一层 | 东墙<br>0.6m 混凝土                                   |
|        |      | 西墙<br>1.4m 混凝土                                   |
|        |      | 南墙<br>2.2m 混凝土~4.7m 混凝土+0.9m 铁                   |
|        |      | 北墙<br>1.6m 混凝土                                   |
|        |      | 底板<br>1.5m 混凝土                                   |
|        | 地上二层 | 东墙<br>1.75 m 混凝土                                 |
|        |      | 西墙<br>1.4 m 混凝土                                  |
|        |      | 南墙<br>1.1 m 混凝土                                  |
|        |      | 北墙<br>0.6 m 混凝土                                  |
|        |      | 顶板<br>0.8m 混凝土                                   |
|        | 地上三层 | 东墙<br>1.4 m 混凝土                                  |
|        |      | 西墙<br>1.35 m 混凝土                                 |
|        |      | 南墙<br>1.1 m 混凝土                                  |

|       |      |    |                                 |
|-------|------|----|---------------------------------|
|       |      | 北墙 | 0.6 m 混凝土                       |
|       |      | 顶板 | 0.6m 混凝土                        |
|       |      | 底板 | 0.8m 混凝土                        |
| 科研终端  | 地上一层 | 东墙 | 迷道内墙：3.4m 混凝土<br>迷道外墙：3.05m 混凝土 |
|       |      | 西墙 | 0.6m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 1.9m 混凝土                        |
|       |      | 北墙 | 1m 混凝土                          |
|       |      | 顶板 | 0.5m 混凝土                        |
|       |      | 底板 | 1.5m 混凝土                        |
| 治疗室 1 | 地上一层 | 东墙 | 迷道内墙：3.4m 混凝土<br>迷道外墙：3.05m 混凝土 |
|       |      | 西墙 | 0.6m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 1.9m 混凝土                        |
|       |      | 北墙 | 1.9m 混凝土                        |
|       |      | 顶板 | 0.5m 混凝土                        |
|       |      | 底板 | 1.5m 混凝土                        |
| 治疗室 2 | 地上一层 | 东墙 | 迷道内墙：3.4m 混凝土<br>迷道外墙：3.05m 混凝土 |
|       |      | 西墙 | 0.6m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 1.9m 混凝土                        |
|       |      | 北墙 | 1m 混凝土                          |
|       |      | 顶板 | 0.5m 混凝土                        |
|       |      | 底板 | 1.5m 混凝土                        |
| 治疗室 3 | 地下一层 | 东墙 | 1.8m 混凝土                        |
|       |      | 西墙 | 0.6m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 3.2m 混凝土                        |
|       |      | 北墙 | 3.2m 混凝土                        |
|       |      | 底板 | 1.5m 混凝土                        |
|       | 地上一层 | 东墙 | 迷道内墙：1.8m 混凝土<br>迷道外墙：0.8m 混凝土  |
|       |      | 西墙 | 0.6m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 3.2m 混凝土+0.9m 铁                 |
|       |      | 北墙 | 1.3m 混凝土~3.2m 混凝土+0.9m 铁        |
|       | 地上二层 | 东墙 | 1.8m 混凝土                        |
|       |      | 西墙 | 1.4m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 3.2m 混凝土                        |
|       |      | 北墙 | 1.1m~4m 混凝土                     |
|       | 地上三层 | 东墙 | 1.8m 混凝土                        |
|       |      | 西墙 | 1.4m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 3.2m 混凝土                        |
|       |      | 北墙 | 1.1m~4m 混凝土                     |
|       |      | 顶板 | 3.6m 混凝土                        |
| 治疗室 4 | 地下一层 | 东墙 | 1.4m 混凝土                        |
|       |      | 西墙 | 0.6m 混凝土                        |
|       |      | 南墙 | 3.2m 混凝土                        |
|       |      | 北墙 | 4.7m 混凝土                        |

|  |      |    |                              |
|--|------|----|------------------------------|
|  |      | 底板 | 1.5m 混凝土                     |
|  | 地上一层 | 东墙 | 迷道内墙：1.5m 混凝土<br>迷道外墙：1m 混凝土 |
|  |      | 西墙 | 1.4m 混凝土                     |
|  |      | 南墙 | 2.2m 混凝土~ 4.7m 混凝土+0.9m 铁    |
|  |      | 北墙 | 3.2m 混凝土+0.9m 铁              |
|  | 地上二层 | 东墙 | 1.8m~2.3m 混凝土                |
|  |      | 西墙 | 1.4m 混凝土                     |
|  |      | 南墙 | 2.2m 混凝土                     |
|  |      | 北墙 | 3.2m 混凝土                     |
|  | 地上三层 | 东墙 | 1.4m~2.3m 混凝土                |
|  |      | 西墙 | 1.4m 混凝土                     |
|  |      | 南墙 | 2.2m 混凝土                     |
|  |      | 北墙 | 3.2m 混凝土                     |
|  |      | 顶板 | 3.6m 混凝土                     |

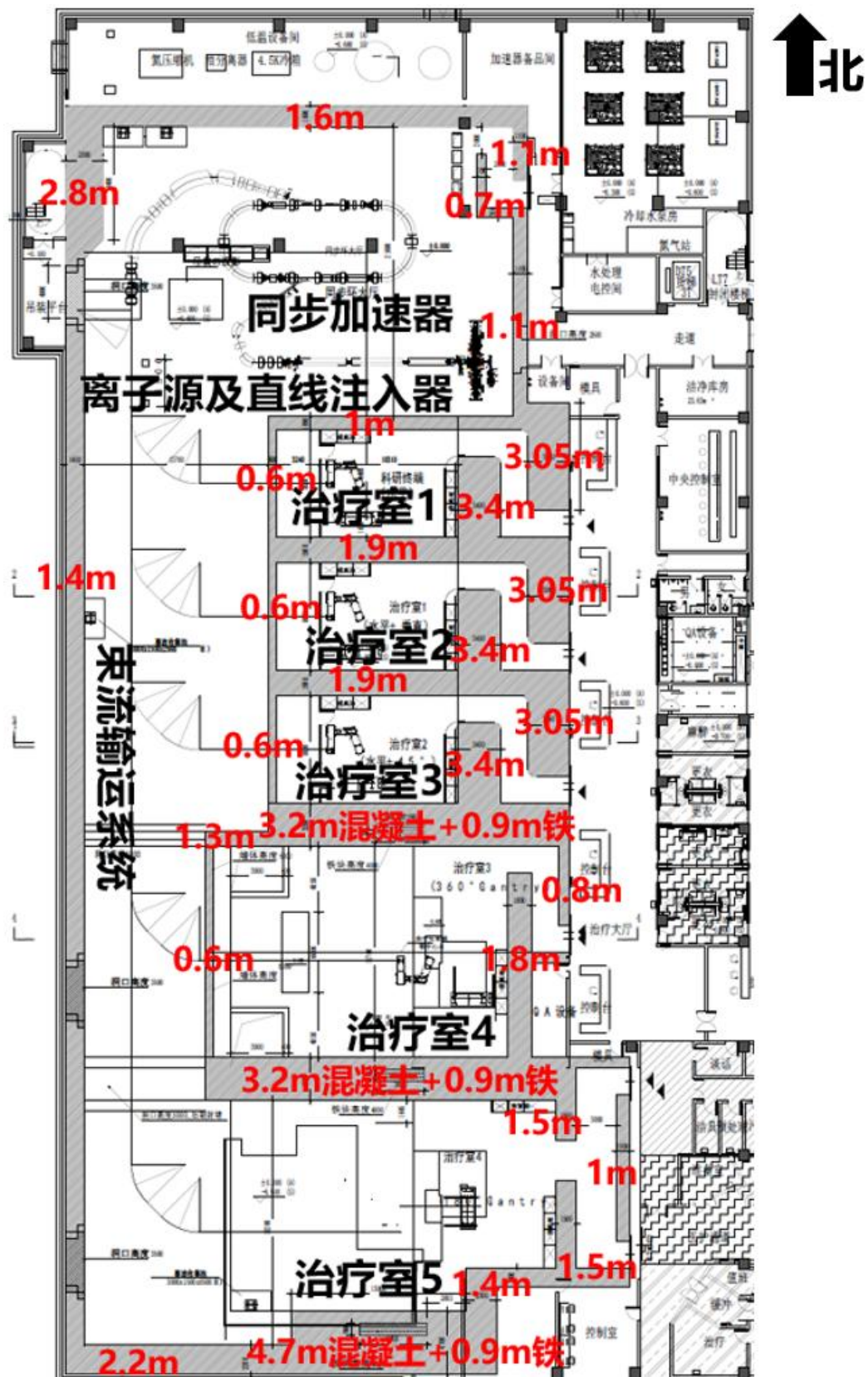


图 4-28 典型案例小型化重离子治疗装置屏蔽设计平面图（地上一层）

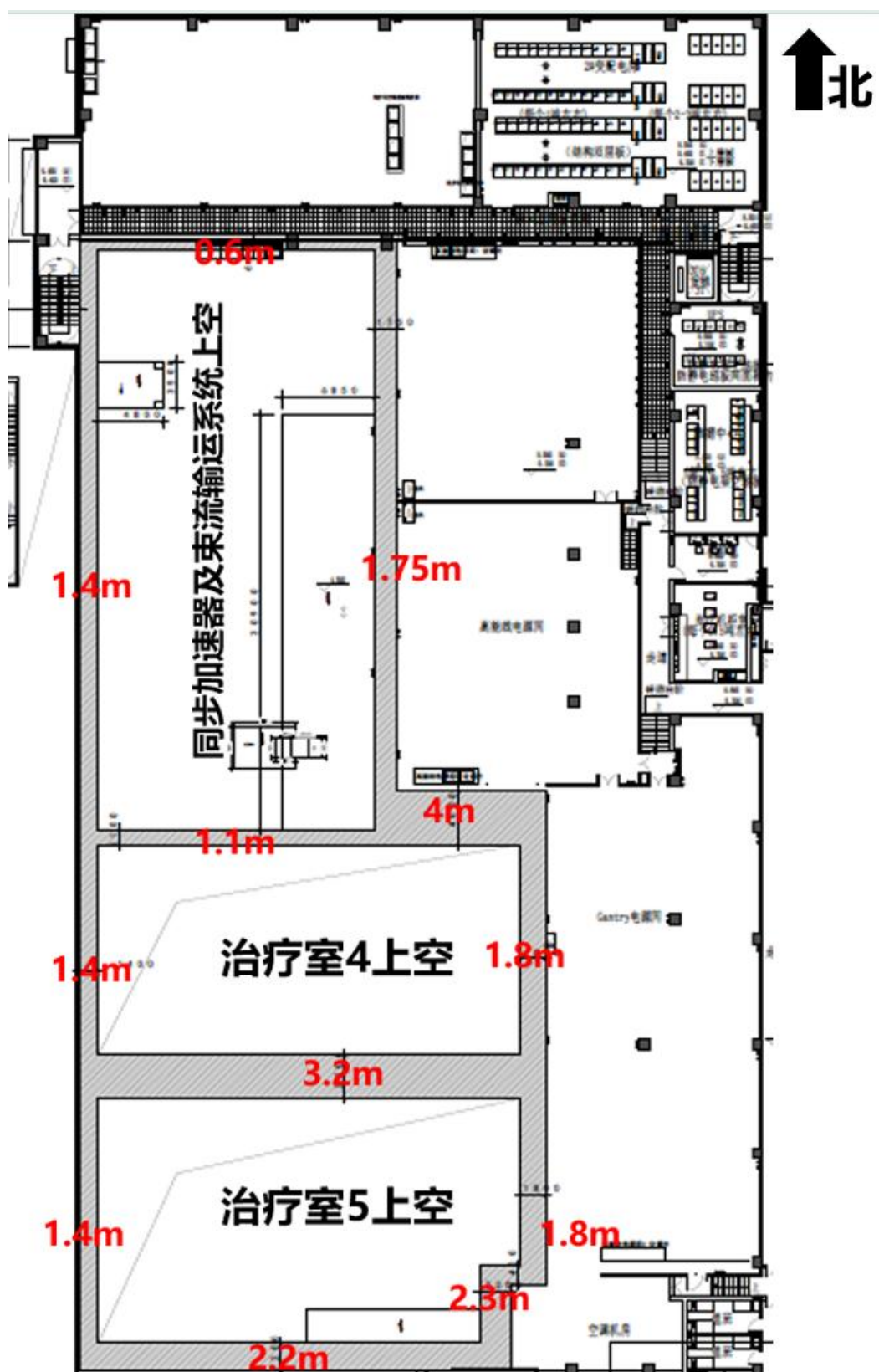


图 4-29 典型案例小型化重离子治疗装置屏蔽设计平面图（地上二层）

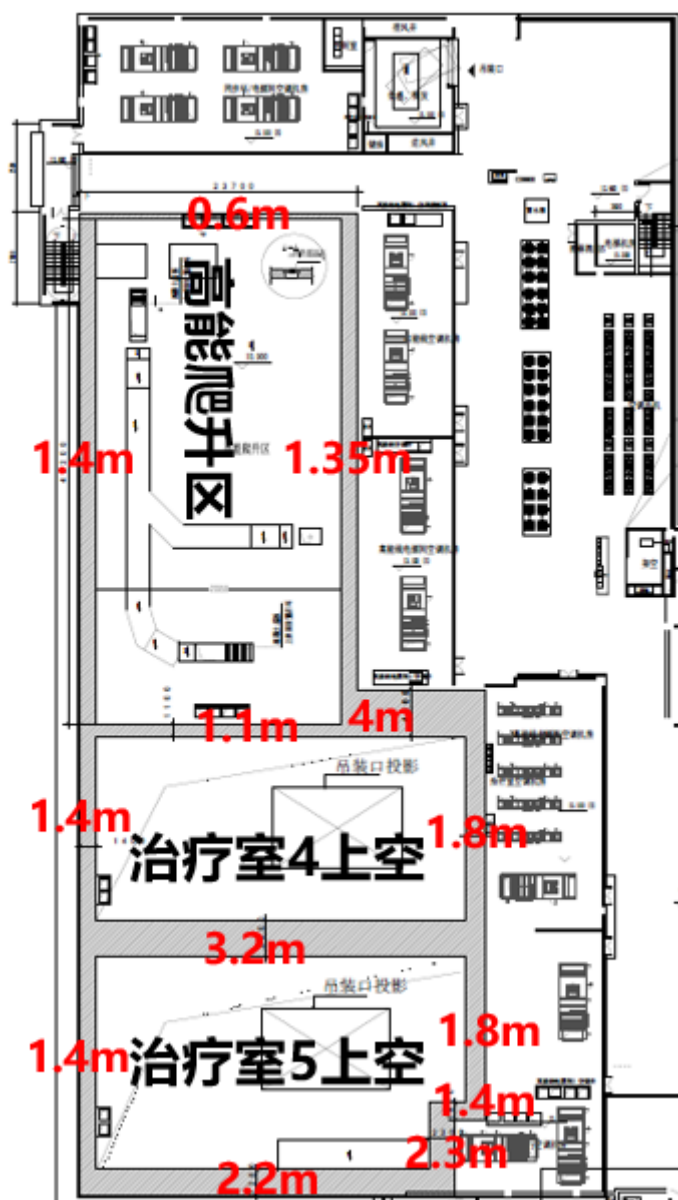


图 4-30 典型案例小型化重离子治疗装置屏蔽设计平面图 (地上三层)

