核技术利用建设项目

南京明基医院二期新建工程（肿瘤中心）建设项目环境影响报告书

（公示版）

建设单位：南京明基医院有限公司

环评单位：中国原子能科学研究院

2026 年 8 月

生态环境部监制

核技术利用建设项目

南京明基医院二期新建工程（肿瘤中心）建设项目环境影响报告书

建设单位名称：南京明基医院有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）：罗翠凌

通讯地址：南京市建邺区河西大街 71 号

邮政编码：210026　　**联系人：**徐思悦

[redacted]

目录

1 概述 1
1.1 项目名称、地点 1
1.2 项目概况 1
1.2.1 建设单位概况 1
1.2.2 项目背景、意义 3
1.2.3 本次环评内容 4
1.2.4 产业政策和规划符合性 6
1.2.5 周围环境概况 9
1.2.6 核技术利用现状 13
1.3 评价依据 25
1.3.1 法律、法规和规章 25
1.3.2 技术导则、标准 27
1.3.3 其它文件、资料 28
1.4 评价标准 28
1.4.1 剂量限值和剂量约束值 28
1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 29
1.4.3 放射性废物管理要求 31
1.4.4 其他标准 33
1.5 评价范围和保护目标 33
1.5.1 评价范围 33
1.5.2 环境保护目标 34
2 自然环境与社会环境状况 37
2.1 地理位置 37
2.2 自然环境状况 37
2.2.1 地形地貌 37
2.2.2 气候气象 37
2.2.3 水文特征 38

2.2.4 地质地震 38
2.2.5 土壤植被 39
2.3 社会环境概况 39
2.3.1 人口分布 39
2.3.2 社会发展 40
2.3.3 文化教育 40
2.3.4 医疗保健 41
2.4 环境质量和辐射现状 41
2.4.1 环境天然放射性水平 41
2.4.2 辐射环境质量现状监测与评价 42
2.4.3 场址适宜性评价 46
3 工程分析与源项 47
3.1 项目规模与基本参数 47
3.1.1 项目规模 47
3.1.2 基本参数 52
3.2 工艺设备 53
3.2.1 质子治疗装置 53
3.2.2 硼中子俘获治疗系统 74
3.2.3 医用电子直线加速器 93
3.2.4 模拟定位 CT 机 98
3.3 辐射源项分析 100
3.3.1 质子治疗装置 100
3.3.2 硼中子俘获治疗系统（BNCT） 130
3.3.3 医用电子直线加速器 140
3.3.4 模拟定位 CT 机 143
3.4 废弃物 143
3.4.1 质子治疗装置 143
3.4.2 硼中子俘获治疗系统（BNCT） 144

3.4.3 医用电子直线加速器 144
3.4.4 模拟定位 CT 机 144
4 辐射安全与防护设施 145
4.1 质子治疗装置 145
4.1.1 场所布局与分区 145
4.1.2 辐射屏蔽 149
4.1.3 辐射安全与防护措施 158
4.1.4 放射性三废处理 180
4.1.5 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析 184
4.2 硼中子俘获治疗系统（BNCT） 191
4.2.1 场所布局与分区 191
4.2.2 工作场所人流物流路径 193
4.2.3 辐射屏蔽 201
4.2.4 人身安全联锁系统 207
4.2.5 通风系统 217
4.2.6 放射性三废处理 220
4.3 医用电子直线加速器 224
4.3.1 辐射工作场所分区 224
4.3.2 机房布局与辐射屏蔽 226
4.3.3 拟采取的安全防护措施 227
4.3.4 通风系统 231
4.3.5 放射性三废 233
4.4 III 类射线装置 233
4.4.1 辐射工作场所分区 233
4.4.2 机房布局和辐射屏蔽 234
4.4.3 拟采取的其他安全与防护措施 234
4.5 服务期满后的环境保护措施 235
5 环境影响分析 236

5.1 建设阶段对环境的影响.....236
5.2 质子治疗装置.....236
5.2.1 正常运行的环境影响.....236
5.2.2 辐射事故工况下的环境影响.....262
5.3 硼中子俘获治疗系统.....264
5.3.1 正常运行的环境影响.....264
5.3.2 辐射事故工况下的环境影响.....279
5.4 医用电子直线加速器.....282
5.4.1 正常运行期间环境影响分析.....282
5.4.2 事故影响分析.....304
5.5 III 类射线装置.....305
（1）事故类型.....306
（2）风险防范措施.....306
6 辐射安全管理.....307
6.1 辐射安全与环境保护管理机构.....307
6.1.1 机构和人员.....307
6.1.2 辐射工作人员管理.....307
6.2 辐射安全管理规章制度.....308
6.3 辐射监测.....308
6.3.1.1 工作场所监测.....308
6.3.1.2 环境监测.....308
6.3.1.3 个人剂量监测.....311
6.3.1.4 监测设备.....311
6.4 辐射事故应急预案.....312
6.5 年度评估报告.....313
6.6 申请者从事辐射工作能力评价.....314
6.6.1 辐射安全与环境保护管理.....314
6.6.2 辐射工作人员考核.....314

6.6.3 工作场所的安全防护措施 315
6.6.4 个人防护用品及监测仪器 315
6.6.5 规章制度 316
6.6.6 辐射事故应急 316
6.6.7 辐射工作能力综合评价 316
6.7 环保投资一览表 317
6.8 竣工环保验收一览表 318
7 利益-代价分析 320
7.1 利益分析 320
7.2 代价分析 320
（1）社会代价 320
（2）经济代价 321
（3）环境代价 321
7.3 正当性分析 321
8 公众参与 322
8.1 公众参与方案 322
8.2 信息公告 322
8.3 公众参与的结果 322
9 结论 323
9.1 项目工程概况 323
9.2 实践的正当性 323
9.3 选址、布局合理性分析 323
9.4 辐射安全与防护措施 323
9.5 辐射环境影响分析 324
9.6 辐射安全管理 324
9.7 公众参与 325
9.8 总结 325
9.9 承诺与建议 325

9.9.1 承诺 325
9.9.2 建议 325



1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：南京明基医院二期新建工程（肿瘤中心）建设项目

建设地点：南京市建邺区河西大街 71 号

建设性质：新建

建设单位：南京明基医院有限公司

建设规模：南京明基医院有限公司（以下简称医院）拟在南京明基医院院区内东南侧肿瘤中心新增使用 1 套质子治疗装置（I 类射线装置）、1 套硼中子俘获治疗系统（II类射线装置）、1 台医用电子直线加速器（II 类射线装置）及 1 台模拟定位 CT 机（III 类射线装置）。

[redacted]

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

南京明基医院是台湾明基佳世达集团与南京市国资集团经国家卫生部和商务部批准于 2003 年共同投资设立。2015 年经江苏省卫计委及南京市投促委批准成为独资经营医院。2022 年获评三级甲等综合医院。医院致力于医疗、教学、科研、运营四位一体的学院型医院建设。是南京医科大学附属医院，东南大学医学院教学医院，南京中医药大学教学医院。

南京明基医院坐落在南京建邺区河西大街 71 号，占地 600 亩，一期占地 200 亩，建筑面积 27 万平方米，设置床位 1500 床。依三级综合性医院标准建设，

2008 年正式运行。二期于 2025 年 2 月开始运行，项目总建筑面积约 10.7 万㎡。规划床位 1000 张。截止目前医院总投资额已达 20 亿元人民币。在职员工现有 2300 余人。开业迄今十八年，已为一千五百多万南京地区民众提供台湾模式优质的医疗服务，年度门、急诊总量逾百余万人次，出院总量逾 5 万余人次。其诚信医疗和全人服务的理念赢得广大民众的信赖和卫生行政部门的好评。

院内设有临床科室 43 个，医技科室 12 个。现有国家临床重点专科 1 个；江苏省省级临床重点专科 6 个；南京市医学重点专科 16 个。建立了一批以肾内科、耳鼻咽喉科头颈外科、胰腺病医院、肠瘘与腹腔感染中心、神经外科、骨科为代表的特色学科。

汇聚大陆、台湾及海外医疗专家，其中享受国务院特殊津贴专家 8 人，江苏省有突出贡献中青年专家 3 人，江苏省双创人才 3 人，江苏省卫生创新团队 2 个，江苏省特聘医学专家 4 人，博士生导师 7 人，硕士生导师 18 人。江苏省医院协会副会长单位。中国非公医疗机构协会副会长单位。

医院是江苏省博士后创新实践基地、江苏省血液净化技术培训基地、江苏省限制类技术培训基地（鼻科内镜诊疗技术、咽喉科内镜诊疗技术）、江苏省康复治疗师规范化培训实践基地、美国心脏协会（AHA）认证的心血管急救培训中心、南京市市级专科护士培训基地。为首批国家胸痛中心认证单位，通过南京市卒中中心认证，被授予南京市创伤救治中心。获评“全国健康管理示范基地”，为国家药物临床试验机构，检验科通过 ISO15189 评审认可。

纳入南京医科大学第四临床医学院管理，教学职能覆盖院校教育、毕业后医学教育、继续教育，医学教育全阶段。医院每年接受理论见习学生、实习生、研究生、住院医师、进修生等来院学习人员五百余人。组建专职科研队伍，投入千余万元建设科研公共实验室，为科研创新提供了坚实的平台支撑，获批南京市咽喉头颈肿瘤医学重点实验室、南京医科大学外科感染与免疫临床转化研究中心。连续多年获国家自然科学基金、江苏省自然科学基金项目资助，在研各类纵横向课题百余项，发表高水平论文百余篇。

2025 年获艾力彼全国社会办医单体医院 100 强第六名。江苏省第一名。

是医保定点与商保合作医疗机构。医院于开院之初即成立国际医疗中心，提供全方位尊享特需高端医疗服务。同时，医院已与 50 余家国内外商业保险机构合作，提供便利的保险责任内免现金直付服务。建立台胞医疗服务中心，为台胞提供全方位医疗保障。南京市首家开通医保智捷付，医保刷脸付、移动付、互联网付、信用付、亲情付等医保移动脱卡支付全覆盖。

医院积极承担社会责任。与建邺区、雨花区、六合区等二十余家社区卫生机构建立医联体。并与南京周边区县及城市建立医疗合作。

1.2.2 项目背景、意义

根据世界卫生组织国际癌症研究机构（IARC）发布的 2022 年全球最新癌症数据，中国已经成为了名副其实的“癌症大国”。2022 年全球新发癌症病例 1996 万例，死亡 974 万例。其中中国新发癌症病例 482 万例（24.15%），死亡病例 321 万例（32.96%）。同期美国新发癌症病例 237 万例（11.87%），而死亡仅 64 万例（6.57%）。同期死亡人数与新发肿瘤患者人数比为中国 66.60%，美国为 27.00%。上述数据显示，在肿瘤的新发病例数、死亡数癌症中国已经是居于世界的第一位，其年度死亡与新发病例之比明显高于美国。研究表明，中国与美国的肿瘤新发原因及疾病构成比、死亡原因及疾病构成比有一定的差异，其中的预防与治疗的主要手段上的差异占据了比较高的比例。尤其是肿瘤放射治疗的设备普及率、设备种类的差异是主要原因。对于中国而言，将癌症预防和治疗干预纳入卫生计划，将有助于降低未来的癌症负担，同时推动抗癌创新药物的发展，“预防+治疗”双管齐下，才能更好的降低癌症负担，护卫人民健康。

放射治疗作为肿瘤治疗的主要方法，在恶性肿瘤的治疗中发挥越来越重要的作用。在发达国家，55%的恶性肿瘤可得到治愈，27%是通过手术而获得治愈，而放射治疗可使22%的恶性肿瘤患者获得长期生存，在美国、日本等国家，接受放疗者约占当年新发病例的50～60％。在我国这个比例还仅为不足30%。预计未来20年，中国接受放射治疗的癌症患者将逐步增加。

目前，江苏省乃至长三角地区，同时拥有质子与硼中子两类尖端放疗设备的

综合性医疗中心尚属空白。为提升区域肿瘤综合诊治能力的迫切需要，优化重大医疗资源布局，缓解群众跨区域就医负担的迫切需要，在南京建邺区建设该中心，能够优化全省高端医疗资源布局，使江苏省及周边区域患者就近即可获得国际最前沿的放疗技术服务，极大缓解群众“看病难、看病贵”的问题，是实实在在的民生工程、健康福祉工程。同时，高端精准放疗中心的建立，将极大增强南京明基医院乃至南京市、江苏省在国内外医疗卫生领域的影响力与吸引力。它不仅能为在苏工作生活的外籍人士、海外华侨提供与国际接轨的顶尖医疗服务，也能吸引国内其他地区的患者前来就医，带动医疗旅游、专业培训、国际学术交流等相关产业发展，对于提升南京的城市国际化水平、优化营商环境、建设吸引和集聚人才的平台具有显著推动作用，受到省、市、区各级领导的大力支持。

南京明基医院作为大型三级甲等综合医院，具备较强的多学科协作诊疗基础和丰富的肿瘤综合治疗经验。同时配置质子治疗装置与硼中子俘获治疗系统（BNCT），能够构建起覆盖更广谱肿瘤类型、适应更复杂病情需求的国际领先精准放疗体系，为患者提供“一站式”最佳治疗方案选择，显著提升区域对疑难复杂肿瘤的救治能力。

1.2.3 本次环评内容

本项目位于南京市建邺区河西大街 71 号，涉及核技术利用的建设内容包括肿瘤中心内使用的 1 套质子治疗装置、1 套硼中子俘获治疗系统（以下简称 BNCT）、1 台医用电子直线加速器（以下简称直加）和 1 台模拟定位 CT 机。项目占地面积 3500m^2，建筑面积 30500m^2。

具体如下：

（1）质子治疗装置

拟在肿瘤中心地下二层至地上一层使用 1 套中广核医疗科技（绵阳）有限公司生产的 BraggCure Proteus PLUS 型质子治疗装置，包括回旋加速器、能量选择系统、束流传输系统及治疗室终端（3 间旋转束治疗室）。加速离子种类为质子，最高能量为 230MeV，属于I类射线装置。并在每间治疗室各配置 1 套 X 射线影像

系统（每套 X 射线影像系统设有 2 支 X 光球管，最大管电压 150kV，最大管电流 800mA），属于 III 类射线装置。

（2）BNCT

拟在肿瘤中心地下一层至地下一层使用 1 套禾荣医疗器械（南京）有限公司生产[redacted]硼中子俘获治疗系统（BNCT），质子束流最高能量 30MeV，[redacted]，由质子加速器、射束传输线、中子生成器及治疗室终端（共两间治疗室）组成，属于II类射线装置。

（3）医用电子直线加速器

拟在肿瘤中心的地下一层使用 1 台医用电子直线加速器，最大 X 射线能量为 10MV，1m 处等中心点最大输出剂量率为 2400cGy/min。属于II类射线装置。

（4）模拟定位 CT 机

拟在肿瘤中心的地上一层使用 1 台模拟定位 CT 机，最大管电压为 150kV，最大管电流为 1300mA。属于 III 类射线装置。

（5）小结

根据《射线装置分类》的规定，本项目拟使用的质子治疗装置属于 I 类射线装置，BNCT、直加属于 II 类射线装置，模拟定位 CT 机属于 III 类射线装置。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的规定，本项目环境影响评价文件类别确定为环境影响报告书。中国原子能科学研究院受建设单位的委托，负责本项目的环境影响评价工作，委托书见附件 2。

1.2.4 产业政策和规划符合性

1.2.4.1 产业政策符合性分析

根据《产业结构调整指导目录》（2024 年本），本项目属于其中**鼓励类**第三十七项“**卫生健康**”第 1 条“ 医疗服务设施建设”项目，本项目建设符合国家产业政策。

1.2.4.2 规划符合性分析

（1）国土空间规划符合性分析

根据《南京市国土空间总体规划（2021 年-2035 年）》的要求，全市耕地保有量 1386.47 平方千米（207.97 万亩）。永久基本农田保护任务 20.00 平方千米（3.00 万亩）。生态保护红线面积 496.64 平方千米。主要集中分布于六合、江宁、溧水、高淳、浦口等区。城镇开发边界 1492.53 平方千米。

本项目位于南京市建邺区河西大街 71 号，不占用基本农田，不在生态保护红线范围内，位于城镇开发边界范围内，符合《南京市国土空间总体规划（2021 年-2035 年）》要求。

（2）《南京市总体规划》（2007-2030）符合性分析

根据《南京市总体规划》（2007-2030），中心城区由主城和东山、仙林、江北三个副城构成，是南京都市区的核心区，总面积约 846 平方千米，其中规划建设用地约 652 平方千米，约占中心城区总面积的 77.1%，绿色生态用地约占中心城区总面积的 22.9%。

在医疗卫生中提到规划目标：为优先保障和发展基本医疗，加强农村卫生与社区卫生服务设施配套，加强急救医疗网络建设，完善大型医院布局，将南京建成全国一流的医疗中心，实现人人享有基本医疗卫生服务目标

本项目建设于南京明基医院二期用地内，完善“三甲”医疗服务，建设“高水平”医疗园区。综上，本项目的建设符合《南京市总体规划》（2007-2030）。

（3）“三线一单”符合性分析

1）生态保护红线

对照《江苏省生态空间管控区域规划》（苏政发〔2020〕1 号）、《省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》（苏政发〔2018〕74 号），本项目位于南京市建邺区黄山路以东、河西大街以南、泰山路以西、嘉陵江东街以北范围内，距离项目最近的生态空间管控区为项目所在地南侧约 2.95km 的秦淮河（南京市区）洪水调蓄区，距离项目最近的国家级生态保护红线为项目所在地西侧约 2.16km 的夹江饮用水水源保护区（建邺区），本项目不在《江苏省生态空间管控区域规划》、《江苏省国家级生态保护红线规划》中的管控范围内，因此，本项目符合生态保护红线规划要求。

2）资源利用上线

本项目位于南京市建邺区黄山路以东、河西大街以南、泰山路以西、嘉陵江东街以北范围内，在规划用地范围内，用地性质为医疗卫生用地；资源消耗主要体现在水、电等利用上，区域环保基础设施较完善，用水来源为市政自来水，当地自来水厂供水能够满足本项目新鲜水使用要求；用电由市供电公司电网接入；天然气由燃气公司提供、管道直接接入。本项目通过采用节水、节能设备等措施，对能源消耗数据进行收集与处理，实现运营过程优化控制。本项目在区域规划划定的资源利用上线内所占比例很小，不会达到资源利用上线。本项目消耗一定的电、水等资源，项目资源消耗量较区域消耗总量很小，符资源利用上线要求。

3）环境质量底线

水环境： 全市水环境质量总体状况为优，纳入江苏省“十四五”水环境考核目标的 42 个地表水断面水质优良(《地表水环境质量标准》III 类及以上)比例 100%，无丧失使用功能(劣 V 类)断面。全市主要集中式饮用水水源地水质持续优良，逐月水质达 III 类及以上，达标比例为 100%。长江南京段干流水质总体状况为优，5 个监测断面水质均达到 I 类。全市 18 条省控入江支流，水质优良比例为 100%。其中 8 条水质为 I 类，10 条水质为 III 类，与上年相比，水质无明显变化。秦淮河干流水质总体状况为优，6

个监测断面中，2 个水质为 I 类，4 个水质为 I 类，水质优良比例为 100%，与上年相比，水质状况无明显变化。秦淮新河水质总体状况为优，2 个监测断面水质均为 I 类，与上年相比，水质状况无明显变化。滁河干流南京段水质总体状况为优，5 个监测断面中，1 个水质为 I 类，4 个水质为 II 类，水质优良比例为 100%，与上年相比，水质状况无明显变化。金川河水质状况为良好，水质为 II 类。与上年相比，水质状况略有下降。玄武湖水质为 IV 类。与上年相比，水质状况无明显变化。固城湖和石臼湖水质均为 III 类。与上年相比，水质状况均无明显变化。全市 5 个主要湖泊中，按综合营养状态指数评价，莫愁湖、金牛湖和固城湖处于中营养水平，玄武湖和石臼湖处于轻度富营养水平。与上年相比，富营养化水平均无明显变化。

大气环境：根据实况数据统计，全市环境空气质量达到二级标准的天数为 319 天，同比增加 5 天，达标率为 87.4%，同比增加 1.6 个百分点。其中，达到一级标准天数为 114 天，同比增加 2 天；未达到二级标准的天数为 46 天，主要污染物为 O_3 和 $PM_{2.5}$。各项污染物指标监测结果：$PM_{2.5}$ 年均值为 27.1μg/m³，达标，同比下降 4.2%；PM_{10} 年均值为 47μg/m³，达标，同比上升 2.2%；NO_2 年均值为 23μg/m³，达标，同比下降 4.2%；SO_2 年均值为 6μg/m³，达标，同比持平；CO 日均浓度第 95 百分位数为 0.9mg/m³，达标，同比持平；O_3 日最大 8 小时浓度第 90 百分位数为 159μg/m³，达标，同比下降 1.9%，超标天数 32 天，同比减少 6 天。

声环境：全市监测区域噪声环境点 534 个。城区区域声环境均值 55.0dB，同比下降 0.1dB；郊区区域噪声环境均值 52.7dB，同比上升 0.4dB。全市监测道路交通声环境点 247 个。城区道路交通声环境均值为 66.8dB，同比下降 0.3dB；郊区道路交通声环境均值 64.8dB，同比下降 0.9dB。全市功能区声环境监测点 20 个，昼间达标率为 96.9%，夜间达标率为 90.9%。

综上，在落实本项目非放部分环境影响报告书提出的风险防范措施、环境污染治理和环境管理措施的前提下，本项目不会突破环境质量底线。

4）环境准入负面清单

本项目行业类别为 8411 综合医院，是一项民生实事工程，不属于《南京市建设项

目环境准入暂行规定》（宁政发[2015]251 号）中禁止准入的行业。

1.2.5 周围环境概况

本项目选址位于南京市建邺区河西大街 71 号南京明基医院院区内。地理位置图见图 1-1，项目周边关系见图 1-2，总体平面布局见图 1-3。

质子治疗装置位于肿瘤中心的西南侧，硼中子俘获治疗系统位于肿瘤中心的东北侧，医用电子直线加速器位于肿瘤中心西侧，模拟定位 CT 机位于肿瘤中心的中部。项目整体均在院区内部，其中西侧为特需治疗中心与院区道路相隔，西北侧为四大中心专科楼与院区道路相隔，东北侧为后勤动力中心与院区内道路相隔、东侧及东南侧均为空地。

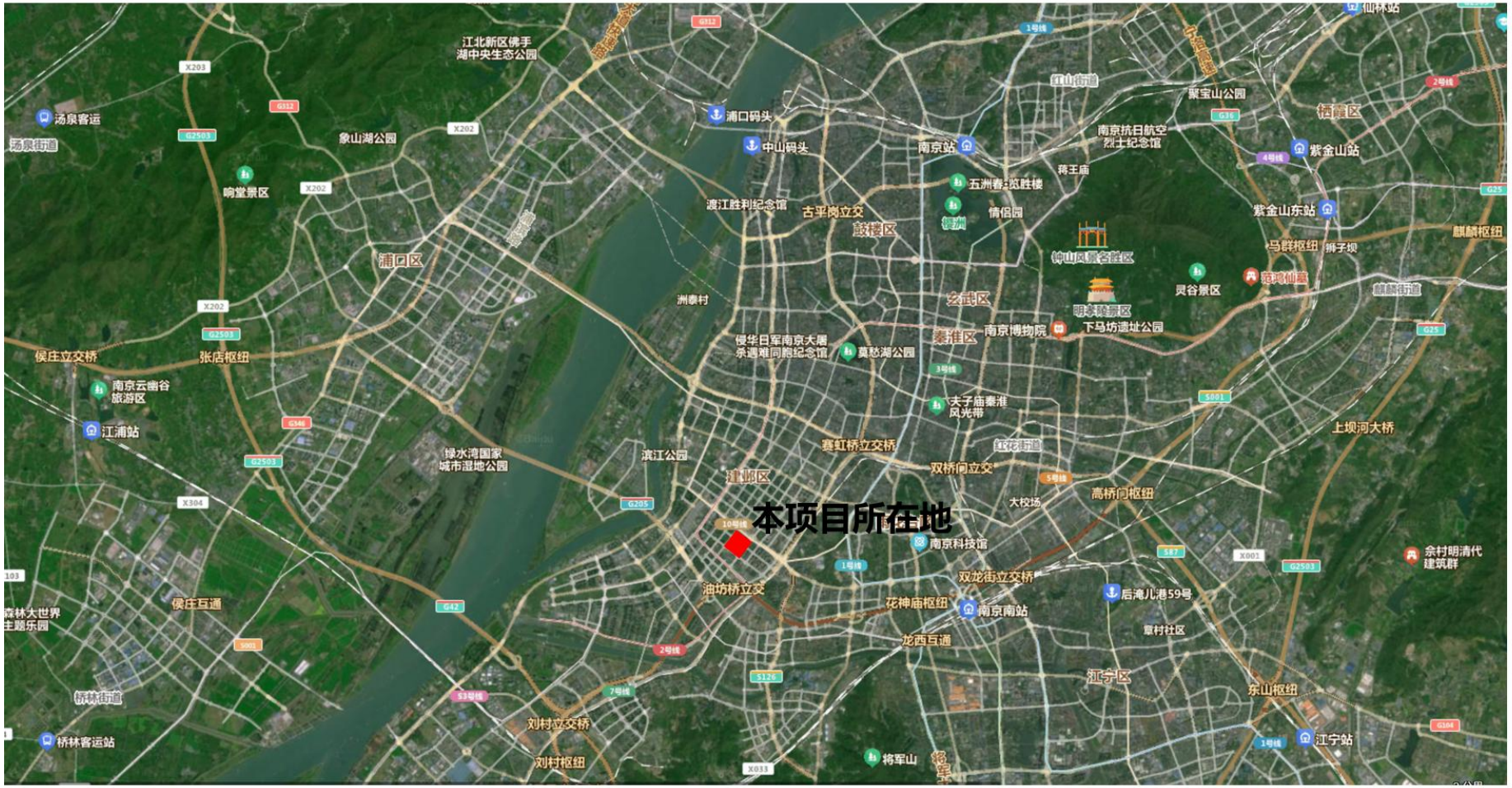


图 1-1 本项目地理位置图


北
图例:
项目所在位置
院区范围
交银大厦
朗诗国际街区-北园
南京师范大学附属中学黄山路小学
南京伊顿慧智金域缇香幼儿园
宋都美域·沁园
河西大街
朗诗国际街区
朗诗国际街区
黄山路
急诊
徐矿广场
宋都美域锦园
中胜
南京明基医院
四大中心专科楼
后勤动力中心
特需医疗楼
(拟建)
高桥
嘉陵江东街
秦山路
停车楼
(拟建)
沙洲街道
江苏省建大厦
瑞泰大厦
万得大厦
雨润大街
艺树家工场
信安大厦
海协大厦
康缘智汇港
舜禹大厦
雨润公司
第二公寓
江苏省食品药品
监督检验研究院
双和园-西区
嘉陵江东街
紫金(建邺)科技创业

图 1-2 项目周边关系图

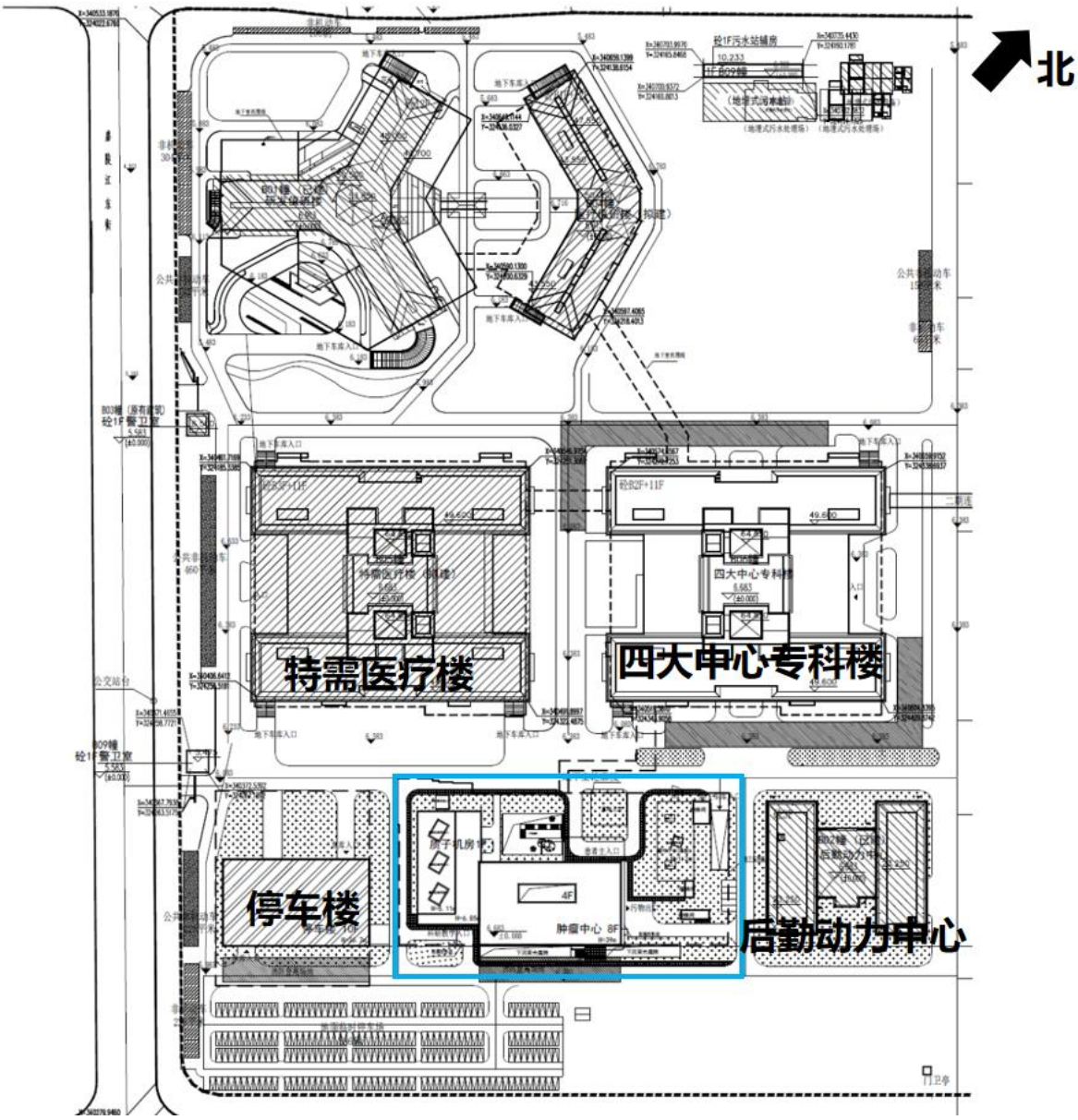


图 1-3 项目总平面布置图

1.2.6 核技术利用现状

1.2.6.1 已获许可情况

医院目前持有江苏省生态环境厅颁发的辐射安全许可证（苏环辐证[00058]，见附件 3），有效期至 2028 年 4 月 3 日。许可的种类和范围为：使用I类放射源；使用II类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。其中质子院区已获许可使用的辐射活动场所、放射源、射线装置和非密封放射性物质的使用情况列于表 1- 1~表 1- 4。

表 1-1 医院已获许可的辐射活动场所情况

序号	名称	场所地址	负责人
1	医院住院楼负一楼	南京市建邺区河西大街 71 号	周宏平
2	医技楼三楼	南京市建邺区河西大街 71 号	王彩萍
3	住院楼二楼	南京市建邺区河西大街 71 号	吕献军
4	地铁广场一楼、医技楼一楼、地铁广场负一楼、地铁广场二楼	南京市建邺区河西大街 71 号	孙学民
5	医院住院楼负一楼（核医学科）	南京市建邺区河西大街 71 号	高文
6	住院急诊楼二楼 DSA 机房、门诊楼二楼 CT 机房	南京市建邺区河西大街 71 号	周宏平
7	体检车内 X 光机检查室（苏 A3F330）	南京市建邺区河西大街 71 号	林智胜
8	二期专科楼 1 楼	南京市建邺区河西大街 71 号	林智胜
9	医技楼一楼、医技楼二楼、住院楼一楼、住院楼二楼、医技楼负一楼、急诊楼一楼	南京市建邺区河西大街 71 号	林智胜

表 1-2 医院已获许可使用的放射源明细

序号	辐射活动场所名称	核素	类别	活度(Bq)×枚	活动种类
1	住院楼负一楼	Co-60	I类	2.2E+14*30	使用

表 1-3 医院已获许可使用的非密封放射性工作场所明细

序号	辐射活动场所名称	场所等级	核素	物理状态	活动种类	日最大操作量（贝可）	日等效最大操作量(贝可)	年最大操作量(贝可)
1	医院住院楼负一楼（核医学科）	乙级	Tc-99m	液态	使用	2.22E+10	2.22E+7	5.55E+12
2	住院急诊楼二楼、DSA 机房、门诊楼二楼 CT 机房	丙级	I-125（粒子源）	固态		8.88E+7	8.88E+5	8.88E+10
3	住院楼负一楼	丙级	I-125（粒子源）	固态		8.88E+7	8.88E+5	8.88E+10
4	住院楼负一楼	乙级	F-18	液态		7.49E+9	7.49E+6	1.11E+12

表 1-4 医院已获许可使用的射线装置明细

序号	辐射活动场所名称	射线装置名称	类别	数量/台（套）	活动种类
1	地铁广场一楼、医技楼一楼、地铁广场负一楼、地铁广场二楼	口腔（牙科）X 射线装置	III	8	使用
2	二期专科楼 1 楼	医用诊断 X 射线装置	III	1	使用
		医用 X 射线计算机断层扫描（CT）装置		1	
3	体检车内 X 光检查室（车牌号：苏 A3F330）	医用诊断 X 射线装置	III	1	使用
4	医技楼三楼	医用诊断 X 射线装置	III	2	使用
		血管造影用 X 射线装置	II	1	
5	医技楼一楼、医技楼二楼、住院楼一楼、住院楼二楼、医技楼负一楼、急诊楼一楼	医用诊断 X 射线装置	III	12	使用
		医用 X 射线计算机断层扫描（CT）装置		6	
6	住院楼二楼	血管造影用 X 射线装置	II	3	使用
7	住院楼负一楼	粒子能量小于 100 兆电子伏的医用	II	1	使用

序号	辐射活动场所名称	射线装置名称	类别	数量/台（套）	活动种类
		加速器			
		医用 X 射线计算机断层扫描（CT）装置	III	1	

1.2.6.2 审批验收情况

医院目前已办理的环评审批和环保验收统计情况见表 1-5。由表 1-5 可知，目前医院辐射安全许可证上已获许可的射线装置、放射源和非密封放射性物质工作场所均已办理了环评手续，并根据《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 1-5 医院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	南京明基医院有限公司原址更新 3 台医用 III 类射线装置项目	更新 3 台 III 类射线装置，活动种类均为使用：①NeuViz ACE 32 型 CT，最大管电压 140kV，最大管电流 320mA，所在场所：急诊楼 1 楼发热门诊 CT 室（原先使用的 1 台 Brilliance TM CT 型 CT 报废）；②DigiEye U7E 型 DR，最大管电压 150kV，最大管电流 800mA，所在场所：医技楼 1 楼放射科 2 号间 X 光室（原先使用的 1 台 Digital Diagnost system 型 DR 报废）；③ MAMMOMAT Revelation 型乳腺 DR，最大管电压 49kV，最大管电流 190mA，所在场所：医技楼 1 楼放射科 4 号间钼靶室（原先使用的 1 台 Selenia 型乳腺 DR 报废）。	已备案（202532010500000124）	——
2	南京明基医院有限公司新增 1 台医用 X 射线装置	新增 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：RC ONE-Rotate 型移动式 C 形臂 X 射线机（简称移动 C 臂机），最大管电压 120kV，最大管电流 63mA，所在场所：医技楼 3 楼手术室 18（OR18）。	已备案（202532010500000120）	——

3	南京明基医院有限公司原址更新 1 台医用 X 射线装置	更新 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：新东方 1000FB 型 DR，最大管电压 150kV，最大管电流 1000mA，所在场所：医技楼 1 楼放射科检查室 3，原先使用的 Digital Diagnost 型 DR 做报废处理。	已备案（202432010500000140）	——
4	南京明基医院有限公司原址更新 1 台医用 X 射线装置	更新 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：uDR 760i 型 DR，最大管电压 150kV，最大管电流 1000mA，所在场所：住院急诊楼 1 楼急诊 X 光室，医院将住院急诊楼 1 楼急诊 X 光室内原先使用的 1 台 Digital Diagnost system 型 DR（设备编号：0702489）更新为 1 台 uDR 760i 型 DR，原先使用的 Digital Diagnost system 型 DR 作报废处理。	已备案（202432010500000139）	——
5	南京明基医院有限公司（二期）新建 2 台医用 III 类射线装置项目	新增 2 台 III 类射线装置，活动种类均为使用：①uCT 960╪型 X 射线计算机体层摄影设备（简称 CT），最大管电压 140kV，最大管电流 833mA，所在场所：二期专科楼 1 楼 CT 室；②uDR 760i 型数字化医用 X 射线摄影系统（简称 DR），最大管电压 150kV，最大管电流 1000mA，所在场所：二期专科楼 1 楼 DR 室。	已备案（202432010500000056）	——
6	南京明基医院有限公司新	新增 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：	已备案	——

	增1台车载DR装置项目	AKHX-19Z-I型车载DR，最大管电压150kV，最大管电流630mA，所在场所：体检车内X光机检查室（车牌号：苏A3F330）。	（202332010500000103）	
7	南京明基医院有限公司新增4台医用X射线装置项目	新增4台III类射线装置，活动种类均为使用：①FOCUS型牙科X射线机（简称牙片机），最大管电压70kV，最大管电流7mA，所在场所：门诊楼1楼口腔科X光室；②X-TREND型口腔颌面锥形束计算机体层摄影设备（简称口腔CBCT），最大管电压120kV，最大管电流7mA，所在场所：地铁广场1楼口腔科CT室；③HK.ESWL-V型体外冲击波碎石机（简称碎石机），最大管电压110kV，最大管电流20mA，所在场所：医技楼2楼震波碎石室；④MobiEye 700T型移动式X射线机（简称移动DR），最大管电压150kV，最大管电流500mA，所在场所：住院楼病房区域。	已备案（202332010500000013）	——
8	南京明基医院有限公司（口腔门诊部）新增2台医用III类射线装置项目	新增2台III类射线装置，活动种类均为使用：①FOCUS型口内X射线机（简称牙片机），最大管电压70kV，最大管电流7mA，所在场所：地铁广场二楼口腔科X光室；②i-	已备案（202132010500000151）	——

		CAT FLX 型口腔 X 射线数字化体层摄影设备（简称口腔 CT），最大管电压 120kV，最大管电流 7mA，所在场所：地铁广场二楼口腔科 CT 室。		
9	南京明基医院有限公司新增和搬迁各 1 台医用 III 类射线装置项目	新增和搬迁各 1 台 III 类射线装置，活动种类均为使用：①APEX 型 X 射线计算机体层摄影设备（简称 CT），最大管电压 140kV，最大管电流 1300mA，所在场所：医技楼 1 楼放射科 CT 室，②本次搬迁射线装置：Digital Diagnost 型数字化医用 X 射线摄影系统（简称 DR），最大管电压 150kV，最大管电流 900mA，所在场所：医技楼 1 楼放射科 DR 室。	已备案（202132010500000148）	——
10	南京明基医院有限公司搬迁医用 III 类射线装置项目	搬迁 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：Brilliance TM CT（16 Slice）型计算机断层扫描成像系统（简称 CT），最大管电压 140kV，最大管电流 500mA，所在场所：急诊楼 1 楼发热门诊 CT 机房。	已备案（202032010500000335）	——
11	南京明基医院有限公司（口腔门诊部）新增医用 III 类射线装置项目	新增 2 台 III 类射线装置，活动种类均为使用：①PP1 型口腔全景机，最大管电压 85kV，最大管电流 10mA，所在场所：地铁广场负一楼口腔科全景机房；②EXPERT DC	已备案（201932010500000444）	——

		型牙科 X 射线机，最大管电压 65kV，最大管电流 7mA，所在场所：地铁广场负一楼口腔科 X 射线机机房。		
12	南京明基医院有限公司（口腔门诊部）新增和搬迁医用 III 类射线装置项目	新增和搬迁各 1 台 III 类射线装置，活动种类均为使用：①PP1 型口腔全景机，最大管电压 85kV，最大管电流 11mA，所在场所地铁广场负一楼口腔科全景机房；②本次搬迁射线装置：eXpert DC 型牙科 X 射线机，最大管电压 65kV，最大管电流 7mA，所在场所由原来门诊部一楼至地铁广场负一楼口腔科牙片机房。	已备案（201932010500000336）	——
13	南京明基医院有限公司（口腔门诊部）新增和变更医用 III 类射线装置项目	变更 1 台 III 类射线装置项目和新增 1 台 III 类射线装置，活动种类均为使用：①PP1 型口腔全景机，最大管电压 85kV，最大管电流 11mA，所在场所地铁广场负一楼口腔科全景机房；②本次新增射线装置：eXpert DC 型牙科 X 射线机，最大管电压 65kV，最大管电流 7mA，所在场所由原来门诊部一楼至地铁广场负一楼口腔科牙片机房。	已备案（201932010500000307）	——
14	南京明基医院有限公司新增医用 III 类射线装置项目	新增 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：uDR370i 型移动 DR，最大管电压 150kV，最大管电流 160mA，所在场所急诊中心。	已备案（201932010500000109）	——

15	南京明基医院有限公司新增 I-125 密封籽源（放射性粒子）植入治疗肿瘤项目	拟在放疗科使用碘-125 密封籽源，日最大操作量 8.88E+08Bq，年最大使用量为 8.88+10Bq。	已备案（201832010500000321）	——
16	南京明基医院有限公司新增医用 III 类射线装置项目	新增 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：uDR 770i 型移动 DR，最大管电压 150kV，最大管电流 1000mA，所在场所急诊中心。	已备案（201832010500000319）	——
17	南京明基医院有限公司原址更新 1 台医用射线装置项目	变更 1 台 III 类射线装置，活动种类为使用：胃肠机型 EXAVISTA，最大管电压 130kV，最大管电流 500mA，所在场所放射科 5 号。	已备案（201832010500000318）	——
18	南京明基医院有限公司使用医用射线装置应用项目	新增 3 台III类射线装置，活动种类均为使用：①3D exam I 型的口腔 CT(最大管电压 120kV、最大管电流 7mA)；②PP1 型 全景机(最大管电压 85kV、最大管电流 11mA)；③eXpert DC 型的牙片机(最大管电压 65kV、最大管电流 7mA)。项目地点：门诊大楼口腔科一楼。	已备案（201732010500000017）	——
19	扩建 2 台 DSA 项目	将住院楼二层导管室 1 南侧的 1 间预留机房扩建为 DSA 机房，配备 1 台 DSA（最大管电压 125kV、最大管电流 1000mA，属Ⅱ类射线装置）；将医技楼三层手术室 6 扩建为 1 间 DSA 复合手术室，配备 1 台 DSA（最大管电	江苏省生态环境厅 苏环辐（表）审[2025]70 号	2026 年 7 月 6 日已验收

		压 125kV、最大管电流 1000mA，属Ⅱ类射线装置），用于开展医疗诊断和介入治疗。		
20	新建 2 台 DSA 项目	新增 2 台 DSA（最大管电压为 125kV，管电流为 1250mA，属 II 类射线装置），用于血管造影及介入治疗；新增 1 台 CT 机和 1 台移动式 C 型臂 X 线系统，属 III 类射线装置。	江苏省生态环境厅 苏环辐（表）审 [2015] 055 号	2016 年 7 月 3 日已验收
21	新建一台 PET/CT 放射诊断和一台 γ 刀放射治疗项目	拟在住院楼负一楼新建核医学科，开展 PET/CT 放射诊断项目，包括一间 PET/CT 机房及相关配套用房，配备一台 PET/CT，使用 18F 正电子核素开展显像检查，使用一枚 68Ge 校验源；在住院楼负一楼新建 γ 刀放射治疗项目，包括一间 γ 刀机房及相关配套用房，配备一台头部多源 γ 射束立体定向放射治疗系统，内含 30 枚 60Co 集聚放射源，初始总装源活度为 2.2×1014Bq。	江苏省生态环境厅 苏环辐（表）审 [2017] 036 号	2017 年 7 月 6 日已验收
22	扩建核医学科项目	在现有核医学科新增 1 台 ECT，并新增使用 ^{99m}Tc 核素开展显像诊断，扩建后核医学科日等效最大操作量由 7.4×10^{6}Bq 增至 2.96×10^{7}Bq，属乙级非密封放射性物质工作场所	江苏省生态环境厅 苏环辐（表）审[2021]57 号	2022 年 7 月 1 日已验收
23	新增医用直线加速器项目	新增 1 台医用电子直线加速器，X 射线能量 6、10MV）	江苏省生态环境厅 苏环辐（表）审 [2011] 157 号	2012 年 6 月 11 日已验收

1.2.6.3 辐射安全管理机构

医院目前已成立了辐射安全管理委员会，负责全院的辐射安全与环境保护管理工作，委员会由主任委员、副主任委员、委员、总干事及干事组成。其中主任委员由分管医工副院长担任，全面负责辐射防护和安全管理的领导工作，副主任委员由影像部、医务处、医学工程处主管担任，委员由核医学科、放疗科、介入中心、口腔科、护理部、人事处、风管科主管担任，总干事由医学工程处主管担任。干事由医学工程处、医务处的工作人员担任，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。

1.2.6.4 辐射工作人员考核

医院现有辐射工作人员 151 名，均已参加了核技术利用辐射安全与防护考核，成绩合格且目前均在有效期内。医院为辐射工作人员配备了个人剂量计，要求辐射工作人员工作时佩戴，并委托有资质单位进行个人剂量监测，监测周期不超过 90 天。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。医院定期组织对辐射工作人员进行职业健康体检，两次体检的时间间隔不超过 2 年。建立个人健康档案，档案中详细记录历次体检报告结果及其评价处理意见，并妥善长期保存。

1.2.6.5 辐射安全管理制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，医院针对现有核技术利用项目的实际情况，制定了《南京明基医院放射工作人员管理制度》《南京明基医院辐射安全事故应急处理预案》《南京明基医院辐射安全管理制度》《辐射安全管理委员会组织章程》《放射性三废处理和处置制度》《放射性同位素使用、登记制度》《辐射安全防护和安全保卫制度》《辐射安全风险管理制度》《辐射监测方案制度》等一系列规章制度，并严格按照规章制度执行，至今未出现过辐射安全事故或事件。

1.2.6.6 个人剂量监测和职业健康体检

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的要求，医院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，监测周期不超过 90 天。根据 2025 年四个季度个人剂量检测报告（见附件 4），辐射工作人员的单一季度个人剂量检测结果最大为 0.65mSv，个人剂量检测结果低于职业照射剂量约束值 5mSv/a。

医院定期组织对辐射工作人员进行职业健康体检，两次体检的时间间隔不超过 2 年。建立个人健康档案，档案中详细记录历次体检报告结果及其评价处理意见，并妥善长期保存。

1.2.6.7 工作场所与环境监测

医院每年委托有能力的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。通过监测结果，医院现有射线装置所在机房、非密封放射性物质工作场所周围的辐射剂量水平检测结果最大不超过 2.5μSv/h，符合屏蔽体外关注点处 2.5μSv/h 的剂量率控制值；核医学工作场所控制区内、监督区内β表面污染水平分别低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)控制区（40Bq/cm^2）和监督区（4Bq/cm^2）的表面污染控制水平；个人防护用品表面的β表面污染水平低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定的工作服、手套、工作鞋表面污染控制水平限值 4Bq/cm^2；操作人员手部、皮肤暴露表面的β表面污染水平低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定的手、皮肤、内衣等表面污染控制水平限值 0.4Bq/cm^2。

1.2.6.8 辐射事故应急

医院制定了《南京明基医院辐射安全事故应急处理预案》，成立了辐射事故应急组织机构，明确了应急组织机构成员及其主要职责，规定了辐射事故处理程序，平时需做好辐射事故应急准备工作，一旦有事故发生时能按照程序启动应急方案。医院自开展放射治疗、放射诊断以来，严格按照国家法律法规以及相关技术标准的要求进行管理，未发生过辐射安全事故。

医院定期会组织进行应急演练，提高应对突发辐射事件的能力，更好的预防辐射事故发生，以及在辐射事故或意外发生时更快地做好应急响应。

1.2.6.9 年度评估报告上报情况及监督检查情况

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，医院每年1月31日前向发证机关提交上一年度的评估报告，内容包括辐射安全和防护设施的运行与维护情况；辐射安全和防护制度及措施的制定与落实情况；辐射工作人员变动及接受辐射安全与防护考核情况；放射性源、非密封放射性物质、射线装置等台账；场所辐射环境监测和个人剂量监测情况及监测数据；辐射事故及应急响应情况；核技术利用项目新建、改建、扩建和退役情况；存在的安全隐患及其整改情况；其他有关法律、法规规定的落实情况等。积极配合生态环境主管部门的监督检查，认真落实各项辐射安全管理制度，确保核技术利用项目的辐射安全。医院目前已提交了2025年度《放射性同位素与射线装置安全和防护状况2025年度评估报告表》。

1.2.6.10 核技术利用现状小结

综上所述，医院现有核技术利用项目环保手续齐全，成立了辐射安全管理机构，制定了各项辐射安全管理规章制度，配备有必要的监测仪器和防护用品，定期开展了年度监测且监测结果符合国家标准要求，按时提交了年度评估报告，辐射工作人员均通过了辐射安全与防护考核，辐射工作人员均配备有个人剂量计，定期开展个人剂量监测和职业健康体检。辐射安全管理现状较为规范。

1.3 评价依据

1.3.1 法律、法规和规章

（1）《中华人民共和国生态环境法典》（2026年3月12日第十四届全国人民代表大会第四次会议通过，2026年8月15日施行）；

（2）《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）；

（3）《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）；

（4）《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）；

（5）《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）；

（6）《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）；

（7）《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）；

（8）《产业结构调整指导目录（2024年本）》（2023年12月27日国家发展改革委令第7号公布）；

（9）《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）；

（10）《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）；

（11）《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）；

（12）《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》（中华人民共和国国家发展和改革委员会令 第7号，2024年2月1日起施行）；

（13）《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》，国家环境保护总局文件，环发〔2006〕145号文；

（14）《环境影响评价公众参与办法》，国家生态环境部文件，2019年1

月 1 日起施行。

1.3.2 技术导则、标准

（1）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；

（2）《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）；

（3）《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》（HJ 10.1-2016）；

（4）《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ 1326-2023）；

（5）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）；

（6）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）

（7）《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）；

（8）《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）；

（9）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）；

（10）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）；

（11）《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）；

（12）《放射性废物管理规定》（GB 14500-2002）；

（13）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

（14）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

（15）《高纯锗γ能谱分析通用方法》（GB/T 11713-2015）；

（16）《电离辐射监测质量保证通用要求》（GB 8999-2021）；

（17）《环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T 16145-2022）；

（18）《大气污染物综合排放标准》（GB 16297-1996）；

（19）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）；

（20）《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）；

（21）《核技术利用设施退役》（HAD 401/14-2021）；

1.3.3 其它文件、资料

（1）NCRP. Report NO.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP,2005；

（2）NCRP. Report NO.151. Structural shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma- Ray Radiotherapy facilities. NCRP,2005；

（3）IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001；

（4）建设单位提供的与本项目相关的初步设计资料等其他技术资料。

1.4 评价标准

1.4.1 剂量限值和剂量约束值

1.4.1.1 剂量限值

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

（1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

1）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）任何一年中的有效剂量，50mSv。

（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：

1）年有效剂量，1mSv；

2）特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

1.4.1.2 剂量约束值

根据《粒子加速器辐射安全与防护规定》（GB5172-2025）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）的相关规定：

本次评价以 5mSv/a 作为本项目辐射工作人员的年剂量约束值，以 0.1mSv/a 作为本项目公众成员的年剂量约束值。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

本项目质子治疗装置辐射工作场所、BNCT 辐射工作场所、直加机房及模拟定位 CT 机房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》（HJ 1198-2021）6.1.4 中相关规定执行，如表 1-6 所示。

表 1-6 本项目各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

场所	位置	位置描述（居留因子）	剂量率控制水平，μSv/h
质子治疗装置、BNCT 辐射工作场所	机房四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶	居留因子 T≥1/2	≤2.5
		居留因子 T＜1/2	≤10
	机房底板外	机房底板外表面与土壤交界处*	≤5.5×10^3
直加、模拟定位 CT 机房的四周屏蔽墙、机房顶和防护门外			≤2.5

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 5.5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5.5mSv/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 放射性废物管理要求

1.4.3.1 放射性废气管理要求

本项目质子治疗装置和 BNCT 运行期间产生的放射性废气管理执行《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中的相关要求：

8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。

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

1.4.3.2 放射性废液管理要求

质子治疗装置、BNCT 运行期间产生活化冷却水以及接受 BNCT 治疗后的患者在留观期间期间产生排泄物作为放射性废液进行暂存和处理。其中：

①质子治疗装置和 BNCT 的活化冷却水中主要关注放射性核素 ^{3}H、^{7}Be。排放前需进行取样监测，排放标准执行《放射治疗的辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）8.3 节的相关要求“事故或检修状况下质子/重离子加速器的活化冷却水按照放射性废液管理要求妥善收集贮存，暂存衰变至低于豁免水平后可作为普通废液处理，并做好存档记录”。

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 ^{3}H 和 ^{7}Be 的单次排放限值 $1ALI_{min}$ 和单月排放限值 $10ALI_{min}$，列于表 1-7。

表 1-7 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）
^{3}H	4.76E+08	4.76E+09
^{7}Be	3.85E+08	3.85E+09

注：放射性核素排放限值（ALI）按工作人员年剂量限值/食入或吸入内照射剂量转换因子计算；食入、吸入内照射剂量转换因子根据 GB18871 的表 B3 得出，各核素的转换因子取保守值。

②BNCT 患者排泄物中主要的放射性核素为 ^{24}Na，其半衰期为 14.96h。参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中相关要求“所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放”，BNCT 患者排泄物排入衰变池内暂存超过 30 天后直接排放。

1.4.3.3 放射性固体废物管理要求

质子治疗装置和 BNCT 运行期间可能产生的放射性固体废物主要为活化部件，其管理执行《放射治疗的辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中相关规定：

8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物，拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。

8.2.2.2 低水平的活化部件如质子/重离子加速器治疗头器件、磁铁等，以及处理质子/重离子加速器冷却水的废树脂，集中放置在固态废物暂存间衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平的送交有资质的单位收贮。

8.2.2.3 建立放射性固态废物台账，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，低于清洁解控水平的可作为一般固态废物处置，并做好存档记录。

清洁解控水平参照《放射治疗的辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）附录 B 表 B.1 执行，具体如表 1-8 所示。

表 1-8 放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

核素	活度浓度/（Bq/g）
^{3}H	1E+02
^{14}C	1E+00
^{54}Mn	1E-01
^{55}Fe	1E+03
^{59}Fe	1E+00
^{58}Co	1E+00
^{60}Co	1E-01
^{63}Ni	1E+02
^{65}Ni	1E+02

1.4.4其他标准

1.4.4.1 O_3和NO_X排放标准

本项目NO_x排放限值参照执行《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）表 2 中硝酸使用及其他有组织氮氧化物排放限值，室内O_3和NO_x浓度限值参照执行《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ2.1-2019）中工作场所空气中化学物质容许浓度限值，具体标准值见表 1-9。

表 1-9 O_3和NO_X排放标准及室内浓度限值

污染物	排放标准		室内浓度限值	
	最高允许排放浓度，mg/m^3	最高允许排放速率（排气筒高度 15m），kg/h	最高容许浓度，mg/m^3	时间加权平均容许浓度，mg/m^3
O_3	——	——	0.3	——
NO_X	240	0.77	——	5

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）“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 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 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。本项目具体评价范

围如下，评价范围示意图见图 1-4：

（1）质子治疗装置。属于I类射线装置，其主要的辐射环境影响途径为瞬发辐射外照射以及运行期间排入环境感生放射性气体对人员造成的照射。其辐射工作场所严格按照我国相关法规标准的要求进行辐射屏蔽设计，采用混凝土作为主屏蔽材料，确保工作场所屏蔽体外剂量率满足要求。在考虑距离衰减后，机房屏蔽边界外 100m 处的剂量率可降低近 4 个量级。且感生放射性气体排放量较低，根据环境影响评价结论，感生放射性气体的排放对场所周围公众所致剂量均低于其剂量约束值。因此，质子治疗装置电离辐射环境影响评价范围取其辐射工作场所四周实体屏蔽墙向外 100m 的范围。

（2）BNCT、直加。属于II类射线装置，环境影响评价范围取 BNCT、直加辐射工作场所四周实体屏蔽墙向外 50m 的范围。

（3）模拟定位 CT 机。属于III 类射线装置，环境影响评价范围取模拟定位 CT 机辐射工作场所四周实体屏蔽墙向外 50m 的范围。

1.5.2 环境保护目标

本项目电离辐射评价范围内无国家一级公益林、湿地公园、森林公园、自然保护区、地质公园、风景名胜区、自然遗产等需要特殊保护的对象，无学校等环境敏感点。

本项目评价范围内的环境保护目标以本项目相关工作人员、周边相关场所周围其他工作人员以及在相关场所周围活动的公众成员为主，具体情况列于表 1-10。

表 1-10 本项目辐射工作场所周围环境保护目标情况

位置	保护对象类型	保护目标	方位	距离，m	常驻人员数量	保护要求
本项目工作场所内	辐射工作人员	质子治疗装置辐射工作场所，包括 3 间治疗室内部及其控制室、技师办公室、QA 设备室等	内部	——	31 人	5mSv/a
		BNCT 辐射工作场所，包括 2 间治疗室及其控制室、加速器加速器控制室、加速器设备机房、无线机房等	内部	——	22 人	

		直加辐射工作场所，包括直加机房、控制室、水冷机房、服务器机房、体模库、摆位间等	内部	——	10 人	
		模拟定位 CT 机辐射工作场所，包括模拟定位 CT 机房、CT 控制室等	内部	——	2 人	
本项目所在肿瘤中心内	公众成员	质子治疗装置、BNCT、直加、模拟定位 CT 机辐射工作场所周围医护人员办公室、候诊区、导医台、各类设备机房、送排风机房及会议室等	四周、楼上、楼下	0~50	100 人	0.1mSv/a
本项目所在建筑室外	公众成员	四大中心专科楼	北侧	0~65	550	0.1mSv/a
		后勤动力中心	东北侧	0~60	50	
		特需治疗楼（拟建，现为施工临时用房）	西侧	0~65	20	
		泰山路	东侧	0~80	——	



图 1-4 本项目电离辐射评价范围示意图

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

南京市位于江苏省西南部、长江下游，南起北纬 31°14′，北抵北纬 32°37′，西起东经 118°22′，东迄东经 119°14′，东西最大横距约 70 千米，南北最大纵距约 150 千米，市域平面呈南北长东西窄展开，面积 6587.04 平方千米。

本项目位于南京市建邺区河西大街 71 号南京明基医院园区内东南侧，秦山路以西，黄山路以东，河西大街以南，嘉陵江东街以北。地理位置图见图 1-1，项目周边关系图如图 1-2 所示。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

南京市地处宁镇扬低山丘陵与长江下游沿江平原过渡地带，地势南高北低，分为剥蚀低山丘陵岗地、堆积河谷平原两大类型，堆积平原又细分为坡积洪积岗地平原、冲洪积河谷平原、长江冲积洲滩平原三类。坡积洪积岗地平原分布在主城南部、江宁溧水丘陵前缘，地面标高 25~45 米，坡度约 9‰，土体多为下蜀黄土粉质黏土，岗坳交错；冲洪积河谷平原沿秦淮河、滁河两岸分布，地处丘陵以北、长江以南，标高 8~15 米，坡度 2‰~3‰，为河流洪水堆积而成，土层以粉质黏土、粉砂互层为主，河网密集；长江冲积洲滩平原位于长江两岸及江心洲，由长江泥沙淤积形成，土质为粉细砂、淤泥质黏土、亚砂土，地势平坦，标高 5~8 米，坡度极小。市域丘陵岗地占比 60.8%，平原洼地占 39.2%，地貌错落衔接。项目场区位于秦淮河冲洪积河谷平原，场地平缓起伏小，受河流沉积作用影响，地层条件稳定。

2.2.2 气候气象

南京市属亚热带湿润季风气候，四季分明，雨水充沛。春季温和湿润、冷

暖多变，夏季高温闷热、梅雨充沛，秋季天高气爽、干爽宜人，冬季寒冷少雨、湿度偏高。 据南京市气象站多年观测资料，区域年平均气温 15.9℃，极端最高气温 43.0℃，极端最低气温 - 14.0℃；7 月气温最高，平均 28.4℃，1 月气温最低，平均 3.1℃；年均无霜期 239 天，年平均日照时数 1980 小时；年均降水量 1100mm，6—8 月降水集中，历年最大年降水量 1621mm，最大日降雨量 218mm；年均相对湿度 76%，年平均风速 2.6m/s；常年主导风向为东南风，夏季盛行东南风，冬季以东北风为主。

2.2.3 水文特征

南京地处长江下游，全市水域面积占全市总面积 11.4%。长江自西南向东北斜贯市境，长约 93 千米，东距入海口 300 多千米，沿江岸线总长近 200 千米。有秦淮河、金川河、玄武湖、莫愁湖、百家湖、石臼湖、固城湖、金牛湖等大小河流湖泊，长江穿城，沿江岸线总长近 200 千米，境内共有大小河道 120 条。河湖水系主要属于长江水系，仅在六合区北部流入高邮湖、宝应湖的河流属淮河水系。长江水系包括江南的秦淮河水系，江北的滁河水系，由沿江两岸独流入江的小河流形成的沿江水系，由石臼湖和固城湖组成的两湖水系，以及高淳东部的西太湖水系。地下水资源丰富且水质优良，汤山温泉、汤泉温泉、珍珠泉等尤为闻名。

长江南京段北岸全长 110 千米，南岸全长 98 千米，自江宁区苏皖交界处慈湖口入境流向东北，在八卦洲附近折向东，至栖霞区大道河口出境。长江南京段发育在长江破碎带上，流向及河道均由长江地质断裂线控制。江宽 1000 米至 3000 米，如藕节状。长江主泓在南京段七次折返于南北岸之间，受其顶冲的江岸不断塌陷形成凹岸，凸岸江段泥沙淤涨。水流量丰富，年平均流量 28200 立方米/秒。水流平缓，加之海潮顶扣，泥沙沉积量大，江中沙洲较多。主航道全年自然水深超过 10.5 米，最深处 50 米左右，可终年通航万吨级海轮。两岸有多条河流入江，其中南岸秦淮河、北岸滁河自成次一级水系。

2.2.4 地质地震

南京地处宁镇断褶带，区域地层发育完整，基底以古生代碎屑岩、碳酸盐岩为主，上部广泛覆盖第四纪松散沉积层；丘陵区多残坡积粉质黏土，沿江平原分布厚层冲洪积粉砂、粉质黏土与淤泥质土层，地层整体稳定性较好，无活动断裂穿越项目建设区域。区内岩土分层清晰，浅部多下蜀黄土，承载力适中，滨江地带存在软弱淤泥层，工程建设需适当进行地基处理。 依据《中国地震动参数区划图》，南京市地震动峰值加速度为 0.10g，对应地震基本烈度 Ⅶ 度，地震动反应谱特征周期 0.35s。区域地震活动频次低、震级偏小，历史少有强震记录，属地壳相对稳定区域。项目场地岩土条件平缓均匀，不良地质现象较少，抗震设计需按照 Ⅶ 度设防标准开展建设。

2.2.5 土壤植被

南京市土壤类型兼具丘陵岗地与沿江平原特征，市域地带性土壤以黄棕壤为主；低山丘陵区广泛分布黏盘黄棕壤，土层黏重、酸度适中；沿江河谷、圩区为水稻土，由长期耕作熟化形成，土层深厚肥沃；滨江滩地零星分布潮土，土质偏砂，通透性较好。区域土壤酸碱度多呈微酸性至中性，肥力条件适中，沿江低洼地段局部存在轻度渍涝隐患。 植被属北亚热带常绿落叶阔叶混交林地带，原生天然林留存较少，如今以人工植被为主。丘陵山地多见马尾松、栎树、杉木等林木；平原农田以水稻、小麦、蔬菜等农作物为主；城市区域广植香樟、悬铃木、桂花等绿化树种，河湖沿岸遍布芦苇、菖蒲等湿生植被。市域植被覆盖率较高，水土保持能力良好，区域生态环境整体稳定。

2.3 社会环境概况

2.3.1 人口分布

截至 2024 年末，南京市常住人口总量 957.70 万人，较上年小幅增长 3 万人，户籍人口 745.45 万人；全市常住人口城镇化率达 87.3%，城镇人口 836.07 万人，乡村人口占比偏低，人口整体呈现高度集聚于城镇的特征。人口空间分布差异显著，呈现主城密集、近郊快速吸纳、远郊平缓分布的格局。玄武、秦淮、建邺、鼓楼四大传统核心城区全域城镇化，人口密度极高；其中鼓

楼、秦淮人口体量靠前，以居住、商务人口为主，空间趋于饱和。近郊的江宁区为全市人口第一大区，常住人口突破 200 万，浦口、雨花台、栖霞依托新城开发，人口吸纳能力强劲，是近年人口主要流入区域。六合、溧水、高淳三处远郊区人口密度偏低，以乡镇、涉农人口为主，人口增速平缓。全市人口正逐步由老城核心向外围新城疏导，科教产业集聚区域人口集聚效应突出；区域人口自然增长率平稳，外来常住人口持续填充近郊板块，城乡人口布局持续优化，整体人口分布与城市产业、居住空间拓展趋势相契合。

2.3.2 社会发展

南京为江苏省省会、长三角核心中心城市，区域综合发展水平位居全国前列。依据南京市统计局 2024 年官方统计公报，全市全年地区生产总值 18500.81 亿元，同比增长 4.5%，三次产业结构层次清晰：第一产业增加值 331.00 亿元，增幅 3.5%，以都市现代农业、特色种养、城郊休闲农业为主，规模体量较小，主要分布于高淳、溧水、六合远郊区域；第二产业增加值 5831.06 亿元，增幅 2.5%，聚焦新能源汽车、集成电路、生物医药、高端装备制造等先进制造业，产业集聚效应凸显，是城市实体经济发展支撑；第三产业增加值 12338.75 亿元，增幅 5.4%，占经济总量主导地位，金融业、现代物流、科创服务、文旅商贸、信息技术服务业蓬勃发展，成为经济增长核心动力。 南京科教资源富集，坐拥多所双一流高校与大量科研院所，创新转化体系完善；全域轨道交通、过江通道等交通网络四通八达，基础教育、医疗、养老等公共服务覆盖城乡。依托长三角一体化发展机遇，城乡差距持续缩小，社会保障体系完备，文旅资源深度活化，都市圈协同发展稳步推进，民生保障持续提质，经济社会整体运行平稳向好。

2.3.3 文化教育

南京历史文化底蕴深厚，作为六朝古都、国家历史文化名城，拥有世界文化遗产 3 处、全国重点文物保护单位 55 处，云锦、秦淮灯彩等百余项各级非物质文化遗产，全市公共图书馆、博物馆、文化馆、街道文化站实现全域覆盖，常态化开展文博展览与民俗文化活动，公共文化服务体系完善。 依据最新年度

统计数据：年末全市幼儿园 1018 所，在园幼儿 34.9 万人，专任教师 2.68 万人；小学 388 所，在校学生 62.8 万人，专任教师 4.12 万人；普通中学 267 所，在校学生 39.5 万人，专任教师 3.86 万人；驻宁普通高等院校 53 所，在校大学生 81.7 万人，高校专任教师 5.3 万人。全市普惠性幼儿园覆盖率超 92%，公办园就读幼儿占比达 61%。 全年完工新建、改扩建中小学及幼儿园 46 所，新增基础教育学位 6.2 万个；职业院校综合实力突出，多所院校斩获全国职业院校技能大赛奖项 70 余项；落地市校合作项目 112 项，扶持高校新建特色产业学院 11 个，产学研协同发展成效显著，基础教育优质均衡推进，高等教育科创资源优势突出。

2.3.4 医疗保健

南京医疗卫生体系完善，医疗综合实力位居长三角前列。截至 2024 年末，全市共有各级各类医疗卫生机构 3993 个，其中医院 315 家，社区卫生服务中心（站）480 个，妇幼保健机构 14 个；医疗机构实有床位 7.41 万张，每千人常住人口床位 7.74 张。全市卫生技术人员 117382 人，包含执业及助理医师 45824 人、注册护士 52500 人，医护配比合理，鼓楼医院、省人民医院等 42 家三级医院陆续布局新城分院，优质医疗资源持续向外围区域均衡延展。 基层公共卫生服务扎实推进，组建家庭医生团队 1587 个，重点人群签约率 79.85%，社区诊疗、慢病管理、妇幼保健服务全覆盖；全市开通 32 家互联网医院，线上问诊、复诊配药常态化运行。社会保障配套完备，职工医保参保 557.51 万人、城乡居民医保全面覆盖，职工住院政策范围内报销比例可达 88%以上，居民医保报销水平稳步提升。疾控、应急救治、中医药服务体系健全，全年总诊疗量超 1.06 亿人次，居民健康保障水平持续提升。

2.4 环境质量和辐射现状

2.4.1 环境天然放射性水平

根据《江苏省环境天然贯穿辐射水平调查研究》（江苏省环境监测站，1993 年），江苏省天然γ辐射剂量率列于下表。

表 2-1 江苏省环境天然γ辐射剂量率（nGy/h）

监测内容	范围	平均值	标准差
原野	33.1~72.6	50.4	6.8
道路	18.1~102.3	47.1	11.8

注：已扣除宇宙射线。

2.4.2 辐射环境质量现状监测与评价

中国原子能科学研究院委托广州星环科技有限公司 2026 年 4 月 23 日对建设项目场所环境γ辐射剂量率、中子剂量当量率进行了本底检测，监测报告见附件 5；委托浙江国辐环保科技有限公司 2026 年 4 月 23 日对建设项目场所环境中土壤进行了本底检测，监测报告见附件 6。具体监测情况如下。

2.4.2.1 监测内容

主要监测内容包括环境γ辐射剂量率、中子剂量当量率，以及土壤中的 Na-22、Be-7。

2.4.2.2 监测设备和监测方法

2.4.2.2.1 监测设备

监测使用主要仪器设备如表 2-2 所示。

表 2-2 仪器设备及性能指标

仪器名称	型号	出厂编号	主要技术性能指标	检定有效日期
X-γ辐射空气吸收剂量率仪	BG9512P	1TRW88AA	能量响应： 28keV~3MeV 测量量程： 10nSv/h~200μSv/h	2025.12.04~2026.12.04
中子周围剂量当量（率）仪	RN200	NR2024H1101	能量响应： 0.025eV~15MeV 测量量程： 0.01μSv/h ~99.99mSv/h	2025.12.04.~2026.12.04

仪器名称	型号	出厂编号	主要技术性能指标	检定有效日期
高纯锗γ谱仪	GEM-S8530	GF-11-1-2016	能量分辨力：1.620keV（^{60}Co，1332.5keV） 本底计数率：0.970cps	2025.11.30~2027.11.29
高纯锗γ谱仪	GC5019	GF-11-2-2019	能量分辨力：1.767keV（^{60}Co，1332.5keV） 本底计数率：0.977cps	2025.11.30~2027.11.29
高纯锗γ谱仪	GMX40-76-LB-B	55-N42921A	能量分辨力：1.850keV（^{60}Co，1332.5keV） 本底计数率：0.973cps	2026.3.24~2028.3.23
高纯锗γ射线谱仪	GMX40-76-LB-B	55-N51492A	能量分辨力：1.690keV（^{60}Co，1332.5keV） 本底计数率：0.975cps	2025.11.30~2027.11.29

2.4.2.2.2 监测方法

监测方法列于表 2-3。

表 2-3 监测方法

序号	监测对象	监测方法	标准依据
1	环境γ辐射剂量率	环境γ辐射剂量率测量技术规范	HJ1157-2021
2	中子剂量当量率	辐射防护仪器中子周围剂量当量（率）仪	GB/T14318-2019
3	土壤中 Na-22	环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法	GB/T 16145-2022
4	土壤中 Be-7	环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法	GB/T 16145-2022

2.4.2.3 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。

2.4.2.4 监测点位

对于环境γ辐射剂量率和中子剂量当量率，在本项目拟建核技术利用场地内部、周围以及本项目周边公众关注点进行了监测布点；对于土壤，在拟建项目厂址的东西南北四侧各取一个关注点。



图 2-1 环境γ剂量率、中子剂量当量率监测点位以及土壤取样点位图

2.4.2.5 监测结果

2.4.2.5.1 外照射

本项目拟建场址内环境地表γ辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果见

下表。

表 2-4 拟建场址内环境γ辐射剂量率和中子剂量当量率监测结果

监测点位	点位描述	表面介质	环境γ辐射剂量率（nGy/h）	中子剂量当量率（μSv/h）
1	拟建区域 1	泥土	83±1	未检出
2	拟建区域 2	泥土	86±1	未检出
3	拟建区域 3	泥土	89±1	未检出
4	拟建区域 4	泥土	84±1	未检出
5	拟建区域 5	泥土	84±1	未检出
6	拟建区域 6	泥土	86±2	未检出
7	拟建区域 7	泥土	84±1	未检出
8	拟建区域 8	泥土	86±1	未检出
9	拟建区域 9	泥土	87±1	未检出
10	拟建区域 10	泥土	85±1	未检出
11	拟建区域 11	泥土	92±2	未检出
12	拟建区域 12	泥土	89±1	未检出
13	四大中心专科楼一楼	混凝土	95±2	未检出
14	拟建特需治疗楼 1	泥土	96±1	未检出
15	拟建特需治疗楼 2	泥土	96±1	未检出
16	后勤动力中心一楼	混凝土	106±1	未检出
17	拟建区域东北侧道路	混凝土	93±2	未检出
18	拟建区域西侧道路	混凝土	96±2	未检出
19	拟建停车楼	泥土	78±1	未检出
20	泰山路东侧公共区域 1	混凝土	86±1	未检出
21	泰山路东侧公共区域 2	混凝土	84±1	未检出
注：1、检测时仪器探头垂直地面，距地约 1m，待读数稳定后，每个测量点约 10s 间隔读取 10 个数值； 2、以上数据已校准，X、γ辐射空气吸收剂量率仪校准系数为 1.02；中子周围剂量当量率仪检出下限为 0.01μSv/h； 3、环境γ辐射剂量率检测结果扣除了仪器对宇宙射线的响应部分（广东省万绿湖检测数值为 11nGy/h，按 HJ61 修正后为 10.8nGy/h）； 4、建筑物对宇宙射线的屏蔽因子：楼房取值 0.8，平房取值 0.9，原野、道路取值 1。				

