

核技术利用建设项目  
泰安市中心医院质子治疗中心项目  
环境影响报告书

泰安市中心医院（青岛大学附属泰安市中心医院，泰山医养中心）

2024年2月

环境保护部监制

核技术利用建设项目  
泰安市中心医院质子治疗中心项目  
环境影响报告书

建设单位名称：泰安市中心医院（青岛大学附属泰安市中心医院，泰山  
医养中心）

建设单位法人代表（签名或签章）：王兴玲

通讯地址：泰安市泰山区龙潭路 29 号泰安市中心医院

邮政编码：271000

联系人：钱琳琳

电子邮箱：

联系电话：

# 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	5
1.2.5	周围环境概况	6
1.2.6	核技术利用现状	10
1.3	编制依据	13
1.3.1	法律、法规和规章	13
1.3.2	技术导则、标准	14
1.3.3	其它文件、资料	15
1.4	评价标准	15
1.4.1	剂量限值和剂量约束值	15
1.4.2	辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	16
1.4.3	放射性废水排放限值	17
1.4.4	放射性固体废物	17
1.4.5	放射性废气	18
1.4.6	其他标准	19
1.5	评价范围和保护目标	20
1.5.1	评价范围	20
1.5.2	环境保护目标	21
2	自然环境与社会环境状况	23
2.1	地理位置	23
2.2	自然环境状况	23
2.2.1	地形地貌	23
2.2.2	气候气象	24
2.2.3	水文	25
2.3	社会环境概况	26
2.3.1	人口分布	26
2.3.2	社会发展	26
2.3.3	交通	27
2.4	环境质量和辐射现状	27
2.4.1	辐射环境质量现状监测与评价	27
2.4.2	场址适宜性评价	35
3	工程分析与源项	36
3.1	项目规模与基本参数	36
3.1.1	项目规模	36

3.1.2	基本参数.....	38
3.2	工艺设备.....	38
3.2.1	质子治疗装置.....	38
3.2.2	模拟定位 CT 机.....	50
3.3	辐射源项分析.....	51
3.3.1	质子治疗系统.....	51
3.3.2	模拟定位 CT 机.....	69
3.4	小结 .....	69
4	辐射安全与防护设施.....	71
4.1	质子治疗系统.....	71
4.1.1	场所布局与屏蔽.....	71
4.1.2	辐射安全与防护措施.....	77
4.1.3	放射性三废治理.....	90
5	辐射环境影响 .....	94
5.1	质子治疗系统辐射环境影响分析.....	94
5.1.1	正常运行的环境影响分析.....	94
5.1.2	事故工况的环境影响分析.....	108
6	辐射安全管理 .....	112
6.1	辐射安全与环境保护管理机构.....	112
6.1.1	机构和人员.....	112
6.1.2	辐射工作人员管理.....	113
6.2	辐射安全管理规章制度.....	113
6.3	辐射监测.....	114
6.4	辐射事故应急预案.....	118
6.5	申请者从事辐射工作能力评价.....	118
6.5.1	辐射安全与环境保护管理.....	118
6.5.2	辐射工作人员培训.....	119
6.5.3	工作场所的安全防护措施.....	119
6.5.4	个人防护用品及监测仪器.....	120
6.5.5	规章制度.....	121
6.5.6	辐射事故应急.....	121
6.5.7	放射性三废治理.....	121
6.6	环保投资一览表.....	122
6.7	竣工环保验收一览表.....	122
7	利益-代价分析 .....	125
7.1	利益分析.....	125
7.2	代价分析.....	125
8	结论 .....	127
8.1	项目工程概况.....	127
8.2	实践的正当性.....	127
8.3	选址、布局合理性分析.....	127
8.4	辐射安全与防护措施.....	128
8.5	辐射环境影响分析.....	128

8.6	放射性三废排放和处理.....	129
8.7	辐射安全管理.....	129
8.8	公众参与.....	129
8.9	总结 .....	129

## 表目录

表 1-1 本项目拟使用射线装置情况 .....	4
表 1-2 泰安市中心医院已获许可的涉源部门情况 .....	10
表 1-3 泰安市中心医院已获许可使用的放射源明细 .....	10
表 1-4 泰安市中心医院已获许可使用的非密封放射物质明细 .....	10
表 1-5 泰安市中心医院已获许可使用的射线装置明细 .....	11
表 1-6 泰安市中心医院辐射安全管理现状 .....	12
表 1-7 本项目各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 .....	16
表 1-8 《流域水污染物综合排放标准 第 3 部分：小清河流域》中的排放标准要求 .....	17
表 1-9 部分含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平 .....	18
表 1-10 X 射线设备机房（照射室）面积、单边长度执行标准 .....	19
表 1-11 X 射线设备机房屏蔽执行标准 .....	19
表 1-12 O <sub>3</sub> 和 NO <sub>x</sub> 排放标准 .....	20
表 1-13 本项目电离辐射环境影响评价范围 .....	21
表 1-14 质子治疗中心周围环境保护目标情况 .....	21
表 2-1 监测对象和项目 .....	28
表 2-2 仪器设备及性能指标 .....	30
表 2-3 监测方法 .....	30
表 2-4 本项目拟建场址内环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果 .....	32
表 2-5 土壤样品监测结果 .....	33
表 2-6 地表水和地下水监测结果 .....	34
表 2-7 气溶胶监测结果 .....	34
表 3-1 本项目拟配备的医用射线装置一览表 .....	38
表 3-2 质子治疗装置主要技术指标 .....	39
表 3-3 治疗前模拟定位的工作人员工作内容和操作时间 .....	46
表 3-4 质子治疗系统工作过程中污染物产生环节及主要污染因子 .....	48
表 3-5 质子治疗系统的年使用规划 .....	49
表 3-6 质子治疗辐射工作人员配置情况 .....	50
表 3-7 束流损失表 .....	52
表 3-8 质子治疗装置各区域顶板外表面 30CM 剂量率 .....	56
表 3-9 空气活化产生的主要放射性核素 .....	57
表 3-10 空气感生放射性静态饱和浓度计算结果 .....	58
表 3-11 质子治疗系统各区域通风系统设计情况 .....	59
表 3-12 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 .....	59
表 3-13 质子治疗系统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 .....	60
表 3-14 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数 .....	60
表 3-15 加速器冷却水活化计算结果 .....	61
表 3-16 调试工况下加速器磁铁 1M 处最大剂量率，MSV/H .....	62
表 3-17 加速器磁铁感生放射性核素 .....	62
表 3-18 人体组织等效靶的组成成分 .....	64
表 3-19 质子束单次治疗患者表面 50CM 处感生放射性剂量率随停机时间的变化，MSV/H .....	64
表 3-20 终端水箱材料 .....	65

表 3-21 水箱表面和 1M 处最大剂量率, mSv/h.....	66
表 3-22 质子治疗系统终端水箱内水体活化结果.....	66
表 3-23 质子治疗系统终端水箱外壳活化结果.....	66
表 3-24 质子治疗机房臭氧饱和浓度计算参数取值.....	68
表 3-25 质子治疗机房内 O <sub>3</sub> 和 NO <sub>2</sub> 饱和浓度计算结果.....	69
表 3-26 本项目主要的辐射污染因子.....	69
表 4-1 质子治疗系统辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平.....	73
表 4-2 质子治疗系统辐射工作场所屏蔽设计及周围环境情况.....	73
表 4-3 X 射线管使用场所的尺寸和面积建设要求对标.....	74
表 4-4 质子治疗系统安全联锁设备数量表.....	83
表 4-5 质子治疗系统工作场所通风系统设计参数.....	87
表 5-1 关注点处的剂量率水平计算结果.....	96
表 5-2 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果.....	98
表 5-3 治疗技师在控制室内工作期间的受照剂量估算结果.....	98
表 5-4 所有治疗技师摆位的年工作量.....	99
表 5-5 每名治疗技师摆位的年工作量.....	99
表 5-6 患者治疗前摆位期间, 治疗技师的年受照剂量.....	99
表 5-7 每位治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量.....	100
表 5-8 每名治疗技师的操作 X 射线管的年工作量.....	100
表 5-9 每位治疗技师操作 X 射线管工作期间的年受照剂量.....	100
表 5-10 每位治疗技师年总受照剂量.....	100
表 5-11 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量.....	101
表 5-12 物理师年受照剂量计算结果.....	101
表 5-13 物理师的年受照剂量.....	102
表 5-14 科室医生年受照剂量估算结果.....	102
表 5-15 护士年受照剂量计算结果.....	103
表 5-16 维护工程师的年受照剂量.....	103
表 5-17 装置运行期间对工作人员所致年受照剂量汇总.....	104
表 5-18 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果.....	105
表 5-19 质子治疗系统放射性排风口参数.....	105
表 5-20 关注点处地面空气浓度计算结果.....	106
表 5-21 剂量转换因子.....	106
表 5-22 空气浸没外照射剂量计算结果.....	107
表 5-23 空气吸入内照射剂量计算结果.....	107
表 5-24 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果.....	108
表 5-25 不同照射量对人体损伤的估计.....	109
表 6-1 本项目辐射工作人员计划编配情况.....	113
表 6-2 本项目辐射工作场所监测计划.....	115
表 6-3 本项目环境监测计划.....	116
表 6-4 本项目拟配备的辐射监测设备清单.....	118
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.....	122
表 6-6 本项目竣工环保验收一览表.....	123



## 图目录

图 1-1 本项目地理位置图.....	7
图 1-2 项目周边关系图.....	8
图 1-3 项目总平面布置图.....	9
图 1-4 本项目电离辐射评价范围示意图.....	22
图 2-1 环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量当量率监测点位.....	29
图 2-2 环境介质取样点位.....	29
图 3-1 质子治疗中心地下一层平面布局图.....	37
图 3-2 质子治疗系统布局示意图.....	39
图 3-3 束流经过的子系统部件.....	39
图 3-4 本项目质子治疗装置平面布局示意图.....	40
图 3-5 本项目质子治疗装置剖面布局示意图.....	41
图 3-6 偏转磁体组示意图.....	42
图 3-7 射频 (RF) 加速腔示意图.....	43
图 3-8 束流引出示意图.....	44
图 3-9 束流输运线实物参考图.....	44
图 3-10 扫描治疗示意图.....	45
图 3-11 质子治疗系统工作流程及主要产污环节图.....	49
图 3-12 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布.....	54
图 3-13 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布.....	54
图 3-14 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布.....	55
图 3-15 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布.....	55
图 3-16 冷却水计算模型.....	61
图 3-17 终端水箱示意图.....	65
图 4-1 质子治疗中心地下一层辐射工作场所分区.....	72
图 4-2 质子治疗系统工作场所辐射屏蔽设计 (平面).....	75
图 4-3 质子治疗系统工作场所辐射屏蔽设计图 (剖面).....	76
图 4-4 人员出入管理箱外形结构图.....	79
图 4-5 医生控制盒外形结构图.....	79
图 4-6 门内开门按钮外形结构图.....	80
图 4-7 紧急开门按钮外形结构图.....	80
图 4-8 声光报警灯外观示意图.....	81
图 4-9 地下一层辐射安全联锁设施点位图.....	82
图 4-10 质子治疗系统辐射工作场所地下一层清场搜索按钮点位和搜索路线图.....	84
图 4-11 安全联锁逻辑图.....	85
图 4-12 质子治疗系统场所辐射监测系统结构.....	86
图 4-13 质子治疗系统工作场所送、排风管道走向图.....	88
图 4-14 质子治疗系统工作场所排风口位置示意图.....	89
图 4-15 质子治疗系统辐射工作场所警告标志示意图.....	89
图 4-16 质子治疗系统冷却水管道走向示意图.....	92
图 5-1 质子治疗系统屏蔽模拟计算模型图.....	94
图 5-2 质子治疗系统屏蔽模拟计算模型剖面图.....	95