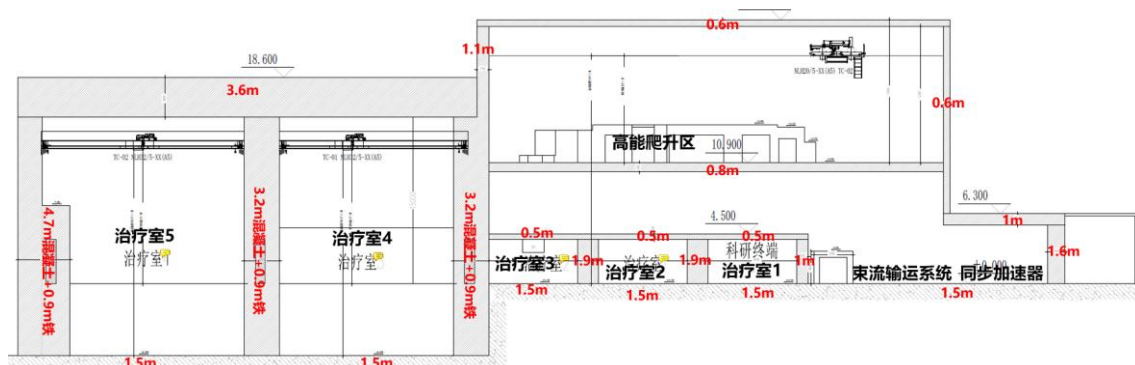


图 4-31 典型案例小型化重离子治疗装置屏蔽设计平面图（剖面）

#### 4.2.2.3 屏蔽体外剂量率结果

由于小型化重离子治疗装置会因为用户单位的不同而改变其终端数量，布局也会根据用户单位内小型化重离子治疗装置所在建筑的情况不同而不同。因此本次评价中将除控制区外的区域分为设备机房、控制室区及医护、公众区作为典型的区域分配，其中设备机房、控制室区的剂量率保守控制 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ，除上述区域外其余区域为医护、公众区，其剂量率保守控制 $\leq 1\mu\text{Sv/h}$ 。而控制区内相邻科研终端及治疗室、加速器大厅内部则 $\leq 10\mu\text{Sv/h}$  进行控制。以典型案例为例，其区域分配如所示。

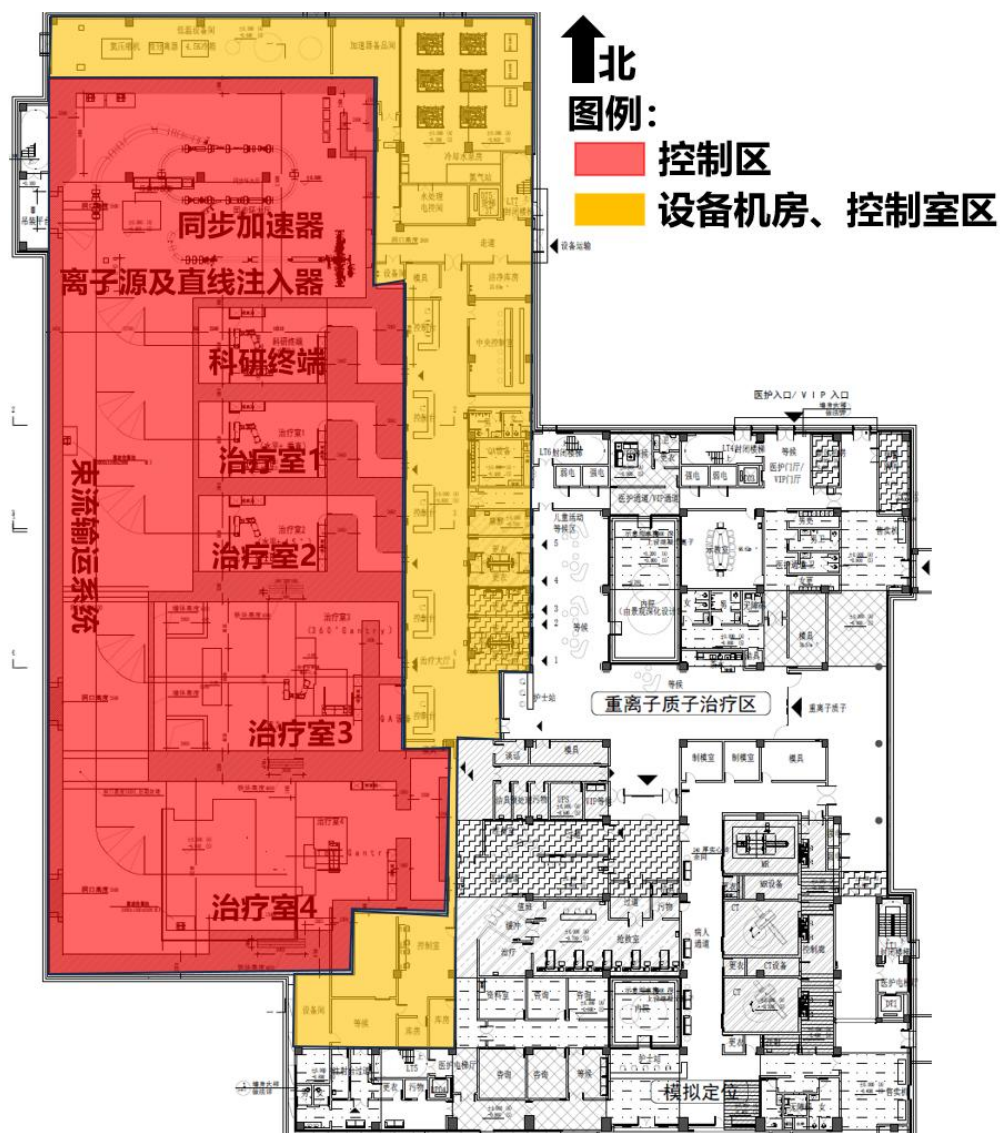


图 4-32 典型案例区域分配示意图

### 4.2.3 安全联锁系统

以下人身安全联锁系统的说明均来自典型案例，并以此进行评价。

#### 4.2.3.1 设计原则

（1）分区联锁：根据重离子治疗装置运行模式，利用实体屏蔽及“束流闸（包括束流阻挡器和法拉第筒）”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，可以允许人员在下流无束流区域进入工作；利用“束流闸”保证束流不会被送到有人区域。

（2）实现辐射区防护门与区域内辐射剂量的双重联锁，即某一区域有束流时，工作人员不能进入该区域；而在某一区域有人时，束流不能被送到相应区域。此外，辐射监测信号也将作为安全联锁信号，当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失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。

#### 4.2.3.2 系统组成

典型案例小型化重离子治疗装置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 4-33。

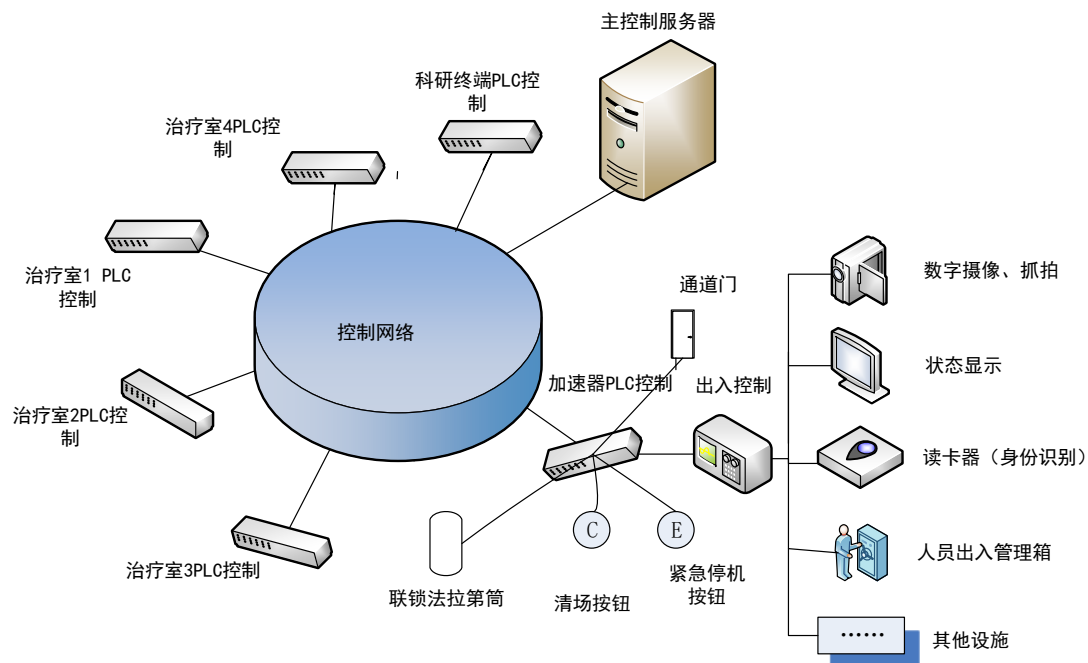


图 4-33 典型案例小型化重离子治疗装置人身安全联锁系统设施示意图

#### 4.2.3.2.1 联锁分区

小型化重离子治疗装置装置的运行模式分为以下几种：

- （1）加速器区域调试；
- （2）各科研终端或治疗室进行实验或治疗。

根据上述模式，典型案例小型化重离子治疗装置的辐射分区如图 4-34 所示。

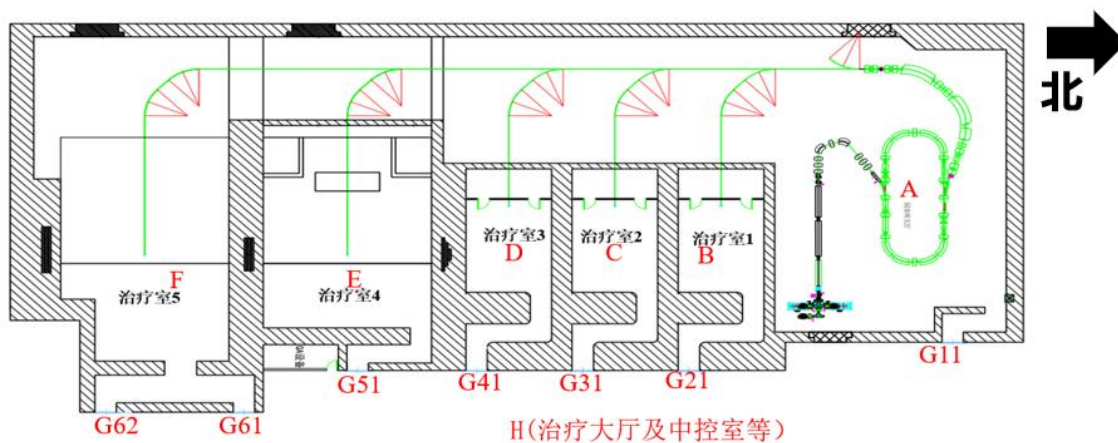


图 4-34 典型案例小型化重离子治疗装置辐射区分图

- （1）控制区：加速器大厅 A、五个治疗室（B-F）；

(2) 监督区：治疗大厅及中控室等（H）；

(3) 门的划分及人员控制：根据小型化重离子治疗装置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 6 个控制区的人员出入口（G11-G62），加入联锁系统并控制人员出入情况。

#### 4.2.3.2.2 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。

#### 4.2.3.2.3 PLC 逻辑控制

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将束流闸、通道门（防护门）、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 4-35 为小型化重离子治疗装置人身安全联锁系统的主要联锁逻辑。

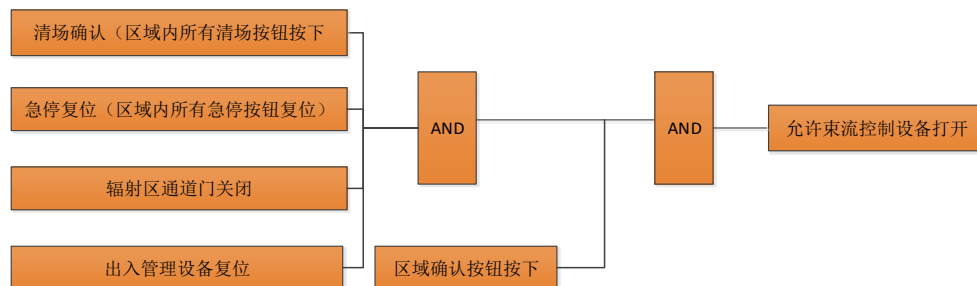


图 4-35 人身安全联锁系统主要联锁逻辑

#### 4.2.3.2.4 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（ $2.5\mu\text{Sv/h}$ ）的区域；二是在科研终端或治疗室区域如果突然发生误照，有较大剂量（ $2.5\mu\text{Sv/h}$ ），能迅速降下束流闸切断束流。

个人剂量联锁可以保障受照剂量超过年剂量限值（ $5\text{mSv}$ ）的工作人员不能进入控制区。

#### 4.2.3.2.5 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。

控制区入口设自动记录进、出该区域的人数装置，当该区域内有人时无法开机。

#### **4.2.3.2.6 门机联锁**

典型案例小型化重离子治疗装置加速器大厅、科研终端及治疗室迷道口防护门以及其内部各通道门都设有位置开关。门开关状态在中控室中实时显示。上述各门处于打开状态时，小型化重离子治疗质子无法供束。小型化重离子治疗装置出束期间打开各门，则会触发安全联锁系统，切断该区域束流。

典型案例小型化重离子治疗装置上述防护门及通道门都设有红外防夹功能，并且为预防紧急情况下无法开门，在迷道口防护门内侧设置了紧急开门按钮，按下后可无条件开门。

#### **4.2.3.2.7 “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、科研终端及治疗室中。加速器大厅清场按钮主要功能是为在实现加速器开机准备前的清场功能，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。若在加速器开机之后仍有工作人员在大厅内，可按下大厅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按下“清场”确认按钮后可重新进行开机操作。科研终端及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，同时会有语音提示，科研终端及治疗室内没有声光报警灯。若有人员滞留治疗室，可按下治疗室内设置的紧急停机按钮切断治疗室束流，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。典型案例小型化重离子治疗装置共设置 24 个急停清场盒，其位置分布图以及清场搜索路线示意图如图 4-36~图 4-41 所示。