2.4.2.5.2 土壤

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见下表。

表 2-5 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
东北侧土壤 CSS20260423556	Na-22	＜0.21
	Be-7	＜1.83
东南侧土壤 CSS20260423557	Na-22	＜0.18
	Be-7	＜1.67
西南侧土壤 CSS20260423558	Na-22	＜0.23
	Be-7	＜2.38
西北侧土壤	Na-22	＜0.19

样品编号	检测项目	结果，Bq/kg
CSS20260423559	Be-7	＜1.46

2.4.3 场址适宜性评价

本项目位于位于南京市建邺区河西大街 71 号南京明基医院园区内东南侧，秦山路以西，黄山路以东，河西大街以南，嘉陵江东街以北。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。

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 项目规模与基本参数

3.1.1 项目规模

本项目位于院区肿瘤中心内，肿瘤中心为一栋地下二层、地上八层的建筑，其中质子治疗装置工作场所位于地下二层至地上一层；硼中子俘获治疗系统（BNCT）工作场所位于地下一层以及地上一层与地下一层之间的管道层；医用电子直线加速器工作场所位于地下一层；模拟定位 CT 机工作场所位于地上一层。

地上一层（除模拟定位 CT 机工作场所外）至地上八层主要为门诊、预留医疗空间、办公区、科研教学门厅、实验室、考站、教室、自习室及阅览室等。

（1）质子治疗装置

质子治疗装置工作场所位于肿瘤中心西侧地下二层至地上一层，主要包括加速器大厅、束流传输系统、3 间治疗室、治疗控制室、主控室、办公室、放射性废水暂存池、放射性固体废物暂存间及其他辅助治疗用房和设备机房等。具体见表 3-1。

表 3-1 质子治疗装置工作场所布局情况

位置	场所布局情况
地下二层	质子治疗装置机架基坑区、放射性废水暂存池、停车场、送风机房以及库房等
地下一层	加速器大厅、束流传输系统、3 间旋转机架治疗室、治疗控制室、主控室、放射性固体废物暂存间、质子候诊区、办公室、会议室以及各类辅助机房等
地上一层	质子治疗装置工作场所上空、水冷间、质子变配电室及气瓶间等

（2）BNCT

BNCT 工作场所位于肿瘤中心地下一层以及地上一层与地下一层之间的管道层，主要包括加速器机房、中子产生机房、2 间治疗室、加速器控制室、治疗控制室、模拟定位室、恢复室、QA/QC 室、办公室、冷却水机房、放射性固体废物

暂存间及其他辅助治疗用房和设备机房等。具体见表 3-2。

表 3-2 BNCT 工作场所布局情况

位置	场所布局情况
地下一层	加速器机房、中子产生机房、2 间治疗室、加速器控制室、治疗控制室、模拟定位室、恢复室、QA/QC 室、办公室、冷却水机房、放射性固体废物暂存间及其他辅助治疗用房和设备机房等
地上一层与地下一层之间	管道层

（3）医用电子直线加速器、模拟定位 CT 机

医用电子直线加速器工作场所位于肿瘤中心地下一层，除医用电子直线加速器机房外主要为控制室、水冷间等辅助用房和设备机房；

模拟定位 CT 机工作场所位于肿瘤中心地上一层，除模拟定位 CT 机房外主要是 CT 控制室。

医用电子直线加速器、模拟定位 CT 机工作场所布局具体见表 3-3。

表 3-3 医用电子直线加速器紧及模拟定位 CT 机工作场所布局情况

位置	场所布局情况
地下一层	医用电子直线加速器机房、控制室、水冷间等辅助用房和设备机房
地上一层	模拟定位 CT 机房、CT 控制室。

本项目所各层平面布局图及各场所的位置见图 3-1~图 3-3。

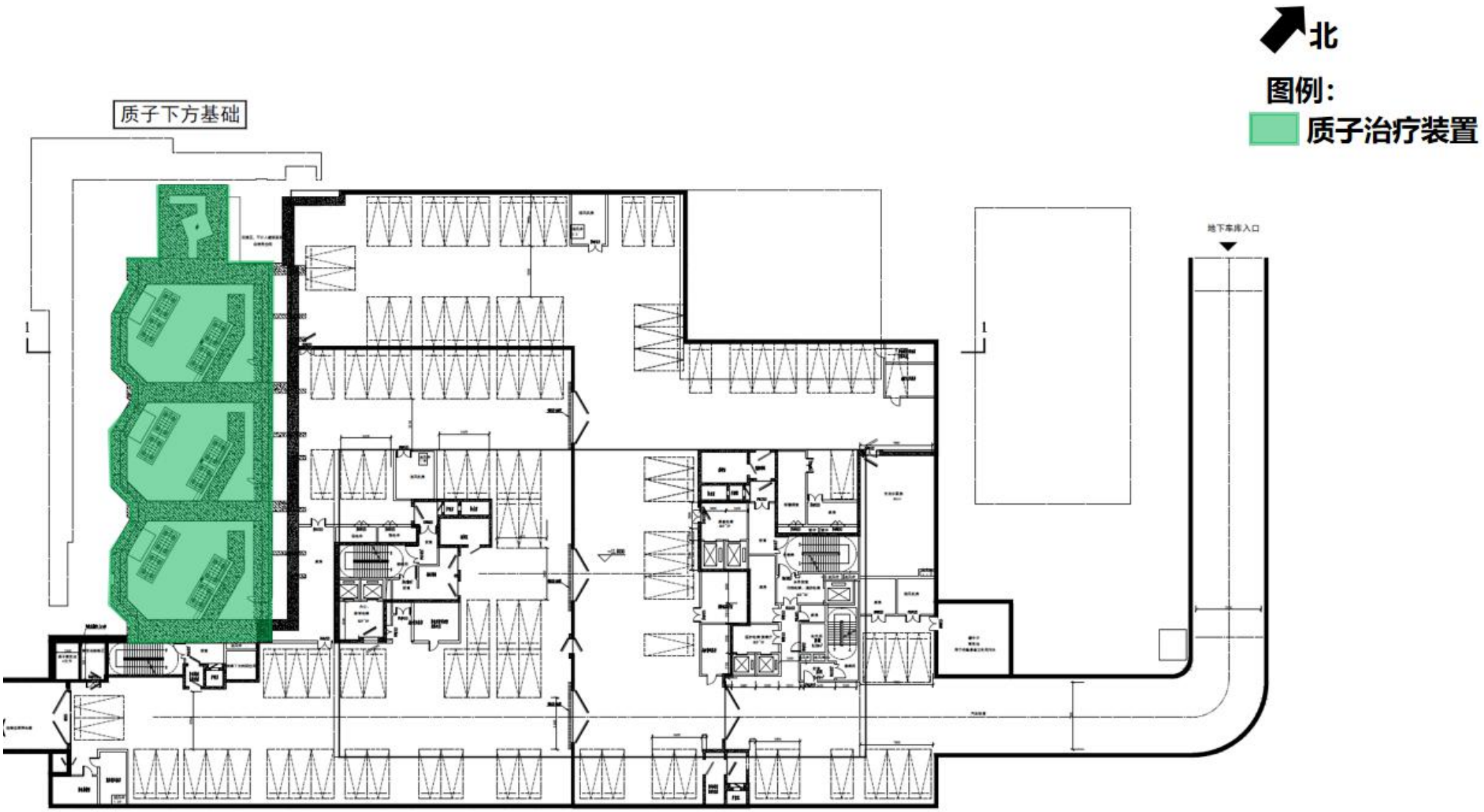


图 3-1 肿瘤中心地下二层平面布局图

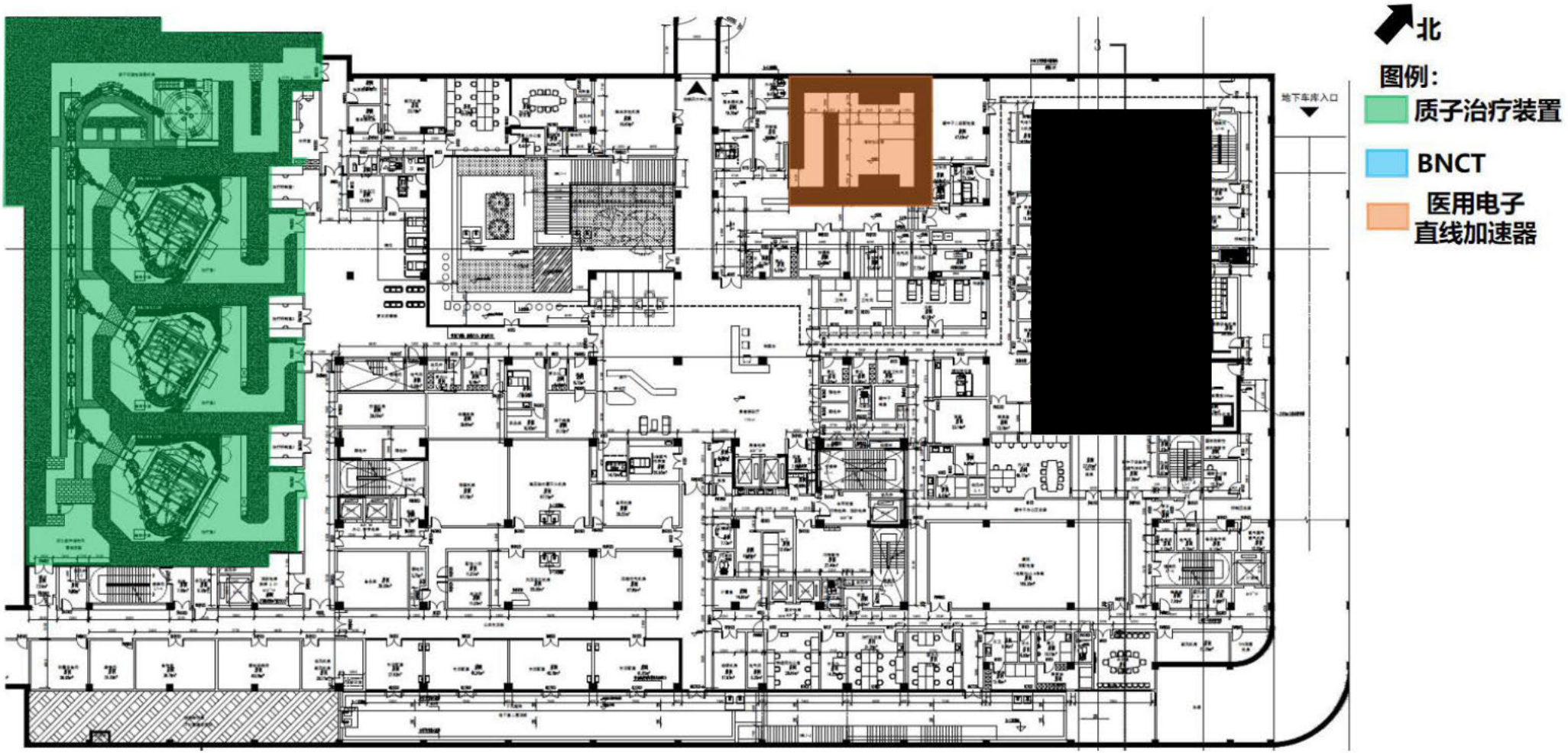


图 3-2 肿瘤中心地下一层平面布局图

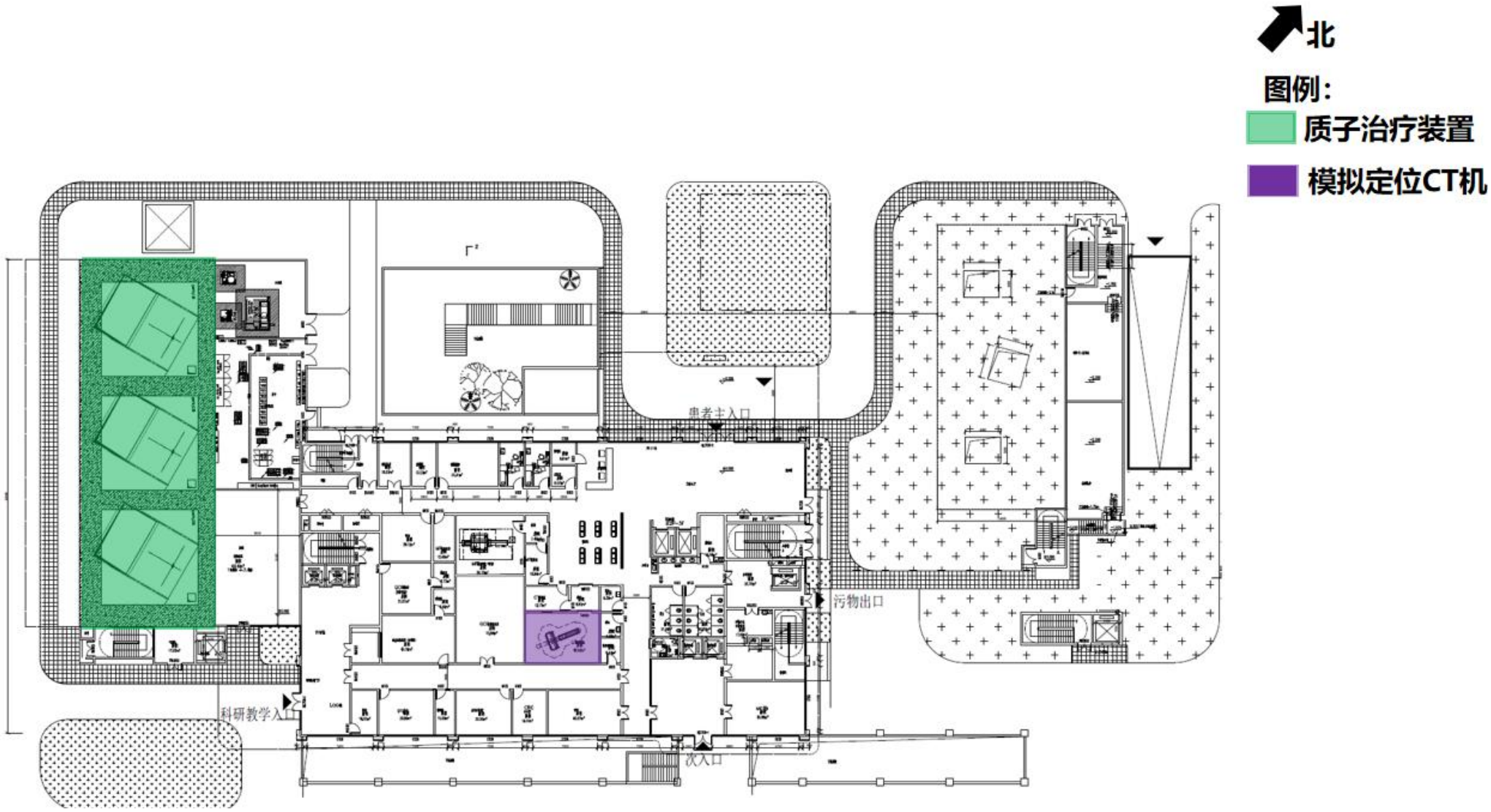


图 3-3 肿瘤中心地上一层平面布局图

3.1.2 基本参数

本项目拟配备的射线装置主要参数列于表 3-4。

表 3-4 本项目拟配备的射线装置一览表

序号	射线装置名称	规格型号	主要参数（能量/管电压，管电流）	生产厂家	数量	类别	所在位置
1	质子治疗装置	Bragg Cure Proteus PLUS	最高能量：230MeV 最大流强：300nA	中广核医疗科技（绵阳）有限公司	1	I	肿瘤中心地下二层~地上一层
2	BNCT	[redacted]	质子最高能量：30MeV [redacted]	禾荣医疗器械（南京）有限公司	1	II	肿瘤中心地下一层以及地上一层与地下一层之间的管道层
3	医用电子直线加速器	\	X 射线最大能量：10MV 等中心最大输出剂量率：2400cGy/min 电子线最大能量：18MeV 等中心最大输出剂量率：1000cGy/min	\	1	II	肿瘤中心地下一层
4	X 射线影像系统	\/	最大管电压：150kV 最大管电流：800mA	中广核医疗科技（绵阳）有限公司	6	III	肿瘤中心地下一层质子治疗装置 3 间旋转机架治疗室内
5	模拟定位 CT 机	\	最大管电压：150kV 最大管电流：1300mA	\	1	III	肿瘤中心地上一层

3.2 工艺设备

3.2.1 质子治疗装置

3.2.1.1 装置组成

本项目拟配置一套由中广核医疗科技（绵阳）有限公司研制生产的BraggCure Proteus PLUS 型质子治疗装置，具体技术指标见表 3-5。该装置回旋加速器、能量选择系统、束流输运系统和治疗系统组成。

质子在回旋加速器中加速到 230MeV 后引出，最大引出流强设计为 300nA，引入能量选择系统。通过调节能量选择系统中降能器的厚度，可根据实际治疗肿瘤的深度和厚度，在输出端得到 70~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。束流输运系统用于将能量选择器引出的质子输运到各治疗室内。

本项目质子治疗装置共配置 3 个旋转机架治疗室，从北到南分别为治疗室 1、治疗室 2 和治疗室 3（3 间旋转机架治疗室（旋转机架最大旋转角度 360°））。

主要技术参数见表 3-5，装置结构组成示意图见图 3-4，平面及剖面布局示意图见图 3-5。

表 3-5 质子治疗装置主要技术参数



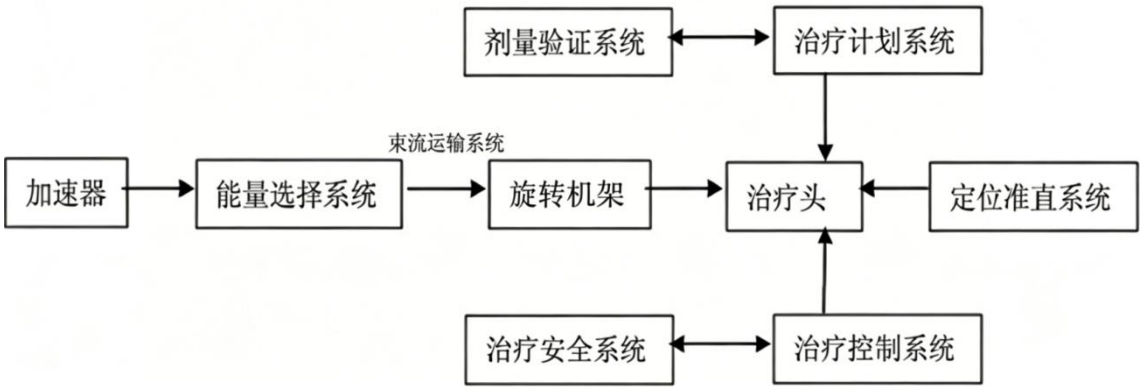


图 3-4 质子治疗装置装置结构组成示意图

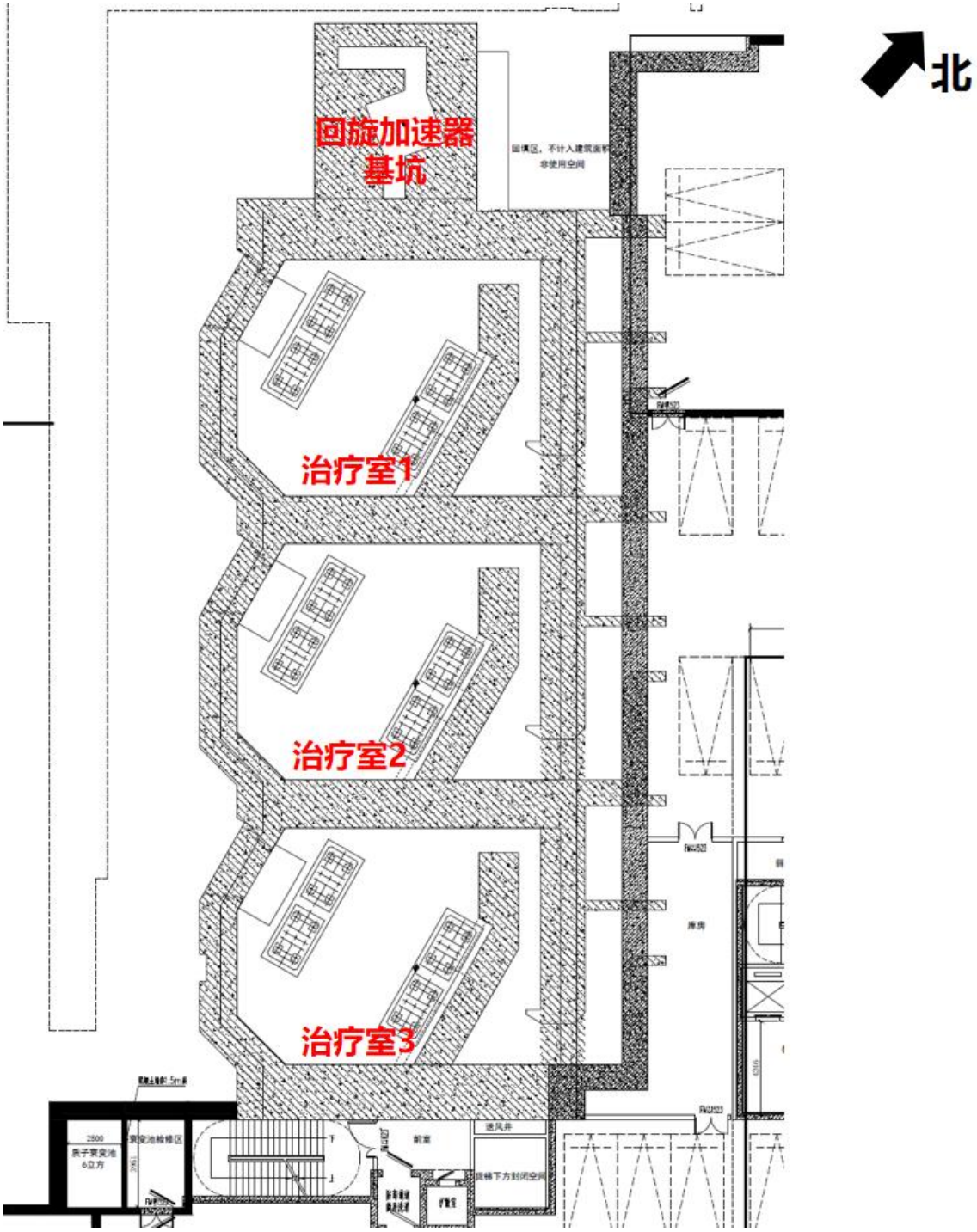


图 3-5 质子治疗装置地下二层平面布局图

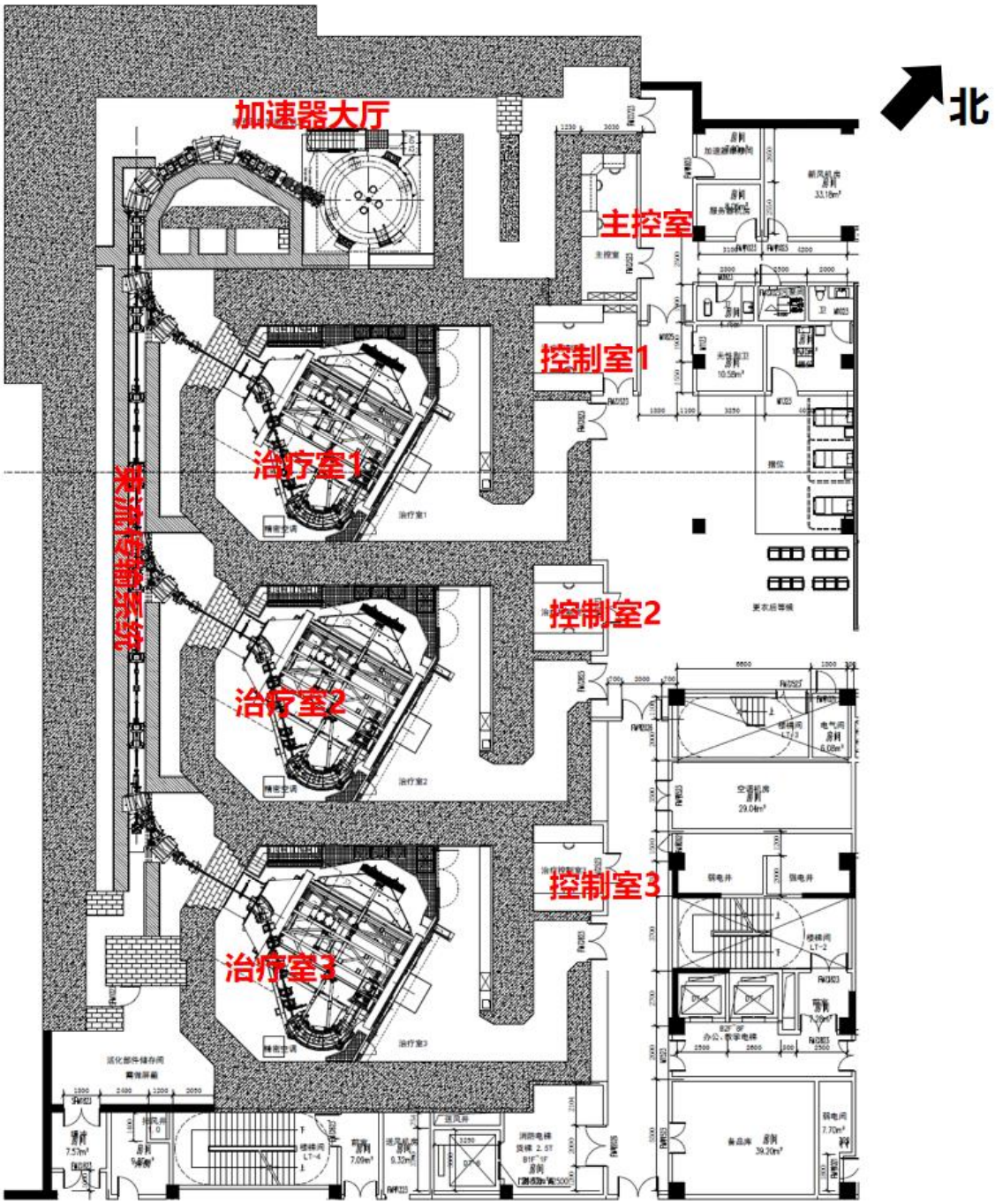


图 3-6 质子治疗装置地下一层平面布局图

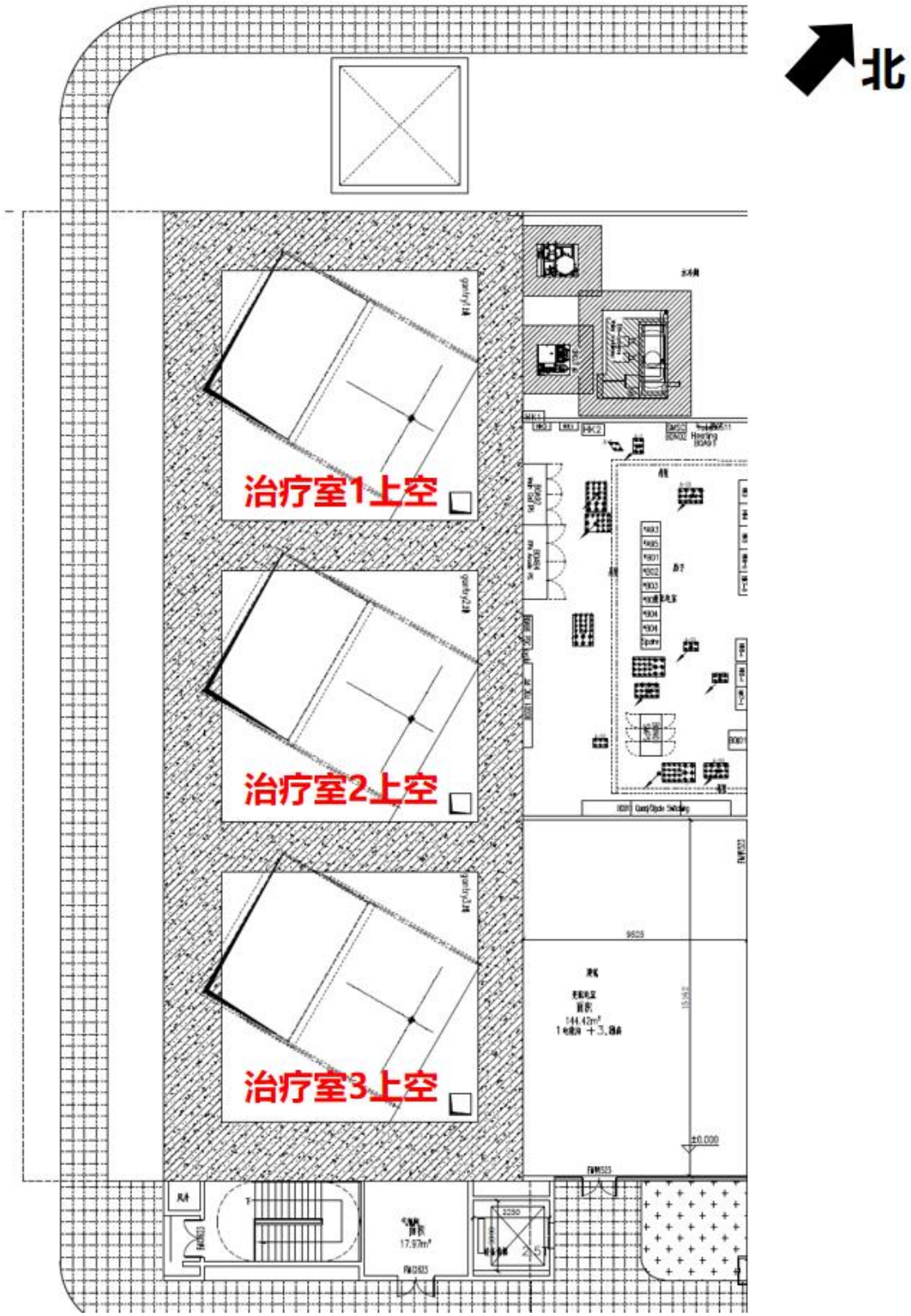


图 3-7 质子治疗装置地上一层平面布局图

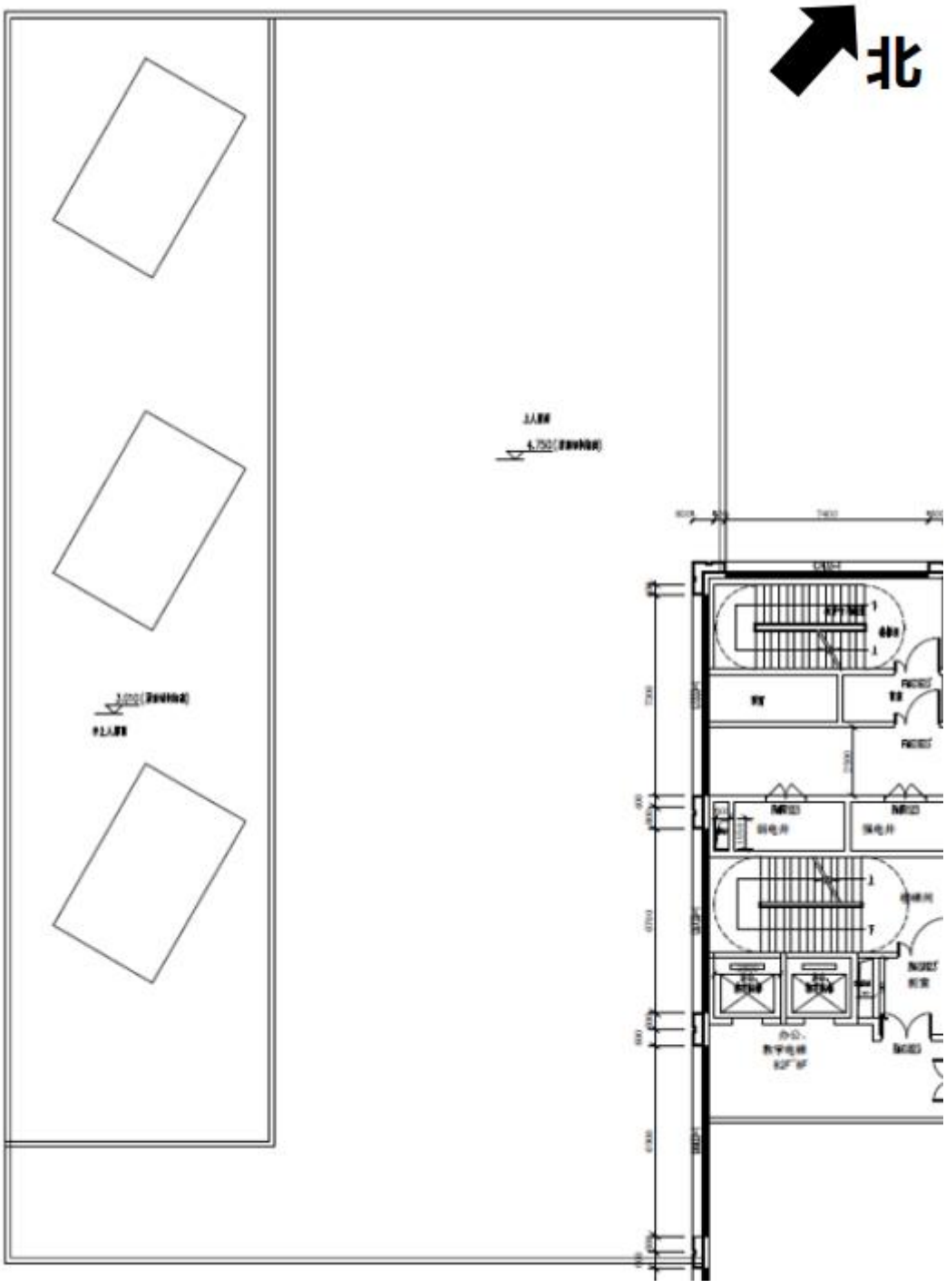


图 3-8 质子治疗装置屋面平面布局图

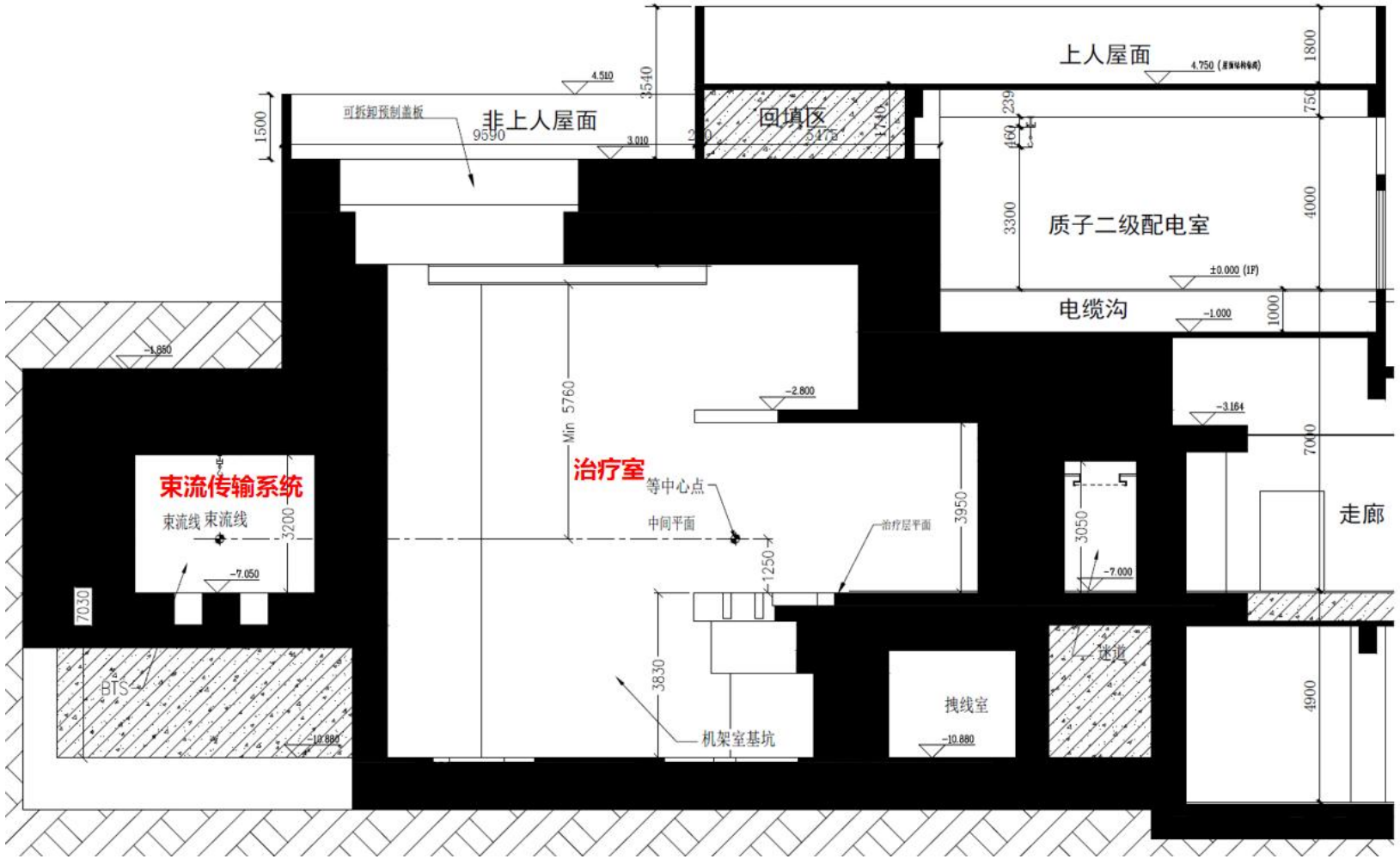


图 3-9 质子治疗装置剖面图 1

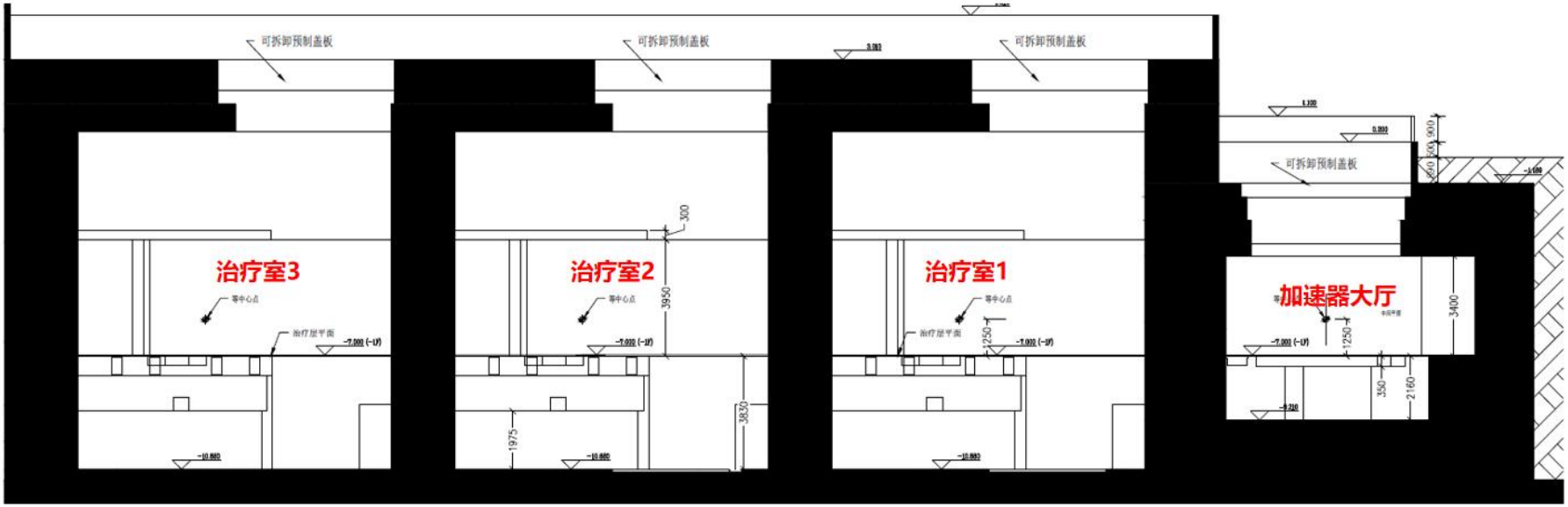


图 3-10 质子治疗装置剖面图 2

3.2.1.2 工作原理

质子治疗装置中质子由回旋加速器→能量选择系统→束流传输系统→治疗室终端，经历质子加速、注入、能量选择、引出和治疗。各部分详细工作原理如下。

3.2.1.2.1 回旋加速器

回旋加速器是质子治疗装置的核心。质子治疗装置的回旋加速器结构示意图如图 3-11 所示。在回旋加速器内，通过离子源部件将氢气进行电离，使其成为氢离子，即带正电的质子。质子通过若干个高频电场供电的间歇，每次通过间隙均得到高频能量进而实现加速。为把质子限制在有限的空间内进行加速，加速器中央设置 D 形盒和周边磁铁，在质子运动的垂直平面上加一个固定磁场，使质子在该磁场中做螺旋圆周运动。D 形盒形成的交变电场和磁铁形成的磁场共同作用，最终将初始能量约 50keV 的质子能量加速到 230MeV，然后通过加速器引出系统利用磁电偏转方式，将质子束从加速器中引出。质子治疗装置正常运行期间，回旋加速器每天 24 小时始终处于开机运行状态，仅在检修保养期间才会停机，且仅在治疗期间才会产生质子束流。



图 3-11 回旋加速器结构示意图

3.2.1.2.2 能量选择系统

质子治疗时要根据肿瘤本身深度和厚度选用不同能量的质子，由于回旋加速器引出的质子能量是固定的，因此在回旋加速器和治疗室之间设置一个能量选择系统，该系统由降能器、准直器与离子光学用的各种磁铁和测量元件组成，能量选择系统（ESS）的主要布局如图 3- 12 所示。沿束流方向，依次包括：降能器（degrader）、准直器（collimator）、散度准直器（divergence slits）、能量狭缝（momentum slits）。

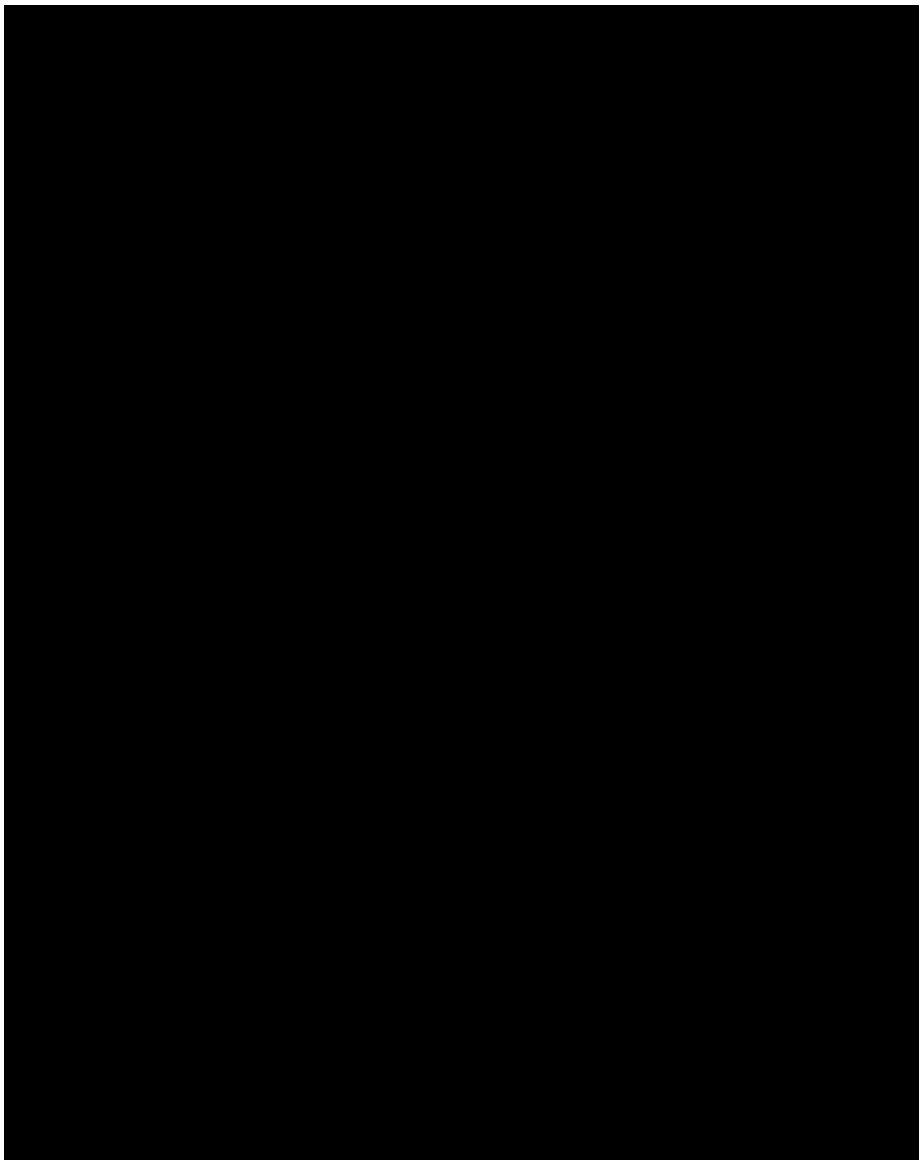


图 3-12 能量选择系统总体布局图

从回旋加速器引出的能量为 230MeV，固定不变。能选系统能按照调试计划，对引出能量进行降能，以获得所需的不同能量质子束流。

降能器材质一般为石墨、Be 和 Al，当质子通过降能器时，降能器厚度越大质子能量降低越多，因此使用不同厚度的降能器即可得到不同程度能量的降低。当回旋加速器引出的能量为 230MeV 的质子进入能量选择系统，通过调节降能器的不同厚度，就可以在输出端得到能量为 70~230MeV 之间连续可调的不同能量的质子。

（1）降能器

当质子通过降能器时，降能器厚度越大质子能量降低越多，因此使用不同厚度的降能器即可得到质子能量不同程度的降低。本项目质子加速器的降能器材质主要为铍（Be）、石墨（C）和铝（Al）。当回旋加速器引出的能量为 230MeV 的质子进入能量选择系统，通过调节降能器的不同厚度，可以在输出端得到能量为 70～230MeV 之间连续可调的不同能量的质子束流。



图 3-13 降能器内部结构示意图

（2）准直器

准直器位于降能器后面，目的是阻挡发散的束流，内部结构见图 5。准直器是一个圆柱体，材质是钽，中间有一个 10mm 的圆孔。



图 3-14 准直器内部结构示意图

（3）散度准直器

散度准直器作用在于进一步阻挡发散的束流，由两组相互垂直的部件组成，包括两组 6cm 厚的镍材质挡块，质子束穿过散度准直器时，发散的质子束流将被挡块吸收。

（4）能量狭缝

能量狭缝仅允许选定能量范围的束流通过，并吸收能量范围外的束流，其形状和材质与散度准直器接近，但其结构只包含一组狭缝。能量狭缝位于两对偶极子之间，使束流偏向治疗室。

3.2.1.2.3 束流传输系统

束流输运系统用于将加速器产生的质子束流输送到患者治疗部位附近。沿束流输运线管道放置四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备、四级磁铁用于对质子束流进行聚焦，偏转磁铁用于改变束流的方向，导向磁铁用

于纠正质子束流在系统安装时产生的偏离。

3.2.1.2.4 治疗室终端

治疗室终端为治疗病人的场所，本项目配备 3 间旋转机架治疗室，旋转机架治疗室内含有旋转机架及旋转治疗头，旋转机架能够环绕卧姿患者进行转动，可实现 360°旋转。引入每个治疗室的束流线前端均设有一个束流闸，用于控制束流通过。当该治疗室没有治疗任务时，束流闸关闭，阻断束流进入治疗室；当需要治疗时，治疗控制系统即打开束流闸，允许束流通过。每个治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一个治疗室提供束流。

①旋转机架

旋转束治疗室通过机架使质子依照同中心旋转，以进行多野不同入射角的照射。在旋转中心的治疗床能进行上下、前后、左右的调节，还能作头脚水平和左右水平方向的倾斜，以方便精确地重复病人治疗的体位。

旋转机架是一个巨大的能同中心旋转的钢结构，该机架上装有质子束偏转磁铁和聚焦磁铁，真空系统和射线监测器，IBA 旋转机架直径约 11 米，重量达 100 吨，可进行±185°旋转，转速可由 0.5rpm 至 1rpm。机架半径的精度小于 1 毫米。

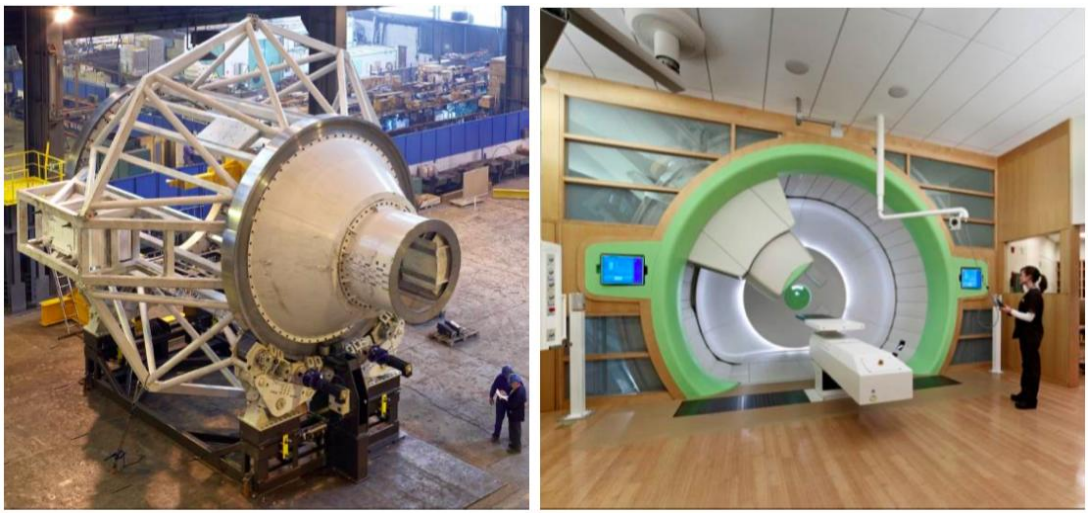


图 3-15 质子治疗系统旋转机架和机架治疗室实物参考图

②治疗头

治疗头位于束流输运系统的最末端，根据不同需求和治疗计划，使用不同的治疗模式，准确地将质子束照射到目标肿瘤中。模拟图见图 3-16。本项目质子治疗系统使用的均为笔形束扫描治疗头。

在笔形束模式（PBS）下，质子束可逐层逐点对靶区进行扫描，以精确匹配肿瘤形状。对形状复杂的肿瘤，笔形束扫描也可以精确配置剂量并达到高度适形。笔形束扫描模式还可以实现调强质子治疗，即质子束依次扫描肿瘤的一小部分，并调整每一部分质子束的剂量和深度适应肿瘤宽窄不一的轮廓。调强质子治疗与适当的影像设备及治疗方式结合，还可以治疗移动肿瘤。



图 3-16 质子治疗系统治疗头模拟图

③患者定位系统

自动患者定位系统提供除了自由的移动和仰俯及侧倾调整功能外，还可以进行水箱的处理或者整合质保工具，并扩展了更多治疗室机械臂的应用。

④X 射线影像系统

X 射线影像系统可以在患者摆位阶段得到数字化 X 光片。X 光片可以显示骨性定位标志/植入标志以及投影的聚焦中心。治疗师将采用此信息与来自治疗计划数字重建 X 光片比对，从而确定病人位置的改变计算矫正矢量。

旋转治疗室 X 射线影像系统由两组 X 光球管（最大管电压：150kV，最大管电流：800mA）和探测器组成，其中一个 X 光球管安装于治疗头内部，其对面的探测器位于质子束流方向，即 Rad-A 影像系统；另一组 X 光球管和探测器位于和第一组正交的方向上，即 Rad-B 影像系统。两套 X 射线影像系统，可以分别单独

采集病人 2D 影像；或者使用 Rad-B 系统采集 3D（CBCT）影像。旋转治疗室内 X 射线影像系统结构图及模拟图见图 3-17~图 3-18。



图 3-17 X 射线影像系统的 X 射线球管和探测器位置结构图

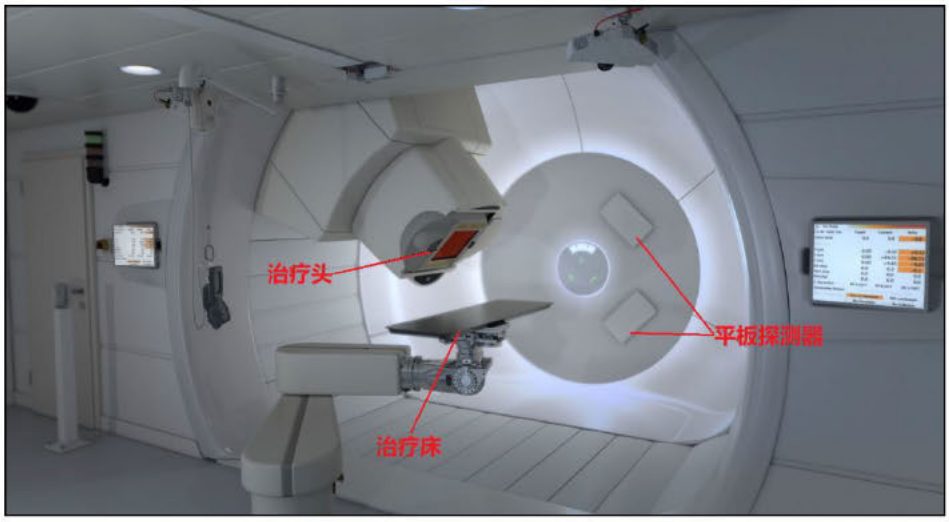


图 3-18 X 射线影像系统模拟图

3.2.1.2.5 工作流程

3.2.1.2.5.1 进入加速器大厅和治疗室的流程

一、 进入加速器大厅的流程

医院的辐射工作人员不会进入加速器大厅，只有设备厂家的工程师方可进入。工程师进入回旋加速器区的流程如下：

（1）当工程师需要进入加速器大厅工作时，由加速器大厅负责人按照加速器正常操作程序停止该区域的束流。

（2） 由专门的辐射防护人员在回旋加速器主控室内将主控钥匙旋转至“OFF”状态，并拔下该钥匙，交给该名工程师。

（3）欲进入人员将主控钥匙随身携带，通过刷门禁卡进行人员身份识别后，通过随身携带的剂量率报警仪，在区域入口处进行剂量率水平确认后，进入加速器大厅内。

（4）工程师在工作结束后，进行“清场搜索”并确认加速器大厅内无人停留后，在规定的时间内通过关门按钮关闭门离开，完成清场搜索程序。

（5）工程师离开加速器大厅并确认出入口的门关闭后，回到加速器大厅控制室内将主控钥匙插回并旋转至“ON”状态，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。

二、进入治疗室流程

（1）每次治疗有两名技师在场，当有患者需要进入治疗室内治疗时，由一名技师通过刷门禁卡进行人员身份识别后，通过随身携带的剂量率报警仪，在治疗室入口处进行剂量率水平确认后，将患者带入治疗室，进行准备工作、摆位等操作；另一名技师留在治疗室的控制室内；

（2）准备工作完成后，治疗室内的技师进行“清场搜索”确认治疗室内无人停留后，离开治疗室进入工作区，确认其工作完成后通过其治疗系统给控制室内的技师发出信号，控制室内的技师收到该确认信号，并确认治疗室内的技师离开治疗室后，向加速器控制系统发送允许开机的信号，方可开始治疗。

（3）根据质子治疗系统自身系统设置，各治疗室之间相互独立。

3.2.1.2.5.2 运维流程

质子治疗装置的运行维护（包括加速器运行及设备的维修维护）工作由厂家工程师负责，医院不参与运维工作。设备厂家负责装置运维过程中相关场所的安保工作。医院作为质子治疗装置的所有单位，负责对厂家运维过程履行监管职责，并协助设备厂家完成该阶段的安保工作。相关内容在厂家销售（含建造）和使用质子治疗装置的环评文件已对相关流程及环境影响进行了详细分析评价，本小节不再赘述。

3.2.1.3 治疗流程及产污环节分析

质子治疗系统的治疗流程和产污环节如下。

（1）制定治疗预案

患者预约、就诊，经专家医师会诊，判断患者符合质子治疗适应症后（诊断、治疗正当性判断），由质子治疗科室医生、物理师、治疗技师联合讨论，制定治疗预案，并预约登记模拟定位时间和治疗时间。

（2）治疗前模拟定位

对于首次预约质子治疗的患者，需要利用模拟定位 CT 机对其进行治疗前的模拟定位，采集患者数据并确定初始等中心，主要的辐射源项为模拟定位 CT 机出束产生的 X 射线。该环节在肿瘤中心地上一层模拟定位 CT 机房进行，主要由治疗技师和护士进行操作。治疗技师主要负责在机房内进行照射前的摆位和在控制室内操作开机照射，照射前摆位约 5min/人次，照射时间约 1min/人次。护士主要负责在有需要的情况下为患者留针并注射造影剂，在机房内完成留针，留针时间约 1min/人次；在控制室内远程注射造影剂，注射时间约 1min/人次。具体的人员配备、操作方式和工作时间列于表 3-6。

表 3-6 治疗前模拟定位的工作人员工作内容和操作时间

工作岗位	工作内容	操作时间
治疗技师	治疗室内摆位	5min/人次
	控制室内操作开机照射	1min/人次
护士	机房内留针	1min/人次

	控制室内远程注射造影剂	1min/人次

（3）治疗计划制定

物理师利用治疗计划系统制定治疗计划，确定治疗参数，如照射次数、照射方向、照射剂量，通过剂量计算制定剂量分布图；确定治疗等中心点的精确位置、照射野大小和方向等参数，并利用治疗计划系统提供的图像编辑和后处理工具对所制定的治疗计划进一步优化，最终确定完整的治疗计划方案。该环节利用治疗计划系统完成，不需开机出束。

（4）治疗计划验证

每名患者的治疗计划在正式使用前，为确保治疗安全，都需进行一次治疗前的计划验证，即利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行水箱模拟治疗，实测其治疗参数，再和治疗计划中规定的治疗参数进行比较，若差值在允许容差内，则允许正式用于患者治疗。一次治疗计划验证的过程与一次正式的治疗过程基本一致，总时间约为 20min。由物理师完成所有操作，包括在治疗室内的摆位等操作和在控制室内操作出束照射。该环节主要的辐射源项为治疗室内定位 X 射线管出束产生的 X 射线以及质子治疗系统出束产生的中子、γ瞬发辐射和感生放射性。

（5）治疗前精确摆位

计划验证通过并获得批准执行后，患者可进入治疗室内准备治疗，根据治疗计划由治疗技师在治疗室内对其进行摆位，摆位完成后使用治疗室内的 X 射线定位系统进行精确的位置验证。该环节主要由治疗技师和护士进行操作。治疗技师负责摆位和摆位后的精确位置验证。利用治疗室内 X 射线管进行精确位置验证时，治疗技师在治疗室外的控制室工作。其中，治疗前摆位约需 5min，精确位置验证约需 5min。护士主要负责在有需要的情况下注射造影剂，包括进入机房内留针和在治疗控制室处远程操作注射造影剂。留针时间为 1min/人次，注射造影剂时间为 1min/人次。该环节的人员配备与“治疗前模拟定位”相同，主要的辐射源项为定位 X 射线管出束产生的 X 射线和质子治疗系统的感生放射性。

（6）质子治疗系统出束照射治疗

摆位验证完成后，治疗技师离开治疗室进入治疗控制室内，确定所有的安全联锁建立后，启动质子束流进行出束治疗。该环节主要的辐射源项为质子治疗系统出束期间产生的中子、γ瞬发辐射和感生放射性。

（7）治疗结束后解除摆位

患者治疗结束后，治疗技师进入治疗室内，对患者解除摆位并协助其离开机房，为下一个患者治疗做准备。该环节在治疗室内进行，由治疗技师全程操作，时间约为 1min。患者在接受治疗期间，其自身组织受到质子束流照射会产生感生放射性。因此，该环节主要的辐射源项为治疗室内的患者感生放射性、活化结构部件及活化空气。

质子治疗系统工作流程污染物产生环节及主要污染因子见图 3-19。

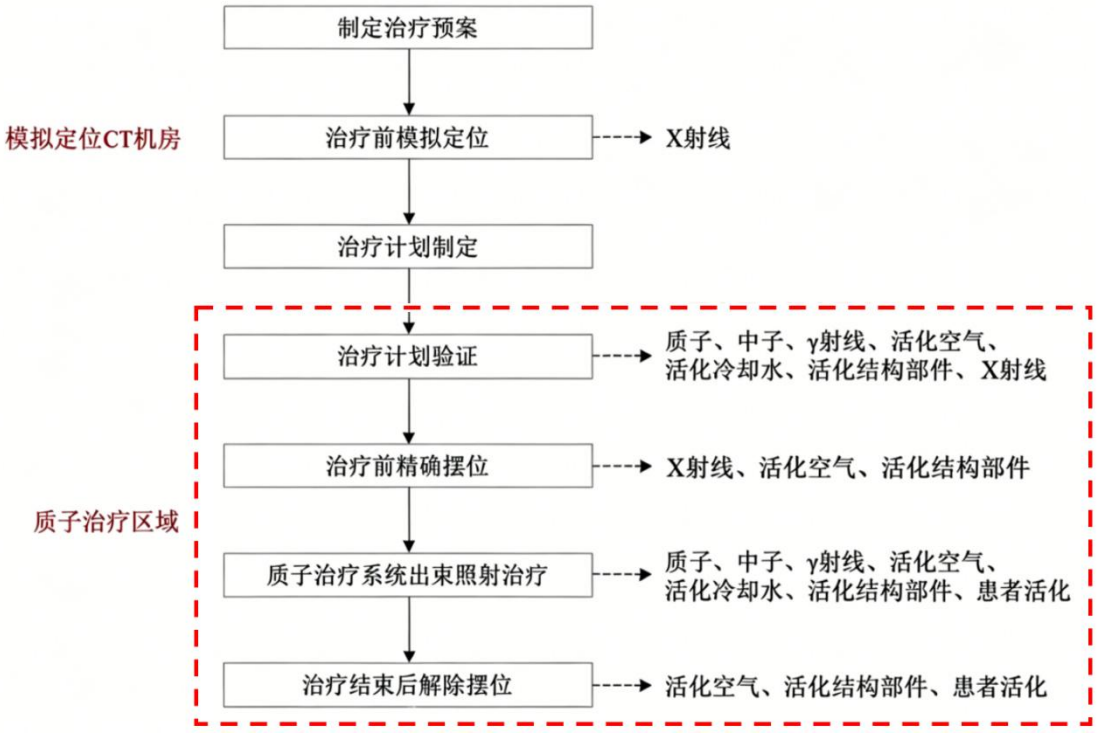


图 3-19 质子治疗系统工作流程及主要产污环节图。

3.2.1.4 人员配备和工作负荷

3.2.1.4.1 人员配备

医院拟为质子治疗装置配置 31 名辐射工作人员，其中治疗技师 9 人，物理师 7 人，科室医生 11 人，护士 4 人。另外由设备厂家配置相运维工程师。以上辐射工作人员均需确保参加辐射安全与防护培训，做到持证上岗。拟为每位工作人员配备个人剂量计，委托有资质的单位定期监测并建立辐射工作人员个人剂量档案，妥善保存，人员配置情况如表 3-7 所示。

表 3-7 质子治疗装置辐射工作人员配置情况

岗位类别	人数	工作地点	工作内容	排班计划
治疗技师	9 人	治疗室及其控制室	治疗准备、治疗前定位和病人摆位	每天两班，每班 8h
物理师	7 人	治疗计划室、物理师办公室、治疗室、治疗控制室	制定治疗计划、治疗计划验证、QA	两人每班，每班 8h
科室医生	11 人	医生办公室、治疗室	诊断、放射治疗方案的确定、治疗效果评定、临床试验、突发状况应急处理等	两人每班，每班 8h
护士	4 人	治疗室及其控制室、注射室	协助进行患者麻醉和治疗后的复苏；模拟定位前，注射造影剂等	两人每班，每班 8h
运维工程师	厂家人员	运维办公室	负责质子治疗装置运行期间日常的维保	每天两班，每班 8h

3.2.1.4.2 工作负荷

根据业主单位提供的资料，质子治疗装置的年使用规划列于表 3-8。

表 3-8 质子治疗装置年使用规划

序号	内容	单位	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	4	4	4
2	每室每天治疗时间	h/d/室	16	16	16
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	64	64	64
4	每室每年治疗天数	d/a/室	264	264	264
5	每室每年治疗人次	人次/a/室	16896	16896	16896
6	每人次治疗平均出束时间	min/人次	2	2	2
7	每室每天治疗出束时间	h/d/室	2.13	2.13	2.13
8	每室每年治疗出束时间	h/a/室	562.32	562.32	562.32
9	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	123	123	123
10	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	685.32	685.32	685.32

11	年总出束时间	h/a	2055.96

3.2.2 硼中子俘获治疗系统

3.2.2.1 装置组成

本项目拟使用 1 套禾荣医疗器械（南京）有限公司销售的[redacted]硼中子俘获治疗系统（BNCT），该系统由质子加速器（包括离子源及回旋加速器）、射束传输线、 中子生成器（包含中子束调整器（Beam Shape Assembly，简称 BSA）、靶系统、中子探测器）、2 间治疗室终端（2 个水平治疗室）、控制系统组成。质子经离子源注入（30keV 质子束流）回旋加速器中加速后引出，此时质子束流能量为 30 MeV，质子束流经射束传输线传送至中子产生器中的靶系统进而撞击铍靶产生中子束流（快中子，最大中子能量≦28 MeV），该束流经中子束调整器进行慢化，能量降至超热中子（0.5eV~10keV），通过治疗口进入治疗室终端，超热中子与注入患者肿瘤细胞内的 ^{10}B 相互作用，产生α粒子和反冲锂核对癌细胞起到杀伤作用，用于癌症治疗。同时治疗口附近的适当位置将安放中子探测器，以监控束流强度。该装置结构组成示意图如图 3-20 所示，主要技术指标见表 3-9。

本项目共配置 2 间水平治疗室。



图 3-20 [redacted] BNCT 治疗系统结构示意图

[redacted]

3.2.2.2 工作原理

硼中子俘获治疗系统是利用 BNCT 产生的超热中子，与患者体内注入的含 ^{10}B 药物相互作用，利用 ^{10}B 与肿瘤有特异性亲合力，对热中子的俘获截面远高于 C、H、O、N 等元素，且是稳定的、无毒性的、自然界同位素丰度高等特点。

先将 ^{10}B 化合物（BPA）注入患者体内，含 ^{10}B 化合物选择性富集于肿瘤细胞内。硼中子俘获治疗系统运行产生的中子束照射肿瘤区域时，肿瘤细胞内的 ^{10}B 可俘获大量中子，俘获核进入激发态，激发态核衰变释放能量，产生高传能线密度的α粒子（^{4}He）和反冲锂核（^{7}Li），并在癌细胞处释放能量，由于α粒子（^{4}He）和反冲锂核（^{7}Li）的射程分别与肿瘤细胞的尺度相近，故其杀伤作用仅限于肿瘤细胞及邻近的细胞，可在破坏肿瘤细胞的同时几乎不影响正常细胞，以此达到癌症治疗的目的。具体工作原理见图 3-21。

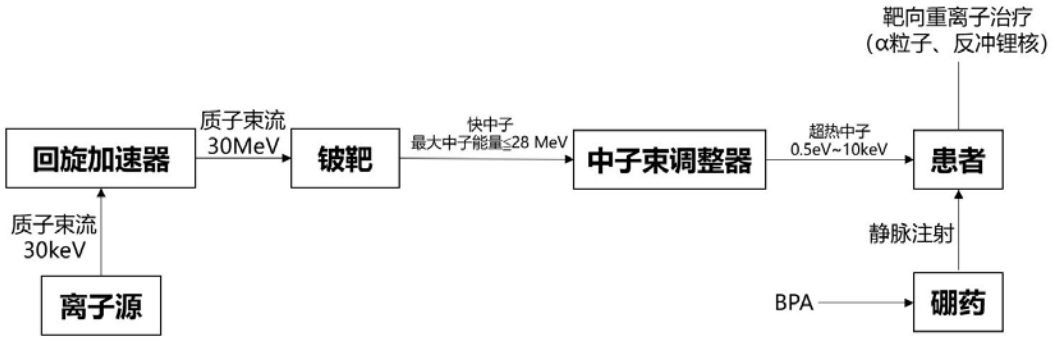


图 3-21 BNCT 治疗系统工作原理

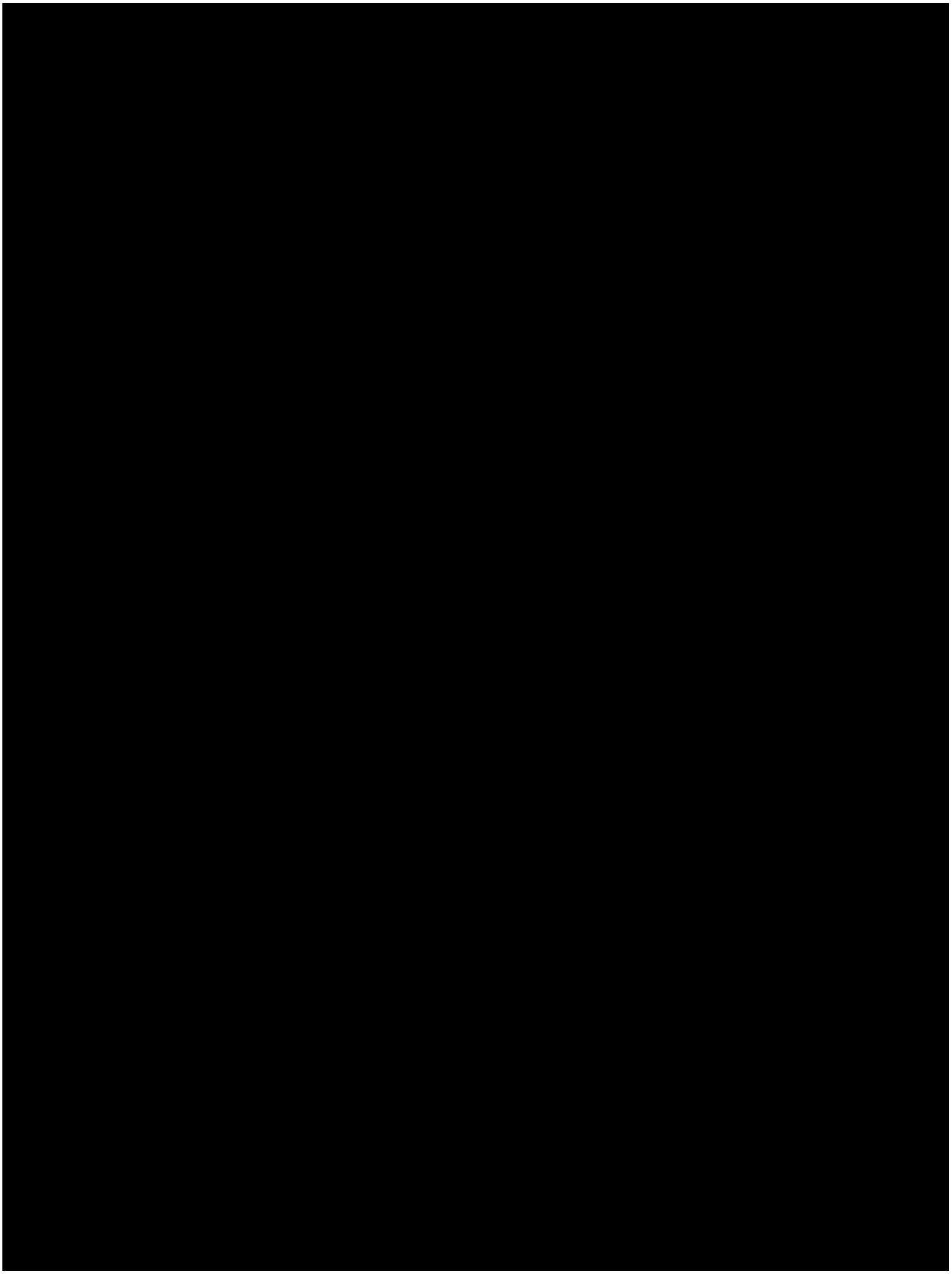


图 3-22 BNCT 地下一层平面布局图



图 3-23 BNCT 剖面图

3.2.2.2.1 质子加速器

该系统由离子源及回旋加速器组成。

质子加速器功能是将由离子源产生的质子注入至回旋加速器，将质子加速至30MeV 后，再经射束传输线输运至下游的靶系统。

（1）离子源

离子源是质子加速器的核心系统之一。由灯丝产生大量热电子与多磁极磁场让电子旋转增加行进路径，使得电子增加附着于氢原子 s 轨道的机会，生成带负一价氢离子（H-）等离子体，经电极将其抽出再加速能量至 30 keV，注入回旋加速器。

离子源外观及离子源内产生热电子灯丝实物照片如下：





图 3-24 离子源外观（上）及离子源内产生热电子灯丝（下）实物照片

（2）回旋加速器

带负电氢离子由离子源垂直进入电磁铁中心，经过 90 度偏转后沿着电磁铁水平面。经过在两个对称纯铜 53 度扇形无线电射频系统（66MHz）腔体时，每圈经过四次 50 kV 加速，获得 200 keV 增能。带负电氢离子经过增能加速后在磁场中受到四个磁峰 2.0 Tesla 磁场强度产生洛伦兹力转弯回旋，回旋越多圈能量越高回旋半径越大[redacted]

带负电氢离子（H-）经过碳膜剥离负氢离子外层两个电子形成正一价氢离子（质子）。因电荷电性相反，洛伦兹力也相反，高能量正氢离子（质子）偏折离开回旋电磁铁，进入射束传输线中输送至靶系统。