图 5-3 关注点分布位置平面示意图 .....	96
图 6-1 本项目固定式监测点位 .....	116

# 1 概述

## 1.1 项目名称、地点

项目名称：泰安市中心医院质子治疗中心项目

建设地点：泰安高新区泰安市中心医院高新院区院内

建设性质：改扩建

建设单位：泰安市中心医院（青岛大学附属泰安市中心医院，泰山医养中心）

建设规模：项目位于泰安高新区泰安市中心医院高新院区院内，计划改造原地下停车场，主要建设质子加速器机房（含治疗室）以及其他配套功能房间。拟使用 1 套质子治疗系统，最高能量 250MeV。

项目投资：项目总投资约 3 亿元，其中环保投资 565 万元，约占总投资的 1.88%。

## 1.2 项目概况

### 1.2.1 建设单位概况

泰安市中心医院始建于 1948 年，坐落于世界文化与自然双重遗产、国家 AAAAA 级旅游景区泰山脚下，是一所集医疗、教学、科研、康复、预防、保健、康养于一体的三级甲等综合医院，是青岛大学直属附属医院。

医院目前编制床位 3066 张，全年门（急）诊量 165 万人次，出院患者 12.2 万人次，开展手术 3.98 万台次。现有在职职工 4500 余人，其中高级职称 590 余人，博士后、博士研究生 190 余人，硕士研究生 1100 余人，硕士生导师 110 余人。

近年来，医院坚持党建引领，实现优质医疗资源扩容、区域均衡的一院多区布局。目前拥有中心院区、迎胜院区、碧霞湖院区、高新院区和海南白沙院区共五个院区。其中：高新院区占地面积 300 亩，一期项目总建筑面积 14.7 万平方

米，定位大专科小综合发展模式，以大肿瘤和心血管疾病诊疗为主，发展精准医学中心，建设肿瘤和心脑血管精准诊疗平台，为临床研究提供技术支撑，形成特色医疗服务品牌；碧霞湖院区环山面水、风景秀丽、空气清新，总占地近 300 亩，总建筑面积 11.9 万平方米，总投资概算 5.35 亿元。定位医养结合发展模式，拥有医疗床位 300 张，公寓式养老床位 700 张，居家式养老 550 户（含 100 套平房院落）今年落地。该院区秉承“如家如亲人”服务理念，已经发展成为一所集生活照护、医疗康复、安宁疗护、科研实训等功能为一体的大型综合性、示范性公建医养结合综合服务机构，“寿比泰山”医养结合品牌走向全国，并成功创建“五星级养老机构”。海南白沙院区位于海南白沙黎族自治县邦溪镇七彩岛，医疗区域总建筑面积 16000 平方米，用于急诊、门诊、治疗、检查、康复、住院、养老等服务，与白沙、昌江当地医院建立绿色急救转诊通道。依托泰安市中心医院雄厚的三甲医疗资源优势 and 泰山医养中心医养结合全国行业标杆的成功实践，以海南白沙邦溪镇门诊部为起点逐步健全提升医疗保障能力，为当地群众及广大“候鸟”老人提供专业的居家医养、社区日间照料、机构养老和旅居疗养“四位一体”的医养综合体服务，并协同各方共同打造“南白沙、中泰山、北伊春”的“候鸟”医养基地。

医院曾被中华医院管理学会誉为“泰安模式”向全国推荐，提出“南学清远（广东省清远市人民医院），北学泰安（泰安市中心医院）”，先后有 8000 余家医疗卫生单位来院考察学习，为国家卫生改革做出了贡献。2019 年新一届领导班子调整到位后，提出了“123106”的工作思路。即：坚持“一个目标”（创建省级区域医疗中心），狠抓“两条主线”（学科建设、管理运营），着力“三个推进”（公立医院党的建设、深化推进医药卫生体制改革、持续推进现代医院管理制度建设），聚力抓重点、补短板、强弱项，全面提升医疗服务质量，着力推动医院高质量发展。

2020 年 9 月，泰安市人民政府根据泰安城区地缘关系、人口分布、群众就医需求、医疗卫生资源分布及其功能定位等因素，统筹主城区内其他八家二级及以上公立医院，组建成立了泰安市医疗发展集团，集团作为市政府直属单位，参照事业单位管理。集团内所有医疗卫生机构可跨行政区划为市民提供疾病预防、诊

断、治疗、营养、康复、护理、健康管理等一体化、连续性医疗卫生服务。泰安市中心医院充分发挥市医疗发展集团牵头单位作用，着力构建网格化、整合型医疗服务体系，打造形成了“医疗集团+健康共同体+专科联盟”发展新模式，积极推进了分级诊疗制度建设。

医院拥有国家中医药重点专科 2 个：其中中医康复科为国家级中医药重点专科、中医妇科为国家级中医药重点专科建设单位；省级临床重点专科 12 个：心血管内科、康复医学科、血液内科、医学影像科、小儿外科、肿瘤科、重症医学科、消化内科、肾内科、妇科、疼痛科、神经外科；省级医药卫生重点学科 3 个：生殖医学、儿科外科学、康复医学与理疗学；省级医药卫生重点实验室 1 个：抗耐药性药物研究实验室；省级临床精品特色专科 1 个：康复科；省级中医药重点专科 2 个：骨伤科、中医科；省级第二批孕产期保健特色专科 1 个：产科；第三批齐鲁中医药优势专科集群建设单位：肾病科；省临床医学研究中心分中心 5 个：山东省血液系统疾病临床医学研究中心分中心，山东省神经系统疾病临床医学研究中心分中心，山东省耳鼻喉疾病临床医学研究中心泰安分中心，山东省糖尿病与代谢疾病临床医学研究中心分中心，山东省眼科角膜疾病临床医学研究中心分中心，山东省医学检验临床医学研究中心分中心、山东省消化系统疾病临床医学研究中心分中心；市级临床重点专科/学科、特色专科 42 个。

### 1.2.2 项目背景、意义

癌症是严重危害人类健康的重大慢性疾病，根据国家癌症中心最新癌症统计数据，2015 年我国恶性肿瘤发病约 392.9 万人，死亡约 233.8 万人，恶性肿瘤死亡占居民全部死因的 23.91%。当前我国癌症治疗水平与美国等国家相比还有很大差距。随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，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，质子治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。

质子治疗系统是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备，目前我国多地都在建设/筹建质子治疗中心。为提高泰安市医疗服务保障水平，建设单位拟建泰安市中心医院质子治疗中心项目，是为了顺应放疗“精确诊断、精确定位、精确计划、精确治疗”的新时代，顺应政府鼓励社会办医打造多元化医疗服务的政策，顺应泰安市及周边地区肿瘤患者高端治疗的迫切需求，通过引进质子治疗系统，满足泰安市及周边地区的恶性肿瘤精准高端治疗的需求，提升癌症治疗水平。

### 1.2.3 本次环评内容

本项目选址位于泰安高新区泰安市中心医院高新院区院内，计划改造原地下停车场，主要建设 1 间质子加速器机房（含治疗室）以及其他配套功能房间，建筑面积约 1889m<sup>2</sup>。

本次环评为本项目的辐射环境影响评价，主要针对项目中涉及核技术利用活动的建设内容开展评价，具体如下：

（1）质子治疗系统。拟在地下一层质子治疗中心使用 1 套质子治疗系统，质子最高能量为 250MeV，属 I 类医用射线装置。厂家为中以康联国际医疗科技有限公司，型号 P-Cure，共建设 1 间加速器机房（含治疗室）。机房内配备 2 个 X 射线管，每个射线管的最大管电压 150kV，最大管电流 640mA。

（2）模拟定位 CT 机。拟在地下一层质子治疗中心加速器机房治疗区使用 1 台模拟 CT 机，属 III 类医用射线装置。最大管电压 140kV，最大管电流 500mA。

上述医用射线装置使用清单见下表。

表 1-1 本项目拟使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量，台	类别	所在位置
1	质子治疗系统（含 2 个 X 射线管）	1	I (III)	地下一层质子治疗中心
2	模拟 CT 机	1	III	

根据《射线装置分类》的规定，质子治疗系统管理类别属于 I 类射线装置。

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（生态环境部令 第 16 号，2020 年）以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第 7 号，2019 年）的规定，本项目环境影响评价文件类别确定为编制环境影响报告书。因此，中国原子能科学研究院受建设单位的委托，负责本项目的环评工作（委托书见附件 3）。

## 1.2.4 产业政策和规划符合性

### 1.2.4.1 产业政策符合性

本项目属于《产业结构调整指导目录》（2024 年本），本项目属于其中**鼓励类**第六项“**核能**”第 4 条“同位素、加速器及辐照应用技术开发”、第十三条第 4 项——高高端医疗器械创新发展以及第三十七条第 1 项——医疗服务设施建设的范畴。因此，本项目建设符合国家相关产业政策。

### 1.2.4.2 规划符合性分析

#### 1.2.4.2.1 与医疗卫生相关规划符合性

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要（2016-2020）》指出：加强重大疾病防治和基本公共卫生服务，完善国家基本公共卫生服务项目和重大公共卫生服务项目，提高服务质量效率和均等化水平。提升集成公共卫生服务能力，加强妇幼健康、公共卫生、肿瘤、精神疾病防控、儿科等薄弱环节能力建设。2016 年中共中央政治局会议上审议通过的《“健康中国 2030”规划纲要》中，也多次提出将重大疾病防治、癌症诊治工作作为重要目标，加强医药技术创新发展以及医药体系的完善。泰安市卫生健康委员会关于印发《泰安市“十四五”医疗卫生服务体系规划》中指出：“...深入开展公立医院高质量发展促进行动，推动优质医疗资源扩容和均衡布局，构建以泰安市中心医院为重点，三级医院为支撑，对标省级区域医疗中心的发展格局。”因此，本项目的建设与国家、泰安市医疗卫生事业相关规划是相符的。

#### 1.2.4.2.2 与土地利用规划的符合性

本项目选址位于泰安市高新区泰安市中心医院高新院区内。项目用地于 2016 年 4 月 12 日取得泰安市规划局颁发的建设用地规划许可证（地字第 370900201600014 号），用地性质为医疗卫生用地。由此可见，本项目用地选址合理，符合城市规划的要求。见附件 2。因此，拟建项目符合土地利用规划要求。