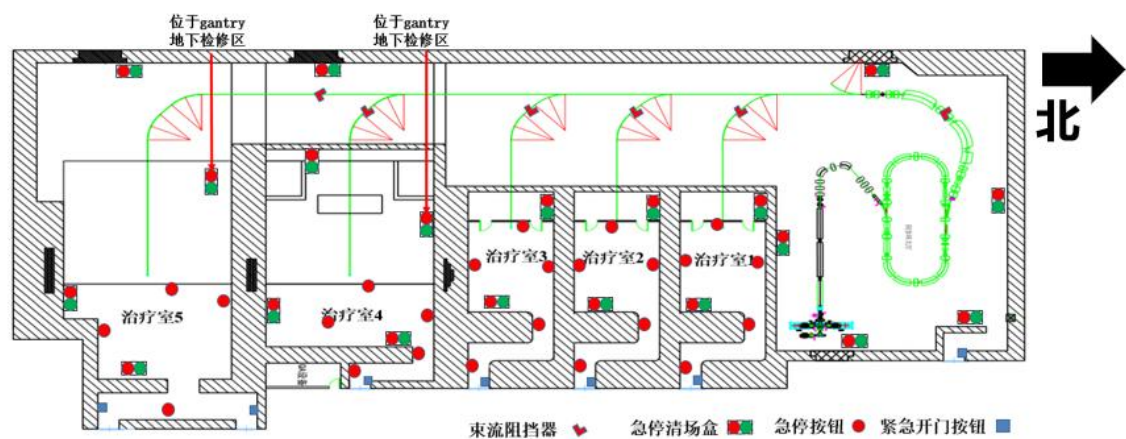


图 4-36 典型案例急停清场盒、急停按钮、紧急开门按钮及束流阻挡器位置分布图（地上一层）

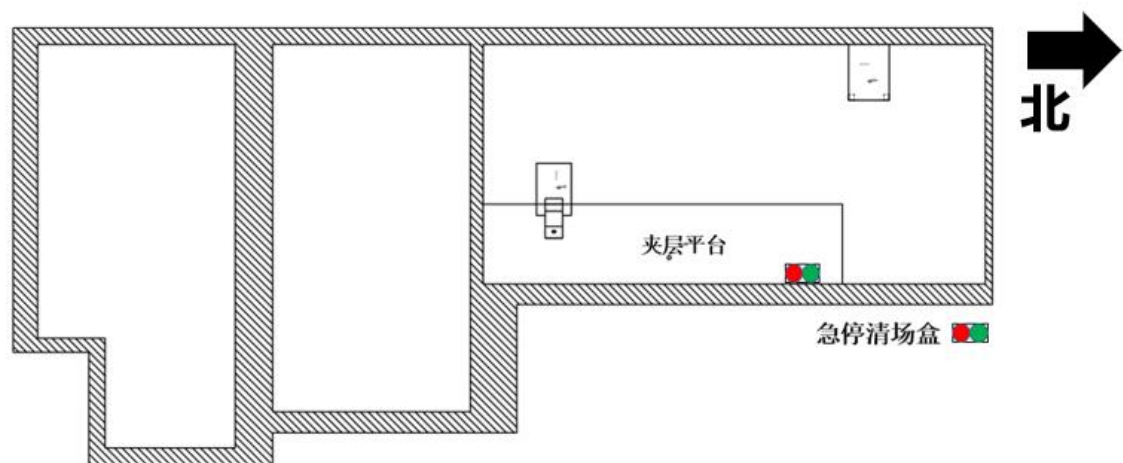


图 4-37 典型案例急停清场盒位置分布图（地上二层）

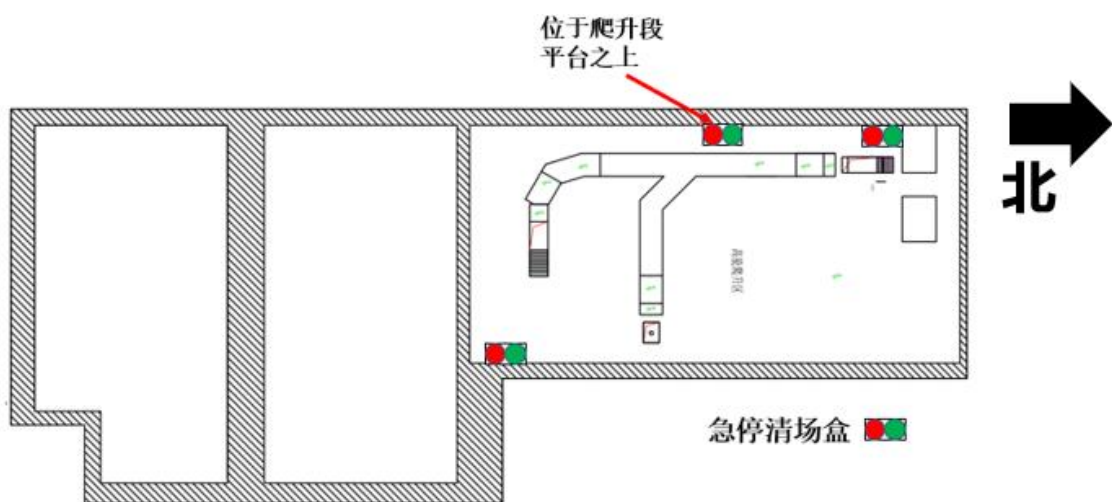


图 4-38 典型案例急停清场盒位置分布图（地上三层）

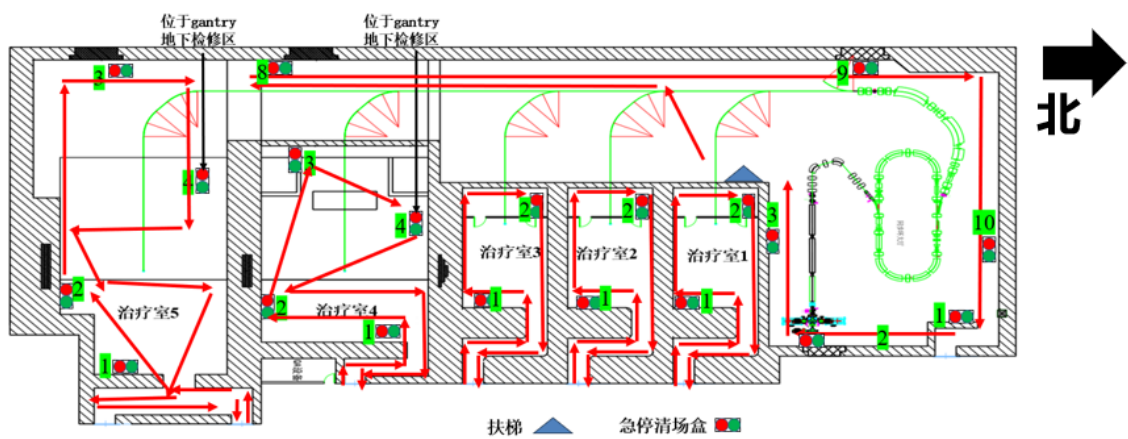


图 4-39 典型案例清场搜索路线示意图（地上一层）

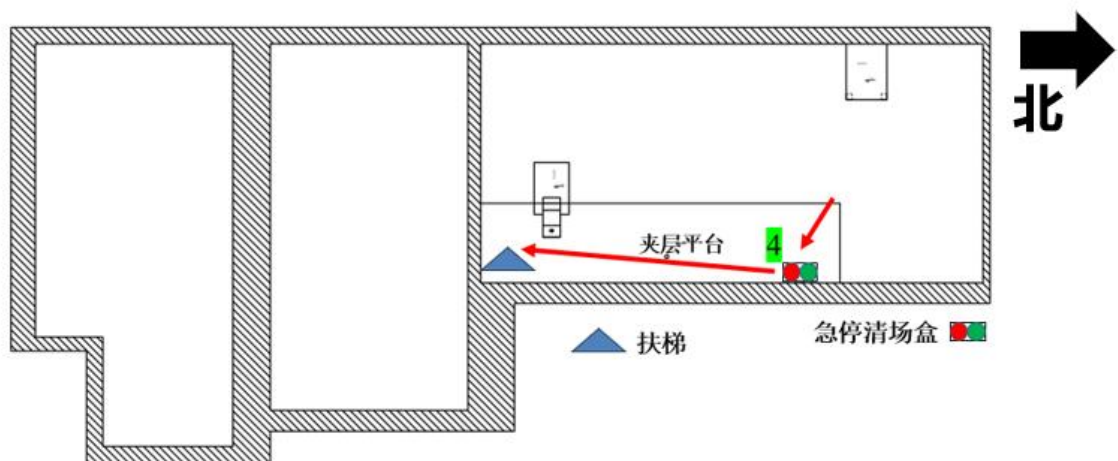


图 4-40 典型案例清场搜索路线示意图（地上二层）

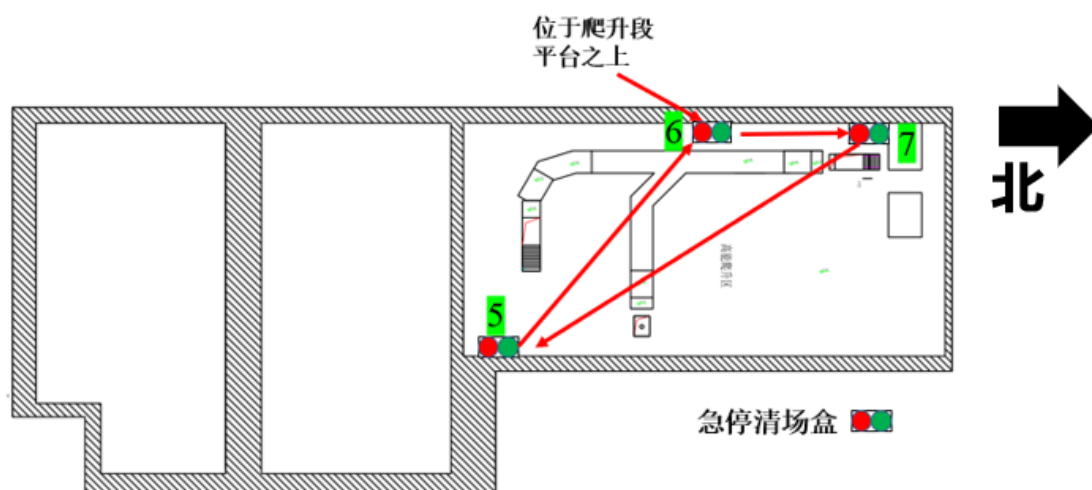
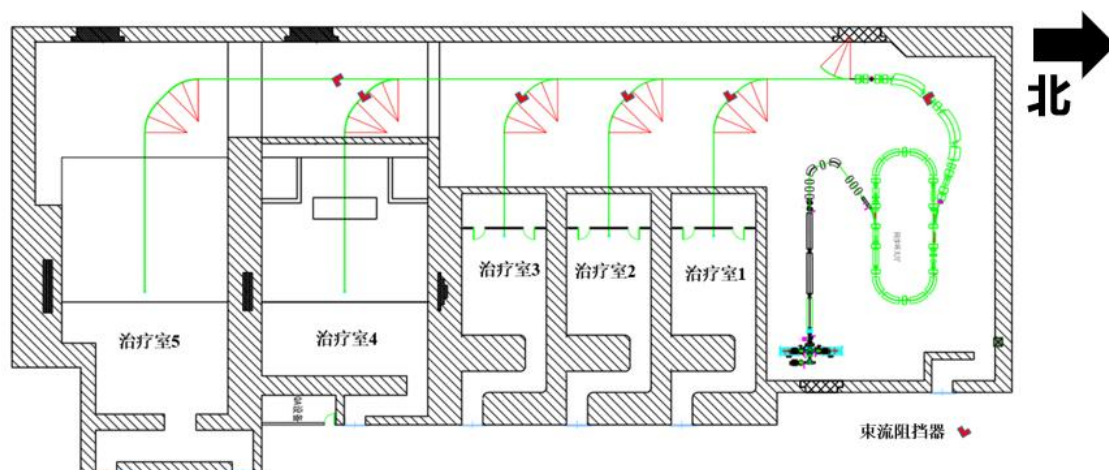


图 4-41 典型案例清场搜索路线示意图（地上三层）

#### 4.2.3.2.8 束流阻挡器

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阻挡器（材质为铜），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。束流阻挡器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。典型案例小型化重离子治疗装置共需束流阻挡器 8 个，其位置分布如图 4-42 所示。



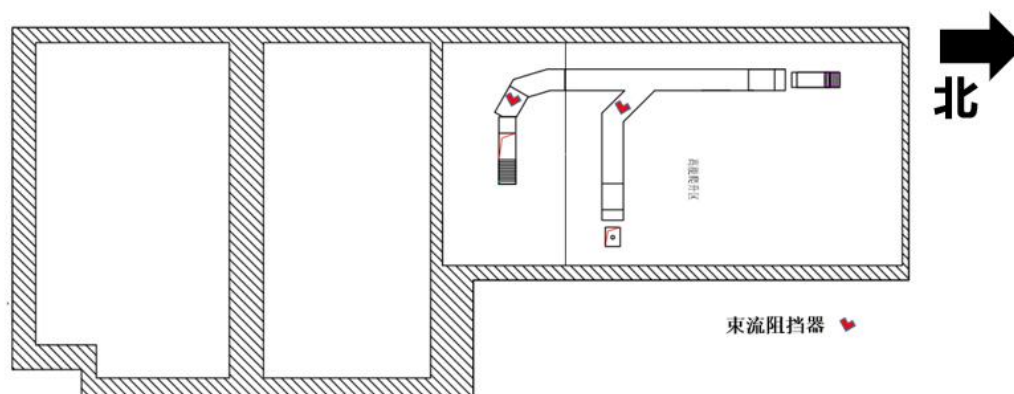


图 4-42 典型案例小型化重离子治疗装置束流阻挡器位置图

#### 4.2.3.2.9 其他安全措施

(1) 警报装置由辐射标志牌、运行状态显示屏、广播等组成。各控制区防护门上均有电离辐射警告标志，加速器大厅入口处及各科研终端及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，以及各处的剂量水平等。

(2) 加速器大厅、高能线爬升段区、各科研终端及治疗室内、科研终端及治疗室门外关键位置安装辐射剂量探头，在科研终端及治疗室入口处、控制室内安装带剂量显示的屏幕，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。

(3) 利用摄像头监控辐射区内人员滞留状况，观察各种设备运行状态，可以设计人员计数系统，对进入辐射区的人员进行记录。

#### 4.2.3.3 安全联锁系统的工作流程

图 4-43 给出了典型案例小型化重离子治疗装置安全联锁系统工作流程图。图中“主卡”即主管人员在人员出入管理箱刷过主卡后，其余工作人员才可在人员出入管理箱进行个人授权卡（“普通卡”）刷卡或刷个人剂量计开门；“普通卡”即个