回旋加速器结构示意图如下：

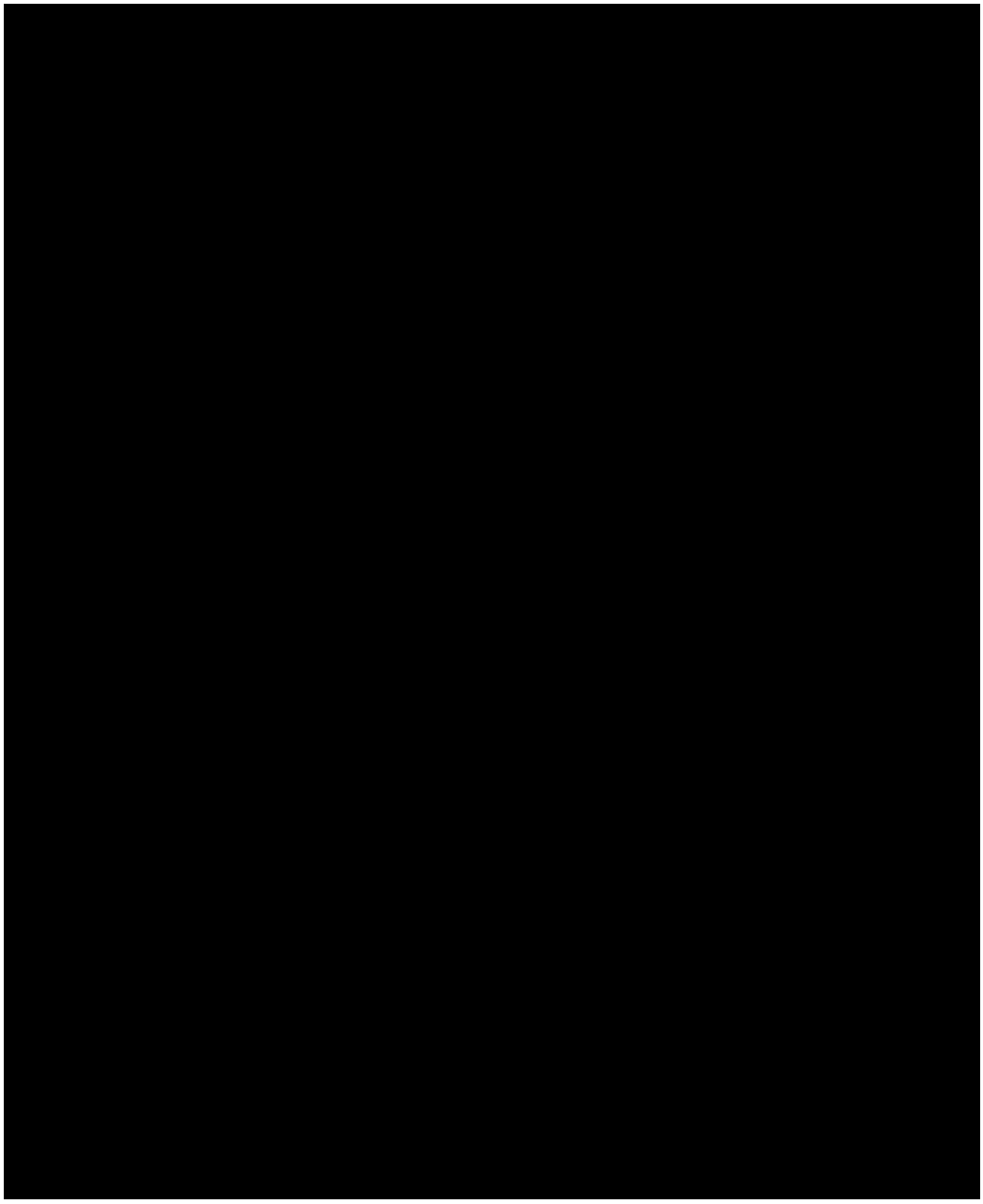


图 3-25 回旋加速器结构示意图

3.2.2.2.2 射束传输线

本系统有两条射束传输线分别在回旋加速器对侧。质子离开回旋加速器后进入射束传输线，经过二级铁调整方向与聚焦四级磁铁的几何中线重合进入两组四级双聚焦磁铁以调控质子束轮廓直径大小，避免质子束因互斥电性散开击中射束线管壁造成不必要的射束损失。质子束在射束传输线中根据束流诊断系统对束流损失进行监控，若损失过大则调整以确保 30MeV 质子束在射束传输线内能在极

低的束流损失情况下传输到靶系统。



图 3-26 射束传输线结构实物示意图

3.2.2.2.3 中子生成器

中子产生器包括靶系统及中子束调整器（BSA）。 从回旋加速器产生的质子束经过射束传输线进入中子产生器，最后由治疗口输出符合射束质量的超热中子束。

（1） 靶系统

两间治疗室各配置 1 个独立的靶系统（铍靶，Be-9）。位于加速器机房两侧的中子生产机房中。靶系统包括靶材本身与冷却水系统。 借由加速器传输过来的质子束撞击铍靶，引发 ^{9}Be（p，n）反应，将质子转换为高能中子，



图 3-27 铍靶结构示意图

（2） 中子束调整器

中子束调整器（BSA）[redacted]能中子通过 BSA 过程被减速并调整成适合进行 BNCT 照射的超热中子束。



图 3-28 中子束调整器结构示意图

（3） 中子探测器

中子束束流在线监测系统采用[redacted]，探测器安装在 BSA 不影响束流质量的位置进行监测，设置两个独立探测器进行监测工作，当束流达到预设的照射剂量时监测系统自动发出信号切断束流，达到停束目的；当系统发生故障，在预设剂量下仍未停束，则触发保护机制，在不超过预设剂量[redacted]，从而从不同层面完成照射及患者保护工作。

3.2.2.2.4 治疗室终端

本项目拟配置 2 间水平治疗室，治疗室终端包括：激光灯定位和中子治疗，其中：

（1）激光灯定位

该系统用于患者治疗前的精确摆位验证（无电离辐射），本项目地下一层治

[redacted]。具体位置分别见图 3-29。



图 3-29 激光灯定位示意图

（3）中子治疗

中子治疗系统设置在 2 个治疗室内，主要实现超热中子的治疗，主要设备为机械臂治疗床和超热中子出束头。其中：

①机械臂治疗床：治疗床采用具有六个运动自由度（DOF）的摆动式机器人治疗床。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 3-30 所示。

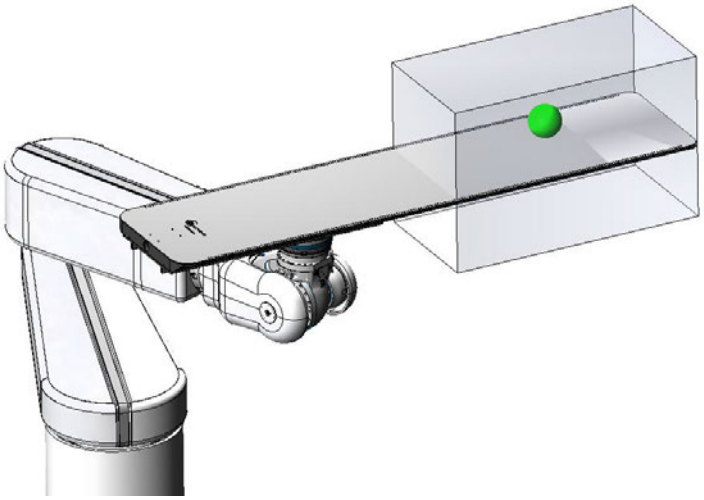


图 3-30 治疗床示意图

②治疗头用于引出超热中子束流，进行患者治疗，见图 3-31。



图 3-31 治疗头实物示意图



图 3-32 治疗室内患者、技师与治疗口的相对位置示意图

3.2.2.2.5 照射控制系统

照射控制系统的主要功能为控制回旋加速器传输质子至中子生成器的时间，组成包括：

1、照射控制系统客户端：

照射控制系统客户端包含射束控制设备（中子束屏蔽器与准直器、照射控制台等）及剂量监控系统，设置于治疗控制室，主要功能是在照射期间持续检查加速器状态，确认射束控制设备功能，以及监控照射剂量状态，以提供良好的射束质量与照射安全。

照射控制系统客户端将依据三种不同运行模式进行管理，不同运行模式之间的转换，通过照射控制台上的模式选择，并要求输入密码并验证权限，以确保照射安全与设备安全。运行模式说明如下：

1）照射模式：为中子束照射模式，照射控制系统客户端需考虑中子射束质量，照射参数与照射计划吻合，方可进行照射，并利用剂量监控系统监控中子射束强度以及质子束流强度，以控制照射时间。

2）质控模式：照射控制系统客户端在此模式下提供质控人员执行中子射束质量保证工作。

3）维修模式：照射控制系统客户端在此模式下提供运行维修人员进行治疗室内设备调整及检查维修

2、回旋加速器控制系统（或照射控制系统服务器）：

回旋加速器控制系统（或照射控制系统服务器）位于加速器控制室，控制回旋加速器运行，并与照射安全系统进行安全联锁，当照射控制系统客户端处于以下运行模式时:

1）照射模式：为中子束照射模式，回旋加速器控制系统（或照射控制系统服务器）需考虑质子束质量，以确保设备安全性。

2）质控模式：回旋加速器控制系统（或照射控制系统服务器）在此模式下提供质控人员执行质子束质量保证工作，包含质子能量、 电流与轮廓质量保证工作。

3）维修模式：回旋加速器控制系统（或照射控制系统服务器）在此模式下提供运行维修人员进行回旋加速器及中子生成器的调整及检查维修。

3.2.2.3 工艺流程

（1）质子产生及加速

离子源中的灯丝产生大量热电子与多磁极磁场让电子旋转增加行进路径，使得电子增加附着于氢原子 s 轨道的机会，生成带负一价氢离子（H-）等离子体，经电极将其抽出再加速能量至 30 keV，注入回旋加速器后加速至 30MeV，再经射束传输线引入靶系统。

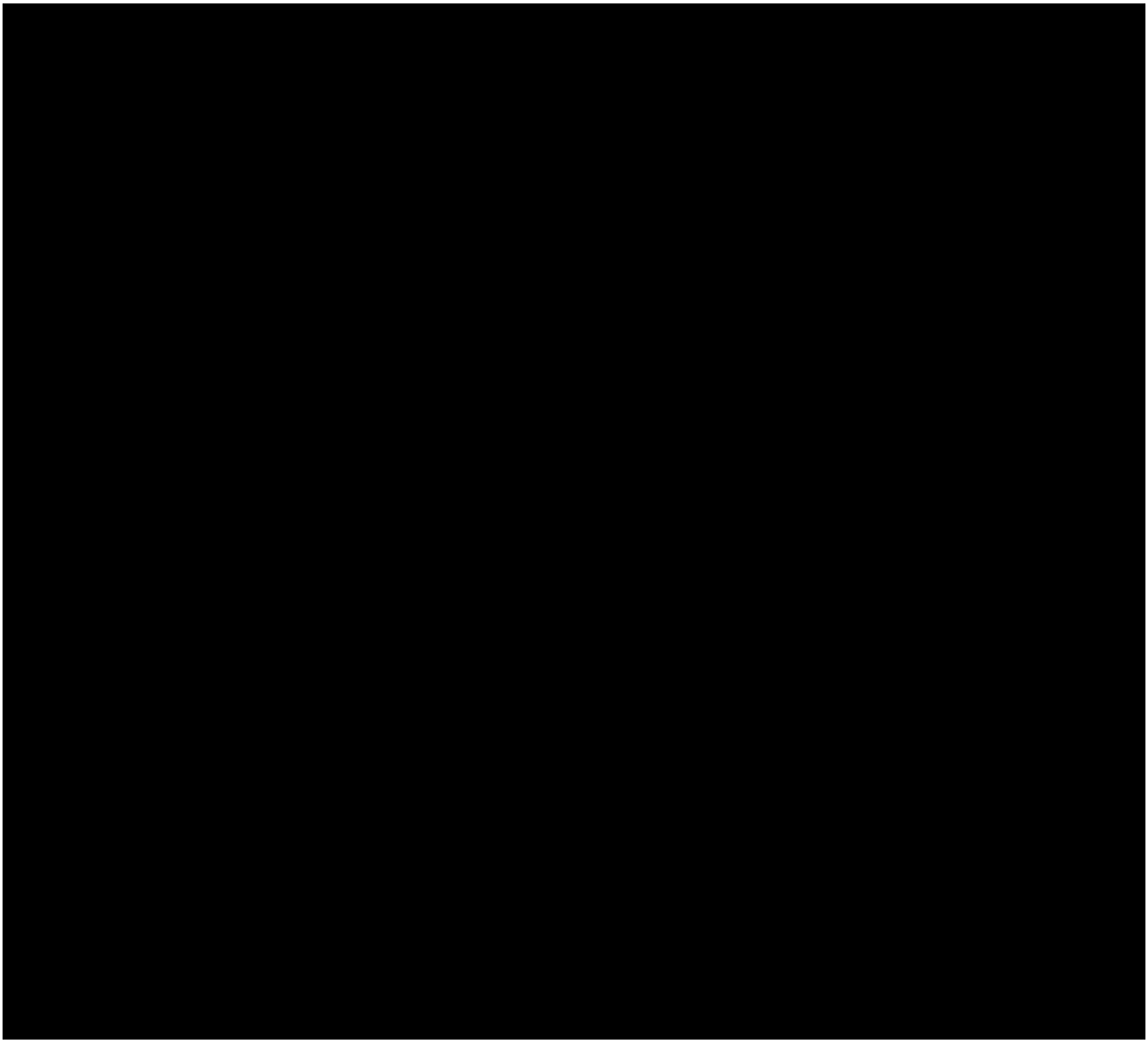
（2）打靶

[redacted]

（3）治疗终端输出

经中子束调整器（BSA）后的超热中子，直接作用于患者，使患者体内注射的含 ^{10}B 药物俘获中子进入激发态，激发态核衰变释放能量，产生α粒子和反冲 ^{7}Li 核，并释放能量，且利用α粒子（^{4}He）和反冲锂核（^{7}Li）射程分别约为 9μm 和 4μm，与肿瘤细胞的尺度相近（细胞直径约 10μm）的特点，即达到杀伤作用仅限于肿瘤细胞及邻近细胞，可破坏肿瘤细胞的同时，又几乎不影响正常细胞。

3.2.2.4 治疗流程





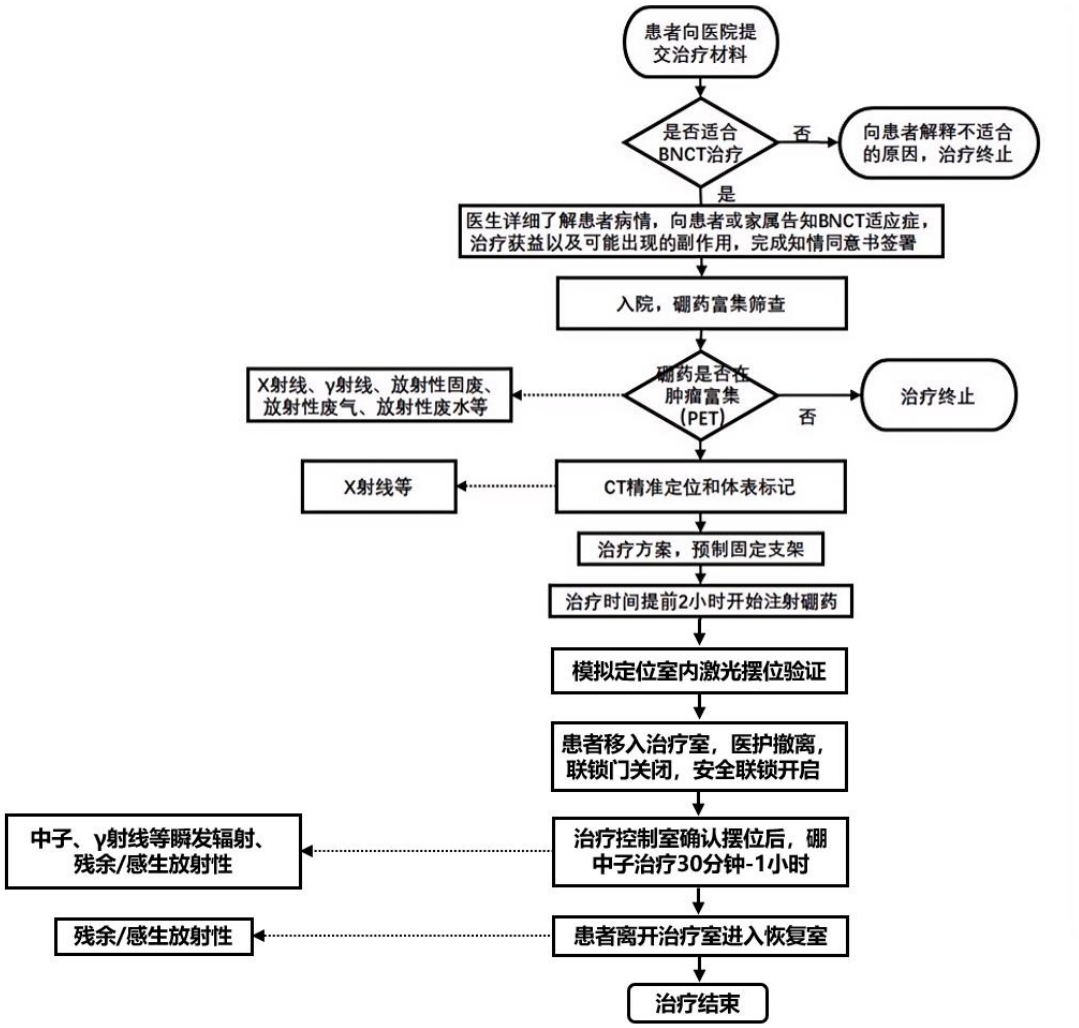


图 3-33 BNCT 治疗工艺流程及产污环节示意图

3.2.2.5 运维流程

厂家禾荣医疗器械（南京）有限公司（以下简称“禾荣（南京）”）是硼中子俘获治疗系统的运维责任方，负责装置运维过程中相关场所的安保工作。医院作为硼中子俘获治疗系统的所有单位，负责对厂家运维过程履行监管职责，并协助设备厂家完成该阶段的安保工作。运维环节主要包括设备检修、锂靶更换。禾荣（南京）生产、销售、使用 BNCT 的环境影响报告表中将对相关流程及环境影响进行了详细分析评价，本小节不再赘述。

3.2.2.5.1 设备检修

禾荣（南京）委派维护工程师常驻医院，定期对硼中子俘获治疗系统进行日常维护及大型维修，上述过程均会涉及整机出束，且大型维修还可能涉及部件拆卸、 组装。硼中子俘获治疗系统日常维护产生的污染物主要有中子、γ射线、韧致辐射、感生放射性废气以及氮氧化物、臭氧等废气，大型维修产生的污染物除了上述污染物，还涉及到放射性固废。

维护工程师日常维护及大型维修过程中均按照要求佩戴个人剂量计，进入机房内必须携带个人剂量报警仪、便携式剂量率监测仪，并且需要有同时测量γ和中子的功能，一旦辐射剂量监测结果异常，立刻退出机房。

3.2.2.5.2 铍靶更换





图 3-34 自动换靶装置原理示意图



3.2.2.6 工作负荷及人员配备

3.2.2.6.1 工作负荷

根据医院提供的资料，BNCT 的年使用规划列于表 3-10。

表 3-10 BNCT 治疗系统年使用规划

每间治疗室每天治疗人次	4 人次/d
每年治疗天数	365d/a
每间治疗室每年治疗人次	1460 人次/a
每次治疗的平均出束时间	40min/人次
每间治疗室每年治疗病人的出束时间	973.3h/a·间
治疗室每年治疗病人的总出束时间	1946.6h/a
每年每间治疗室其它出束时间（QA）	90h/a·间
BNCT 治疗系统每年总出束时间	2036.6h/a

3.2.2.6.2 人员配备

BNCT 治疗系统辐射工作人员主要包括治疗技师、物理师、科室医生、护士和运维工程师五类，如表 3-11 所示。

表 3-11 本项目辐射工作人员岗位和工作量规划

岗位类别	人数	工作地点	工作内容
治疗技师	8 人	治疗室内及其控制室、模拟定位机房及其控制室、模拟定位室	治疗准备、治疗前定位和病人摆位
物理师	4 人	物理师办公室、物理质控设备间、治疗控制室	制定治疗计划、治疗计划验证、QA
科室医生	8 人	医生办公室、治疗室	诊断、放射治疗方案的确定、治疗效果评定、临床试验、突发状况应急处理等
护士	2 人	麻醉/复苏室、注射室	协助进行患者麻醉和治疗后的复苏；模拟定位前，注射造影剂等
运维工程师	厂家人员	辐射办公室、办公室、加速器控制室	负责 BNCT 治疗系统运行期间日常的运维和铍靶更换工作

3.2.3 医用电子直线加速器

3.2.3.1 装置组成

医用电子直线加速器是以磁控管为微波功率源的直线加速器，它的结构单元为：加速管、电子枪、微波系统、调制器、束流输运系统及准直系统、真空系统、恒温水冷系统和控制保护系统。电子枪产生的电子由微波加速波导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子束由电子窗口射出，通过 2cm 左右的空气射到金属钨靶，产生大量高能 X 射线，经初级准直器和均整器形成剂量均匀的 X 射线束，再通过监测电离室和次级准直器限束，最后到达患者病灶实现治疗目的。医用电子直线加速器内部结构如图 3-35 所示。

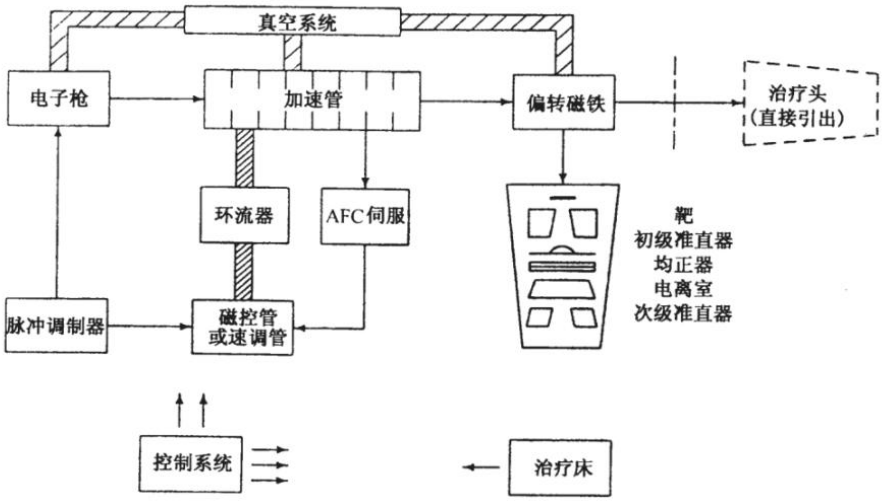


图 3-35 医用电子直线加速器内部结构图

本项目拟使用的医用电子直线加速器主要技术参数列于下表。

表 3-12 本项目拟使用医用电子直线加速器的主要技术参数

射线装置名称	厂家及型号	主要技术参数	数量	工作场所
医用电子直线加速器	待定	X 射线最大能量：10MV； 等中心最大输出剂量率：2400cGy/min； X 射线最大照射野：40cm×40cm； 电子线最大能量：18MeV； 等中心最大输出剂量率：1000cGy/min；	1	直线加速器机房

		电子线最大照射野：25cm×25cm； 有用束最大张角：28°； 源皮距：100cm； 治疗头旋转角度：365°		

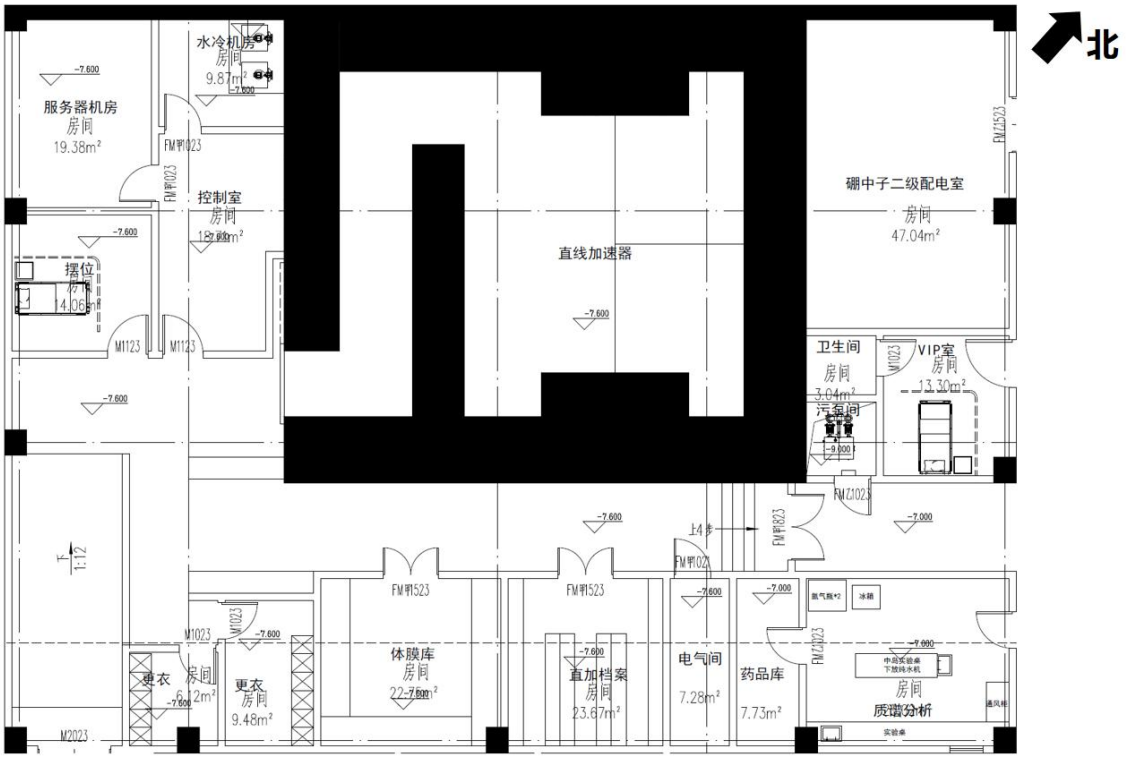


图 3-36 医用电子直线加速器机房平面布局图

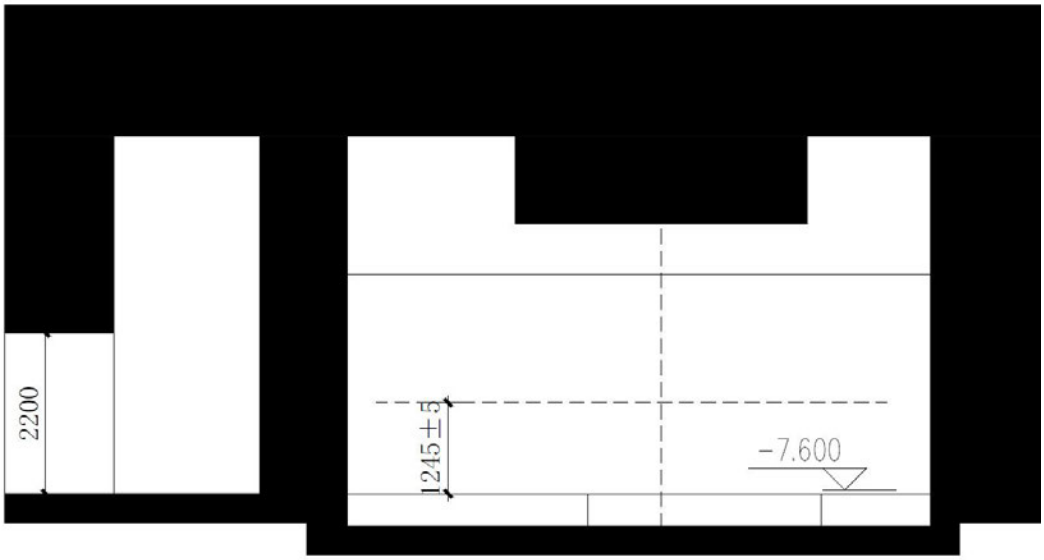


图 3-37 医用电子直线加速器机房剖面图

3.2.3.2 工作原理

医用电子直线加速器是产生高能电子束的装置。电子枪发射电子，再由磁控管/速调管为功率源的加速管中加速，当达到所需能量时，经散射箔和准直器得治疗电子束。电子束射到金属靶上产生轫致辐射，经准直得到治疗 X 射线。加速器放射治疗的工作方式为：以一个或几个治疗野定向照射，获得计划所需的治疗剂量。常见医用电子直线加速器外观结构示意图如图 3-38 所示。

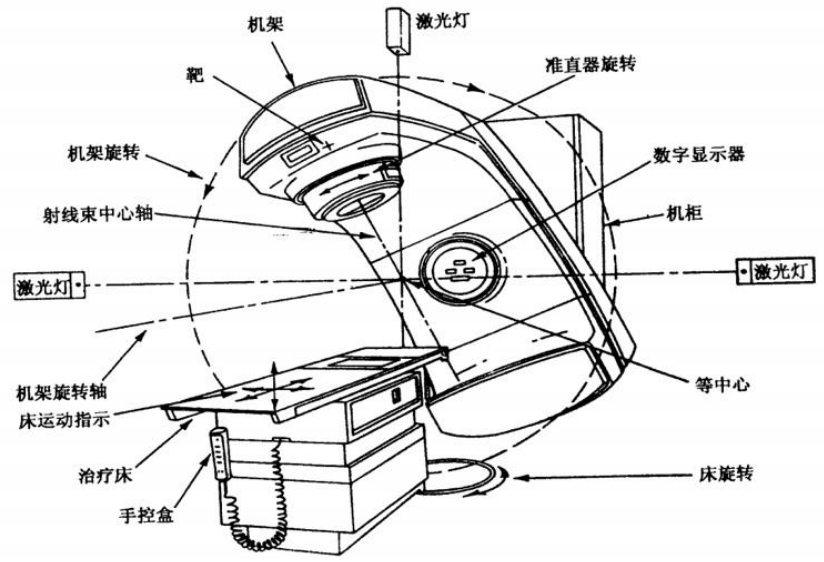


图 3-38 常见医用电子直线加速器结构示意图

3.2.3.3 工作流程及产污环节分析

医用电子直线加速器治疗流程如图 3-39 所示，具体治疗流程如下：

（1）接收病人：对病人进行登记，进行临床检查，经医生诊断和治疗正当性判定后，根据肿瘤分期、分型确定治疗方案，与放疗科预约登记，确定模拟定位治疗的时间；

（2）制模：为方便患者治疗定位，用热塑体模在相应治疗部位按照病人身体轮廓进行塑形；

（3）模拟定位：目前计划利用肿瘤中心地上一层的模拟定位 CT 机对肿瘤患者进行放疗前定位，以确定肿瘤的位置和三维结构，从而用于治疗计划系统的优

化和计算；

（4）勾画靶区 TPS 制定治疗计划：勾画病变靶区和正常器官，根据患者瘤体的类型、部位和大小等初步确定照射剂量和照射时间，并进一步制定相应的常规放疗、适形放疗及调强放疗的治疗计划；

（5）治疗计划确认：再次确认靶区剂量，核实正常器官、热点和冷点是否在允许的范围之内，加速器是否有相应的转床、碰床等机械限值，移床等坐标设置是否正确；

（6）病人摆位：摆位前认真查对病人信息、照射条件及摆位要求，调整治疗床高度，严格按照摆位要求实施摆位；

（7）实施治疗：根据放疗计划，运用有关技术实施精确照射；

（8）结束治疗：病人离开治疗室，摆位人员进行下一个患者摆位准备。

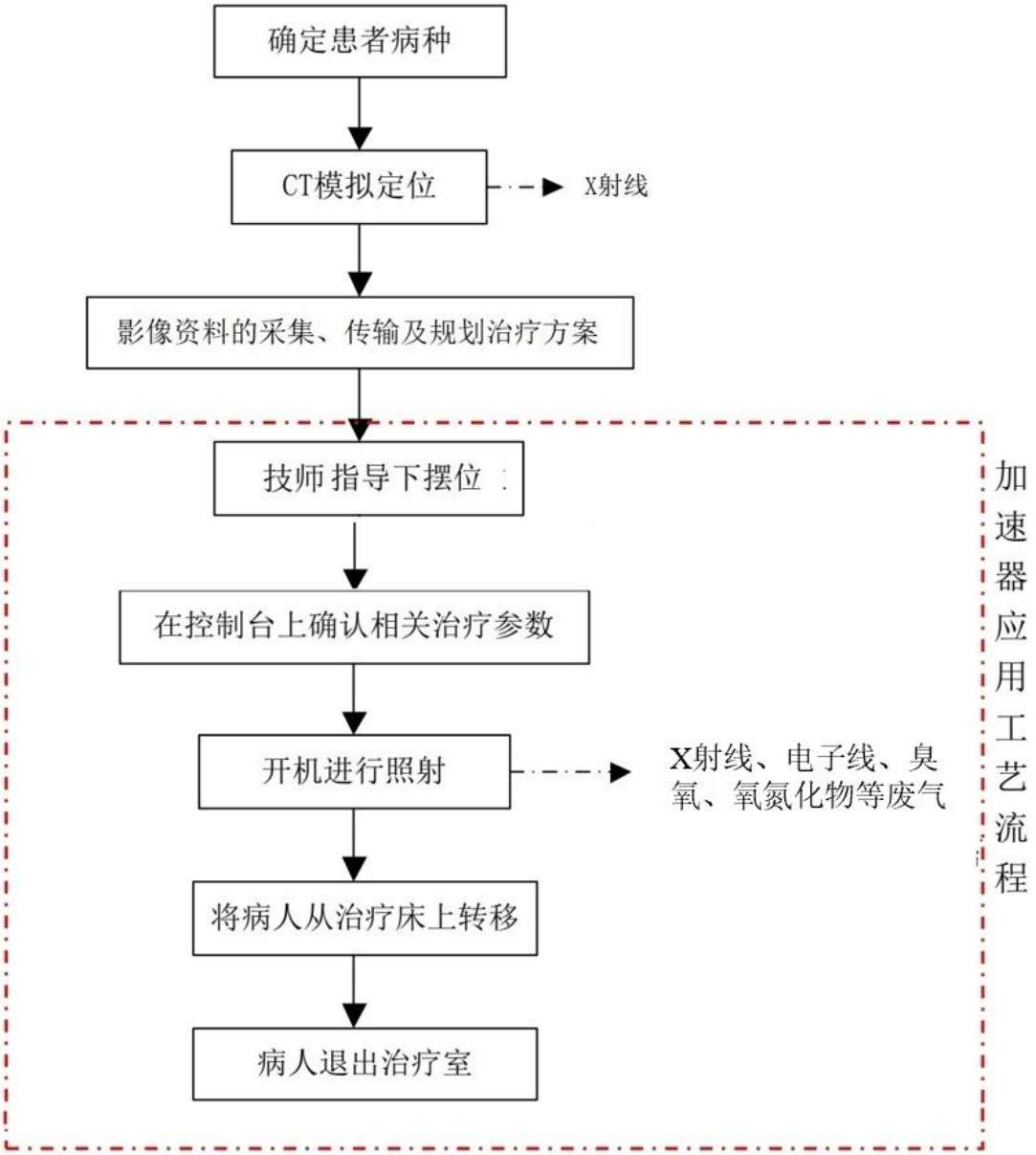


图 3-39 医用电子直线加速器的治疗流程及产污环节图

3.2.3.4 人员配备和工作负荷

3.2.3.4.1 人员配备

医院拟为医用电子直线加速器配置 10 名辐射工作人员，其中治疗技师 4 人，物理师 3 人，科室医生 2 人，护士 1 人。以上辐射工作人员均需确保参加辐射安全与防护培训，做到持证上岗。拟为每位工作人员配备个人剂量计，委托有资质

的单位定期监测并建立辐射工作人员个人剂量档案，妥善保存，人员配置情况如表 3-7 所示。

表 3-13 质子治疗装置辐射工作人员配置情况

岗位类别	人数	工作地点	工作内容	排班计划
治疗技师	4 人	直加机房及控制室、技师办公室	患者摆位、控制室操作等	两人每班，每班 8h
物理师	3 人	治疗计划室、物理师办公室、直加机房及控制室	制定治疗计划、计划验证、QA 等	两人每班，每班 8h
科室医生	2 人	诊室、医生办公室、直加机房	诊断、放射治疗方案确定、治疗效果评定等	两人每班，每班 8h
护士	1 人	注射室、护士站等	注射、护理等	两人每班，每班 8h

3.2.3.4.2 工作负荷

本项目医用电子直线加速器每年最多工作 48 周，每周工作 5 天。每台设备计划最多治疗 50 次/天，平均每人次照射 3min，则每台设备的年治疗出束时间最多为 600h。此外每台设备的年 QA 出束时间最多为治疗时间的 15%，即 90h，则每台设备治疗加 QA 的年总出束时间最多为 690h。则医用电子直线加速器年总出束时间见表 3-14。

表 3-14 医用电子直线加速器年出束时间

装置名称	单次治疗出束时间，min/次	年治疗人次	年治疗出束时间/h	年 QA 出束时间/h	年总出束时间/h
医用电子直线加速器	3	12000	600	90	690

3.2.4 模拟定位 CT 机

3.2.4.1 装置组成

模拟定位 CT 机主要由 X 射线发生装置、金属影像增强器、数据图像处理器、床体系统等组成。X 射线发生装置由 X 射线球管和高压电源组成。X 射线管由安装在真空玻璃壳中的阴极和阳极组成。阴极是钨制灯丝，装在聚焦杯中。当灯通

电加热时，电子即“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚焦成束，直接向嵌在金属阳极中的靶体射击。高电压加在 X 射线管的两极之间，使电子在射到靶体之前被加速达到很高的速度。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成，高速电子轰击靶体产生 X 射线。

本项目使用的模拟定位 CT 机主要参数见表 3-15。

表 3-15 本项目模拟定位 CT 机主要参数

射线装置名称	数量	主要技术参数（最大管电压/管电流）
模拟定位 CT 机	1 台	150kV，1300mA

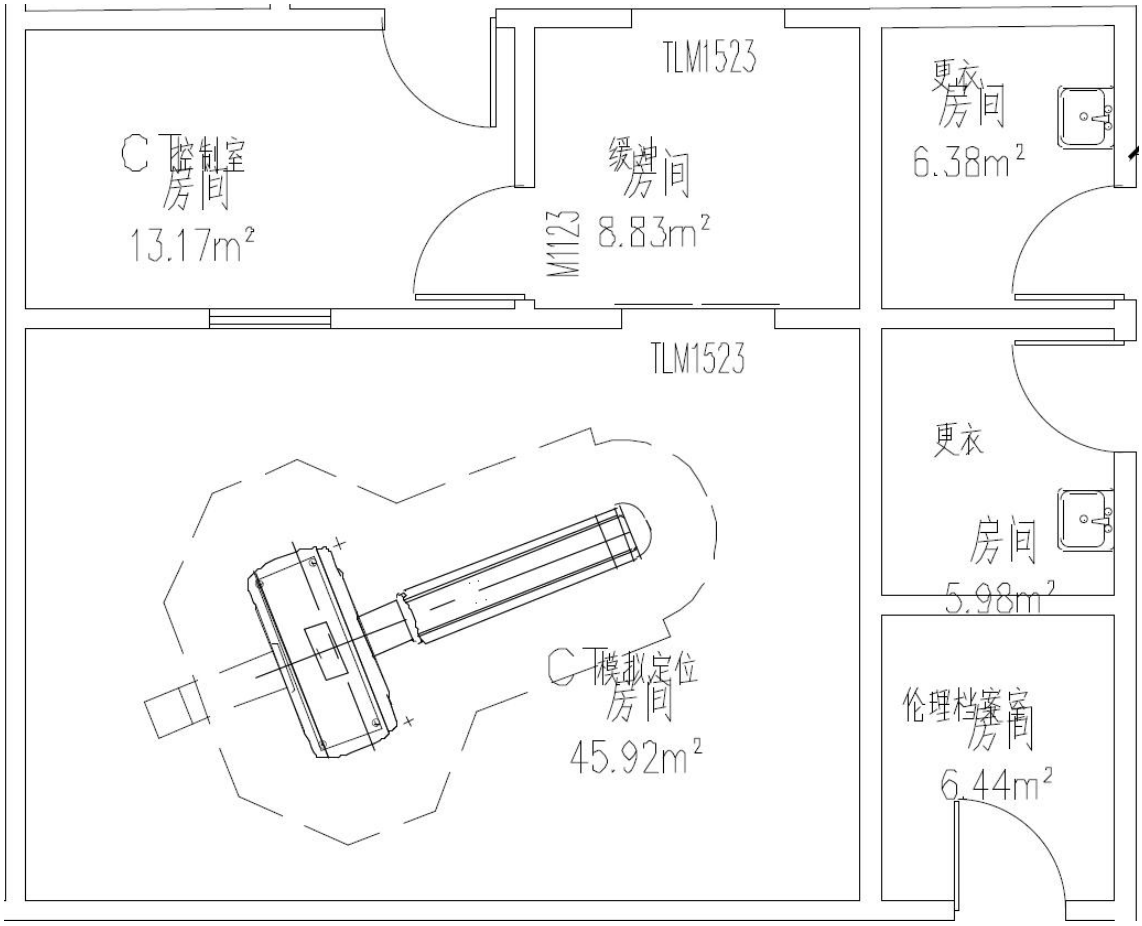


图 3-40 模拟定位 CT 机房平面布局图

3.2.4.2 工作原理

模拟定位 CT 机是诊断性 CT 机与传统模拟定位机的结合。现代的模拟定位 CT 机常选用大孔径、高速扫描的螺旋 CT 机，由于扫描速度快，扫描层厚薄，重建的 CT 图像质量较高。临床医师在 CT 横断面上逐层勾画出肿瘤和周围重要器官的轮廓，从而确定肿瘤靶体积及其与周围重要器官的关系。并根据肿瘤侵袭的微观特点设计了包含肿瘤细胞可能侵袭的亚临床病灶的临床靶区，进一步考虑到器官运动及摆位误差的影响，设计适当的计划靶区。通过优化照射野对计划靶区的覆盖情况及避开重要器官，保证靶区接受了均与的处方剂量并避免重要器官受到过量的照射。

3.2.4.3 工作流程及产污环节分析

用于显像诊断的III类射线装置工作流程如下：患者信息登记确认后进入机房→技师进入机房或通过语音对讲系统进行患者摆位→摆位结束后技师来到控制台，确认防护门关闭、各辐射安全防护设施正常工作→技师操作设备出束，非紧急情况任何人不得进入机房→照射结束后，患者接触摆位后离开机房。

产污环节分析：本项目模拟定位 CT 机出束时，会产生 X 射线，对周围环境产生辐射影响。此外本项目模拟定位 CT 机主要用于质子治疗装置、BNCT 及医用电子直线加速器对患者进行放射治疗前的模拟定位，其工作流程及产污环节分析包含在了 3.2.1.3 小节、3.2.2.4 小节及 3.2.3.3 小节的内容中。

3.2.4.4 人员配备和工作负荷

模拟定位 CT 机由质子治疗装置、BNCT 及医用电子直线加速器的辐射工作人员进行操作。上述工作人员的人员配置及工作负荷在 3.2.1.4 小节、3.2.2.6 小节和 3.2.3.4 小节介绍。

3.3 辐射源项分析

3.3.1 质子治疗装置

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

3.3.1.1 瞬发辐射源

3.3.1.1.1 瞬发辐射场分析

对于质子治疗装置，在质子束流形成、加速、传输和引出等过程中，都会发生束流的损失。损失的质子撞击在装置的结构部件，如降能器、准直器、能量狭缝等部件上，会与部件材料中的原子核发生核反应。

质子治疗装置从回旋加速器引出的质子最高能量为 230MeV，治疗终端输出的能量在 70MeV~230MeV 范围内。该能区的质子与物质的相互作用，以原子的电离和激发过程为主，同时穿过原子核的库仑势垒，进入原子核内部，发生核内级联，通过（p，n）、（p，pn）、（p，2n）、（p，γ）等核反应产生瞬发中子、γ等次级粒子。

在产生的次级粒子中，带电粒子因电离作用迅速停止，因此打靶产生的辐射场组成主要为次级中子和γ。其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。在屏蔽墙体的作用下，初始的热中子、蒸发中子和γ的数量迅速减少，不能穿透深屏蔽，级联中子成为穿透屏蔽墙的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽体的过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数量，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过（n，γ）反应等转变成了γ光子，使得达到一定屏蔽深度后，中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变，形成“平衡谱”，最终在屏蔽墙体内、外的瞬发辐射场都为中子、γ的混合辐射场。

此外，治疗室终端内精确位置验证的出束期间，会产生 X 射线，也是质子治疗装置运行期间瞬发辐射场的组成部分。

3.3.1.1.2 辐射场源项估算

3.3.1.1.2.1 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，通过该程序模拟质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}eV 到 20TeV，光子能量范围从 100eV 到 10000TeV，电子从 1keV 到 1000TeV，带店粒子及其反粒子为 1keV 到 20TeV，重离子为＜1000TeV/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。

3.3.1.1.2.2 中子能谱

根据对质子治疗系统瞬时辐射场的分析结果，其瞬发辐射场起决定性作用的是中子。中子产额、能谱和角分布与质子的能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。FLUKA 程序模拟的 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的辐射场如图 3-41 和图 3-42 所示。由结果可以看出高能质子核反应产生的瞬发中子有几个主要特点：

（1）从角分布看，前向的中子产额较高。随着出射角增加，谱峰向低能端移动；

（2）从能谱看，几乎各个方向都有一部分高能中子，尤其是前方，其能量最高可与质子束的能量相当；

（3）打铁靶与打水靶能谱的显著区别为：打水靶没有明显的蒸发中子峰，这是因为水中只有 H、O 两种元素，产生的中子主要来源于质子及次级中子与 O-16 的直接散裂反应和级联过程，不像铁靶那样容易形成复合核。

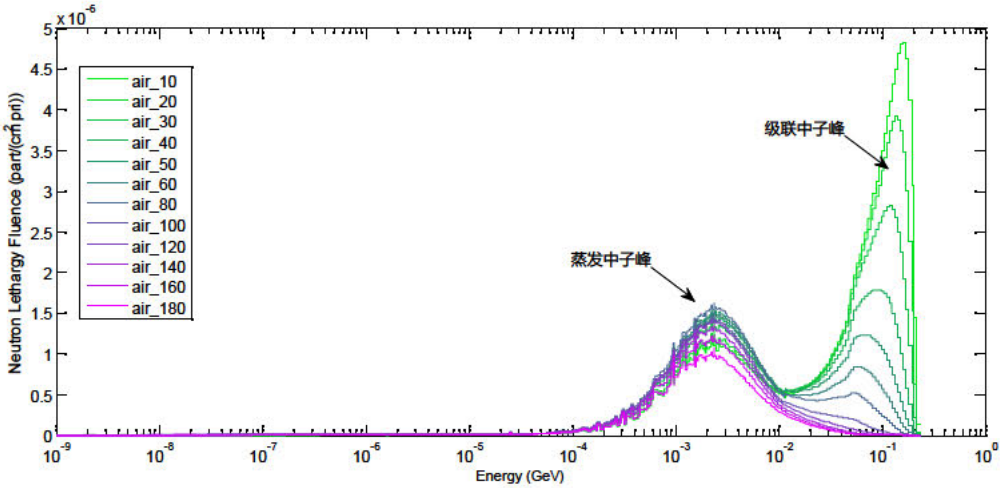


图 3-41 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布

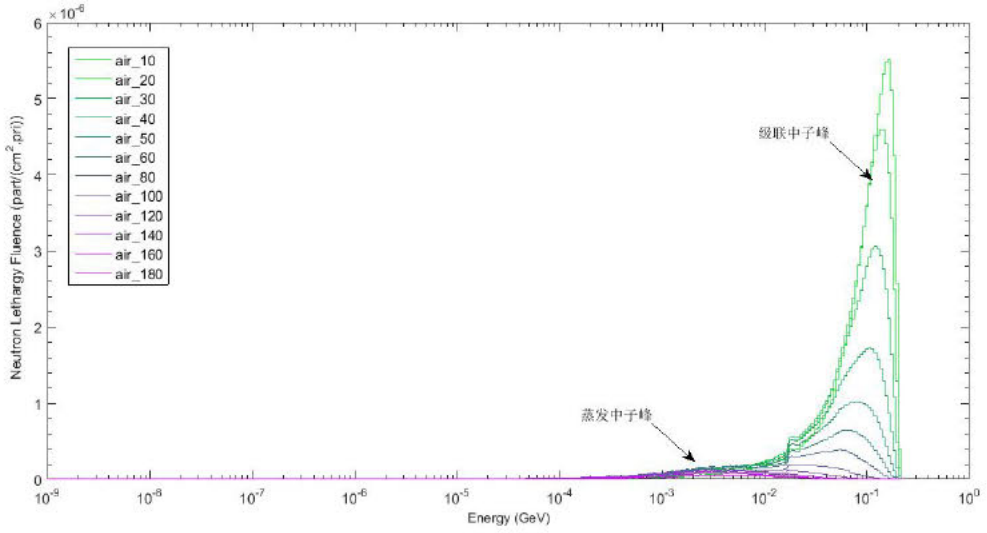


图 3-42 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布

3.3.1.1.2.3 光子能谱

FLUKA 程序模拟的 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的光子能谱如图 3-43 和图 3-44 所示。从角分布来看，光子几乎是各向同性的。无论是打铁靶或水靶，谱峰均出现在 1MeV~10MeV 之间。

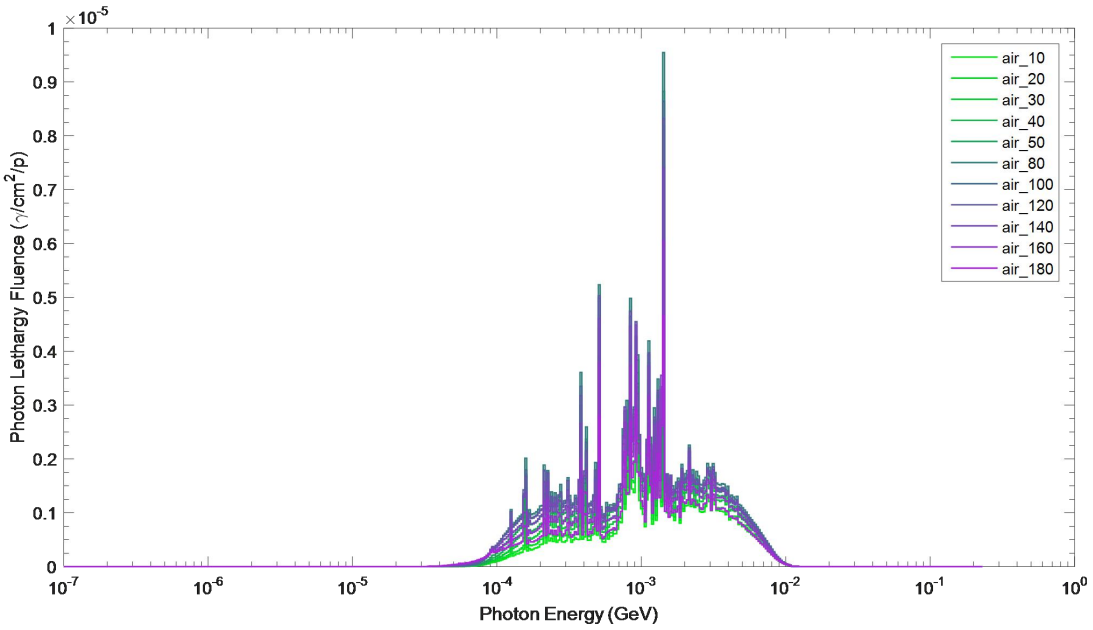


图 3-43 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

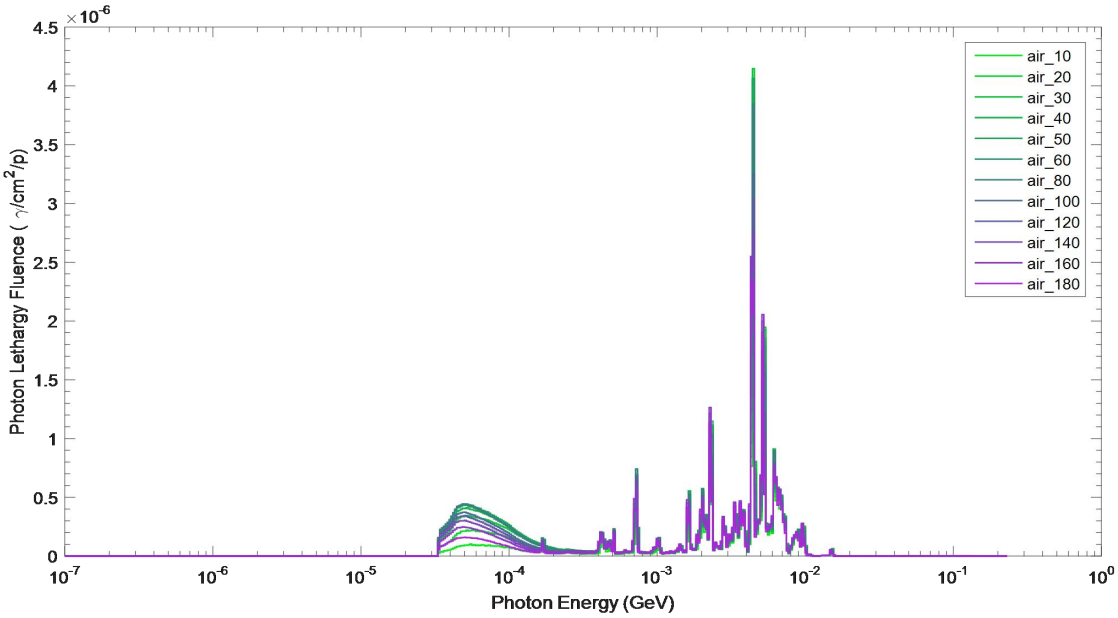
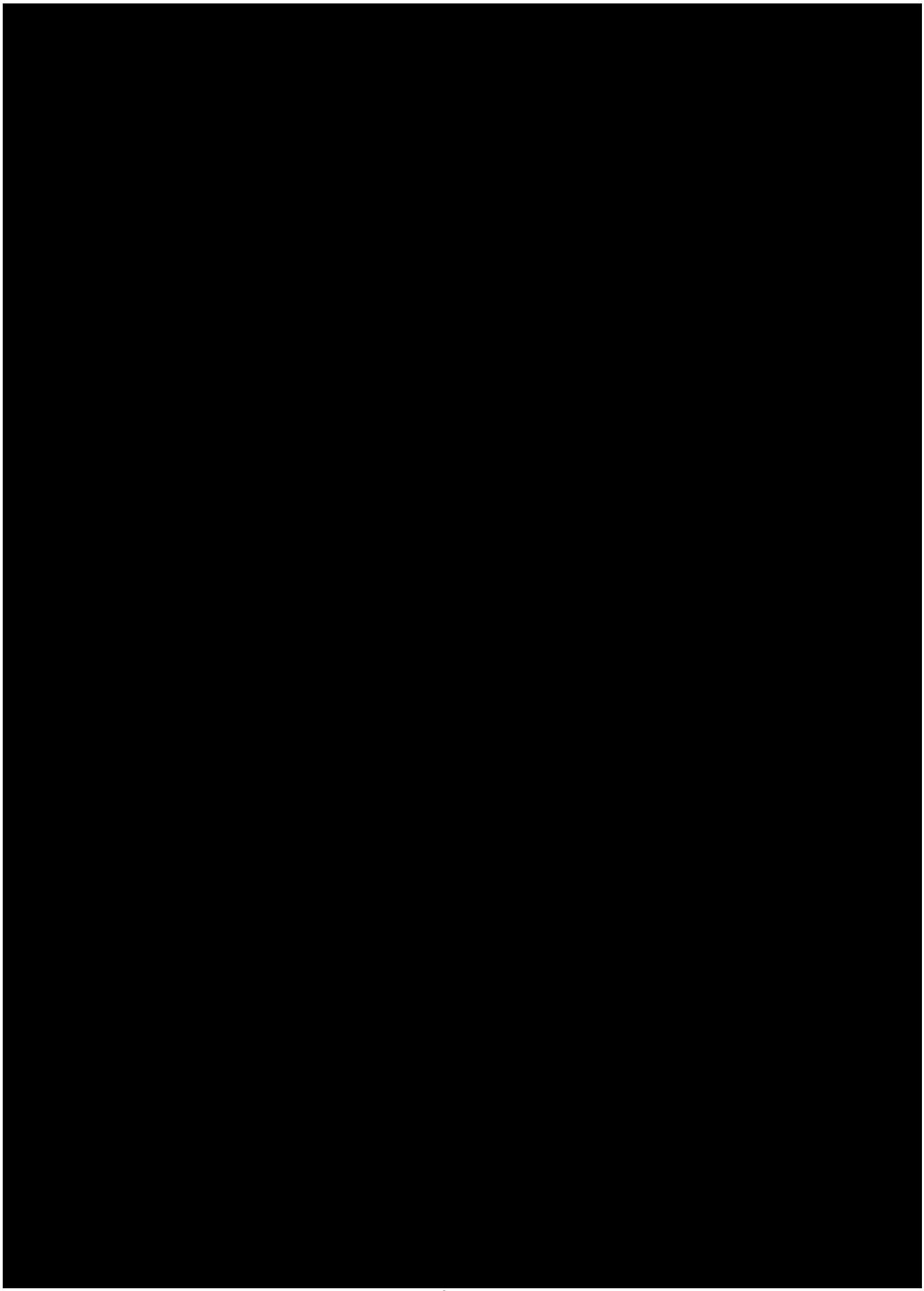


图 3-44 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

3.3.1.1.3 各环节束流损失分析

根据建设单位提供的资料，本项目质子治疗装置各束流损失点的束流损失情况如下，分为三种工况。

[redacted]





3.3.1.2 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。本项目质子治疗装置各区域顶板屏蔽体外剂量率列于表 3-19。

表 3-19 质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，μSv/h
41	回旋加速器上方顶板外	0.5
49	能量选择系统上方顶板外	5.2
51	束流输运系统上方顶板外	0.3
43	治疗室 1 上方顶板外	2.4
45	治疗室 2 上方顶板外	2.4
47	治疗室 3 上方顶板外	2.4

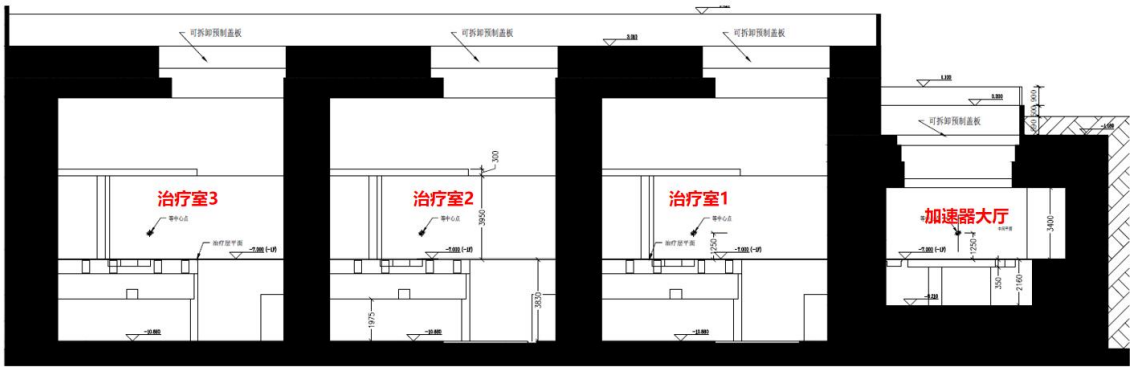


图 3-45 本项目质子治疗装置剖面建筑结构示意图

由计算结果可知，能量选择系统上方顶板外的剂量率高于 2.5μSv/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 3-20，计算结果列于表 3-21。

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

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

$$\Omega=2\pi(1-\cos\theta) \qquad (3\text{-}3)$$

式中，

κ' 为常数，取值 2×10^{-15}Sv·m^2；

h 为常数，取值 40m；

r 为源到关注点的距离，m；

λ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，Sv·m^2；

H(d,t)为顶板屏蔽体外表面的剂量率，Sv/h；

Ω为源从顶屏蔽辐射出的立体角。

表 3-20 中子天空反散射计算参数

参数	取值	来源

λ，m	450	NCRP NO.144 报告表 6.5，能量按 230MeV 考虑
d，m	4.61	CAD 图纸测量
g，$Sv \cdot m^2$	1.23E-14	文献《ACCELERATOR SKYSHINE:TYGER,TYGER,BURNING BRIGHT》(Particle Accelerator,1994,vol.44(1),pp1-15,GEOFFREY B.STAPLETON)表 4，保守取质子能量 226MeV，利用内插法计算得出
Ω，sr	6.28	θ保守取值 90°
H(d,t)，Sv/h	5.2E-06	FLUKA 程序计算

表 3-21 不同距离 r 处天空反散射造成的剂量率

距离 r，m	H(r)，μSv/h
5	2.59E-02
10	2.08E-02
20	1.41E-02
50	5.87E-03
100	2.17E-03
200	5.91E-04

由图 3-45，保守考虑天空反散射对公众的瞬时剂量影响距离取 5m，即质子治疗装置周围地面处，以表 3-21 的计算结果可知天空反散射造成的剂量率为 2.59E-02μSv/h。

表 3-22 天空反散射所致公众的年有效剂量

瞬时剂量率/（μSv/h）	**居留因子[2]**	**年受照时间/h[1]**	**年有效剂量/（mSv/a）**
2.59E-02	1/16	2055.96	3.33E-03

注: 1. 年受照时间取值依据为年总出束时间为 2055.96h；2.户外区域居留因子保守取 1/16。

由表 3-22 所示，质子治疗装置周围地面处公众年有效剂量为 3.33E-03mSv。

3.3.1.3 感生放射性

质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。

质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治疗室终端内工作的医生、物理师、技师、护士以及运维工程师等工作人员。本次评价主要对空气、冷却水、结构

部件和治疗室内患者的感生放射性进行分析评价。

3.3.1.3.1 空气的感生放射性

质子治疗装置运行期间初级粒子或次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、（γ，n）反应和高能中子散裂反应等产生 ^{3}H、^{7}Be、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素如 ^{3}H 和 ^{7}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}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素，具体见表 3-23。

表 3-23 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量份额	产生机制	活化反应截面 σ^2，mb
^{11}C	20.39min	N	7.55×10^{-1}	（γ，T）	0.7
		N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	（γ，αn）	0.7
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
^{13}N	9.96min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		N	7.55×10^{-1}	（γ，n）反应	9
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	9
^{15}O	2.04min	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	（γ，n）反应	17
^{41}Ar	1.83h	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	610

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告。

3.3.1.3.1.1 空气感生放射性静态饱和浓度

本次评价利用 FLUKA 程序计算了不考虑通风的情况下，质子治疗装置各区域空气感生放射性静态饱和活度，计算时考虑了所有束流损失点，并以各束流损失点处最高能量（230MeV）和最高损失流强为依据进行保守估算，计算结果列于表 3-24。

表 3-24 各区域空气感生放射性静态饱和浓度计算结果，Bq/m^3

核素	加速器大厅及束流传输系统	治疗室
^{11}C	2.29E+04	2.41E+01
^{13}N	3.77E+04	4.15E+01
^{15}O	1.52E+04	2.80E+01
^{41}Ar	2.94E+04	3.48E+01
总计	1.05E+05	1.28E+02

3.3.1.3.1.2 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度

质子治疗装置运行期间，加速器大厅及束流输运线隧道以及执行治疗任务的治疗室均保持通风系统开启状态。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计算。计算结果列表 3-26。

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

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；

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

r_1 为正常运行时房间内的换气次数，s^{-1}，见下表；

表 3-25 质子治疗装置各区域通风系统设计情况

区域名称	体积，m^3	新风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/h
加速器大厅（包含束流输运系统）	1478	2000	13000	9
1 号旋转机架治疗室机架区	330	2800	2800	8
1 号旋转机架治疗室治疗区	252	2500	2500	10
2 号旋转机架治疗室机架区	330	2800	2800	8
2 号旋转机架治疗室治疗区	252	2500	2500	10
3 号旋转机架治疗室机架区	330	2800	2800	8
3 号旋转机架治疗室治疗区	252	2500	2500	10

表 3-26 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度计算结果

核素	动态饱和浓度，Bq/m³	
	加速器大厅及束流输运系统	治疗室
^{11}C	4.23E+03	4.89E+00
^{13}N	1.19E+04	1.42E+01
^{15}O	1.05E+04	1.99E+01
^{41}Ar	1.21E+03	1.60E+00
总计	2.78E+04	4.07E+01

3.3.1.3.1.3 排入环境的空气感生放射性核素量

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”，质子治疗装置运行期间通风系统向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由下式计算。

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

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

（3-5）

式中，

Q_t 为质子治疗装置运行 t 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度，Bq；

t 为质子治疗装置年运行时间（年总出束时长 2055.96h=7401456s），s。

R_t 为质子治疗系统正常运行状态下的通风速率，m^3/s；

由此可计算得出质子治疗装置运行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 3-27。

表 3-27 质子治疗装置运行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
^{11}C	1.13E+11	1.53E+04
^{13}N	3.20E+11	4.32E+04
^{15}O	2.80E+11	3.78E+04
^{41}Ar	3.23E+10	4.36E+03
总计	7.45E+11	1.01E+05

3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

质子治疗装置中，用于冷却偏转磁铁等结构部件的冷却水，在由束流损失产生的中子辐射场照射下会被活化。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，产生 ^{3}H、^{7}Be、^{11}C、^{13}N、^{15}O 等放射性核素，各放射性核素的参数见表 3-28。其中，^{11}C、^{13}N、^{15}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}H 和 ^{7}Be。

表 3-28 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

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

质子治疗装置共有三套相互独立的冷却水系统：1 号系统为回旋加速器主盘管冷却环路，2 号系统为真空泵冷却环路，3 号系统为能量选择器和束流输运线冷却环路，其中 2 号系统不涉及冷却水的活化，主要考虑 1 号和 3 号冷却水系统的活化。

本次评价采用 FLUKA 程序对冷却水活化进行了计算，结果见表 3-30，计算时使用的参数如下：

（1）质子束损能量为 230MeV，流强为 29.4nA，连续运行时间为 2500h；

（2）简化模型：假设一根平行于束流管、轴线距束流管轴线 22cm，里面装半径 1cm 的冷却水，见图 3-46~图 3-48。

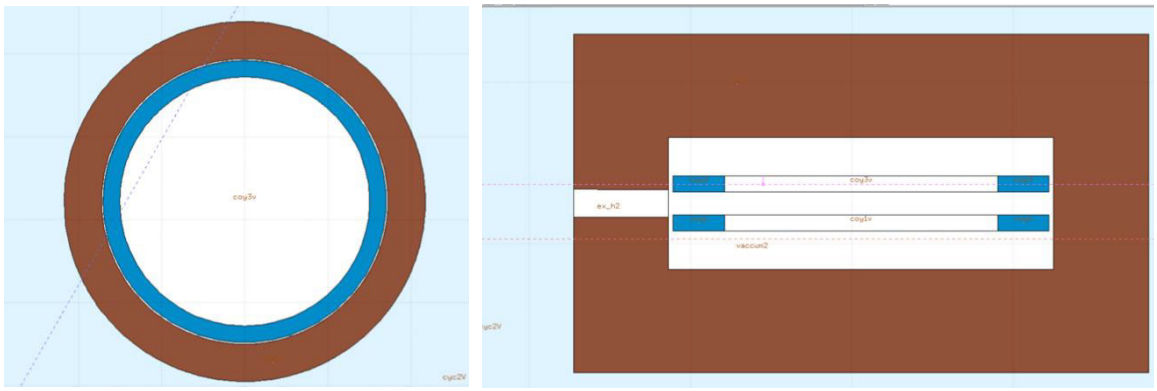


图 3-46 冷却水感生放射性计算模型（左：1 号回路俯视图，右：1 号回路侧视图）

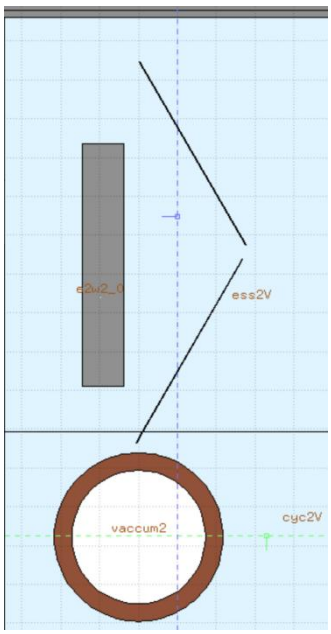


图 3-47 冷却水感生放射性计算模型（3 号回路俯视图）

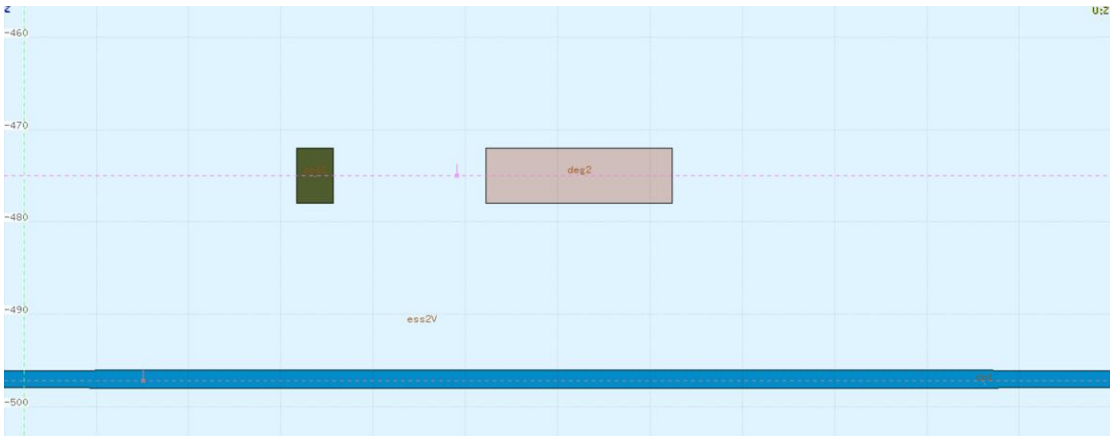


图 3-48 冷却水感生放射性计算模型（3 号回路在降能器附近侧视图）

计算结果列于表 3-30。由此可知，停机时刻后，放射性核素 ^{3}H 和 ^{7}Be 的感生放射性活度分别为 7.19E+06Bq 和 7.93E+07Bq，低于其单次排放限值 1 ALI_{min}。

表 3-29 冷却水感生放射性核素排放限值（ALI_{min}）

核素名称	单月排放限值 10ALI_{min}，Bq	单次排放限值 1ALI_{min}，Bq
^{3}H	4.76E+09	4.76E+08
^{7}Be	3.85E+09	3.85E+08

表 3-30 冷却水感生放射性计算结果

冷却时间	活化冷却水总水量	核素	放射性活度，Bq	放射性活度浓度，Bq/m^3
停机时刻	$5m^3$	^{3}H	7.19E+06	1.44E+06
		^{7}Be	7.93E+07	1.59E+07

3.3.1.3.3 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。质子治疗系统产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如加速器偏转磁铁、引出口、降能器、准直器等，其主要材料有铁、铜、不锈钢、碳、钽、镍等。相关实验研究表明，加速器停机后活化部件中的放射性核素主要是 ^{54}Mn、^{51}Cr、^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

根据质子治疗系统的主要的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序，计算了质子治疗系统连续运行 2500h 后，停机时刻及停机 12h，主要束流损失部位的感生放射性活度。

各主要束流损失结构部件感生放射性活度的计算结果列于表 3-31~表 3-35。由计算结果可知，停机后感生放射性主要来自 ^{48}V、^{55}Fe、^{59}Fe、^{54}Mn、^{56}Mn、^{56}Co、^{57}Co、^{58}Co、^{60}Co 等半衰期在月级别的中长寿命放射性核素。

表 3-31 回旋加速器的感生放射性计算结果

核素	**停机时刻活度， Bq**	**停机 12h 活度，Bq**
^{3}H	1.31E+07	1.31E+07
^{7}Be	1.82E+06	1.80E+06
^{14}C	5.91E+01	5.91E+01

核素	停机时刻活度， Bq	停机 12h 活度，Bq
^{18}F	1.72E+05	1.82E+03
^{22}Na	5.31E+03	5.31E+03
^{24}Na	1.62E+05	9.29E+04
^{31}Si	1.88E+05	7.89E+03
^{32}Si	6.82E+01	6.82E+01
^{32}P	7.35E+05	7.17E+05
^{33}P	5.01E+05	4.94E+05
^{35}S	4.92E+05	4.90E+05
^{38}S	3.30E+03	1.76E+02
^{36}Cl	3.11E+00	3.11E+00
^{38}Cl	5.97E+05	2.26E+02
^{39}Cl	1.78E+05	2.48E+01
^{37}Ar	2.01E+06	1.99E+06
^{39}Ar	3.76E+03	3.76E+03
^{41}Ar	3.60E+05	3.79E+03
^{42}Ar	4.35E+02	4.35E+02
^{42}K	5.25E+06	2.68E+06
^{43}K	2.03E+06	1.40E+06
^{41}Ca	2.44E+01	2.44E+01
^{45}Ca	3.47E+06	3.46E+06
^{47}Ca	1.68E+05	1.56E+05
^{43}Sc	8.77E+06	1.03E+06
^{44}Sc	5.30E+07	1.20E+07
^{46}Sc	4.71E+07	4.69E+07
^{47}Sc	4.21E+07	3.80E+07
^{48}Sc	1.38E+07	1.14E+07
^{49}Sc	1.61E+06	2.60E+02
^{44}Ti	2.88E+04	2.88E+04
^{45}Ti	4.71E+07	3.16E+06
^{45}V	5.61E+04	1.31E+01
^{46}V	3.97E+06	4.65E+08

核素	停机时刻活度， Bq	停机 12h 活度，Bq
^{47}V	5.82E+07	2.41E+08
^{47}Cr	7.26E+04	8.30E+06
^{48}Cr	1.22E+07	1.69E+03
^{51}Cr	2.97E+09	2.93E+09
^{49}Mn	5.61E+04	5.21E+03
^{51}Mn	2.56E+08	6.34E+08
^{52}Mn	6.75E+08	4.48E+02
^{54}Mn	2.46E+09	2.46E+09
^{56}Mn	3.98E+09	1.58E+08
^{52}Fe	6.30E+07	2.31E+07
^{55}Fe	3.01E+09	3.01E+09
^{59}Fe	7.08E+08	7.03E+08
^{55}Co	4.55E+06	2.83E+06
^{56}Co	2.25E+07	2.24E+07
^{57}Co	5.67E+05	5.66E+05
^{58}Co	3.05E+05	3.04E+05
^{61}Co	3.30E+03	2.13E+01
^{56}Ni	3.30E+03	3.12E+03
^{57}Ni	9.90E+03	7.84E+03
^{63}Ni	6.44E+00	6.44E+00
^{64}Cu	3.30E+03	1.71E+03

表 3-32 降能器的感生放射性计算结果

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{3}H	2.00E+08	2.00E+08
^{7}Be	1.21E+10	1.20E+10
^{10}Be	1.73E+02	1.73E+02
^{11}C	4.94E+10	1.12E+00
^{14}C	1.62E+02	1.62E+02
^{18}F	8.25E+04	8.75E+02