综合所述，本项目的建设符合相关政策和规划的要求。

#### 1.2.5 周围环境概况

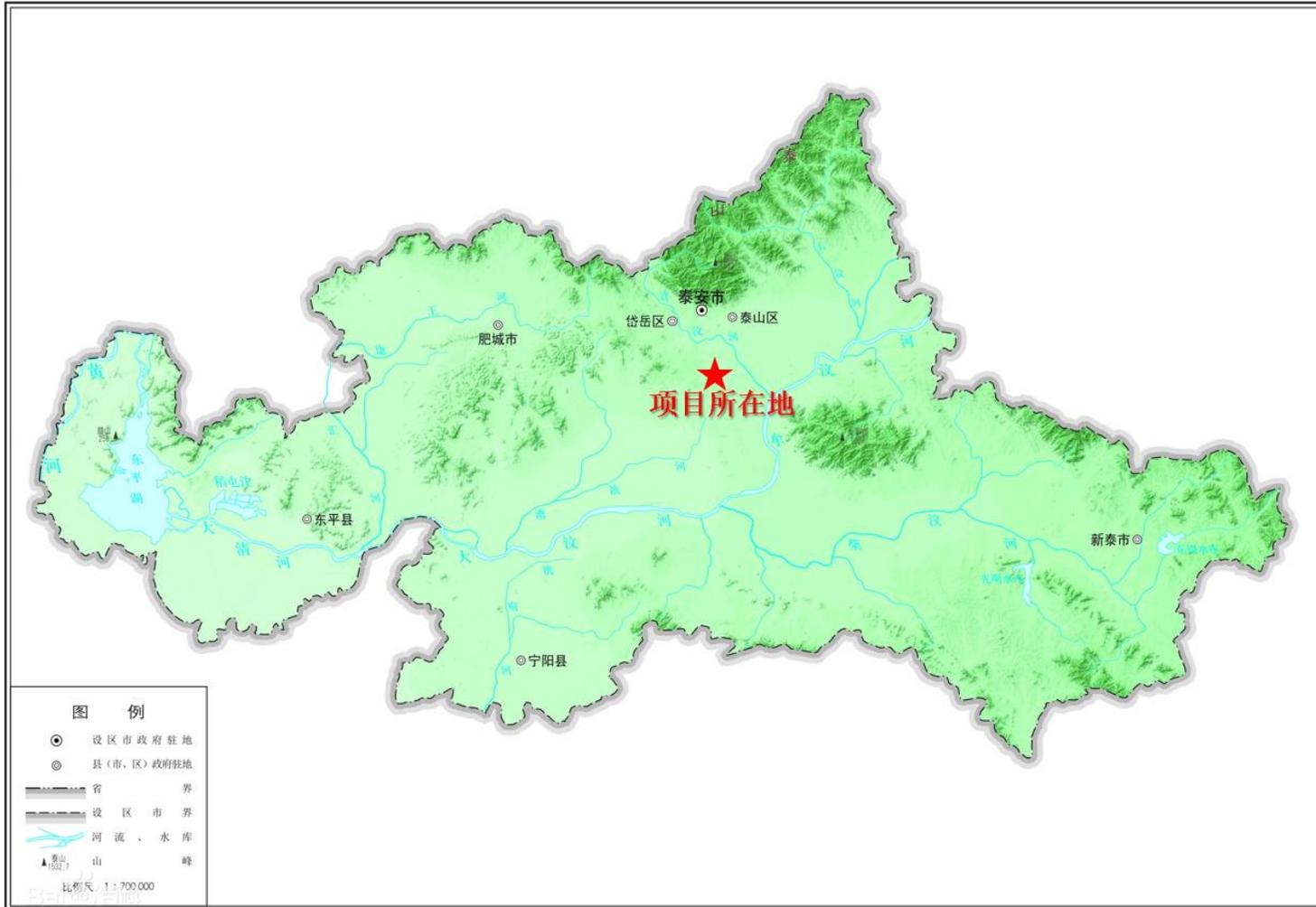
本项目建设地点位于泰安市高新区泰安市中心医院高新院区内，北邻配天门大街，西邻长城路，地理位置见图 1-1。

本项目计划对泰安市高新区泰安市中心医院高新院区地下停车场进行改造，具体位置和周围环境详见图 1-2。质子治疗中心位于院区东侧区域，质子治疗中心拟建场址北侧、西侧、南侧均为院区内部，东侧为绿地和道路。项目总平面布局图见图 1-3。

# 泰 安 市 地 图

山东省标准地图

设区市·自然地理版



审图号：鲁SG(2020)019号

山东省自然资源厅监制 山东省地图院编制

图 1-1 本项目地理位置图



图 1-2 项目周边关系图

中国核工业集团公司核工业北京原子能研究所

4 (2019年版)《核工业建设项目环境影响评价技术导则》

核工业

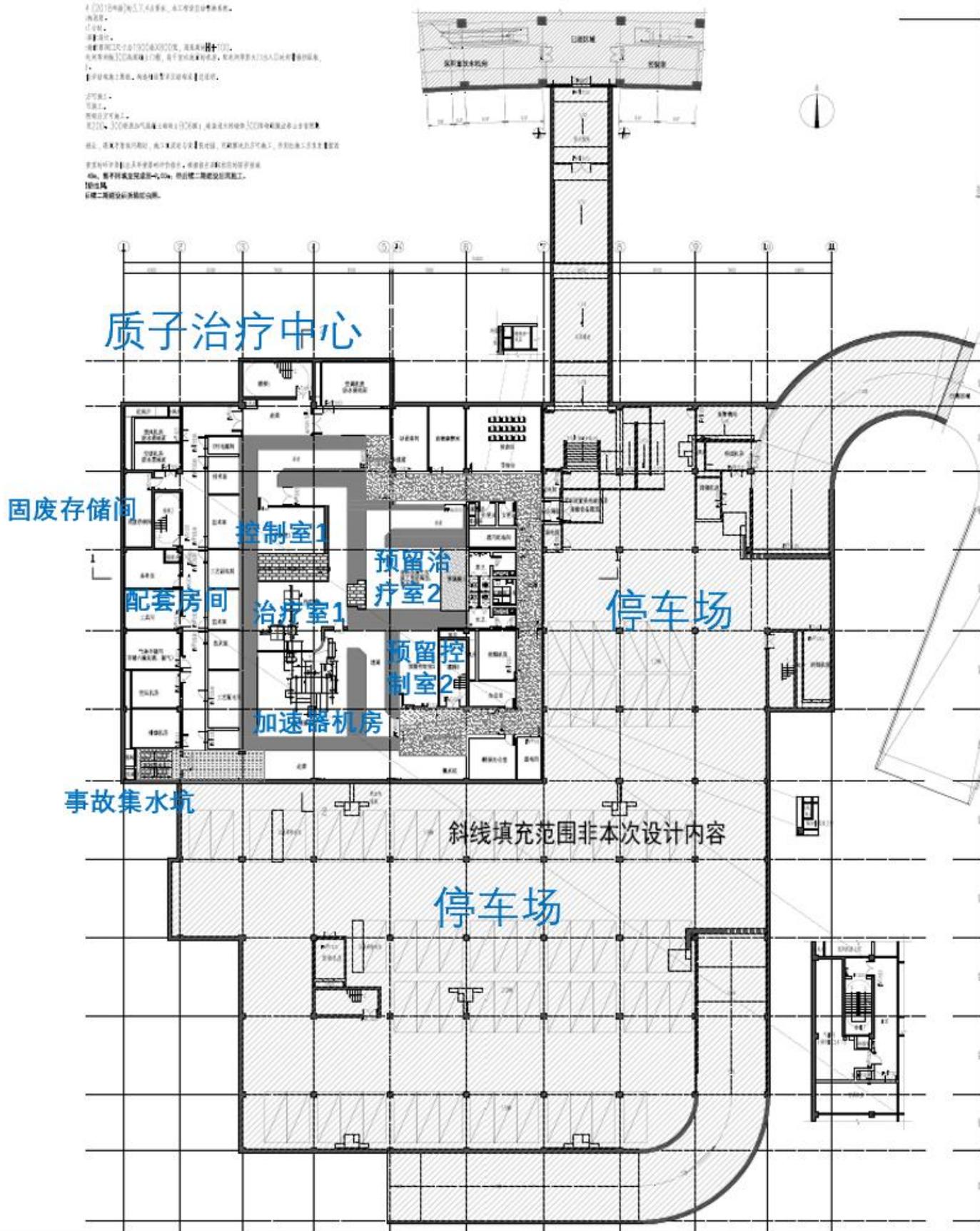


图 1-3 项目总平面布置图

## 1.2.6 核技术利用现状

泰安市中心医院持有山东省生态环境厅发布的辐射安全许可证，证书编号为鲁环辐证[09121]，有效期至 2027 年 9 月 25 日，许可种类和范围为使用 III 类、V 类放射源；使用 II 类、III 类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所，见附件 3。已获许可的涉源部门、放射源、射线装置和非密封放射性物质的使用情况列于表 1-2~表 1-5。医院的辐射安全管理现状见。

表 1-2 泰安市中心医院已获许可的涉源部门情况

序号	名称	地址	负责人
1	泰安市中心医院核医学科	龙潭路 29 号	韩建国
2	泰安市中心医院 PET-CT 机房	龙潭路 29 号	刘树永
3	泰安市中心医院介入放射科	龙潭路 29 号	孟庆民
4	泰安市中心医院第一手术室	龙潭路 29 号	杨在启
5	泰安市中心医院放疗中心	配天门大街长城路路口东侧	周运生
6	泰安市中心医院医学影像部	龙潭路 29 号	谢元忠
7	泰安市中心医院口腔科	龙潭路 29 号	万光勇
8	碧霞湖院区放射科	泰安市泰山区碧霞湖大街 17 号	谢元忠

表 1-3 泰安市中心医院已获许可使用的放射源明细

序号	核素名称	类别	活度（贝克）×枚数	活动种类
1	Sr-90（Y-90）	V	1.480E+9	使用
2	Sr-90	V	1.17E+9	使用
3	Sr-90	V	2.45E+8	使用
4	Sr-90	V	1.27E+9	使用
5	Sr-90（Y-90）	V	1.17E+9	使用
6	Na-22	V	3.7E+6	使用
7	Na-22	V	3.7E+5*6	使用
8	Ir-192	III	3.7E+11	使用

表 1-4 泰安市中心医院已获许可使用的非密封放射物质明细

序号	工作场所名称	场所	核素	日等效最大操作量	年最大用量	活动种类
----	--------	----	----	----------	-------	------

		等级		(贝可)	(贝可)	
1	核医学科楼二楼	丙	F-18	7.4E+6	1.85E+12	使用
2	核医学科楼二楼	乙	I-131	1.85E+9	9.62E+11	使用
3	核医学科楼二楼	乙	I-125	3.7E+8	4.44E+11	使用
4	核医学科楼二楼	乙	Sr-89	7.4E+7	3.85E+9	使用
5	核医学科楼二楼	乙	P-32	7.4E+7	8.88E+10	使用
6	核医学科楼二楼	乙	Re-188	1.11E+8	1.16E+10	使用
7	核医学科楼二楼	乙	Tc-99m	1.85E+8	4.44E+12	使用
8	核医学科楼二楼	乙	Re-186	1.11E+8	1.16E+10	使用
9	核医学科楼二楼	乙	Sm-153	3.7E+8	1.924E+10	使用
10	核医学科楼二楼	乙	Y-90	3.7E+8	1.93E+10	使用