人授权卡；“中控室区域总钥匙”为中控室内加速器大厅最终联锁确认的按钮

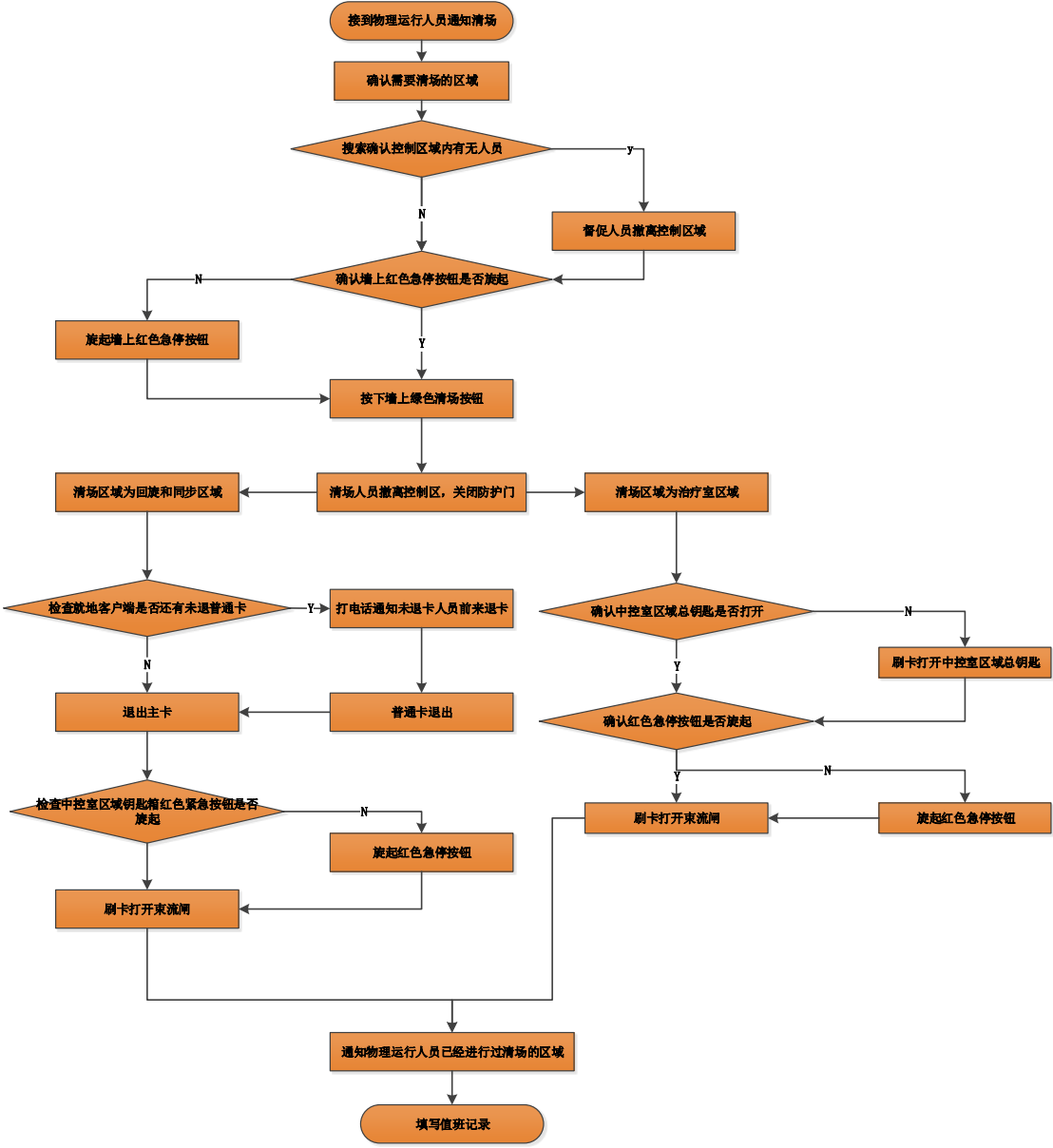


图 4-43 典型案例小型化重离子治疗装置安全联锁系统工作流程

4.2.3.4 典型案例加速器大厅及治疗室出束条件及切断条件

典型案例加速器大厅出束的联锁条件包括 10 个紧急按钮，10 个清场按钮及 1 个人员出入管理箱和 1 个防护门，1 个区域总钥匙确认按钮。加速器大厅出束前，必须满足大厅内所有急停按钮复位，巡检人员按照固定巡检路线按下所有清场按钮后退出加速器大厅，等加速器大厅防护门关闭后，归还人员出入管理箱上所有门禁卡，前往中控室在区域总钥匙箱上刷卡授权按下加速器大厅按钮后，加速器调试人员（物理人员）方可进行开启离子源（ECR）。出束后，除加速器调试人员主动切断束流外，人员也可通过破坏联锁条件切断束流。

- a) 中控室：刷卡按下加速器大厅按钮或按下区域总钥匙箱急停按钮。
- b) 加速器大厅：若有人员滞留加速器大厅，可通过按下加速器大厅内任意一个急停按钮或从加速器大厅内部开启防护门。

典型案例加速器大厅出束联锁逻辑图如图 4-44 所示：

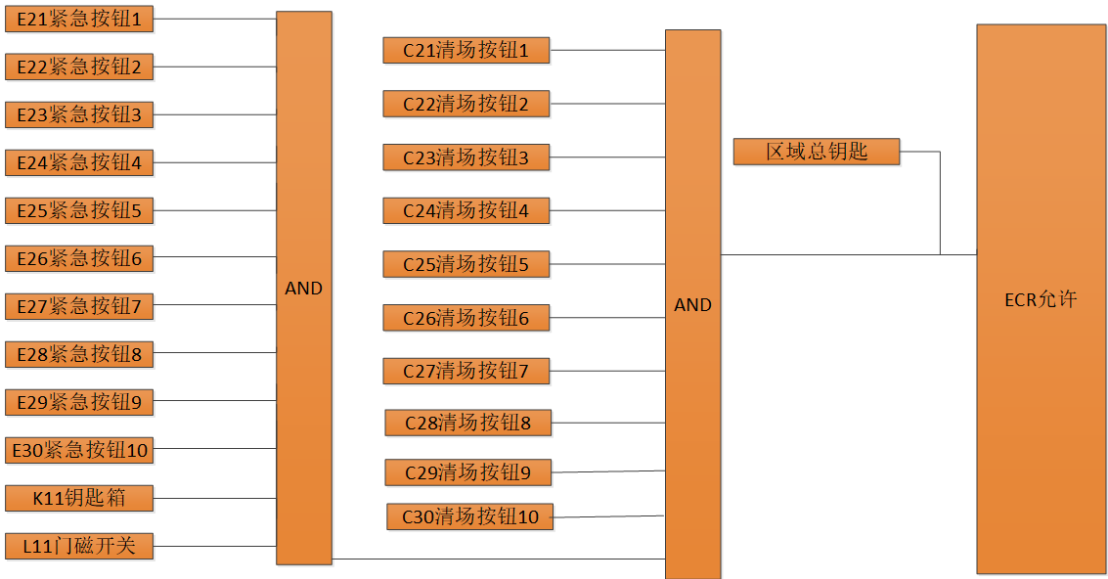


图 4-44 典型案例加速器大厅出束联锁逻辑图

科研终端及治疗室出束的联锁条件包括急停按钮、清场按钮、门磁开关、中控室区域总钥匙及医生控制台确认按钮。治疗室出束的前提条件是加速器大厅首先满足供束条件，然后当医护进入科研终端及治疗室确认急停按钮复位后，巡检科研终端及治疗室内无人员滞留后按下清场按钮，退出机房，关闭科研终端及治疗室防护门，最后和中控室确认此治疗室能否供束。若可以供束，则通知中控室

调试人员在区域总钥匙箱刷卡授权对应治疗室允许按钮，医护人员方可在医生控制台刷卡按下允许出束按钮，使联锁束流阻挡器离线，此时科研终端及治疗室方可出束。科研终端及治疗室出束联锁逻辑图如图 4-45 所示：

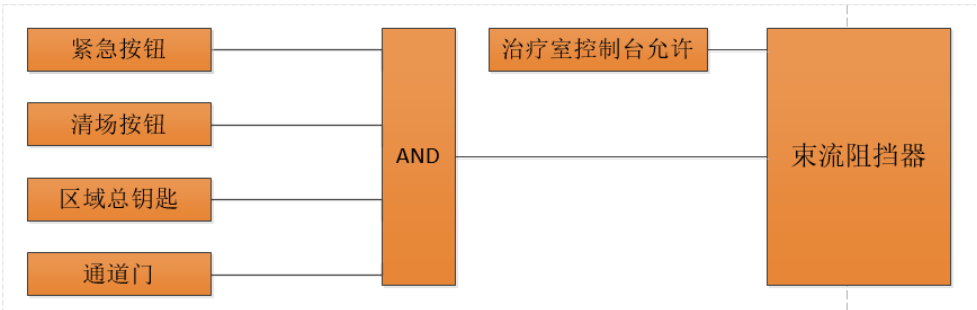


图 4-45 科研终端治疗室出束联锁逻辑图

#### 4.2.4 辐射监测系统

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

场所辐射监测系统的系统结构如图 4-46 所示，系统由探测器、数据采集单元、内部局域网、监控计算机与数据库组成：

- 1) 探测器用于测量场所的中子、 $\gamma$  剂量率；
- 2) 数据采集单元用于采集探测器的输出信号和完成信号的加权处理、剂量率显示、本地报警及通讯；
- 3) 内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；
- 4) 监控计算机用于完成监测数据的日常分析与管理，监管探测器的工作状态；
- 5) 数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据, 包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型( $\gamma$ /中子)。

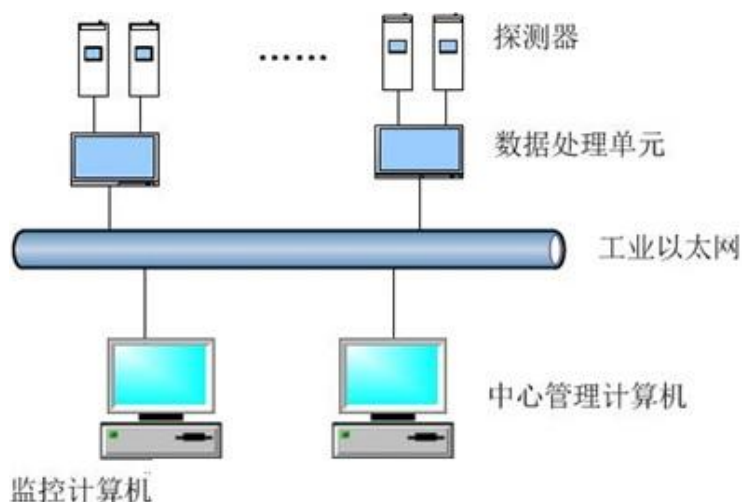


图 4-46 典型案例小型化重离子治疗装置场所辐射监测系统结构

场所辐射监测系统一般安装在加速器大厅（包含束流输运系统）区域及入口处、各控制室、科研终端及治疗室迷道内和入口处，每个监测点一般由一台中子探测器和一台  $\gamma$  探测器组成。根据各监测点剂量水平和中子能量选择不同灵敏度的辐射探测器。主要功能是确定参考点的辐射水平，测定加速器的工作场所和周围环境中的辐射水平，保证安装调试及运行维护期间工作人员和公众的安全，验证屏蔽措施的可靠性，防止辐射泄漏造成环境污染。

不同区域的中子、 $\gamma$  辐射探测器推荐性能指标如下：

#### （1）区域中子探测器

本项目推荐采用中子探测器的性能指标应当满足以下条件：

- （1）中子探测器的能量响应为  $0.025\text{eV} \sim 1\text{GeV}$ ；
- （2）剂量率范围  $0.1 \sim 100000\mu\text{Sv/h}$ ；
- （3）探测器具备良好的可靠性，包括环境适应性、抗电磁干扰能力等；
- （4）包括可设置报警阈值的声光报警部件，在超过阈值时发出警报信号；

（5）包括可远程监控的主机，通过以太网组网，在监控计算机上可管理和展示所有探测器数据。

## (2) 区域 $\gamma$ 探测器:

本项目推荐采用  $\gamma$  探测器的性能指标应当满足以下条件:

- (1) 探测器对  $\gamma$  射线响应的能量范围不低于 80KeV $\sim$ 3MeV;
- (2) 剂量率范围 10nSv $\sim$ 10Sv/h;
- (3) 探测器具备良好的可靠性, 包括环境适应性、抗电磁干扰能力等;
- (4) 包括可设置报警阈值的声光报警部件, 在超过阈值时发出警报信号;
- (5) 包括可远程监控的主机, 通过以太网组网, 在监控计算机上可管理和展示所有探测器数据。

典型案例小型化重离子治疗装置区域辐射监测点示意图如图 4-47 所示。

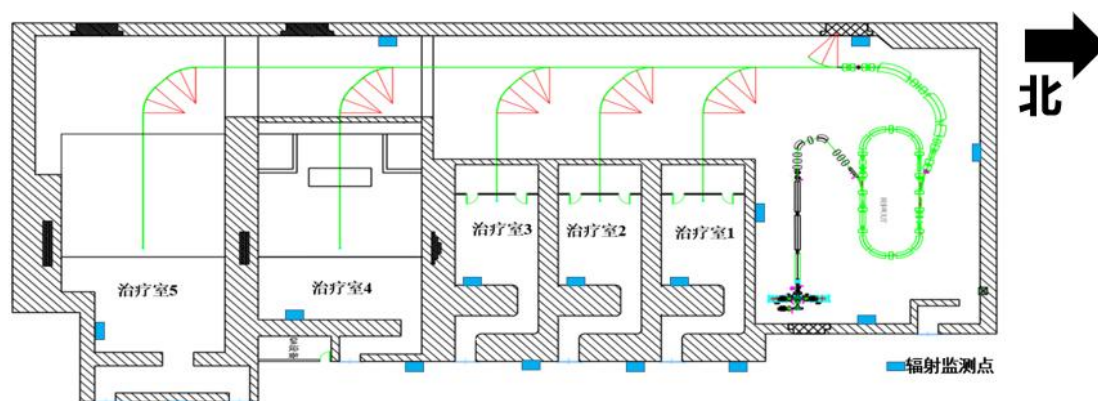


图 4-47 典型案例小型化重离子治疗装置区域辐射监测点示意图

## 4.2.5 通风系统

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021) 和《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020) 的要求, 兰州泰基推荐给用户单位的小型化重离子治疗装置系统通风系统设计方案:

科研终端及治疗室内应设置强制排风系统, 采用全排全送的通风方式, 换气次数不少于 4 次/h, 进风口应设置放射治疗室的上部, 排风口应设置在放射治疗

室的下部，进风口与排风口的位置应对角设置，以确保室内的空气完全交换，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。

小型化重离子治疗装置停机后，加速器大厅应加强通风排气，采取措施使人员延时进入，以降低活化空气的感生放射性水平，减少人员受照剂量。

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

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

#### 4.2.6 工作人员剂量控制措施

束束调试或运行维护期间确认辐射安全与防护设施功能正常。调试前期尽量使用单束团、小流强，待束流物理参数达到预期后再逐步增大流强直至达到预定值。

进入加速器大厅前通风系统会进行 5min 强制通风方可允许辐射工作人员进入。对于较高活化水平的部位，采用便携式监测仪器进行监测后并挂警示标牌（警示工作人员无工作需求时尽量远离）。需要进入控制区内部工作，由辐射防护人员对区域辐射水平进行监测，重点关注束流损失较大位置处的辐射水平，并根据监测结果结合工作人员个人剂量测量值制定工作计划、提出辐射防护措施，由兰州泰基现场负责人批准后方可进入工作。

在后续的实际工作中，将要求工作人员在各项目工作时随身佩戴其唯一的个人剂量计，保证监测的年累积剂量是该人员在所有项目中所受剂量的总和。对于潜在超过剂量控制目标值的辐射工作人员不允许其进入控制区工作。同时，兰州泰基在本项目每个用户单位现场，均会配置电子直读式个人剂量报警仪，监测结果也可供参考。

同时在束流调试、运行维护期间除依托固定式监测仪表实时监测外，还会定期对环境敏感点巡测。在放射性固体废物每次拆卸或收贮前，监测其表面剂量率

水平。

## 4.2.7 放射性三废治理

下文的放射性三废治理仅针对用户单位出束调试以及运行维护环节，以典型案例为例。过程中产生的三废由用户单位负责处理，具体措施在用户项目中进行评价。

### 4.2.7.1 放射性废气

#### (1) 废气来源

根据第三章的分析，小型化重离子治疗装置运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为  $^{13}\text{N}$  ( $T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$ )、 $^{15}\text{O}$  ( $T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$ )、 $^{11}\text{C}$  ( $T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$ ) 和  $^{41}\text{Ar}$  ( $T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$ )。各放射性核素的活度浓度参见表 3-20。

#### (2) 废气处理措施

安装调试及运行维护期间产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。加速器大厅、束流输运系统、科研终端及各治疗室内均设有通风系统，装置运行过程中产生的感生放射性气体经通风系统最终引至建筑物屋面高空排入环境，考虑到其排入大气后的扩散和稀释，其对环境和公众的影响是可以接受的。

### 4.2.7.2 放射性废液及处理措施

小型化重离子治疗装置可能产生的放射性废液主要是活化的冷却水。冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于  $^{16}\text{O}$  散裂反应可能形成的放射性核素除  $^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}$  外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间可自行衰变至较低水平。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修或发生冷却水泄漏事故的情况下才需要排放。涉及活化的冷却水主要用于加速器回路使用冷