表 3-33 准直器的感生放射性计算结果

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{3}H	1.16E+08	1.16E+08
^{7}Be	3.14E+05	3.12E+05
^{14}C	2.11E+02	2.11E+02
^{18}F	4.62E+04	4.90E+02
^{22}Na	1.45E+03	1.45E+03
^{24}Na	9.86E+05	5.67E+05
^{28}Mg	6.60E+03	4.43E+03
^{28}Al	1.32E+04	4.44E+03
^{31}Si	1.97E+04	8.27E+02
^{32}P	2.63E+04	2.56E+04
^{33}P	2.18E+04	2.15E+04
^{35}S	3.89E+04	3.87E+04
^{38}S	3.97E+04	2.12E+03
^{38}Cl	8.26E+04	2.71E+03
^{39}Cl	6.51E+04	9.07E+00
^{41}Ar	6.83E+04	7.21E+02
^{42}K	9.28E+04	4.75E+04
^{43}K	1.75E+05	1.21E+05
^{45}Ca	7.34E+04	7.32E+04
^{47}Ca	1.72E+05	1.59E+05
^{44}Sc	1.32E+04	4.22E+03
^{46}Sc	7.43E+04	7.40E+04
^{47}Sc	4.19E+05	3.94E+05
^{48}Sc	2.71E+05	2.24E+05
^{49}Sc	2.81E+05	4.64E+01
^{45}Ti	6.60E+03	4.43E+02
^{48}V	1.63E+04	1.60E+04
^{49}V	8.43E+03	8.42E+03
^{51}Cr	3.36E+04	3.32E+04
^{52}Mn	3.59E+03	3.37E+03

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{54}Mn	3.68E+04	3.68E+04
^{56}Mn	1.35E+06	5.47E+04
^{55}Fe	3.44E+03	3.44E+03
^{59}Fe	1.36E+06	1.35E+06
^{56}Co	2.00E+03	2.00E+03
^{57}Co	1.16E+04	1.15E+04
^{58}Co	1.12E+05	1.11E+05
^{60}Co	3.06E+04	3.06E+04
^{61}Co	2.27E+06	1.50E+04
^{63}Ni	6.02E+03	6.02E+03
^{65}Ni	1.88E+06	6.90E+04
^{66}Ni	1.67E+06	1.43E+06
^{61}Cu	6.60E+03	5.47E+02
^{64}Cu	9.14E+05	4.75E+05
^{66}Cu	3.77E+06	1.44E+06
^{67}Cu	3.19E+06	2.79E+06
^{65}Zn	6.93E+04	6.92E+04
^{69}Zn	3.70E+06	3.41E+05
^{71}Zn	1.33E+06	1.81E+01
^{72}Zn	1.19E+06	9.96E+05
^{66}Ga	2.64E+04	1.10E+04
^{67}Ga	2.64E+05	2.37E+05
^{68}Ga	6.87E+05	1.05E+04
^{72}Ga	3.88E+06	2.64E+06
^{73}Ga	3.07E+06	5.55E+05
^{68}Ge	1.00E+04	1.00E+04
^{69}Ge	1.25E+05	1.01E+05
^{71}Ge	1.60E+06	1.55E+06
^{75}Ge	3.60E+06	8.75E+03
^{77}Ge	9.17E+05	4.37E+05
^{78}Ge	6.27E+05	2.16E+03

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{71}As	1.09E+05	9.59E+04
^{72}As	2.94E+05	2.15E+05
^{73}As	8.65E+05	8.61E+05
^{74}As	2.21E+06	2.17E+06
^{76}As	3.59E+06	2.62E+06
^{77}As	5.70E+06	4.73E+06
^{78}As	3.14E+06	2.58E+04
^{72}Se	6.60E+03	6.33E+03
^{73}Se	4.67E+04	1.57E+04
^{75}Se	4.29E+05	4.28E+05
^{81}Se	2.32E+06	1.31E+02
^{75}Br	1.98E+04	1.14E+02
^{76}Br	1.81E+05	1.10E+05
^{77}Br	8.48E+05	7.34E+05
^{80}Br	4.12E+06	2.66E+05
^{82}Br	3.83E+06	3.03E+06
^{83}Br	3.66E+06	1.11E+05
^{76}Kr	6.60E+03	3.76E+03
^{77}Kr	1.32E+04	1.61E+01
^{79}Kr	6.07E+05	4.79E+05
^{85}Kr	3.58E+04	2.78E+00
^{88}Kr	3.03E+05	1.60E+04
^{81}Rb	3.48E+05	5.79E+04
^{82}Rb	5.08E+05	8.95E+04
^{83}Rb	1.64E+06	1.63E+06
^{84}Rb	3.58E+06	3.54E+06
^{86}Rb	5.17E+06	5.07E+06
^{88}Rb	1.97E+06	1.78E+04
^{82}Sr	9.02E+04	8.89E+04
^{83}Sr	3.00E+05	2.32E+05
^{85}Sr	1.32E+06	1.32E+06

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{89}Sr	3.10E+06	3.08E+06
^{90}Sr	1.75E+04	1.75E+04
^{91}Sr	1.12E+06	4.71E+05
^{92}Sr	6.17E+05	2.55E+04
^{85}Y	3.96E+04	1.78E+03
^{86}Y	4.51E+05	2.67E+05
^{87}Y	1.81E+06	1.70E+06
^{88}Y	1.71E+06	1.71E+06
^{90}Y	4.16E+06	3.70E+06
^{91}Y	3.65E+06	3.64E+06
^{92}Y	3.00E+06	3.80E+05
^{93}Y	1.80E+06	7.97E+05
^{86}Zr	1.65E+04	9.97E+03
^{87}Zr	6.93E+04	4.91E+02
^{88}Zr	2.85E+05	2.84E+05
^{89}Zr	1.27E+06	1.15E+06
^{95}Zr	1.37E+06	1.36E+06
^{97}Zr	4.03E+05	2.45E+05
^{89}Nb	1.65E+04	2.74E+02
^{90}Nb	1.72E+05	9.78E+04
^{91}Nb	2.05E+02	2.05E+02
^{95}Nb	4.24E+06	4.24E+06
^{96}Nb	2.80E+06	1.96E+06
^{97}Nb	2.60E+06	2.66E+05
^{90}Mo	3.30E+03	7.39E+02
^{99}Mo	2.32E+06	2.05E+06
^{93}Tc	2.16E+04	1.14E+03
^{94}Tc	4.62E+04	8.41E+03
^{95}Tc	1.77E+05	1.18E+05
^{96}Tc	6.12E+05	5.65E+05
^{95}Ru	6.60E+03	4.18E+01

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{97}Ru	1.72E+05	1.52E+05
^{103}Ru	2.21E+06	2.19E+06
^{105}Ru	7.39E+05	1.14E+05
^{106}Ru	9.84E+04	9.83E+04
^{99}Rh	3.92E+04	3.84E+04
^{100}Rh	2.39E+05	1.62E+05
^{101}Rh	1.44E+04	1.44E+04
^{102}Rh	2.02E+05	2.02E+05
^{105}Rh	2.68E+06	2.18E+06
^{106}Rh	1.78E+05	9.83E+04
^{100}Pd	3.30E+03	3.00E+03
^{101}Pd	2.64E+04	9.89E+03
^{103}Pd	3.74E+05	3.67E+05
^{109}Pd	8.55E+05	4.64E+05
^{112}Pd	1.32E+05	8.89E+04
^{103}Ag	1.65E+04	8.29E+00
^{104}Ag	3.63E+04	2.68E+01
^{105}Ag	1.80E+05	1.78E+05
^{108}Ag	7.16E+05	9.33E+00
^{110}Ag	7.43E+05	4.84E+02
^{111}Ag	1.12E+06	1.07E+06
^{112}Ag	5.87E+05	1.35E+05
^{113}Ag	3.22E+05	6.86E+04
^{109}Cd	5.68E+04	4.47E+03
^{115}Cd	2.26E+05	1.94E+05
^{117}Cd	2.26E+04	8.00E+02
^{110}In	4.95E+04	9.13E+03
^{111}In	3.00E+05	2.66E+05
^{112}In	3.56E+05	2.51E+05
^{117}In	2.69E+05	6.63E+03
^{121}Sn	1.60E+04	1.18E+04

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{116}Sb	1.29E+05	3.92E+02
^{117}Sb	2.77E+05	1.54E+04
^{118}Sb	3.30E+05	9.35E+04
^{119}Sb	4.69E+05	3.96E+05
^{122}Sb	9.57E+04	8.43E+04
^{124}Sb	2.07E+04	2.06E+04
^{126}Sb	3.29E+03	3.20E+03
^{127}Sb	6.60E+03	6.03E+03
^{116}Te	9.90E+03	3.51E+02
^{117}Te	3.96E+04	1.27E+01
^{118}Te	9.90E+04	9.34E+04
^{119}Te	1.02E+05	6.10E+04
^{121}Te	1.83E+05	1.80E+05
^{127}Te	2.26E+04	1.27E+04
^{129}Te	3.30E+03	2.54E+00
^{120}I	2.64E+04	7.23E+01
^{121}I	6.60E+04	1.31E+03
^{122}I	1.02E+05	1.09E+04
^{123}I	2.05E+05	1.11E+05
^{124}I	1.25E+05	1.15E+05
^{125}I	1.76E+05	1.75E+05
^{126}I	8.88E+04	8.64E+04
^{128}I	3.30E+04	1.43E+03
^{131}I	6.60E+03	6.32E+03
^{122}Xe	1.65E+04	1.09E+04
^{123}Xe	2.31E+04	4.24E+02
^{125}Xe	8.91E+04	5.48E+04
^{127}Xe	1.02E+05	1.02E+05
^{125}Cs	9.90E+03	1.32E+04
^{126}Cs	2.97E+04	5.73E+03
^{127}Cs	4.95E+04	1.05E+05

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{129}Cs	1.32E+05	9.42E+04
^{132}Cs	1.32E+04	1.25E+04
^{128}Ba	6.60E+03	5.72E+03
^{129}Ba	2.62E+04	6.35E+02
^{131}Ba	7.25E+04	7.04E+04
^{133}Ba	1.83E+03	1.83E+03
^{131}La	2.64E+04	5.60E+00
^{132}La	4.07E+04	8.97E+03
^{133}La	4.62E+04	7.12E+03
^{134}La	4.95E+04	2.67E+04
^{135}La	4.95E+04	3.95E+04
^{132}Ce	6.60E+03	6.17E+02
^{133}Ce	6.60E+03	3.85E+01
^{134}Ce	2.97E+04	2.66E+04
^{135}Ce	2.64E+04	1.66E+04
^{137}Ce	3.96E+04	1.70E+04
^{139}Ce	2.29E+04	2.29E+04
^{141}Ce	2.94E+03	2.91E+03
^{143}Ce	3.30E+03	2.57E+03
^{135}Pr	6.60E+03	3.48E+01
^{136}Pr	2.31E+04	3.18E+03
^{137}Pr	1.65E+04	8.60E+03
^{138}Pr	2.97E+04	3.58E+04
^{142}Pr	3.30E+03	2.14E+03
^{143}Pr	6.57E+03	6.47E+03
^{138}Nd	1.65E+04	3.17E+03
^{140}Nd	3.96E+04	3.57E+04
^{141}Nd	8.91E+04	3.56E+03
^{147}Nd	3.30E+03	3.19E+03
^{140}Pm	3.30E+03	5.80E+01
^{141}Pm	6.27E+04	4.48E+04

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{144}Pm	1.49E+04	1.49E+04
^{146}Pm	1.04E+03	1.04E+03
^{147}Pm	1.40E+03	1.40E+03
^{148}Pm	3.30E+03	3.09E+03
^{149}Pm	6.60E+03	5.64E+03
^{142}Sm	5.61E+04	5.74E+01
^{143}Sm	9.90E+04	4.48E+04
^{145}Sm	8.81E+04	8.83E+04
^{145}Eu	3.23E+05	3.05E+05
^{146}Eu	5.93E+05	5.73E+05
^{147}Eu	1.02E+06	1.01E+06
^{148}Eu	2.25E+05	2.24E+05
^{149}Eu	7.27E+05	7.28E+05
^{150}Eu	4.64E+04	4.42E+04

表 3-34 散度准直器感生放射性计算结果

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{3}H	3.09E+05	3.09E+05
^{7}Be	8.33E+04	8.28E+04
^{43}Sc	6.60E+03	7.78E+02
^{44}Sc	2.31E+04	5.50E+03
^{46}Sc	5.72E+03	5.69E+03
^{47}Sc	6.60E+03	5.95E+03
^{44}Ti	5.51E+01	5.51E+01
^{45}Ti	9.24E+04	6.21E+03
^{48}V	1.53E+06	1.50E+06
^{49}V	1.80E+06	1.80E+06
^{48}Cr	7.59E+04	5.16E+04
^{49}Cr	3.85E+06	2.90E+01
^{51}Cr	2.76E+07	2.73E+07
^{51}Mn	7.76E+06	1.58E+02

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{52}Mn	3.82E+07	3.59E+07
^{53}Mn	1.07E+01	1.07E+01
^{54}Mn	1.38E+07	1.38E+07
^{56}Mn	9.74E+05	3.87E+04
^{52}Fe	7.97E+06	2.92E+06
^{55}Fe	5.25E+07	5.25E+07
^{59}Fe	3.79E+05	3.76E+05
^{55}Co	1.43E+08	8.88E+07
^{56}Co	6.51E+08	6.48E+08
^{57}Co	5.16E+08	5.16E+08
^{58}Co	2.65E+08	2.64E+08
^{60}Co	6.27E+05	6.27E+05
^{61}Co	6.99E+06	4.50E+04
^{56}Ni	7.67E+07	7.25E+07
^{57}Ni	6.06E+08	4.80E+08
^{59}Ni	1.86E+03	1.86E+03
^{63}Ni	4.02E+04	4.02E+04
^{65}Ni	1.91E+05	7.03E+03
^{61}Cu	2.47E+07	2.04E+06
^{64}Cu	4.39E+06	2.28E+06

表 3-35 能量狭缝感生放射性计算结果

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{3}H	1.95E+04	1.95E+04
^{7}Be	2.45E+03	2.43E+03
^{46}Sc	1.91E+03	1.90E+03
^{45}Ti	9.90E+03	6.65E+02
^{48}V	1.11E+05	1.09E+05
^{49}V	1.21E+05	1.21E+05
^{48}Cr	3.30E+03	2.24E+03
^{49}Cr	2.31E+05	1.74E+00

核素	停机时刻活度，Bq	停机 12h 活度，Bq
^{51}Cr	1.88E+06	1.86E+06
^{51}Mn	5.87E+05	1.20E+01
^{52}Mn	2.56E+06	2.41E+06
^{54}Mn	8.90E+05	8.89E+05
^{56}Mn	8.91E+04	3.54E+03
^{52}Fe	5.64E+05	2.07E+05
^{55}Fe	3.46E+06	3.46E+06
^{59}Fe	1.32E+04	1.31E+04
^{55}Co	9.57E+06	5.95E+06
^{56}Co	4.31E+07	4.30E+07
^{57}Co	3.43E+07	3.43E+07
^{58}Co	1.76E+07	1.75E+07
^{60}Co	4.62E+04	4.62E+04
^{61}Co	4.88E+05	3.15E+03
^{56}Ni	4.87E+06	4.60E+06
^{57}Ni	4.06E+07	3.21E+07
^{59}Ni	1.66E+02	1.66E+02
^{63}Ni	8.74E+03	8.74E+03
^{65}Ni	8.58E+04	3.15E+03
^{61}Cu	1.62E+06	1.34E+05
^{64}Cu	2.64E+05	1.37E+05

表 3-36 不同冷却时间下距离回旋加速器表面 100cm 位置处残余剂量率水平，μSv/h

冷却时间	距离表面 100cm
0s	3.14
5min	1.13
2h	0.92
12h	0.89

表 3-37 不同冷却时间下距离降能器、准直器表面 100cm 位置处残余剂量率水平，μSv/h

冷却时间	距离表面 100cm

0s	13
5min	9.6
2h	4.1
12h	2.6

表 3-38 不同冷却时间下距离散度准直器表面 100cm 位置处残余剂量率水平，μSv/h

冷却时间	距离表面 100cm
0s	1334
5min	901
2h	556
12h	356

表 3-39 不同冷却时间下距离能量狭缝表面 100cm 位置处残余剂量率水平，μSv/h

冷却时间	距离表面 100cm
0s	1434
5min	851
2h	456
12h	289

3.3.1.3.4 治疗室内患者的感生放射性

本项目解除摆位时，工作人员处于治疗机房内且近距离接触刚受到照射的患者，因此需计算分析此时治疗机房内患者感生放射性强度，以此确定摆位前有无必要等待合适时间再进入治疗机房内对患者解除摆位，并评估治疗后患者带有的感生放射性对治疗技师的辐射影响。

3.3.1.3.4.1 计算条件

治疗机房内由于照射病人所致感生放射性强度的计算条件如下：

（1）患者的组织等效材料与水类似，而通过上文冷却水感生放射性的计算，所以采用最保守的束流条件：以束流参数 230MeV/u@1.06nA 的束流连续治疗 2min，假设病人不移动，计算了停机时刻、1min、5min、10min、30min 和 1h 治疗室患者残余剂量率。

（2）人体组织等效靶的组成成分采用文献《Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling》（Pacific Northwest National

Laboratory, 2011）中推荐的 ICRP 标准软组织成分，列于表 3-40，靶的尺寸为厚度 30cm，半径 15cm 的圆柱体。

表 3-40 人体组织等效靶的组成成分

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

3.3.1.3.4.2 患者感生放射性水平

结合实际治疗情况，以束流参数 230MeV/u@1.06nA 的束流连续治疗 2min，假设病人不移动，计算了据患者 1m 处停机时刻、1min、5min、10min、30min 和 1h 的残余剂量率水平，计算结果见表 3-41。

表 3-41 单次治疗患者表面 100cm 处不同时刻残余剂量率水平，μSv/h

停机时间	距患者表面 100cm 处
0s	46
1min	14
5min	6.6
10min	2.9
30min	2.4
1h	0.9

3.3.1.3.4.3 治疗室内治疗区各辐射源项影响占比分析

以治疗室 2 为例，当技师在该治疗室进行治疗前摆位时需考虑以下（2）和（3）。对照射结束后的患者进行解除摆位的操作时，其工作区的辐射源项主要考虑以下（1）、（2）和（3）：

（1）照射结束后的患者产生的感生放射性剂量率，见表 3-41；

（2）相邻正在执行治疗任务的治疗室所致的瞬时剂量率，取表 5-3 中“关注

点 19（治疗室 2 南墙外）”处的剂量率水平 9.5μSv/h，由于关注点在屏蔽体外 30cm 处，辐射工作人员工作位置在治疗床附近，治疗床距治疗室 1 南墙外约 7.3m，剂量率与距离的平方成反比，因此技师工作区域的剂量率水平为 1.6E-02μSv/h。；

（3）治疗室内感生放射性空气所致的外照射剂量率，计算空气感生放射性所致剂量率时，采用治疗室内空气感生放射性静态饱和浓度（具体见表 3-24）进行保守计算，计算结果列于表 3-42~表 3-43。

$$C_{t_C} = C_t \cdot e^{-(\lambda + r_2)t_c} \qquad (3\text{-}6)$$

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

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

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

t_c为停机时间，s；

r_2为停机通风时房间内的换气次数，s^{-1}，5 次/h=5/3600=1.39E-03s^{-1}。

表 3-42 各停机时刻下机房内的空气感生放射性浓度

	C_{tc}/（Bq/m^3）			
核素	停机 1min（60s）后	停机 5min（300s）后	停机 10min（600s）后	停机 30min（1800s）后
^{11}C	4.14E+00	2.12E+00	9.18E-01	3.23E-02
^{13}N	1.16E+01	5.16E+00	1.87E+00	3.23E-02
^{15}O	1.25E+01	1.97E+00	1.94E-01	1.83E-05
^{41}Ar	1.39E+00	7.95E-01	3.95E-01	2.42E-02
总计	2.97E+01	1.00E+01	3.38E+00	8.88E-02

表 3-43 空气感生放射性浸没外照射剂量率计算结果/（μSv/h）

核素	**停机 1min 后**	**停机 5min 后**	**停机 10min 后**	**停机 30min 后**
^{11}C	7.29E-04	3.73E-04	1.62E-04	5.69E-06
^{13}N	2.05E-03	9.10E-04	3.30E-04	5.70E-06
^{15}O	2.22E-03	3.48E-04	3.43E-05	3.24E-09

^{41}Ar	3.25E-04	1.86E-04	9.25E-05	5.65E-06
合计	5.32E-03	1.82E-03	6.18E-04	1.70E-05

表 3-44 治疗室治疗 2min，停机 1min、5min、10min 和 30min 后，治疗室内的剂量率情况

来源	停机 1min 后		停机 5min 后		停机 10min 后		停机 30min 后	
	剂量率，μSv/h	贡献率，%	剂量率，μSv/h	贡献率，%	剂量率，μSv/h	贡献率，%	剂量率，μSv/h	贡献率，%
患者	46	99.95	6.6	99.73	2.9	99.43	2.4	99.34
相邻治疗室	1.6E-02	0.03	1.6E-02	0.24	1.6E-02	0.55	1.6E-02	0.66
空气感生放射性	5.32E-03	0.01	1.82E-03	0.03	6.18E-04	0.02	1.70E-05	0.00
总计	55.51	100	16.10	100	12.40	100	11.90	100

由计算结果可知，治疗室内患者治疗完成后，治疗区技师工作位置的瞬时剂量率主要来自患者感生放射性，其次是相邻正在出束的治疗室。

3.3.2 硼中子俘获治疗系统（BNCT）

BNCT 治疗系统运行过程中产生的辐射场，主要为装置运行时产生的“瞬发辐射场”和装置停机后依然存在的“残余辐射场”。瞬发辐射是装置运行时损失的粒子束流与结构部件等发生核反应产生，特点是随着装置的停机而完全消失；残余放射性主要来自与装置结构部件、冷却水、场所内空气等被中子束流或次级粒子轰击产生的活化产物，在装置停机后依然存在。

3.3.2.1 瞬发辐射源

BNCT 瞬发辐射源主要来自质子、中子和 γ 射线。

本项目 BNCT 系统的回旋加速器最大质子能量为 30MeV，该能区的质子以原子的电离和激发过程为主，同时会穿过原子核的库仑势垒，进入原子核内，通过(p，n)、(p，2n)等核反应产生瞬发中子、γ 光子。

质子轰击铍靶发生(p，n)核反应产生中子，加速器引出高能的质子轰击靶，

发生核反应产生 p^+电子，与核外电子和原子核相互作用产生电子损失、轫致辐射和弹性散射，伴随产生γ射线。因此，中子和γ射线也是 BNCT 运行过程中的主要瞬发辐射源。

3.3.2.1.1 瞬发辐射场分析

3.3.2.1.2 辐射场源项估算

3.3.2.1.2.1 MCNP 程序

MCNP 程序由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室研发，是基于蒙特卡罗算法的通用粒子输运计算软件，广泛应用于质子加速器辐射防护、放射治疗、核装置设计、剂量评估、中子物理等领域。程序可模拟中子、光子、电子、质子等多种粒子输运过程，能量区间覆盖热中子直至高能 GeV 量级，完整刻画粒子散射、吸收、核反应、级联发射等微观作用过程；能够搭建多层屏蔽、治疗机头、人体模体等复杂三维几何结构，设置多种计数方式获取通量、剂量率、能谱、角分布等辐射参数，同时支持不稳定核素活化辐射演化计算，并配备可视化后处理工具。

MCNP 依托 NNDC 权威核截面数据库，经过大量加速器与辐射防护实验验证，采用卡片式输入模式，操作便捷，是医疗质子系统瞬发中子辐射场仿真、机房屏蔽核算常用的主流计算程序。

本次评价采用 MCNP 程序对辐射场源项进行估算，通过该程序模拟质子与铍靶作用的中子产额及中子能谱。

3.3.2.1.2.2 中子产额及中子能谱

30MeV 质子轰击铍（Be）靶的特征如下：

所有角度下中子产额均随中子能量升高持续下降，低能中子产额远高于高能中子；空间分布上呈现显著前向优势，0° 正向中子产额整体最高，随出射角度逐步增大，中子总产额逐级降低；同时中子最大能量随角度增加不断缩减，0° 方向中子最高能量接近 9 MeV，90° 约 7 MeV，110° 背向中子最高能量仅 6 MeV 左右；低能段各角度产额差距相对平缓，高能区间不同角度产额可相差数个数量级。

随着出射角度增大，峰值通量持续降低，峰值位置小幅向低能偏移，中子高能截止边界不断前移；能量低于 5 MeV 时，各个角度中子通量数值差距较小；中子能量超过 10 MeV 之后，前向与大角度背向通量差距显著拉大，高能中子几乎集中分布于 0°~30° 前向区域。

综上，30 MeV 质子轰击铍靶产生的瞬发中子具备极强的前向发射特征，前向方位中子产额更大、通量更高、可生成更高能量中子；出射角度越大，中子整体产额、平均能量、最大能量均逐步衰减，能谱向低能端收缩偏移。



图 3-49 30MeV 质子轰击铍靶时中子产额（上）及中子能谱（下）图

3.3.2.1.3 各环节束流损失分析

根据建设单位提供的资料，本项目 BNCT 治疗系统主要的束流损失点位分布在加速器内部、铍靶、BSA 以及患者，各束流损失点的束流损失情况，见表 3-45。

表 3-45 BNCT 束流损失表



3.3.2.2 天空反散射

通过 MCNP 程序计算得出的屏蔽体外剂量率水平，由表 5-31，BNCT 机房屋顶外关注点剂量率水平最高为 3.0E-01μSv/h（关注点 86、90，治疗室 1 顶板上方、治疗室 2 顶板上方），同时由于屋顶设置厚混凝土进行屏蔽。天空反散射所致公众的有效剂量可忽略，因此，BNCT 可不考虑天空反散射影响。

3.3.2.3 感生放射性

BNCT 治疗系统的感生放射性主要是质子打靶产生的中子与设备部件、所在区域空气以及一次冷却水相互作用产生的感生放射性。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。

BNCT 治疗系统产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响

对象是对停机后，需要进入辐射工作区域内工作的医生、物理师、技师、护士以及运维工程师等工作人员。本次评价主要对 BNCT 治疗系统空气、冷却水、结构部件的感生放射性进行分析评价。

3.3.2.3.1 空气的感生放射性

BNCT 治疗系统运行期间中子与空气中 ^{40}Ar 发生 $^{40}Ar(n，\gamma)^{41}Ar$ 核反应生成 ^{41}Ar 核素，加上产生 ^{41}Ar 的活化反应截面很小，所以 ^{41}Ar 的生成率极低。其他核素被活化的产额远小于 ^{41}Ar，且主要以气溶胶形式存在。因此，本项目活化气体中其他核素的危害几乎可以忽略，主要考虑 ^{41}Ar。

采用 MCNP 程序模拟了加速器机房、中子生产机房和治疗室的空气感生放射性。根据医院对 BNCT 的年工作量规划，加速器年最大出束时间为 2036.6h，因此模拟计算取 BNCT 连续出束时间 2500h 进行计算，足够保守。

根据模拟结果，空气感生放射性核素中最主要的是 $^{41}Ar(T_{1/2}=109.61min)$，其静态饱和活度具体数据见表 3-46。

根据本报告给出的动态饱和浓度、年排放量和年平均排放速率的计算方法，BNCT 空气感生放射性核素的动态饱和活度浓度见表 3-47，空气感生放射性核素的年排放量和年平均排放速率见表 3-48。

表 3-46 BNCT 空气感生放射性核素的静态饱和活度浓度，Bq/m^3

区域	核素	停机时刻的静态饱和活度浓度，Bq/m^3
加速器机房	Ar-41	6.60E+07
中子生产机房	Ar-41	5.96E+08
治疗室	Ar-41	6.48E+07

表 3-47 BNCT 空气感生放射性核素的动态饱和活度浓度，Bq/m^3

区域	核素	停机时刻的动态饱和活度浓度，Bq/m^3
加速器机房	Ar-41	1.79E+04
中子生产机房	Ar-41	1.86E+05
治疗室	Ar-41	1.91E+04

表 3-48 BNCT 空气感生放射性核素的年排放量和年平均排放速率

核素	年排放量，Bq	年平均排放速率，Bq/s
Ar-41	5.53E+11	7.54E+04

3.3.2.3.2 冷却水的感生放射性

硼中子俘获治疗系统的冷却水系统正常情况下封闭循环使用不外排。用于冷却质子加速器、射束传输线及靶系统，冷却水通过预埋水管穿出加速器机房屏蔽墙流到冷却水设备机进行冷却，并透过离子交换树脂维持设备冷却水纯净度，过程中设备冷却水采封闭回路，不会泄漏至外界。可能会发生（n，γ）反应而产生 ^{3}H 等放射性核素。[redacted]

本次评价采用 MCNP 程序对靶系统模拟了冷却水的感生放射性，模拟的参数为：[redacted]建模图见图 3-50。根据计算结果，活化冷却水中主要长半衰期核素 ^{3}H 和 ^{14}C，活度分别为 3.94E+01Bq 和 7.52E+02Bq，远低于其对应豁免活度 1E+09Bq 和 1E+07Bq。

[redacted]

图 3-50 BNCT 冷却水活化计算建模图

3.3.2.3.3 结构部件的感生放射性

结构部件的感生放射性主要来自靶系统，其主要材质为铍、铝合金。停机后靶系统的主要核素是 ^{24}Na、^{26}Al、^{54}Mn、^{51}Cr、^{7}Be、^{10}Be、^{64}Cu 等。

利用 MCNP 程序计算了靶系统的感生放射性，计算时所用参数如下：

（1）靶系统运行工况：照射时间为连续轰击 2500h；

（2）束流参数：质子能量 30MeV，质子束流强 500μA，；

（3）靶系统结构：沿质子束流方向，各材质厚度依次为 5.5μm、5mm、30mm，具体见图 3-51。



图 3-51 靶系统结构示意图

结构部件感生放射性活度的计算结果见表 3-49~表 3-50，停机后不同时刻距离靶系统 1m 处的剂量率计算结果见表 3-51。

表 3-49 靶系统（铝合金）的感生放射性计算结果，Bq

核素	停机时刻	冷却 5min	冷却 2h	冷却 12h	冷却 1d
^{26}Al	1.41E+04	1.41E+04	1.41E+04	1.41E+04	1.41E+04
^{24}Na	1.72E+11	1.72E+11	1.57E+11	9.88E+10	5.67E+10
^{55}Fe	8.50E+07	8.50E+07	8.50E+07	8.50E+07	8.50E+07
^{54}Mn	1.32E+08	1.32E+08	1.32E+08	1.32E+08	1.32E+08
^{63}Ni	5.16E+05	5.16E+05	5.16E+05	5.16E+05	5.16E+05
^{51}Cr	4.97E+08	4.97E+08	4.96E+08	4.91E+08	4.85E+08
^{65}Zn	3.91E+07	3.91E+07	3.91E+07	3.90E+07	3.90E+07
^{60}Co	2.06E+06	2.06E+06	2.06E+06	2.06E+06	2.06E+06
^{46}Sc	2.70E+07	2.70E+07	2.70E+07	2.69E+07	2.68E+07
^{49}V	4.29E+06	4.29E+06	4.29E+06	4.29E+06	4.28E+06
^{27}Mg	2.01E+11	1.40E+11	3.05E+07	2.44E-12	0.00E+00
^{45}Ca	3.36E+06	3.36E+06	3.35E+06	3.35E+06	3.34E+06
^{53}Mn	3.33E-01	3.33E-01	3.33E-01	3.33E-01	3.33E-01
^{64}Cu	6.27E+08	6.24E+08	5.62E+08	3.26E+08	1.69E+08

^{47}Sc	4.99E+07	4.99E+07	4.92E+07	4.56E+07	4.17E+07
^{48}Sc	4.68E+07	4.67E+07	4.53E+07	3.87E+07	3.20E+07
^{56}Mn	3.81E+08	3.72E+08	2.22E+08	1.51E+07	6.01E+05
^{67}Cu	1.56E+07	1.56E+07	1.53E+07	1.36E+07	1.19E+07
^{47}Ca	6.24E+06	6.24E+06	6.16E+06	5.78E+06	5.36E+06
^{28}Al	6.18E+09	1.32E+09	4.72E-07	0.00E+00	0.00E+00
^{63}Zn	1.09E+08	9.99E+07	1.26E+07	2.54E+02	5.89E-04
^{62}Cu	4.18E+08	2.93E+08	7.71E+04	1.64E-14	0.00E+00
^{65}Ni	2.18E+07	2.14E+07	1.26E+07	8.02E+05	2.95E+04
^{29}Al	8.43E+07	4.98E+07	2.62E+02	0.00E+00	0.00E+00
^{69}Zn	9.36E+06	8.81E+06	2.14E+06	1.34E+03	1.93E-01
^{52}V	1.28E+08	5.08E+07	2.85E-02	0.00E+00	0.00E+00
^{49}Sc	3.12E+06	2.94E+06	7.29E+05	5.07E+02	8.24E-02
^{66}Cu	3.43E+07	1.75E+07	3.02E+00	0.00E+00	0.00E+00
^{49}Cr	3.12E+06	2.88E+06	4.37E+05	2.35E+01	1.76E-04

表 3-50 靶系统（铍）的感生放射性计算结果，Bq

核素	停机时刻	冷却 5min	冷却 2h	冷却 12h	冷却 1d
Be10	1.47E+01	1.47E+01	1.47E+01	1.47E+01	1.47E+01
Be7	2.78E+07	2.78E+07	2.78E+07	2.76E+07	2.74E+07

表 3- 51 停机不同时刻距离靶系统 1m 处的剂量率

停机时间	**停机时刻**	**冷却 5min**	**冷却 2h**	**冷却 12h**	**冷却 1d**
距离 1m 处的剂量率，μSv/h	1.0E+05	9.27E+04	6.97E+04	4.38	2.52E+04

3.3.2.3.4 治疗室内患者的感生放射性

根据《Neutron activation survey on patients following BNCT clinical trials at THOR》(Chun-Kai Huang, Applied Radiation and Isotopes174,2021)对 26 名头部和颈部癌症复发患者的 BNCT 治疗后，中子活化相关研究成果表明：

（1）几乎所有患者，都测到活化产物 ^{24}Na、^{38}Cl、^{49}Ca，它们分别由人体内天然存在的 ^{23}Na、^{37}Cl 和 ^{48}Ca 活化产生。

（2）患者表面γ剂量率最大值在治疗结束后几分钟内测得，约几十μSv/h，但都不超过 100μSv/h。

（3）治疗结束后，前 10~20 分钟内，患者表面γ剂量率急剧下降，其主要原因是活化产物 ^{49}Ca（半衰期 8.718min）的衰减，这表明在最初的几分钟内，γ射

线剂量率贡献以 ^{49}Ca 为主。

（4）治疗结束后，30~40 分钟内，患者表面γ剂量率下降到最大水平的一半，恰好是活化产物 ^{38}Cl（半衰期 37.24min）衰变一半的时间，这表明 ^{49}Ca 消失后，γ射线剂量率的下降趋势主要来自 ^{38}Cl。

（5）一般来说，BNCT 照射后 1 小时，测量的γ射线剂量率贡献主要来自活化产物 ^{24}Na。

（6）治疗结束后，一般距离患者头颈部 30cm 处的γ剂量率，最大值约 10μSv/h；距离头颈部 100cm 处总的γ剂量率，均小于 3μSv/h。

（7）活化产物 ^{24}Na、^{38}Cl、^{49}Ca、^{42}K 所致患者 1m 处的γ剂量率，停机时刻、15min、30min、45min、60min 分别约为 1.27μSv/h、0.8μSv/h、0.67μSv/h、0.6μSv/h、0.57μSv/h。

本次评价采用 MCNP 程序计算了患者活化的情况，计算条件如下：

（1）采用治疗室终端最保守的束流条件，考虑 9.18E+13n/s 的总中子注量率，连续照射时间 30min；

（2）人体组织等效靶的组成成分采用文献《Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling》（Pacific Northwest National Laboratory, 2011）中推荐的 ICRP 标准软组织成分，列于表 3-40，球体半径 15cm。

表 3-52 人体组织等效靶的组成成分

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

元素	质量分数/%
总计	100

停止照射后不同时刻，患者体内核素活度及体外 1m 处剂量率计算结果见表

3-53 停止照射后不同时刻，患者体内核素活度及体外 1m 处剂量率

核素	半衰期	停机时刻	冷却 1min	冷却 5min	冷却 10min	冷却 30min	冷却 1h
14C	5703.78 年	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02
16N	7.13 秒	4.71E+06	1.38E+04	1.02E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
15O	2.04 分钟	7.43E+04	5.29E+04	1.36E+04	2.47E+03	2.74E+00	1.01E-04
19O	26.46 秒	3.21E+04	6.68E+03	1.24E+01	4.81E-03	0.00E+00	0.00E+00
1m 外剂量率/μSv/h		1.18E+00	9.18E-03	1.34E-03	2.43E-04	2.69E-07	9.94E-12

。由计算结果可以看出，停机时刻，导致患者活化的核素主要为 Na-16（半衰期 7.13s），患者体表 1m 处剂量率为 1.18μSv/h；经衰变 1h 后，最主要的核素为 C-14（半衰期 5703.78 年），患者体表 1m 处剂量率降至 9.94E-12μSv/h。

表 3-53 停止照射后不同时刻，患者体内核素活度及体外 1m 处剂量率

核素	半衰期	停机时刻	冷却 1min	冷却 5min	冷却 10min	冷却 30min	冷却 1h
^{14}C	5703.78 年	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02
^{16}N	7.13 秒	4.71E+06	1.38E+04	1.02E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
^{15}O	2.04 分钟	7.43E+04	5.29E+04	1.36E+04	2.47E+03	2.74E+00	1.01E-04
^{19}O	26.46 秒	3.21E+04	6.68E+03	1.24E+01	4.81E-03	0.00E+00	0.00E+00
1m 外剂量率/μSv/h		1.18E+00	9.18E-03	1.34E-03	2.43E-04	2.69E-07	9.94E-12

3.3.3 医用电子直线加速器

医用电子直线加速器运行期间产生的辐射污染源主要包括初级粒子、次级粒子以及电子束和 X 射线与空气作用产生的臭氧和氮氧化物等有害气体。

3.3.3.1 初级粒子

初级粒子是被加速的粒子，主要是医用电子直线加速器治疗时使用的 X 射线和电子线。本项目医用电子直线加速器使用的 X 射线最大能量为 10MV，使用电子线的最高能量为 18MeV；电子线与机头、床、人体组织等作用产生的韧致辐射的能量和强度均低于电子束撞击钨靶时产生的 X 射线的能量和强度，且电子线在混凝土中的最大射程约为 5.1cm。因此，医用电子直线加速器机房及其防护门若能满足 X 射线的屏蔽防护，则也能够满足电子束治疗中产生的韧致辐射的屏蔽防护。

3.3.3.2 有害气体

医用电子直线加速器运行期间，电子束和 X 射线与空气作用会产生臭氧和氮氧化物等有害气体。

O_3 来源包括有用线束产生 O_3 和泄露辐射产生的 O_3 两部分，本次评价依据文献《辐射所致臭氧的估算与分析》（王时进等，中华放射医学与防护杂志，1994 年 4 月第 14 卷第 2 期）中给出的方法和公式估算 O_3 产额。

（1）有用线束的 O_3 产额 P_1

有用线束的 O_3 产额可用公式 3-10 计算。

$$P_1 = 2.43\dot{D}_0(1-\cos\theta)RG \qquad (3\text{-}7)$$

式中，

P_1 为有用线束的 O_3 产额，mg/h；

$\dot{D}_0$ 为有用线束在距等中心点 1m 处的输出剂量率，Gy/min；

R 为射线束中心点到屏蔽物（墙）的距离，m；

G 为空气吸收 100eV 辐射能量产生的 O_3 分子数，取值为 10；

θ为有用束的半张角，为 14°。

各参数的取值和计算结果见下表。

表 3-54 有用线束的 O_3 产额的计算参数和计算结果

机房	$\dot{D}_0$，Gy/min	R，m	G	θ	P_1，mg/h
医用电子直线加速器机房	24	3.5	10	14°	61.24

（2）泄漏辐射的 O_3 产额 P_2

将泄漏辐射看作 4π方向均匀分布的点源，并考虑加速器机房墙壁的散射线使室内的 O_3 产额增加 10%，泄漏辐射的 O_3 产额 P_2 可用公式 3-8 计算。

$$P_2 = 3.32\times10^{-3}\dot{D}_0 G V^{1/3} \qquad (3\text{-}8)$$

式中，

P_2 为泄漏辐射的 O_3 产额，mg/h；

V 为加速器机房体积（不含迷道），m^3；

泄漏辐射 O_3 产额的计算参数和计算结果见下表。

表 3-55 泄漏辐射的 O_3 产额的计算参数和计算结果

机房	$\dot{D}_0$，Gy/min	G	V，m^3	泄漏辐射所致 O_3 产额 P_2，mg/h	考虑散射增加 10%后 O_3 产额 P_3，mg/h
医用电子直线加速器机房	24	10	362	5.68	6.25

（3）O_3 总产额

根据表 3-54 和表 3-55 可计算得出医用电子直线加速器机房的 O_3 总产额为 61.24+6.25=67.49mg/h。

（4）O_3 饱和浓度

考虑医用电子直线加速器机房运行时的连续排风和 O_3 的分解，机房内空气

中 O_3 的平均浓度可由公式 3-9 计算。

$$Q(t)=\frac{Q_0T}{V}(1-e^{-t/T}) \qquad (3\text{-}9)$$

式中，

Q(t)为 t 时刻机房内 O_3 的平均浓度，mg/m^3；

Q_0 为 O_3 的产生率，mg/h；

V 为加速器机房体积（不含迷道），m^3；

T 为有效清除时间，h。

若照射时间很长，即 t>>T，O_3 浓度达到饱和，则可由公式 3-10 计算 O_3 的饱和浓度。

$$Q(t)=\frac{Q_0T}{V} \qquad (3\text{-}10)$$

其中，有效清除时间 T 可由公式 3-14 计算。

$$T=\frac{t_v\cdot t_d}{t_v+t_d} \qquad (3\text{-}11)$$

式中，

t_v 为换气一次所需要的时间，h；

t_d 为 O_3 的有效分解时间，取 0.83h。

各参数的取值和 O_3 饱和浓度的计算结果见下表。

表 3-56 医用电子直线加速器机房内 O_3 饱和浓度计算结果

机房	Q_0，mg/h	V，m^3	t_v，h	t_d，h	T，h	Q(t)，mg/m^3
医用电子直线加速器机房	67.94	362	0.17	0.83	1.41E-01	5.57E-03

由计算结果可知，医用电子直线加速器机房 O_3 的饱和浓度最大为 5.57E-03mg/m^3。氮氧化物（以 NO_2 为主）产额约为 O_3 的一半，约为 2.79E-03mg/m^3，

低于《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）中规定的 O_3 和 NO_2 浓度限值 0.3mg/m^3 和 5mg/m^3。

3.3.4 模拟定位 CT 机

模拟定位 CT 机运行期间，主要的放射性污染是 X 射线，但仅在设备开机并处于出束状态时才会发出 X 射线。X 射线贯穿机房的屏蔽体进入外环境中，将对工作人员和机房周围人员造成辐射影响，设备关机后 X 射线将消失。

此外，X 射线与空气作用会产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。

3.4 废弃物

3.4.1 质子治疗装置

（1）放射性废气

本项目质子治疗装置运行期间产生的感生放射性气体来源于质子束流损失产生的初级和次级粒子引起的空气活化，其主要放射性核素为 ^{11}C（$T_{1/2}[^{11}C]$=20.39min）、^{13}N（$T_{1/2}[^{13}N]$=9.965min）、^{15}O（$T_{1/2}[^{15}O]$=2.037min）和 ^{41}Ar（$T_{1/2}[^{41}Ar]$=1.8h）。每年排入环境的空气感生放射性核素总量和年均排放速率计算结果列于表 3-27。

（2）放射性废液

质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。质子治疗装置所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素。除 ^{7}Be、^{3}H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。涉及活化冷却水排放的检修频次最多为 1 次/年，活化冷却水最大排放量约为 5m^3。

（3）放射性固体废物

质子治疗装置运行期间可能产生的放射性固体废物主要有含感生放射性的结构部件、冷却水废离子树脂、加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等。

含感生放射性的结构部件每年产生量小于 1m^3；冷却水废离子树脂每年产生量小于 3m^3；加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等每年产生量小于 2m^3。

3.4.2 硼中子俘获治疗系统（BNCT）

（1）放射性废气

BNCT 运行期间将产生感生放射性气体，空气感生放射性主要考虑热中子俘获产生的 ^{41}Ar（T1/2[^{41}Ar]=1.8h），根据计算，^{41}Ar 年排放量为 8.62E+13Bq，排放速率为 1.18E+07Bq/s。

（2）放射性废液

BNCT 放射性废液包括活化冷却水，主要核素为 ^{3}H 和 ^{14}C（活度分别为 3.94E+01Bq 和 7.52E+02Bq）以及接受治疗后的患者排泄物、呕吐物及其冲洗水，主要核素包括 ^{24}Na 和 ^{38}Cl。

（3）放射性固体废物

BNCT 系统运行期间可能产生的放射性固废为厂家更换下来的废靶片以及

[redacted]

3.4.3 医用电子直线加速器

医用电子直线加速器 X 射线最高能量为 10MV，因此运行期间不产生放射性三废，仅产生部分臭氧及氮氧化物，经计算低于《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》（GBZ 2.1-2007）中规定的浓度限值。

3.4.4 模拟定位 CT 机

模拟定位 CT 机为 III 类射线装置，运行期间不产生放射性三废，仅 X 射线与空气作用会产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。

4 辐射安全与防护设施

4.1 质子治疗装置

4.1.1 场所布局与分区

本项目质子治疗装置设置在肿瘤中心西侧。其中加速器大厅、束流输运系统、旋转机架治疗室的治疗区等主要功能区位于地下一层，地下二层为机架基坑区域，地上一层为各治疗室上空。

质子治疗装置设置了物理隔离和相对独立的人流路线，与其他各医疗单元之间分隔明确，不会相互穿插和干扰。加速器大厅和各个治疗室都设有迷道，紧邻场所四侧屏蔽墙体、防护门和屋顶除控制室外无办公室等人员长居留场所。辐射工作场所控制区的进出口均设置了门禁管理，便于场所的防护管理与安全控制。整个质子治疗区房间功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关标准要求。从满足安全诊疗和辐射安全防护的角度来看，该区域的布局是合理的。

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

质子治疗装置的辐射工作场所分区具体如下：

（1）控制区：加速器大厅、束流输运系统、3 间旋转机架治疗室、放射性固体废物暂存间、放射性废液暂存池；

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，机房门列入安全联锁系统，装置运行期间禁止进入，仅经授权并解除联锁后才能进入控制区内，进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

（2）监督区：治疗控制室、主控室、缓冲间、水冷间及质子变配电室等。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，并设置门禁，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。辐射工作场所分区图见图 4-1~图 4-3。

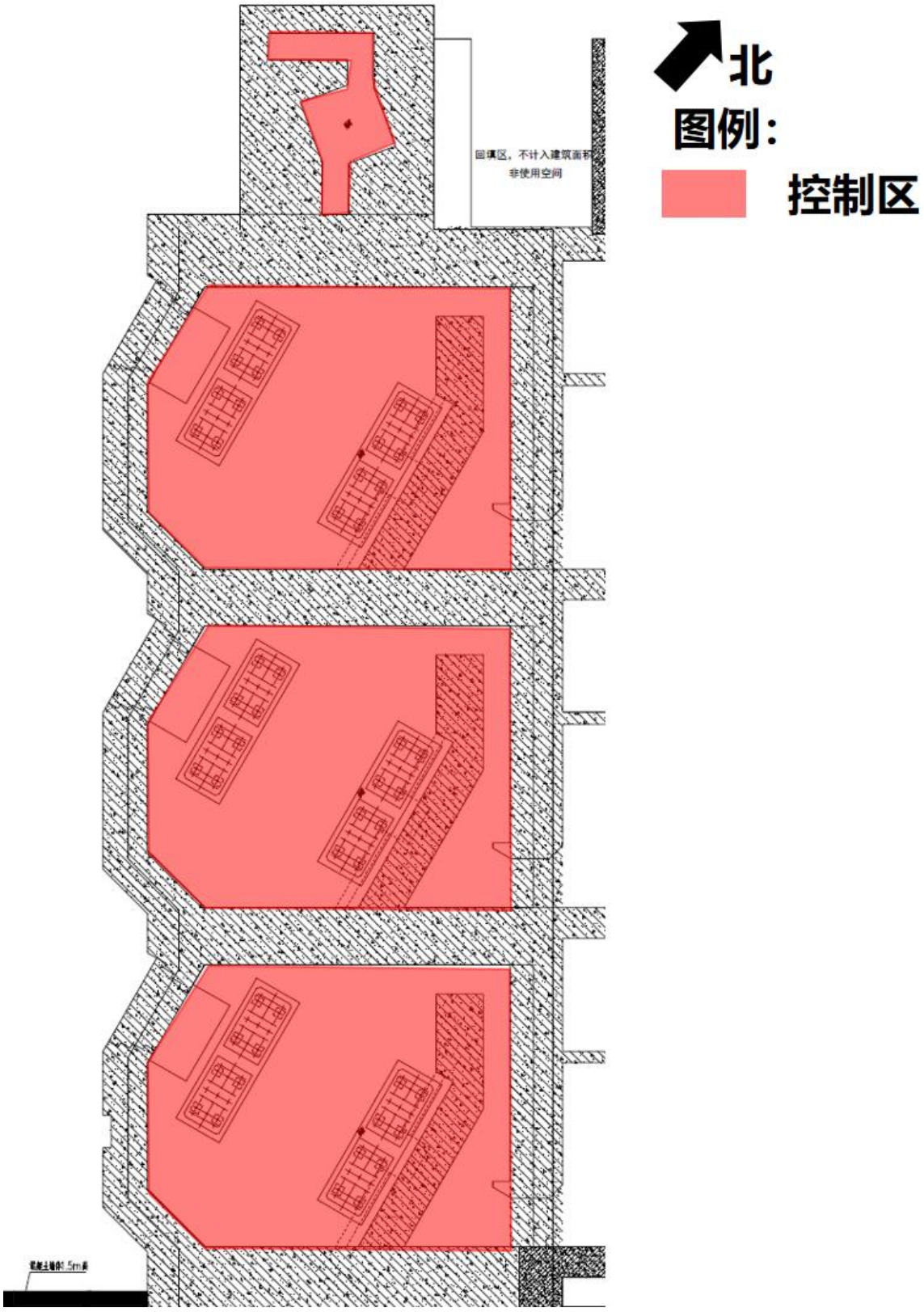


图 4-1 质子治疗装置地下二层辐射工作场所分区图

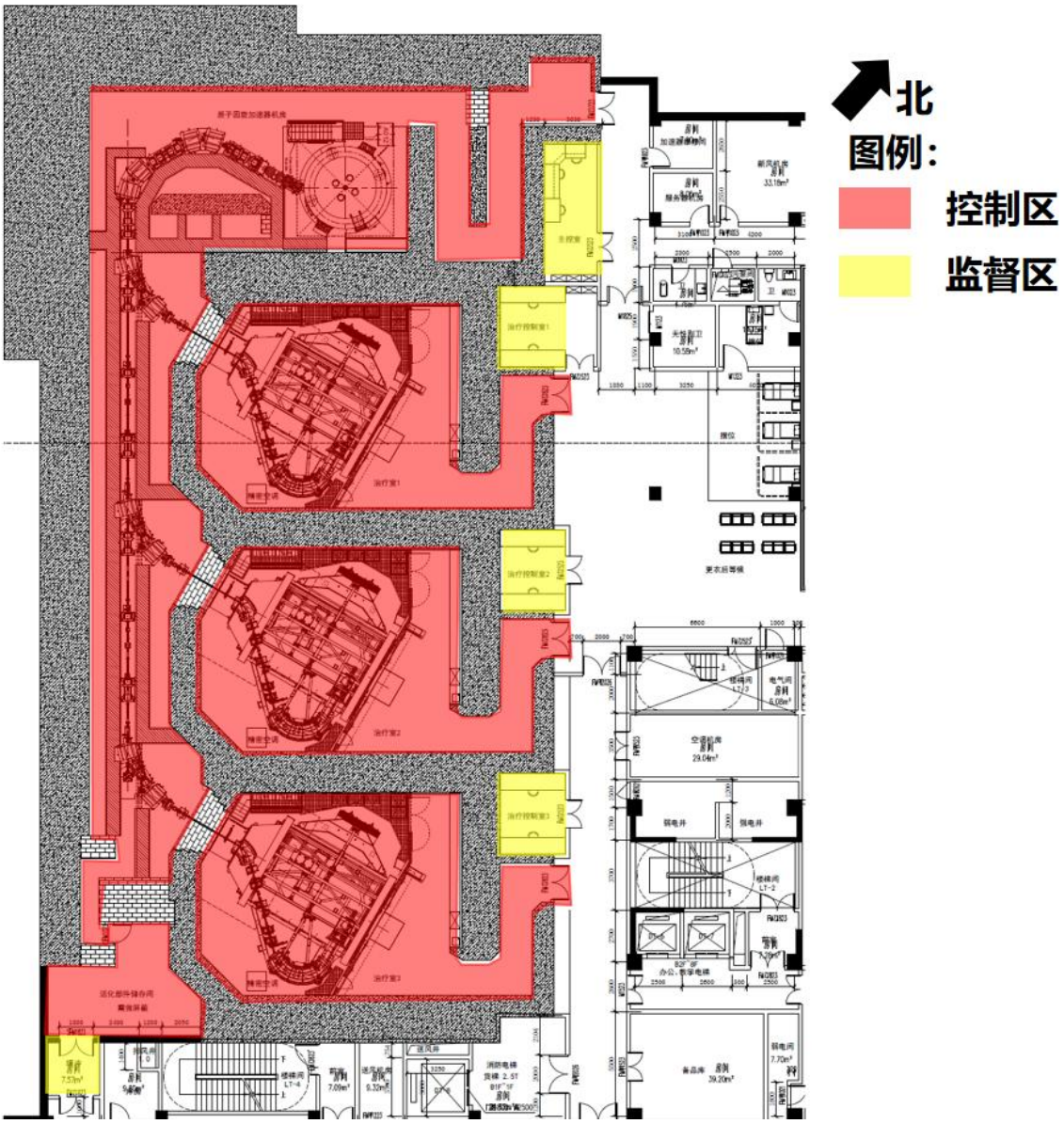


图 4-2 质子治疗装置地下一层辐射工作场所分区图

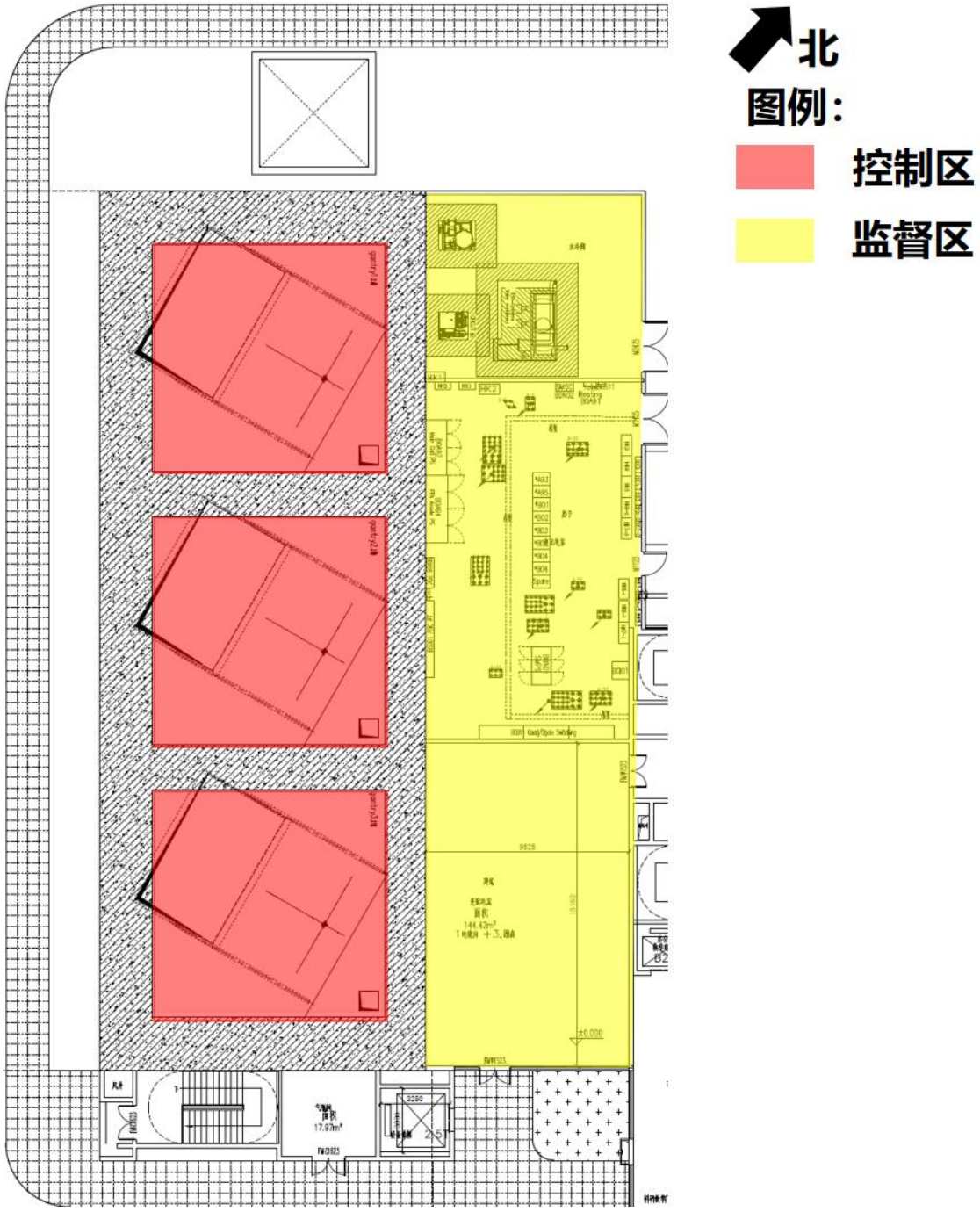


图 4-3 质子治疗装置地上一层辐射工作场所分区图

4.1.2 辐射屏蔽

4.1.2.1 设计标准

辐射工作场所辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

（1）年剂量约束值

根据《粒子加速器辐射安全与防护规定》（GB5172-2025）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）的相关规定：

本次评价以 5mSv/a 作为本项目辐射工作人员的年剂量约束值，以 0.1mSv/a 作为本项目公众成员的年剂量约束值。

（2）屏蔽体外剂量率控制水平

机房屏蔽体外各关注点处的剂量率应不高于 1.4.2 小节中给出的剂量率控制水平。

4.1.2.2 屏蔽设计

质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、束流输运系统以及各治疗室墙体采用密度不低于 2.3g/cm^3 的混凝土作为主屏蔽；

表 4-1 质子治疗装置辐射工作场所辐射屏蔽设计

场所名称	位置	墙体屏蔽厚度和材料	周围环境
加速器大厅	北墙	1.5m~4.5m 混凝土	土层
	西墙	4.5m 混凝土	土层
	南墙	2.75m 混凝土	治疗室 1 治疗区
	东墙	迷道从内到外：1.41m、0.92m~1.22m、1.23m 混凝土	走廊、室外绿化
	顶板	2.46m 混凝土	空地
	底板	2.84m 混凝土	土层
束流传输系统	北墙	4.5m 混凝土	土层
	西墙	2.6m~4.5m 混凝土	土层
	南墙	迷道从内到外：1.22m、2.44m、1.22m	放射性固体废物暂存间

			混凝土	
		东墙	1.68m 混凝土	治疗室 1、2、3 治疗区
		顶板	2m 混凝土	不上人屋面
		底板	1.27m 混凝土	土层
治疗室 1	地下二层	北墙	2.75m 混凝土	回旋加速器基坑区
		西墙	1.68m 混凝土	土层
		南墙	2.15m 混凝土	治疗室 2 机架基坑区
		东墙	2m 混凝土	土层
		底板	1.2m 混凝土	土层
	地下一层	北墙	2.75m 混凝土	加速器大厅
		西墙	1.68m 混凝土	束流传输系统
		南墙	2.15m 混凝土	治疗室 2 治疗区
		东墙	迷道从内到外：2m、1.15m 混凝土	控制室 1、走廊等
	地上一层	北墙	2.5m 混凝土	空地
		西墙	2.44m 混凝土	道路
		南墙	2.15m 混凝土	治疗室 2 上空
		东墙	1.9m 混凝土	水冷间
		顶板	2.44m 混凝土	不上人屋面
治疗室 2	地下二层	北墙	2.15m 混凝土	治疗室 1 机架基坑区
		西墙	1.68m 混凝土	土层
		南墙	2.15m 混凝土	治疗室 3 机架基坑区
		东墙	2m 混凝土	土层

		底板	1.2m 混凝土	土层
	地下一层	北墙	2.15m 混凝土	治疗室 1 治疗区
		西墙	1.68m 混凝土	束流传输系统
		南墙	2.15m 混凝土	治疗室 3 治疗区
		东墙	迷道从内到外：2m、1.15m 混凝土	控制室 2、走廊等
	地上一层	北墙	2.15m 混凝土	治疗室 1 上空
		西墙	2.44m 混凝土	道路
		南墙	2.15m 混凝土	治疗室 3 上空
		东墙	1.9m 混凝土	质子变配电室
		顶板	2.44m 混凝土	不上人屋面
治疗室 3	地下二层	北墙	2.15m 混凝土	治疗室 2 机架基坑区
		西墙	1.68m 混凝土	土层
		南墙	2.5m 混凝土	楼梯间
		东墙	2m 混凝土	土层
		底板	1.2m 混凝土	土层
	地下一层	北墙	2.15m 混凝土	治疗室 2 治疗区
		西墙	1.68m 混凝土	束流传输系统
		南墙	2.5m 混凝土	楼梯间、送风机房等
		东墙	迷道从内到外：2m、1.15m 混凝土	控制室 3、走廊等
	地上一层	北墙	2.15m 混凝土	治疗室 2 上空
		西墙	2.44m 混凝土	道路
		南墙	2.5m 混凝土	楼梯间、气瓶间
		东墙	1.9m 混凝土	变配电室
		顶板	2.44m 混凝土	不上人屋面

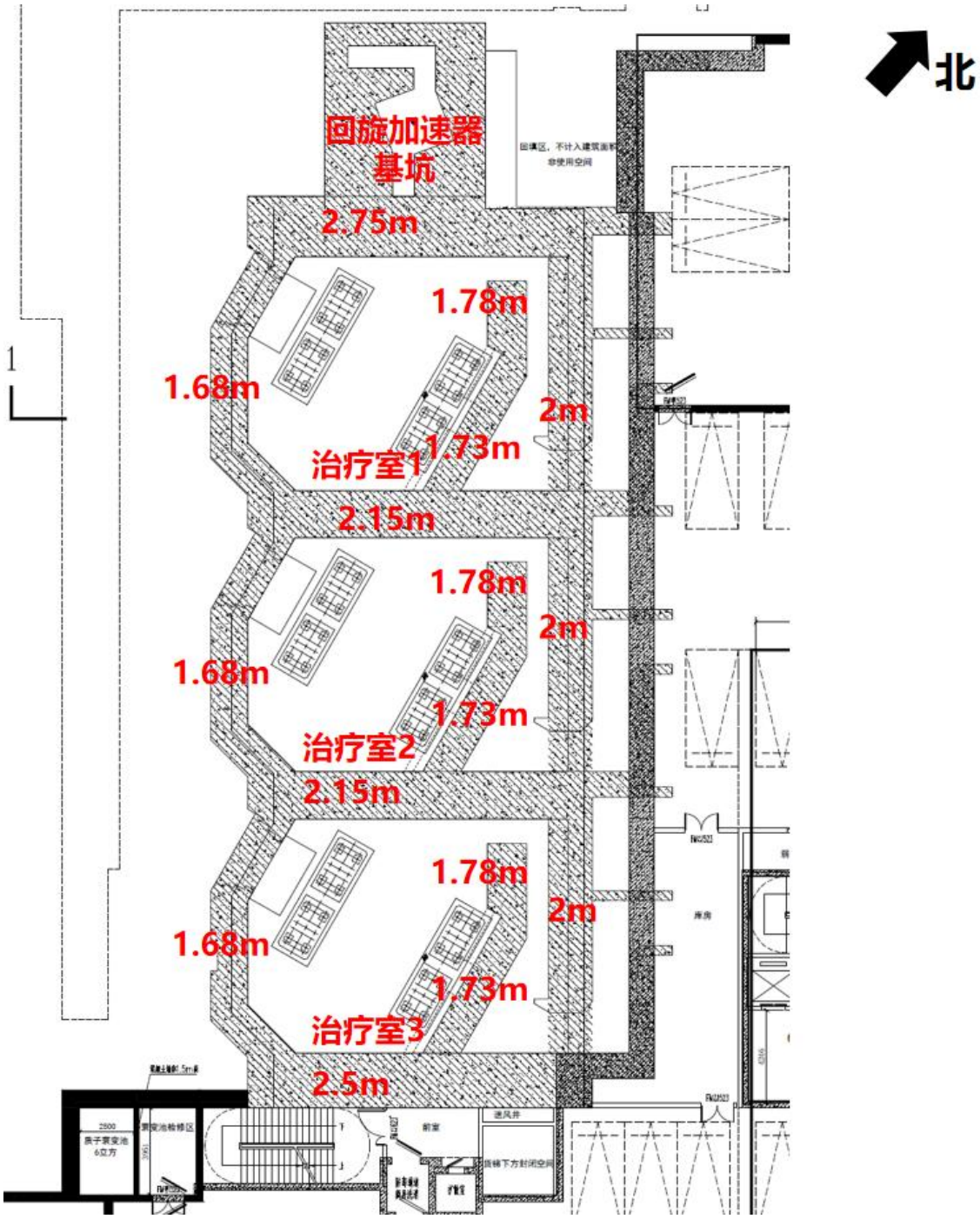


图 4-4 质子治疗装置地下二层屏蔽设计平面示意图

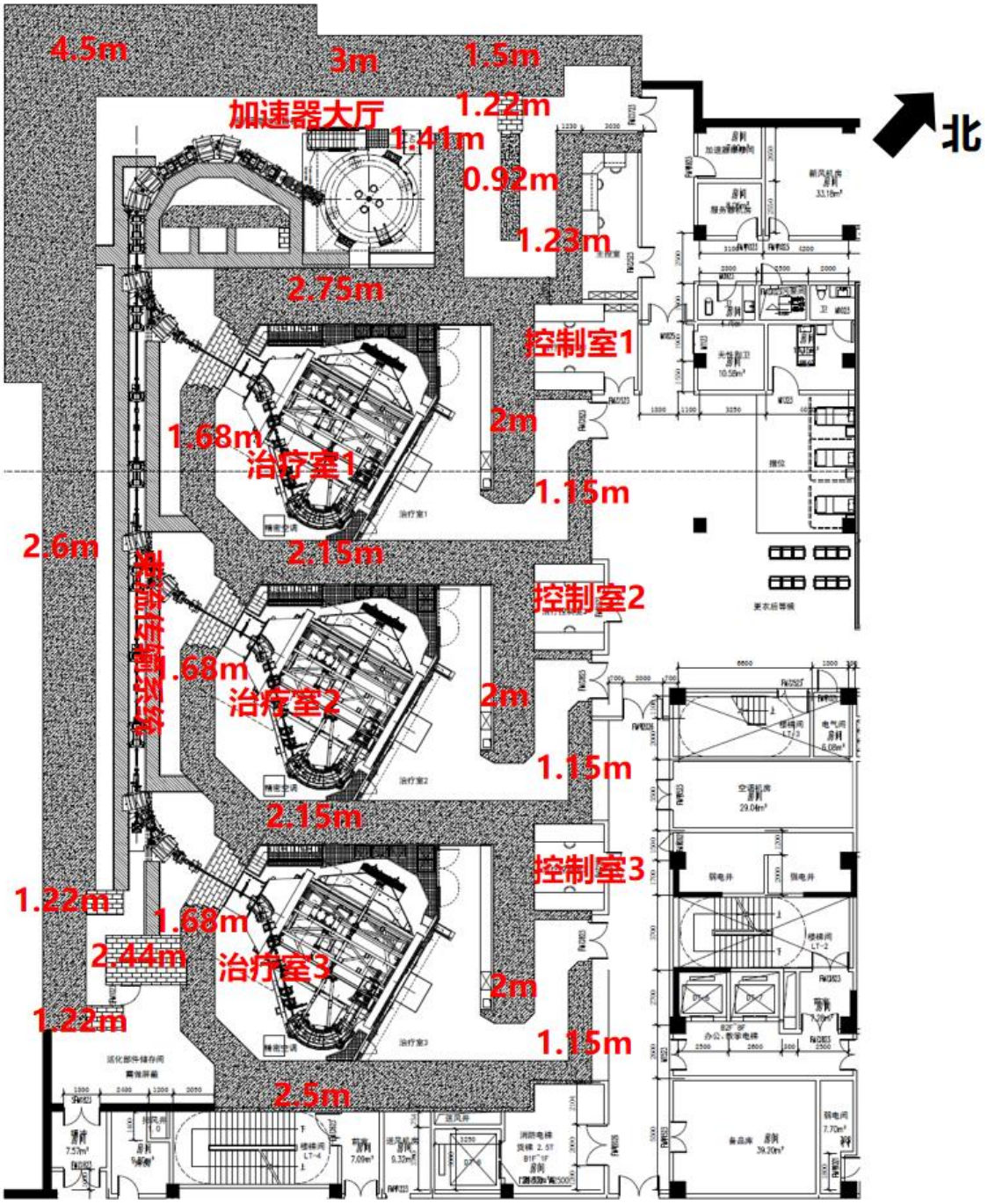


图 4-5 质子治疗装置地下一层屏蔽设计平面示意图

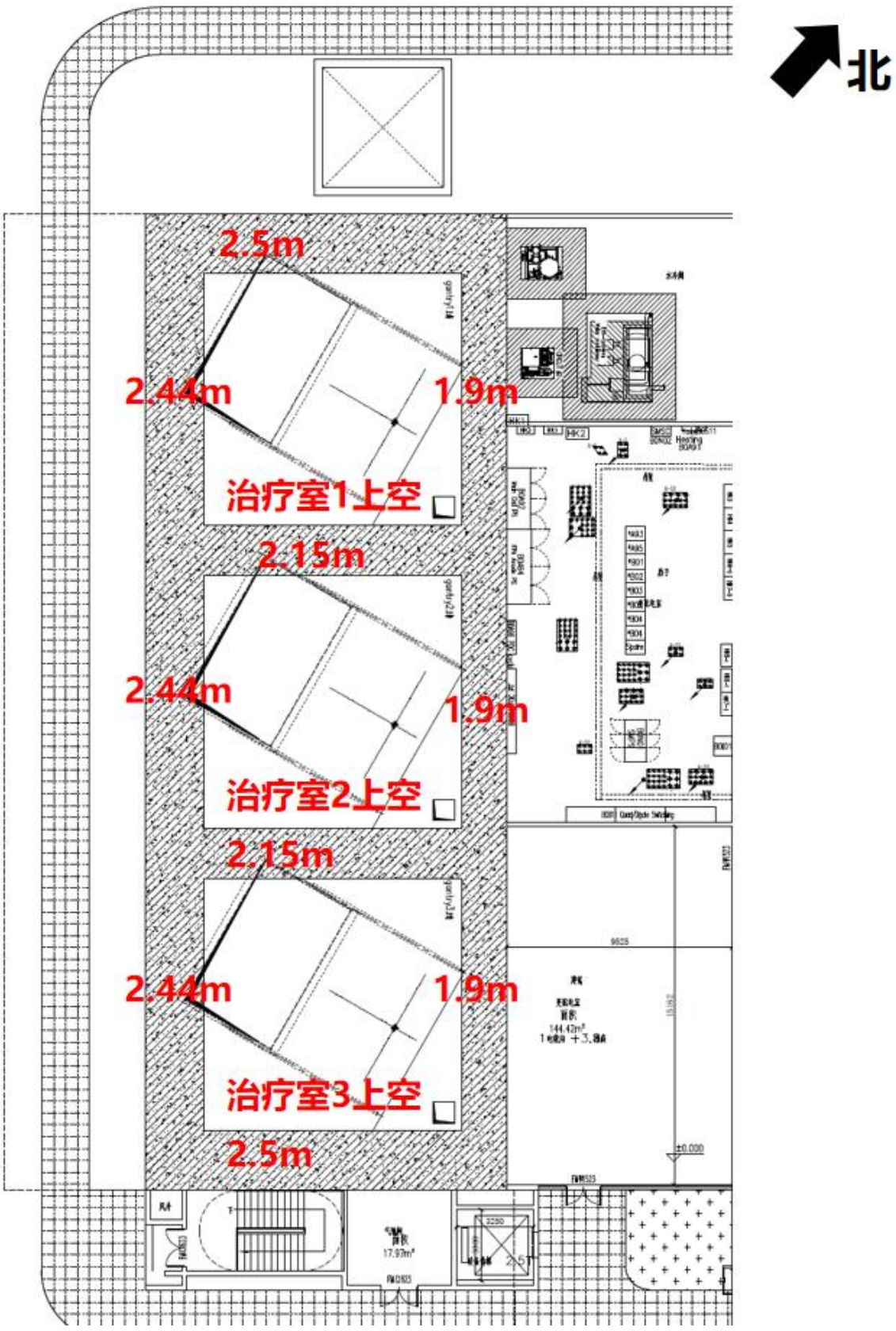


图 4-6 质子治疗装置地上一层屏蔽设计平面示意图

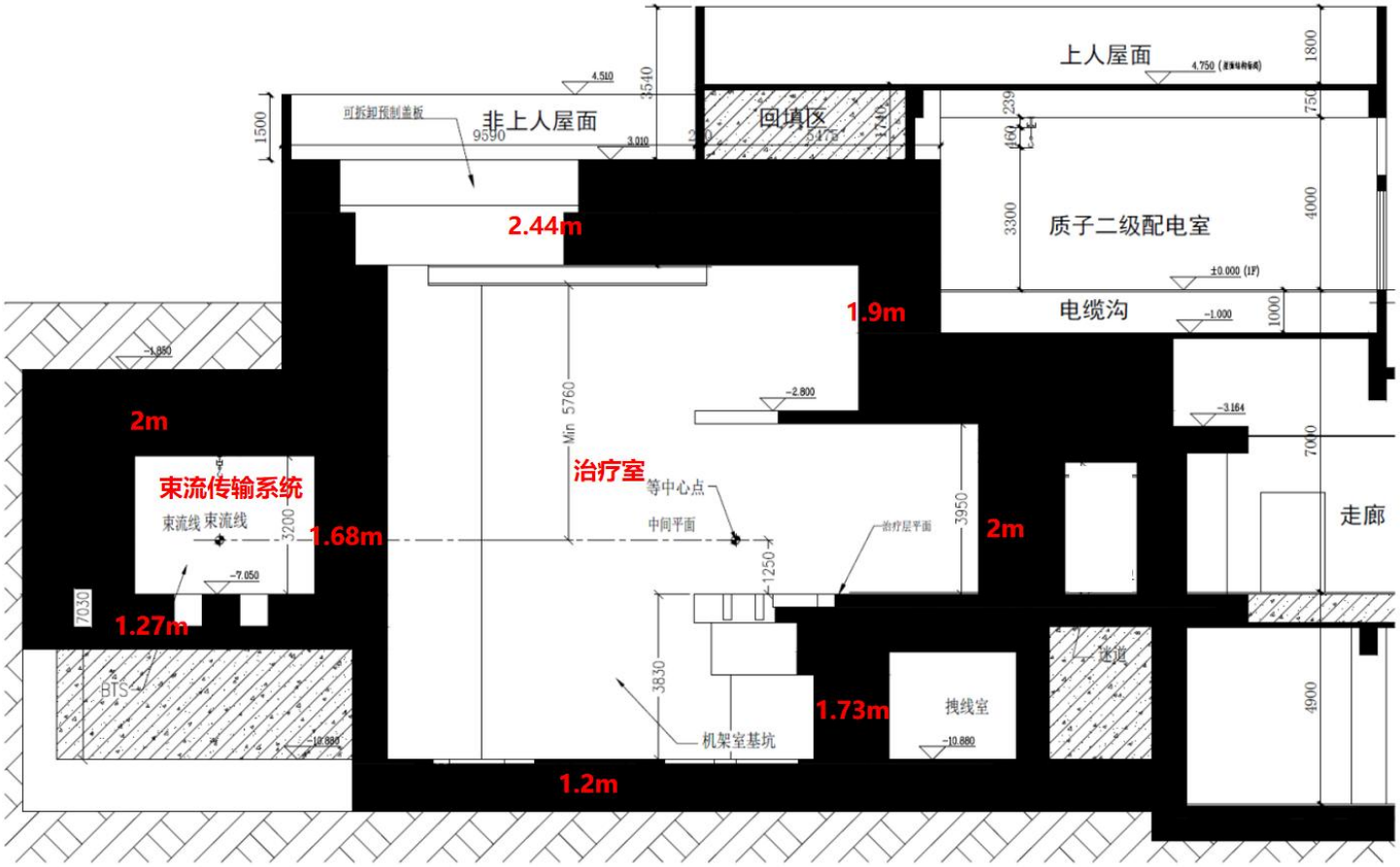


图 4-7 质子治疗装置屏蔽设计剖面示意图 1

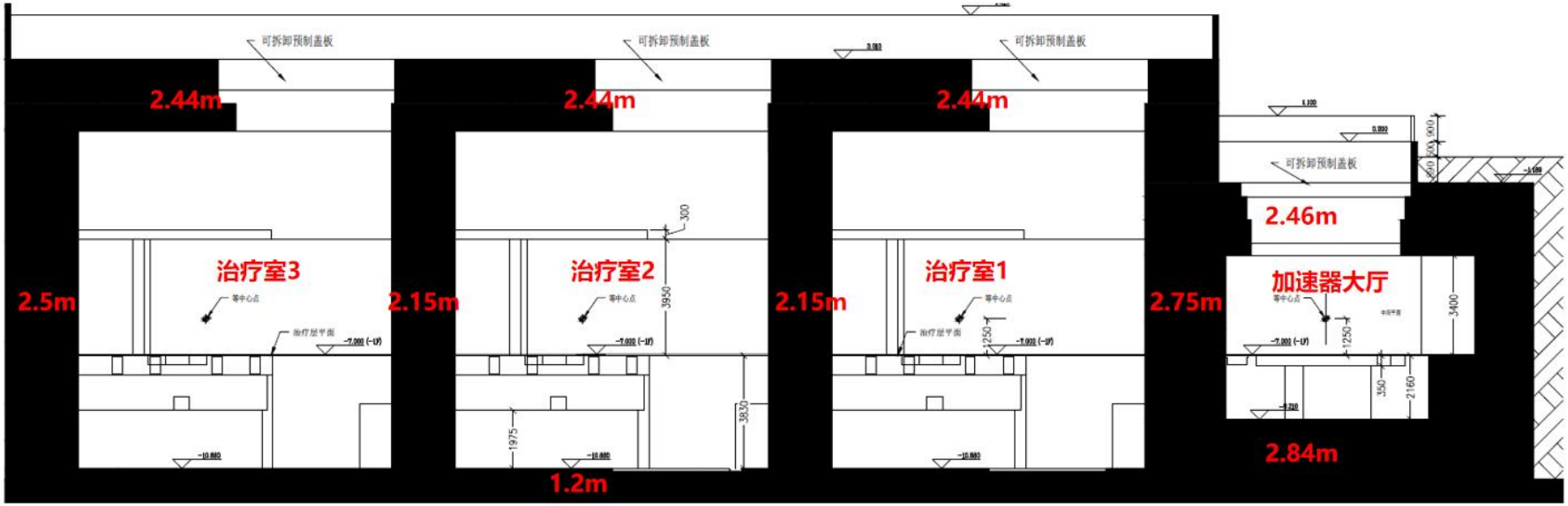


图 4-8 质子治疗装置屏蔽设计剖面示意图 2

4.1.3 辐射安全与防护措施

4.1.3.1 人身安全联锁系统

4.1.3.1.1 设计准则

从人员安全和系统安全角度考虑，系统全局的进行人身安全联锁系统设计，选择故障安全型元件设备和控制器，进行冗余和联锁设计，软件上进行系统状态、设备心跳信号实时监测，在保证设备正常工作前提下，系统所有的状态均安全可控，所有状态均反馈给操作人员和最终用户，防止患者、工作人员和公众遭受射线照射、运动部件的碰撞、挤压、电源触电等伤害。具体如下：