表 1-5 泰安市中心医院已获许可使用的射线装置明细

序号	射线装置名称	类别	数量	活动种类
1	PET-CT CT	III	1	使用
2	X 线机 EX II	III	1	使用
3	牙片机 220-240	III	1	使用
4	X 线机 AX	III	1	使用
5	DSA Artis zee floor	II	1	使用
6	16 排 CT SOMATOM	III	1	使用
7	DSA Artis zee ceiling	II	1	使用
8	移动 C 型臂 ZIEHM8000	III	1	使用
9	64 排 128 层 CT SOMATOM Ddfinition	III	1	使用
10	X 线机 X-550CROSS	III	1	使用
11	X 线机 P II	III	1	使用
12	X 线机 UD150L-R	III	1	使用
13	X 线机 50AC	III	1	使用
14	X 线机 MU125P	III	1	使用
15	X 线机 MU125P	III	1	使用
16	C 型臂 OPESCOPE 50S	III	1	使用
17	医用电子直线加速器	II	1	使用
18	移动 X 光机 10J	III	1	使用
19	数字化多功能 X 光 XIOM ICONOS R200	III	1	使用
20	乳腺机 DIAMCND	III	1	使用
21	X 线机 UD150L-30e	III	1	使用
22	X 线机 COMPACT15	III	1	使用
23	DR	III	1	使用
24	DSA 9000C	II	1	使用
25	DSA Innova3100-IQ	II	1	使用

26	UCT550 CT	III	1	使用
27	UCT550 CT	III	1	使用
28	DRX-Evolution Plus DR	III	1	使用
29	PLD9200 数字胃肠机	III	1	使用
30	BV Vectra C 型臂	III	2	使用
31	3000504 碎石机	III	1	使用
32	Uct528 车载 CT	III	1	使用
33	Revolution CT	III	1	使用
34	DRX-Evolution 移动 DR	III	1	使用
35	ELEKTA Infinity 直线加速器	II	1	使用
36	VitalBeam 直线加速器	II	1	使用
37	Azurion 7 M20 DSA	II	1	使用
38	Innova IGS 530 DSA	II	1	使用

表 1-6 泰安市中心医院辐射安全管理现状

项目	现状
辐射安全管理机构	医院成立有辐射安全与环境保护管理领导小组，主任委员由院领导担任，其余成员均为医院相关部门及科室领导。
辐射安全管理制度	医院已根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》规定制定了相关的辐射安全管理制度，主要有《放射诊疗安全防护管理制度》、《辐射安全工作制度》、《工作人员安全防护管理制度》、《操作规程》、《岗位职责》、《放疗设备维修维护制度》、《人员培训制度》等。
辐射事故应急	医院成立有辐射事故应急处置领导小组，组长由副院长担任，其余成员均为相关部门及科室领导，并制定有《辐射事故应急预案》。
辐射工作人员	医院辐射工作人员均通过了辐射安全与防护考核，持证上岗。
辐射监测	医院每年开展辐射工作场所及环境监测、个人剂量监测，配备有适宜的辐射监测仪器仪表及个人防护用品。
环保手续履行情况	医院现有核技术利用项目均已履行了相关环保手续，无遗留环保问题。

## 1.3 编制依据

### 1.3.1 法律、法规和规章

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

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

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

(4)《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》(国务院令第 709 号, 2019 年 3 月 22 日修正版);

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

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

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

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

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

(10)《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);

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

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

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

(14)《辐射安全与防护监督检查技术程序》(生态环境部, 2020 年);

(15)《关于明确辐射安全监管有关事项的通知》(生态环境部, 环办辐射函[2016]430 号);

(16)《山东省环境保护条例》(山东省第十三届人民代表大会常务委员会第七次会议通过, 2019 年 1 月 1 日施行);

(17)《山东省辐射污染防治条例》(山东省人民代表大会常务委员会公告第 37 号, 2014 年 5 月 1 日施行)。

### 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) 《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);

(3) 《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021);

(4) 《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);

(5) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分:  $\gamma$  射线源放射治疗机房》(GBZ/T 201.3-2014);

(6) 《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);

(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) 《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021)；
- (10) 《环境 $\gamma$ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157-2021)；
- (11) 《电离辐射工作场所监测的一般规定》(EJ 381-1989)；
- (12) 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ 128-2019)；
- (13) 《职业性内照射个人监测规范》(GBZ 129-2016)；
- (14) 《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466-2005)；
- (15) 《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》(GBZ 2.1-2019)。

### 1.3.3 其它文件、资料

(1)《泰安市中心医院质子治疗中心项目环境影响评价委托书》(泰安市中心医院, 2023年)；

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

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

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

(5)泰安市中心医院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) 公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

年有效剂量，1mSv。

#### 1.4.1.2 剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）照射剂量约束和潜在照射危险约束的防护要求，剂量约束值通常在公众照射剂量限值的 10%-30% 的相关要求。同时，参考《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）：

本次评价以职业照射剂量限值的 1/4 即 5mSv/a 作为本项目职业人员的年剂量约束值，以公众照射剂量限值的 1/10 即 0.1mSv/a 作为本项目公众人员的年剂量约束值。

#### 1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

参照《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/T201.5-2015）、《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》（HJ 1198-2021）中的相关规定，本项目各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平列于表 1-7。

表 1-7 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， $\mu\text{Sv/h}$
质子治疗系统 辐射工作场所	机房屏蔽墙体外、入口防护门外、机房顶	居留因子 $T \geq 1/2$	$\leq 2.5$
		居留因子 $T < 1/2$	$\leq 10$

	机房地板	机房地板外表面与土壤交界处*	$\leq 5 \times 10^3$
模拟定位 CT 机房的四周屏蔽墙、机房顶和防护门外			$\leq 2.5$

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“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 放射性废水排放限值

本项目可能产生的放射性废水为质子治疗装置的活化冷却水。正常运行情况下，冷却水循环使用不向环境排放。对于检修期间或发生泄漏事故期间可能产生的放射性废水，排放前需进行取样监测。满足山东省地方标准《流域水污染物综合排放标准 第3部分：小清河流域》（DB37/3416.3-2018）第一类污染物中总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 的最高允许排放浓度标准要求（列于表 1-8），方可排入医院污水管网。

表 1-8 《流域水污染物综合排放标准 第3部分：小清河流域》中的排放标准要求

污染物	最高允许排放浓度, Bq/L
总 $\alpha$	1
总 $\beta$	10

### 1.4.4 放射性固体废物

本项目运行期间可能产生的放射性固体废物主要为质子治疗系统的活化结构部件。

上述放射性固体废物管理按照 HJ 1198-2021 执行，具体如下：

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

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，集中放置在固体废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平的（放射性废物豁免的活度、活度浓度见附录 B）

送交有资质的单位收贮。

8.2.2.3 建立放射性固体废物台账，存放及处置前进行监测，记录部件名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息，低于清洁解控水平的可作为一般固体废物处置，并做好存档记录。”

HJ 1198-2021 附录 B 表 B.1 列出了对放射治疗活动中可能产生的含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平，具体见下表。

表 1-9 部分含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平

核素	活度浓度 <sup>a</sup> (Bq/g)	活度浓度 <sup>b</sup> (Bq/g)	活度 <sup>b</sup> (Bq)
<sup>3</sup> H	1E+02	1E+06	1E+09
<sup>14</sup> C	1E+00	1E+04	1E+07
<sup>54</sup> Mn	1E-01	1E+01	1E+06
<sup>55</sup> Fe	1E+03	1E+04	1E+06
<sup>59</sup> Fe	1E+00	1E+01	1E+06
<sup>58</sup> Co	1E+00	1E+01	1E+06
<sup>60</sup> Co	1E-01	1E+01	1E+05
<sup>59</sup> Ni	1E+02	1E+04	1E+08
<sup>63</sup> Ni	1E+02	1E+05	1E+08

a 固体物质的解控水平以及批量固体物质的解控水平。

b 小批量固体物质的豁免水平（通常适用于小规模使用放射性物质的实践，所涉及的数量最多为吨量级）。

另外，根据 GB 18871-2002，如果存在一种以上的放射性核素，仅当各种放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比之和小于 1 时，才可能考虑给予豁免。

## 1.4.5 放射性废气

本项目射线装置放射性废气的管理按照 HJ 1198-2021 执行，具体如下：

### “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，采用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，减少人员受照剂量。”

另外，本项目射线装置放射性废气的管理还按照 GBZ 121-2020 执行，具体如下：

“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。

## 1.4.6 其他标准

### 1.4.6.1 机房面积、单边长度

根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中的相关要求面积、单边长度执行标准列于表 1-10。

表 1-10 X 射线设备机房（照射室）面积、单边长度执行标准

设备类型	机房内最小有效使用面积， m <sup>2</sup>	机房内最小单边长度， m
CT 机	30	4.5

### 1.4.6.2 X 射线设备机房屏蔽

根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)中的相关要求，本项目不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度执行标准列于表 1-11。

表 1-11 X 射线设备机房屏蔽执行标准

设备类型	有用线束方向铅当量 mmPb	非有用线束方向铅当量 mmPb
CT 机房、CT 模拟定位机房	2.5	

### 1.4.6.3 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放标准

本项目 NO<sub>x</sub> 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<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 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 1-12。

表 1-12 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放标准

污染物	排放标准		室内浓度限值	
	最高允许排放浓度, mg/m <sup>3</sup>	最高允许排放速率(排气筒高度 15m), kg/h	最高容许浓度, mg/m <sup>3</sup>	时间加权平均容许浓度, mg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	——	——	0.3	——
NO <sub>x</sub>	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”。本项目使用的质子治疗装置为 I 类射线装置, 其主要的辐射环境影响途径为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。质子治疗系统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。且质子治疗系统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。

综上所述, 本项目质子治疗系统电离辐射环境影响评价范围取质子治疗系统辐射工作场所四周实体屏蔽墙向外 100m 的范围, 模拟 CT 电离辐射影响评价范围取 CT 机房四周实体屏蔽墙向外 50m 的范围, 由于模拟 CT 机房位于质子治疗中心加速器机房治疗区内, 因此本项目的的评价范围取为质子治疗系统辐射工作场所四周实体屏蔽墙向外 100m 的范围, 具体情况如表 1-13 和图 1-4 所示。

表 1-13 本项目电离辐射环境影响评价范围

类型	电离辐射环境影响评价范围	依据
质子治疗系统	机房四周实体屏蔽墙体 向外 100m 的范围	I 类射线装置

### 1.5.2 环境保护目标

本项目电离辐射评价范围内无自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象，无居民小区、学校等环境敏感点。评价范围内的保护目标为评价范围内的辐射工作人员和公众，公众主要包括医院其他医护人员、陪同家属、院内和周边道路的流动人员，具体情况列于表 1-14。