却水。最大排放量 3m<sup>3</sup>。

根据用户单位布局在场所内合适位置设置废水暂存间，房间内设有废水暂存池，总容积不低于 3m<sup>3</sup>。活化冷却水通过管道与机房的地漏相连且标高低于机房地板标高，机房设自流坡度确保冷却水能够自流并通过机房内地漏排入暂存水池内暂存或通过潜污泵将冷却水提升至暂存间的暂存池。一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水，污水收集至暂存池存放。根据上文的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员和环境造成辐射影响。

暂存水池上设有取样口，活化的冷却水在排放前由用户单位负责委托有资质单位进行取样测量，满足放射性废水排放标准，方可排放。取样检测结果不满足标准要求时，用户单位将委托有资质单位进行处置。

**4.2.7.3 放射性固体废物及其处理措施**

重离子治疗装置运行期间可能产生的放射性固体废物主要有以下两类：

（1）不再回收利用的活化部件及维修维护过程中被污染的劳保用品，如荧光靶、手套、棉纱等。参考同类设备运行经验，预计每年放射性固体废物产生量不会超过 1m<sup>3</sup>，见表 4-6。这些放射性固体废物的主要材料是铜、铁和镍等。装置停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是 <sup>64</sup>Cu、<sup>58</sup>Co、<sup>61</sup>Cu、<sup>51</sup>Cr、<sup>48</sup>V、<sup>7</sup>Be、<sup>54</sup>Mn 和 <sup>52</sup>Mn 等半衰期较长的核素。

（2）冷却水系统更换下来的离子交换树脂，年产生量不超过 0.36m<sup>3</sup>。

**表 4-10 小型化重离子治疗装置安装调试及运行维护期间产生的放射性固体废物年产生量**

| 种类            | 预计年产生量                  |
|---------------|-------------------------|
| 废旧部件及被污染的劳保用品 | 不超过 1 m <sup>3</sup>    |
| 废离子交换树脂       | 不超过 0.36 m <sup>3</sup> |
| 总计            | 不超过 1.36 m <sup>3</sup> |

对于用户单位，根据用户单位的布局，将设置放射性固体废物暂存区，暂存

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

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

（1）对于满足解控标准的：

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

（2）对于不满足解控标准的，由用户单位委托有资质单位处理。

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

## 5. 环境影响分析

### 5.1 测调中心

#### 5.1.1 安装期间的环境影响分析

在测调中心内将进行的小型化重离子治疗装置进行出束调试前需对装置进行安装。主要污染源为噪声和固体废物（非放射性），其中噪声是最主要的污染物。这些环境影响是暂时性的，随着生产作业结束而消失。

在小型化重离子治疗装置安装过程中，使用低噪声的工具和设备，必要时使用隔音材料、设置隔音屏障等，减少噪声排放，并合理布局工作区域，减少噪声的传播和影响，确保排放的噪声符合国家规定的工业企业厂界噪声排放标准（执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2 类标准昼间 60dB（A）、夜间 50dB（A）的要求）。

对于非放射性固体废物，在兰州泰基园区内安装现场均设置了固体废物暂存点，确保产生的废包装材料、废零部件、废螺栓、废垫片、废测试材料、废记录纸等固体废物得到妥善管理。并且通过优化生产流程和材料管理，减少固体废物的产生。对产生的固体废物进行分类收集，可回收利用的部件进行回收复用，不能回收利用的部件经审管部门认可后，按一般废物处理。工作结束后，对工作中产生的固体废物全部清除，生活垃圾及时交由环卫清运处理。

通过上述措施，确保生产和安装过程中的环境影响最小化，符合国家相关环境保护标准。

#### 5.1.2 正常运行时的环境影响分析

测调中心内装置正常运行时造成的辐射影响主要为进行小型化重离子治疗装置出束调试期间的辐射影响。

##### 5.1.2.1 工作人员受照剂量估算

本项目正式运行期间工作人员主要为束流调试工程师。

束流调试工程师的工作主要是对小型化重离子治疗装置各部分进行调试，同时在设备出现故障时进入控制区内进行故障处理和检修，以确保设备恢复正常状态，在此期间对束流调试工程师的辐射影响主要来自加速器开机出束产生的瞬时辐射影响以及进入加速器大厅及终端后受到活化空气及活化部件的感生放射性影响。

对于上述工作人员的受照剂量由下式 5-1 计算

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

$H$  为工作人员年受照剂量，mSv/a；

$D$  为工作人员所在区域剂量率，mSv/h；

$t$  为工作人员年受照时间，h/a。

$T$  为居留因子。

#### 5.1.2.1.1 出束调试

#### 5.1.2.1.2 隔室操作的受照剂量

出束调试过程中，隔室操作人员的工作区域主要位于控制室。

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

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

式中， $H$  为工作人员年受照剂量，μSv/a；

$D$  为工作人员所在区域剂量率，μSv/h；

$t$  为工作人员年受照时间，h/a。

出束调试期间，工作人员的工作机制为 2 班 3 倒。

表 5-1 每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间每名束流调试工程师

### 隔室操作受照剂量计算结果

| 阶段                    | 工作区域 | 剂量率水平 <sup>1</sup> , μSv/h | 受照时间 <sup>2</sup> , h | 居留因子 | 受照剂量, mSv |
|-----------------------|------|----------------------------|-----------------------|------|-----------|
| 注入器束流调试               | 控制室  | 0.08                       | 575                   | 1    | 4.60E-02  |
| 同步加速器束流调试             |      |                            |                       |      |           |
| 30°固定束终端治疗头束流调试和性能测试  |      |                            | 250                   |      | 2.0E-02   |
| 360°旋转束终端治疗头束流调试和性能测试 |      |                            | 624                   |      | 4.99E-02  |

注：1、控制室内控制台剂量率见表 4-2。

2、①注入器束流调试及同步加速器束流调试出束共计 1150h，共两班，因此每名束流调试工程师在每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间受照时间为 1150/2=575h；②30°固定束终端治疗头束流调试出束 500h，共两班，因此每名束流调试工程师在每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间受照时间为 500/2=250h；③360°旋转束终端治疗头束流调试出束 1248h，共两班，因此每名束流调试工程师在每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间受照时间为 1248/2=624h。

由表 5-1 可计算得，每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间，束流调试工程师隔室操作时所受最大受照剂量为 4.99E-02mSv。

#### 5.1.2.1.3 进入加速器大厅或终端内部的受照剂量

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

##### 5.2.1.1.3.1 活化部件的影响

每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间，束流调试工程师出进入加速器大厅或终端内接触的活化部件影响主要来自于同步环、偏转磁铁、法拉第筒及水箱的影响。活化部件的剂量率水平保守取表 3-30~表 3-33 中停机冷却 5 min，表面 5cm 处的模拟计算结果（水箱考虑人员操作位置，因此为距表面 1m 处）。下表为每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间接触活化部件所致受照剂量的计算结果。

表 5-2 活化部件所致受照剂量结果

| 工作区域                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 活化部件 <sup>1</sup> | 剂量率水平, $\mu$<br>Sv/h | 工作时间 <sup>1</sup> , h | 受照剂量, mSv |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------|
| 加速器大厅、<br>束流输运系统                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 同步环               | 3.60E-01             | 1.44                  | 5.19E-04  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 偏转磁铁              | 17.68                | 8.63                  | 1.53E-01  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 法拉第筒              | 6.02                 | 2.88                  | 1.73E-02  |
| 终端                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 水箱                | 0.83                 | 20.13                 | 1.67E-02  |
| 注：1.①同步环的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 5 分钟保守计算，即 $[(2898/(7 \times 24)) \times (5/60)] = 1.44\text{h}$ ；<br>②偏转磁铁的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 30 分钟计算，即 $(2898/(7 \times 24)) \times 0.5 = 8.63\text{h}$ ；<br>③法拉第筒的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 10 分钟计算，即 $[(2898/(7 \times 24)) \times (10/60)] = 2.88\text{h}$ ；<br>④水箱的工作时间依据建设单位提供的资料为每天一次，一次工作 10 分钟计算，即 $(2898 \div 24) \times (10/60) = 20.13\text{h}$ ； |                   |                      |                       |           |

#### 5.2.1.1.3.2 活化空气的影响

活化空气对工作人员的影响途径考虑浸没外照射和吸入内照射，由于进入加速器大厅前需强制通风 5min，同时停机后终端内也会加强通风，换气次数为 5 次/h。结合空气中主要感生放射性核素的半衰期及通风换气次数，因此加速器大厅及终端内的活化空气感生放射性对束流调试工程师的剂量影响可忽略。

#### 5.2.1.1.3.3 工作人员受照剂量汇总

综上所述，每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间，工作人员年总受照剂量汇总如下

表 5-3 所示。

表 5-3 每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间每名工作人员年总受照剂量

| 阶段                    | 隔室操作, mSv | 进入加速器大厅及终端内部接触活化部件, mSv             | 总计, mSv  |
|-----------------------|-----------|-------------------------------------|----------|
| 注入器束流调试               | 4.60E-02  | 5.19E-04+1.53E-01+1.73E-02=1.71E-01 | 2.17E-01 |
| 同步加速器束流调试             |           |                                     |          |
| 30°固定束终端治疗头束流调试和性能测试  | 2.0E-02   | 1.67E-02                            | 3.67E-02 |
| 360°旋转束终端治疗头束流调试和性能测试 | 4.99E-02  | 1.67E-02                            | 6.67E-02 |

由此可以看出，测调中心内对小型化重离子治疗装置出束调试期间，每台（套）小型化重离子治疗装置工作人员中所受个人有效剂量最大为 2.17E-01mSv。

### 5.1.3 公众受照剂量估算

#### 5.1.3.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象为园区内的其他工作人员和东侧园区道路的公众，测调中心内小型化重离子治疗装置出束时长为2898h，公众所在位置居留因子参照《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2020）取值。公众由瞬发辐射所受剂量结果见下表。

表 5-4 公众由瞬发辐射所受剂量结果

| 区域                                                                                                                                                                              | 瞬时剂量率 <sup>1</sup><br>( $\mu\text{Sv/h}$ ) | 年受照时长 <sup>2</sup><br>(h) | 居留因子 | 年受照剂量<br>(mSv/a) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|------|------------------|
| 超导测试间                                                                                                                                                                           | 5.0E-02                                    | 2920                      | 1/4  | 3.65E-02         |
| 东侧园区道路                                                                                                                                                                          | 2.2E-01                                    | 2920                      | 1/16 | 4.02E-02         |
| 注：1.各区域瞬时剂量率均取自表 4-2中与之临近的关注点的剂量率水平；<br>2.年最大销售量为4台，单台（套）小型化重离子治疗装置出束调试时间为2898h，4台（套）总时间为11592h，但已超出年总时间（365天×24h=8760h），所选区域公众不会24h在同一位置，因此按照公众每日8h工作考虑，公众年最大受照时长为365×8=2920h。 |                                            |                           |      |                  |

因此公众由瞬发辐射照射所致年最大受照剂量为4.02E-02mSv/a，低于公众

年剂量约束值0.1mSv/a。

5.1.3.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用 IAEA NO.19 技术报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》中推荐的简单稀释模式，估算设备正常运行工况下放射性气态流出物的影响，放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射。

表 5-5 测调中心小型化重离子治疗装置放射性排风口参数

| 排风高度，m | 最靠近关注点的建筑物的最大截面积 $A_b$ ， $m^2$ | 临近最高建筑物高度 $H_b$ ，m |
|--------|--------------------------------|--------------------|
| 12     | 1733.59                        | 17.85              |

注：临近最高建筑物为倒班宿舍楼

5.1.3.2.1 空气浸没外照射

由表 5-5 可知，测调中心小型化重离子治疗装置排风口高度  $H < 2.5H_b$ （临近最高建筑物高度）：

（1）与排风口近距离范围内的公众， $x \leq 2.5 \sqrt{A_b}$ （ $x \leq 104.09m$ ）

根据 IAEA NO.19 号报告，当  $x \leq 2.5 \sqrt{A_b}$  时，关注点处地面空气浓度可由式 5-3 计算：

$$C_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \tag{5-3}$$

式中，

- $C_{a,i}$  为距离排风口  $x$  米处核素  $i$  的地面空气浓度， $Bq/m^3$ ；
- $Q_i$  为放射性核素  $i$  的年均排放率， $Bq/s$ ，见表 3-22；
- $P_p$  为一年中风吹向接收点所在扇形方位  $p$  的时间份额，保守的取为 0.25；
- $u_a$  为释放高度上年平均风速， $m/s$ ，依据 2.2.2 小节，取值为  $2.3m/s$ ；

K 为经验常数，m，取值 K=1m；

(2) 与排风口距离  $x > 2.5\sqrt{A_b}$  ( $x > 104.09\text{m}$ )

根据 IAEA NO.19 号报告，当  $x > 2.5\sqrt{A_b}$  时，关注点处地面空气浓度可由式 5-4 计算：

$$C_{a,i} = \frac{P_p B Q_i F}{u_a} \quad (5-4)$$

式中：

B 为在下风距离  $x$  处的高斯扩散因子；由下式 5-5 计算。

F 为各核素考虑距离  $x$  因素的衰减因子；

$\sigma_z$  为垂直扩散参数，m，

$$F = \text{EXP} \left( -\frac{x}{u_a} \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \right)$$

$$B = \frac{16}{\sqrt{2\pi^3}} \frac{1}{x \sum z}, \quad \sum z = (\sigma_z^2 + A_b / \pi)^{0.5}, \quad \sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \quad (5-5)$$

各关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-6。

表 5-6 各关注点处地面空气浓度计算结果，Bq/m<sup>3</sup>

| 关注点                         | <sup>11</sup> C | <sup>13</sup> N | <sup>15</sup> O | <sup>41</sup> Ar |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 与排风口距离 $X \leq 100\text{m}$ | 1.33E-01        | 2.56E-01        | 8.51E-01        | 8.70E-03         |
| 与排风口距离 $X = 200\text{m}$    | 2.50E-03        | 4.65E-03        | 1.21E-02        | 1.67E-04         |

空气浸没外照射剂量可由下式 5-6 计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \quad (5-6)$$

式中：

$H_A$  为空气浸没照射所致年有效剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；取值  $365 \times 8 \times 3600 = 10512000\text{s}$ ；

$S_F$  为建筑物屏蔽因子，本次评价取 1；

G 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-7，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子；取值为 1。

表 5-7 剂量转换因子

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

空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-8。

表 5-8 空气浸没外照射剂量计算结果，mSv/a

| 关注点           | <sup>11</sup> C | <sup>13</sup> N | <sup>15</sup> O | <sup>41</sup> Ar | 总计       |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------|
| 与排风口距离 X≤100m | 6.85E-05        | 1.32E-04        | 4.39E-04        | 5.95E-06         | 6.45E-04 |
| 与排风口距离 X=200m | 1.29E-06        | 2.39E-06        | 6.25E-06        | 1.14E-07         | 1.00E-05 |

#### 5.1.3.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由式 5-7 计算：

$$H_{h-i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \quad (5-7)$$

式中：

$H_{h-i}$  为吸入内照射所致年有效剂量，Sv/a；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m<sup>3</sup>/h，成人：1.5m<sup>3</sup>/h；

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

吸入内照射剂量计算结果见表 5-9。

表 5-9 吸入内照射剂量计算结果，mSv/a

| 关注点                         | $^{11}\text{C}$ | $^{13}\text{N}$ | $^{15}\text{O}$ | $^{41}\text{Ar}$ | 总计       |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------|
| 与排风口距离 $X \leq 100\text{m}$ | 1.05E-05        | ——              | ——              | ——               | 1.05E-05 |
| 与排风口距离 $X = 200\text{m}$    | 1.97E-07        | ——              | ——              | ——               | 1.97E-07 |