（1）纵深防御：充分考虑并合理设置联锁设施实现对人身辐射安全的多重冗余保护且各重保护措施之间具有相互独立性, 不但重要场所进行多重“冗余”设计，整个系统也为“冗余”，一般采用四重冗余安全措施；

（2）硬件最可靠：重要的位置把最大的信赖寄托在“硬件”上；

（3）最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是设备最初始的运行功能（如离子源的高压等），更好的保证区域内的辐射安全；

（4）失效保护设计：关键联锁部件及联锁系统失效时，相应联锁控制区域仍处于安全状态；

（5）自锁：联锁系统主要环节有自锁功能，即一旦联锁从该处实施切断，现场辐射安全人员必须到现场检查，确保不安全因素已排出后，手动“复位”才有效。

4.1.3.1.2 系统结构和功能

（1）安装直接控制离子源的“离子源电子单元”，凡是由测量剂量的“游离室电子单元”传来超剂量信号或由量程调制器电子单元传来的错误调制量程信号等都能在几十微秒时间内切断离子源，确保安全

（2）安全联锁系统是一个安全逻辑回路全部用硬件连接的系统，将质子治疗建筑、设备和单元部件中一切关键的与辐射安全有关的联锁信号（如离子源供电电源、束流线上的束流闸、旋转机架和患者定位系统的马达、治疗室和加速器大厅门开关等）彼此串联成一个“安全锁链”。当其中任何一个安全联锁条件不成立时，对应联锁接点就会打开，断开此安全链，切断质子束流。安全锁链控制的功能主要如下：

a. 切断离子源供电电源，阻止在加速器中产生质子；

b. 切断加速器高频调制器，停止质子加速，是阻止切断质子产生的冗余措施；

c. 关闭能量选择系统出口处的束流闸，阻止束流通过；

d. 关闭治疗室入口处的束流闸，若安全条件不满足，即阻止束流进入治疗室；

e. 关闭治疗室的设备驱动单元、旋转机架的转动，若安全条件不能满足，即阻止一切机械动作。

（3）TSS 控制系统使用不间断电源供电，控制器系统一直处于运行状态，负责整个质子治疗装置的电源供电控制。任何试图对 TSS 的断电意味着整个系统所有设备的断电。

治疗安全系统（TSS）由多个安全冗余控制单元（SRCU）组成，每个 SRCU 保证一个指定区域的人员安全：其中，控制加速器区的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCU0（由主控室操控），治疗室的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCUX（X 为治疗室号，本项目 X 从 1 到 3）。各区域的硬安全联锁信号都接入各自的 SRCU，形成一个独立的安全联锁回路。

（4）每个 SRCU 冗余控制系统会进行硬件的输入/输出信号的可靠性进行校验以及软件逻辑的计算过程的可靠性进行二次核对，确保外部信号和计算过程的绝对可靠，一旦上述校验和核对出现偏差，会立即切断质子束流。

4.1.3.1.3 系统组成

质子治疗装置的人身安全联锁系统主要由钥匙控制、出入管理设备、门机联锁、清场搜索按钮、急停按钮和警示装置等组成，安全联锁设施具体点位如图4-9和图4-10所示，具体数量见表4-3。

4.1.3.1.3.1 钥匙控制

加速器主控室和每间治疗室控制室内均设有一个控制面板，控制面板上设有四个按钮，包括一个“beam pause”按钮、一个急停按钮、一个带主控钥匙的转换开关，一个用于切换“ACU service mode”的钥匙旋钮（该元件用于将加速器状态切换至维修状态，在该状态下，加速器无法出束）。

主控钥匙转换开关有“ON”和“OFF”两种转换状态，是束流开启的必要条件。在加速器停机期间进入加速器大厅或治疗室内的工作人员，应先登记然后从相应区域的控制室，将主控钥匙旋转至“OFF”状态，并拔下钥匙(治疗室清场除外，由于治疗室经常有人员出入，如果打到off可能会打断病人治疗的某些逻辑，需要进行确认后才能恢复)；从该控制区域出来后，在所有清场搜索按钮以及门磁系统等都建立好联锁后，只有当主控制钥匙插入并转到“ON”的状态，才能最终允许出束。主控制钥匙未归位前，各辐射区均无法出束。

4.1.3.1.3.2 剂量联锁

剂量联锁的主要功能是通过固定式γ及中子监测设备进行监测（加速器大厅（包含束流传输系统）剂量阈值设定为25μSv/h），剂量率超过设定值加速器大厅（包含束流传输系统）的入口门及末端迷道门无法从外部打开，在加速器开机时及停机后，人员无法进入剂量率超过设定值的放射性的区域，可以通过紧急开门按钮退出控制区。

4.1.3.1.3.3 门机联锁及门禁系统

加速器大厅迷道门、束流输运系统入口门及末端迷道门、治疗室终端迷道门和内部通道门与加速器出束联锁，各联锁门设置有门限位开关，开关也采用冗余

设计，设两个位置开关。只有当两个位置开关全部到位，才能确认门的位置，门位置信息通过 SRCU 送入 SCADA 系统画面显示。各联锁门关闭到位后，且在其他安全联锁条件满足的情况下，加速器才允许出束。同时，在加速器出束时，联锁门若被打开，加速器瞬间退高压关机以保证进入人员的安全。

辐射工作人员在进入加速器大厅及治疗室终端前需刷门禁卡确认身份。

4.1.3.1.3.4 紧急停机

加速器大厅、各治疗室终端内以及这些区域的控制室内均安装若干各紧急停机按钮，如图 4-9 和图 4-10 所示。若装置开机后仍有人员滞留在这些区域内，可就近按下该区域出口处的紧急停机按钮切断加速器运行。待确认控制区内无工作人员并将急停按钮复位后可重新开机操作。正常的流程是：在手动按下急停按钮后，进行事故确认，待排除事故后，手动拔出上述急停按钮，然后按下相应区域的 TSS 系统 PLC 机柜上的复位确认按钮，重启相应急停按钮。

4.1.3.1.3.5 紧急开门

加速器大厅迷道门内、束流输运系统末端迷道门内、治疗室终端迷道门内均设置了紧急开门按钮，如图 4-9 所示。当遇到意外情况，可随时按动紧急开门按钮，打开防护门，门打开后将切断束流。

4.1.3.1.3.6 清场搜索按钮

清场搜索是在开机前执行一套特定的安全搜索程序完成清场和建立联锁，联锁完成信号作为开机的必要前提条件之一，从而确保在开机前无人员滞留在里面。清场搜索按钮分布于加速器大厅、束流输运系统和各治疗室终端内部四周沿途一定距离、一定高度的墙壁上，具体点位如图 4-9 和图 4-10 所示。

每个搜索子区设搜索时间窗限制和搜索顺序，超出搜索时间或违反搜索顺序需重新进行清场。清场搜索共分为加速器大厅区域（含加速器区及束流输运系统区）以及 3 间治疗室共计 4 个区域，每个区域的清场搜索系统是相互独立的。其中加速器大厅区域又分为束流输运系统区（子区 1）和加速器区（子区 2）共 2 个子区，由束流输运系统入口门分隔；每间治疗室终端分为机架区（子区 1）和

治疗区（子区 2）共 2 个子区，由治疗区与机架区之间的通道门分隔。每个子区也是相互独立的。

表 4-2 质子治疗装置辐射工作场所清场子区及时间窗限值

区域	子区	子区描述	搜索时间窗	搜索顺序
加速器大厅（包含束流输运系统）	1、束流输运系统区	束流输运系统入口门至末端迷道门之间的区域	1min	子区 1 至子区 2
	2、加速器区	加速器大厅迷道门入口至束流输运系统入口门之间的区域	2min	
治疗室终端	1、机架区	治疗室的机架区	2min	子区 1 至子区 2
	2、治疗区	治疗室终端的治疗区	1min	

加速器大厅区域和治疗室终端区域的清场搜索逻辑如图 4-13 所示，具体流程如下：

每天首次治疗开始前，由当天现场负责的工作人员在规定的时间按照规定的路线进行清场搜索，需拔下加速器主控室钥匙和各治疗控制室钥匙。工作人员确定该被搜索区域无除治疗室内患者以外的人员停留后按下“清场搜索按钮”，当清场搜索按钮被按下后时，该区的声光报警装置发出声、光报警信号，提醒人员离开该区域。通常加速器大厅区域在每次开机前进行一次清场搜索；各治疗室治疗区则在每次治疗前进行一次清场搜索。任一子区的清场状态被破坏（如门打开或清场搜索按钮未按下），都需要对该子区重新进行清场，若任一子区的清场状态未被破坏则无需再对该子区进行重新清场，直至清场状态被破坏为止。具体的搜索路线如下：

加速器大厅的清场路线是从加速器大厅东侧的迷道门进入控制区，首先从加速器大厅进入到束流输运系统末端迷道处，按下巡检按钮 1，然后按照图 4-11~图 4-12 中的搜索路线，由子区 1 至子区 2 依次按下巡检按钮，其中回旋加速器部分需下入基坑区巡检后再按下上一层巡检按钮 3，最后从加速器大厅东侧的门离开控制区，完成清场。

治疗室终端的清场路线同样由子区 1 至子区 2，依次按下巡检按钮，最后从治疗室终端迷道门离开，完成清场。具体路线是从治疗室终端的迷道门进入，首先进入机架基坑区（子区 1）进行清场搜索，完成后通过楼梯上至治疗区，按下巡检按钮 3，最后从治疗室终端的入口门离开，完成治疗室终端的清场。清场搜索路线如图 4-11~图 4-12 所示（由于治疗室终端的清场路线一致，因此仅以其中一间治疗室终端的清场路线为例）。

只有当清场搜索完成所有区域的联锁门都已处于关闭状态，主控室总钥匙插回主控室的控制面板上，治疗控制室总钥匙插入控制面板，并均处于允许状态，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。

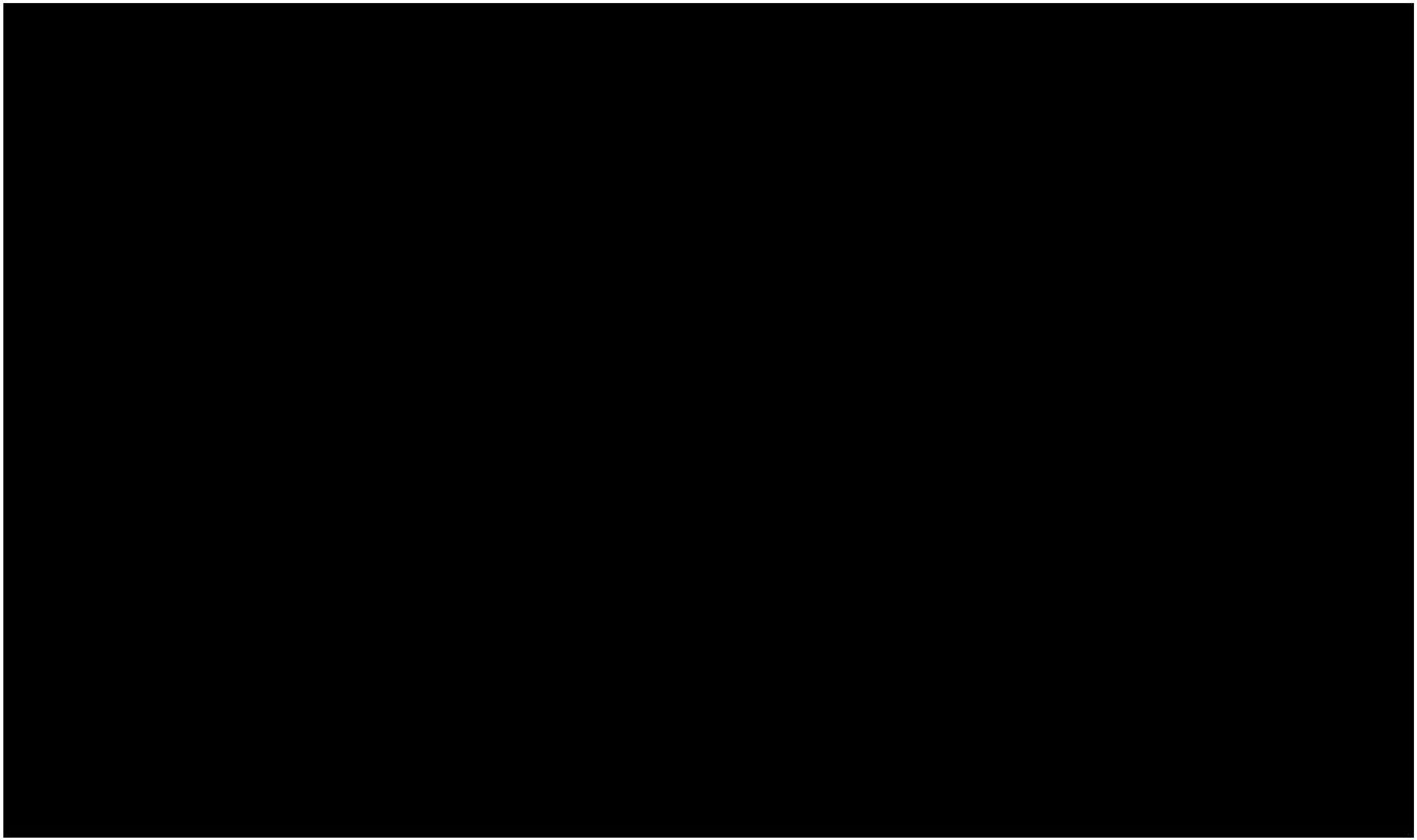


图 4-9 质子治疗装置安全联锁设施分布点位示意图（地下一层）



图 4-10 质子治疗装置安全联锁设施分布点位示意图（地下二层）



图 4-11 质子治疗装置辐射工作场所清场巡检路线示意图（地下一层）



图 4-12 质子治疗装置辐射工作场所清场巡检路线示意图（地下二层）

表 4-3 质子治疗装置安全联锁设备数量表

区域	设备名称	设备数量，个
加速器大厅（含束流输运系统）	联锁门	2
	紧急开门按钮	2
	紧急停机按钮	11
	清场搜索按钮	3
	警示铃	2
	警示灯	4
	状态指示灯	6
	γ 探测器及中子探测器	4
主控室	紧急停机按钮	1
	复位按钮	1
	γ 探测器及中子探测器	1
治疗室 1	联锁门	3
	紧急开门按钮	1
	紧急停机按钮	9
	清场搜索按钮	3
	复位按钮	1
	警示铃	1
	状态指示灯	2
	γ 探测器及中子探测器	3
治疗控制室 1	紧急停机按钮	1
	复位按钮	1
	γ 探测器及中子探测器	1
治疗室 2	联锁门	3
	紧急开门按钮	1
	紧急停机按钮	9
	清场搜索按钮	3
	复位按钮	1
	声音报警	1
	束流状态指示灯	2
	γ 探测器及中子探测器	3
治疗控制室 2	紧急停机按钮	1
	复位按钮	1
	γ 探测器及中子探测器	1
治疗室 3	联锁门	3
	紧急开门按钮	1
	紧急停机按钮	9
	清场搜索按钮	3
	复位按钮	1
	声音报警	1
	束流状态指示灯	2
	γ 探测器及中子探测器	3
治疗控制室 3	紧急停机按钮	1
	复位按钮	1
	γ 探测器及中子探测器	1

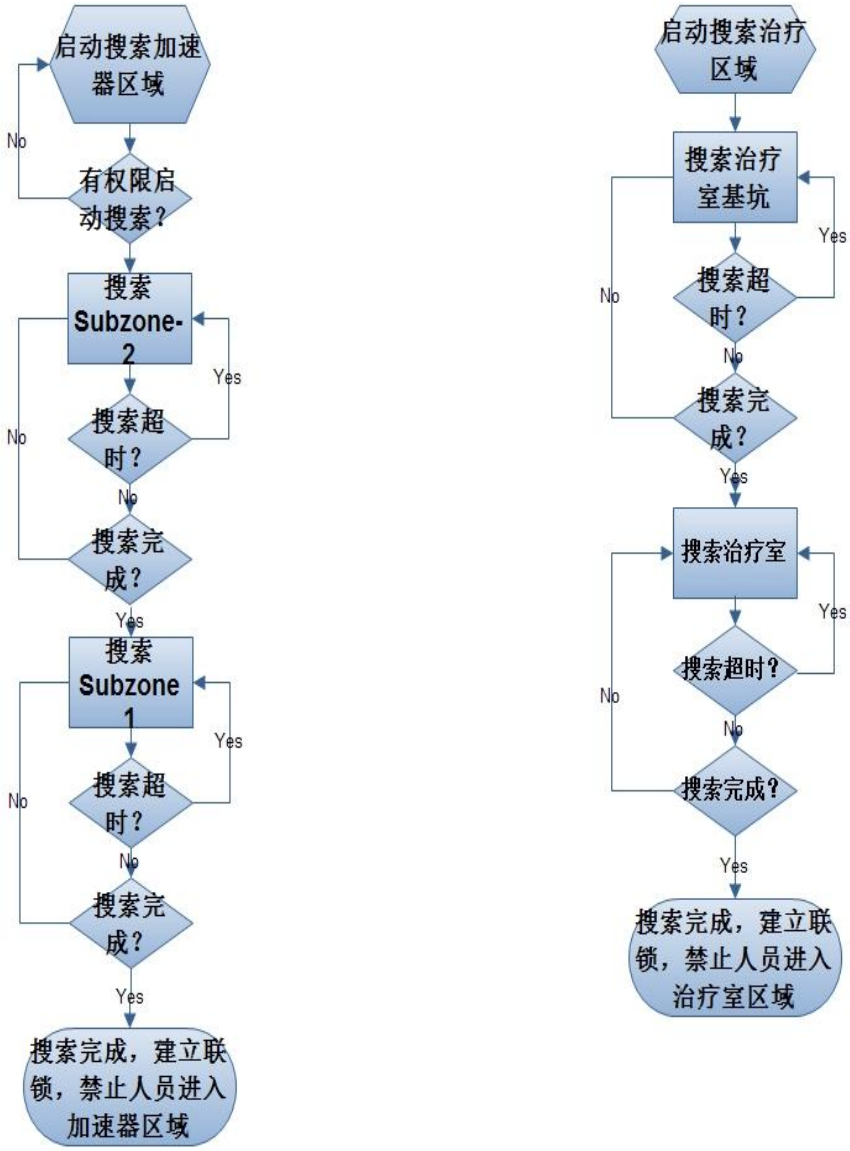


图 4-13 质子治疗装置清场搜索逻辑图

4.1.3.1.3.7 束流监控装置

（1）束流闸

质子治疗系统在由能量选择系统引出至各治疗室的分支束线上设有束流闸，束流闸按照“失效保护”的原则设计，其材质为铝或铜。只有当安全联锁逻辑中所有条件都成立时，束流闸方可打开，束流方可进入下游区域。安全联锁逻辑中任意条件被破坏，束流闸均不能打开。束流闸安装点位如图 4-14 所示。



图 4-14 质子治疗装置束流闸安装点位示意图

（2）束流监测

质子治疗装置在其束流输运系统和治疗室终端的治疗头内均设置了束流监测系统，监测设备都由人身安全联锁系统监控，一旦监测到不应该出现束流之处有束流，会立刻中断束流。

（3）束流安全设备

束流安全设备包括离子源、束流注入引出控制磁铁、束流降速降能控制器、主环上的磁铁、高能束流线束流切断系统快二极铁、高能束流线法拉第杯、分支线弯转磁铁、分支线束流闸，分布于整个装置的束流沿线。定位安全设备包括定位机械转臂、旋转支架、射线终端可移动喷嘴。

束流安全设备处于启动状态时，束流将通过这些安全设备。当束流安全设备处于停止状态时，束流将无法通过该安全设备。定位安全设备处于启动状态时，治疗师通过患者资料，操作定位系统，定位患者肿瘤位置。当定位安全设备处于停止状态时，定位系统处于停止状态，治疗时无法操作。

因此，通过控制这些安全设备的启停状态可以控制束流的分布区域以及定位

系统的开关状态。辐射安全联锁系统对是否允许安全设备工作进行控制。如果联锁系统不允许安全设备工作，则安全设备处于停止状态。如果联锁系统允许安全设备工作，则由束流和定位安全控制系统对安全设备的启停进行控制。

4.1.3.1.3.8 状态指示和声光报警

（1）状态指示

加速器大厅、束流输运系统入口和内部四周沿途一定距离处以及各治疗室终端入口处，安装有束流状态指示灯，具体点位如图 4-9 和图 4-10 所示。

（2）声光报警

加速器大厅及其控制室、束流输运系统、3 间治疗室终端均设置了声光报警装置，具体点位如图 4-9 和图 4-10 所示。

4.1.3.1.3.9 摄像头和对讲装置

在加速器厅和各个治疗室终端内布置必要的摄像监视装置，根据场地面积和结构要求尽可能覆盖所有区域，尽量无死角。

每间治疗室终端内设置双向患者监测对讲系统或有线电话，即在治疗室终端内设语音激活或连续接通的对讲机/电话，控制室的控制台上设有对讲按钮，确保治疗期间，控制室内的医护人员可通过该对讲按钮与治疗室终端内的患者进行实时交流、具体可参照设备厂商提供的建筑接口文件中的“通讯设备”页的内容来实施。

4.1.3.1.4 安全联锁逻辑

质子治疗装置安全联锁系统逻辑图见图 4-15，系统允许开机的逻辑图见图 4-16。

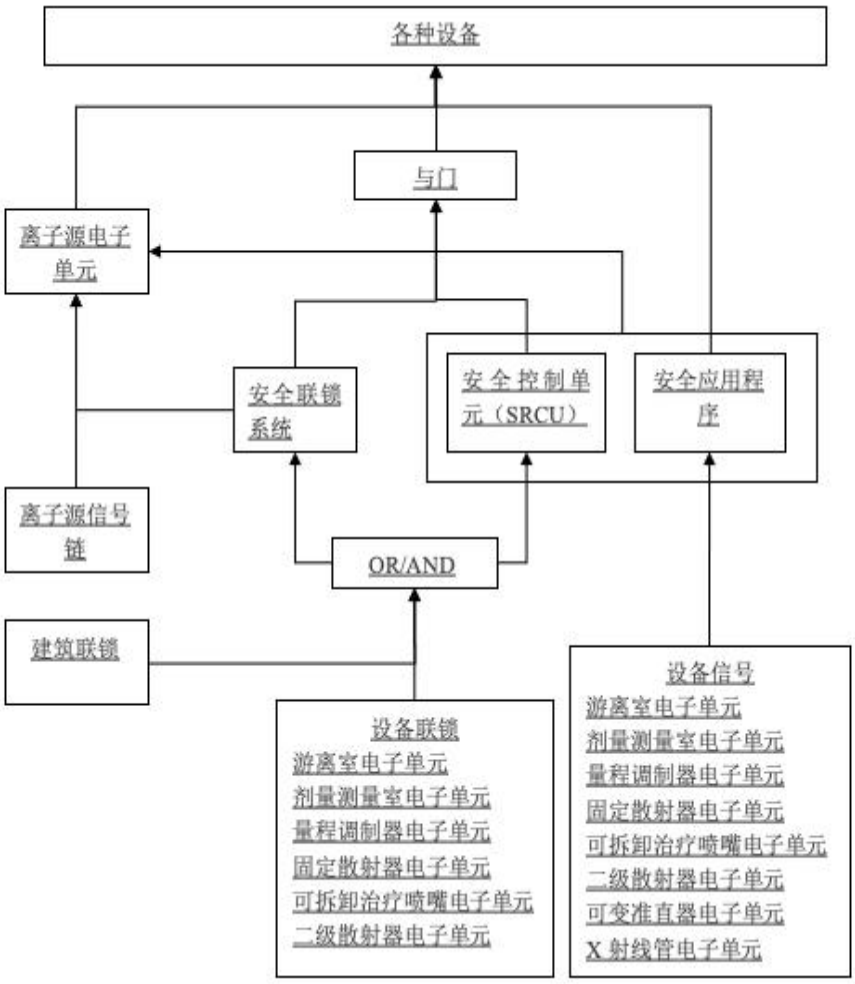


图 4-15 质子治疗系统安全联锁逻辑图

允许开机出束的逻辑如下：

（1）加速器大厅和需要使用的治疗室内清场搜索按钮按一定顺序全部按下；

（2）加速器大厅和需要使用的治疗室终端内的急停按钮全部复位；

（3）加速器大厅控制室内钥匙面板上的主控钥匙全部归位并旋转至“ON”。

（4）控制区出入口的门全部处于关闭状态；

（5）获得治疗室内医生发出的允许开机的指令。

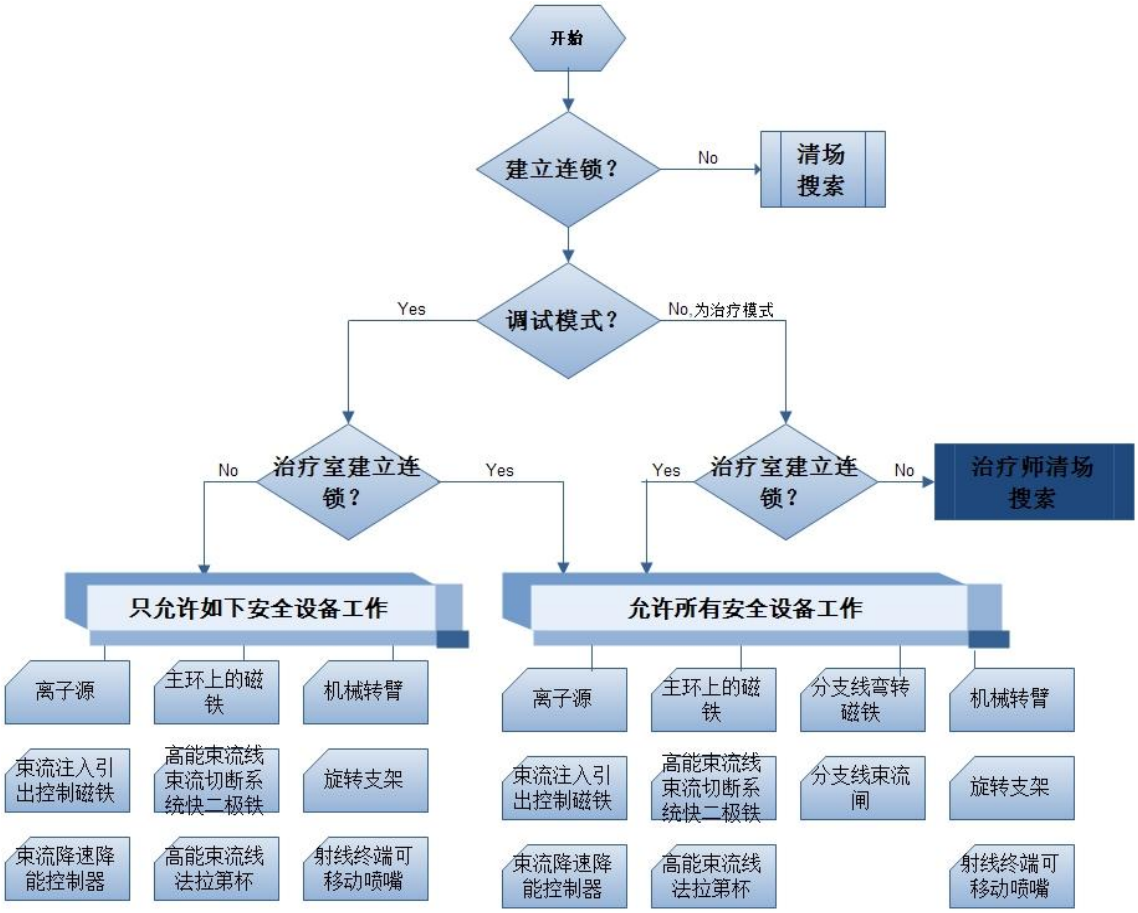


图 4-16 质子治疗系统允许开机的逻辑图

4.1.3.2 区域辐射监测系统

质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 4-17 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（γ/中子）。

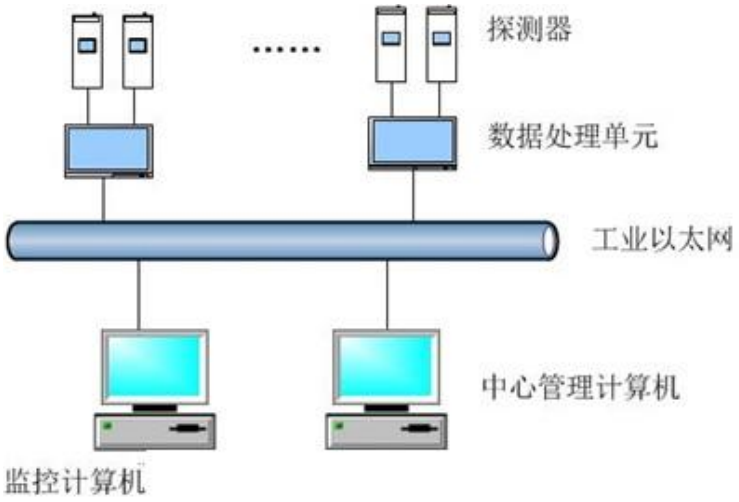


图 4-17 质子治疗装置场所辐射监测系统结构



图 4-18 场所监测系统布置点位示意图

固定安装的探测器的安装位置一般在质子治疗装置安装完成后，根据实际的剂量水平确定。一般分布在加速器厅的入口、治疗室迷道等人员常驻区域，同时在设备周围设置若干监测点位，以监测周围环境辐射水平变化。本项目固定式剂量率监测仪表的位置如图 4-18 所示，每个监测点由一台中子探测器和γ探测器组成，加速器大厅（不包含束流传输系统）的监测点显示单元（实时显示剂量率水平）设置在加速器大厅入口处，超过阈值时显示单元将报警蜂鸣，各治疗室的监测点显示单元设置在治疗室入口处，实时显示剂量率水平。同时所有监测点的剂量率水平均会连线至主控室的控制电脑上，实时显示剂量率水平，当超过设定的阈值时中控室内将会收到报警信息。

根据各监测点剂量水平和中子能量选择不同灵敏度的辐射探测器。主要功能是确定参考点的辐射水平，测定加速器的工作场所和周围环境中的辐射水平，保证工作人员和公众的安全，验证屏蔽措施的可靠性，防止辐射泄漏造成环境污染。

4.1.3.3 通风系统

质子治疗系统的加速器大厅及束流输运区、各治疗室均设计了通风系统。各区域通风管道的布局如图 4-19 所示，通风系统的设计参数见表 4-4。各治疗室换气次数均大于 4 次/h，符合 HJ1198-2021 的相关要求。质子治疗各区域的感生放射性气体通过排风系统后统一通过屋顶总排风口排放到室外，正常运行情况下不会对室内人员造成明显的辐射影响。

加速器大厅和束流传输系统连通，为一个区域，每个治疗室均分为治疗区和机架区，以上区域的送风机房均位于地下一层的两个新风机房，由地下一层的新风机房从迷道引入控制区内，治疗室治疗区统一排风。

新风输送进入治疗室治疗区后由治疗区与机架区相连的新风管道，向机架区输送新风，机架区的排风是排入束流传输系统区域后与加速器大厅（包含束流传输系统）的排风统一排出。

治疗室治疗区和加速器大厅（包含束流传输系统）均采用上送下排的方式，穿墙样式采用“Z”型曲路，避免了直穿，能有效控制通风管道孔的辐射泄漏，

排风管道引至屋顶后排放，排风口距屋面 1.8m，排风高度约 39.3m。

表 4-4 质子治疗装置工作场所通风系统设计参数

区域名称	体积，m^3	新风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/h
加速器大厅（包含束流输运系统）	1478	2000	13000	9
1 号旋转机架治疗室机架区	330	2800	2800	8
1 号旋转机架治疗室治疗区	252	2500	2500	10
2 号旋转机架治疗室机架区	330	2800	2800	8
2 号旋转机架治疗室治疗区	252	2500	2500	10
3 号旋转机架治疗室机架区	330	2800	2800	8
3 号旋转机架治疗室治疗区	252	2500	2500	10

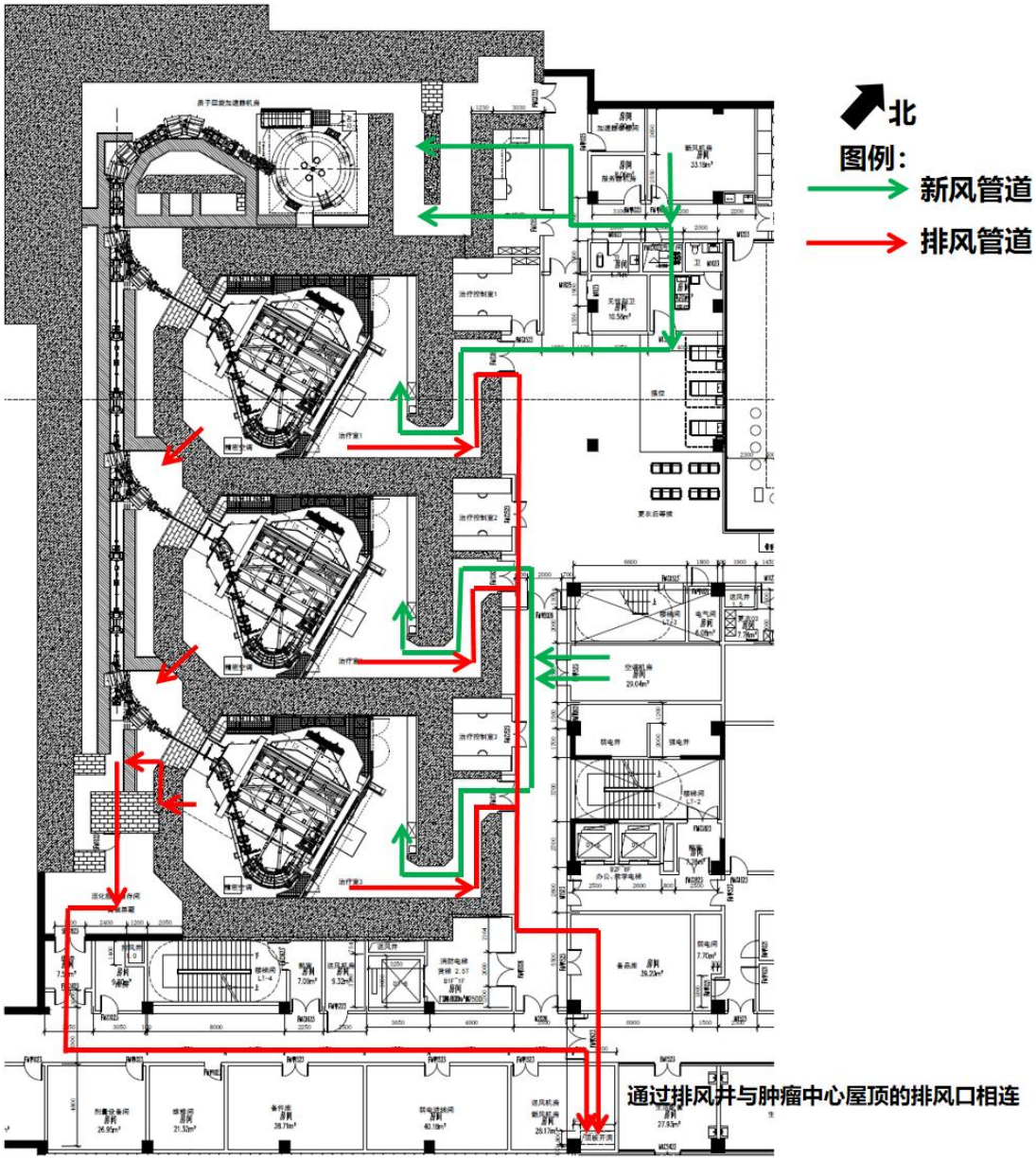


图 4-19 质子治疗装置地下一层通风系统设计图

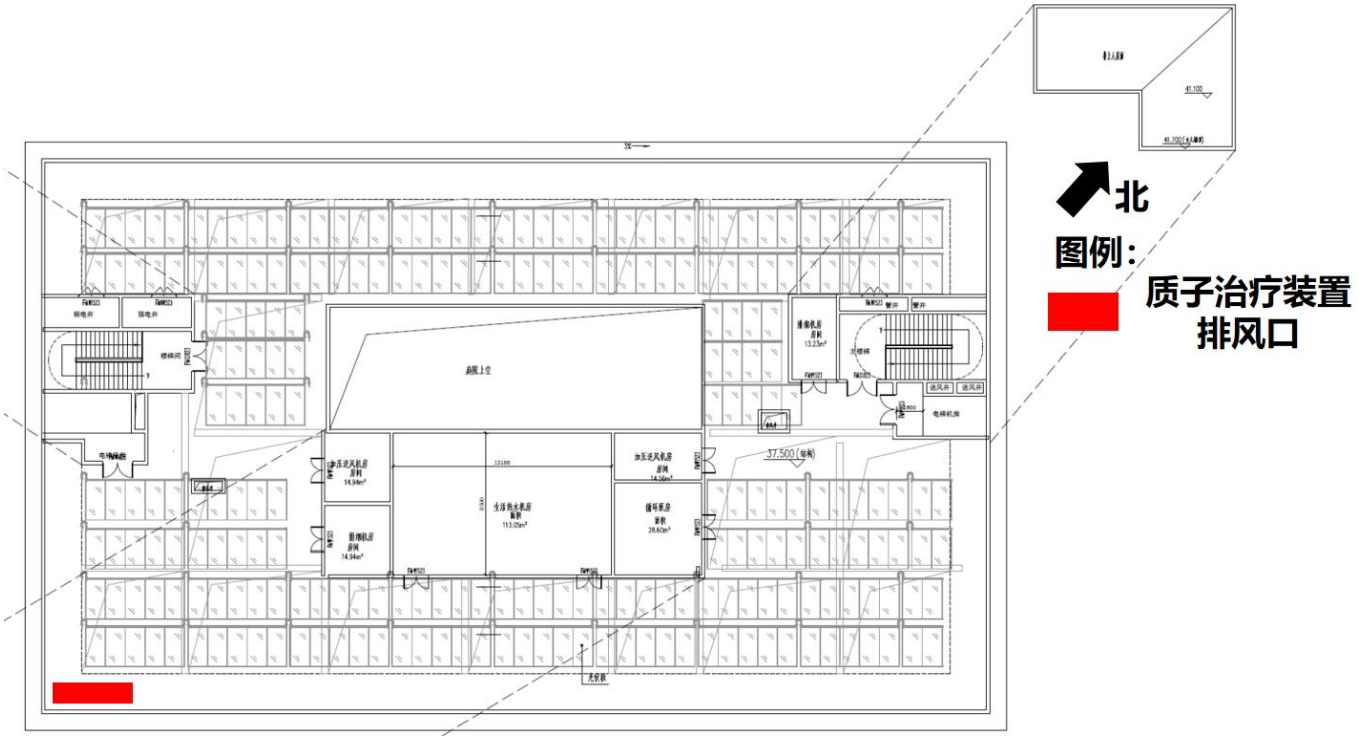


图 4-20 质子治疗装置总排风口在屋顶的位置示意图

4.1.4 放射性三废处理

4.1.4.1 放射性废气来源及处理措施

（1）来源

根据第三章的分析，质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}N（$T_{1/2}[^{13}N]$=9.965min）、^{15}O（$T_{1/2}[^{15}O]$=2.037min）、^{11}C（$T_{1/2}[^{11}C]$=20.39min）和 ^{41}Ar（$T_{1/2}[^{41}Ar]$=1.8h），年排放量见表 3-27。

（2）处理措施

质子治疗装置运行产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。质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楼顶排气筒排入环境。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。

4.1.4.2 放射性废液来源及处理措施

本项目产生的放射性废水主要是活化的冷却水。质子治疗装置所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素见表 3-28。除 ^{7}Be、^{3}H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。

（2）处理措施

质子治疗装置运行期间，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修时才会排放。加速器大厅、束流输运线系统及治疗室内均设有地漏，通过地漏收集至肿瘤中心地下二层南侧的放射性废液暂存池，具体布置情况见图 4-21。暂存池的有效容积为 6m^3，用于暂存活化冷却水。根据质子治疗装置厂商提供的信息，质子治疗装置中可能产生活化冷却水的总量约为 5m^3，每年因检修将回路中的冷却水排放的次数最多为一次。

暂存池上设有取样口，在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.3.2 节”所列中放射性废水排放标准，并经审管部门批准后方可排放，且配备手动启动的排水泵，需要排放时手动开启排水泵。每次排放需记录存档，记录废水来源、排放量、活度浓度监测结果、排放去向等信息。

综上所述，质子治疗装置正常运行时不会产生放射性废液，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。

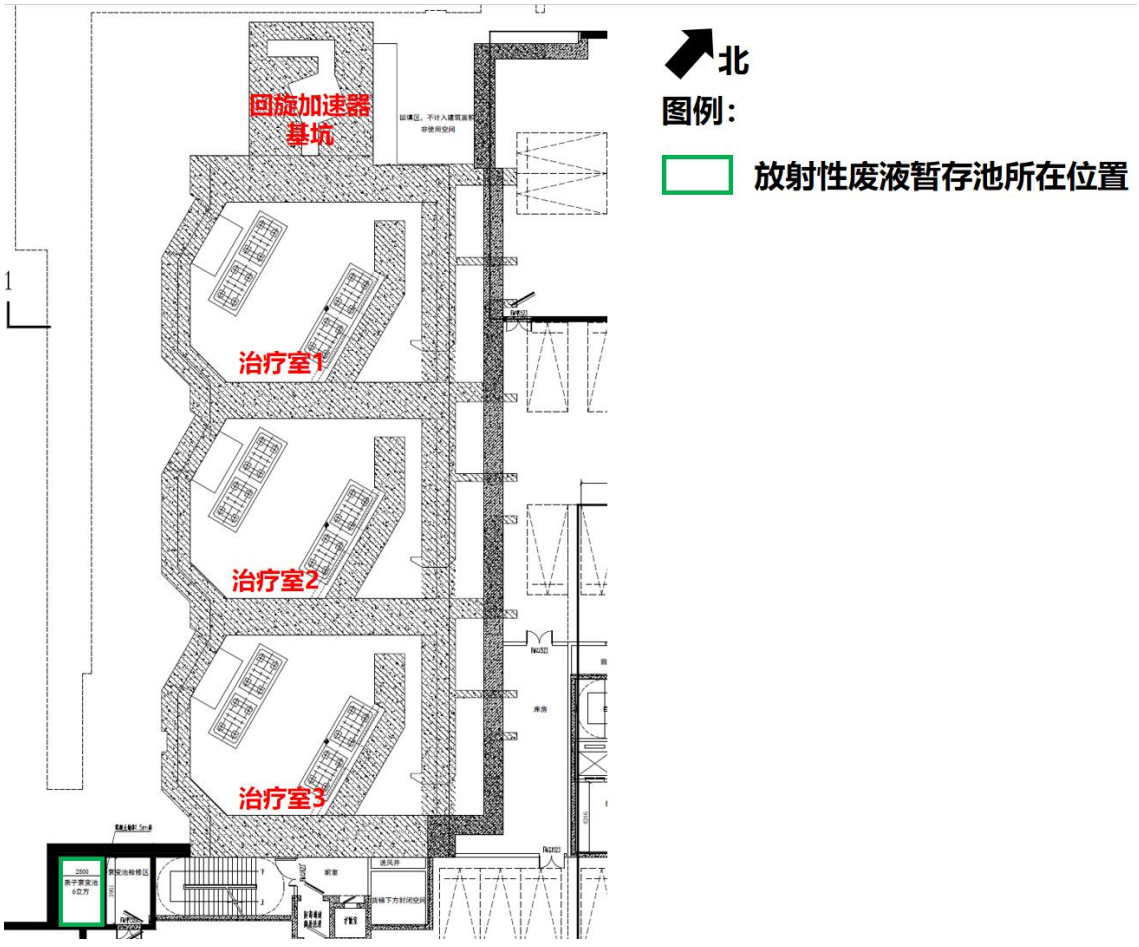


图 4-21 质子治疗装置暂存池位置示意图

4.1.4.3 放射性固体废物来源及处理措施

质子治疗装置产生的放射性固废为含感生放射性的结构部件、冷却水废离子树脂、加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等。按预计含感生放射性的结构部件每年产生量小于 1m^3；冷却水废离子树脂每年产生量小于 3m^3；加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等每年产生量小于 2m^3。

产生的放射性固体废物的主要材料是钢、碳和镍，其主要的感生放射性核素及其半衰期列于表 4-5。停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是主要是 ^{54}Mn、^{51}Cr、^{52}Mn、^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。

表 4-5 活化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	^{3}H	12.3a	钢	^{51}Cr	27.8d
	^{7}Be	53.6d		^{52}Mn	5.55d
	^{11}C	20.4min		^{52m}Mn	21.3min
钢	同上述核素加以下核素	——		^{54}Mn	300d
	^{22}Na	2.60a		^{56}Co	77d
	^{24}Na	15.0h		^{57}Co	270d
	^{42}K	12.47h		^{58}Co	72d
	^{43}K	22.4h		^{55}Fe	2.94a
	^{44}Sc	3.92h	镍	^{58}Fe	5.1d
	^{44m}Sc	2.44d		同上加以下	
	^{46}Sc	83.8d		^{65}Ni	2.56h
	^{47}Sc	3.43d		^{61}Cu	3.33h
	^{49}Sc	1.83d		^{62}Cu	9.80min
	^{48}V	16.0d		^{64}Cu	12.82h

（2）处理措施

医院对质子治疗系统产生的放射性固体废物分类收集和包装，结构部件的放射性活度浓度一般高于豁免水平，需要对拆卸下来的部件加强管理，进行辐射水平监测、登记，暂存在地上一层束流输运系统末端放射性固体废物暂存间暂存，位置见图 4-22。设置暂存柜，柜体外张贴电离辐射警告标志，容器外包装贴有标签，标明废物名称、数量、来源、剂量率水平和存放日期等信息，并配备专门的管理人员，负责放射性固体废物的安全管理。

当暂存区域内废物暂存量接近容积的 2/3 时，由医院委托有资质单位进行检测分析：

1）测量放射性固体废物的表面辐射剂量率，若为本底水平：

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）若辐射剂量率高于本底水平，由医院委托有资质单位处理。

医院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。

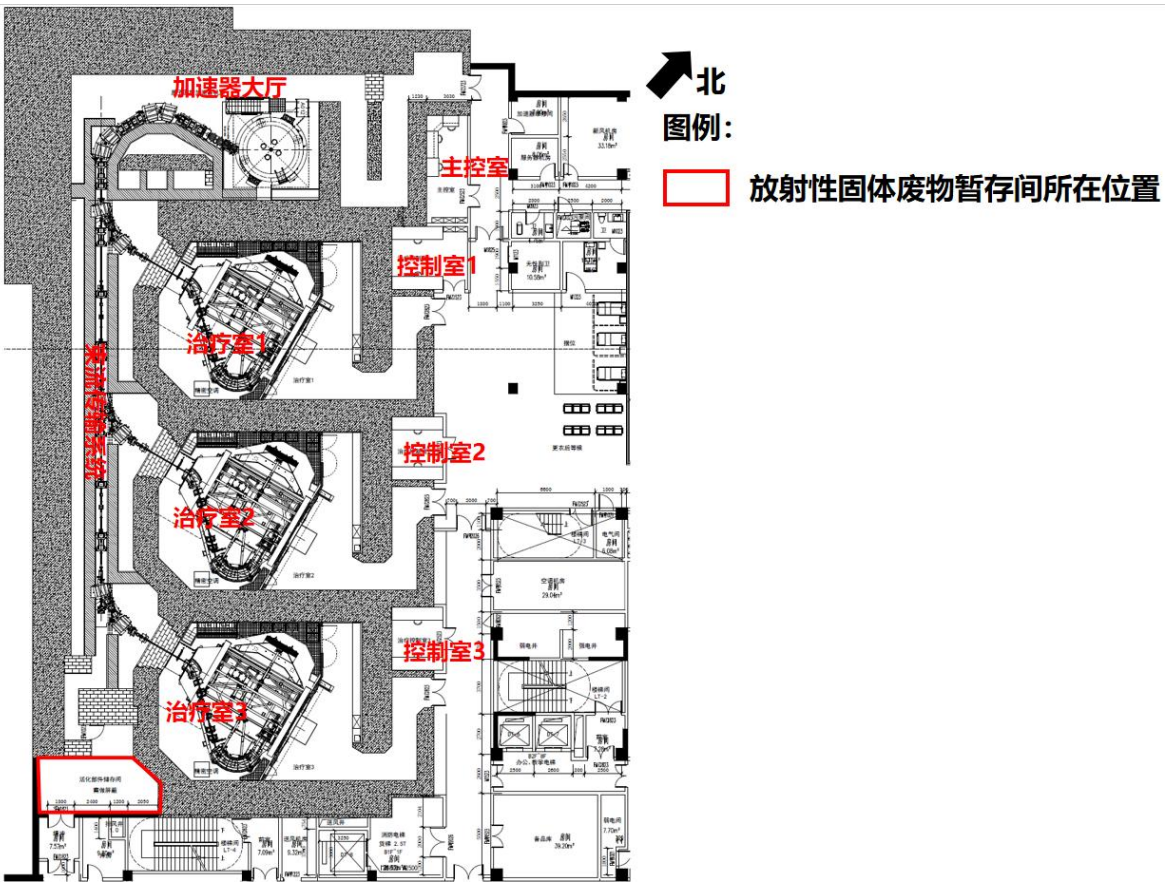


图 4-22 质子治疗装置放射性固体废物暂存间位置

4.1.5 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析

质子治疗装置拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中相关要求的对比情况列于下表。

表 4-6 质子治疗装置拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中相关要求对比

标准名称	标准要求		本项目建设情况
《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）	6.1 布局要求	6.1.1 放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。	质子治疗装置功能区主要位于肿瘤中心的地下二层~地上一层，位于拟建场址的西侧，其辐射屏蔽墙体、放射性三废处理设施均与机房主体同时设计和建造。
		6.1.2 放射治疗工作场所应分为控制区和监督区。治疗机房、迷路应设置为控制区；其他相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需经常检查其职业照射条件的区域设为监督区。	质子治疗装置辐射工作场所按控制区和监督区划分，其中加速器大厅、束流输运系统、3 间旋转机架治疗室、放射性固体废物暂存间、放射性废液暂存池为控制区，治疗控制室、主控室、缓冲间、水冷间及质子变配电室等为监督区。
		6.1.3 治疗机房有用线束照射方向的防护屏蔽应满足主射线束的屏蔽要求，其余方向的防护屏蔽应满足漏射线及散射线的屏蔽要求。	质子治疗装置防护屏蔽按要求进行防护设计。
		6.1.4 治疗设备控制室应与治疗机房分开设置，治疗设备辅助机械、电器、水冷设备，凡是可以与治疗设备分离的，尽可能设置于治疗机房外。	本项目控制室、设备间、配电间等辅助用房均与质子治疗装置分开设置。
		6.1.5 应合理设置有用线束的朝向， 直接与治疗机房相连的治疗设备的控制室和其他居留因子较大的用室，尽可能避开被有用线束直接照射。	质子治疗装置的控制室均设置在治疗机房屏蔽体外，尽可能避开被有用线束直接照射。
		6.1.6 X 射线管治疗设备的治疗机房、术中放射治疗手术室可不设迷路；γ刀治疗设备的治疗机房，根据场所空间和环境条件，确定是否选用迷路；其他治疗机房均应设置迷路。	质子治疗装置的加速器大厅、束流输运系统、治疗室均设置迷道。
	6.2 空间、通风要求	6.2.1 放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需要。	质子治疗装置的治疗室面积能够满足临床应用需要。
		6.2.2 放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数应不小于 4 次/h。	质子治疗装置中治疗室送排风管道对角设置，进风口设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部。换气次数均大于 4 次/h。

	6.3 屏蔽要求	6.3.1 治疗机房墙和入口门外关注点周围剂量当量率参考控制水平；治疗机房顶屏蔽的周围剂量当量率参考控制水平。	按照要求确定了质子治疗装置屏蔽体外关注处剂量率控制水平。
		6.3.3 屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能和经济因素，符合最优化要求，新建机房一般选用普通混凝土。	质子治疗装置机房屏蔽墙体、屋顶和地板的主材料均采用密度不低于 2.35 g/cm^3 的普通混凝土。
	6.4 安全装置和警示标志要求	6.4.2 放射治疗设备都应安装门机联锁装置或设施，治疗机房应有从室内开启治疗机房门的装置，防护门应有防挤压功能。	质子治疗装置设有门机联锁装置，门内设有开门装置，防护门有防挤压功能。
		6.4.3 医疗机构应当对下列放射治疗设备和场所设置醒目的警告标志： a）放射治疗工作场所的入口处，设有电离辐射警告标志； b）放射治疗工作场所应在控制区进出口及其他适当位置，设有电离辐射警告标志和工作状态指示灯。	质子治疗装置迷道入口处均设有电离辐射中文警告标志和工作状态指示灯。
		6.4.4 放射治疗设备控制台上应设置急停开关，除移动加速器机房外，放射治疗机房内设置的急停开关应能使机房内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。通常应在机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧和控制台等处设置。	质子治疗装置加速器大厅、束流传输系统、治疗室、治疗室控制室及中控室均设有急停按钮。上述控制区内各方向的墙壁、迷道入口门旁均设有急停按钮。
		6.4.6 控制室应设有在实施治疗过程中观察患者状态、治疗床和迷路区域情况的视频装置；还应设置对讲交流系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。	质子治疗装置控制区内均设有摄像头，治疗室内设置双向患者监测对讲系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。
《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）	5.1 选址与布局	5.1.1 放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	质子治疗装置周围 100m 的范围内没有民居、写字楼和商住两用的建筑物。
		5.1.2 放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。	质子治疗装置功能区主要位于肿瘤中心的地下二层~地上一层，避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。
	5.2 分区原则	5.2.1 放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下，控制区包括加速器大厅、治疗室（含迷路）等场所，如质子/重离子加速器大厅、束流输运通道和治疗室，直线加速器机房、含源装置的治疗室、放射性废物暂存区域等。开展术中放射治疗时，术中放射治疗室应确定为临时控制	质子治疗装置辐射工作场所按控制区和监督区划分，其中加速器大厅、束流输运系统、3 间旋转机架治疗室、放射性固体废物暂存间、放射性废液暂存池为控制区，治疗控制室、主控室、缓冲间、水冷间及质子变配电室等为监督区。

		区。	
		5.2.2 与控制区相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区（如直线加速器治疗室相邻的控制室及与机房相邻区域等）。	
	6.1 屏蔽要求	6.1.1 放射治疗室屏蔽设计应按照额定最大能量、最大剂量率、最大工作负荷、最大照射野等条件和参数进行计算，同时应充分考虑所有初、次级辐射对治疗室邻近场所中驻留人员的照射。	按照要求确定了质子治疗装置屏蔽体外关注处剂量率控制水平。
		6.1.2 放射治疗室屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能，符合最优化要求。使用中子源放射治疗设备、质子/重离子加速器或大于 10MV 的 X 射线放射治疗设备，须考虑中子屏蔽。	质子治疗装置机房主屏蔽墙体采用密度不低于 2.35 g/cm^3 的普通混凝土。
		6.1.3 管线穿越屏蔽体时应采取不影响其屏蔽效果的方式，并进行屏蔽补偿。应充分考虑防护门与墙的搭接，确保满足屏蔽体外的辐射防护要求。	加速器大厅及治疗室的排风管均由风井升至屋面排出。
	6.2 安全防护设施和措施要求	6.2.1 放射治疗工作场所，应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等：a）放射治疗工作场所的入口处应设置电离辐射警告标志，贮源容器外表面应设置电离辐射标志和中文警示说明；b）放射治疗工作场所控制区进出口及其他适当位置应设电离辐射警告标志和工作状态指示灯；c）控制室应设有实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统。	质子治疗装置迷道入口处均设有电离辐射中文警告标志和工作状态指示灯。控制区内均设有摄像头，治疗室内设置双向患者监测对讲系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。
		6.2.2 质子/重离子加速器大厅和治疗室内、含放射源的放射治疗室、医用电子直线加速器治疗室（一般在迷道的内入口处）应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内或机房门附近。	加速器大厅、束流输运系统以及治疗室内外均设置固定式辐射剂量监测仪，并具有异常情况下报警功能。
		6.2.3 放射治疗相关的辐射工作场所，应设置防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全联锁措施：a)放	质子治疗装置设有门机联锁装置，门内设有开门装置，防护门有防挤压功能。质子治疗装置加速器大厅、束流传输系

		射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置门-机/源联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束/出源照射，出束/出源状态下开门停止出束或放射源回到治疗设备的安全位置。含放射源的治疗设应设有断电自动回源措施；b）放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置室内紧急开门装置，防护门应设置防夹伤功能；c）应在放射治疗设备的控制室/台、治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁、质子/重离子加速器大厅和束流输运通道内设置急停按钮；急停按钮应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发；d）质子/质子治疗装置安全联锁系统还应包括清场巡检系统、门钥匙开关（身份识别系统）。质子/重离子治疗室、加速器大厅和束流输运通道应建立分区清场巡检和束流控制的逻辑关系，清场巡检系统应考虑清场巡检的最长响应时间和分区调试情况的联锁设置。日常清场巡检时，如超出设定的清场巡检响应时间，需重新进行清场巡检；e）质子/质子治疗装置应考虑建立调试、检修、运行维护人员的人身安全联锁系统，将调试、检修、运行维护人员的有效剂量与进入控制区的权限实施联锁管控；f）安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位并通过控制台才能重新启动放射治疗活动；安装调试及维修情况下，任何联锁旁路应通过单位辐射安全管理机构的批准与见证，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。	统、治疗室、治疗控制室及中控室均设有急停按钮。上述控制区内各方向的墙壁、迷道入口门旁均设有急停按钮。质子治疗装置安全联锁系统还包括了清场巡检系统、人员出入管理系统。日常清场巡检时，如超出设定的清场巡检响应时间，需重新进行清场巡检。
	8.2.2 其他固态废物管理要求	8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存，最终送交给有资质的单位收贮。	医院对质子治疗装置产生的放射性固体废物分类收集和包装，结构部件的放射性活度浓度一般高于豁免水平，需要对拆卸下来的部件等加强管理，进行辐射水平监测、登记，暂存在束流传输系统末端的放射性固废暂存间内。当废物暂存量接近容积的 2/3 时，由医院委托有资质单位进行集中测量分析并按照要求处置。医院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
		8.2.2.2 低水平的活化部件如质子/重离子加速器治疗头器件、磁铁等，以及处理质子/重离子加速器冷却水的废树	

		脂，集中放置在固态废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平的送交有资质的单位收贮。	测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息。
		8.2.2.3 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，低于清洁解控水平的可作为一般固态废物处置，并做好存档记录。	
	8.3 液态废物管理要求	事故或检修状况下质子/重离子加速器的活化冷却水按照放射性废液管理要求妥善收集贮存，暂存衰变至低于豁免水平后可作为普通废液处理，并做好存档记录。	质子治疗装置加速器部分的活化冷却水通过地漏汇集到地下二层南侧的放射性废液暂存池。暂存池上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须委托有资质单位取样分析，满足放射性废液排放标准，方可排放，并对每次取样分析结果和冷却水排放量进行记录存档。
	8.4 气态废物管理要求	8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，排气口不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。	排风口位于质子治疗装置屋面，排风口周围为不上人屋面。换气次数均大于 4 次/h。
		8.4.2 质子/重离子加速器停机后，加速器大厅应加强通风排气，采取措施使人员延时进入，以降低活化空气的感生放射性水平，减少人员有效剂量。	加速器大厅设置有延时进入。
	9.2 放射治疗工作场所监测	9.2.1 应根据使用放射治疗设备种类、能量和使用方式配备相应的辐射监测设备，对辐射工作场所的辐射水平（X-γ辐射周围剂量当量率、中子辐射周围剂量当量率等）进行监测。	本项目辐射监测总体包括工作场所监测、个人剂量监测和环境监测。工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测主要以巡测的方式进行；个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。
		9.2.2 应对放射治疗工作场所机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、观察窗、防护门，以及其他关注点处开展 X-γ辐射周围剂量当量率监测；中子源治疗装置、质子/重离子加速器治疗装置、大于 10MV 的 X 射线放射治疗设备还应对前述位置开展中子剂量当量率监测。	本项目工作场所监测方案中包括γ辐射剂量率和中子剂量率的监测，监测的布置也能够满足要求。
	9.3 环境监测	9.3.1 开展放射治疗相关活动的机构应自行或委托有能力的监测机构对工作场所运行工况下周围环境的辐射水平进行	本项目环境监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，每年至少进行一次，监测数据记录存档。

		监测，监测频次不少于 1 次/年。	
		9.3.2 质子/重离子加速器主体建筑周围应根据加速器产生的辐射场在加速器机房屏蔽体外人员可达处、主要束流损失点屏蔽体外和需关注的敏感点等位置合理布置固定式环境辐射监测仪，并将辐射监测数据接入计算机管理系统。	质子治疗装置工作场所周围已设置固定式监测仪表，周围环境的监测采用自行巡测及委托监测相结合的方式进行。
	9.4 个人剂量监测	9.4.1 放射治疗工作场所的工作人员应佩戴个人剂量仪，对个人外照射剂量进行监测。同时应根据射线类型选择合适的个人剂量计。临时工作人员、实习人员应纳入个人剂量监测范围。	本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。配备的个人剂量计和个人剂量报警仪均需具有监测 X-γ和中子的功能。
		9.4.2 个人剂量档案应妥善保存，监测数据异常时，应及时查明原因并报告生态环境主管部门。	个人剂量计用于对放射性工作人员和相关医护人员的常规个人剂量监测，医院为每名放射性工作人员配备了个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

4.2 硼中子俘获治疗系统（BNCT）

4.2.1 场所布局与分区

BNCT 辐射工作场所位于肿瘤中心地下一层及地上一层东侧位置。地下一层部分主要由 BNCT 机房（地下一层包括加速器室、2 间中子生产机房、2 间治疗室、2 间治疗室控制室、1 间加速器控制室）、2 间恢复室、QA/QC 间、设备间、模具室、模拟定位室、注射室、质谱分析室、办公室及卫生间等组成。地上一层部分主要是 BNCT 的管道间及屋面组成，管道层主要为通风管道的布置空间，其进出口门常闭常锁，仅设备厂商授权人员才可取得钥匙后进入，且在进入前需与设备厂商的运维工程师确认束流状态，仅在不出束时方可进入。

BNCT 辐射工作场所集中设置，加速器控制室、治疗控制室与加速器室、各治疗室、模拟摆位室等分开设置，实行隔室操作；工作场所布局合理。

根据 BNCT 的工作特点和结构，BNCT 的辐射工作场所分区如下所示：

（1）控制区：加速器机房、2 间治疗室、2 间中子生产机房、2 间恢复室、冷却水机房、放射性固体废物暂存间；

（2）监督区：加速器控制室、治疗控制室、管道间、QA/QC 间、模具室、设备间、办公室、库房等与控制区相邻的工作场所。

分区管理措施如下：

（1）控制区：进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平指示。实体屏蔽（包括门禁系统和联锁装置）控制进出控制区，放射性操作区应与非放射性工作区隔开，本项目恢复室、冷却水机房及放射性固体废物暂存间根据其功能划分为控制区，为方便辐射工作人员协助患者进出恢复室，恢复室不增加门禁系统或联锁装置，冷却水机房及放射性固体废物暂存间的门上设置了外挂锁进行控制，同样不增加门禁系统或联锁装置。

（2）监督区：入口处的合适位置张贴电离辐射警告标志，并定期检查工作

状况，确认是否需要防护措施和安全条件，或是否需要更改监督区的边界。

BNCT 辐射工作场所平面布局及分区见图 4-23~图 4-24。



图 4-23 本项目地下一层 BNCT 工作场所辐射工作场所分区图



图 4-24 本项目 BNCT 工作场所夹层辐射工作场所分区图

4.2.2 工作场所人流物流路径

由于患者治疗后体内会产生感生放射性，可能会对工作人员或治疗前患者产生外照射；另外，换下的废靶属于放射性固废，转运至放射性固体废物暂存间的过程中可能会对周围人员产生外照射，因此医院将本项目工作场所人流和物流的路线规划如图 4-25~图 4-31 所示。具体描述如下：



[redacted]

医护路线：医护人员由地下一层东南侧办公室区域进入治疗控制室 1、治疗控制室 2、模拟摆位室、各治疗室等，除放疗技师外其他工作人员与治疗后患者基本无交叉，通过与治疗后患者错开时间经过注射室前走廊来尽量避免不必要的照射。医护路线见图 4-29。

运维工程师路线：加速器正常运行状态下，运维工程师不允许进入加速器机房；当加速器换靶、维修/维护等情况下，运维工程师需经过 BCNT 南侧办公室、辐射办公室或东侧加速器控制室由加速器机房的活塞门进入中子生产机房；完成上述操作后原路返回。运维工程师路线见图 4-30。

放射性固废转移路线：放射性固废由工程师从中子生产机房经控制区走廊转移至放射性固体废物暂存间。固废转移路线见图 4-31。

本项目工作场所规划路线工作人员与患者的路线基本无交叉，接受照射治疗后的患者通过进入恢复室过程中可能与治疗前患者交叉，通过合理安排患者通过走廊的时间，错开刚接受完治疗从治疗室出来的患者和治疗前患者的路线，可降低额外、非必要的照射。



图 4-25 本项目 BNCT 1 号治疗室患者治疗流线图 1



图 4-26 本项目 BNCT 1 号治疗室患者治疗流线图 2



图 4-27 本项目 BNCT 2 号治疗室患者治疗流线图 1



图 4-28 本项目 BNCT 2 号治疗室患者治疗流线图 2



图 4-29 本项目 BNCT 医护人员流线图



图 4-30 本项目 BNCT 运维工程师流线图



图 4-31 本项目 BNCT 放射性固废流线图

4.2.3 辐射屏蔽

4.2.3.1 设计标准

辐射工作场所辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

（1）年剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）及《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）的相关要求，以 5mSv/a 作为辐射工作人员的年剂量约束值，以 0.1mSv/a 作为公众的年剂量约束值。

（2）屏蔽体外剂量率控制水平

机房屏蔽体外各关注点处的剂量率应不高于 1.4.2 小节中给出的剂量率控制水平。

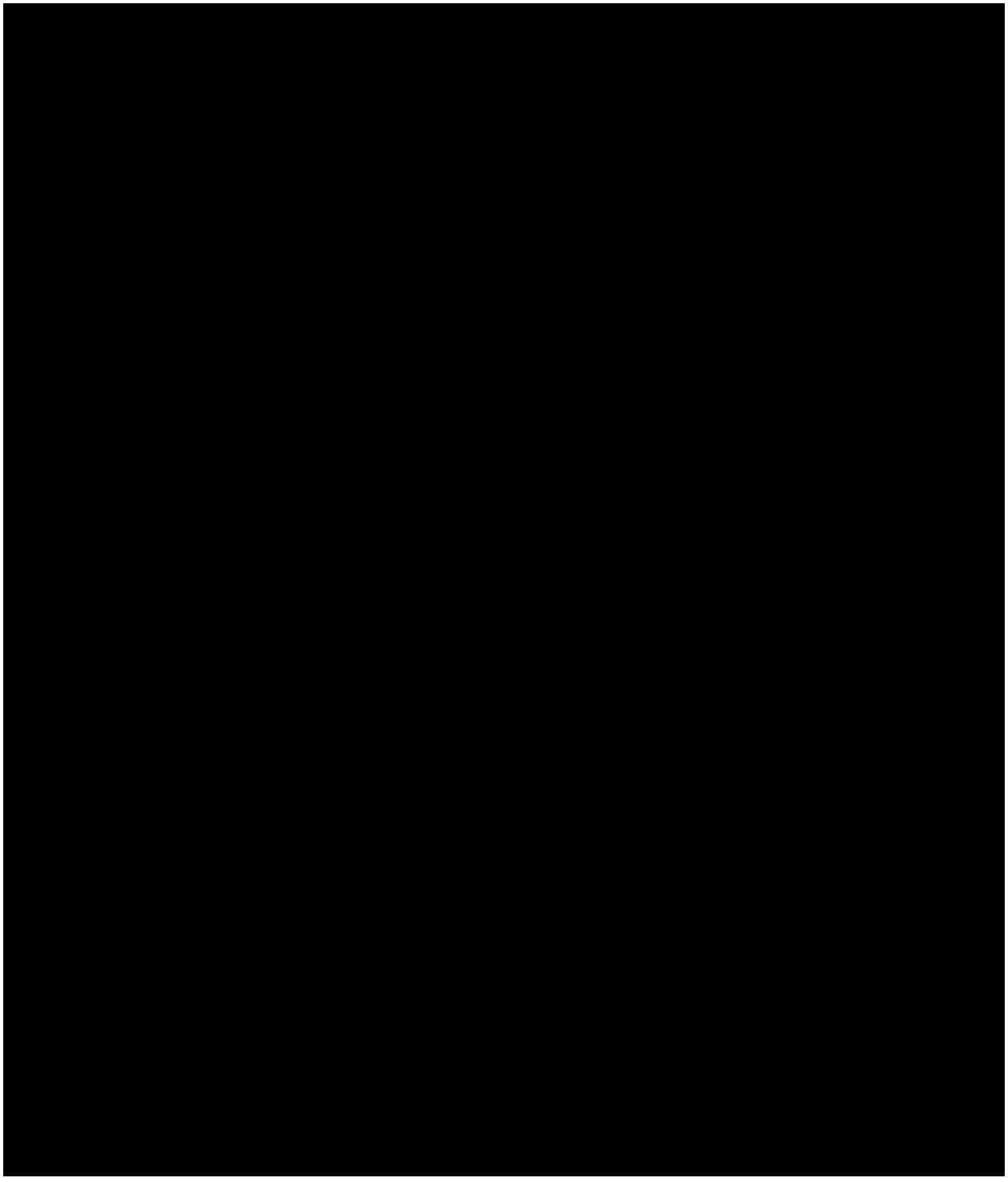
4.2.3.2 屏蔽方案

根据医院提供的资料，加速器机房、中子生产机房和各治疗室的四周屏蔽墙体采用密度不低于 2.35g/cm^3 的普通混凝土作为屏蔽材料，治疗室的四周屏蔽墙[redacted]其作用为吸收热中子，从而降低病人受到的额外辐射剂量。BNCT 各区域屏蔽设计方案如下表所示。