表 1-14 质子治疗中心周围环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	距离/m	周围环境情况	环境保护目标
质子治疗中心	N	0-5	控制室	职业人员
	N	5-20	走廊、空调机房、楼梯	公众
	N	20-35	土壤	/
	N	35-100	一期病房楼地下建筑等	公众
	E	0-15	预留治疗室 2、预留控制室 2、设备通道、保洁休息室、维保办公室、弱电间、风井、卫生间等	公众
	E	15-45	停车场、弱电间、配电间、风井、排烟机房等	公众
	E	45-100	土壤	/
	W	0-12	弱电间、技术室、工艺配电间、通用配电间、走廊、工具间、气体存储、排烟机房等	公众
	W	12-100	土壤	/
	S	0-3	走廊	公众
	S	3-50	地下停车场、排烟机房、风井	公众
	S	50-100	土壤	/
	顶板	相邻	停车场	公众
	底板	相邻	土壤	/

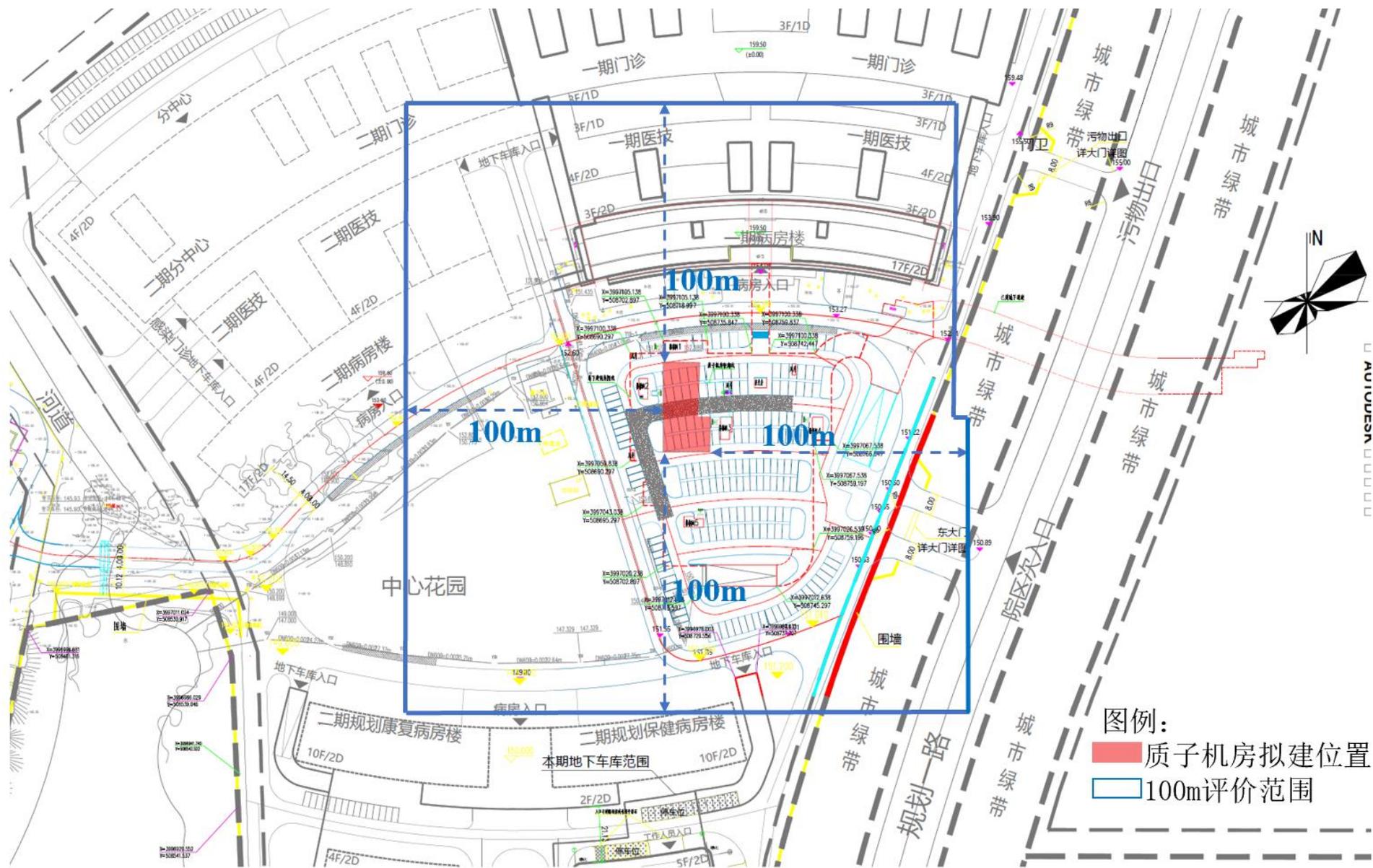


图 1-4 本项目电离辐射评价范围示意图

## 2 自然环境与社会环境状况

### 2.1 地理位置

泰安市，山东省辖地级市，位于山东省中部的泰山南麓，东邻济南市、淄博市、临沂市，南连济宁市，西隔黄河与聊城市、河南省濮阳市相望，北以泰山与济南市为界，介于东经  $116^{\circ} 20'$  —  $117^{\circ} 59'$ ，北纬  $35^{\circ} 38'$  —  $36^{\circ} 28'$  之间，总面积 7762 平方千米。北距省会济南市 66.8 千米。截至 2022 年 10 月，泰安市辖 2 个市辖区、2 个县级市、2 个县。

本项目位于泰安国家高新技术产业开发区（高新区），高新区位于驰名中外的泰山脚下，是国务院批准的国家高新区，泰城现代化园林旅游城市的重要组成部分和副中心。至 2017 年 3 月，泰安高新区辖区面积达到 748 平方公里，辖区人口约 40 万人，其中房村镇 96 平方公里、良庄镇 137 平方公里、徂徕镇 140 平方公里、化马湾乡 100 平方公里、天宝镇 158 平方公里，泰安高新区驻地实现了道路、供水、供电、供热、排污、通讯、场地平整等“七通一平”；新区区位优势明显，发展条件得天独厚，已实现道路、供水、供电、供热、天然气、排污、通讯等“七通一平”，建成了“六纵七横”100 余公里的骨干道路网，各种配套管线同步敷设，基础设施日臻完善。

本项目地理位置图和周边关系图见图 1-1 和图 1-2。

## 2.2 自然环境状况

### 2.2.1 地形地貌

泰山区大地构造位置属中期准地台鲁西断块隆起区西北部泰（安）莱（芜）断陷盆地之西部。地层区划上属于华北地层区鲁西分区泰安小区。出露地层有太古界泰山岩群，下古生界寒武系、奥陶系，新生界下第三系、第四系。

区内构造主要为断裂构造，其中两组断裂最为发育，即北东东向与北北西向。按地质力学划分，属于新华夏系的两组共轭扭裂面，即泰山式和大义山式。

北东东向（泰山式）断裂由北向南依次为泰山断裂、结庄断裂（隐伏）；北北西向（大义山式）断裂由东向西顺序为岱道庵断裂，泮河断裂等。泰山断裂为本区构造格架断裂。

泰安地处鲁中山区的一部分，整个地势自东北向西南倾斜，境内拥有多种地貌类型，山地、丘陵、平原、洼地、湖泊兼而有之。

山地集中分布在市域北部和东部，面积 14.07 万公顷，占全市土地总面积的 18.3%。一般海拔高度在 400—800 米之间。

五岳之首的东岳泰山雄距市域北部，横跨市岱岳区、泰山区和肥城市，向东延伸至济南市莱芜区、钢城区，面积 426 平方千米，其中主峰玉皇顶，为山东省内第一高峰，海拔 1532.7 米，相对高度 1391 米，矗立于泰城北面。

中部徂徕山横卧于市郊区和新泰市结合部，主峰太平顶，海拔 1028 米。东部莲花山位于新泰市境内，向北绵延至济南市。新泰市南部和宁阳县东部的低山丘陵属蒙山支脉的绵延。

丘陵主要分布在新泰市西南部、宁阳县东部、市郊区西北部、肥城盆地边缘及东平县北部，面积 31.64 万公顷，占全市土地总面积的 41.1%，海拔高度一般在 120—400 米之间。

平原主要分布在山麓及河流沿岸，多为河谷平原和山前冲、洪积冲平原，面积 27.76 万公顷，占全市土地面积的 36.1%，海拔高度在 60—120 米之间。

洼地主要分布于东平县内“三湖”（东平湖、稻屯湖、州城湖）周围，面积 3.43 万公顷，占全市总面积的 4.5%，洼地地面高程在 38—60 米之间。

## 2.2.2 气候气象

泰安市属于温带大陆性半湿润季风气候区，四季分明，寒暑适宜，光温同步，雨热同季。春季干燥多风，夏季炎热多雨，秋季晴和气爽，冬季寒冷少雪。全市多年平均太阳辐射总量为 121.58 千卡/平方厘米，年际变化在 112—131 千卡/平方厘米之间。年内以 5 月份最多，12 月份最少。按 80% 保证率计算，全年辐射总量为 117.9 千卡/平方厘米。在 3—11 月份作物生产发育期间，可有 102 亿千卡

/公顷的能量供利用。

泰安市全年平均日照数 2627.1 小时,年际变化在 2342.3—3413.5 小时之间。日照百分率 58%左右。年内以小麦灌浆的 5、6 月份最多,月均 268 小时左右。

泰安市年平均气温为 12.9℃。年内 7 月份最高,平均 26.4℃,1 月份最低,平均为-2.6℃。极端最高气温 41℃,极端最低气温-27.5℃。在地域分布上,南部、西部较高,东部、北部偏低。全年平均 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温 4731℃, $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温 4213℃,无霜期平均 195 天,最长可达 241 天,最短为 161 天。受地形、地貌影响,垂直的变化,地域的差异,形成了一些局部小气候区。泰山山顶年平均气温仅有 5.2℃,而年降水量达 1163.8 毫米;徂徕山前、柴汶河畔的高温小区,年均气温 14℃以上,比全市平均高出三、四度,达到了亚热带标准。

泰安市多年平均降水量为 697 毫米。因受季风气候影响,年际降水变幅较大,年最大降水量 1498 毫米,年最小降水量 199 毫米,相差 7.5 倍。因受地貌影响,东部降水多于西部,山区降水多于平原,东部山区年平均降水量 700—750 毫米,西部平原则为 600—650 毫米,总趋势是自东北向西南逐渐减少。年内降水分布很不均衡,夏季降水最多,占年降水量的 65.2%,冬季最少,仅占 3.6%;一年之中 7 月份最多,占年降水的 32.1%,雨热同季,对农作物和林果生长发育十分有利,1 月份最少,仅占 0.96%。

### 2.2.3 水文

泰安市多年平均水资源可利用总量为 13.4 亿立方米,其中地表水可利用量为 5.2 亿立方米,地下水可开采量为 8.5 亿立方米。多年平均开发利用水总量为 13.1 亿立方米,其中利用地表水 4.33 亿立方米,开发地下水量为 6.65 亿立方米。湖泊集中在东平县境内。东平湖是市内最大、省内第二大淡水湖,该湖为“水泊梁山”的仅存水域,由一级湖和二级湖组成。