#### 5.1.3.2.3 总受照剂量

放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果列于表 5-10，由放射性气体排放所致公众年最大受照剂量为  $6.56\text{E-}04\text{mSv/a}$ ，低于公众年剂量约束值  $0.1\text{mSv/a}$ 。

表 5-10 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果，mSv/a

| 关注点                         | $^{11}\text{C}$ | $^{13}\text{N}$ | $^{15}\text{O}$ | $^{41}\text{Ar}$ | 总计       |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------|
| 与排风口距离 $X \leq 100\text{m}$ | 7.90E-05        | 1.32E-04        | 4.39E-04        | 5.95E-06         | 6.56E-04 |
| 与排风口距离 $X = 200\text{m}$    | 1.49E-06        | 2.39E-06        | 6.25E-06        | 1.14E-07         | 1.02E-05 |

#### 5.1.3.3 小结

综上所述，公众主要分为两部分，首先为测调中心内非本项目工作人员主要受到瞬发辐射照射及天空反散射的影响，其年最大受照剂量为  $2.80\text{E-}02$ （天空反散射）+ $3.65\text{E-}02$ （瞬发辐射照射（超导测试间））= $6.42\text{E-}02\text{mSv}$ ，其次测调中心外的公众主要受到瞬发辐射和放射性气体排放的影响，其年最大受照剂量为  $4.02\text{E-}02$ （瞬发辐射照射（东侧园区道路））+ $6.56\text{E-}04$ （放射性气体排放）= $4.09\text{E-}02\text{mSv}$ 。两类公众年受照剂量均低于公众年剂量约束值  $0.1\text{mSv/a}$ 。

### 5.1.4 事故工况下的环境影响

#### 5.1.4.1 事故情景

小型化重离子治疗装置的核心是同步加速器，其辐射场是瞬发性的，装置一旦停机，能造成环境影响的辐射源立即消失，且不会再引起周边介质的活化。

小型化重离子治疗装置运行期间可能发生的事故主要有：

(1) 安全联锁系统失效、人员误入加速器大厅、终端内部造成的误照射事故；

(2) 工作人员在加速器大厅、终端内部工作期间，小型化重离子治疗装置出束造成的误照射事故；

#### 5.1.4.2 事故后果分析

##### 5.1.4.2.1 人员误照射事故

###### 5.1.4.2.1.1 事故后果估算

在人员误照射事故中，加速器大厅或治疗室内部工作期间，小型化重离子治疗装置出束造成的误照射事故所致人员受照剂量最大，本次评价对该事故期间的人员受照剂量进行估算。

根据图 4-5~图 4-13，小型化重离子治疗装置出束时，加速器大厅及终端内工作人员的常驻工作区最大剂量率水平约为  $1\text{E}+04\mu\text{Sv/h}$ ，取单次误照射时间 1min 进行计算，事故期间工作人员的最大受照剂量约为  $2.78\text{E}-03\text{mSv}$ 。

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

###### 5.1.4.2.1.2 事故防范措施

兰州泰基拟采取以下防范措施以降低人员误入事故的发生率：

（1）为防止各项安全联锁硬件设施失效，应定期检查并确认安全联锁设施、声光指示灯的有效性。

（2）开机出束前，撤离控制区时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和程序对各区域进行清场。出束期间一旦发现有人滞留在控制区内，就近按下急停按钮。

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

（4）做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

#### 5.1.4.2.2 人员受照剂量超出年剂量限值

##### 5.1.4.2.2.1 事故情景分析

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

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

##### 5.1.4.2.2.2 事故预防措施

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

## 5.2 用户单位

### 5.2.1 用户单位安装期间的环境影响分析

在用户单位内进行小型化重离子治疗装置安装流程，主要污染源为噪声和固体废物（非放射性），其中噪声是最主要的污染物。这些环境影响是暂时性的，随着生产作业结束而消失。

在小型化重离子治疗装置安装过程中，使用低噪声的工具和设备，必要时使用隔音材料、设置隔音屏障等，减少噪声排放，并合理布局工作区域，减少噪声的传播和影响，确保排放的噪声符合国家规定的工业企业厂界噪声排放标准。

对于非放射性固体废物，在用户单位安装现场均设置了固体废物暂存点，确保产生的废包装材料、废零部件、废螺栓、废垫片、废测试材料、废记录纸等固体废物得到妥善管理。并且通过优化生产流程和材料管理，减少固体废物的产生。对产生的固体废物进行分类收集，可回收利用的部件进行回收复用，不能回收利用的部件经审管部门认可后，按一般废物处理。工作结束后，对工作中产生的固体废物全部清除，生活垃圾及时交由环卫清运处理。

通过上述措施，确保生产和安装过程中的环境影响最小化，符合国家相关环境保护标准。

### 5.2.2 正常运行时的环境影响分析

本项目生产、销售及安装阶段仅涉及部件装配、机械性能验证、商务谈判和财务结算，对周围环境和相关人员不会产生辐射类的危害和影响，正常运行时造成的辐射影响主要是小型化重离子治疗装置于用户单位安装调试及运行维护期间的环境影响。

#### 5.2.2.1 工作人员受照剂量估算

本项目在安装调试阶段工作人员分为安装工程师和束流调试工程师，工作

场所均位于用户现场。其中安装工程师负责完成小型化重离子治疗装置及其配件的安装，在安装期间加速器不出束。束流调试工程师参与安装结束后的调试工作。每台小型化重离子治疗装置在调试期间最大出束时间为 1627h，现场服务工程师在安装调试结束后继续在用户点驻场，并参与后续的运行维护工作。

#### 5.2.2.1.1 安装调试

根据前面章节的分析，用户单位内小型化重离子治疗装置安装调试期间对束流调试工程师的辐射影响主要来自调试过程中加速器开机出束产生的瞬发辐射的照射，以及进入加速器大厅和科研终端或治疗室等区域内接触活化部件、活化空气造成的感生放射性影响。

##### 5.2.2.1.1.1 隔室操作的受照剂量

安装调试过程中，隔室操作人员的工作区域主要位于加速器主控室、治疗室控制台和相邻科研终端或治疗室等区域。

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

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

式中， $H$  为工作人员年受照剂量， $\mu\text{Sv/a}$ ；

$D$  为工作人员所在区域剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

$t$  为工作人员年受照时间， $\text{h/a}$ 。

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

因此，本次评价采用上文中典型案例区域分配的屏蔽体外剂量率水平进行

估算。安装调试期间，工作机制为 2 班 3 倒。

**表 5-11 每台（套）小型化重离子治疗装置安装调试期间隔室操作受照剂量计算结果**

| 阶段                          | 工作区域                      | 剂量率水平 <sup>1</sup> ,<br>μSv/h | 每名束流<br>调试工程<br>师受照时<br>间 <sup>2</sup> , h | 居留因<br>子 | 受照剂量,<br>mSv/a | 总计       |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|----------|----------------|----------|
| 注入器束<br>流调试                 | 加速器主<br>控室                | 0.18                          | 158.5                                      | 1        | 2.85E-02       | 2.85E-02 |
| 同步加速<br>器束流调<br>试           |                           |                               |                                            |          |                |          |
| 固定束治<br>疗头束流<br>调试和性<br>能测试 | 加速器主<br>控室、治<br>疗室控制<br>台 | 0.18                          | 310                                        | 1        | 5.58E-02       | 5.98E-01 |
|                             | 相邻科研<br>终端或治<br>疗室        | 3.5                           |                                            | 1/2      | 5.42E-01       |          |
| 旋转束治<br>疗头束流<br>调试和性<br>能测试 | 加速器主<br>控室、治<br>疗室控制<br>台 | 0.18                          | 325                                        | 1        | 5.85E-02       | 6.27E-01 |
|                             | 相邻科研<br>终端或治<br>疗室        | 3.5                           |                                            | 1/2      | 5.69E-01       |          |

注：1、加速器主控室、治疗室控制台与相邻治疗室或科研终端的剂量率，由于典型案例或以往项目布局类似，因此以上区域剂量率取以往装置参数一致项目的剂量率水平，加速器主控室、治疗室控制台最大为 0.18μSv/h，相邻治疗室或科研终端最大为 3.5μSv/h。

2、①注入器束流调试及同步加速器束流调试出束共计 317h，共两班，因此每名束流调试工程师在每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间受照时间为 317/2=158.5h；②固定束治疗头束流调试出束 620h，共两班，因此每名束流调试工程师在每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间受照时间为 620/2=310h，并保守考虑每名束流调试工程师在加速器主控室、治疗室控制台与相邻治疗室或科研终端的受照时间均为 310h；③旋转束治疗头束流调试出束 650h，共两班，因此每名束流调试工程师在每台（套）小型化重离子治疗装置出束调试期间受照时间为 650/2=325h，并保守考虑每名束流调试工程师在加速器主控室、治疗室控制台与相邻治疗室或科研终端的受照时间均为 325h。

由式 5-1 可计算得，每台（套）小型化重离子治疗装置安装调试期间，束流调试工程师隔室操作时所受最大受照剂量为 6.27E-01mSv。

#### 5.2.2.1.1.2 进入加速器大厅及治疗室内部的受照剂量

进入加速器大厅内部和治疗室内部的工作人员的受照剂量主要来自活化部

件、活化空气造成的感生放射性影响。

5.2.2.1.1.2.1 活化部件的影响

用户单位每台（套）小型化重离子治疗装置安装调试期间，束流调试工程师进入加速器大厅或终端内接触的活化部件影响主要来自于同步环、偏转磁铁、法拉第筒及水箱的影响。活化部件的剂量率水平保守取表 3-30~表 3-33 中停机冷却 5min，表面 5cm 处的模拟计算结果（水箱考虑人员操作位置，因此为距表面 1m 处）。下表为安装调试期间接触活化部件所致年受照剂量的计算结果。

表 5-12 活化部件所致受照剂量结果

| 工作区域                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 活化部件 <sup>1</sup> | 剂量率水平， $\mu$<br>Sv/h | 工作时间 <sup>1</sup> ，h | 受照剂量，mSv<br>/a |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| 加速器大厅、束流运输系统、终端                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 同步环               | 3.60E-01             | 0.81                 | 2.92E-04       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 偏转磁铁              | 17.68                | 4.84                 | 8.56E-02       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 法拉第筒              | 6.02                 | 1.61                 | 9.69E-03       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 水箱                | 0.83                 | 11.3                 | 9.38E-03       |
| 注：①同步环的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 5 分钟保守计算，即 $[(1627/(7 \times 24)) \times (5/60)] = 0.81h$ ；<br>②偏转磁铁的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 30 分钟计算，即 $(1627/(7 \times 24)) \times 0.5 = 4.84h$ ；<br>③法拉第筒的工作时间依据建设单位提供的资料为每周一次，一次工作 10 分钟计算，即 $[(1627/(7 \times 24)) \times (10/60)] = 1.61h$ ；<br>④水箱的工作时间依据建设单位提供的资料为每天一次，一次工作 10 分钟计算，即 $(1627 \div 24) \times (10/60) = 11.3h$ ； |                   |                      |                      |                |

5.2.2.1.1.2.2 活化空气的影响

活化空气对工作人员的影响途径考虑浸没外照射和吸入内照射，由于进入加速器大厅前需强制通风 5min，同时停机后科研终端和治疗室内也会加强通风，换气次数为不低于 4 次/h。结合空气中主要感生放射性核素的半衰期及通风换气次数，因此加速器大厅、科研终端和治疗室内的活化空气感生放射性对束流调

试工程师造成的剂量影响可忽略。

**5.2.2.1.1.2.3 安装调试期间工作人员受照剂量汇总**

综上所述，每台（套）小型化重离子治疗装置安装调试期间，束流调试工程师年总受照剂量汇总如下表 5-13 所示。

**表 5-13 每台（套）小型化重离子治疗装置安装调试期间每名束流调试工程师年总受照剂量**

| 阶段                    | 隔室操作，<br>mSv | 进入加速器大厅、科研终端及治疗室内部接触活化部件，mSv        | 总计，mSv   |
|-----------------------|--------------|-------------------------------------|----------|
| 注入器束流调试               | 2.85E-02     | 2.92E-04+8.56E-02+9.69E-03=9.56E-02 | 1.24E-01 |
| 同步加速器束流调试             |              |                                     |          |
| 30°固定束终端治疗头束流调试和性能测试  | 5.98E-01     | 9.38E-03                            | 6.07E-01 |
| 360°旋转束终端治疗头束流调试和性能测试 | 6.27E-01     | 9.38E-03                            | 6.36E-01 |

由此可以看出，用户单位安装调试期间，每台（套）小型化重离子治疗装置束流调试工程师所受个人有效剂量最大为 6.36E-01mSv。

**5.2.2.1.2 运行维护**

小型化重离子治疗装置安装调试完成交付用户后，兰州泰基驻场的现场服务工程师主要负责系统日常的运行维护，根据前文的分析，运行维护期间对现场服务工程师的辐射影响主要来自进入加速器大厅、科研终端及治疗室等区域内接触活化部件和活化空气造成的感生放射性影响以及日常运行时隔室操作（控制室或相邻科研终端及治疗室）所受剂量。在小型化重离子治疗装置运行期间的工作时间依据典型案例和同类型设备的年最大出束时间保守考虑，第一年交付设备后出束时间为 1000h，而到第二年开始进行全年性的出束治疗等工作，同样根据典型案例和同类型设备，认为出束时间为 2000h。现场服务工程师的工作机制为 2 班 3 倒。同时又因为运行期间多数工作在控制室内完成，控制室处的剂量率控制水平取 2.5μSv/h。

综上所述，运行维修期间，现场服务工程师年总受照剂量如表 5-14 所示。

表 5-14 运行维护期间现场服务工程师年总受照剂量

| 时间         | 隔室操作, mSv                                                  | 进入机房内部（活化部件）, mSv | 每名现场服务工程师的受照剂量, mSv |
|------------|------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|
| 安装调试交付后年度  | $2.5\text{E-}03\text{mSv/h} \times (1000/2) \times h=1.25$ | 1.07E-01          | 1.36                |
| 第二年度及以后每年度 | $2.5\text{E-}03\text{mSv/h} \times (2000/2) = 2.5$         | 1.07E-01          | 2.61                |

运行维护过程中单一年度现场服务工程师仅在一个项目站点进行工作，同时由于安装调试交付后年度，现场服务工程师来自测调中心及用户单位束流调试工程师，因此安装调试交付后年度现场服务工程师受照剂量最大为  $1.36+6.36\text{E-}01+2.17\text{E-}01=2.21\text{mSv/a}$ 。综上本项目每名现场服务工程师每台（套）小型化重离子治疗装置的年受照剂量最大为 2.21mSv。

#### 5.2.2.2 公众受照剂量估算

本项目生产、销售及安装阶段仅涉及部件装配、机械性能验证、商务谈判和财务结算，对周围环境和相关人员不会产生辐射类的危害和影响。主要考虑小型化重离子治疗装置出束调试及运行维护期间对公众的辐射影响。出束调试及运行维护期间严格限制无关人员进入工作区域，对工作人员进行授权，无授权人员将不得进入。

公众所受瞬时辐射照射剂量由式（5-4）计算

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

$H$  为公众的年受照剂量， $\mu\text{Sv/a}$ ；

$D$  为公众所在区域剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

$t$  为公众年受照时间， $\text{h/a}$ ；

$T$  为居留因子。

参考典型案例及相关项目经验，公众所在位置为典型案例的医护、公众区，其剂量率水平  $\leq 1\mu\text{Sv/h}$ ，其中护士站起引导患者及问询的作用，属于典型的常居