加速器机房的防护门为活塞式电动门，与同侧墙体密度相同，以尽量降低射线在防护门及门缝处泄漏，防护门与两侧、顶部墙体为 3 层阶梯式互相契合，间隙小于 10mm。防护门底部轨道铺设在地平面上，门与地面间隙小于 10mm。中子生产机房和治疗室的防护门与两侧、顶部墙体搭接不小于 10cm，平开防护门紧贴地面，推拉防护门与地面搭接不小于 5cm。

表 4-7 BNCT 各区域屏蔽设计方案

[redacted]



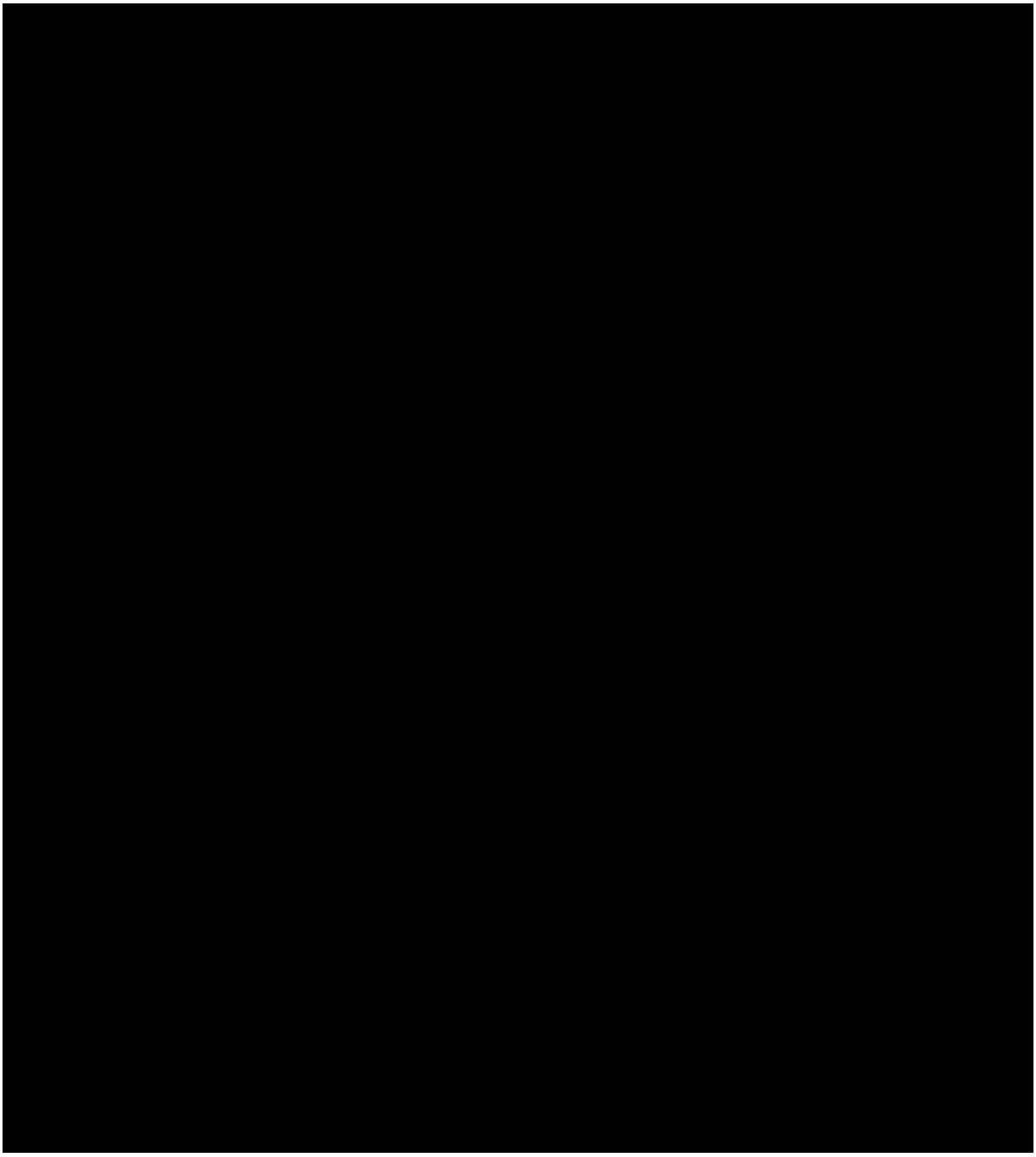


图 4-32 BNCT 工作场所屏蔽设计平面图



图 4-33 BNCT 工作场所屏蔽设计剖面图 1



图 4-34 BNCT 工作场所屏蔽设计剖面图 2



图 4-35 活塞式电动门侧视图

4.2.4 人身安全联锁系统

4.2.4.1 设计准则

本项目硼中子俘获治疗装置辐射安全联锁系统主要设计原则如下：

（1）简单可靠：系统设计要力求在简洁的基础上保证运行可靠性及稳定性。

（2）最优切断：辐射安全联锁系统在加速器控制系统的联锁逻辑中具有最优先的权力切断束流。

（3）失效保护：当辐射安全联锁系统关键设备失效时,系统有相应的应急保护措施来保障工作人员的人身安全。

（4）冗余：系统关键设备要采取冗余设计,以保障系统的可靠性、减少系统故障时间并预留有进一步改进的余地。

（5）纵深防护：在设计系统时要充分考虑并合理安排辐射安全设施设备的联锁逻辑,实现对工作人员人身安全的交叉纵深防护。

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

（7）以人为本：辐射安全联锁系统是在保障工作人员人身安全的基础上兼顾设备的运行安全，此外系统要具备人性化的特点——联锁逻辑简洁合理、操作简单、维护方便、人机交互性好。

4.2.4.2 系统组成

本项目 BNCT 安全联锁系统主要包括门机联锁、紧急停机按钮、清场按钮、紧急开门按钮、声光报警装置及监控摄像头等设备及措施，各设备点位分布示意图见图 4-36，各设备及措施具体描述如下。

4.2.4.2.1 钥匙控制

每间治疗室控制室内均设有一个控制面板，控制面板上设有控制钥匙开关，和急停按钮，仅有当控制钥匙旋转至“就绪”时，且此时其他安全联锁都已建

立，才可给出允许出束信号。控制钥匙未归位或未旋转至“就绪”状态时，治疗室无法出束。

4.2.4.2.2 门机联锁

门机联锁的作用是防止有人在加速器运行过程中进入控制区内，或者防护门未闭合的情况下开始治疗。[redacted]防护门均设置有门机联锁装置，如果防护门或通道门没有完全关闭，加速器将无法启动；如果在加速器运行过程中上述任意一道防护门或通道门被意外打开，加速器将自动停止出束，需在联锁被破坏区域重新清场巡检后建立联锁方可重新出束。本项目防护门均设计防挤压装置。

[redacted]

4.2.4.2.3 紧急停机按钮

本项目加速器机房、2 间中子生产机房和 2 间治疗室的四周墙壁、加速器控制室及各治疗控制室等处均设计了紧急停机按钮（简称“急停按钮”），并有明显标志及中文说明，一旦有人被误关或滞留在控制区，可以就近按动该按钮，防止被误照。

其中紧急停机按钮依安装位置有两种不同功能：

（1）加速器机房内

紧急停止按钮按下后，除加速器真空系统外，以硬线直接连接加速器控制系统将离子源（Ion source）电源切断，终止 H-产生，同时关闭高压电源以停止加速 H-。

（2）治疗室内

在治疗室处于出束状态时，一旦按下紧急停机按钮将启动加速器的安全联锁中断质子从加速器输出，接着加速器控制系统也会将射束传输线上的法拉第杯关闭，直到安全联锁重新建立，以避免人为误操作让质子进入中子生成器。

在按下紧急停止按钮后，必须经详细检查排除异常情况后，并对急停按钮进行手动复位后才能重新启动加速器系统。

4.2.4.2.4 紧急开门按钮

在加速器机房的活塞门内外，2 间中子生产机房、2 间治疗室的防护门内外均安装紧急开门按钮，门内紧急开门按钮在发生紧急状况时用于人员逃离控制区，门外紧急开门按钮用于门禁系统失效时从门外开门。出束过程中防护门打开，硼中子俘获治疗系统将会自动切断质子束流，停止出束。

4.2.4.2.5 清场按钮

辐射工作人员必须完成 BNCT 机房清场巡检工作后才能开启治疗。清场按钮包含巡检确认按钮和巡检完成按钮，其中巡检确认按钮安装在 BNCT 加速器机房内、2 间中子生产机房、2 间治疗室及其迷道内，安装高度均距离地面约 1.5m，巡检完成按钮安装在加速器机房及各治疗室外。两种按钮日常保持亮灯状态，按下后灯光熄灭。

巡检清场流程为：使用刷卡门禁激活加速器机房活塞门及治疗室内外侧防护门的控制开关，进入加速器机房或治疗室，确定无人滞留的前提条件下按顺序按下巡检确认按钮，最终按下各区域门外的巡检完成按钮，其中加速器机房活塞门及治疗室内外侧防护门外均设置有关闭按钮，巡检完成按钮按下后按下关门按钮关闭门。治疗室需在内侧防护门关闭的前提下离开，最终关闭外侧防护门，巡检清场完成。

此外，各区域首个巡检确认按钮按下后将启动定时器，需在 10min 内按下该区域所有巡检确认按钮及相应巡检完成按钮方可建立联锁，否则视为清场巡检失败，全部清场按钮重置。加速器机房、中子生产机房或治疗室等控制区巡检清场完成后，任一区域的防护门开启，视为该区域清场巡检失效，该区域全部清场按钮重置。加速器机房、中子生产机房或治疗室等控制区巡检清场完成后，任一区域的防护门未开启，视为该区域巡检清场有效，硼中子俘获治疗系统再次启动前无需再对该区域巡检清场。清场路线如下图所示。



图 4-36 BNCT 辐射工作场所安全联锁设施点位及清场巡检路线图

4.2.4.2.6 声光报警装置

加速器机房入口设置加速器运行显示灯以及治疗室入口设置的照射显示灯，均具有三种颜色：绿、黄和红灯。

绿灯(Beam off)：表示加速器无运转，或治疗室无照射状态，工作人员可进入；

黄灯（Ready）：表示治疗室或加速器机房安全联锁已建立进入就绪状态，只待下达出束指令

红灯（Beam on）：表示出束中。

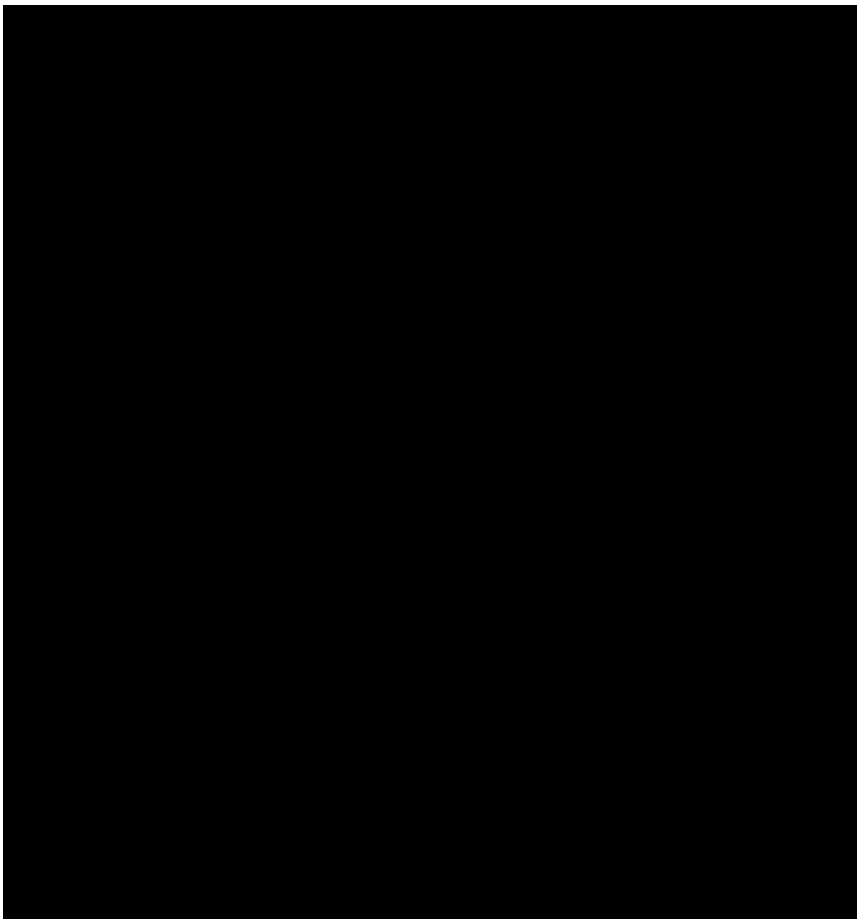


图 4-37 加速器运行显示灯及照射显示灯实物图

此外，加速器机房内设有闪烁警告黄灯，在进行辐射区域清场时闪烁，使进出辐射控制区作业的辐射工作人员都能够获得足够的警示；并设置了清晰的警示声音，清场巡检开始时以及加速器机房活塞门在关闭时，加速器机房与中子生产机房会响起 30 秒的警告声响，以警示机房内的人员快速退场。

4.2.4.2.7 工作状态指示灯

拟在 BNCT 控制区设置工作状态指示灯，[redacted]、各治疗室的外侧防护门外及治疗控制室。工作状态指示灯与硼中子俘获治疗系统出束状态联锁。



图 4-38 工作状态指示灯实物图

4.2.4.2.8 监视系统及对讲系统

加速器机房、中子生产机房、各治疗室及放射性固体废物暂存间均设置闭路监视系统，以监控该区域全区状况，并显示分割画面于加速器控制室、治疗控制室及 BNCT 南侧辐射办公室，以便运行人员随时监控各区状况，避免辐射工作人员发生意外未知晓或外人擅入该区。同时为便于各区域间通讯沟通，设置内部区域对讲机通讯系统。监控摄像头及对讲系统设置点位如图 4-39 所示。



图 4-39 监视系统及对讲系统设置点位图

4.2.4.2.9 场所辐射剂量监测系统

BNCT 的场所辐射监测系统主要负责工作场所的监测，由固定安装探测器、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 4-17 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（γ/中子）。

每个监测点由一台中子探测器和γ探测器组成（冷却水机房及放射性固体废物暂存间的探测器仅监测γ），均会连线至加速器机房外、加速器控制室、治疗室外及治疗控制室内实时显示，同时当超过阈值时，在上述位置进行声光报警。监测点位如表 4-8 和图 4-41 所示。

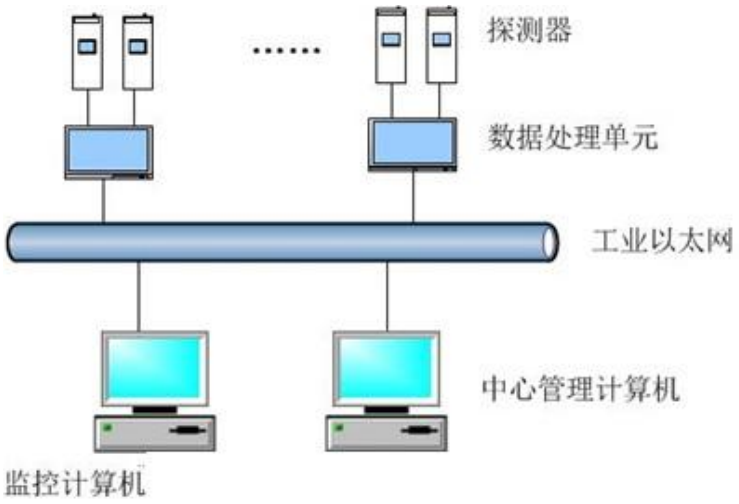


图 4- 40 BNCT 辐射监测系统结构。

表 4-8 BNCT 辐射工作场所监测点位及报警阈值情况

[redacted]





图 4-41 BNCT 辐射工作场所监测点位图

表 4-9 本项目 BNCT 工作场所辐射安全防护设施数量一览表，个

区域		门机联锁	清场按钮	紧急停机按钮	紧急开门按钮	声光报警装置（三色灯）	工作状态指示灯	固定式剂量率监测点位
负一层	加速器机房	1	3	3	2	1	1	2
	加速器控制室	/	/	1	/	0	0	/
	中子生产机房（治疗室 1 侧）	1	1	2	/	/	/	1
	中子生产机房	1	1	2	/	/	/	1

区域		门机联锁	清场按钮	紧急停机按钮	紧急开门按钮	声光报警装置（三色灯）	工作状态指示灯	固定式剂量率监测点位
	（治疗室 2 侧）							
	治疗室 1	2	2	4	4	1	1	1
	治疗室 2	2	2	4	4	1	1	1
	治疗控制室 1	/	/	1	/	/	1	/
	治疗控制室 2	/	/	1	/	/	1	/
	恢复室（治疗室 1 侧）	/	/	/	/	/	/	1
	恢复室（治疗室 2 侧）	/	/	/	/	/	/	1
	冷却水机房	/	/	/	/	/	/	1
	放射性废物暂存间	/	/	/	/	/	/	1

4.2.4.3 联锁逻辑

本项目 BNCT 工作场所安全联锁逻辑关系见图 4-42 及图 4-43。



图 4-42 BNCT 加速器室控制区安全联锁逻辑关系图

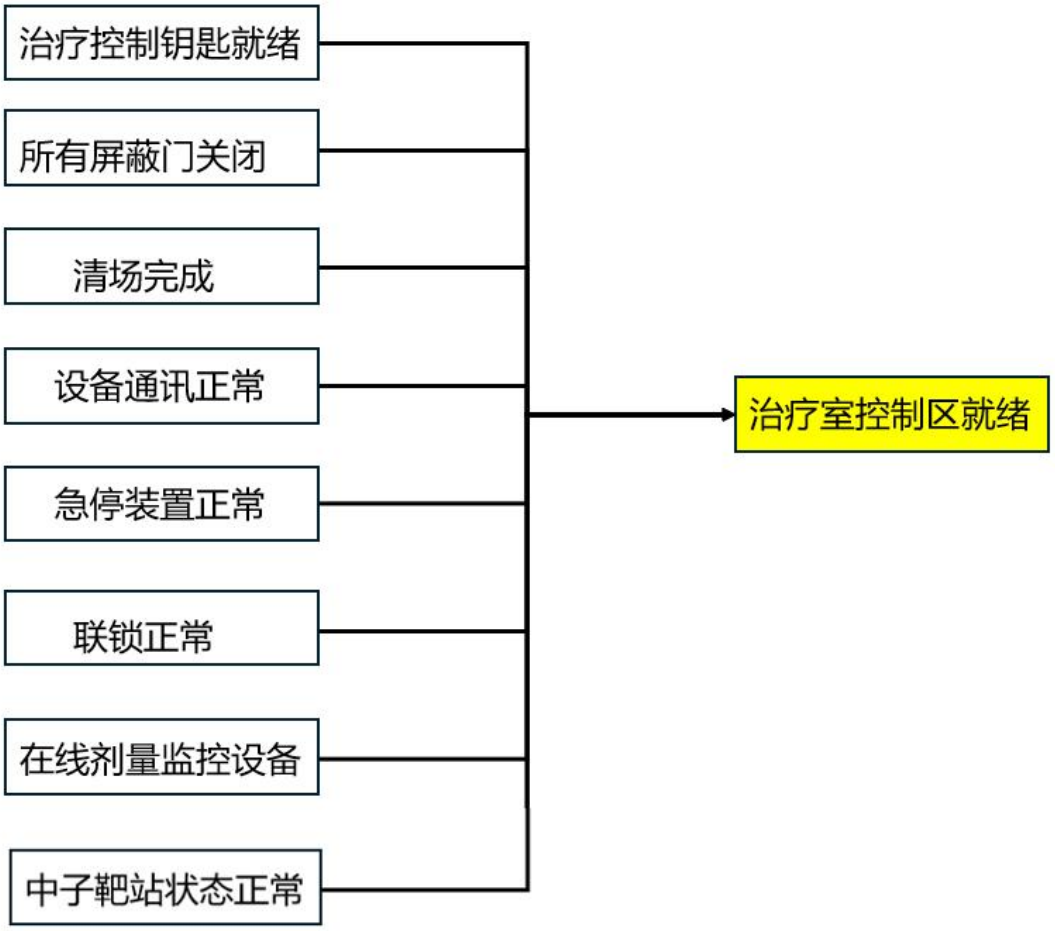


图 4-43 BNCT 治疗室控制区安全联锁逻辑关系图

4.2.5 通风系统

本项目在加速器机房、中子生产机房、各治疗室均设计机械通风换气装置，通风参数具体见表 4-10，通风管道走向见图 4-44、图 4-45。

[redacted]

根据表 4-10，各房间理论通风次数均能满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中关于“放射治疗机房通风换气次数应不小于 4 次/h”的要

求，可保持各机房内良好通风。

表 4-10 BNCT 通风参数表





图 4-44 BNCT 管道层通风管道走向示意图

[redacted]

图 4-45 BNCT 地下一层通风管道走向示意图

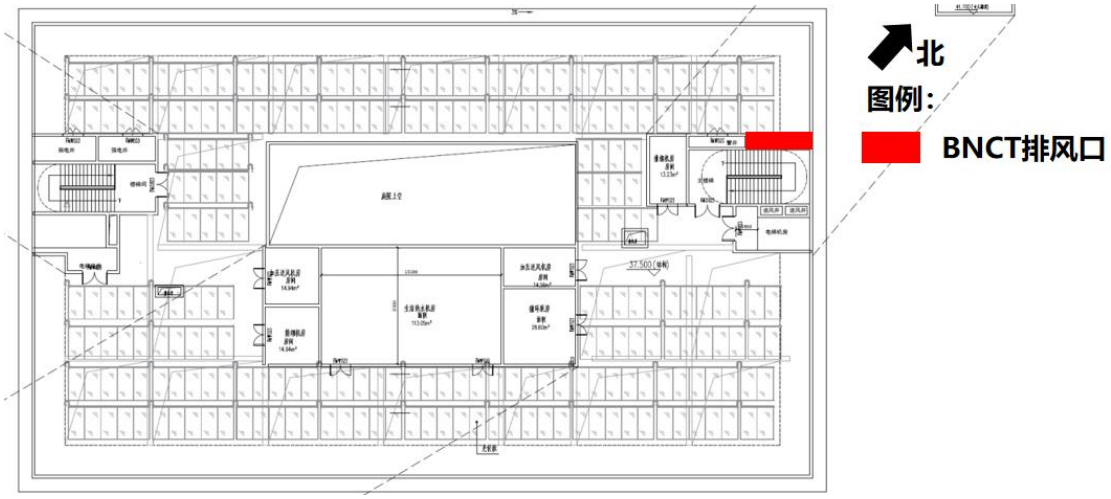


图 4-46 BNCT 总排风口在屋顶的位置示意图

4.2.6 放射性三废处理

4.2.6.1 放射性废气来源及处理措施

（1）来源

根据第三章的分析，BNCT 运行期间将产生感生放射性气体，主要核素产生量见表 3-46。由结果可知，空气感生放射性主要考虑 ^{41}Ar（$T_{1/2}[^{41}Ar]$=1.8h）。

（2）处理措施

本项目 BNCT 治疗机房设置有机械排风系统，均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中换气次数不少于 4 次/h 的要求。装置运行过程中产生的感生放射性气体最终由屋面排入环境。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，其对环境的影响很小。

4.2.6.2 放射性废液来源及处理措施

（1）来源

根据第三章 BNCT 冷却水感生放射性模拟结果， BNCT 的冷却水可不考虑活化。放射性废液主要来源于接受治疗后的患者排泄物、呕吐物及其冲洗水，主要放射性核素包括 ^{24}Na 和 ^{38}Cl 。

（2）处理措施

对于恢复室内患者的排泄物、呕吐物及冲洗水等废液，通过排水系统排入负二层的放射性废物暂存间的衰变池内，位置见图 4-47。

本项目放射性废液衰变系统由 2 个沉淀池和 3 个衰变池组成，衰变池均为混凝土结构，厚度为 300mm 混凝土，衰变池、沉淀池盖均为铅钢复合结构，厚度为 4mmPb。2 个沉淀池净容积均为 3m^3，三个衰变池净容积均为 4.6m^3，各连接管道均采用不锈钢材质并用 4mm 铅皮包裹。

BNCT 恢复室废液处理流程：衰变箱系统设置有控制柜、液位传感器、流量传感器、压力传感器、污水泵和多功能降解槽等，放射性废液先进入衰变池 1，通过控制柜控制，当液面到达设定高度，自动关闭衰变池 1 的电动闸阀（自

动计算设定好的衰变时间），打开衰变池 2 的电动闸阀，当液面到达设定高度，自动关闭衰变池 2 电动闸阀，打开衰变池 3 的电动闸阀，当液面到达设定高度，自动关闭衰变池 3 电动闸阀，在此过程中，衰变池 1 的废液已排空，废液排入衰变池 1 内，废液暂存至满足《放射治疗的辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）有关要求后，排至院内污水处理系统。

恢复室患者产生废液的暂存时间：BNCT 装置每天最多治疗 8 名患者，每名患者在恢复室每天产生 2L 排泄物及冲洗水等废液，每天共产生 16L 废液，BNCT 每周工作七天，每周产生的废液量为 0.016m^3×7d=0.112m^3/周。单个衰变池有效容积为 4.6m^3，注满单个衰变池时间约为 4.6/0.112≈41 周，衰变池为三池并联，则废液衰变时间为 41×7×2=574 天。患者受照后主要的放射性核素为 $^{24}Na(T_{1/2}=15h)$、$^{38}Cl(T_{1/2}=37.23min)$，患者在恢复室/抢救室产生的废液经过衰变箱衰变 574 天后，最长半衰期核素 $^{24}Na(T_{1/2}=15h)$已衰减殆尽。

放射性废液排水系统各衰变池均设有取样口，废液暂存至满足《放射治疗的辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）及《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）有关要求后，经过不锈钢管道，排至医院污水处理系统。

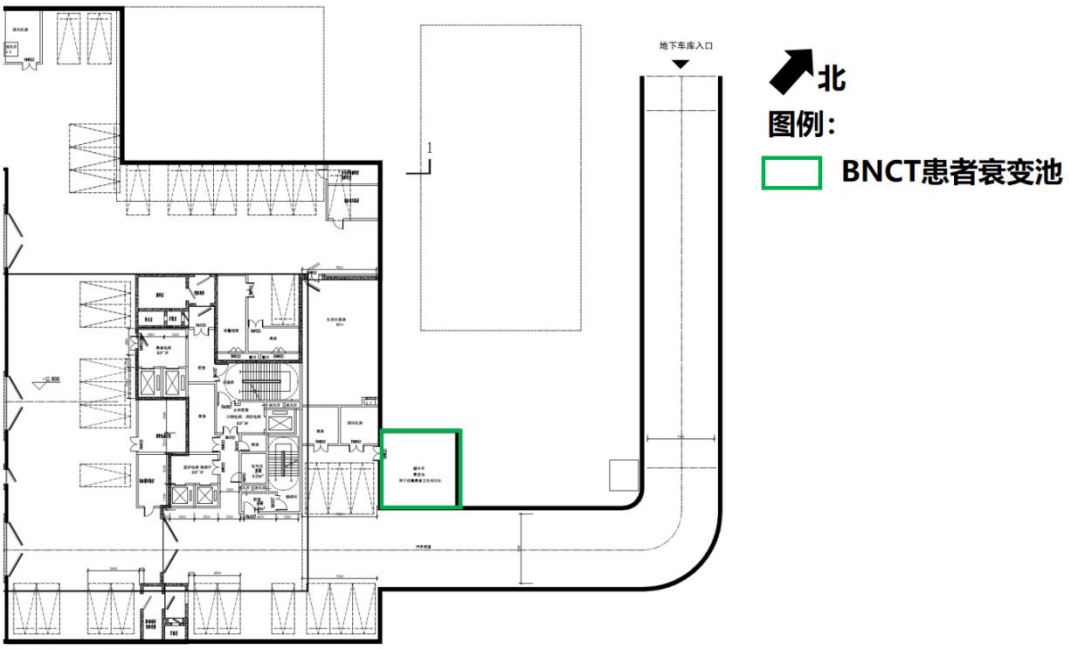


图 4-47 BNCT 患者衰变池所在位置平面布局图

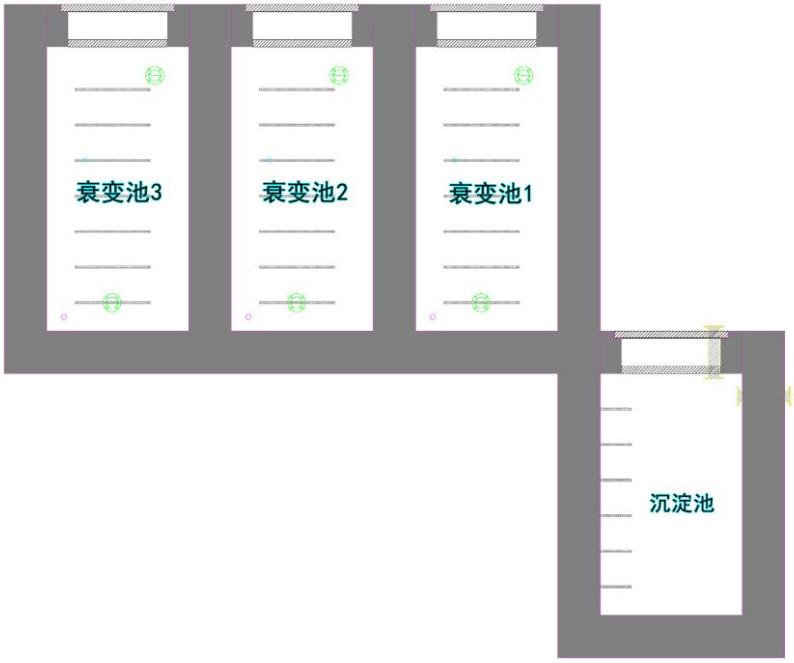


图 4-48 BNCT 患者衰变池剖面布局示意图

4.2.6.3 放射性固体废物来源及处理措施

（1）来源

BNCT 系统运行期间可能产生的放射性固废为废离子交换树脂以及厂家更

[redacted]

（2）处理措施

[redacted]

位收贮。

医院将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；还将在本项目运行后尽快与具有相应放射性固体废物处置资质的单位签订处置协议。

4.3 医用电子直线加速器

4.3.1 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。本项目医用电子直线加速器辐射工作场所分区图见图 4-49。

控制区：医用电子直线加速器机房；

监督区：控制室、水冷机房、硼中子二级配电室、污泵间、相邻走廊等医用电子直线加速器机房四周相邻场所。

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，入口门和装置出束状态联锁，装置运行期间禁止进入。停机后进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，边界处设置电离辐射警告标志，防止无关人员进入受到不必要的照射。进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

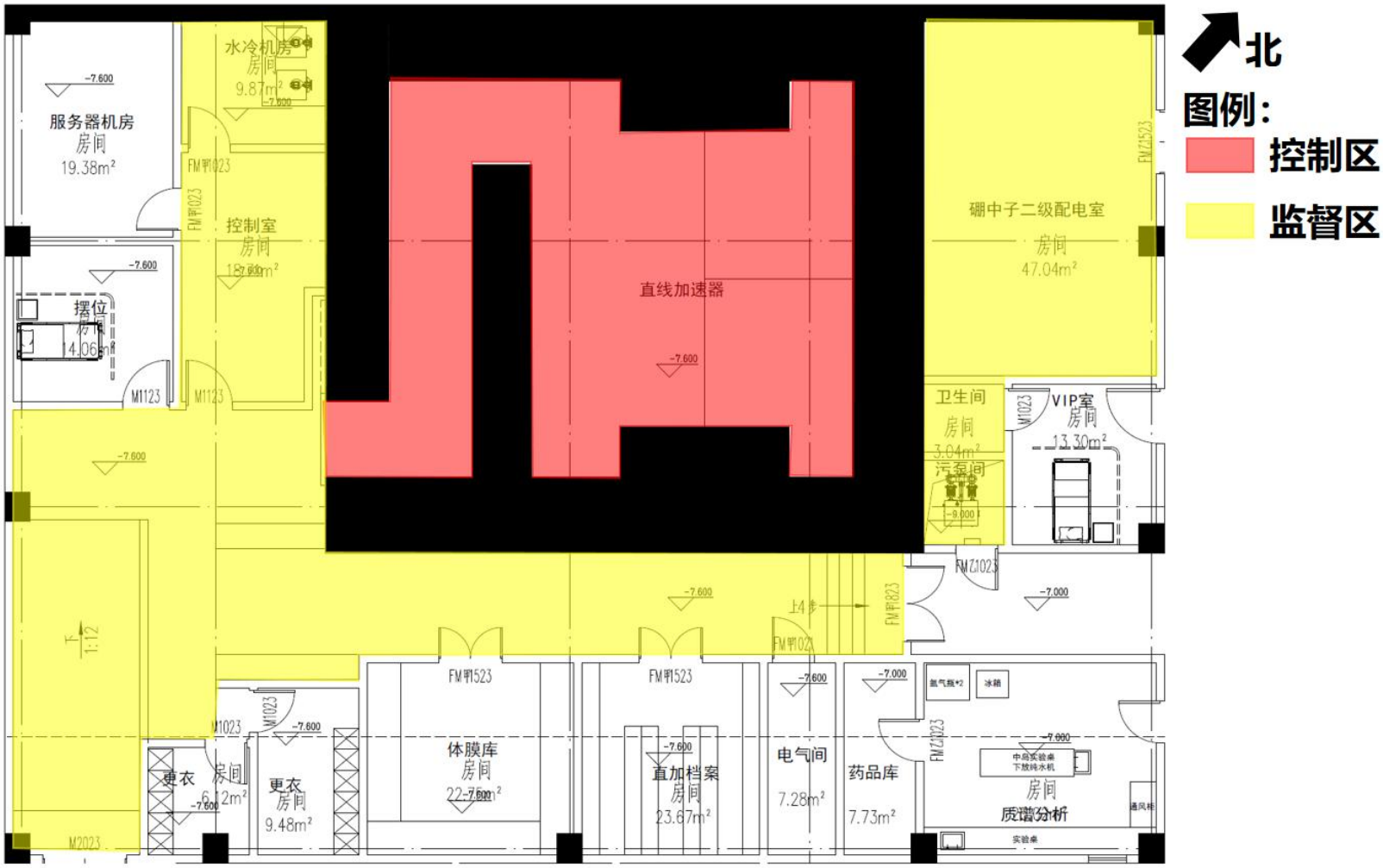


图 4-49 医用电子直线加速器机房辐射工作场所分区图

4.3.2 机房布局与辐射屏蔽

4.3.2.1 布局合理性分析

本项目医用电子直线加速器机房设置于肿瘤中心地下一层，机房顶板之上为门诊大厅入口前空地，底板之下为地下二层，无房间。周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域或人员流动性大的商业活动区域。机房内设置有迷道，控制室与机房分开。该区域整体设置了物理隔离及相对独立的人员通道，防止无关人员进入，有利于辐射安全防护。该区域功能布局紧凑、动线合理、辐射屏蔽防护满足相关要求，总体布局是合理的。

4.3.2.2 机房辐射屏蔽设计

本项目医用电子直线加速器机房的辐射屏蔽设计方案见表 4-11 和图 4-50。辐射屏蔽材料为普通混凝土（密度不低于 2.35g/cm^3）和铅（密度不低于 11.3 g/cm^3）。

表 4-11 直线加速器治疗室的屏蔽设计及周围环境

机房名称	位置	屏蔽设计	周围环境
直线加速器治疗室 1	南侧	主屏蔽墙：3m 厚、4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.8m 混凝土	走廊
	北侧	主屏蔽墙：3m 厚、4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.8m 混凝土	土层
	西侧	迷道内墙：1.4m 混凝土 迷道外墙：1.5m 混凝土	水冷机房、控制室等
	东侧	侧屏蔽墙：1.7m 混凝土	硼中子二级配电室、污泵间等
	顶板	主屏蔽墙：3m 厚、4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.8m 混凝土	门诊大厅入口前空地
	底板	0.4m 混凝土	土层
	防护门	20mmPb	走廊

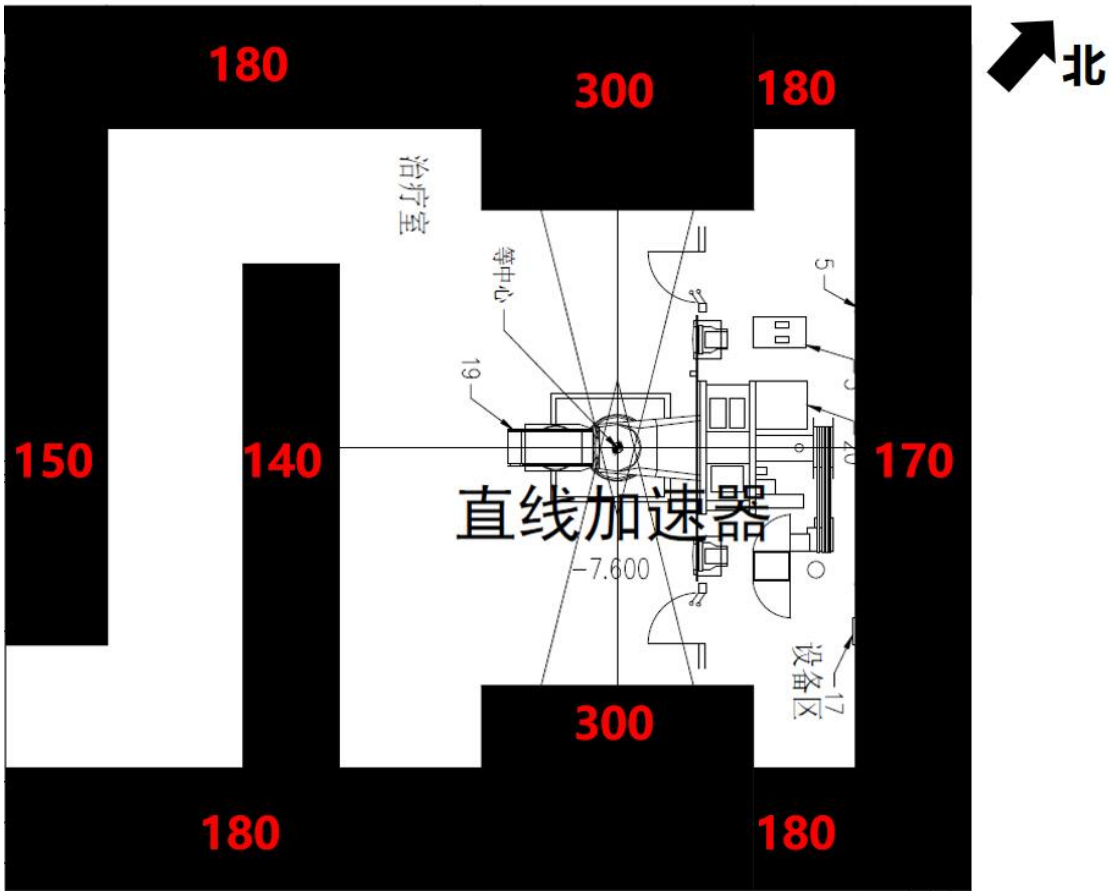


图 4-50 医用电子直线加速器机房辐射屏蔽设计平面图

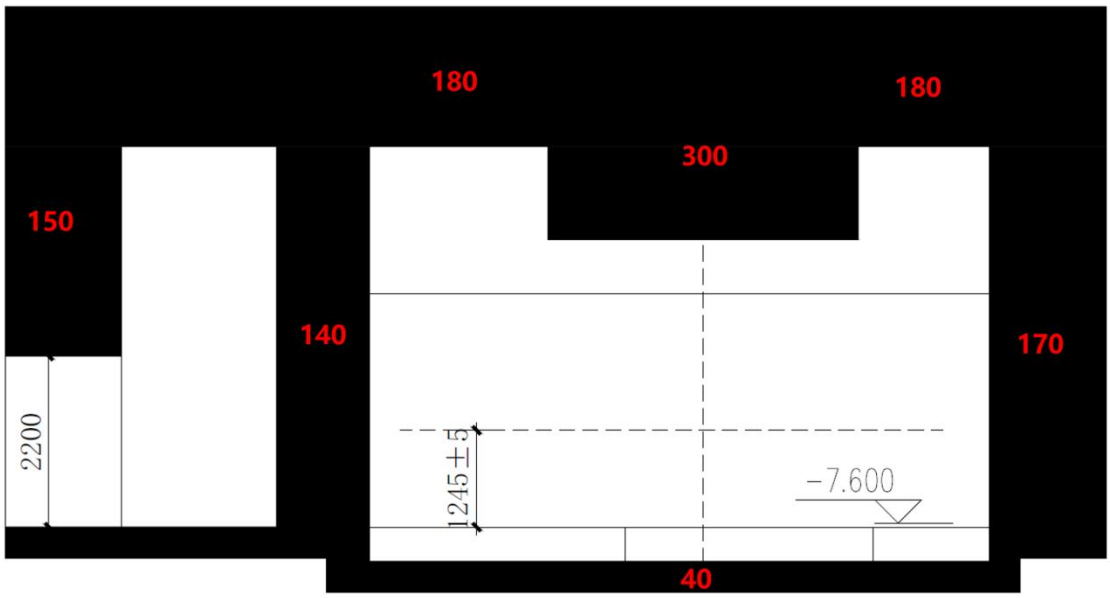


图 4-51 医用电子直线加速器机房辐射屏蔽设计剖面图

4.3.3 拟采取的安全防护措施

医用电子直线加速器机房拟采取的辐射安全防护措施如下：

4.3.3.1 设备安全功能

控制台显示辐射类型、标称能量、照射时间、吸收剂量、吸收剂量率、治疗方式、楔形过滤器类型及规格等照射参数预选值。照射启动与控制台显示的照射参数预选值联锁，控制台选择各类照射参数之前，不得启动照射。控制台配置带有时间显示的照射控制计时器，并独立于其他任何控制照射终止系统。当照射中断或终止后，应保留计时器计数，应将计时器复零后，才能启动下一次照射。使用计算机控制系统的加速器软件和硬件控制程序应加密，未经允许不得存取或修改；用于监视联锁或作为测量线路、控制线路一部分的计算机一旦发生故障，即停止照射。

4.3.3.2 钥匙控制

控制台设专用钥匙控制。只有通过专用钥匙才能使加速器出束。钥匙由专人保管，工作人员离开控制室进入机房时，拔下专用钥匙随身携带，以防止他人误操作。

4.3.3.3 联锁系统

机房设置多重联锁装置，以保证人员和设备安全，防止意外事故。

（1）门机联锁

采用电动手动一体化防护门，与设备启动电路实行门机联锁方式，即防护门未关闭前，加速器无法启动。

（2）系统联锁

当出现控制台计算机故障、加速管真空故障等情况时，设备会自动出现系统联锁，无法出束。

4.3.3.4 紧急开门按钮

在防护门内侧墙上安装 1 个紧急开门按钮，并有明显标志。当遇到意外情况，可随时按动紧急开门按钮，打开防护门，切断设备高压，停止出束。

4.3.3.5 急停按钮

急停按钮安装在每间加速器机房的控制室内的控制台上（1 个）、治疗床（依设备型号而定，通常不少于 1 个）、直线加速器机身（依设备型号而定，通常不少于 1 个）、机房四周墙壁上（4 个）和迷道内（1 个），并有明显标志。当遇到意外情况，可不必穿越主束随时按动急停开关，切断设备高压，停止出束。紧急停止开关必须采用手动方式才能复位。

4.3.3.6 视频监控对讲系统

机房内和迷道安装视频监控，安装点位确保能看到整个治疗机房（含迷道）的全景，以便在治疗过程中能够随时观察患者状况。此外，也可以观察治疗机房是否有人员滞留。治疗室与控制室之间设对讲设备，便于工作人员与患者之间进行交流。

4.3.3.7 警告标志及工作状态指示

机房防护门外设立电离辐射警告标志和中文警示说明，安装工作状态指示灯，不同颜色显示和加速器运行状态关联。

4.3.3.8 固定式辐射剂量监测仪

机房迷道内安装带有报警功能的固定式 γ 辐射监测仪，每间机房设 1 台，用于监测机房内的辐射水平并在控制室内显示，安装点位具体见图 4-53。

4.3.3.9 其他

1）每个机房分别配置 2 台个人剂量报警仪，工作人员进入机房时佩戴个人剂量报警仪，一旦超出设定的剂量率阈值，会发出警告。

2）电动防护门具有防夹人功能，停电时能够手动开启，使患者安全转移。

3）治疗室安装应急照明装置，设火灾自动报警装置等。

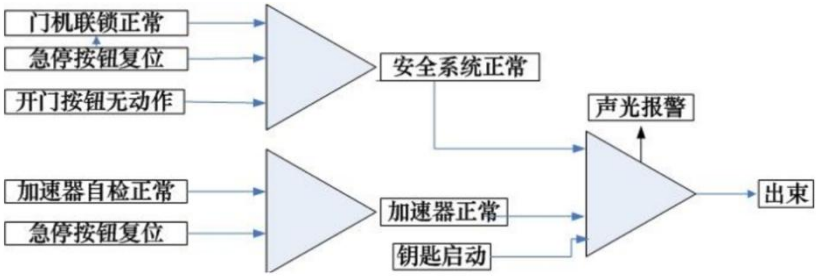


图 4-52 医用电子直线加速器安全联锁逻辑图

医用电子直线加速器机房拟采取的安全与防护设施设计方案见下表，辐射安全与防护设施点位示例图如图 4-53 所示。

表 4-12 医用电子直线加速器机房的安全与防护设施情况表

序号	项目	内容	本项目	备注
1	A 控制台及安全联锁	防止非工作人员误操作的锁定开关	√	控制台钥匙控制
2		控制台有紧急停机按钮	√	控制室控制台上 1 个
3		电视监控与对讲系统	√	1 套
4		治疗室门与束流联锁	√	门机联锁
5		治疗室内准备出束声音提示	√	声光报警
6	B 警告标志	入口电离辐射警告标志	√	设置在防护门外
7		入口有加速器工作状态显示灯	√	设置在防护门外
8	C 照射室紧急设施	紧急开门按钮	√	防护门内侧墙上 1 个
9		紧急照明或独立通道照明系统	√	1 套
10		治疗室内有紧急停机按钮	√	治疗室内墙壁 4 个，迷道 1 个
11		治疗床有紧急停机按钮	√	至少 1 个
12	D 监测设备	治疗室内有固定式剂量率仪	√	1 台固定式γ剂量率仪
13		便携式辐射监测仪器仪表	√	1 台便携式 X-γ剂量率仪
14		个人剂量报警仪	√	2 台个人剂量报警仪
15		个人剂量计	√	1 支/人
16	E 其他	治疗室门防夹人装置	√	具有防夹功能和停电手动开启动能
17		通风系统	√	设有通风系统，换气次数 6 次/h
18		火灾报警仪	√	治疗室内房顶设火灾报警器
19		灭火器材	√	——

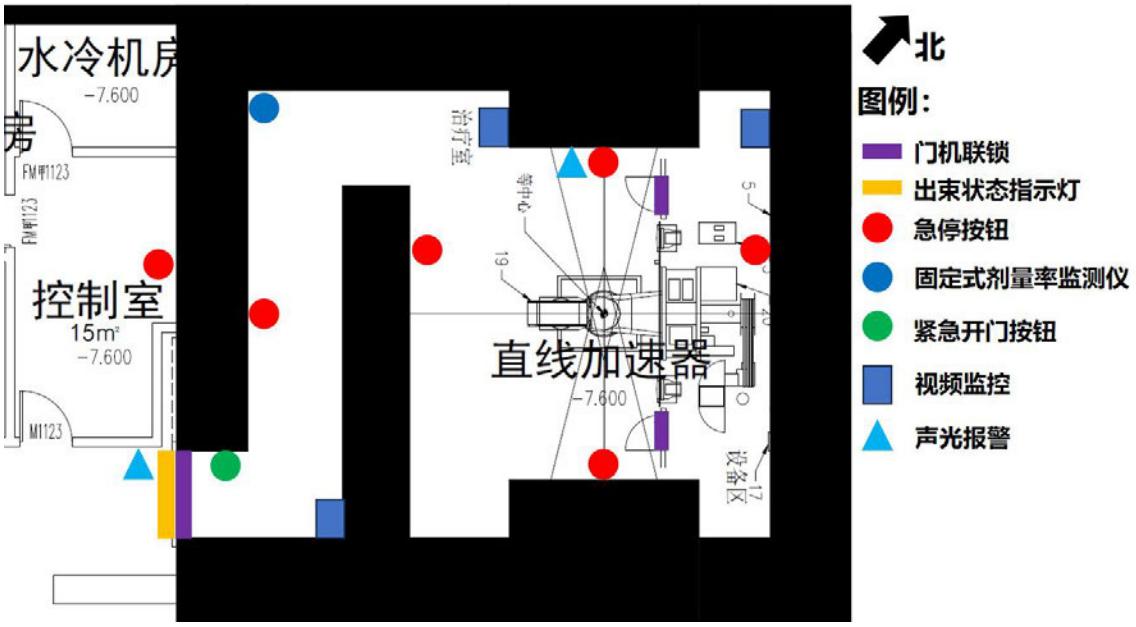


图 4-53 医用电子直线加速器机房辐射安全与防护设施点位示例图

4.3.4 通风系统

医用电子直线加速器机房的送排风均采用“上送下排、对角布置”的方式：送风口设置在机房顶部；排风口设置在机房底部，底部距离机房地面高度 30cm。通风管道穿墙方式示意图见图 4-54，进风管道与排风管道穿墙方式均采用“Z”型曲路，避免了直穿，能有效控制通风管道孔的辐射泄漏。排风管道引至地上一层 BNCT 机房屋顶（无人员常居留）上 1.2m 排放。

本项目医用电子直线加速器治疗室的通风系统设计满足 HJ1198-2021 相关要求，同时也满足 GBZ 121-2020 中“6.2.2 放射治疗机房应设置强排风系统，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换，通风换气次数应不小于 4 次/h”的要求。

表 4-13 医用电子直线加速器机房通风系统参数表

区域名称	体积，m^3	新风量，m^3/h	正常运行排风量，m^3/h	换气次数，次/h
医用电子直线加速器机房	362	2000	2200	6

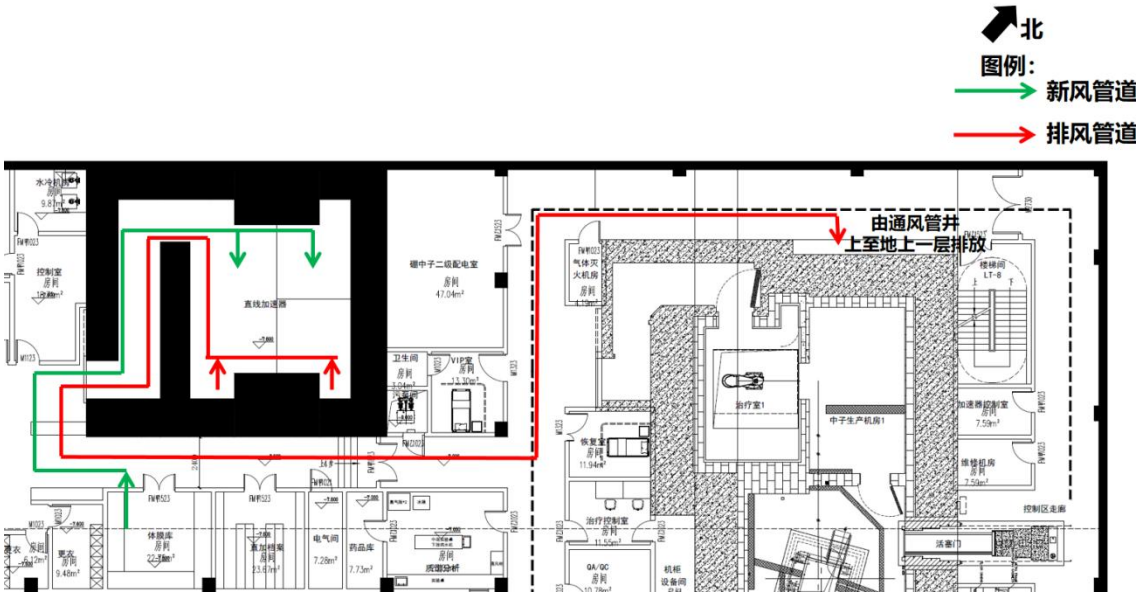


图 4-54 医用电子直线加速器机房通风管道走向示意图

4.3.5 放射性三废

本项目医用电子直线加速器 X 射线的最高能量为 10MV，不需考虑感生放射性，运行期不产生放射性三废。

4.4 III 类射线装置

4.4.1 辐射工作场所分区

质子治疗装置每间治疗室内 2 台放射治疗 X 射线图像引导系统（DR），最大管电压 150kV，最大管电流 500mA，每台 DR 含一支 X 射线管，为 III 类射线装置。

地上一层模拟定位 CT 机房使用 1 台模拟定位 CT 机，最大管电压 150kV，最大管电流 1300mA，为 III 类射线装置。

DR 控制区为各治疗室内部，监督区为机房四周屏蔽体墙体外区域。

模拟定位 CT 机房控制区为机房内部，监督区为 CT 控制室和缓冲间。

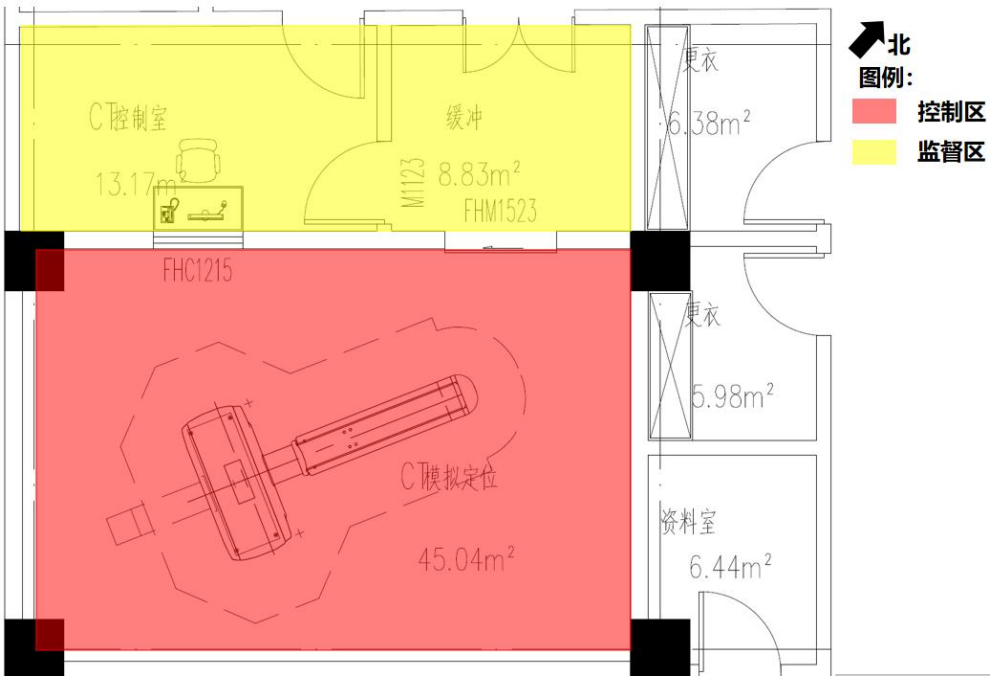


图 4-55 模拟定位 CT 机房辐射工作场所分区示意图

4.4.2 机房布局和辐射屏蔽

放射治疗 X 射线图像引导系统（DR）、滑轨 CT 机所在治疗室的屏蔽厚度及模拟定位 CT 机房屏蔽厚度需满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“CT 模拟定位机房铅当量 2.5mmPb”的要求。

最小单边长度和有效使用面积需能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求。具体对标情况列于表 4-15。

表 4-14 模拟定位 CT 机房屏蔽设计表

机房名称	机房尺寸和面积	位置	屏蔽设计	铅当量	周围环境
模拟定位 CT 机房	5.52m×8.16m（长×宽），面积 45.04m²	西墙	240mm 实心砖墙+25mm 硫酸钡砂	4mmPb	档案室
		东墙	240mm 实心砖墙+25mm 硫酸钡砂	4mmPb	更衣室、资料室
		北墙	240mm 实心砖墙+25mm 硫酸钡砂	4mmPb	CT 控制室、缓冲间
		南墙	240mm 实心砖墙+25mm 硫酸钡砂	4mmPb	走廊
		顶板	200mm 实心砖	3.5mmPb	预留机房
		底板	200mm 实心砖	3.5mmPb	压缩气体机房
		防护门	4mmPb	4mmPb	CT 控制室
		观察窗	4mm 铅玻璃	4mmPb	CT 控制室

表 4-15 屏蔽厚度铅当量、机房最小有效使用面积和最小单边长度对标情况

装置名称	本项目设计情况			标准要求			是否满足要求
	最小单边长度，m	最小有效使用面积，m²	屏蔽厚度	最小单边长度，m	最小有效使用面积，m²	屏蔽厚度铅当量，mmPb	
DR	10.53	41.35	依托治疗室屏蔽厚度，如表 4-1 所示	4.5	30	2.5	是
模拟定位 CT 机	5.52	45.04	3.5mmPb~4mmPb	4.5	30	2.5	是

4.4.3 拟采取的其他安全与防护措施

参照《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求，上述 III 类射线装置机房拟采取的安全防护措施如下：

（1）机房设有观察窗摄像头，位置便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

（2）机房设有机械通风系统，保持良好的通风。

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

（4）平开式机房门设自动闭门装置，推拉式机房门设曝光时关闭机房门的管理措施；工作状态指示灯能与机房门有效关联。电动推拉门设防夹装置。

4.5 服务期满后的环境保护措施

可能产生放射性污染的质子治疗装置、硼中子俘获治疗系统的辐射工作场所因搬迁等原因不再使用时，建设单位应编制相应的退役方案、制定退役目标，做好辐射工作人员、场所和环境监测，确保放射性废物与放射性药物得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

5 环境影响分析

5.1建设阶段对环境的影响

施工期的污染源主要有噪声、扬尘、废水和固体废物等，其中噪声和扬尘为最主要的污染物。施工期这些环境影响都是暂时性的，其对环境的影响将随施工的结束而消失。项目对施工机械进行合理选择及布局，采取一系列有效的噪声污染防治措施，使排放的噪声符合国家规定的施工场界环境噪声排放标准。施工场地主要采取洒水、设立围挡、物料覆盖等措施防止粉尘飞扬。施工现场设置废水收集和回收处置设施，对施工废水进行回收后循环利用。施工过程中设置固体废物暂存点，同时注意减少施工固体废物的产生，工程结束后，对施工中产生的固体废物全部清除，生活垃圾及时交由环卫清运处理。在采取一系列污染防治措施后，施工期间对环境的影响较小。

5.2 质子治疗装置

5.2.1 正常运行的环境影响

5.2.1.1 系统年出束时间

根据建设单位提供的资料，本项目质子治疗装置的年使用规划列于表 5-1。

表 5-1 本项目质子治疗装置的年使用规划

序号	内容	单位	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	4	4	4
2	每室每天治疗时间	h/d/室	16	16	16
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	64	64	64
4	每室每年治疗天数	d/a/室	264	264	264
5	每室每年治疗人次	人次/a/室	16896	16896	16896
6	每人次治疗平均出束时间	min/人次	2	2	2
7	每室每天治疗出束时间	h/d/室	2.13	2.13	2.13
8	每室每年治疗出束时间	h/a/室	562.32	562.32	562.32
9	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	123	123	123
10	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	685.32	685.32	685.32
11	年总出束时间	h/a	2055.96		

5.2.1.2 屏蔽体外剂量率计算

5.2.1.2.1 计算时使用的源项

本次评价采用目前国内外通用的 FLUKA 程序计算质子治疗系统屏蔽体外剂量率水平。屏蔽计算依据的束流损失参数见表 3-16~表 3-18，屏蔽体厚度见表 4-1。

5.2.1.2.2 关注点设置

根据质子治疗装置的平面布置及周围环境情况设置了关注点，关注点周围环境及剂量率控制水平见表 5-2，各关注点位置示意图见图 5-1~图 5-4。

表 5-2 质子治疗装置屏蔽体外关注点

源项	序号	点位描述
加速器大厅	1	回旋加速器北侧墙外
	2	能量选择系统北侧墙外
	3	束流输运系统西侧墙外
	4	束流输运系统末端墙外缓冲间
治疗室 3	5	前室
	6	候梯厅
	7	治疗室 3 迷道口
	8	治疗室 3 治疗控制室
治疗室 2	9	治疗室 2 迷道口
	10	治疗室 2 治疗控制室
治疗室 1	11	治疗室 1 迷道口
	12	治疗室 1 治疗控制室
加速器大厅	13	主控室
	14	加速器大厅迷道口
	15	加速器大厅南墙外
治疗室 2	16	治疗室 2 北墙外
治疗室 1	17	治疗室 1 南墙外
治疗室 3	18	治疗室 3 北墙外
治疗室 2	19	治疗室 2 南墙外
治疗室 3	20	剂量设备间
	21	维修间
	22	备件库
	23	生活配套房间
	24	备品间
治疗室	25	体模库房

2	26	更衣室
治疗室1	27	更衣后等候区
	28	摆位间 1
	29	摆位间 2
回旋加速器	30	服务器机房
	31	会议室
	32	办公室
治疗室2	33	下沉庭院
	34	质子候诊区
治疗室1	35	水冷间
治疗室2	36	质子变配电室
治疗室3	37	变配电室
	38	地上一层南侧楼梯间
	39	气瓶间
	40	科研教学门厅
加速器大厅	41	回旋加速器上方顶板外
	42	回旋加速器下方底板外
治疗室1	43	治疗室 1 上方顶板外
	44	治疗室 1 下方底板外
治疗室2	45	治疗室 2 上方顶板外
	46	治疗室 2 下方底板外
治疗室3	47	治疗室 3 上方顶板外
	48	治疗室 3 下方底板外
加速器大厅	49	能量选择系统上方顶板外
	50	能量选择系统下方底板外
束流输运系统	51	束流输运系统上方顶板外
	52	束流输运系统下方底板外

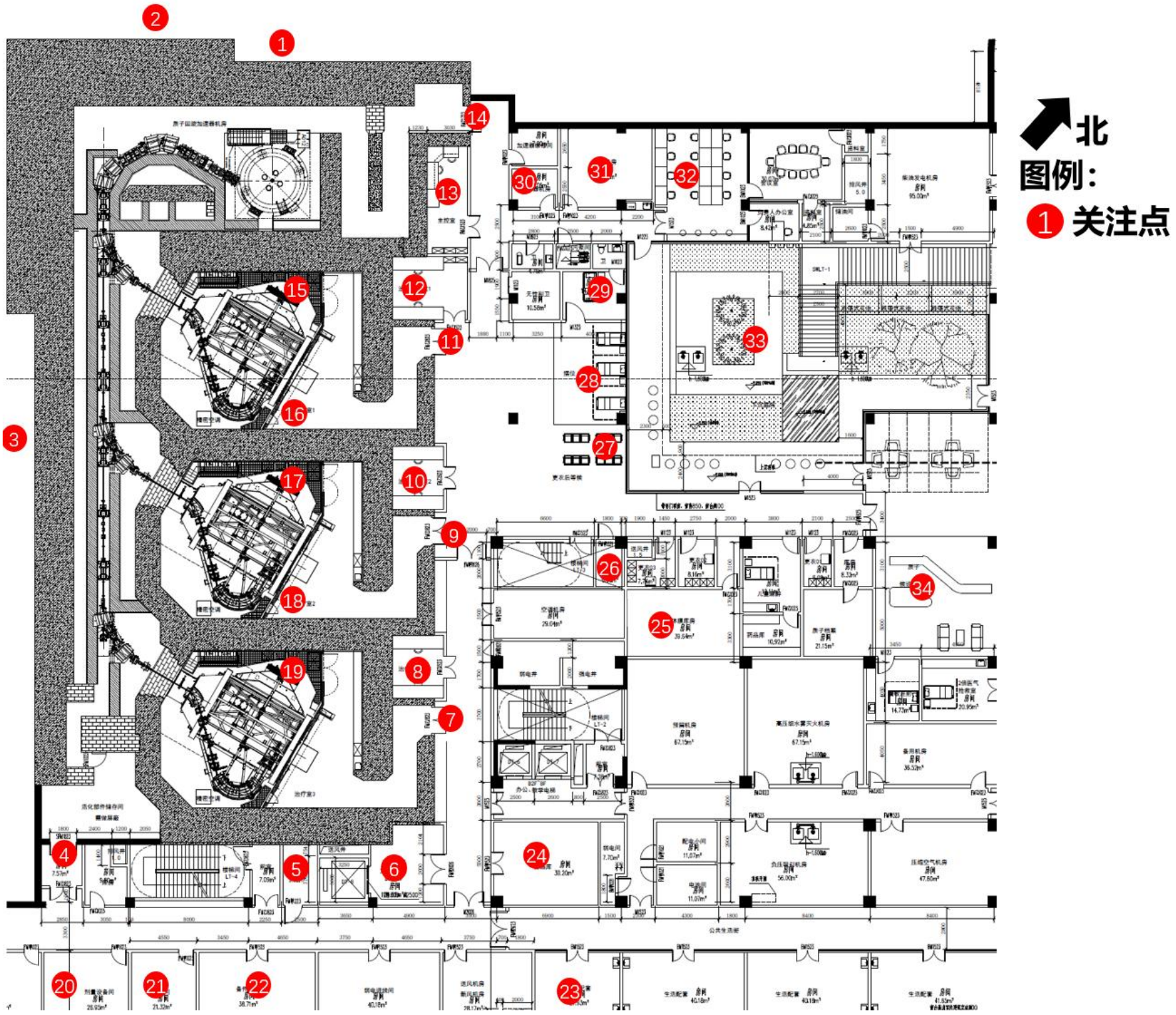


图 5-1 质子治疗装置地下一层关注点平面图示意图（1）

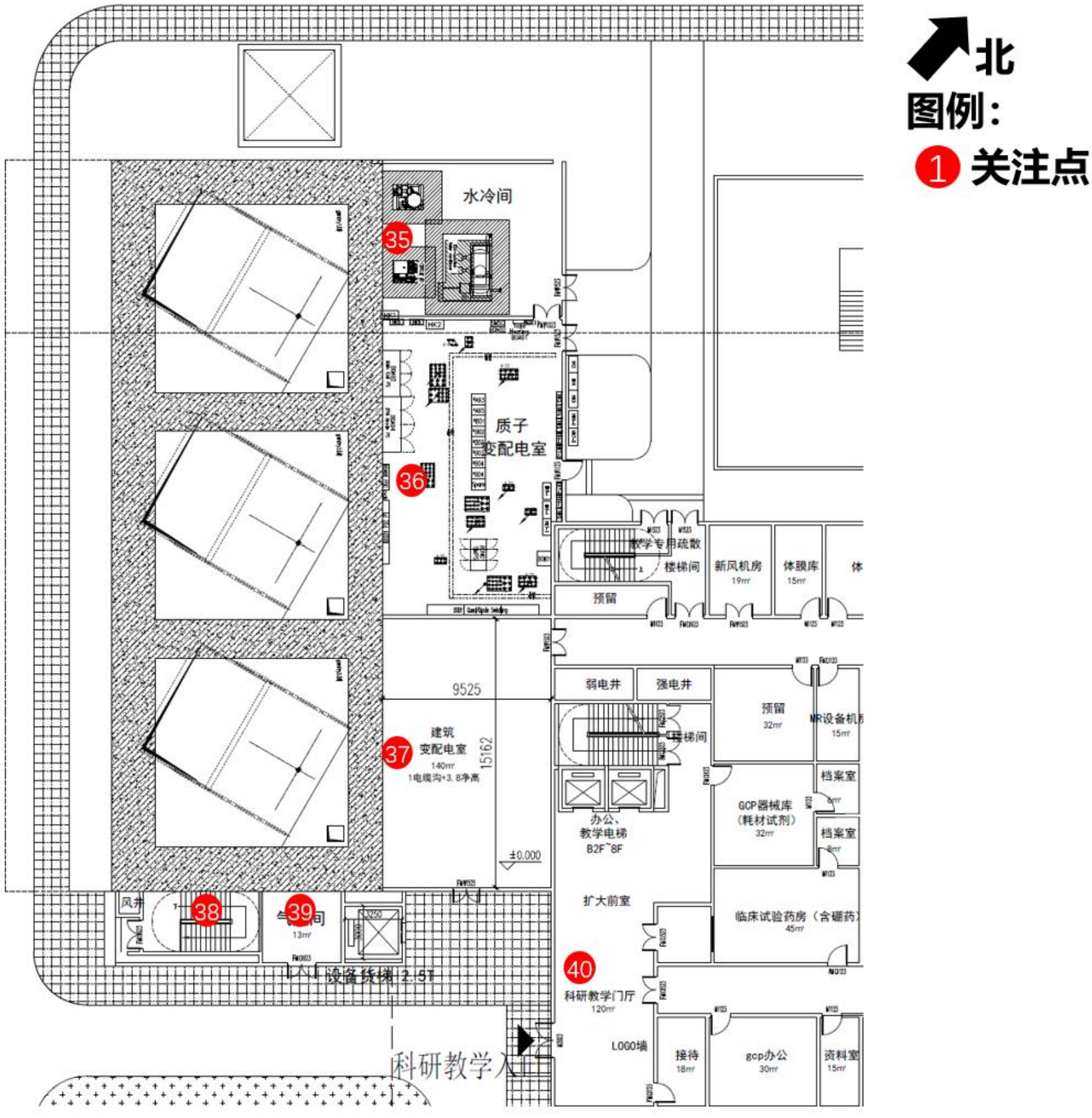


图 5-2 质子治疗装置地上一层关注点平面图示意图

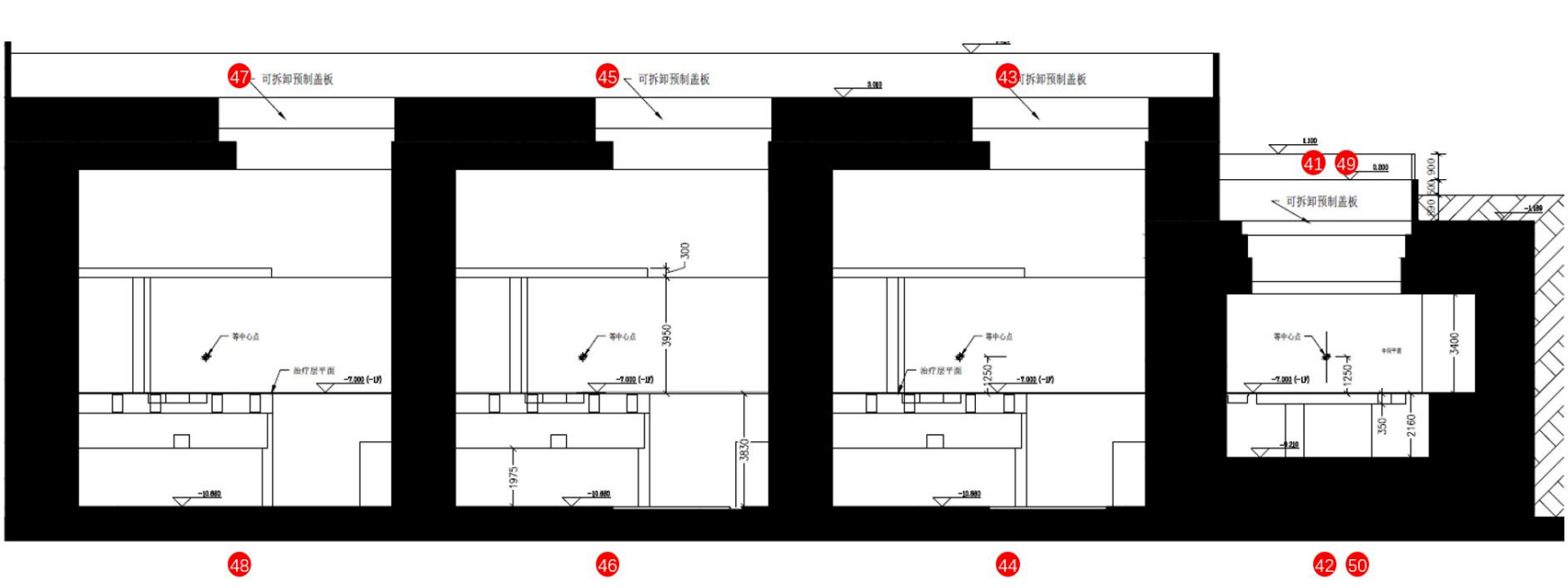


图 5-3 质子治疗装置关注点剖面示意图（1）

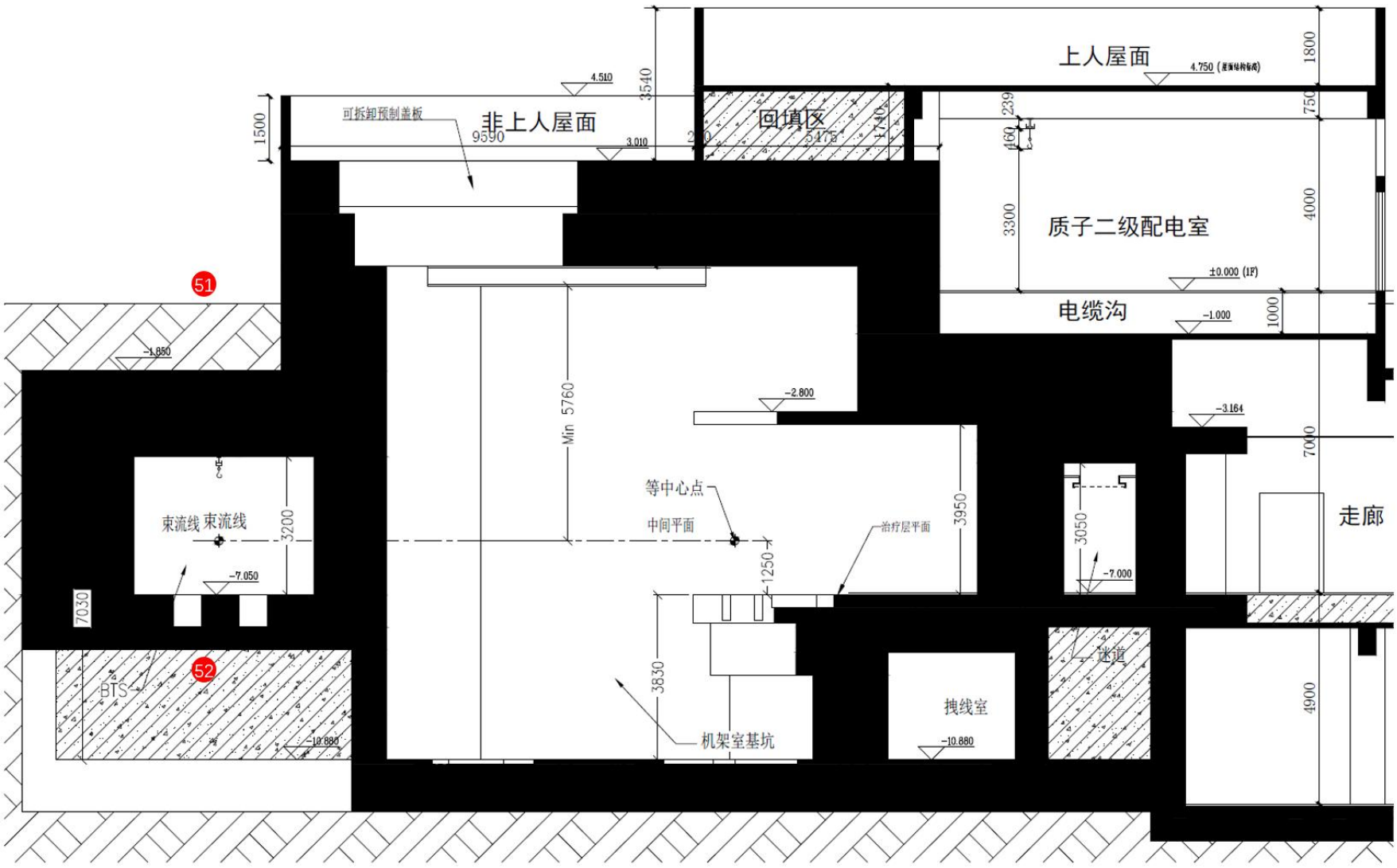


图 5-4 质子治疗装置关注点剖面示意图（2）

5.2.1.2.3 计算结果

根据 FLUKA 程序的计算结果，本项目使用的质子治疗装置屏蔽体外各关注点处的剂量率计算结果如表 5-3 所示，模拟得到的剂量率分布图见图 5-5~图 5-17。