其中,河流水面 15076.38 公顷(22.61 万亩),占 27.14%;湖泊水面 14861.89 公顷(22.29 万亩),占 26.75%;水库水面 7312.38 公顷(10.97 万亩),占 13.16%;坑塘水面 10043.29 公顷(15.07 万亩),占 18.08%;沟渠 5941.28 公顷(8.91 万亩),占 10.69%;水工建筑用地 2319.25 公顷(3.48 万亩),占 4.18%。

## 2.3 社会环境概况

### 2.3.1 人口分布

根据第七次全国人口普查结果，泰安市全市常住人口为 5472217 人。与 2010 年第六次全国人口普查的 5494207 人相比，减少 21990 人，下降 0.4%。全市共有家庭户 1848599 户，集体户 127379 户，家庭户人口为 5003557 人，集体户人口为 468660 人。平均每个家庭户的人口为 2.71 人，比 2010 年第六次全国人口普查的 3.04 人减少 0.33 人。

全市常住人口中，0-14 岁人口为 950797 人，占 17.37%；15-59 岁人口为 3314382 人，占 60.57%；60 岁及以上人口为 1207038 人，占 22.06%，其中 65 岁及以上人口为 854918 人，占 15.62%。与 2010 年第六次全国人口普查相比，0-14 岁人口的比重上升 1.77 个百分点，15-59 岁人口的比重下降 9.17 个百分点，60 岁及以上人口的比重上升 7.40 个百分点，65 岁及以上人口的比重上升 6.04 个百分点。

截至 2022 年末，泰安市年末常住人口 540.1 万人，常住人口城镇化率为 65.45%。城镇新增就业 4.96 万人，完成全年目标的 115.4%。其中，失业人员再就业 2.36 万人。

### 2.3.2 社会发展

2022 年泰安市实现地区生产总值 3198.1 亿元，比上年增长 4.3%。分产业看，第一产业增加值 350.9 亿元，增长 4.7%；第二产业增加值 1286.0 亿元，增长 6.8%；第三产业增加值 1561.3 亿元，增长 2.3%。三次产业结构调整为 11:40.2:48.8。

规模以上工业实现增加值比上年增长 9.0%，37 个工业行业大类有 23 个实现正增长、增长面为 62.2%。计算机、通信和其他电子设备制造业，皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业，食品制造业，电力、热力生产和供应业，纺织服装、服饰业等 5 个行业实现较快增长。规模以上工业实现营业收入 2897.4 亿元，

增长 5.1%，实现利润总额 142.9 亿元，下降 7.2%。

居民人均可支配收入 35260 元，比上年增长 5.2%，其中，城镇居民人均可支配收入 43435 元，增长 4.1%；农村居民人均可支配收入 23149 元，增长 6.3%。城乡居民收入比(以农村居民为 1)由上年的 1.92 缩小至 1.88。居民人均消费支出 20193 元，下降 0.4%。其中，城镇居民人均消费支出 24101 元，下降 2.4%；农村居民人均消费支出 14404 元，增长 3.0%。恩格尔系数为 25.5%。

### 2.3.3 交通

截至 2022 年末公路通车里程 16937.6 公里，公路密度 218.2 公里/百平方公里；营业性运输车辆 46613 辆，货车中型以上比例 66%，市直客运集约化比例 81%。新开通定制公交线路 4 条，调整优化公交线路 5 条。泰安港东平港区老湖作业区完成吞吐量 53.58 万吨，全市营运船舶增至 134 艘。京杭运河大清河航道基本具备通航条件，兖矿泰安港公铁水联运物流园项目码头工程和铁路专用线建设顺利推进。“四好农村路”建设任务圆满完成，新改建工程 820 公里，村道安保工程 150 公里，危桥改造 30 座，路面状况改善工程 1070 公里。

## 2.4 环境质量和辐射现状

### 2.4.1 辐射环境质量现状监测与评价

为了解本项目拟建场址（以下简称“拟建场址”）及周围环境的辐射环境现状，评价单位委托中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室对项目拟建场址及周围环境进行了辐射环境现状调查。监测报告见附件 4。

#### 2.4.1.1 监测内容

根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征，本次辐射环境现状调查选取的监测对象为外照射、土壤、地表水、地下水和气溶胶。辐射环境现状监测对象和监测项目列于表 2-1。

质子治疗系统运行期间的辐射场为中子和  $\gamma$  辐射混合场，因此外照射监测内

容包括环境地表  $\gamma$  辐射剂量率和中子剂量当量率。

质子治疗装置运行期间, 机房屏蔽体的次级辐射可能会引起底板周围土壤和地下水的活化, 因此本次辐射环境现状调查中, 对土壤和地下水中相关核素的活度浓度进行分析。此外, 考虑到总  $\alpha$ 、总  $\beta$  能够反应某区域的总放射性水平, 因此本次现状调查对土壤和地下水中总  $\alpha$ 、总  $\beta$  的活度浓度也进行了分析。

表 2-1 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
1	外照射	环境地表 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率
		中子剂量当量率
2	土壤	$^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度
3	气溶胶	总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度
4	地表水	$^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度
5	地下水	$^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度

#### 2.4.1.2 监测/取样点位

环境地表  $\gamma$  辐射剂量率和中子当量剂量率的监测点位见图 2-1。由监测点位可知, 在项目拟建场址、场址周围环境均设置了监测点位, 能够反映拟建场址及邻近环境的辐射环境本底水平。因此, 监测点位布设是符合相关标准规定的。

环境介质取样点位见图 2-2。取土壤样品时, 根据现场条件, 在本项目拟建场址的东、西、南、北方位分别设取样点, 每个点位取土样约 3kg, 取样时去除石头、树枝等杂质。取水样样品容器选用聚乙烯塑料桶, 容器预先用盐酸洗涤后, 再用净水冲洗干净, 盖上盖子。分析  $^3\text{H}$  样品用棕色玻璃瓶采集。气溶胶样品采集使用崂应 2031 型 TSP 大流量或其他种类大流量空气采样器, 滤材选用对直径  $0.5\ \mu\text{m}$  粒子捕集效率 99.95% 以上的 TD/G-99B 聚丙烯滤膜 (可完全灰化)。采样器布设在开阔的平地上, 应避免选择在异常微气象情况或其他由于人为因素的影响距离, 采样口高出基础面 1.5m, 进气口和出气口之间有一定的距离, 取样流量在取样过程中要保持稳定, 在正常运行和预期的滤纸负荷变化范围内, 流量变化大于 5% 时, 及时更换滤纸。



图例 ①  $\gamma$  辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位

图 2-1 环境地表  $\gamma$  辐射剂量率和中子剂量当量率监测点位



图 2-2 环境介质取样点位

### 2.4.1.3 监测设备和监测方法

#### 2.4.1.3.1 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-2。现场监测时间为 2023 年 11 月 29 日-11 月 30 日，监测、分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

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
$\gamma$ 辐射剂量率仪	FH40G+FHZ672-10	024979+0810	测量范围：10nGy/h~100 $\mu$ Gy/h； 能量响应：48keV~6MeV 相对响应之差小于 $\pm 15\%$ （相对于 $^{137}\text{Cs}$ 参考 $\gamma$ 辐射源）	2024/9/28
中子周围剂量当量率仪	LB123+LB6411	178982-4092+1501	测量范围：50nSv/h~100mSv/h； 能量范围：热中子~20MeV。	2024/12/26
高纯锗 $\gamma$ 谱仪	BE3830P	13490	分辨力 3keV 相对误差 $< 10.0\%$	2025/3/22
低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪	BH1227	2020-022	探测效率： $\alpha \geq 80\%$ ； $\beta \geq 50\%$	2024/3/18
超低本底液闪谱仪	Quantulus 1220	2200266	对氡的本底计数率：0.91cpm，探测效率：23% 对 $^{14}\text{C}$ 的本底计数率：2.5cpm，探测效率：50%	2024/10/23

#### 2.4.1.3.2 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	环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率	采用网格均匀布点的方式布设环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率监测点位，共计 15 个监测点位。采用便携式监测仪表，以定点测量方式进行。每个监测点位测量 5 次，每次间隔 5 秒钟，监测结果取平均值。	《环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率测定规范》（GB/T 14583-1993）
2	中子剂量当量率	采用网格均匀布点的方式布设，共计 15 个监测点位。采用中子剂量当量率仪，以定点测量的方式进行。	
3	土壤	分别在指定的点位取表层土壤，使用土壤采集器，在 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 范围内，采用梅花五点法采集，条件不具备时采用蛇形布样采集，每点采 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 的表层	《高纯锗 $\gamma$ 能谱分析通用方法》（GB/T11713-2015）； 《水中总 $\alpha$ 放射性的测定 厚

		土样（1~5cm），在现场充分混合，除去石块、草根的杂物后取约 3kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。土壤样品送实验室预处理后采用低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪进行总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度测量，采用高纯锗 $\gamma$ 谱仪测量 $\gamma$ 核素活度浓度。	源法》（HJ898-2017）； 《水中总 $\beta$ 放射性的测定 厚源法》（HJ899-2017）； 《水中氚的分析方法》（HJ1226-2020）。
4	地表水和地下水	样品容器选用聚乙烯塑料桶，容器预先用盐酸洗涤后，再用净水冲洗干净，盖上盖子。分析 $^3\text{H}$ 样品用棕色玻璃瓶采集。采样时用采样水冲洗器具 2~3 次，用漏斗把样品水充入样品容器中，至预定体积。	
5	气溶胶	采集使用崂应 2031 型 TSP 大流量或其他种类大流量空气采样器，滤材选用对直径 $0.5\ \mu\text{m}$ 粒子捕集效率 99.95% 以上的 TD/G-99B 聚丙烯滤膜（可完全灰化）。采样器布设在开阔的平地上，应避免选择在异常微气象情况或其他由于人为因素的影响距离，采样口高出基础面 1.5m，进气口和出气口之间有一定的距离，取样流量在取样过程中要保持稳定，在正常运行和预期的滤纸负荷变化范围内，流量变化大于 5% 时，及时更换滤纸。	

#### 2.4.1.4 质量保证措施

（1）监测单位具备中国国家认证认可监督管理委员会颁发的《检验检测机构资质认定证书》（证书编号 230012349756，有效期至 2029 年 8 月 21 日），现场监测时间在其证书有效期内。监测项目在《检验检测机构资质认定证书附表》里批准的检验检测能力范围内。

（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）针对各类样品的采集，监测单位制定了操作规程，要求参加采样人员在实施采样前充分了解，并在采样过程中严格执行；

（4）采样器符合国家技术标准的规定，使用前须检验并确认其性能良好后方可采样，保证采样器和样品容器的清洁，防止交叉污染。

（5）采样后按规定方法进行暂存或预处理，并尽快送往实验室，做好样品交接工作；

（6）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；

(7) 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用；

(8) 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；

(9) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；

(10) 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。

### 2.4.1.5 监测结果

#### 2.4.1.5.1 外照射

本项目拟建场址及周围环境的环境地表  $\gamma$  辐射剂量率和中子剂量当量率监测结果见下表。

表 2-4 本项目拟建场址内环境地表  $\gamma$  辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