留位置，按照已有项目和典型项目布局的屏蔽体外剂量率计算结果，取  $0.03\mu\text{Sv/h}$  对本项目公众受照剂量进行估算，居留因子取 1。年受照时间按照全年工作时间保守取值，即 2000h。由此可计算得出用户单位小型化重离子治疗装置束流对公众年最大受照剂量为  $6.0\text{E-}02\text{mSv/a}$ ，低于公众剂量约束值  $0.1\text{mSv/a}$ 。

### 5.2.3 事故工况下的环境影响

事故工况下的环境影响已在 5.3 小节中进行了分析，由于测调中心内的小型化重离子治疗装置与用户单位的小型化重离子治疗装置基本一致，仅终端数量不同，且事故情形一致，因此此处不再重复评价。

## 5.3 本项目工作人员受照剂量小结

兰州泰基在测调中心及用户单位安装调试、运行维护每台（套）小型化重离子治疗装置期间年最大受照剂量如表 5-15 所示。

**表 5-15 安装调试期间每台小型化重离子治疗装置束流调试工程师最大受照剂量**

| 调试阶段    | 束流调试/安装调试, mSv |          | 总计, mSv  |
|---------|----------------|----------|----------|
|         | 测调中心           | 用户单位     |          |
| 注入器阶段   | 2.17E-01       | 1.24E-01 | 3.41E-01 |
| 同步加速器阶段 |                |          |          |
| 固定束终端阶段 | 3.67E-02       | 6.07E-01 | 6.44E-01 |
| 旋转束终端阶段 | 6.67E-02       | 6.36E-01 | 7.03E-01 |

由上表可知，每台（套）小型化重离子治疗装置中测调中心及用户单位安装调试期间辐射工作人员的最大受照剂量为  $7.03\text{E-}01\text{mSv}$ 。本项目每名现场服务工程师受照剂量最大为  $2.21\text{mSv/a}$ 。同时按照年最大销售（含建造）量 4 台估算，本项目每名束流调试工程师年最大受照剂量为  $7.03\text{E-}01\text{mSv} \times (4 \text{ 台}/2 \text{ 班}) = 1.41\text{mSv}$ 。

另外由于本项目辐射工作人员存在参与本单位其它建设项目工作的兼职情

况，根据附件 7 2024 年度个人剂量检测报告结果所示，最大年个人剂量监测结果为 0.48mSv，因此保守考虑正常工况下测调中心及用户单位安装调试和运行维护阶段，本项目束流调试工程师的年最大受照剂量为  $1.41\text{mSv}+0.48\text{mSv}=1.89\text{mSv}$ ，现场服务工程师年最大受照剂量为  $2.21\text{mSv}+0.48\text{mSv}=2.69\text{mSv}$ ，均低于其个人剂量约束值 5mSv。

## 6. 辐射安全管理

### 6.1 辐射安全与环境保护管理机构

辐射安全管理委员会是兰州泰基离子技术有限公司的辐射安全管理机构，总经理担任主任委员，分管安全的副总经理和总经理助理担任副主任委员，辐射防护负责人由注册核安全工程师担任。

综合办公室安全监管组是辐射安全管理的执行部门，负责全公司辐射安全工作的日常管理。

**表 6-1 辐射安全管理委员会成员**

| 姓 名 | 性别 | 职务或职称    | 工作部门  | 专/兼职 |
|-----|----|----------|-------|------|
| 石 健 | 男  | 总经理      | 综合办公室 | 兼职   |
| 杨文杰 | 男  | 副总经理     | 综合办公室 | 兼职   |
| 周利荣 | 男  | 总经理助理    | 运维部   | 兼职   |
| 李武元 | 男  | 注册核安全工程师 | 设计部   | 专职   |
| 王俊杰 | 男  | 工程师      | 综合办公室 | 专职   |
| 何娟娟 | 女  | 工程师      | 综合办公室 | 专职   |

辐射安全管理委员会职责如下：

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

## 6.2 辐射工作人员管理

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

目前兰州泰基共 122 名辐射工作人员，包括设计人员、运维人员、管理人员等均通过了生态环境部门认可的辐射安全与防护考核。同时按照公司年度培训计划和工作需要，开展了内部辐射安全相关的培训，包括公司辐射安全制度、辐射安全基础知识、职业健康等内容；对新员工进行了安全教育和培训。

本项目于测调中心参与设备调试及运行维护的辐射工作人员，在设备调试完成后，将会在用户单位进行安装调试，并有一部分人进行驻场运维。因此每季度收集工作人员的个人剂量计进行个人剂量监测并做累加，监测结果建立档案，严格按照个人剂量约束值 5mSv/a 控制。各个项目场所配置了一定数量的直读式个人剂量报警仪，在工作人员进行高活化部件的检修等操作时，其监测数据作为在该项目所受职业照射的参考依据。

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

## 6.3 辐射安全管理制度

为认真贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，从工作的实际出发，兰州泰基建立健全本单位的辐射安全规章制度。目前已制定了《辐射安全与防护管理大纲》、《辐射安全管理制度》、《活化部件检修防护管理制度》、《放射性废物处置管理制度》、《辐射安全与防护设施维护检修制度》、《辐射监测方案》、《调试阶段辐射安全管理制度》、《辐射事故应急预案》、《直线注入器辐射安全管理制度》、《直线注入器辐射监测方案》及《射线装置台账管理制度》等。

同时兰州泰基将根据本项目建设内容和特点，制定和完善操作规程、辐射安全防护、辐射工作人员管理考核、设备检修维护、监测方案、辐射事故应急预案、放射性废物处理等相关辐射安全管理制度，确保本项目的辐射安全。

## 6.4 辐射监测

小型化重离子治疗装置测调中心内出束调试、运行维护的监测内容包括环境监测、工作场所监测和个人剂量监测。

### 6.4.1 测调中心

#### 6.4.1.1 环境监测

环境监测包括自行监测（瞬时剂量率监测）及委托监测（瞬时剂量率监测、土壤检测、循环冷却水检测和固体废物外表面剂量率监测）。

##### （1）便携式监测仪表巡测

在未来小型化重离子治疗装置的运行过程中，还会根据监测计划及加速器运行功率利用便携式仪器对装置周边进行中子、 $\gamma$  剂量率进行监测。每年至少监测 1 次，并委托有资质单位每年监测 1 次。

##### （2）土壤监测

在测调中心四周设置 4 个土壤监测点位，由兰州泰基委托有资质单位检测，

定期进行验证性的监测，确保装置对土壤的影响满足本报告中的要求，监测项目为  $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、总  $\alpha$ 、总  $\beta$ 。

### (3) 环境监测大纲

依据《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）中要求和本项目特点，制定本项目环境监测方案见表 6-2。

**表 6-2 本项目测调中心部分环境监测方案**

| 监测对象    | 监测项目                                                    | 监测点位                     | 监测频次          | 监测方式          |
|---------|---------------------------------------------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| 外照射     | 中子剂量率、 $\gamma$ 剂量率                                     | 测调中心周围，如测调中心四周、相邻厂房及宿舍楼等 | 1 次/年         | 便携式剂量率仪<br>巡测 |
| 外照射     | 中子剂量率、 $\gamma$ 剂量率<br>中子剂量率、 $\gamma$ 剂量率              | 同上                       | 1 次/年         | 委托监测          |
| 土壤      | $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、总 $\alpha$ 、总 $\beta$ | 测调中心四周                   | 1 次/年         |               |
| 循环冷却水   | $^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}$ 、总 $\alpha$ 、总 $\beta$     | 水冷间、暂存池                  | 1 次/年         |               |
| 固体废物外表面 | $\gamma$ 剂量率                                            | 放射性固体废物暂存间               | 当容量到达 2/3 时监测 | 便携式剂量率仪       |

#### 6.4.1.2 工作场所监测

工作场所监测包括自行监测和委托监测，自行监测方式包括便携式辐射剂量仪巡测和固定式辐射剂量仪连续监测。

##### (1) 自行监测

兰州泰基配备中子巡检仪和  $\gamma$  巡检仪，在安装调试期间，定期对工作场所进行巡测，包括 X- $\gamma$  辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率。监测点位按照工作场所机房四周屏蔽墙外 30cm 处、控制室、操作位、防护门外以及其他敏感点位进行设置。安装调试阶段，应在最大工况下，由辐射工作人员进行全面的辐射监测，评估辐射安全状况，确保辐射水平达标。

测调中心内设置了 10 个固定式辐射剂量监测仪，每台固定式辐射剂量监测仪包括一个  $\gamma$  监测仪和一个中子监测仪，接入剂量联锁系统，实时监测工作场所固定点位的  $\gamma$  剂量和中子剂量。

## （2）委托监测

兰州泰基每年委托有资质的技术服务机构开展工作场所辐射剂量，每年至少一次。

表 6-3 工作场所监测计划

| 监测方式 | 监测对象 | 监测方式        | 监测项目                 | 监测点位                                 | 监测频次                  |
|------|------|-------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| 自行监测 | 外照射  | 便携式仪表<br>巡测 | $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量率 | 机房四周屏蔽墙外 30cm 处、控制室、操作位、防护门外以及其他敏感点位 | 在束流调试、运行维护期间巡测，每月 1 次 |
|      |      | 固定式仪表<br>监测 |                      | 如图 4-23 所示                           | 实时                    |
| 委托监测 | 外照射  | ——          | $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量率 | 同自行监测                                | 1 次/年                 |

## （3）监测要求

对于监测方法，采用网格均匀布点的方式对环境敏感点、机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、治疗室控制室、中央控制室、操作位、观察窗、门以及其他敏感点位进行环境地表  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率监测，采用便携式监测仪表，以定点或巡测的测量方式进行。每个监测点位测量 10 次，每次间隔 10 秒钟，监测结果取平均值。监测结果与 1.4.2 小节中所要求的屏蔽体外剂量率控制水平进行参照。

当超出控制水平时，首先应暂停重离子治疗系统运行，以防止辐射剂量进一步增加，避免对人员和环境造成更大的危害。并暂停在该区域的所有辐射工作人员活动，包括辐射工作人员的操作、各人员的通行等，防止受到过量辐射照射。同时向本单位辐射安全管理部门以及用户单位辐射安全管理部门汇报监测结果超标情况。

然后检查监测仪器是否出现故障或异常，确定是否因监测仪器异常导致剂量率升高的问题。其次检查屏蔽墙、顶棚、防护门等屏蔽设施是否完好，是否存在裂缝、孔洞或其他损坏情况，导致辐射泄漏到屏蔽体外。最后排查其他因素，考

虑是否存在其他外部因素导致剂量率升高，如附近其他辐射源的影响、环境条件变化等。

在确认异常情况的原因后应及时采取整改措施，如检修监测仪器，增加局部屏蔽，调整装置工作状态、调整人员的工作流程和操作位置，避免人员长时间停留在辐射剂量较高的区域，减少人员受照剂量等。

在完成上述整改后，使用便携式监测仪表，按照原来的监测方法和点位，重新对环境地表  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率进行监测，确保监测结果符合屏蔽体外剂量率控制水平。如果整改后监测结果仍不达标，应进一步分析原因，采取更有效的措施，直至辐射水平满足要求。监测均需记录监测结果。

## 6.4.2 用户单位

### 6.4.2.1 环境监测

(1) 对辐射工作场所的辐射水平（X- $\gamma$  辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率等）进行监测；

(2) 对辐射工作场所机房四周屏蔽墙外 30 cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点开展 X- $\gamma$  辐射周围剂量当量率监测和中子剂量当量率监测；

(3) 安装调试阶段，在最大工况下，由辐射工作人员进行全面的辐射监测，评估辐射安全状况，确保辐射水平达标。

综上兰州泰基配备中子巡检仪和  $\gamma$  巡检仪，在安装调试和维修维护期间，定期对周围环境进行巡测。

### 6.4.2.2 工作场所监测

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

兰州泰基配备中子巡检仪和  $\gamma$  巡检仪，在安装调试和运行维护期间，定期对工作场所进行巡测。同时项目将设置固定式辐射监测仪实时监测，辐射监测数据接入辐射中央控制系统，实时监控。

表 6-4 用户单位小型化重离子治疗装置工作场所监测计划

| 监测方式                  | 监测对象 | 监测方式    | 监测项目                 | 监测点位                                               | 监测频次         |
|-----------------------|------|---------|----------------------|----------------------------------------------------|--------------|
| 自行监测                  | 外照射  | 便携式仪表巡测 | $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量率 | 环境敏感点                                              | 每月 1 次<br>巡测 |
|                       |      | 固定式仪表监测 |                      | 加速器主体建筑墙外 30 cm 处开展在线监测，选择主体建筑墙外、楼顶及厂界相应的关注点开展定点监测 | 实时           |
| 注：自行监测由兰州泰基和用户单位共同完成。 |      |         |                      |                                                    |              |

### 6.4.3 个人剂量监测

兰州泰基的辐射工作人员在工作期间必须佩带个人剂量计，并佩戴个人剂量报警仪。兰州泰基为这些工作人员建立档案，每次工作结束后，由专门的辐射安全员负责回收个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，作为下次工作时制定工作方案的依据。个人剂量计每季度委托有相关资质单位监测一次，并由专门的辐射安全员负责存档；个人剂量报警仪能够实时显示工作人员的累积受照剂量和场所的剂量率水平。

## 6.5 监测设备

本项目配备了与其辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，具体清单见表 6-5。可以满足调试及维修维护期间的需要。

表 6-5 辐射监测设备清单

| 名称                  | 型号             | 数量 | 监测对象       |
|---------------------|----------------|----|------------|
| 中子剂量当量（率）仪          | FH40G-X/FHT762 | 1  | 工作场所环境中子剂量 |
| X、 $\gamma$ 环境辐射监测仪 | BH3103C        | 1  | 工作场所环境伽马剂量 |

| 名称                       | 型号        | 数量    | 监测对象             |
|--------------------------|-----------|-------|------------------|
| 便携式 X- $\gamma$ 辐射剂量当量率仪 | 451P      | 2     | 工作场所环境伽马剂量和感生放射性 |
| 表面污染仪                    | RJ39-2100 | 1     | 检修后相关地面、表面的监测    |
| 个人剂量报警仪                  | DMC3000   | 30    | 个人剂量             |
| 个人剂量计                    | TLD       | 1 支/人 | 常规个人剂量监测         |

拟配备的辐射监测仪器设备的相关要求如下：

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

中子剂量当量率仪：能量响应：热中子~5GeV，测量范围：1nSv/h~100mSv/h；  
便携式 X-  $\gamma$  辐射剂量当量率仪：能量响应：25keV~3MeV，测量范围：10nGy/h~1mGy/h。

3) 仪表最低可测度数值应不大于 0.1 $\mu$ Sv/h；

4) 仪表需经剂量检定并在鉴定有效期内使用。

## 6.6 环保投资及竣工验收一览表

本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表和环保竣工验收一览表见表 6-6 和表 6-7。

**表 6-6 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表**

| 序号 | 项目     | 环境保护（辐射防护）措施                                                                             | 预计投资（万元） |
|----|--------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1  | 辐射安全管理 | 辐射安全管理机构：成立辐射安全防护领导小组<br>辐射安全管理制度：制定操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案，辐射事故应急预案等 | \        |
| 2  | 人员考核   | 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核                                                                        | 1        |
| 3  | 安全联锁   | 人身安全联锁系统（软硬件）、区域辐射监测                                                                     | 400      |

| 序号 | 项目            | 环境保护（辐射防护）措施                                | 预计投资（万元） |
|----|---------------|---------------------------------------------|----------|
|    | 设备、监测仪器和防护用品  | 系统（中子剂量探测器、伽马剂量探测器、个人剂量计、个人剂量报警仪等）、环境辐射监测系统 |          |
| 4  | 环境影响评价、竣工环保验收 |                                             | 80       |
| 总计 |               |                                             | 481      |