表 5-3 质子治疗装置屏蔽体外关注点剂量率模拟计算结果/（μSv/h）

源项	序号	点位描述	剂量率水平	剂量率控制水平
回旋加速器	1	回旋加速器北侧墙外	1.17	5500
	2	能量选择系统北侧墙外	5.22	5500
	3	束流输运系统西侧墙外	0.08	5500
	4	束流输运系统末端墙外缓冲间	0.21	10
治疗室 3	5	前室	3.04	10
	6	候梯厅	0.008	10
	7	治疗室 3 迷道口	0.93	10
	8	治疗室 3 治疗控制室	0.02	2.5
治疗室 2	9	治疗室 2 迷道口	0.93	10
	10	治疗室 2 治疗控制室	0.02	2.5
治疗室 1	11	治疗室 1 迷道口	0.93	10
	12	治疗室 1 治疗控制室	0.02	2.5
回旋加速器	13	主控室	2.2	2.5
	14	加速器大厅迷道口	3.1	10
	15	加速器大厅南墙外	2.1	10
治疗室 2	16	治疗室 2 北墙外	7	10
治疗室 1	17	治疗室 1 南墙外	9.5	10
治疗室 3	18	治疗室 3 北墙外	7	10
治疗室 2	19	治疗室 2 南墙外	9.5	10
治疗室 3	20	剂量设备间	0.002	10
	21	维修间	0.002	10
	22	备件库	0.001	10
	23	生活配套房间	0.001	2.5
	24	备品间	0.009	10
治疗室 2	25	体模库房	0.001	10
	26	更衣室	0.001	2.5
治疗室 1	27	更衣后等候区	0.001	2.5
	28	摆位间 1	0.001	2.5
	29	摆位间 2	0.001	2.5
回旋加速器	30	服务器机房	0.021	10
	31	新风机房	0.076	2.5
	32	办公室	0.003	2.5
治疗室 2	33	下沉庭院	0.001	10
	34	质子候诊区	0.001	2.5
治疗室 1	35	水冷间	0.18	10

治疗室 2	36	质子变配电室	0.18	10
治疗室 3	37	变配电室	0.18	10
	38	地上一层南侧楼梯间	0.3	10
	39	气瓶间	0.3	10
	40	科研教学门厅	0.001	10
回旋加速器	41	回旋加速器上方顶板外	0.5	10
	42	回旋加速器下方底板外	3400	5500
治疗室 1	43	治疗室 1 上方顶板外	2.4	10
	44	治疗室 1 下方底板外	568	5500
治疗室 2	45	治疗室 2 上方顶板外	2.4	2.5
	46	治疗室 2 下方底板外	568	5500
治疗室 3	47	治疗室 3 上方顶板外	2.4	10
	48	治疗室 3 下方底板外	568	5500
能量选择系统	49	能量选择系统上方顶板外	5.2	10
	50	能量选择系统下方底板外	4500	5500
束流输运系统	51	束流输运系统上方顶板外	0.3	10
	52	束流输运系统下方底板外	325	5500

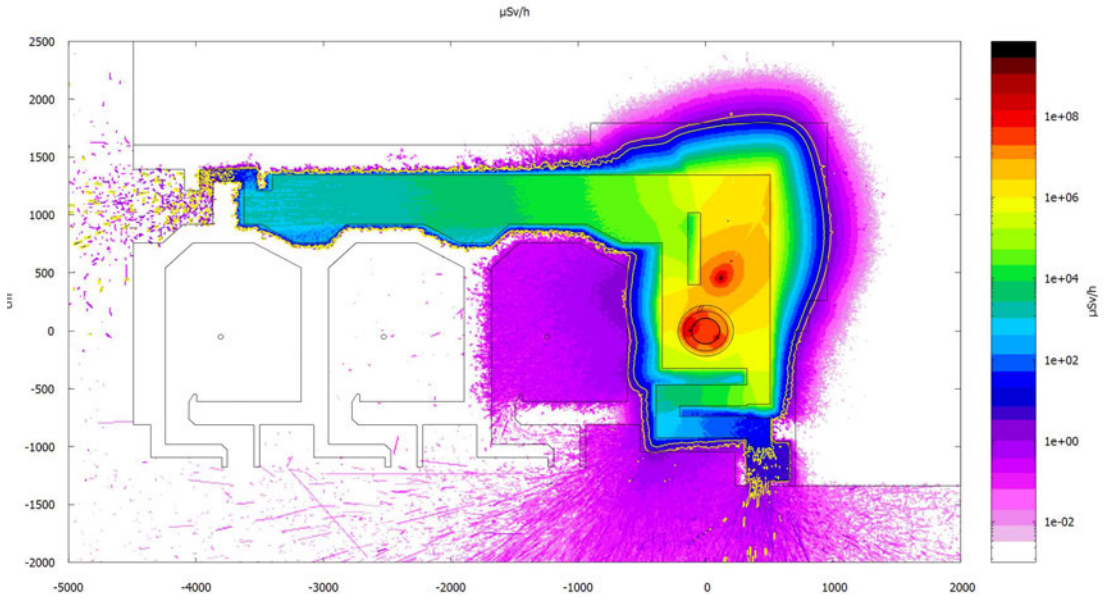


图 5-5 工况 1 加速器大厅（包含束流传输系统）辐射剂量率分布图

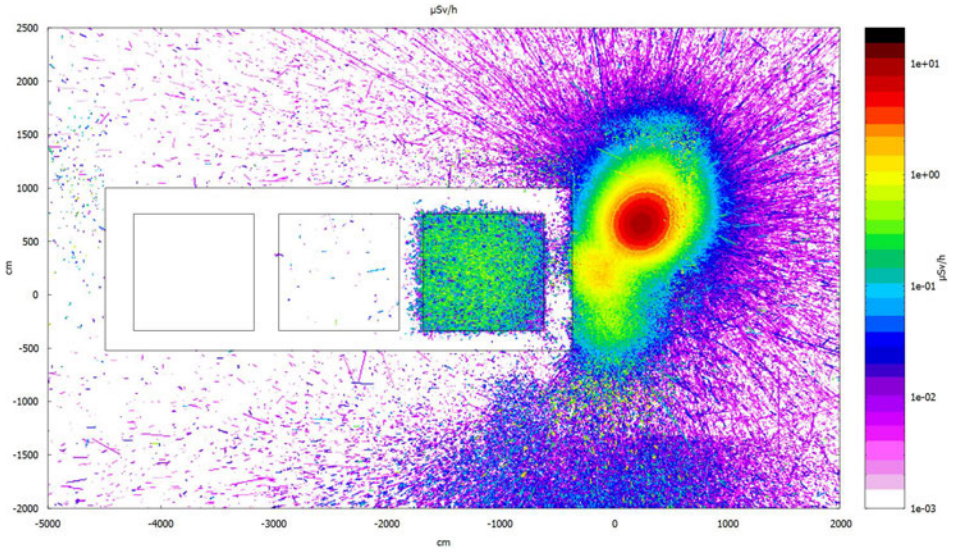


图 5-6 工况 1 地上一层辐射剂量率分布图

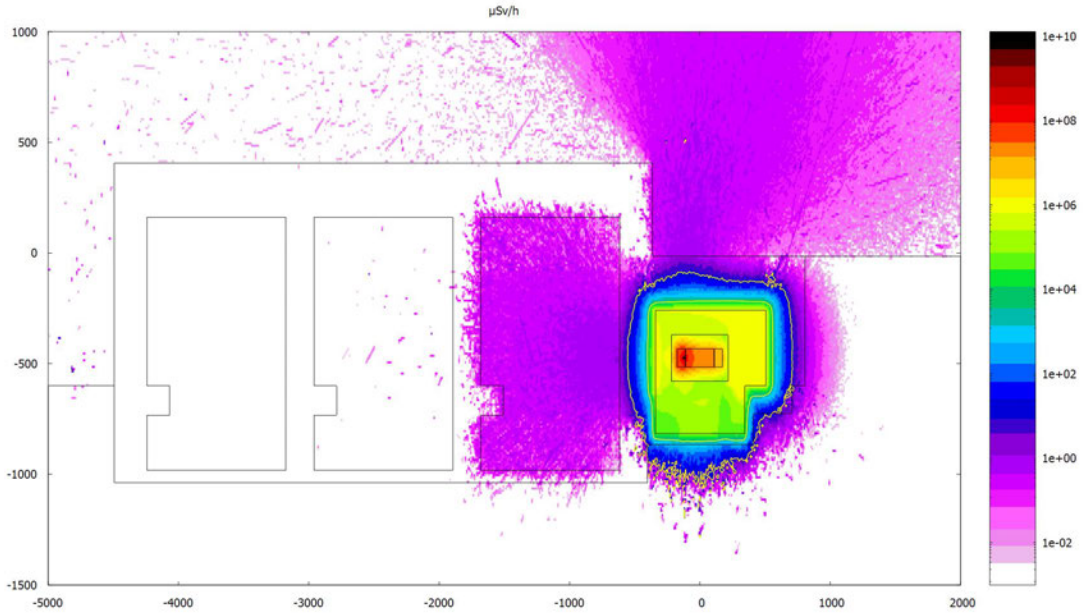


图 5-7 工况 1 南北剖面辐射剂量率分布图

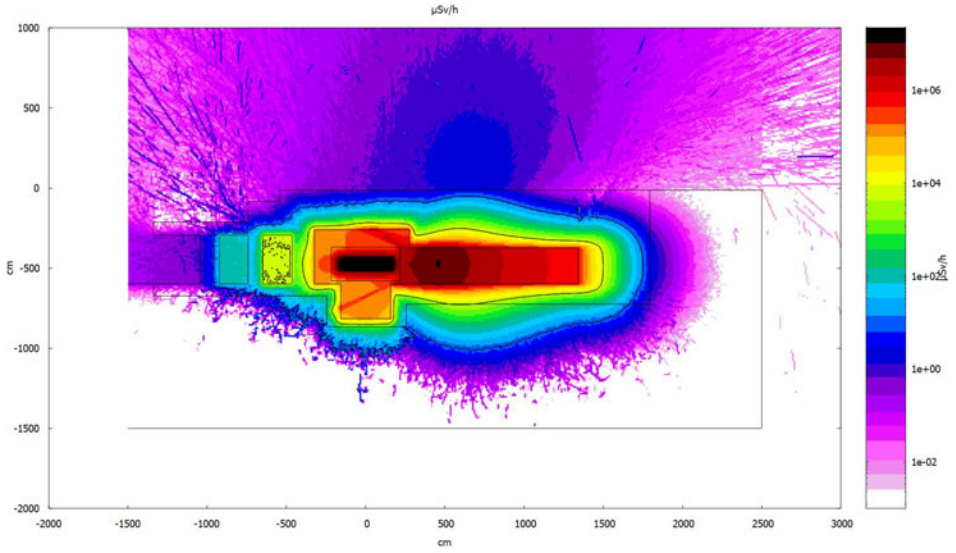


图 5-8 工况 1 东西剖面辐射剂量率分布图

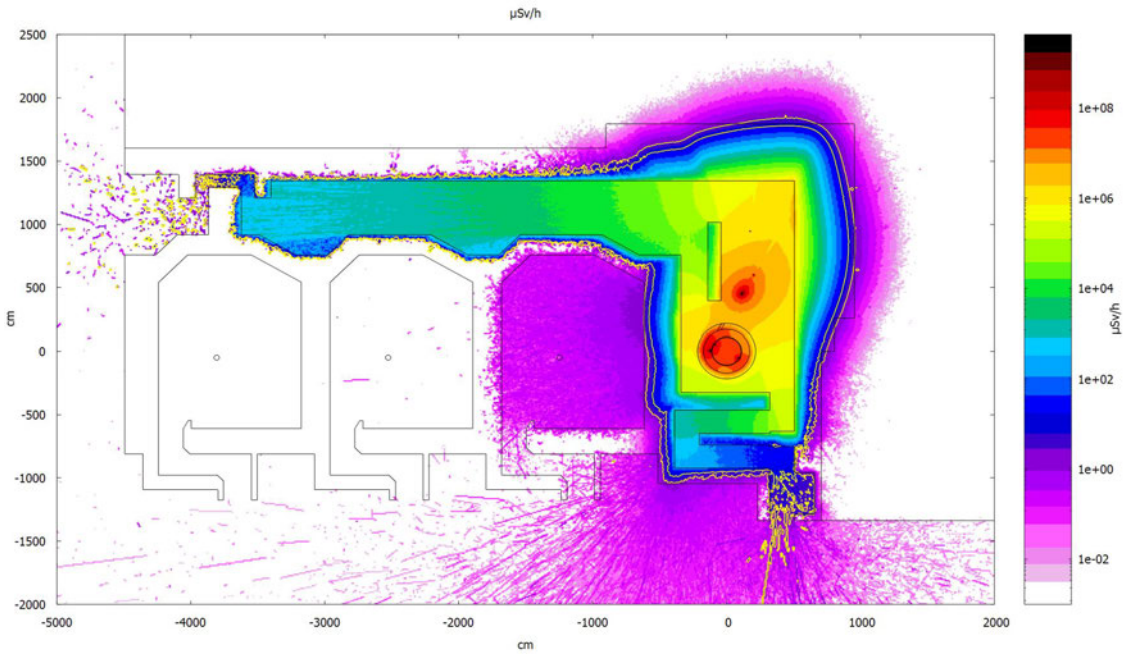


图 5-9 工况 3 加速器大厅（包含束流传输系统）辐射剂量率分布图

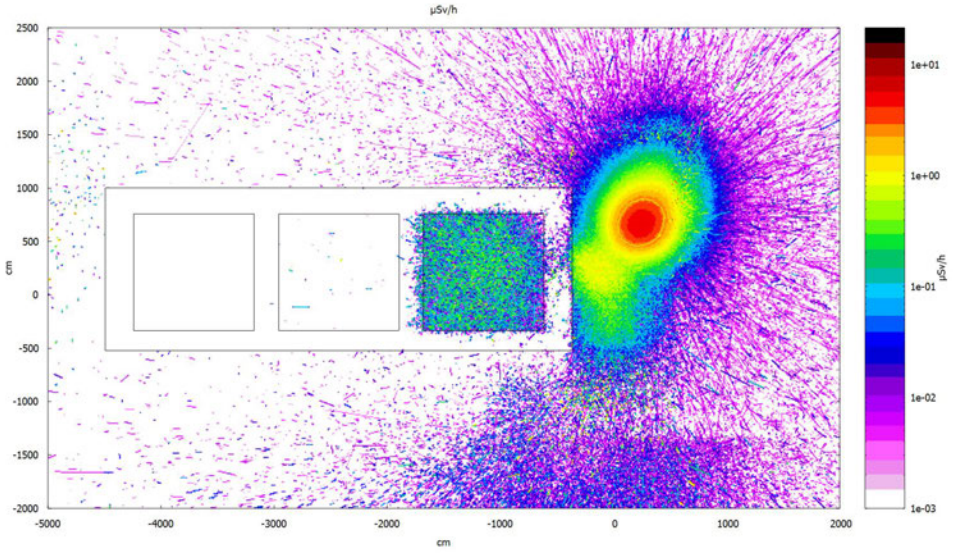


图 5-10 工况 3 地上一层辐射剂量率分布图

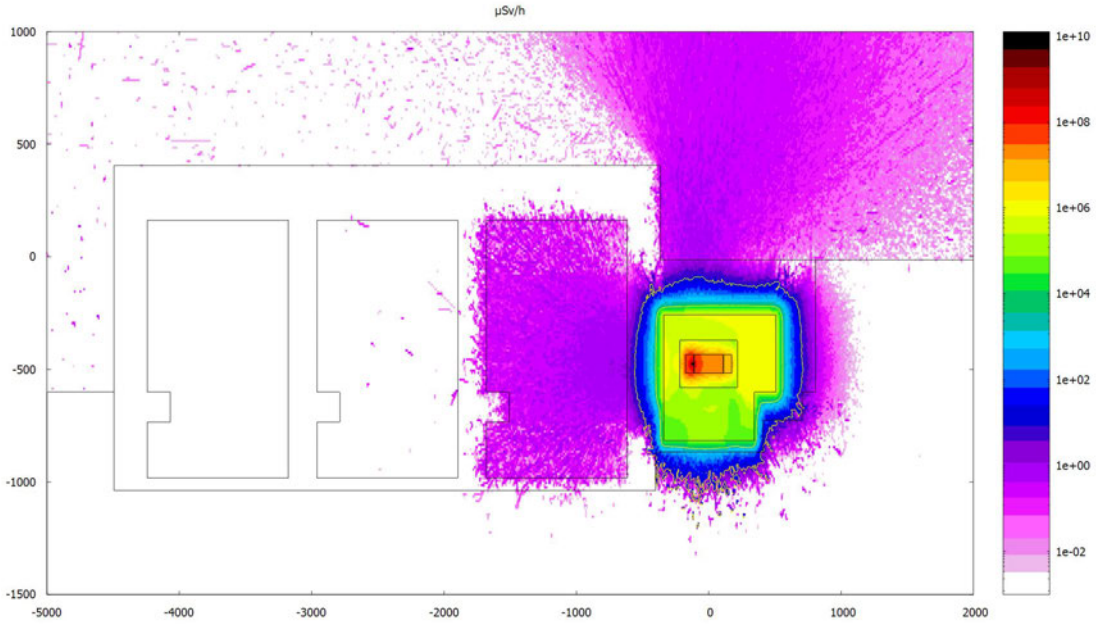


图 5-11 工况 3 南北剖面辐射剂量率分布图

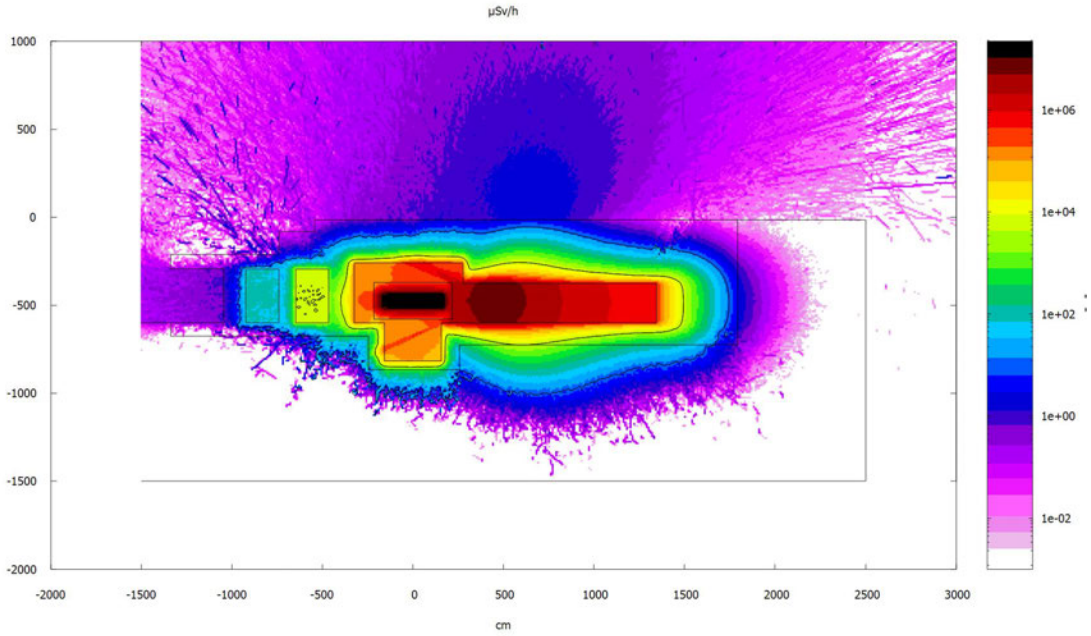


图 5-12 工况 3 东西剖面辐射剂量率分布图

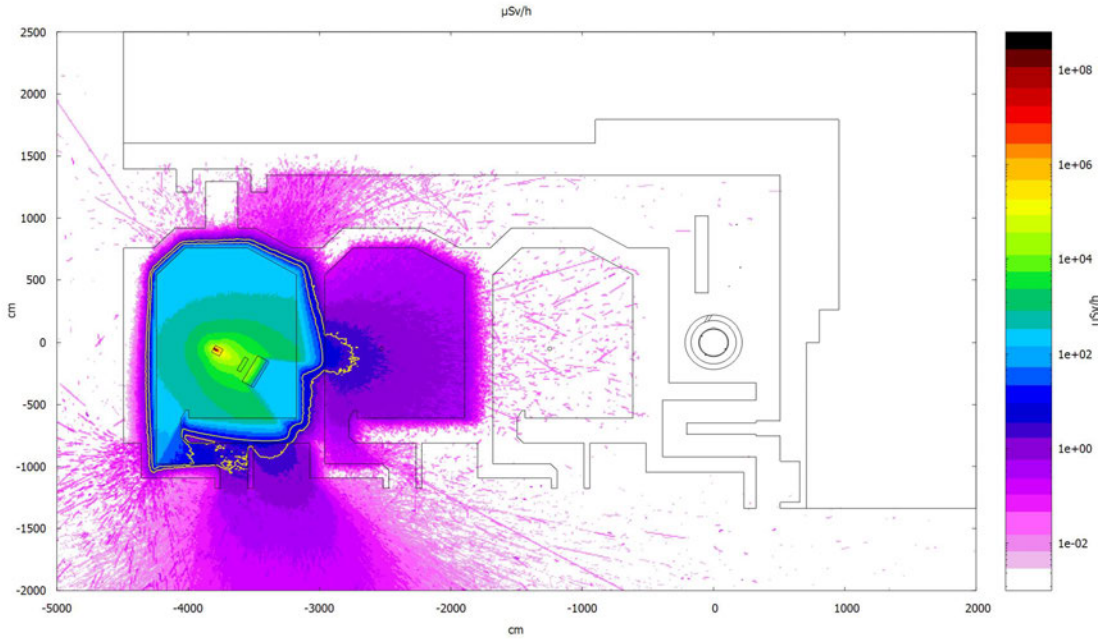


图 5-13 工况 3 治疗室 3 向北照射辐射剂量率分布图

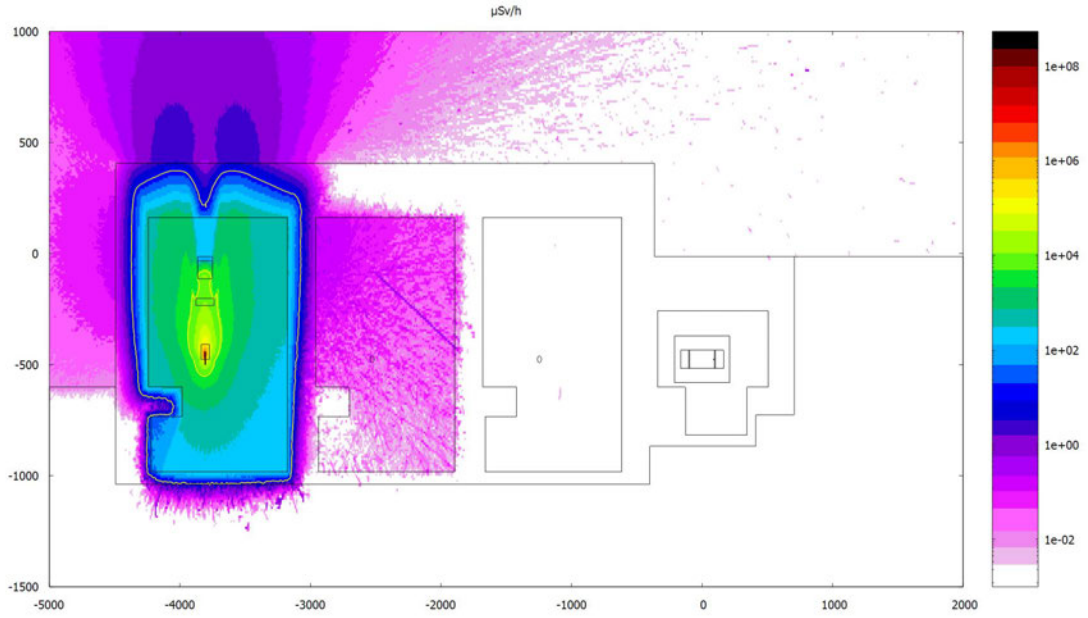


图 5-14 工况 3 治疗室 3 向上照射辐射剂量率分布图

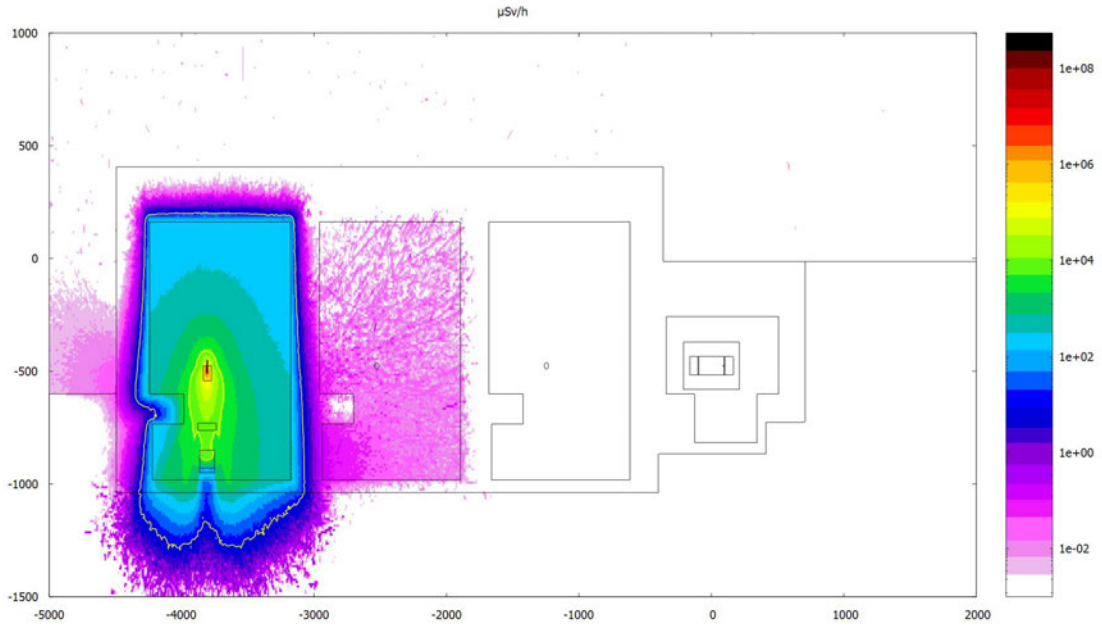


图 5- 15 工况 3 治疗室 3 向下照射辐射剂量率分布图

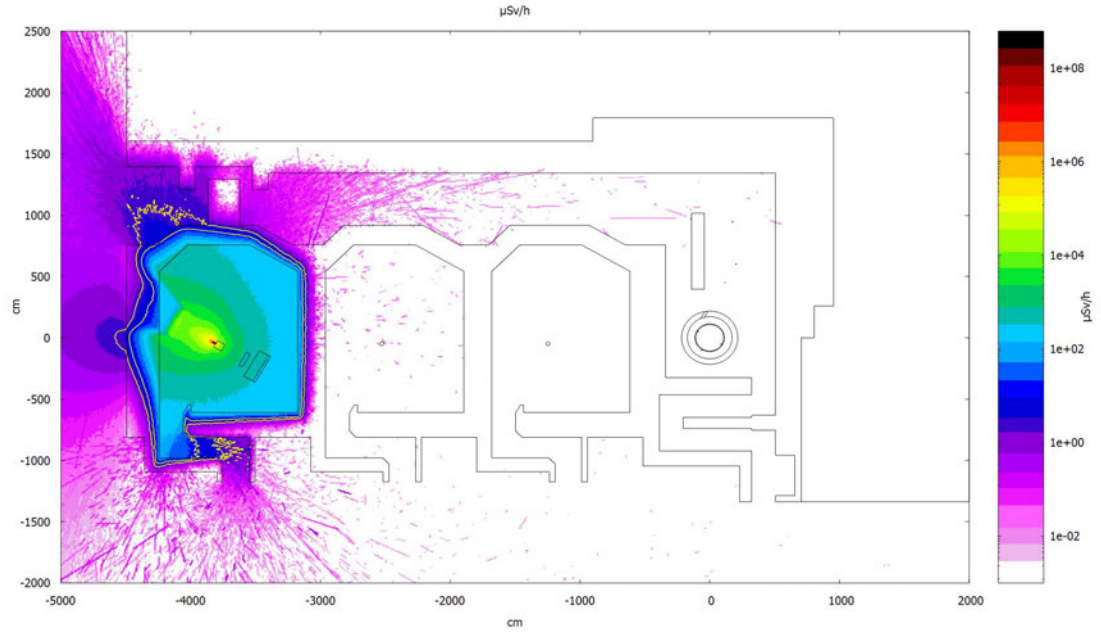


图 5-16 工况 3 治疗室 3 向南照射辐射剂量率分布图

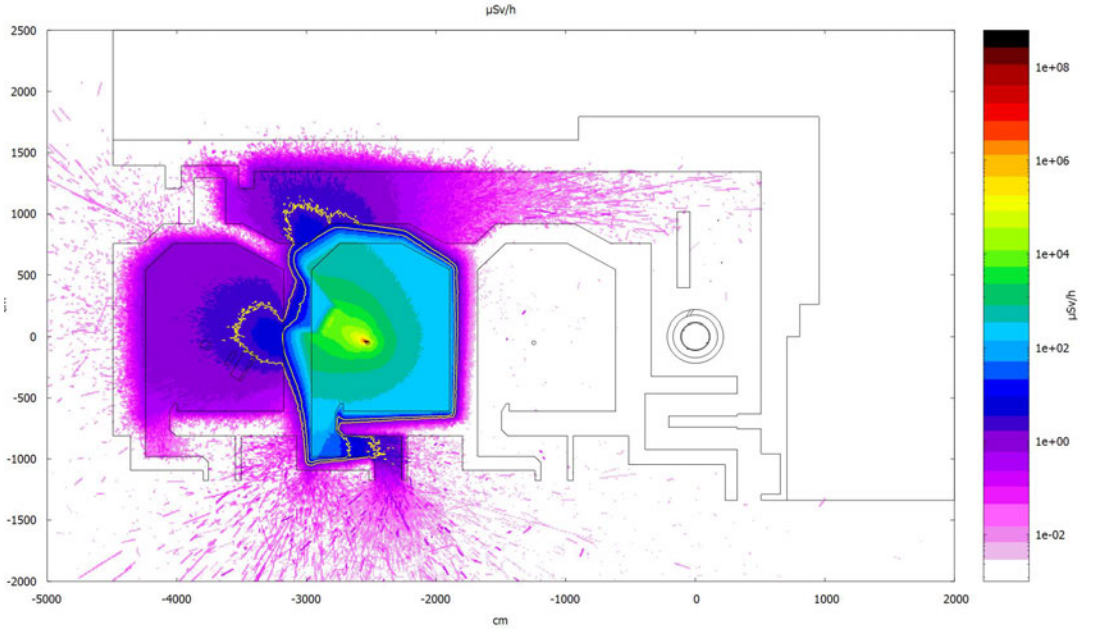


图 5-17 工况 3 治疗室 2 向南照射辐射剂量率分布图

5.2.1.3 工作人员有效剂量估算

质子治疗装置正常运行期间，对以上工作人员的辐射影响主要来自装置开机出束以及治疗室出束治疗时产生的瞬发辐射照射。直接照射剂量可由下式进行计算：

$$H = D \times T \times t \qquad (5\text{-}1)$$

式中，

H 为工作人员年有效剂量，mSv/a；

D 为工作人员所在区域剂量率，mSv/h；

T 为工作人员的居留因子；

t 为工作人员年受照时间，h/a。

5.2.1.3.1 治疗技师

治疗技师的工作内容主要包括在治疗前的模拟定位、在治疗室给患者摆位和操作 X 射线定位系统以及在控制室内操作设备。

5.2.1.3.1.1 外照射

5.3.1.3.1.1.1 治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用模拟定位 CT 对其进行治疗前的模拟定位。本项目每年总治疗患者人次约为 50688 人次，每人平均治疗次数约为 25 次，因此本项目每年总治疗人数约 2028 人。

每次模拟定位期间，技师在模拟定位 CT 机房内的工作时间为 5min，CT 机出束时间技师在控制室内工作时间为 1min，每年进行模拟定位次数取每年治疗人数的 2 倍，保守取整为 4100 次。每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目共配备 9 名治疗技师轮班，每名治疗技师每年参与模拟定位的次数约为 911.1 次。由此可以计算得出每名技师从事模拟定位期间的有效剂量，列于表 5-4。

表 5-4 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年有效剂量估算结果

工作区域	剂量率水平/（mSv/h）	年受照时间/h	有效剂量/（mSv/a）
CT 控制室 1)	2.5E-03	15.2	3.8E-02
总计	—	—	3.8E-02

注：根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h，则 CT 控制室的剂量率保守取 2.5μSv/h。年受照时间为 911.1 次×1min=911.1min=15.2h。

5.3.1.3.1.1.2 机房内摆位

在摆位期间的有效剂量来自患者治疗前摆位和治疗后解除摆位两个过程。根据质子治疗装置满负荷运行情况下规划的工作量，每年共治疗 50688 人次，所有治疗技师的年总工作量计算结果列于表 5-5。共 9 名治疗技师，保守假设每次摆位由 2 名技师同时在场完成，每名治疗技师的年工作量列于表 5-6。

表 5-5 所有治疗技师摆位的年工作量

单次治疗前摆位所需时间/min	年进行治疗前摆位总次数	年进行治疗前摆位总时间/h	单次解除摆位所需时间/min	年总进行解除摆位工作的次数	年进行解除摆位总时间/h
5	50688	4224	1	50688	844.8

表 5-6 每名治疗技师摆位的年工作量

年进行治疗前摆位总时间/h	年进行解除摆位总时间 [1]/h
938.7	93.7

注：1.单次解除摆位由一名技师完成。

（1）患者治疗前摆位

患者每次治疗前，治疗技师在治疗室接触的是未受到照射的患者，该过程中治疗技师所在区域的瞬时剂量率主要来自“3.3.1.3.4 节”所列的（2）和（3），具体数值和计算结果列于表 5-7。

表 5-7 患者治疗前摆位期间，治疗技师的年有效剂量

来源	瞬时剂量率/（mSv/h）	年工作时间/h	年有效剂量/（mSv/a）
相邻治疗室 [1]	1.6E-05	938.7	1.5E-02
空气感生放射性 [2]	5.32E-06	938.7	4.99E-03
总计	——	——	6.49E-02

注：1. 相邻正在执行治疗任务的治疗室所致的瞬时剂量率，取表 5-3 中“关注点 19（治疗室 2 南墙外）”剂量率水平 9.5μSv/h，由于关注点在屏蔽体外 30cm 处，辐射工作人员工作位置在治疗床附近，治疗床距治疗室 1 南墙外约 7.3m，剂量率与距离的平方成反比，因此辐射工作人员工作区域的剂量率水平为 1.6E-02μSv/h；

2.空气感生放射性所致瞬时剂量率保守取表 3-44 中停机 1min 后的数值。

（2）患者治疗后解除摆位

患者每次治疗结束后，治疗技师需要进入治疗室内，对患者解除摆位及谈话。此时，患者自身由于受到质子束流的照射产生的感生放射性会对治疗技师产生一定照射。解除摆位过程中，治疗技师与患者被照射部位的平均距离约为

1m。保守取表 3-41 中“单次治疗后，停机 5min 后距离患者 100cm 处的剂量率”，可计算得出每间治疗室每名治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年有效剂量，结果列于表 5-8。

表 5-8 每位治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年有效剂量

来源	瞬时剂量率/（mSv/h）	年工作时间/h	年有效剂量/（mSv/a）
患者	6.6E-03	93.7	6.18E-01
相邻治疗室	1.6E-05	93.7	1.50E-03
空气感生放射性	5.32E-06	93.7	4.98E-04
总计	——	——	6.24E-01

5.3.1.3.1.1.3 操作 DR

考虑到治疗技师在治疗室内工作期间，除对病人进行摆位外，还需在治疗室控制台利用 D 进行精确位置验证，单次工作时间约为 5min。每名技师操作 DR 的年工作量及年有效剂量如下所示。

表 5-9 每名治疗技师操作 DR 的年工作量

单次操作 DR 机治疗期间工作时间/min	年治疗总次数	操作 DR 机的年总工作时间/h	每名治疗技师操作 DR 的年总工作时间 [1]/h
5	50688	4224	469.3

注：1.每次操作 DR 由 1 名治疗技师完成。

表 5-10 每位治疗技师操作 DR 工作期间的年有效剂量

来源	瞬时剂量率/（mSv/h）	年工作时间/h	年有效剂量/（mSv/a）
CT 出束 [1]	2.5E-03	469.3	1.17
总计	——	——	1.17

注： 在估算过程中保守考虑 DR 出束时治疗技师所在位置的瞬时剂量率为 2.5μSv/h。

5.3.1.3.1.1.4 控制室内

质子治疗装置出束期间，治疗技师在治疗室控制室内的工作，其工作期间的有效剂量估算结果列于表 5-11。

表 5-11 治疗技师在控制室内工作期间的有效剂量估算结果

工作区域	剂量率水平 [1]/（mSv/h）	受照时间 [2]/h	有效剂量/（mSv/a）
控制室	2.0E-05	456.9	9.14E-03

注：1.治疗室控制室内的剂量率水平保守取表 5-3 中关注点 8（治疗室 3 治疗控制室）的剂量率，即 2.0E-05mSv/h；

2.对于技师，质子治疗装置的年出束时间为2055.96h，治疗技师共9人轮班，每班2人，因此每人受照时间约为456.9h。

5.2.1.3.1.2 吸入内照射

工作人员在治疗机房内工作期间，除受到感生放射性气体的浸没外照射，还会由于吸入感生放射性气体受到内照射，吸入内照射剂量可由下式5-2计算。计算结果列于表5-13。

$$H_{h\cdot i} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \qquad (5\text{-}2)$$

式中：

$H_{h\cdot i}$为年吸入内照射年有效剂量，Sv/a；

T为年受照时间，h/a；由表5-6可知，每名技师在机房内的年总工作时间为1032.4h；

u为正常情况下的呼吸率，m^3/h，成人的呼吸率取值$1.2m^3/h$；

$C_{a\cdot i}$为工作场所内部空气感生放射性核素的浓度，Bq/m^3；取停机1min后机房内空气感生放射性浓度。

$g_{h\cdot i}$为吸入放射性核素i产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq，见表5-12。

表5-12 吸入内照射剂量转换因子

核素	吸入内照射剂量转换因子/（Sv/ Bq）
^{11}C	1.80E-11
^{13}N	——
^{15}O	——
^{41}Ar	——

表5-13 治疗技师在机房内工作期间所受感生放射性气体吸入内照射剂量

核素	$C_{a,i}$/（Bq/m³*）	T/（h/a）	u/（m³/h）	$g_{h\cdot i}$/（Sv/Bq）	$H_{h\cdot i}$/（mSv/a）
^{11}C	4.14E+00	1032.4	1.2	1.80E-11	9.23E-05
^{13}N	1.16E+01	1032.4	1.2	——	——
^{15}O	1.25E+01	1032.4	1.2	——	——
^{41}Ar	1.39E+00	1032.4	1.2	——	——
总计	2.97E+01	1032.4	1.2	——	9.23E-05

5.2.1.3.1.3 小结

每位治疗技师年总有效剂量计算结果列于表 5-14。

表 5-14 每位治疗技师年总有效剂量

来源		年有效剂量/（mSv/a）
外照射	治疗前模拟定位	3.8E-02
	治疗前摆位	6.49E-02
	治疗后解除摆位	6.24E-01
	操作 DR	1.17
	控制室内	9.14E-03
吸入内照射	治疗机房内工作	9.23E-05
总计		1.9

5.2.1.3.2 物理师

物理师有效剂量主要来自其在治疗计划验证及 QA 工作期间：

（1）治疗计划验证

本项目每年总治疗患者人次约为 50688 人次，每人平均治疗次数约为 25 次，因此本项目每年总治疗人数约 2028 人。

本项目共配备 7 名物理师。每次工作由 2 名物理师完成。每名患者进行 1 次治疗计划验证，因此每年进行治疗计划验证次数约 2028 次，则每名物理师每年进行治疗计划验证次数约为 580 次。每次治疗计划验证期间的有效剂量保守与每次治疗期间技师的有效剂量取值一致，由表 5-14 保守推算，将技师所有工作均分为两个班次，则其单次工作有效剂量为(1.90mSv/a÷(50688÷2))=7.5E-05mSv/次，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的有效剂量计算结果列于表 5-15。

表 5-15 物理师进行治疗计划验证期间的年有效剂量

工作内容	单次工作有效剂量/（mSv/次）	年工作次数	有效剂量/（mSv/a）
治疗计划验证	7.5E-05	580	4.35E-02

（2）QA

QA 期间，物理师的工作地点包括机房内部和控制室，有效剂量估算结果

列于表 5-16。

表 5-16 物理师 QA 工作期间年有效剂量算结果

工作地点	剂量率[1]/（mSv/h）	年工作时间[2]/h	年有效剂量/（mSv/a）
治疗室内	6.62E-03	105.4	6.98E-01
控制室	2.0E-05	105.4	2.11E-03
总计	——	——	7.0E-01

注:1. 物理师在治疗机房内工作时，机房内剂量率主要考虑相邻治疗室出束和空气感生放射性所致剂量率及水箱感生放射性所致的剂量率（保守取停机 5min 患者 1m 处的数值），取值为 1.6E-05+5.32E-06+6.6E-03=6.62E-03mSv/h；

2.由表 5-1 可知，每间治疗室 QA 出束时间为 123h，3 间治疗室的年总出束时间为 369h。共 7 名物理师，假设每次工作由 2 名物理师共同完成，则每名物理师的年工作时间为 105.4h。

（3）小结

根据上述计算结果，可得出物理师的年有效剂量，列于表 5-17。

表 5-17 物理师的年有效剂量

治疗计划验证/（mSv/a）	QA/（mSv/a）	总有效剂量/（mSv/a）
4.35E-02	7.0E-01	7.44E-01

5.2.1.3.3 科室医生

医生的工作地点主要在医生办公室，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内部，平均每名医生在治疗室内部的工作时间不会超过 30h/年，则科室医生年有效剂量估算结果列于表 5-18。

表 5-18 科室医生年有效剂量估算结果

工作内容	辐射来源	剂量率水平[1]，mSv/h	年受照时间[2]，h	有效剂量，mSv/a
医生办公室	瞬发辐射	7.6E-05	2025.96	1.54E-01
治疗室	相邻治疗室	1.6E-05	30	4.8E-04
	患者感生放射性	6.6E-03		1.98E-01
	空气感生放射性	5.32E-06		1.6E-04
总计	——	——	2055.96	3.53E-01

注：1. 医生办公室的剂量率水平保守取表 5-3 中关注点 32（办公室）的值进行计算，即 7.6E-05mSv/h；

2. 质子治疗装置年总出束时间为 2055.96h，保守假设医生除在治疗室内工作外均在

办公室工作。

5.2.1.3.4 护士

根据质子治疗装置治疗流程，护士在治疗前模拟 CT 定位和进行 DR 精确定位期间，根据工作需要为患者注射造影剂。模拟 CT 定位时，护士在模拟 CT 机房留针，然后在 CT 控制室操作注射造影剂；DR 定位时，护士进入治疗室内留针，然后在治疗控制室内操作注射造影剂。每年的操作总次数按模拟 CT 定位次数和 DR 精确定位次数的 1/10 考虑，分别为 203 次、5069 次。留针的时间按 1min/次考虑，注射造影剂的时间按 1min/次考虑。共 4 名护士，则每名护士的年有效剂量计算结果列于表 5-19。由此可知，本项目运行期间护士年最大有效剂量为 2.06E-02mSv/a。

表 5-19 护士年有效剂量估算结果

工作区域		瞬时剂量率/（mSv/h）	年受照时间，h	年有效剂量/（mSv/a）
治疗前模拟定位	模拟定位 CT 机房内 [1]	2.50E-03	0.85	2.13E-03
	CT 控制室 [2]	2.50E-03	0.85	2.13E-03
DR 或滑轨 CT 机精确定位	治疗室内 [3]	2.13E-05	21.1	4.49E-04
	操作间 [4]	2.50E-03	21.1	5.28E-02
总计		——	——	5.74E-02

注：1、2. 保守考虑模拟定位 CT 机房内剂量率水平与 CT 控制室相同，均保守取 2.5μSv/h；
3. 治疗室内主要考虑相邻正在执行治疗任务的机房以及空气感生放射性所致的瞬时剂量率之和，即 1.6E-05+5.32E-06=2.13E-05mSv/h；
4. 保守按照 DR 出束时控制室处剂量率为 2.5μSv/h 考虑。

5.2.1.3.5 工作人员有效剂量汇总

质子治疗装置辐射工作人员有效剂量汇总如表 5-20 所示。由上述计算结果可知，质子治疗装置运行期间，医院配备的治疗技师有效剂量最大，个人年最大有效剂量为 1.9mSv/a，未超过本次评价中工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-20 质子治疗装置运行期间对工作人员所致年有效剂量汇总

人员类别	合计
治疗技师	1.9
物理师	7.44E-01
科室医生	3.53E-01

人员类别	合计
护士	5.74E-02

5.2.1.4 公众有效剂量估算

质子治疗装置正常运行期间，对公众的辐射影响主要来自质子治疗装置开机出束期间产生的瞬发辐射直接外照射以及感生放射性气体的排放。

5.2.1.4.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象质子治疗装置辐射工作场所周围近距离范围内的公众，根据本项目质子治疗装置工作场所周围环境分布情况。其所受瞬发辐射照射剂量由下式计算。计算结果列于表 5-21。

$$H = D \times t \times T \qquad (5\text{-}3)$$

H 为公众的年有效剂量，mSv/a；

D 为公众所在区域剂量率，mSv/h；

t 为公众年受照时间，h/a；

T 为居留因子。

表 5-21 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

楼层	关注点	点位描述	剂量率水平，μSv/h	居留因子	时间,h/a	年有效剂量,mSv
地下一层	6	候梯厅	0.008	1/16	2055.96	1.03E-03
	20	剂量设备间	0.002	1/16	2055.96	2.57E-04
	21	维修间	0.002	1/16	2055.96	2.57E-04
	22	备件库	0.001	1/16	2055.96	1.28E-04
	23	生活配套房间	0.001	1/16	2055.96	1.28E-04
	24	备品间	0.009	1/16	2055.96	1.16E-03
	25	体模库房	0.001	1/16	2055.96	1.28E-04
	26	更衣室	0.001	1	2055.96	2.06E-03
	27	更衣后等候区	0.001	1	2055.96	2.06E-03
	28	摆位间 1	0.001	1	2055.96	2.06E-03
	29	摆位间 2	0.001	1	2055.96	2.06E-03
	30	服务器机房	0.21	1/16	2055.96	2.70E-02
	31	新风机房	0.076	1/16	2055.96	9.77E-03

楼层	关注点	点位描述	剂量率水平，μSv/h	居留因子	时间,h/a	年有效剂量,mSv
	32	办公室	0.003	1	2055.96	6.17E-03
	33	下沉庭院	0.001	1/16	2055.96	1.28E-04
	34	质子候诊区	0.001	1	2055.96	2.06E-03
地上一层	35	水冷间	0.18	1/16	2055.96	2.31E-02
	36	质子变配电室	0.18	1/16	2055.96	2.31E-02
	37	变配电室	0.18	1/16	2055.96	2.31E-02
	38	地上一层南侧楼梯间	0.3	1/16	2055.96	3.85E-02
	39	气瓶间	0.3	1/16	2055.96	3.85E-02
	40	科研教学门厅	0.001	1/16	2055.96	1.28E-04

注：1.各公众所在区域的瞬时剂量率的保守选取来自于表 5-3 中的点位；

5.2.1.4.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用李红等人在《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》（方栋、李红，辐射防护，2002 年第 22 卷第 6 期）中推荐的简单稀释模式估算质子治疗装置正常运行工况下放射性气态流出物的影响。

简单稀释模型在于其能够提供一种快速且相对保守的方法，适用于核技术利用项目环境影响评价。这种方法不需要复杂的气象数据和详细的地形分析，因此非常实用。此外，这种方法提供了一种保守的估算，有助于确保在设计阶段考虑到最坏情况下的环境影响。

所选取的参数包括：①核素 i 的年均排放量 Qi；②排放源高度 H；③邻近最高建筑物的高度 Hb　　及最大截面面积 Ab。

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。计算时主要关注排风口近距离范围内公众的有效剂量。

表 5-22 质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
39.3	5555.2	49.6
临近最高建筑为西北侧四大中心专科楼或西侧特需医疗楼病房楼，高度均为 49.6m		

5.2.1.4.2.1 空气浸没外照射

由表 5-22 所示，质子治疗装置排风口高度 H＜2.5H_b（H_b为临近最高建筑物高度），对于近距离范围的公众，根据 IAEA NO.19 号报告，当 x≤2.5$\sqrt{A_b}$（X≤74.53m）时，关注点地面空气浓度可由下式计算：

$$c_{a,i}=\frac{P_pQ_i}{\pi u_aH_bK} \qquad (5\text{-}4)$$

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 3-27；

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，根据南京年平均风速，取值 2.6m/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＞74.53m）

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 5-7 计算：

$$c_{a,i}=\frac{P_pBQ_i}{u_a} \qquad (5\text{-}5)$$

式中：

B为在下风距离 x 处的高斯扩散因子，1/m^2；由下式 5-6 计算。

σ_z为垂直扩散参数，m，

$$B=\frac{16}{\sqrt{2\pi^3}}\frac{1}{x\sum z},\quad \sum z=(\sigma_z{}^2+A_b/\pi)^{0.5},\quad \sigma_z=\frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \qquad (5\text{-}6)$$

各关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-23。

表 5-23 各关注点处地面空气浓度计算结果

关注点	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar
与排风口距离 x≤74.53m	9.45	2.67E+01	2.33E+01	2.69
与排风口的距离 x=100m	6.94E-01	1.93	1.49	2.00E-01
与排风口的距离 x=200m	3.34E-01	9.14E-01	6.27E-01	9.77E-02
与排风口的距离 x=300m	2.13E-01	5.74E-01	3.48E-01	6.31E-02
与排风口的距离 x=500m	1.16E-01	3.02E-01	1.44E-01	3.52E-02

空气浸没外照射剂量可由下式 5-7 计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \qquad (5\text{-}7)$$

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；

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 5-24，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子。

表 5-24 剂量转换因子

核素	剂量转换因子	
	空气浸没，(Sv/s)/(Bq/m^3)	吸入，Sv/ Bq
^{11}C	4.89E-14	1.8E-11
^{13}N	4.90E-14	——
^{15}O	4.91E-14	——
^{41}Ar	6.50E-14	——

空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-25。

表 5-25 空气浸没外照射剂量计算结果，mSv/a

关注点	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar	总计
与排风口距离 x≤74.53m	3.42E-03	9.67E-03	8.48E-03	1.3E-03	2.29E-02
与排风口的距离 x=100m	2.51E-04	6.99E-04	5.43E-04	9.63E-05	1.59E-03
与排风口的距离 x=200m	1.21E-04	3.32E-04	2.28E-04	4.70E-05	7.27E-04
与排风口的距离 x=300m	7.72E-05	2.08E-04	1.27E-04	3.03E-05	4.42E-04
与排风口的距离 x=500m	4.19E-05	1.10E-04	5.22E-05	1.69E-05	2.21E-04

5.2.1.4.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由下式计算：

$$H_{h\cdot i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \qquad (5\text{-}8)$$

式中：

$H_{h\cdot i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m^3/h，成人：$1.2m^3/h$；

$g_{h\cdot i}$ 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 5-26。

表 5-26 吸入内照射剂量计算结果，mSv/a

关注点	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar	总计
与排风口距离 x≤74.53m	4.19E-04	——	——	——	4.19E-04
与排风口的距离 x=100m	3.08E-05	——	——	——	3.08E-05
与排风口的距离 x=200m	1.48E-05	——	——	——	1.48E-05
与排风口的距离 x=300m	9.47E-06	——	——	——	9.47E-06
与排风口的距离 x=500m	5.15E-06	——	——	——	5.15E-06

5.2.1.4.2.3 总有效剂量

放射性气体排放所致关注点处公众总有效剂量计算结果列于表 5-27。由此可见放射性气体排放对本项目周围各关注点处公众所致年有效剂量均低于公众年剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-27 放射性气体排放所致关注点处公众总有效剂量计算结果，mSv/a

关注点	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar	总计
与排风口距离 x≤74.53m	3.84E-03	9.48E-03	8.15E-03	2.29E-03	2.38E-02

与排风口的距离 x=100m	2.82E-04	6.99E-04	5.43E-04	9.63E-05	1.62E-03
与排风口的距离 x=200m	1.36E-04	3.32E-04	2.28E-04	4.70E-05	7.43E-04
与排风口的距离 x=300m	8.67E-05	2.08E-04	1.27E-04	3.03E-05	4.52E-04
与排风口的距离 x=500m	4.71E-05	1.10E-04	5.22E-05	1.69E-05	2.26E-04

5.2.1.4.3 公众有效剂量汇总

公众有效剂量计算结果汇总见表 5-28。

表 5-28 公众有效剂量汇总，mSv/a

瞬发辐射外照射[1]/（mSv/a）	天空反散射/（mSv/a）	放射性气体排放/（mSv/a）	合计/（mSv/a）
3.85E-02	3.33E-03	2.38E-02	6.56E-02

注：1、质子治疗装置所在建筑外剂量率水平保守取表 5-21 中地上一层的最大值。

由此可见，质子治疗装置正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 6.56E-02mSv/a，低于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

5.2.2 辐射事故工况下的环境影响

质子治疗装置的核心是回旋加速器，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。

质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或治疗室内部造成的误照射事故，工作人员在加速器大厅或治疗室内部工作期间，质子治疗装置出束造成的误照射事故；

（2）冷却水泄漏事故。

5.2.2.1 人员误照射事故

5.2.2.1.1 事故后果分析

在人员误照射事故中，辐射工作人员在加速器大厅及治疗室内部工作期间，

质子治疗装置出束造成的误照射事故所致人员有效剂量最大，本次评价对该事故期间的人员有效剂量进行估算。

由图 5-13~图 5-17，质子治疗装置出束时，医院辐射工作人员常在的工作区域（主要在治疗床附近）剂量率水平由图中读取约 1.0E+04μSv/h，质子治疗装置设计了完善、多层次和冗余的安全联锁设施，其中在治疗室内墙壁上设置多个急停按钮，辐射工作人员可在事故工况下 1min 内完成按下急停切断束流的操作，因此保守按 1min 进行计算，事故期间工作人员的最大有效剂量约为 1.67E-01mSv。

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。

5.2.2.1.2 事故防范措施

医院采取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员滞留在控制区内，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。

5.2.2.2 冷却水泄露事故

5.2.2.2.1 事故后果分析

冷却水管路上安装有泄漏测量传感器，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。根据“3.3.1.3.2 节”的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员造成辐射影响。

因此，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

5.2.2.2.2 事故防范措施

定期检查冷却水系统运行情况，确认泄漏测量系统的有效性。制定检修操作程序，加强安全文化教育，严格遵守操作程序，防止误操作造成的冷却水泄漏事故。

5.3 硼中子俘获治疗系统

5.3.1 正常运行的环境影响

5.3.1.1 系统年出束时间

根据医院提供的资料， BNCT 的年使用规划列于表 5-29。

表 5-29 BNCT 治疗系统年使用规划

每间治疗室每天治疗人次	4 人次/d
每年治疗天数	365d/a
每间治疗室每年治疗人次	1460 人次/a
每次治疗的平均出束时间	40min/人次
每间治疗室每年治疗病人的出束时间	973.3h/a·间
治疗室每年治疗病人的总出束时间	1946.6h/a
每年每间治疗室其它出束时间（QA）	90h/a·间
BNCT 治疗系统每年总出束时间	2036.6h/a

5.3.1.2 机房屏蔽体外剂量率计算

5.3.1.2.1 计算时使用的源项和模型

本次评价采用 MCNP 进行 BNCT 屏蔽体外剂量率的模拟计算，建立的模型图见图 5-18。

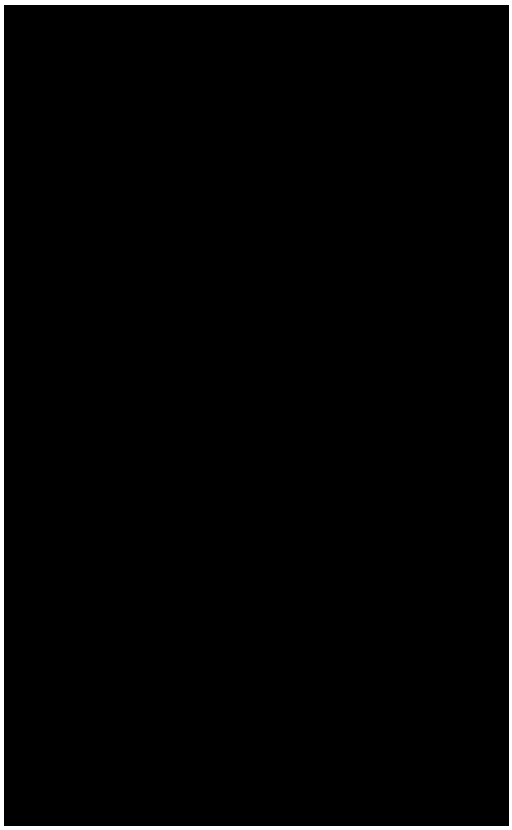


图 5-18 MNCP 建模图

5.3.1.2.2 关注点设置

根据 BNCT 的平面布置及周围环境情况设置了若干关注点，关注点描述见表 5-30，各关注点位置示意图见图 5-19~图 5-21。

表 5-30 BNCT 屏蔽体外关注点位置

源项	序号	点位描述
治疗室 1	53	治疗室 1 北墙外
加速器机房及中子生产机房	54	北侧中子生产机房北墙外
	55	加速器控制室
	56	维修机房
	57	活塞门北侧
	58	活塞门东侧
	59	加速器设备机房
	60	冷却水机房
	61	放射性固体废物暂存间
	62	辐射办公室
	63	硼中子设备用压缩气体机房
治疗室 2	64	预留房间
	65	办公室
	66	模具室

	67	治疗室 2 迷道口
	68	恢复室 2
	69	治疗室 2 治疗控制室
加速器机房及中子生产机房	70	QA/QC 间
	71	机柜设备间
治疗室 1	72	治疗室 1 治疗控制室
	73	恢复室 1
	74	治疗室 1 迷道口
	75	VIP 室
加速器机房及中子生产机房	76	质谱分析间
	77	注射间
治疗室 2	78	模拟定位间
\	79	导医台
	80	物理师办公室
	81	主任办公室
	82	治疗计划室
	83	医生办公室
	84	卫生间
	85	会议室
治疗室 1	86	治疗室 1 顶板上方
	87	治疗室 1 上方管道层
加速器机房	88	加速器机房顶板上方
	89	加速器机房上方管道层
治疗室 2	90	治疗室 2 顶板上方
	91	治疗室 3 上方管道层
中子生产机房	92	中子生产机房顶板上方
	93	中子生产机房上方管道层



图 5-19 BNCT 地下一层关注点平面示意图



图 5-20 BNCT 关注点剖面示意图（1）



图 5-21 BNCT 关注点剖面示意图（2）

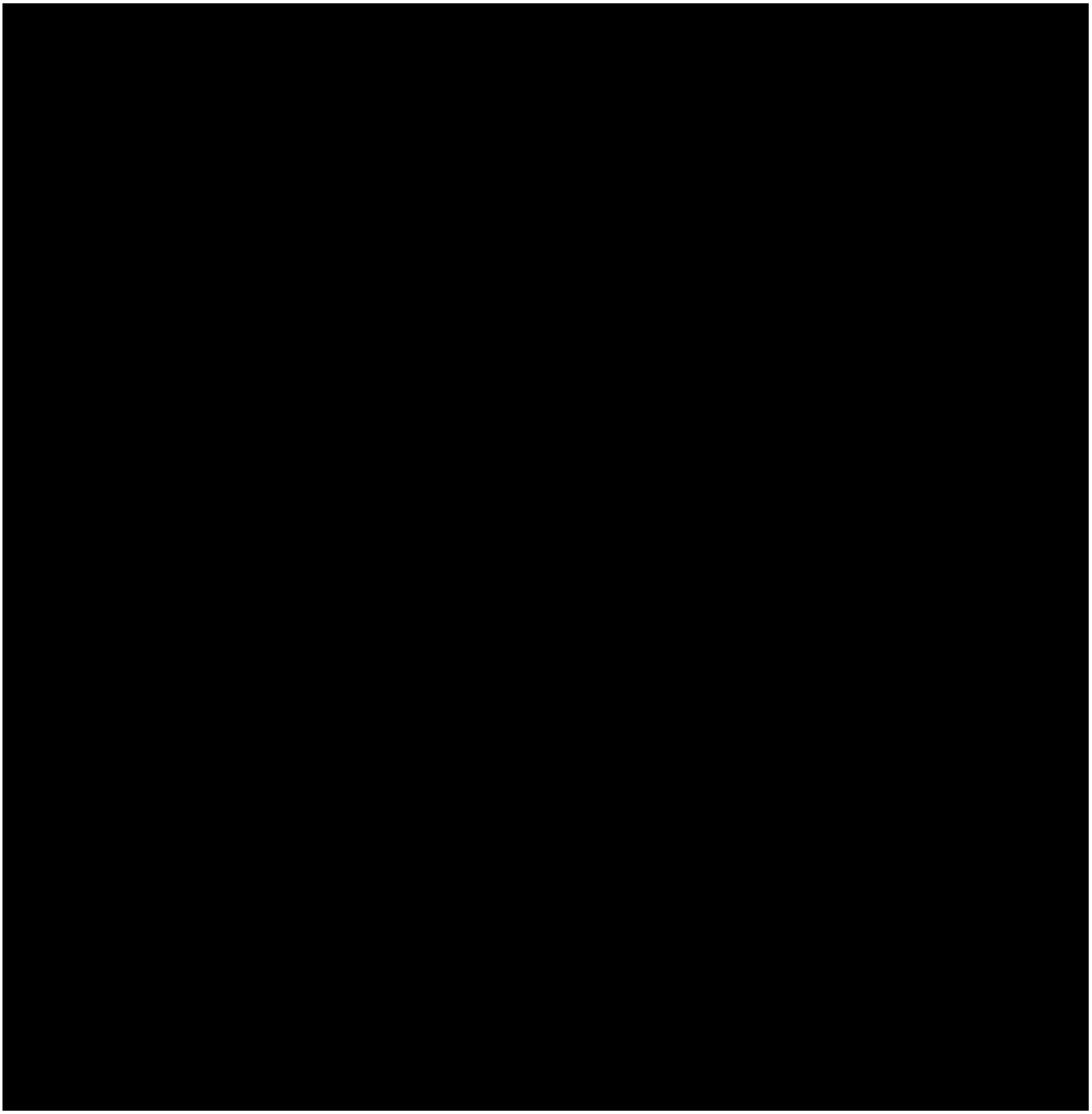
5.3.1.2.3 计算结果

根据 MCNP 的计算结果，本项目使用的 BNCT 屏蔽体外各关注点处的剂量率计算结果如表 5-3 所示，模拟得到的剂量率分布图见图 5-22~图 5-23。

表 5-31 BNCT 屏蔽体外关注点剂量率模拟计算结果/（μSv/h）







5.3.1.1 工作人员有效剂量估算

根据医院提供的资料，BNCT 辐射工作人员主要包括治疗技师、物理师、科室医生和护士。

5.3.1.1.1 治疗技师

治疗技师的工作内容主要包括在治疗前的模拟定位、在模拟定位间给患者摆位和在控制室内操作设备。

5.3.1.1.1.1外照射

5.2.1.1.1.1.1 治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用模拟定位 CT 机对其进行治疗前的模拟定位。本项目每间治疗室每年治疗患者人数为 1460 人次，每名患者治疗次数为 1 次，则治疗人数为 2920 人。

每次模拟定位期间，技师在模拟定位 CT 机房内的工作时间为 5min，模拟定位 CT 出束时技师在控制室内工作时间为 1min。每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目共配备 8 名治疗技师轮班，则每名治疗技师每年参与模拟定位的次数约为 730 次。由此可以计算得出每名技师从事模拟定位期间的有效剂量，列于下表。

表 5-32 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年有效剂量估算结果

工作区域	剂量率水平，mSv/h	年受照时间，h	有效剂量，mSv/a
CT 控制室	2.5E-03	12.2	3.05E-02
总计	——	——	3.05E-02

注：根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h，则 CT 控制室的剂量率保守取 2.5μSv/h。年受照时间为 730 次×1min=730min=12.2h。

5.2.1.1.1.1.2 模拟定位间摆位

BNCT 在模拟定位室进行摆位验证，利用光学摄像头实时捕捉患者治疗位置与治疗计划位置之间的偏差，系统计算偏差后自动调整。摆位时间均不超过

20min，根据 BNCT 满负荷运行情况下规划的工作量，每年需摆位 2920 次，所有治疗技师的年总工作量计算结果列于表 5-33 。共 8 名治疗技师，保守假设每次摆位由 2 名技师同时在场完成，每名治疗技师的年工作量列于表 5-33。

表 5-33 每名治疗技师摆位的年工作量

单次治疗前摆位所需时间，min	年进行治疗前摆位总次数	年进行治疗前摆位总时间，h
20	2920	243.3

表 5-34 患者治疗前摆位期间，治疗技师的年有效剂量

来源	瞬时剂量率，mSv/h	年工作时间，h	年有效剂量，mSv/h
相邻治疗室[1]	2.81E-07	243.3	6.84E-05

注：1. 模拟定位间的瞬时剂量率由相邻治疗室出束所致，剂量率水平取表 5-30 中“关注点 78（模拟定位间）”，即 2.81E-04μSv/h。

5.2.1.1.1.1.3 治疗后转移患者

患者每次治疗结束后，治疗技师需要进入治疗室内，协助患者进入恢复室。此时，患者自身由于受到粒子束流照射产生的感生放射性会对治疗技师产生一定照射。根据第三章表 3-53 的计算结果，停止照射 10 分钟后病人体表 1m 处剂量为 2.43E-04μSv/h，整个过程用时保守考虑约 10min，根据 BNCT 满负荷运行情况下规划的工作量，每年共治疗 2920 人次，共 8 名治疗技师，保守假设每次协助患者进入恢复室由 1 名技师在场完成，因此年总工作时间为（10÷60）×（2920÷8）=60.8h。

由此可计算得出每间治疗室每名治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年有效剂量，结果列于下表。

表 5-35 每位治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年有效剂量

来源	瞬时剂量率，mSv/h	年工作时间，h	年有效剂量，mSv/h
患者	2.43E-07	60.8	1.48E-05
总计	——	——	1.48E-05

5.2.1.1.1.1.4 控制室内

BNCT 出束期间，治疗技师在治疗控制室内工作，其工作期间的有效剂量估算结果列于下表。

表 5-36 治疗技师在治疗控制室内工作期间的有效剂量估算结果

工作区域	剂量率水平[1]，mSv/h	受照时间[2]，h	有效剂量，mSv/h
治疗控制室	1.66E-08	509.2	8.45E-06

注：1.治疗控制室内的剂量率水平保守取表 5-31 中治疗控制室 1 或 2 的剂量率，即 1.66E-05μSv/h；

2.BNCT 的年治疗出束时间为 2036.6h，治疗技师共 8 人轮班，每班 2 人，因此每人受照时间约为 509.2h。

5.3.1.1.1.2 小结

每位治疗技师最大年总有效剂量计算结果列于下表。

表 5-37 每位治疗技师最大年总有效剂量

来源	最大年有效剂量，mSv/a
治疗前模拟定位	3.05E-02
模拟定位间摆位	6.84E-05
治疗后转移患者	1.48E-05
控制室内	8.45E-06
总计	3.06E-02

5.3.1.1.2 物理师

物理师有效剂量主要来自其在治疗计划验证和 QA 工作期间：

（1）治疗计划验证

本项目 BNCT 每年总治疗患者人数为 2920 人次。

本项目共配备 4 名物理师。每次工作由 1 名物理师完成。每名患者进行 1 次治疗计划验证，因此每年进行治疗计划验证次数为 2920 次，则每名物理师每年进行治疗计划验证次数为 730 次。每次治疗计划验证期间的有效剂量保守与每次治疗期间技师的有效剂量取值一致，由表 5-37 保守推算，将技师所有工作均分为两个班次，则其单次工作有效剂量为 3.06E-02mSv/a÷(2920÷2))=2.1E-05mSv/次，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的有效剂量计算结果列于下表。

表 5-38 物理师进行治疗计划验证期间的年有效剂量

工作内容	单次工作有效剂量/（mSv/次）	年工作次数	有效剂量/（mSv/a）
治疗计划验证	2.1E-05	730	1.53E-02

（2）QA

QA 期间，物理师的工作地点包括治疗室内部和治疗控制室，有效剂量估算结果列于下表。

表 5-39 物理师 QA 工作期间年有效剂量算结果

工作地点	剂量率[1]，mSv/h	年工作时间[2]，h	年有效剂量，mSv/a
治疗室内	2.5E-03	45	1.13E-01
治疗控制室	1.66E-08	45	7.47E-07
总计	——	——	1.13E-01

注:1. 物理师在治疗室内工作时，治疗室内工作位的剂量率水平保守考虑为 2.5μSv/h；治疗控制室内的剂量率水平保守取表 5-31 中治疗控制室 1 或 2 的剂量率，即 1.66E-05μSv/h。
2.根据工作负荷规划，每间治疗室 QA 出束时间为 90h，2 间治疗室的 QA 年总出束时间为 180h。共 4 名物理师，每次工作由 1 名物理师完成，则每名物理师的年工作时间为 45h。

（3）小结

根据上述计算结果，可得出物理师的年有效剂量，列于下表。

表 5-40 物理师的年有效剂量

治疗计划验证，mSv/a	QA，mSv/a	总有效剂量，mSv/a
1.53E-02	1.13E-01	1.28E-01

5.3.1.1.3 科室医生

BNCT 科室医生的工作地点主要在医生办公室，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内部，平均每名医生在治疗室内部的工作时间不会超过 30h/年，则科室医生年有效剂量估算结果列于下表。

表 5-41 科室医生年有效剂量估算结果

工作内容	辐射来源	剂量率水平[1]，mSv/h	年受照时间[2]，h	有效剂量，mSv/a
医生办公室	瞬发辐射	1.54E-07	2006.6	3.09E-04
治疗室	相邻治疗室	2.5E-03	30	7.5E-02
	患者感生放射性	2.43E-07		7.29E-06
总计	——	——	2036.6	7.54E-02

注：1. 医生办公室的剂量率水平保守取表 5-31 中关注点 83（医生办公室）的值进行计算，即 1.54E-04mSv/h；
2. 质子治疗装置年总出束时间为 2036.6h，保守假设医生除在治疗室内工作外均在医生办公室工作。

5.3.1.1.4 护士

根据 BNCT 治疗流程，护士在治疗前模拟定位期间，根据工作需要为患者注射造影剂。模拟定位或精确定位时，护士在模拟定位 CT 机房内留针，然后在 CT 控制室操作注射造影剂。每年留针并注射造影剂的操作总次数按模拟定位次数的 1/10 考虑，为 292 人次。留针的时间按 1min/次考虑，注射的时间按 1min/次考虑。共 2 名护士轮班，则每名护士的最大年有效剂量计算结果列于下表。

表 5-42 护士年有效剂量估算结果

工作区域及工作内容		瞬时剂量率，mSv/h	年受照时间，h	年有效剂量，mSv/a
模拟定位	模拟定位 CT 机房内[1]	2.50E-03	2.43	6.08E-03
	CT 控制室	2.50E-03	2.43	6.08E-03
总计		——	——	1.22E-02