监测点位	点位描述	环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率, nGy/h*	中子周围剂量当量率, $\mu$ Sv/h
1	质子治疗装置拟建场所西侧	37.9±0.5	<LLDn
2	质子治疗装置拟建场所东侧	25.0±0.4	<LLDn
3	质子治疗中心拟建场所北侧	22.4±0.4	<LLDn
4	质子治疗中心拟建场所西侧	24.5±1.4	<LLDn
5	质子治疗中心拟建场所南侧	41.2±0.7	<LLDn
6	质子治疗中心拟建场所东侧	22.8±1.1	<LLDn
7	质子治疗中心北侧院区空地	20.0±1.0	<LLDn
8	质子治疗中心西侧院区道路	19.3±3.5	<LLDn
9	质子治疗中心南侧院区空地	12.9±0.8	<LLDn
10	质子治疗中心东侧院区空地	14.6±0.2	<LLDn
11	质子治疗中心北侧院区出入口	11.5±0.8	<LLDn
12	质子治疗中心西侧院区空地	16.6±0.5	<LLDn
13	质子治疗中心南侧院区空地	52.5±0.3	<LLDn
14	质子治疗中心东侧院外道路	28.4±1.3	<LLDn
15	质子治疗中心东侧院外道路	36.6±1.0	<LLDn

注\*：监测结果已扣除仪表对宇宙射线的响应（20.3 nGy/h）；LLD 是 lower limit of detection 探测下限，LLDn=0.05 $\mu$ Sv/h。

由上表可知，本项目拟建场址及周围环境地表  $\gamma$  辐射剂量率水平在

(11.5~52.5)nGy/h(扣除宇宙射线 20.3nGy/h)范围内,中子剂量当量率未检出。根据《2022年全国辐射环境质量报告》(中华人民共和国生态环境部,2020年),山东省2022年环境地表 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率小时均值范围在59.8~101.4nGy/h之间。因此,本项目拟建场址及周围环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率水平在山东省环境地表 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率本底涨落范围内,项目周围环境的辐射环境质量现状无异常。

#### 2.4.1.5.2 土壤

拟建场址土壤样品的分析测量结果见表 2-5。

表 2-5 土壤样品监测结果

样品编号	取样点	检测项目	检测结果
土壤 1	山东泰安医院厂址道路旁	$^7\text{Be}$	<MDC=2.3E+00 Bq/kg
		$^{22}\text{Na}$	<MDC=5.5E-01 Bq/kg
		$^{54}\text{Mn}$	<MDC=2.7E-01 Bq/kg
		$^{51}\text{Cr}$	<MDC=2.7E+00 Bq/kg
		总 $\alpha$	(4.36±0.34) E+02Bq/kg
		总 $\beta$	(1.05±0.02) E+03Bq/kg
土壤 2	山东泰安医院厂址地表	$^7\text{Be}$	<MDC=2.1E+00 Bq/kg
		$^{22}\text{Na}$	<MDC=4.0E-01 Bq/kg
		$^{54}\text{Mn}$	<MDC=2.4E-01 Bq/kg
		$^{51}\text{Cr}$	<MDC=2.4E+00 Bq/kg
		总 $\alpha$	(2.86±0.26) E+02Bq/kg
		总 $\beta$	(8.99±0.16) E+02Bq/kg
土壤 3	山东泰安医院厂址地坑	$^7\text{Be}$	<MDC=2.6E+00 Bq/kg
		$^{22}\text{Na}$	<MDC=4.9E-01 Bq/kg
		$^{54}\text{Mn}$	<MDC=3.6E-01 Bq/kg
		$^{51}\text{Cr}$	<MDC=2.5E+00 Bq/kg

		总 $\alpha$	(1.56±0.26) E+02Bq/kg
		总 $\beta$	(8.17±0.17) E+02Bq/kg

拟建场址土壤中核素  $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Cr}$  活度浓度均小于探测限；总  $\alpha$  活度浓度在 (1.56~4.36) E+02Bq/kg 范围内；总  $\beta$  活度浓度在 (0.817~1.05) E+03Bq/kg 范围内。

#### 2.4.1.5.3 水样

拟建场址地表水和地下水的监测结果见下表。

表 2-6 地表水和地下水监测结果

样品编号	检测项目	结果
山东泰安医院厂址地表水	$^7\text{Be}$	<MDC=5.0E-02 Bq/L
	$^3\text{H}$	<MDC=1.5 Bq/L
	总 $\alpha$	<MDC=3.7E-0.2 Bq/L
	总 $\beta$	(1.36±0.07)E-01 Bq/L
山东泰安医院厂址地下水	$^7\text{Be}$	<MDC=4.9E-02 Bq/L
	$^3\text{H}$	<MDC=1.5 Bq/L
	总 $\alpha$	<MDC=3.8E-0.2 Bq/L
	总 $\beta$	(1.02±0.08)E-01 Bq/L

拟建场址环境水样中总  $\alpha$ 、 $^7\text{Be}$  和  $^3\text{H}$  活度浓度均小于探测限；总  $\beta$  活度浓度在(1.02~1.36) E-01Bq/L 范围内。

#### 2.4.1.5.4 气溶胶

本项目拟建场址上风向和下风向气溶胶监测结果见下表。

表 2-7 气溶胶监测结果

样品编号	取样地点	检测项目	结果
------	------	------	----

气溶胶 1	山东泰安医院厂址东北	总 $\alpha$	$(1.36\pm 0.10)E-04 \text{ Bq/m}^3$
		总 $\beta$	$(7.89\pm 0.08)E-04 \text{ Bq/m}^3$
气溶胶 2	山东泰安医院厂址西南	总 $\alpha$	$(1.74\pm 0.11)E-04 \text{ Bq/m}^3$
		总 $\beta$	$(9.95\pm 0.10)E-04 \text{ Bq/m}^3$

拟建场址气溶胶总  $\alpha$  活度浓度在 $(1.36\sim 1.74)E-04 \text{ Bq/m}^3$  范围内，总  $\beta$  活度浓度在 $(7.89\sim 9.95)E-04 \text{ Bq/m}^3$  范围内。

## 2.4.2 场址适宜性评价

本项目选址位于泰安市高新区泰安市中心医院高新院区院内，该地块规划用地性质为医疗用地，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。

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

本项目拟在泰安市中心医院高新院区院内改造原地下停车场，拟将地下停车场建设为质子治疗中心和地下停车场，其中质子治疗中心位于地下一层的西北角，拟建设 1 间加速器机房（含治疗区）、1 间治疗控制室以及其他配套功能房间；停车场位于地下一层的东北角和南侧。

本项目地下一层的平面布局图见下图。

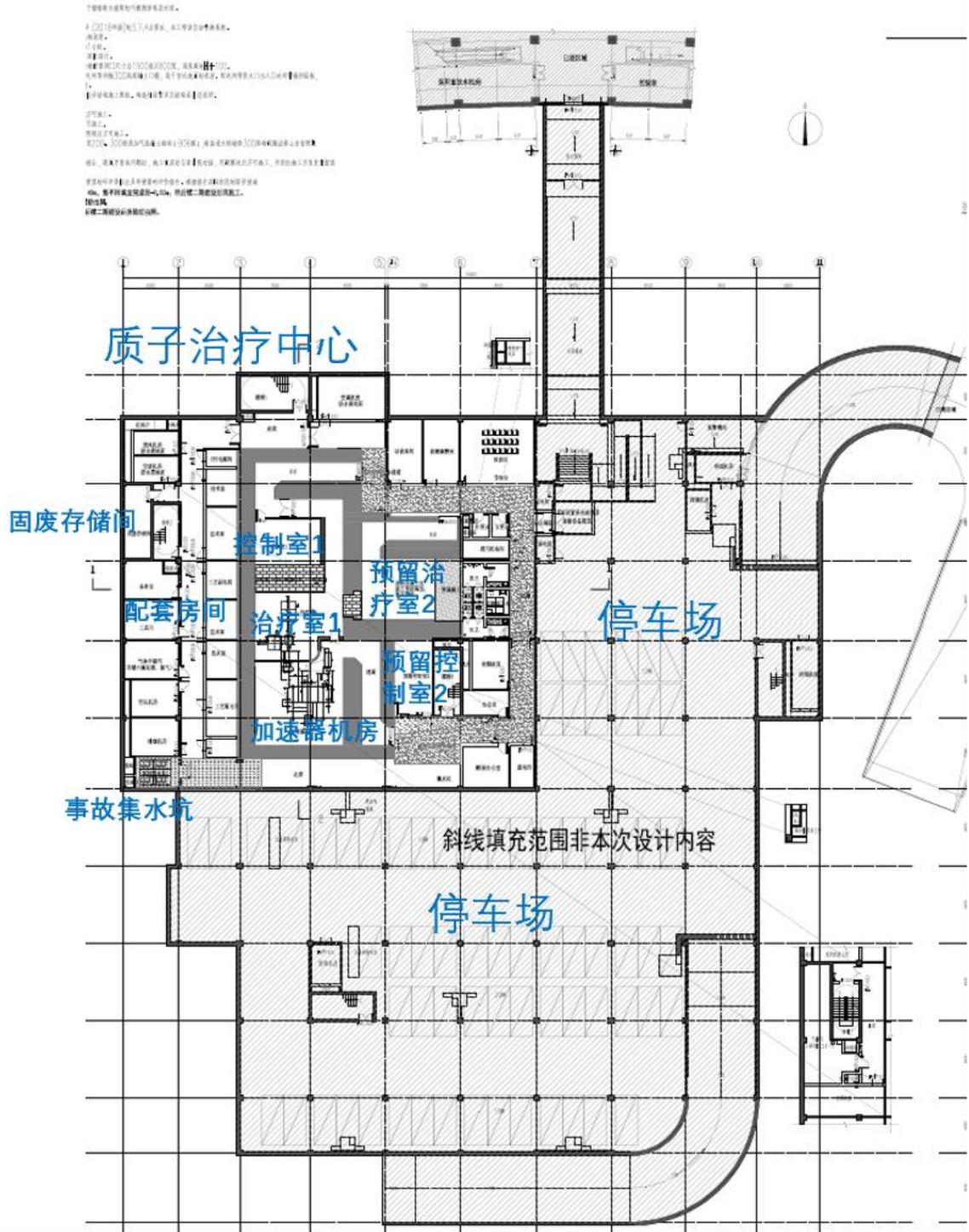


图 3-1 质子治疗中心地下一层平面布局图

### 3.1.2 基本参数

本项目拟配备的医用射线装置见表 3-1。

表 3-1 本项目拟配备的医用射线装置一览表

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	质子治疗系统 (2个 X 射线管)	P-Cure	质子最高能量: 250MeV X 射线管最大管电压: 150kV, 最大管电流: 640mA	中以康联国际医疗科技有限公司	1	I (X 射线管属于 III 类射线装置)	质子治疗中心
2	模拟 CT 机	Philips Brilliance Big Bore CT	最大管电压: 140kV, 最大管电流: 500mA	中以康联国际医疗科技有限公司	1	III	质子治疗中心治疗区