表 6-7 环保竣工验收项目一览表

| 序号 | 验收内容      | 验收要求                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----|-----------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 环保资料      | 本项目审批后的环境影响报告书、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2  | 辐射安全管理    | 建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 3  | 人员要求      | 1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名；<br>2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 4  | 电离辐射      | 屏蔽体外剂量率                                                          | 小型化重离子治疗装置四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶：剂量率水平不高于第 1.4.2 “辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平”章节的要求。                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 5  | 辐射防护与安全措施 | 重离子治疗系统                                                          | 1.辐射工作场所分区：<br>控制区：加速器大厅、束流输运隧道、终端和放射性固体废物暂存间；<br>监督区：上述各控制区屏蔽墙体外紧邻的场所。<br>2.人身安全联锁系统：由 PLC、出入管理设备、急停、清场按钮、紧急开门按钮、束流阻挡器等组成，且所有安全设备均能正常投入使用。<br>3.通风系统：小型化重离子治疗装置机房设置排风系统，根据项目实地情况设置所需的通风换气次数，测调中心内正常运行时为 0.5 次/h，事故情况下为 5 次/h。<br>4.场所辐射监测系统：安装在加速器大厅入口处、控制室、终端内和入口处，每个监测点一般由一台中子探测器和 $\gamma$ 探测器组成。根据各监测点剂量水平和中子能量选择不同灵敏度的辐射探测器。 |
| 6  | 放射性三废     | 废气                                                               | 测调中心放射性三废由兰州泰基负责处置，销售（含建造）部分则由用户单位负责处置                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|    |           | 废水                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|    |           | 固体废物                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 7  | 辐射监测      | 工作场所/环境监测                                                        | 制定辐射监测计划，在安装调试和运行维护期间，定期对工作场所及周围环境进行巡测。                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|    |           | 个人剂量监测                                                           | 每位辐射工作人员配置累积式个人剂量监测计监测，委托有资质的单位监测，每季度进行监测，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。                                                                                                                                                                                                                                                             |
|    |           | 监测设备                                                             | 配备中子巡检仪、 $\gamma$ 巡检仪、个人剂量计和直读式个人剂量报警仪，建立个人剂量档案和职业病健康档案。                                                                                                                                                                                                                                                                           |

## 6.7 申请者从事辐射工作能力评价

兰州泰基离子技术有限公司（以下称“建设单位”）成立于 2002 年 4 月，是中国科学院近代物理研究所孵化的高新技术企业。建设单位现有员工近 500 人，主要由本科及以上学历人员构成；是目前国内唯一拥有医用重离子加速器（即碳离子治疗系统）设计、生产、调试、运维资质和能力的企业；建设单位先后通过 ISO9001、13485 质量管理体系认证，并取得Ⅲ类医疗器械生产和经营许可证、I 类射线装置辐射安全许可证等相关资质，完全具备从事本项目辐射工作的能力。

根据中华人民共和国《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第二章第十二条之规定，“辐射工作单位组织编制或者填报环境影响评价文件时，应当按照其规划设计的放射性同位素与射线装置的生产、销售、使用规模进行评价。前款所称的环境影响评价文件，除按照国家有关环境影响评价的要求编制或者填报外，还应当包括对辐射工作单位从事相应辐射活动的技术能力、辐射安全和防护措施进行评价的内容”。本报告依据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第二章第十六条对辐射安全许可证申领单位的要求，对兰州泰基从事小型化重离子治疗装置销售（含建造）和使用活动的技术能力、辐射安全和防护措施等进行分析评价如下。

### 6.7.1 辐射安全与环境保护管理

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行），申请者应当设置专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少安排 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

同时，根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40 号）的规定，销售（含建造）、使用 I 类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安

全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。

兰州泰基成立了辐射安全管理委员会，总经理担任主任委员，分管安全的副总经理和总经理助理担任副主任委员，辐射防护负责人由注册核安全工程师担任。

综合办公室安全监管组是辐射安全管理的执行部门，负责全公司辐射安全工作的日常管理。

### 6.7.2 辐射工作人员培训

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第18号，2011年5月1日起施行），申请者应对从事辐射工作的人员进行辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训，并进行考核，合格后方可上岗。

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

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

此外，按照公司年度培训计划和工作需要，开展了内部辐射安全相关的培训，包括公司辐射安全制度、辐射安全基础知识、职业健康等内容；对新员工进行了安全教育和培训。在严格落实人员招聘计划和培训考核计划后，兰州泰基的辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

### 6.7.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第18号，2011年5月1日起施行），申请者射线装置生产、调试场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

兰州泰基测调中心内调试及维修维护涉及开机出束属于辐射活动，拟销售

（含建造）的小型化重离子治疗装置销售环节不涉及开机出束，不属于辐射活动，其安装调试和运行维护场所为用户单位使用场所。兰州泰基的工作人员在进行设备安装调试前，需确认用户单位取得相应的环评批复，且其安装调试场所的屏蔽设计、辐射剂量率水平等指标符合环境影响评价文件的相关要求后，方可进行安装调试的带束工作。

小型化重离子治疗装置设有完备的安全联锁系统。开机出束调试开始前，建立调试区域的辐射剂量监测；检查安全联锁系统是否能正常工作。确认安全联锁系统能正常工作后，进行清场、警报、锁门等安全工作，确保加速器大厅/主机室内无人后方可开始调试。调试过程中，场所设有警示灯，张贴有电离辐射警示标志，并有专人看管，防止无关人员闯入。

兰州泰基采取的以上安全防护措施，基本能够保证其辐射工作场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

#### 6.7.4 个人防护用品及监测仪器

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

兰州泰基为本项目从事安装调试和维修维护的辐射工作人员配备个人剂量计和个人剂量报警仪，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，并佩戴个人剂量报警仪。其中，个人剂量计每季度委托有相关资质的单位进行监测一次，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。

同时，为辐射工作人员配备工作服、手套和鞋套等个人防护用品，保证工作人员的安全。

兰州泰基配备 $\gamma$ 巡检仪及中子巡检仪，在设备运行过程中，定期对辐射工作场所的辐射水平进行巡测。

综上所述，本项目配备的个人防护用品及监测仪器能够满足相关要求。

### 6.7.5 规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（中华人民共和国环境保护部令第18号，2011年5月1日起施行），申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

为认真贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，从工作的实际出发，兰州泰基建立健全本单位的辐射安全规章制度。目前已制定了《辐射安全与防护管理大纲》、《辐射安全管理制度》、《活化部件检修防护管理制度》、《放射性废物处置管理制度》、《辐射安全与防护设施维护检修制度》、《辐射监测方案》、《调试阶段辐射安全管理制度》、《辐射事故应急预案》、《直线注入器辐射安全管理制度》、《直线注入器辐射监测方案》及《射线装置台账管理制度》等。

兰州泰基将根据本项目建设内容和特点，制定和完善操作规程、辐射安全防护、辐射工作人员管理考核、设备检修维护、监测方案、辐射事故应急预案、放射性废物处理等相关辐射安全管理制度，按要求继续完善并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度基本能够满足相关要求。

### 6.7.6 辐射事故应急预案

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

兰州泰基已经制定了《辐射事故应急预案》，每年进行一次辐射事故应急演练，同时辐射事故应急预案与《甘肃省辐射事故应急预案》、《兰州新区突发环境事件应急预案》相匹配，同时与用户单位所在地政府部门的辐射事故应急预案相联系。

应急预案包括应急组织体系及其职责任务、事故类型及相应应急措施、应急响应程序、发生辐射事故时向相关部门报告的程序、内容以及报告的部门、事故

的处理程序以及各部门的联系方式等方面的内容，应具有可操作性，应准备充足的辐射事故应急监测、救援等方面的专用装备、器材和工具等，并定期组织开展辐射事故应急演练，增加应急工作人员的实战经验。确保一旦发生辐射事故，能立即启动辐射事故应急预案，并采取相应的应急措施。能有序、迅速地采取正确的处理措施，缓解事故后果，控制辐射事故的发展，将事故对人员、财产和环境的损失减少到最低限度。

#### 6.7.7 对用户单位的要求

兰州泰基在销售（含建造）小型化重离子治疗装置时，将对用户单位使用该设备的资质进行严格审核。若用户未取得环评批复，提示用户向当地生态环境主管部门办理使用拟销售的小型化重离子治疗装置的环评审批手续。确认用户单位取得使用拟销售（含建造）的小型化重离子治疗装置的环评批复，且用户单位安装调试场所符合要求后，方可安排技术人员进行设备的现场安装调试。

此外，在用户单位使用拟销售（含建造）的小型化重离子治疗装置之前，兰州泰基应对用户单位相关辐射工作人员进行培训，培训的内容包括拟销售（含建造）的小型化重离子治疗装置的工作原理及应用、操作规程等方面的内容。

兰州泰基对用户单位在使用拟销售（含建造）的小型化重离子治疗装置过程中的安全操作、拟销售（含建造）的小型化重离子治疗装置安全性能、安全联锁系统的到位情况以及辐射安全管理措施的落实情况进行监督。

#### 6.7.8 辐射工作能力综合评价

综上所述，兰州泰基在严格落实制定的人员培训计划后，其辐射工作人员的能力能够达到相关要求；兰州泰基设立的辐射安全管理委员会，完善后能够做到职责和分工明确，满足管理要求；兰州泰基在射线装置安装调试场所采取的安全防护措施，能够满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。配备了工作人员个人防护用品和辐射监测仪表；兰州泰基将进一步完善相关辐射

安全管理制度，按要求制定完成并严格落实以后，能够确保小型化重离子治疗装置在本项目辐射工作过程中的辐射安全；

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

## 7. 利益-代价分析

### 7.1 利益分析

重离子治疗系统是当前国际上肿瘤放射治疗最现实和最先进的主流装置，临床结果显示相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织包绕的肿瘤，重离子治疗显示出较大的优越性:精确度高、治愈率高、副作用小。

本项目的建设将具有较大的社会效益，主要体现在以下几个方面:

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

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

### 7.2 代价分析

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

少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，对工作人员和周围公众受到少量的辐射照射;少量的放射性物质和有害气体进入大气环境和水环境;每年将有少量的放

射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，给环境带来的这些影响均低于国家标准中规定的限值，其影响都是可以接受的。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于广大人民。

## 8. 结论和承诺

### 8.1 结论

本项目在运行过程中严格遵守《中华人民共和国环境保护法》、生态环境部、地方生态环境主管部门颁布的有关法规标准，主要的环境影响评价结论如下：

(1) 兰州泰基拟开展 HiTS 400S 小型化重离子治疗装置销售（含建造）、安装调试以及运行维护工作（安装调试以及运行维护包括测调中心及用户单位）。小型化重离子治疗装置属于成型设备，质子最大能量 230MeV、氦离子最大能量 230MeV/u、碳离子最大能量 430MeV/u、氧离子最大能量 430MeV/u，离子源提供的  $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $H^{+}$ 、 $He^{2+}$  离子束。兰州泰基申请的重离子治疗系统年最大销售（含建造）量为4台，建设单位地址位于兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号。本项目的建设符合国家相关的法律规定和国家产业政策。建设项目目的明确、理由正当，同时具备了技术、人员等条件。

(2) 兰州泰基在小型化重离子治疗装置销售（含建造）过程中不会开机出束，因此不会对工作人员和环境造成辐射影响。小型化重离子治疗装置的安装调试和运行维护环节，加速器开机出束产生的瞬发辐射和感生放射性为本项目主要的污染源。

(3) 兰州泰基会为其用户推荐该装置的结构布置和建筑布局的基础方案和基本要求。同时，用户单位在使用小型化重离子治疗装置前，需要进行环境影响评价和安全分析，并对其使用场所建筑墙体的屏蔽设计进行评价，确保其能够满足小型化重离子治疗装置屏蔽设计标准的最低要求。

(4) 本项目位于兰州市兰州新区中川园区汉水街 3260 号。项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响射线装置稳定运行和安全使用的颠覆性因素。结合本项目特征辐射污染因子和电离辐射环境影响评价范围，区域周边社会环境相对简单，评价范围内无居民区、学校等敏感目标，条件较好。同时本项目所在地块已取得用地批复，项目的选址可行，平面布局合理。

(5) 评价结果表明, 本项目辐射工作人员和公众的年最大有效剂量为均低于本次评价确定的  $5\text{mSv/a}$  的职业照射剂量约束值和  $0.1\text{mSv/a}$  的公众照射剂量约束值。项目对工作人员和公众所致附加辐射影响可以接受。

(6) 本项目辐射工作场所设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施, 以尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价, 本项目对工作人员和公众的辐射影响很小, 满足国家相关标准要求。本项目对国家战略需求、探索前沿科学研究所带来的利益是大于可能引起的辐射危害的。因此, 本项目核技术利用实施活动是正当的。

(7) 小型化重离子治疗装置安装调试和运行维护过程中可能发生的事故主要是安装调试和运行维护过程中, 工作人员在加速器开机出束的情况下误入加速器大厅(含束流输运系统)或科研终端及治疗室内造成的人身伤害。小型化重离子治疗装置设计有功能齐全, 具有安全冗余的高安全等级的人身安全联锁系统, 采用清场搜索、紧急停机、警报装置等安全设备和措施, 能够保证工作人员在安装调试和运行维护过程中的安全。此外, 兰州泰基制定了辐射事故应急预案并拟制定和完善一系列辐射安全管理制度, 通过加强管理, 严格遵守各种规章制度和操作规程, 采取有效的事故预防措施, 可有效防止事故的发生, 减小和缓解事故的影响。兰州泰基在安装调试和运行维护期间的辐射安全与防护措施基本满足相关标准要求。

(8) 对兰州泰基辐射工作能力的分析评价表明, 兰州泰基在严格落实制定的人员招聘及培训计划后, 其辐射工作人员的能力能够达到相关要求; 兰州泰基设立专门的辐射安全与环境保护管理机构, 完善后能够做到职责和分工明确, 满足管理要求; 兰州泰基在射线装置调试场所采取的安全防护措施, 能够满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。配备了工作人员个人防护用品和辐射监测仪表; 兰州泰基正在建立相关辐射安全管理制度, 按要求制定完成并严格落实以后, 能够确保小型化重离子治疗装置安装调试和运行维护工作中的安全; 在严格按照国家相关法律法规以及技术规范制定管理制度, 完善以上提出各项要求后, 能够满足国家相关的管理及技术层面要求。

(9) 本项目参照《环境影响评价公众参与办法》的要求, 主要通过网络公示、报

纸媒体公示、现场粘贴的方式进行了公众参与，期间均未收到社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈意见。

综上所述，本项目在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，本项目的建设对环境的影响符合环境保护的要求，故从环境影响的角度考虑，本项目的建设是可行的。

## 8.2 承诺

为了保证人员和环境安全，兰州泰基承诺：

（1）兰州泰基在销售（含建造）小型化重离子治疗装置时，若用户未取得环评批复，提示用户向当地生态环境部门办理使用小型化重离子治疗装置的环评审批手续。确认用户单位取得小型化重离子治疗装置的环评批复，且用户单位安装调试场所符合要求后，方可安排技术人员进行设备的现场安装调试。

（2）严格遵守国家相关规定，在取得环评批复后方可开展小型化重离子治疗装置销售（含建造）和使用活动。

（3）所有辐射工作人员都参加辐射安全与防护考核。

（4）项目建设和运行过程中，加强内部监督管理，接受生态环境部门的监督检查。

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

（6）辐射工作人员年受照剂量不超过 5mSv。

（7）绝不弄虚作假和违规操作。