注：1. 保守考虑模拟定位 CT 机房内剂量率水平与 CT 控制室相同，均保守取 2.5μSv/h。

5.3.1.1.5 工作人员有效剂量汇总

BNCT 辐射工作人员有效剂量汇总如下表所示。由计算结果可知，本项目 BNCT 运行期间，医院配备的物理师有效剂量最大，个人年最大有效剂量为 1.22E-02mSv/a，未超过本次评价中工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-43 BNCT 运行期间对工作人员所致年有效剂量汇总

人员类别	年有效剂量，mSv/a
治疗技师	3.06E-02
物理师	1.28E-01
科室医生	7.54E-02
护士	1.22E-02

5.3.1.2 公众有效剂量估算

BNCT 正常运行期间，对公众的辐射影响主要来自 BNCT 开机出束期间产生的瞬发辐射直接外照射以及感生放射性气体的排放。

5.3.1.2.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象为 BNCT 辐射工作场所周围近距离范围内的公众，根据本项目 BNCT 工作场所周围环境分布情况，可能受到瞬发辐射影响的公众所受瞬发辐射照射剂量由式（5-3）计算。计算结果列于下表。

表 5-44 公众所受 BNCT 瞬发辐射外照射剂量计算结果

[redacted]

5.3.1.2.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用李红等人在《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》（方栋、李红，辐射防护，2002 年第 22 卷第 6 期）中推荐的简单稀释模式估算 BNCT 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。计算时主要关注排风口近距离范围内公众的有效剂量。

表 5-45 BNCT 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
39.3	5555.2	49.6
临近最高建筑为西北侧四大中心专科楼或西侧特需医疗楼病房楼，高度均为 49.6m		

由表 5-45 所示，BNCT 排风口高度 H＜2.5H_b（H_b为临近最高建筑物高度），对于近距离范围的公众，根据 IAEA NO.19 号报告，当 x≤2.5$\sqrt{A_b}$（X≤74.53m）时，关注点地面空气浓度可由下式计算：

$$c_{a,i}=\frac{P_pQ_i}{\pi u_aH_bK} \qquad (5\text{-}9)$$

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 3-48；

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，根据南京年平均风速，取值 2.6m/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＞74.53m）

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 5-7 计算：

$$c_{a,i}=\frac{P_pBQ_i}{u_a} \qquad (5\text{-}10)$$

式中：

B为在下风距离 x 处的高斯扩散因子，1/m^2；由下式 5-11 计算。

σ_z为垂直扩散参数，m，

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

各关注点处地面空气浓度计算结果列于下表。

表 5-46 各关注点处地面空气浓度计算结果，Bq/m³

关注点	^{41}Ar
与排风口距离 x≤74.53m	4.66E+01
与排风口的距离 x=100m	3.46
与排风口的距离 x=200m	1.69
与排风口的距离 x=300m	1.09
与排风口的距离 x=500m	6.08E-01

空气浸没外照射剂量可由下式 5-12 计算：

$$H_A=t\cdot S_f\cdot C_{a,i}\cdot G_A\cdot T\qquad（5\text{-}12）$$

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；

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，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子。

表 5-47 剂量转换因子

核素	剂量转换因子
	空气浸没，(Sv/s)/(Bq/m³)
^{41}Ar	6.50E-14

空气浸没外照射剂量计算结果见下表。

表 5-48 空气浸没外照射剂量计算结果，mSv/a

关注点	^{41}Ar
与排风口距离 x≤74.53m	2.22E-02
与排风口的距离 x=100m	1.67E-03
与排风口的距离 x=200m	8.13E-04
与排风口的距离 x=300m	5.25E-04

与排风口的距离 x=500m	2.92E-04

5.3.1.2.3 公众有效剂量汇总

公众有效剂量计算结果汇总见表 5-28。

表 5-49 公众有效剂量汇总，mSv/a

瞬发辐射外照射[1]/（mSv/a）	放射性气体排放/（mSv/a）	合计/（mSv/a）
3.82E-02	2.21E-02	6.03E-02

注：1、BNCT 所在建筑外剂量率水平保守取表 5-44 中治疗室、加速器机房或中子生产机房顶板上的最大值

由此可见，BNCT 正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 6.03E-02mSv/a，低于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

同时由于质子治疗装置与 BNCT 存在同时运行的情况，因此公众还需考虑同时受到质子治疗装置与 BNCT 放射性气体排放所致的剂量。

因此公众所受最大剂量保守考虑为质子治疗装置和 BNCT 所致瞬发辐射的最大值与放射性气体排放所致剂量的和，即 3.85E-02（质子瞬发辐射）+3.33E-03（质子治疗装置天空反散射）+2.38E-02（质子治疗装置放射性气体排放）+2.21E-02（BNCT 放射性气体排放）=8.77E-02mSv/a，同样低于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

5.3.2 辐射事故工况下的环境影响

5.3.2.1 事故情景

BNCT 可能发生的事故情景分析如下：

（1）由于安全联锁装置发生故障，辐射工作人员误入加速器机房、中子生产机房、治疗室等，造成的意外照射。或辐射工作人员滞留于上述区域，但 BNCT 出束，造成的意外照射。

（2）放射性废液未经足够的时间衰变进行排放，使排放超出规定的限值，

可能对环境或人体造成危害；放射性固体废物未经足够的时间衰变进行擅自处理，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

（3）换靶过程中发生脱落等事故造成废靶暴露，对周围环境和人员造成辐射影响。

5.3.2.2 事故后果分析

事故情景（1）所致人员有效剂量最大，本次评价对该事故期间的人员有效剂量进行估算。

由图 5-22~图 5-23，BNCT 出束时，医院辐射工作人员常在的工作区域（主要在治疗床附近）剂量率水平由图中读取约 5.6E+05μSv/h，BNCT 设计了完善、多层次和冗余的安全联锁设施，其中在治疗室内墙壁上设置多个急停按钮，辐射工作人员可在事故工况下 1min 内完成按下急停切断束流的操作，因此保守按 1min 进行计算，事故期间工作人员的最大有效剂量约为 93mSv。

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。

5.3.2.3 事故防范措施

针对上述 BNCT 可能发生的事故情景，防范措施如下：

（1）制定自检制度，且严格进行经常性自查，每周自检一次，如发现安全联锁装置、声光报警系统、监视及对讲装置、工作状态指示灯、电离辐射警告标志不够完善或失灵，以及防护门出现故障，应立即补充和修复。

（2）做好设备保养维护工作，定期对设备开展维护维修；加强对辐射工作人员的培训，制定规范的操作规程并落实。

（3）加速器机房、中子生产机房、治疗室等场所均设有监控探头，防护门设有门机联锁装置，控制室内同时工作的人员不少于 2 名，发生人员在防护门关闭前未撤离质子加速器室或治疗室的概率极低，一旦发现此情况，工作人员按下紧急停止开关，可防止人员受到进一步照射，

（4）医院须加强放射性废液的管理，严格控制放射性废液衰变时间，放射

性废液经充分衰变满足规定值后方可排放。

（5）医院须加强放射性废物的管理，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；应与具有相应放射性固体废物处置资质的单位签订处置协议。放入铅储存箱的中子靶，在废靶室内经充分衰变，低于解控水平后，方可按照免管固废处置。

（6）在换靶前应制订完备的工作方案，专业人员严格执行方案，完成上述工作。

5.4 医用电子直线加速器

5.4.1 正常运行期间环境影响分析

5.4.1.1 屏蔽体外剂量率计算

5.4.1.1.1 屏蔽效能核算

5.4.1.1.1.1 计算依据

本次评价中医用电子直线加速器的最高能量为 10MV 和等中心最大输出剂量率为 24Gy/min，主要参数见下表。

表 5-50 医用电子直线加速器用于屏蔽计算的主要参数

射线装置	X 射线最高能量，MV	等中心点输出剂量率，Gy/min
医用电子直线加速器	10	24

5.4.1.1.1.2 不同关注点应考虑的辐射种类

①主屏蔽墙：仅考虑有用束的直接照射；

②与主屏蔽墙直接相连的次屏蔽墙：考虑泄漏辐射和来自患者、机房墙体的散射辐射；

③侧屏蔽墙：仅考虑泄漏辐射；

④迷路入口门处：考虑有用束、患者散射、机头泄漏射线的散射、穿过迷路内墙的泄漏辐射。

5.4.1.1.1.3 计算方法

本次评价主要采用《兆伏级 X、γ 射线放疗设施屏蔽设计和评价》（周启甫，戈立新主编，中国原子能出版社）、NCRP NO.151 号报告及 GBZ 201 系列卫生标准中推荐的计算方法，对医用电子直线加速器机房辐射屏蔽进行估算。

（1）初级辐射

主屏蔽墙外 30cm 处主要受初级 X 射线的影响，参考 NCRP NO.151 报告 P22 中式 2.1~2.4，初级 X 射线屏蔽可由下式 5-13 和式 5-14 计算得出。

$$H_{pri}=\frac{B_{\mathrm{pri}}H_0UT}{d_{\mathrm{pri}}^2} \qquad (5\text{-}13)$$

$$B_{\mathrm{pri}}=10^{-\{1+[\frac{t_{\mathrm{barrier}}-TVL_1}{TVL_e}]\}} \qquad (5\text{-}14)$$

式中，

H_{pri}为距离加速器靶 d_{pri} 米处的剂量率，Sv/h；

B_{pri}为主屏蔽墙的厚度对应的透射因子；

H_0为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U为使用因子，计算瞬时剂量率时取 1；

T为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

$t_{barrier}$为主屏蔽墙的厚度，m；

TVL_1为第一个十分之一值层厚度，m；见表 5-51；

TVL_e为平衡时的十分之一值层厚度，m；见表 5-51；

d_{pri}为靶点至关注点的距离，m。

表 5-51 X 射线对应不同材料的 TVL 值

TVL 值 / 射线类型		混凝土，cm		铅，cm	
		TVL_1	TVL_e	TVL_1	TVL_e
有用束	10MV	41	37	5.7	5.7
泄漏辐射	10MV	35	31	5.7	5.7

注：表中数据取自 NCRP NO.151 中附录 B.2、B.7 和 B.5a。

（2）泄漏辐射

根据 NCRP NP.151 报告中 P33 页式 2.8，泄漏辐射屏蔽可由下式 5-15 和式 5-16 计算得出。

$$H_L = \frac{B_L H_0 T}{1000 d_L^2} \qquad (5\text{-}15)$$

$$B_L = 10^{-\{1+[\frac{t_{barrier}-TVL_1}{TVL_e}]\}} \qquad (5\text{-}16)$$

式中，

H_L 为距离加速器等中心点 d_L 米处的剂量率，Sv/h；

1/1000 为泄漏辐射率，取 0.1%；

B_L 为次蔽墙的厚度对应泄漏辐射的透射因子；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

T 为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

TVL_1 为泄漏辐射十分之一值层厚度，m；

TVL_e 为泄漏辐射平衡时的十分之一值层厚度，m；

d_L 为靶点距关注点的距离，m。

（3）散射辐射

根据 NCRP NP.151 报告中 P32 页式 2.7，散射辐射可由下式 5-17 和式 5-18 计算。

$$H_{PS} = \frac{B_{PS}\alpha H_0 T \frac{F}{400}}{d_{sca}^2 d_{sec}^2} \qquad (5\text{-}17)$$

$$B_{PS}=10^{-\frac{t_{barrier}}{TVL_{sca}}} \qquad (5\text{-}18)$$

式中，

H_{PS}为距离患者 d_{sec} 米处的剂量率，Sv/h；

B_{PS}为次蔽墙的厚度对应散射辐射的透射因子；

d_{sca}为靶点至患者的距离，m；

d_{sec}为患者至关注点的距离，m；

α为患者体表对初级辐射束的散射比，由入射的 X 射线能量及散射的角度决定，；

H_0为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

T为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

TVL_{sca}为患者散射辐射十分之一值层厚度，m；

F—患者等中心 1m 处照射野面积，取 40×40cm^2，保守安全最大面积。

5.4.1.1.1.4 计算结果

计算时在医用电子直线加速器机房外设置了若干关注点，见图 5-25~图 5-26。医用电子直线加速器机房屏蔽体外各关注点剂量率计算参数和结果见表 5-52。

表 5-52 医用电子直线加速器机房关注点剂量率计算结果（10MV、24Gy/min）

关注点	周围环境	射线类型	H_0，μGy/h	$d_{pri}/d_L/d_{sec}$，m	$t_{barrier}$，cm	透射因子 B	H，μSv/h	合计，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
A1	土层	主束	1.44E+09	7.50	300	1.00E-08	2.56E-01	2.56E-01	5500
A2	土层	主束	1.44E+09	7.50	300	1.00E-08	2.56E-01	2.56E-01	5500
A3	门诊大厅入口前空地	主束	1.44E+09	6.46	300	1.00E-08	3.45E-01	3.45E-01	10
a1	土层	漏射	1.44E+09	8.22	197	5.95E-07	6.34E-02	8.83E-02	5500
		散射	1.44E+09	8.22	197	9.21E-08	2.50E-02		
a2	土层	漏射	1.44E+09	8.22	197	5.95E-07	6.34E-02	8.83E-02	5500
		散射	1.44E+09	8.22	197	9.21E-08	2.50E-02		
a3	走廊	漏射	1.44E+09	8.22	197	5.95E-07	6.34E-02	8.83E-02	10
		散射	1.44E+09	8.22	197	9.21E-08	2.50E-02		
a4	走廊	漏射	1.44E+09	8.22	197	5.95E-07	6.34E-02	8.83E-02	10
		散射	1.44E+09	8.22	197	9.21E-08	2.50E-02		
a5	门诊大厅入口前空地	漏射	1.44E+09	7.46	208	2.63E-07	3.40E-02	4.62E-02	10
		散射	1.44E+09	7.46	208	3.73E-08	1.23E-02		
a6	门诊大厅入口前空地	漏射	1.44E+09	7.46	208	2.63E-07	3.40E-02	4.62E-02	10
		散射	1.44E+09	7.46	208	3.73E-08	1.23E-02		
a7	硼中子二级配电室	漏射	1.44E+09	5.20	170	4.42E-06	1.18E+00	1.18	10
a8	控制室	漏射	1.44E+09	9.0	290	5.95E-10	5.28E-05	5.28E-05	2.5
a9	水冷机房	漏射	1.44E+09	9.76	163	7.43E-06	5.62E-01	5.62E-01	10
a10	卫生间	漏射	1.44E+09	5.41	177	2.63E-06	6.46E-01	6.46E-01	10

根据上述计算结果，医用电子直线加速器机房屏蔽体外剂量率水平均低于其剂量率控制水平。

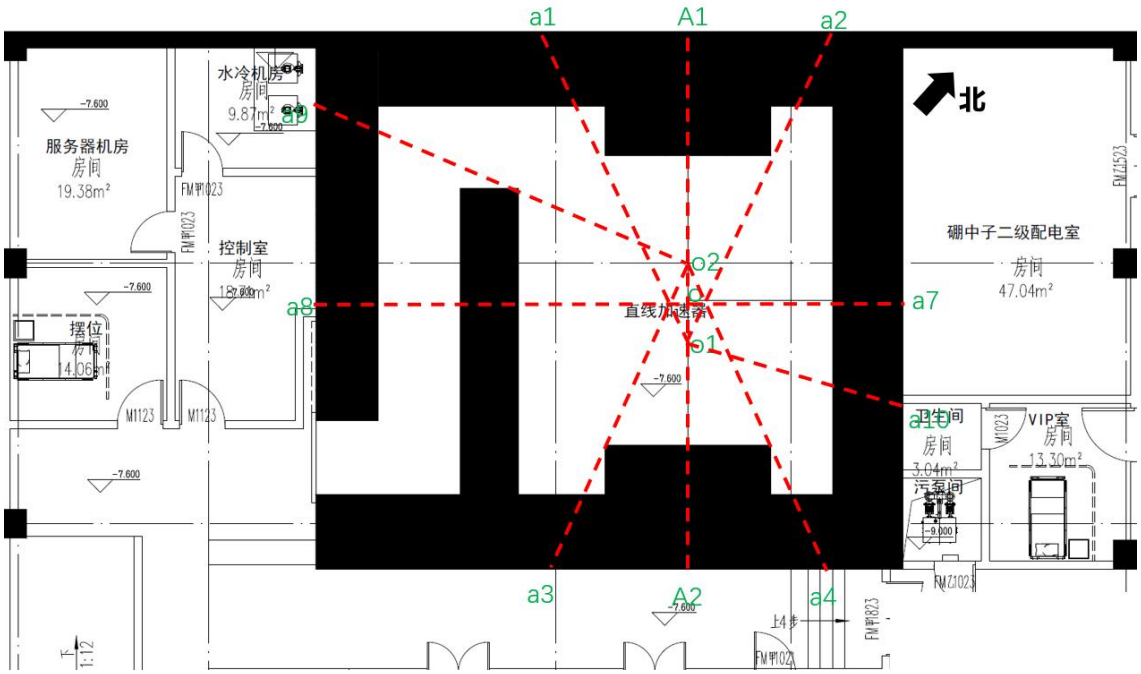


图 5-24 医用电子直线加速器机房屏蔽体外关注点示意图（平面）

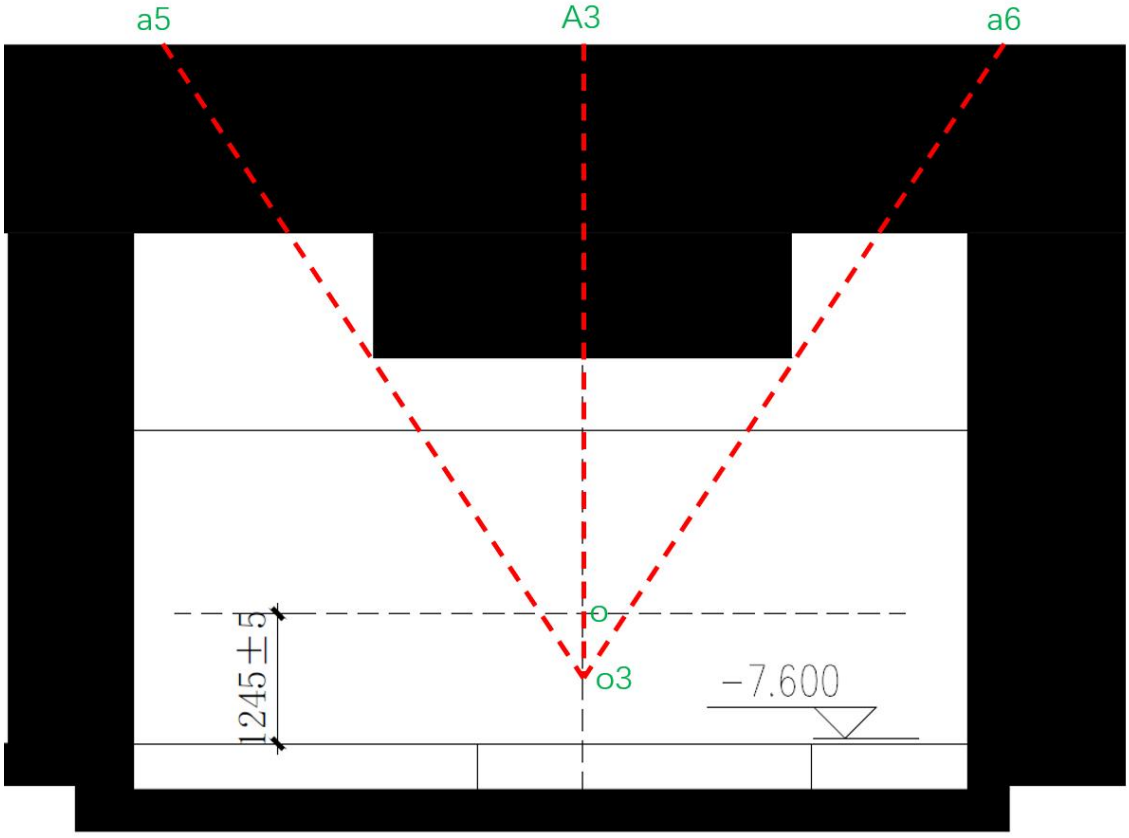


图 5-25 医用电子直线加速器机房屏蔽体外关注点示意图（剖面）

5.4.1.1.2 迷路入口剂量率计算

5.4.1.1.2.1 计算方法

① H_{PS}（患者散射辐射）

参照 NCRP NO.151 号报告 P38 式 2.11，H_{ps} 可由下式 5-19 计算：

$$H_{PS}=\frac{a(\theta)H_0(\frac{F}{400})\alpha_1 A_1 \alpha_2 A_2}{(d_0 d_1 d_2 d_3)^2} \qquad (5\text{-}19)$$

式中，

H_{PS} 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U为使用因子，取 1；

F为患者等中心 1m 处照射野面积，取 40×40cm^2，保守安全最大面积。

$a(\theta)$为患者散射的初级辐射以一定角度入射到 K 墙的散射比；

α_1为墙 K 对患者散射辐射的反散射系数；

A_1为患者散射至墙 K 的有效散射面积（A_1的长度×机房净高），m^2；

α_2为墙 P 对患者散射辐射的反散射系数；

A_2为散射至墙 P 的有效散射面积（A_2的长度×机房净高），m^2；

d_0为靶点至患者的距离，m；

d_1为患者至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_2为散射体 K 墙到散射体 P 墙迷路中心线的距离，m；

d_3为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

② Hs（墙的散射辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P35 式 2.9，Hs 可由下式 5-20 计算：

$$H_S = \frac{H_0 U \alpha_0 A_0 \alpha_3 A_3 \alpha_4 A_4}{(d_4 d_5 d_6 d_7)^2} \qquad (5\text{-}20)$$

式中：

H_s 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U 为使用因子，取 1；

α_0 为主束散射面 L 墙的反散射系数；

A_0 为等中心 1m 处最大照射野投影在主屏蔽墙 L 上的面积，m^2；

α_3 为主束经迷路外墙 M 第二次散射时的反射系数；

A_3 为主束散射面 L 墙的散射线经过迷路口内口发散到迷路外墙内表面的散射面积，m^2；

α_4 为主束经墙体 P 第二次散射时的反射系数；

A_4 为主束散射到墙体 P 表面的散射面积，m^2；

d_4 为靶点至主束散射面 L 墙的距离，m；

d_5 为主束散射面中心点经迷路内口的边缘至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_6 为散射体 K 墙到散射体 P 墙迷路中心线的距离，m；

d_7 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

③ H_{LS}（机头泄漏在墙上的散射辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P37 式 2.10，Hs 可由下式 5-21 计算：

$$H_{LS}=\frac{L_f H_0 U \alpha_5 A_5 \alpha_6 A_2}{(d_8 d_2 d_3)^2} \qquad (5\text{-}21)$$

式中：

H_{LS} 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

L_f 为距靶 1m 处装置头泄漏辐射率，取 0.001；

H_0 为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U 为使用因子，取 1；

α_5 为 K 墙对装置头泄漏辐射的第一次反散射系数；

A_5 为装置头泄漏辐射至墙 K 的有效散射面积（A_5 的长度×机房净高），m^2；

α_6 为 P 墙对装置头泄漏辐射的第二次反散射系数；

A_2 为散射至墙 P 的有效散射面积（A_2 的长度×机房净高），m^2；

d_8 为靶至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_2 为散射体 K 墙到入口处的垂直距离，m；

d_3 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

④ H_{LT}（穿过迷道墙的机头泄漏辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P38 式 2.12，H_{LT}可由下式 5-22 和式 5-23 计算：

$$H_{LT}=\frac{L_f H_0 UB}{d_L^2} \qquad (5\text{-}22)$$

$$B_{\mathrm{L}}=10^{-\{1+[\frac{t_{barrier}-TVL_1}{TVL_e}]\}} \qquad (5\text{-}23)$$

式中：

H_{LT}为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

L_f为距靶 1m 处装置头泄漏辐射率，取 0.001；

H_0为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处的最大输出剂量率，Gy/h；

U为使用因子，取 1；

B为迷路内墙对装置头泄露辐射的透射因子；

d_L为靶经迷路内墙至迷路入口处的距离，m；

$t_{barrier}$为泄漏射线由装置头斜射至迷路入口处穿过迷路内墙的有效厚度，m；

TVL_1为十分之一值层厚度，m；

TVL_e为平衡时的十分之一值层厚度，m。

⑤ $H_{Tot-shield}$（经防护门屏蔽后的总剂量率）

根据 NCRP NO.151 号报告 P42 式 2.22，$H_{Tot\text{-}shield}$可由下式 5-24 计算。

$$H_{Tot-shield}=H_{Tot}\times 10^{-\frac{t_{barrier}}{TVL_{Pb}}}+H_{LT} \qquad (5\text{-}24)$$

其中：$H_{Tot}=H_{PS}+H_{LS}+H_S$

式中：

$t_{barrier}$—防护门的铅当量，20mm；

TVL_{pb}—取 5.7mm， The TVL for scattered and leakage photons (H_{Tot})varies between 3 and 6 mm of lead depending on the maze length(McGinley, 2002)。

5.4.1.1.2.2计算结果

医用电子直线加速器机房迷路各路径示意图见图 5-27~图 5-31，医用电子直线加速器机房迷路入口处的剂量率计算结果列于表 5-53~表 5-56。

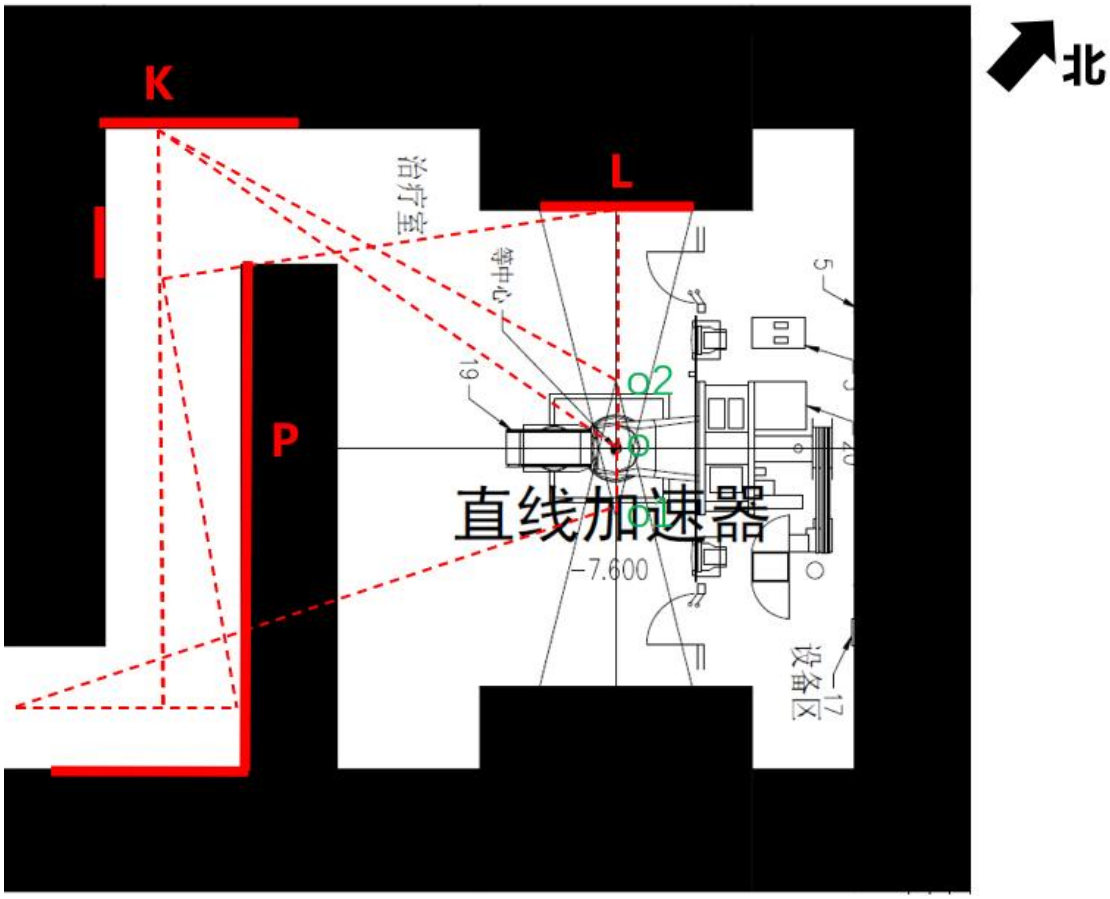


图 5-26 医用电子直线加速器机房迷路路径示意图

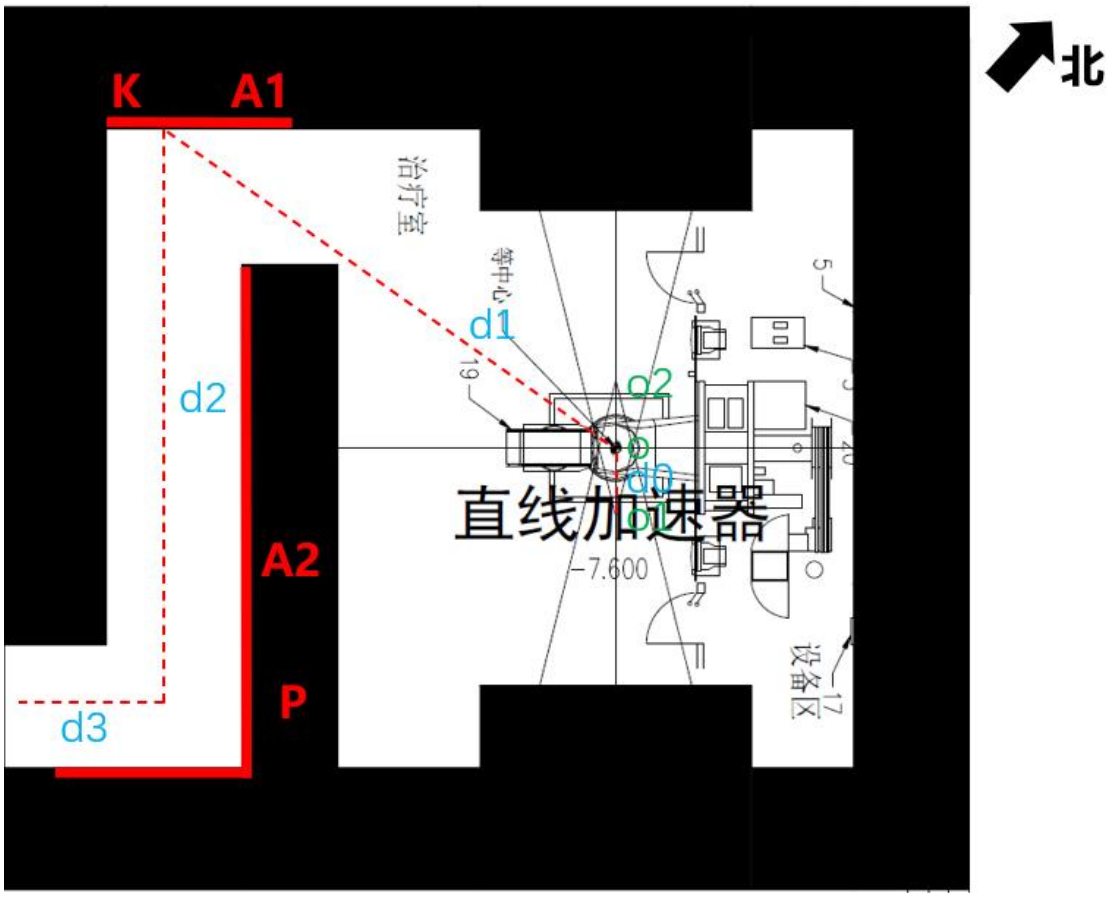


图 5-27 H_{PS} 路径示意图

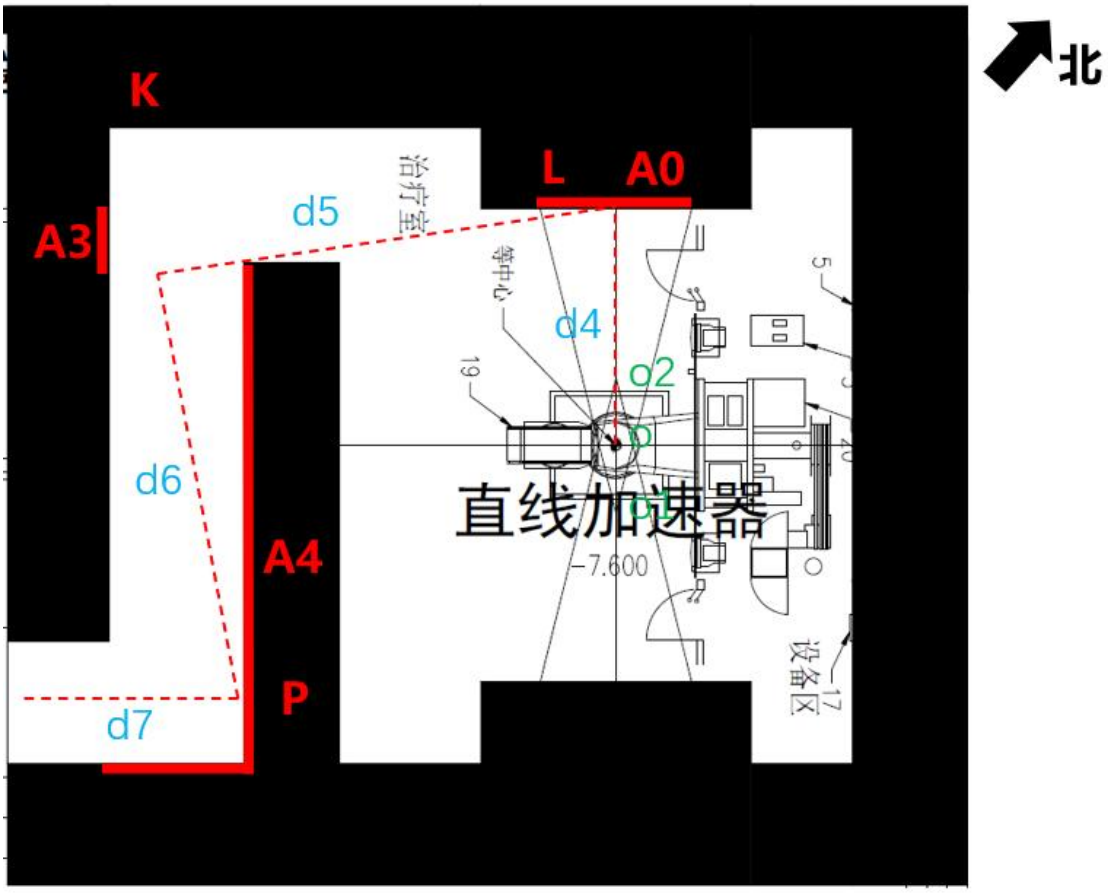


图 5-28 H_S 路径示意图

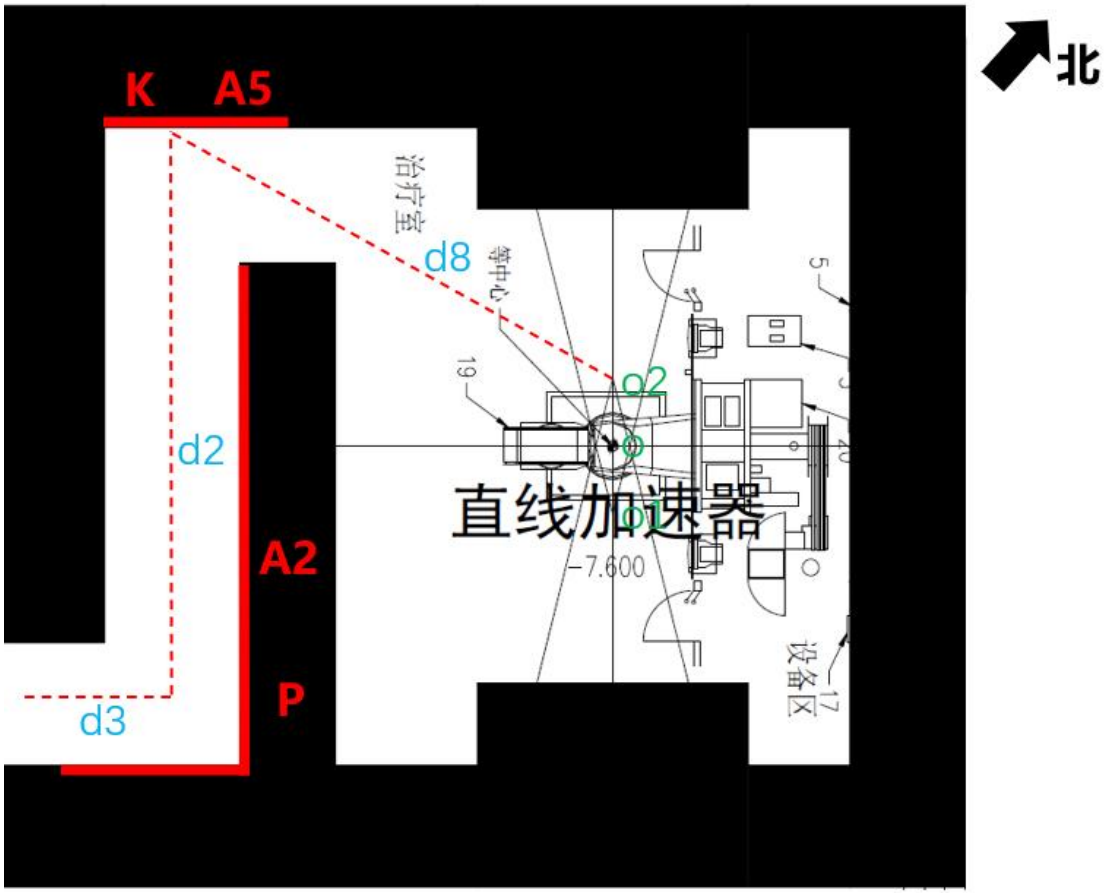


图 5-29 H_{LS} 路径示意图

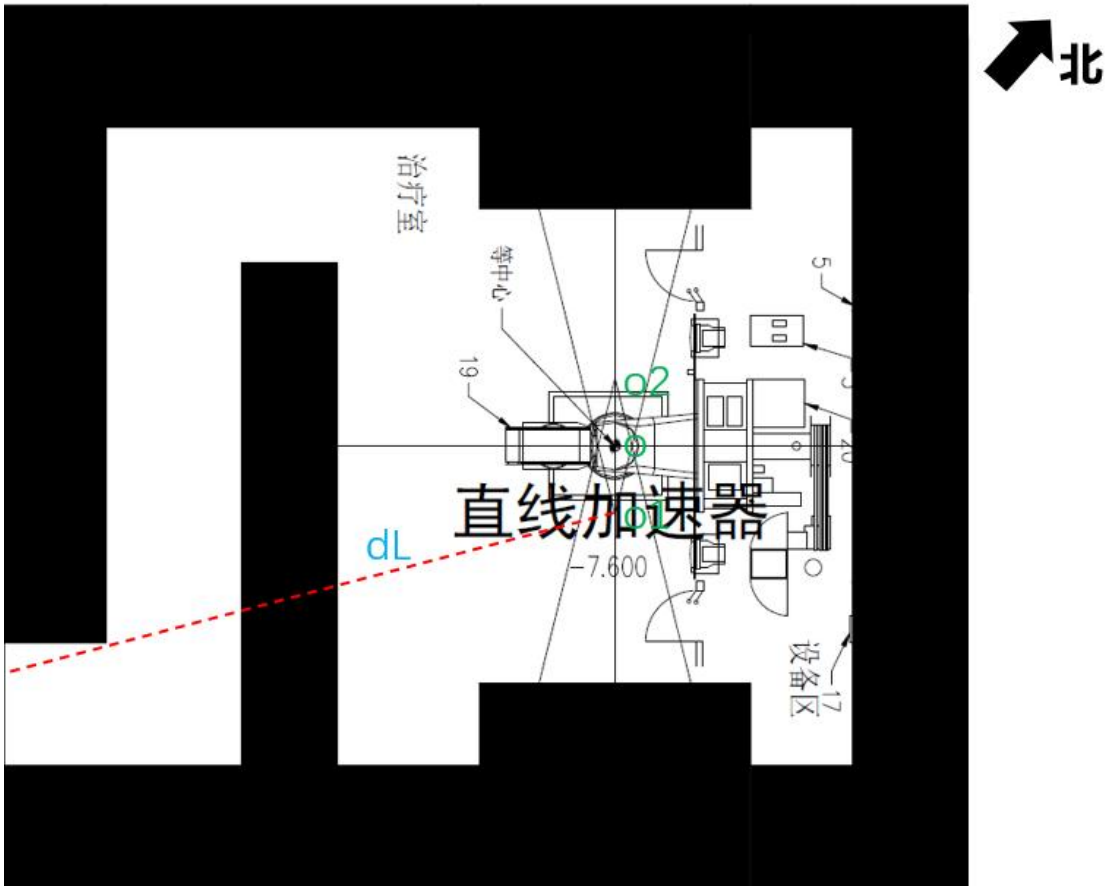


图 5-30 H_{LT} 路径示意图

表 5-53 H_{PS} 数值计算结果

参数	10MV，24Gy/min
H_{PS}，Sv/h	9.87E-05
H_0，Gy/h	1440
U	1
F，cm^2	1600
a(θ)	1.35E-03
α1	0.022
A1，m^2	11.56
α2	0.036
A2，m^2	49.25
d0，m	1
d1，m	8.02
d2，m	9.40
d3，m	2.50

注：1.a(θ)值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.4，保守取 X 射线能量为 10MV，入射角为 45°时的数值

2. α_1 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b，取 0.5MeV X 射线，入射角为 45°，反射角为 0°的数值，为 0.022；

3. α_2 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b，保守取 0.25MeV X 射线，入射角为 45°，反射角为 0°的数值，为 0.036。

表 5-54 H_S 数值计算结果

参数	10MV，24Gy/min
H_S，Sv/h	3.02E-06
H_0，Gy/h	1440
U	1
α0	2.10E-03
A0，m^2	10.98
α3	1.30E-03
A3，m^2	5.39
α4	3.60E-02
A4，m^2	49.25
d4，m	3.50
d5，m	6.57
d6，m	6.43
d7，m	2.50

注：1. α_0 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8a，X 射线能量为 10MV，入射角为 0°，反射角为 75°时的数值；

2. α_3 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8a。通常取 0.5MeV X 射线，入射角为 0°，反射角为 60°的数值；

3. α_4 值取自 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8a。保守取 0.25MeV X 射线，入射角为 45°，反射角为 0°的数值。

表 5-55 H_{LS} 数值计算结果

参数	10MV，24Gy/min
H_{LS}，Sv/h	4.10E-06
H_0，Gy/h	1440
U	1
L_f	0.001
α5	6.00E-03
A5，m^2	13.23
α6	0.0225
A2，m^2	49.25
d8，m	7.48
d2，m	9.40
d3，m	2.50

注 1. α_5 值参考 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b。对于直线加速器，保守取 10MV X 射线，入射角为 45°，反射角为 75°的数值，为 6.0×10^{-3}；

2.α_6 值保守参考 NCRP NO.151 报告附录 B 表 B.8b。取 0.5MeV X 射线，入射角为 45°，反射角为 30°的数值，为 0.0225。

表 5-56 H_{LT} 数值计算结果

参数	10MV，24Gy/min
H_{LT}，Sv/h	4.72E-07
B	2.83E-05

H_0，Gy/h	1440
U	1
L_f	0.001
d_L，m	9.29
$t_{barrier}$	1.45

5.4.1.1.2.3 小结

根据上述计算结果，考虑各机房防护门屏蔽后，医用电子直线加速器机房迷路入口处的剂量率计算结果列于下表。根据计算结果，医用电子直线加速器机房迷路防护门外剂量率均低于其剂量率控制水平。

表 5-57 医用电子直线加速器机房迷路防护门外 X 射线剂量率计算结果

路径	参数取值及计算结果
患者散射辐射 H_{PS}，Sv/h	9.87E-05
墙的散射辐射 H_S，Sv/h	3.02E-06
机头泄漏在墙上的散射辐射 H_{LS}，Sv/h	4.10E-06
穿过迷道墙的机头泄漏辐射 H_{LT}，Sv/h	4.72E-07
$H_{Tot}=H_{PS}+H_S+H_{LS}$，Sv/h	1.06E-04
防护门铅厚度，mm	20
TVL_{Pb}，mm	5.7
经铅防护门屏蔽后散射辐射和泄漏辐射所致总的剂量当量，μSv/h	5.05E-01

5.4.1.1.3 主屏蔽墙宽度核算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），本项目主屏蔽墙均为内凸，因此对主屏蔽墙的宽度利用下式 5-25 计算，计算结果列于表 5-58。

$$Y=(100+a+X_2)tg14°+30 \qquad (5\text{-}25)$$

式中：

Y 为主屏蔽墙半宽，cm；

a 为等中心点到主屏蔽墙的距离，cm；

X_2 为主屏蔽墙内凸部分的厚度，cm。

表 5-58 医用电子直线加速器机房主屏墙宽度核算结果

主屏蔽墙位置	a，cm	X_2，cm	主屏蔽宽度计算结果，cm	实际宽度，cm	是否满足
医用电子直线加速器机房北侧主屏蔽墙	350	120	344.2	400	是
医用电子直线加速器机房南侧主屏蔽墙	350	120	344.2	400	是
医用电子直线加速器机房顶部主屏蔽墙	245.5	120	292.1	400	是

5.4.1.2 工作量规划

根据 3.2.2.4 小节，本项目医用电子直线加速器每年最多工作 48 周，每周工作 5 天。每台设备计划最多治疗 50 次/天，平均每人次照射 3min，则每台设备的年治疗出束时间最多为 600h。此外每台设备的年 QA 出束时间最多为治疗时间的 15%，即 90h，则每台设备治疗加 QA 的年总出束时间最多为 690h。

5.4.1.3 工作人员有效剂量估算

医用电子直线加速器的辐射工作人员主要包括医生、物理师、技师和护士。

5.4.1.3.1 医生

科室医生的工作地点主要在医生办公室，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内。由于医生办公室与机房距离较远，根据屏蔽体外剂量率计算结果，保守以屏蔽体外剂量率水平的最大值，关注点 a10（卫生间），即 6.46E-01 μSv/h 作为参考。预计每名医生在治疗室内的工作时间最多不超过 50h/年，则直加医生年有效剂量估算结果列于下表。

表 5-59 直加医生年有效剂量估算结果

岗位	工作地点	剂量率[1]，μSv/h	年受照时间，h	有效剂量，mSv/a
医生	医生办公室	6.46E-01	50	3.23E-02

5.4.1.3.2 技师

根据治疗流程，技师的工作内容主要包括治疗前模拟定位、在机房内给患者摆位以及在控制室内操作设备出束，在机房内给患者摆位时无相邻治疗室出

束导致的辐射影响（质子治疗装置与 BNCT 距离较远，对治疗室内的辐射工作人员影响可忽略不计）。

5.4.1.3.2.1 在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用模拟 CT 对其进行治疗前的模拟定位。本项目直线加速器每年治疗总人次为 12000 人次，按每名患者治疗 10 次估计，则每年技师需要治疗前模拟定位总次数为 1200 次。

每次模拟定位期间，按在模拟 CT 机房内摆位 5min、在控制室内操作模拟 CT 出束 1min 考虑，每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目共配备 4 名技师轮班，则每名技师每年参与模拟定位的次数约为 600 次。由此可计算得出每名技师从事模拟定位工作期间的有效剂量，列于下表。

表 5-60 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年有效剂量估算结果

工作区域	剂量率[1]，μSv/h	年受照时间，h	年有效剂量，mSv/a
模拟 CT 控制室	2.5	10	2.5E-02
注：1. 根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h，则 CT 控制室的剂量率保守取 2.5μSv/h。			

5.4.1.3.2.2 在控制室内操作装置出束

医用电子直线加速器每年总治疗出束时间为 600h（因技师不参与 QA，故不考虑 QA 出束时间），本项目共配备 4 名技师，控制室需 2 名技师同时工作，则每名技师在每间直加控制室内的年受照时间为 300h。则技师在控制室内工作期间的年有效剂量估算结果列于下表。

表 5-61 技师在控制室内工作期间的有效剂量估算结果

工作区域	剂量率[1]，μSv/h	年受照时间，h	有效剂量，mSv/a
控制室	5.28E-05	300	1.58E-05

5.4.1.3.2.3 小结

根据上述分析，将本项目技师年总有效剂量计算结果列于下表。

表 5-62 本项目技师年总有效剂量

工作岗位	工作内容	年有效剂量，mSv/a
技师	在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位	2.5E-02

	在控制室内操作装置出束	1.58E-05
	总计	2.5E-02

5.4.1.3.3 物理师

物理师的有效剂量主要来自治疗计划验证和 QA 工作期间，工作地点在医用电子直线加速器治疗室及其控制室。

（1）治疗计划验证

每位患者需要物理师做一次治疗计划验证，则每年治疗计划验证总次数为 1200 次。本项目共配备 3 名物理师，则每名物理师每年进行治疗计划验证的次数为 400 次。每次治疗计划验证期间的有效剂量保守与每次治疗期间技师的有效剂量取值一致，将技师所有工作均分为两个班次，则其单次工作有效剂量为 2.5E-02mSv/a÷(1200÷2))=4.17E-05mSv/次，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的年有效剂量计算结果列于下表。

表 5-63 物理师进行治疗计划验证期间的年有效剂量

工作内容	单次工作有效剂量，mSv/次	年工作次数	有效剂量，mSv/a
治疗计划验证	4.17E-05	400	1.67E-02

（2）QA

QA 期间，物理师的工作地点包括机房内和控制室。在机房内工作时无相邻治疗室出束导致的辐射影响（质子治疗装置与 BNCT 距离较远，对治疗室内的辐射工作人员影响可忽略不计），医用电子直线加速器的 QA 年总出束时间为 90h，共 3 名物理师，则每年每名物理师在控制室内的时间为 30h。则物理师 QA 工作期间的年有效剂量估算结果列于下表。

表 5-64 物理师 QA 工作期间年有效剂量算结果

工作区域	工作地点	剂量率，μSv/h	年工作时间，h	年有效剂量，mSv/a
医用电子直线加速器	控制室	5.28E-05	30	1.58E-06
	总计			1.58E-06

（3）小结

根据上述计算结果，可得出放疗科物理师的年有效剂量，列于下表。

表 5-65 物理师的年有效剂量

工作岗位	工作内容	年有效剂量，mSv/a
放疗科物理师	治疗计划验证	1.67E-02
	QA	1.58E-06
	总计	1.67E-02

5.4.1.3.4 护士

根据治疗流程，护士在治疗前的模拟定位期间，在技师操作模拟定位 CT 时，根据工作需要为患者注射造影剂。护士在模拟 CT 机房内留针，然后在 CT 控制室远程操作注射造影剂。每年的操作总次数按模拟 CT 定位次数的 1/10 考虑，即 120 次。留针的时间按 1min/次考虑，注射造影剂的时间按 1min/次考虑。共 1 名护士，则每名护士的年有效剂量计算结果列于下表。

表 5-66 护士年有效剂量计算结果

工作区域及工作内容		**瞬时剂量率，mSv/h**	**年受照时间，h**	**年有效剂量，mSv/a**
模拟定位	模拟定位 CT 机房内 [1]	2.50E-03	2	5.0E-03
	CT 控制室	2.50E-03	2	5.0E-03
总计		——	——	1.0E-02

注：1. 保守考虑模拟定位 CT 机房内剂量率水平与 CT 控制室相同，均保守取 2.5μSv/h。

5.4.1.3.5 小结

本项目辐射工作人员的最大年有效剂量汇总如表 5-70 所示。由结果可知，医用电子直线加速器的辐射工作人员中医生年有效剂量最大，个人年最大有效剂量为 3.22E-01mSv，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-67 辐射工作人员有效剂量汇总

人员类别	年有效剂量，mSv/a
医生	3.22E-02
技师	2.5E-02
物理师	1.67E-01
护士	1.0E-02

5.4.1.4 公众有效剂量估算

瞬发辐射主要影响对象为各直线加速器治疗室周围近距离范围内的公众。

公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果列于下表。由计算结果可知，各直线加速器治疗室正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 5.09E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-68 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

关注点	周围环境	居留因子	瞬时剂量率，μSv/h	年受照时间，h	年有效剂量，mSv/a
A3	门诊大厅入口前空地	1/16	3.45E-01	690	1.49E-02
a3	走廊	1/16	8.83E-02	690	3.81E-03
a4	走廊	1/16	8.83E-02	690	3.81E-03
a5	门诊大厅入口前空地	1/16	4.62E-02	690	1.99E-03
a6	门诊大厅入口前空地	1/16	4.62E-02	690	1.99E-03
a7	硼中子二级配电室	1/16	1.18	690	5.09E-02
a9	水冷机房	1/16	5.62E-01	690	2.42E-02
a10	卫生间	1/16	6.46E-01	690	2.79E-02
A3	门诊大厅入口前空地	1/16	4.45E-01	690	1.92E-02
a3	走廊	1/16	3.38E-03	690	1.46E-04
a4	走廊	1/16	3.02E-03	690	1.30E-04
a5	门诊大厅入口前空地	1/16	9.42E-04	690	4.06E-05

5.4.2 事故影响分析

5.4.2.1 事故类型

医用电子直线加速器运行期间可能发生的辐射事故中，最严重的为人员误照事故。当加速器正在出束时因门机联锁失效等原因人员误入机房内，或是工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工作时加速器开机出束，会造成人员误照。

5.4.2.2 事故后果分析

本项目保守假设辐射工作人员到达迷道口处发现设备误出束，此时剂量率

水平最大为 1.06E-04Sv/h（无防护门屏蔽时），以 10s 为工作人员发现误出束后的撤离时间，则由此可计算得出发生该类事故期间，工作人员最大有效剂量为 2.94E-04mSv。

电离辐射引起的生物效应包括随机效应和确定性效应。随机效应的发生不存在剂量的阈值，其发生几率与有效剂量的大小有关，如遗传效应和某些躯体效应（即癌症）。确定性效应的发生存在阈值效应，其效应的严重程度随有效剂量的大小而异，剂量愈高则效应的严重程度愈大。

5.4.2.3 事故防范措施

（1）机房设有声光报警、工作状态指示、门机联锁、视频监控系统、急停按钮、紧急开门按钮等一系列冗余的安全措施，可有效防止该事故发生。此外，辐射工作人员进入机房内工作时，需佩戴个人剂量报警仪。一旦出现误照情况，报警仪会发出报警信号提醒工作人员立即撤出。

（2）此外，为防止人员误留在机房内受到误照射，要求在每次出束前，工作人员在撤离前必须清点人员，按程序对机房进行全视角搜寻，确认无误后，方可出束。

（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）定期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）医院在采购设备时应充分考虑生产厂家的售后产品技术支持，提高产品可靠性。在维护和维修时，不可擅自解除联锁系统。

5.5 III 类射线装置

III 类射线装置包括质子治疗装置每间治疗室配置的 X 射线影像系统以及地上一层模拟定位 CT 机房的模拟定位 CT 机，关于 X 射线影像系统和模拟定位

CT 机正常运行的辐射影响已包括在 5.2.1 小节和 5.4.1 小节中进行了描述，本小节主要针对事故类型和事故防范措施进行描述。

（1）事故类型

III 类射线装置运行期间，可能出现的辐射事故（事件）类型如下：

1）工作人员在防护门关闭前尚未撤离机房，III 类射线装置运行可能产生误照射。

2）安全联锁装置发生故障状况下，人员误入正在运行的治疗室内。

3）滥用 X 射线对患者进行诊断、治疗，造成病员受到不必要的照射。

（2）风险防范措施

1）按操作规程定期对各个联锁装置进行检查，发现故障及时清除，严禁在警示灯失效的情况下违规操作。

2）撤离机房时清点人数，必须按程序对机房进行全视角搜寻，对滞留机房内的无关人员强行劝离。有外来人员进入时，工作人员应根据情况，采取急停或相应措施，防止外来人员受到误照射。

3）辐射工作人员必须加强辐射安全与防护知识培训，提高防护技能，避免犯常识性错误；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）医院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。

6 辐射安全管理

6.1 辐射安全与环境保护管理机构

6.1.1 机构和人员

医院目前已成立了辐射安全管理委员会，负责全院的辐射安全与环境保护管理工作，委员会由主任委员、副主任委员、委员、总干事及干事组成。其中主任委员由分管医工副院长担任，全面负责辐射防护和安全管理的领导工作，副主任委员由影像部、医务处、医学工程处主管担任，委员由核医学科、放疗科、介入中心、口腔科、护理部、人事处、风管科主管担任，总干事由医学工程处主管担任。干事由医学工程处、医务处的工作人员担任，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。

辐射安全管理委员会的主要职责如下：

（1）贯彻落实国家辐射安全相关法律法规，完善院内辐射安全管理制度，制定年度辐射防护工作计划，完成医院辐射防护年度工作计划；

（2）常态化开展院内辐射安全风险梳理分析与隐患排查治理，对重大隐患制定专项整改措施并跟踪落实；

（3）负责院内射线装置、放射源作业场所安全管理，督导落实辐射防护监测、设备日常质控与检修维护工作；

（4）统筹辐射工作人员职业健康管理，落实人员培训、职业体检、个人剂量监测工作，定期组织辐射防护学习交流与讲座，提升人员安全专业能力。

（5）制定辐射安全事故应急预案，组织年度应急演练，保障辐射安全管理投入，推进辐射安全标准化评定与核安全文化建设工作。

6.1.2 辐射工作人员管理

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。”本项目拟配备 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，同时作为辐射安全专职管理人员。

本项目的辐射工作人员主要为辐射防护负责人、医生、技师、物理师、护士等。医院拟制定辐射工作人员培训计划，新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，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。

6.2 辐射安全管理规章制度

为加强辐射安全管理，按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法规的要求，医院正在建立一系列辐射安全管理制度，主要内容涵盖《辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全防护制度》《辐射安全保卫制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》《设备检修维护规程》《操作规程》《南京明基医院辐射安全事故应急处理预案》等，建成后可满足辐射安全管理要求。

6.3 辐射监测

6.3.1.1 工作场所监测

本项目工作场所监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，采用安装固定式监测仪表和便携式剂量率监测仪相结合的方式，监测数据均记录存档。按照 HJ 1198-2021、HJ 61-2021 的相关要求，制定了本项目的工作场所监测计划，如表 6-2 所示。

6.3.1.2 环境监测

本项目环境监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，每年至少进

行一次，监测数据记录存档。参照《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）表11、表12的相关规定，并结合本项目主要辐射源项特点及实际情况，制定了本项目的环境监测计划，具体环境监测计划列于表6-1。

表6-1 本项目环境监测计划

监测方式	监测对象		监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	贯穿辐射	便携式剂量率监测仪巡测	γ辐射剂量率和中子剂量率	本项目建筑墙体外100m范围内四个方位，每隔50m布设一个点，共8个点	1次/年
委托监测	贯穿辐射		γ辐射剂量率和中子剂量率	同上	1次/年
	取样分析	土壤	Na-22、Be-7、总α、总β	场址土壤	1次/年
		活化冷却水	H-3、Be-7、总α、总β	质子治疗装置废水暂存池、BNCT废水暂存池	每次排放前
		患者废液	^{24}Na 和 ^{38}Cl	BNCT衰变池	

表 6-2 本项目工作场所监测计划表

监测类别	监测对象	监测方式	监测内容	监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	质子治疗装置辐射工作场所	固定式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	见图 4-18	实时
		便携式剂量率监测仪监测			机房四周和屋顶屏蔽墙外、防护门外、监督区边界，治疗控制室、主控室、办公室和质子候诊区等人员长居留场所	1 次/年
	BNCT 辐射工作场所	固定式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	见图 4-41	实时
		便携式剂量率监测仪监测			机房四周和屋顶屏蔽墙外、防护门外、恢复室墙外、门外和顶板上方、监督区边界，办公室和患者接驳厅等人员长居留场所	1 次/年
	医用电子直线加速器辐射工作场所	固定式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率	医用电子直线加速器机房内	实时
		便携式剂量率监测仪	外照射剂量率	γ辐射剂量率	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，控制室、VIP 室等人员长居留场所	1 次/年
	模拟定位 CT 机辐射工作场所	便携式剂量率监测仪	外照射剂量率	γ辐射剂量率	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门等关注点	1 次/年
委托监测	质子治疗装置辐射工作场所、BNCT 辐射工作场所	便携式剂量率监测仪监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	同自行监测点位	1 次/年
	医用电子直线加速器辐射工作场所、模拟定位 CT 机辐射工作场所	便携式剂量率监测仪监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率	同自行监测点位	1 次/年

6.3.1.3 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。

个人剂量计用于对辐射工作人员的常规个人剂量监测，建设单位为每名辐射工作人员配备了个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

个人剂量报警仪用于工作人员在机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的有效剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。建设单位为进入控制区内工作的人员建立档案，每次在控制区内的工作结束后，由辐射安全专职管理人员负责回收个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的有效剂量，统一汇总在该工作人员个人剂量档案中。

医院安排专人负责个人剂量监测管理，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、剂量监测结果等材料，应妥善保存。

此外，医院对辐射工作人员进行健康体检，两次体检的时间间隔不超过 2 年。建立个人健康档案，档案中详细记录历次体检报告结果及其评价处理意见，并妥善长期保存。

6.3.1.4 监测设备

为满足项目的场所与环境剂量在线监测和自行巡检监测，医院配备了中子便携式剂量率监测仪、伽马便携式剂量率监测仪、固定式监测仪表等。医院拟配备的自行监测设备基本可以满足日常监测，基本可以满足相关标准要求。具体监测仪器一览表如下表所示。

表 6-3 本项目监测仪器一览表

序号	工作场所	仪器名称	仪器类型	仪器数量	备注
1	质子治疗装置、	固定式辐射监测	固定式	质子治疗装	每个监测点位包括

	BNCT、医用电子直线加速器	仪表		置工作场所共计 15 个监测点位；BNCT 共计 10 个监测点位；医用电子直线加速器共计 1 个监测点位	1 台中子探测器和 1 台γ探测器（质子治疗装置及 BNCT），监测点位仅包括γ探测器（医用电子直线加速器）
2	质子治疗装置	中子便携式剂量率监测仪	便携式	1 台	新增
	BNCT			1 台	
3	质子治疗装置	伽马便携式剂量率监测仪	便携式	1 台	新增
	BNCT			1 台	
	医用电子直线加速器			1 台	
	模拟定位 CT 机				
4	质子治疗装置、BNCT、医用电子直线加速器、模拟定位 CT 机	个人剂量计	便携式	每人 1 台	——
5	质子治疗装置、BNCT、医用电子直线加速器、模拟定位 CT 机	个人剂量报警仪	便携式	每人 1 台	新增

6.4 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条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）要求，使用II类以上（含II类）射线装置的辐射工作单位应建立完善的辐射事故应急方案或具有针对性与操作性的应急措施。

医院已制定《南京明基医院辐射安全事故应急处理预案》，具体内容包括适用范围、组织机构与职责、应急工作原则、应急响应、可能发生的事故(事件)及工作人员应对措施等。

重点强调了以下几个方面的工作：

（1）规定了辐射安全管理委员会负责组织、开展辐射事故应急处理救援工

作。

（2）规定了应急响应程序，包括应急处置、辐射事故上报、应急终止、后期处理、应急保障（含应急资金、应急设施设备、应急能力维持）等内容。

在应急能力维持中指出：

每年由辐射安全管理委员会组织 1 次辐射事故应急演练，并对演练结果进行评价和总结。应急演练设置不同的事故场景，以模拟辐射事故应急响应的形式进行应急演练，检验应急人员的应急技能和应急反应速度。

后续将根据本项目的需求及实际情况对该辐射事故应急预案进行补充完善，完善后能满足辐射安全管理的要求。

6.5 年度评估报告

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环保部第 18 号令）第十二条的规定，建设单位应对其放射性同位素和射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向生态环境主管部门提交上一年度的评估报告。评估报告主要包括以下内容：

（1）辐射安全和防护设施的运行与维护情况；

（2）辐射安全和防护制度及措施的制定与落实情况；

（3）辐射工作人员变动及接受辐射安全与防护考核情况；

（4）放射性同位素、射线装置等台账；

（5）场所辐射环境监测和个人剂量监测情况及监测数据；

（6）辐射事故及应急响应情况；

（7）核技术利用项目新建、改建、扩建和退役情况；

（8）存在的安全隐患及其整改情况；

（9）其他有关法律、法规规定的落实情况。

6.6 申请者从事辐射工作能力评价

6.6.1 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许可管理办法》要求，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，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。

医院目前已成立了辐射安全管理委员会，负责全院的辐射安全与环境保护管理工作，委员会由主任委员、副主任委员、委员、总干事及干事组成。其中主任委员由分管医工副院长担任，全面负责辐射防护和安全管理的领导工作，副主任委员由影像部、医务处、医学工程处主管担任，委员由核医学科、放疗科、介入中心、口腔科、护理部、人事处、风管科主管担任，总干事由医学工程处主管担任。干事由医学工程处、医务处的工作人员担任，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。注册核安全工程师担任辐射安全关键岗位，目前正在落实中。

医院建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。

6.6.2 辐射工作人员考核

根据《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），新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等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，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。

医院制定了辐射工作人员考核计划，新从事辐射活动人员以及原持有的辐射

安全培训合格证书到期的人员，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。

在严格落实人员考核计划后，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

6.6.3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许可管理办法》要求，申请者射线装置使用场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用质子治疗装置、硼中子俘获治疗系统、医用电子直线加速器和模拟定位 CT 机，经预测分析评价，各区域的辐射屏蔽设计均能确保屏蔽体外剂量率水平满足相关标准的要求。各机房设计了完备的安全联锁系统，通过门-机联锁、门-灯联锁、紧急停机、声光报警、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止工作人员和公众意外照射。本项目的辐射防护设计方案满足辐射防护与安全的要求。

医院应按照辐射防护设计方案进行施工建设，并确保经验收合格后投入使用。在此基础上，各射线装置机房、核医学工作场所能满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

6.6.4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许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目拟为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天。并建立辐射工作人员个人剂量档案，妥善保存，长期进行信息跟踪、监控。并配备个人剂量报警仪，用于工作人员在机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的有效剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目拟在加速器机房、治疗室等区域内设固定式监测仪表，能够对工作场所内的辐射水平进行实时在线监测。此外，拟配备便携式 X-γ辐射巡测仪、便携

式中子辐射巡测仪、便携式表面污染监测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

医院按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

6.6.5规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，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等。

医院根据本项目使用的射线装置、放射源和放射性同位素情况，已建立了一系列辐射安全管理制度，包括《辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全防护制度》《辐射安全保卫制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》《设备检修维护规程》《操作规程》《南京明基医院辐射安全事故应急处理预案》等。

医院还将根据本项目的内容补充完善相关辐射安全规章制度，按要求全部制定完成并严格落实的基础上本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

6.6.6辐射事故应急

医院已根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）的有关规定，制定了《南京明基医院辐射安全事故应急处理预案》。在本项目申请辐射安全许可证前，会继续补充完善辐射事故应急预案中与本项目的相关内容。在应急预案补充完善后，可符合本项目辐射事故应急的相关要求。

6.6.7辐射工作能力综合评价

对照根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》最新修订要求，对建设单位从事申请活动种类（使用 I 类、II 类、III 类射线装置以及放射性同位素）的能力进行综合分析与评价，结果见下表。

表 6-4 建设单位从事辐射活动能力的评价

序号	应具备条件	评价结果
1	使用I类、II类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	医院已成立辐射安全管理委员会，正在配置相应资质的专业人员，人员配置完成且辐射安全管理委员会健全后，可满足要求。
	依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	建设单位正在配置注册核安全工程师，到位后可满足要求。
2	新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等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，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。	医院拟从事辐射工作的人员上岗前需参加并通过辐射安全与防护考核，考核合格后，方可满足要求。
3	放射性同位素与射线装置使用场所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施	设计满足要求。
4	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。	设计满足要求。
5	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	规章制度按照项目情况完善健全后可满足要求。
6	有完善的辐射事故应急措施。	辐射事故应急预案按照项目情况完善健全后可满足要求。
7	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	设计满足要求。

6.7 环保投资一览表

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见表 6-5。

表 6-5 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表

[redacted]

6.8 竣工环保验收一览表

本项目建成后，建设单位应按规定组织自主验收，编制验收监测报告。本项目的竣工环保验收内容及要求列于下表。

表 6-6 本项目竣工环保验收一览表

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、辐射安全许可等。	
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、制定并按照环评建议对相应的规章制度进行了补充和完善。	
3	人员要求	1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名； 2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
4	屏蔽体外剂量率	射线装置辐射工作场所四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶： a、居留因子＞1/2，剂量率水平不高于 2.5μSv/h； b、居留因子≤1/2，剂量率水平不高于 10μSv/h。	
5	辐射防护与安全措施	1.对辐射工作场所划分为监督区和控制区，并按要求进行分区管理； 2.人身安全联锁系统：由出入管理设备、紧急开出门按钮、急停开关、清场按钮、声光报警灯、视频监控和对讲装置等组成，且所有安全设备均能正常投入使用； 3.通风系统：排风方式、送排风量、换气次数等满足设计指标； 4.场所辐射监测系统：场所辐射监测系统建立并符合场所监测要求。	
6	放射性三废处理设施	放射性废气	辐射工作场所设有独立的通风系统，质子治疗装置机 BNCT 的排风管最终排至屋顶排风口排放，医用电子直线加速器的排风管引至一层排放。
		放射性废液	质子治疗装置、BNCT 的放射性废液按要求收储、检测和排放，医用电子直线加速器及模拟定位 CT 不产生放射性废液。
		放射性固体废物	质子治疗装置、BNCT 的放射性固体废物按要求分类收集、暂存、处置和建立台账，医用电子直线加速器及模拟定位 CT 不产生放射性固体废物。
7	辐射监测	场所、环境、环境介质监测	完善现有环境辐射监测方案，包括自行监测和委托监测，并按照监测方案实施了监测。
		个人剂量监测	每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天，并建立辐射工作人员个人剂量档案，妥善保存，长期进行信息跟踪、监控。配备一定数量的个人剂量报警仪。
		监测设备	配备了与项目相适应的固定式γ探测器、固定式中子探测器、

			便携式χ-γ剂量率仪、便携式中子剂量率监测仪、便携式表面污染监测仪、个人剂量报警仪、个人剂量计。
8	辐射事故应急预案		制定了《辐射事故应急预案》，并根据环评中建议的内容进行补充完善。

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

随着我国社会经济的迅速发展，人民生活水平有了很大提高，医疗卫生条件得到进一步改善。然而，肿瘤（特别是恶性肿瘤）依然是国民健康水平进一步提高的主要障碍。据统计数据，2020 年我国恶性肿瘤新发病例达 457 万人，因恶性肿瘤死亡人数达 300 万人。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子治疗肿瘤技术以及 BNCT 的治疗肿瘤技术已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子治疗和 BNCT 治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。质子治疗装置和 BNCT 已成为当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。

本项目的建设将具有较好的社会效益和经济效益，具体如下：

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

（2）本项目建成后，将有力的提升南京市乃至江苏省的医疗水平，可满足南京市及周边省市的就医需求，造福于民。

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

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

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面：项目占地面积 3500m^2，建筑面积 30500m^2。

能源方面，项目运行期间需用水、电等能源。

（2）经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等三个方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的瞬发辐射穿过屏蔽体进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性气体进入大气环境；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，项目运行期间对环境的影响均低于国家标准中规定的限值。

7.3 正当性分析

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

8 公众参与

8.1公众参与方案

本项目参照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络平台公开、报纸公开、张贴公告的方式进行了公众参与。主要针对人群为医院内部工作人员及本项目选址周边公众。

8.2信息公告

本项目公众参与的具体实施过程见表 8-1。

表 8-1 本项目公众参与实施过程

公参阶段	公开途径	公示时间及渠道
首次信息公开	网络平台公开	2026.4.14，南京明基医院有限公司官网
征求意见稿公示	网络平台公开	2026.06.03~06.17，南京明基医院有限公司官网
	报纸公开	2026.06.05，《扬子晚报》 2026.06.11，《扬子晚报》
	张贴公告	2026.06.04~06.18，南京市建邺区河西大街 71 号医技楼 2 号门内
报批前公示	网络平台公开	待开展
注：征求意见稿公示已满足《环境影响评价公众参与办法》中 10 个工作日的要求。		

8.3公众参与的结果

本项目参照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络平台公开、报纸公开、张贴公告的方式进行了公众参与，期间均未收到反馈社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈意见。

9 结论

9.1 项目工程概况

本项目拟在肿瘤中心内建设质子治疗装置、硼中子俘获治疗系统、医用电子直线加速器和模拟定位 CT 机，肿瘤中心为一栋地下二层、地上八层的建筑，项目占地面积 3500m^2，建筑面积 30500m^2。

项目运行期间的辐射污染源主要是使用射线装置时产生的“瞬发辐射”、装置停机后依然存在的“感生放射性”、运行期间产生放射性三废。

9.2 实践的正当性

射线装置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。

9.3 选址、布局合理性分析

本项目位于南京市建邺区河西大街 71 号南京明基医院园区内东南侧，秦山路以西，黄山路以东，河西大街以南，嘉陵江东街以北。评价范围内无学校等敏感目标，条件较好；项目布局辐射场所功能合理，便于辐射工作场所的辐射防护和安全管理。从辐射防护与环境保护的角度，项目的选址可行，平面布局合理。

9.4 辐射安全与防护措施

（1）辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。

（2）辐射安全联锁系统：各辐射工作场所设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括门机联锁/门灯联锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器，以及工作状态指示灯、视频监控以及放射性警告标志和中文警示说明，可有效防止工作人员和公众受到意外照射。

（3）辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算各辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平。

（4）工作场所辐射监测系统：辐射工作场所内均设有固定式辐射监测仪表，对场所内剂量率水平进行实时监测和显示，确保工作人员和公众的安全。

（5）通风系统：射线装置工作场所的排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计均能满足相关标准要求，确保排入环境中的放射性废气对环境的影响能够满足相关标准要求。

9.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，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 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

9.6 辐射安全管理

建设单位已成立了专门的放射防护管理领导小组，并建立了一系列辐射安全管理制度，内容涵盖辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全防护制度》《辐射安全保卫制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》《设备检修维护规程》《操作规程》《南京明基医院辐射安全事故应急处理预案》等；已制定辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在上岗前参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗，拟制定辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案，能够满足本项目运行的要求。

9.7 公众参与

本项目按照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络平台公开、报纸公开、张贴公告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，详见本项目《公众参与说明》。

9.8 总结

综上所述，建设单位拟开展的“南京明基医院二期新建工程（肿瘤中心）建设项目”在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和环境的影响符合环境保护的要求，该项目对环境的影响是可以接受的。建设单位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，故从辐射防护和环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。

9.9 承诺与建议

9.9.1 承诺

本项目辐射安全责任单位将按照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第四十二条之规定编写射线装置安全与防护状况年度评估报告，于每年1月31日前报送辐射安全许可证发证机关。

9.9.2 建议

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