## 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以康联国际医疗科技有限公司研制生产的 P-Cure 型重质子治疗系统, 具体技术指标表 3-2。该装置主要由注入器、同步加速器、束流引出系统、束流运输系统、扫描头、旋转治疗椅和室内立位 CT 等组成。

首先, 注入器产生质子, 并通过串列静电加速器将其加速到 1.5 MeV, 为同步加速器提供高品质高流强的脉冲束流; 其次, 同步加速器收集注入的质子, 进行数百万圈的加速后, 将质子能量提高到预设的能量; 然后, 通过束流引出系统, 控制质子轨道, 进行偏转引出; 最后, 引出的质子束在扫描治疗头的作用下对靶区进行扫描。

装置的布局如图 3-2 所示, 束流经过的子系统部件如图 3-3 所示。本项目质

子治疗装置平面、剖面布局示意图如图 3-4、图 3-5 所示。

表 3-2 质子治疗装置主要技术指标

指标	数值/方案
加速器类型	同步加速器
射线种类	质子
引出能量（可调节）	70MeV~250MeV
标准最大引出流强	2.2E+09 p/s
引出效率	大于 60%

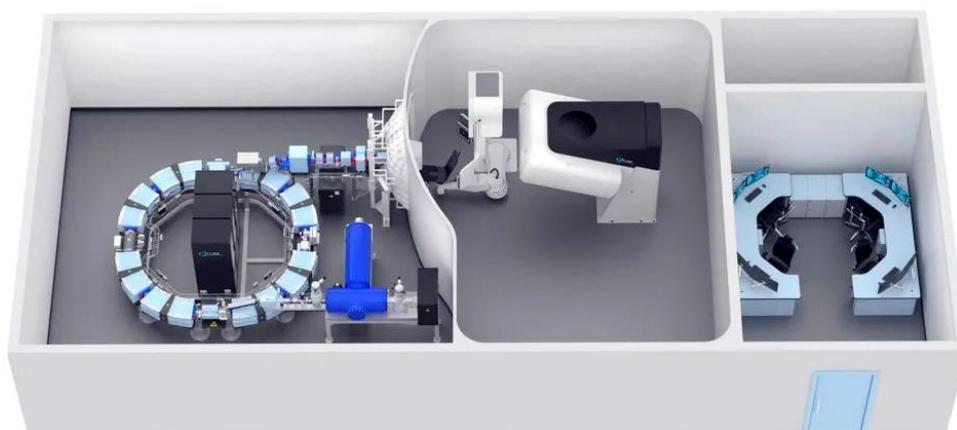


图 3-2 质子治疗系统布局示意图

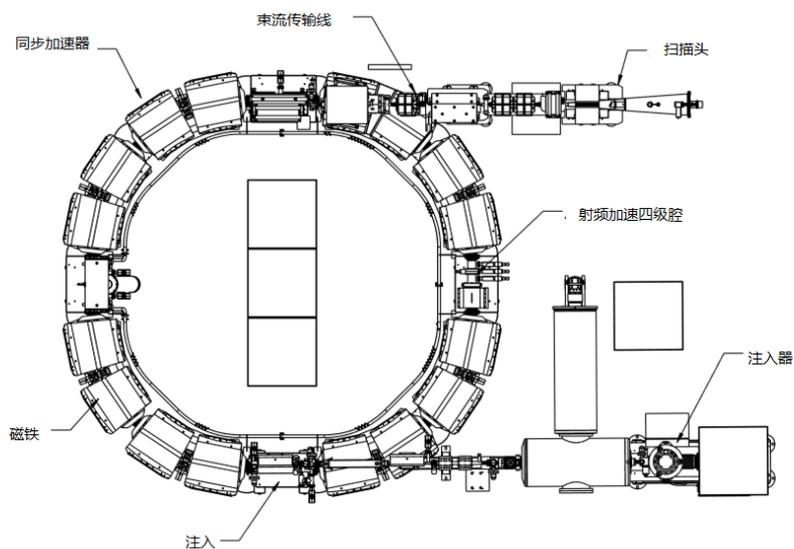


图 3-3 束流经过的子系统部件

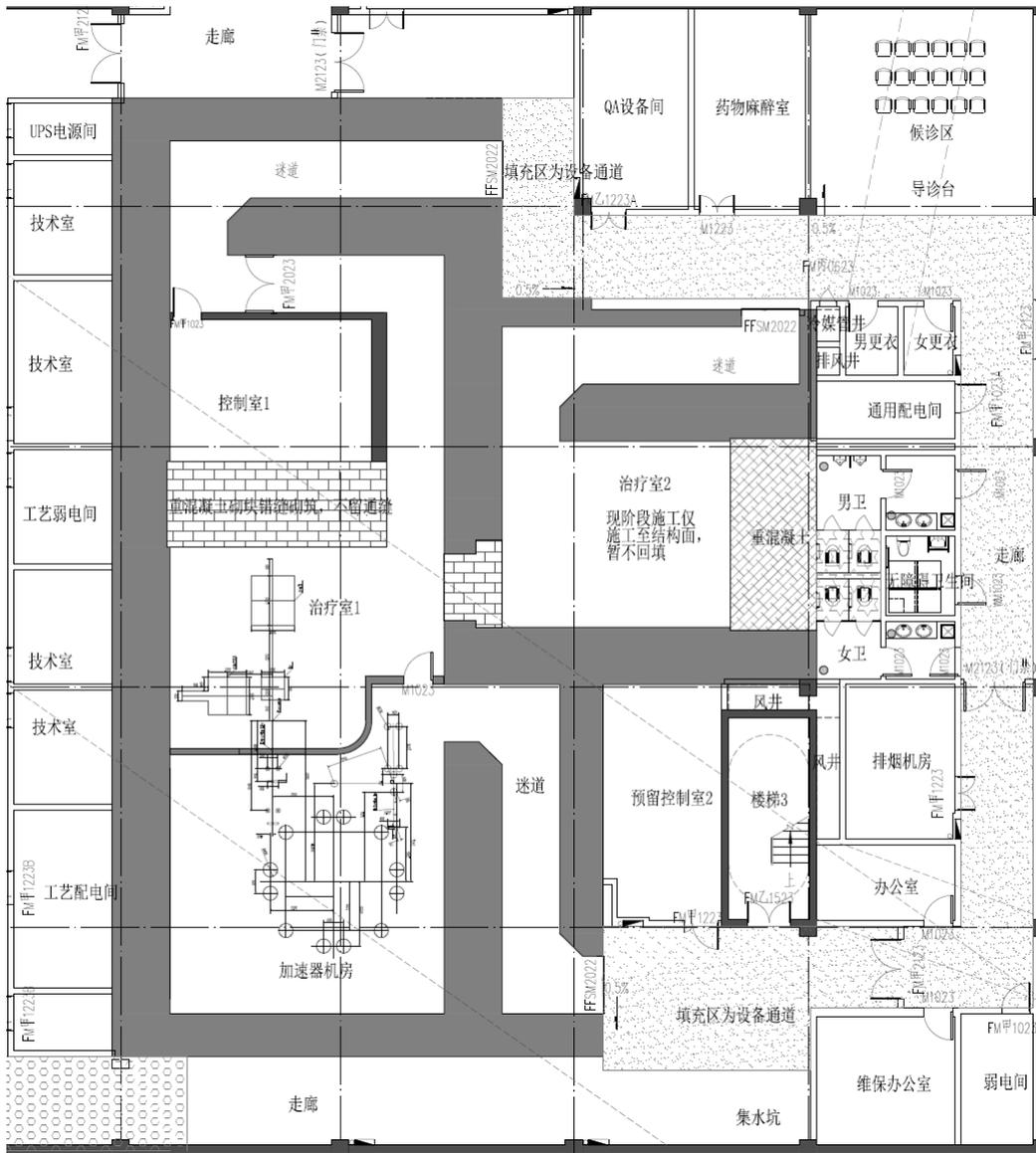


图 3-4 本项目质子治疗装置平面布局示意图

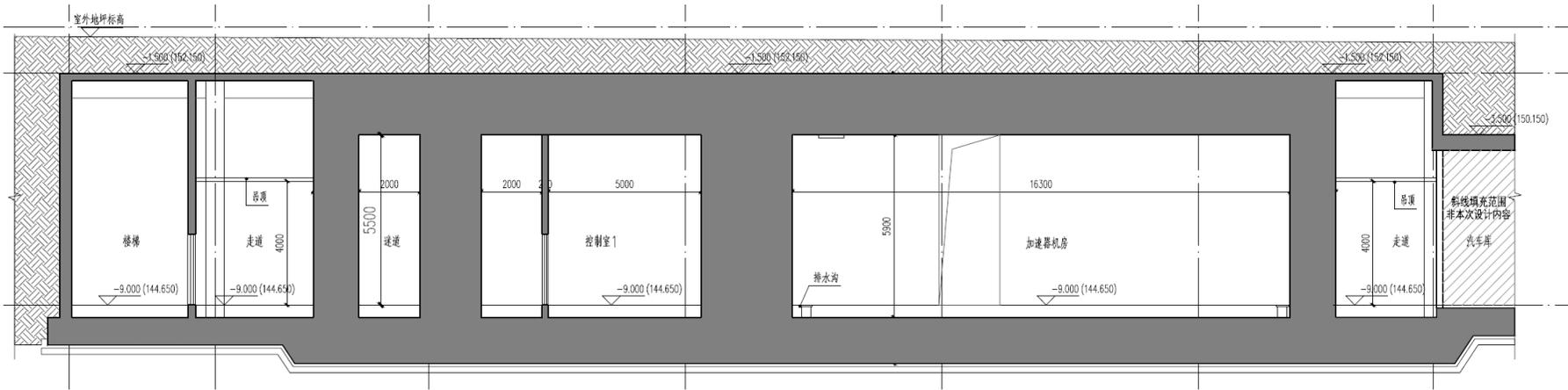


图 3-5 本项目质子治疗装置剖面布局示意图

### 3.2.1.2 工作原理

#### 3.2.1.2.1 注入系统

串列静电加速器由两段构成，第一段对 H 负离子进行加速，第二段对质子进行加速。在两段中间区域为高电压，两端为低电压，这样仅通过一个高压形成了两段静电加速电场，两个加速电场配合，完成两次加速，达到 1.5MeV 的注入能量。

#### 3.2.1.2.2 同步加速器

同步加速器是整个系统的核心部分，它承担着束流累积、束流加速及引出到束流传输系统的任务。

第一部分为偏转磁体组，如图 3-6 所示。偏转磁体组每  $90^\circ$  为一个扇区，共 4 个扇区。每个偏转磁体组由四个小的偏转磁体组成。偏转磁体产生的偏转磁场，为质子束提供偏转向心力，使其沿着圆弧形轨道行进。随着加速过程进行，质子束的能量不断累积增加，从而其速度也不断变大。因此，需要偏转磁场的场强也同时逐渐提升，以使质子束轨道半径维持不变。偏转磁体系统由铁轭、绕组线圈、真空系统、冷却系统、支撑系统构成。绕组线圈中的直流电形成磁场，磁场通过铁轭回路并穿过两个磁极之间的真空离子通道，冷却系统为线圈提供散热，支撑系统提供定位和支撑。

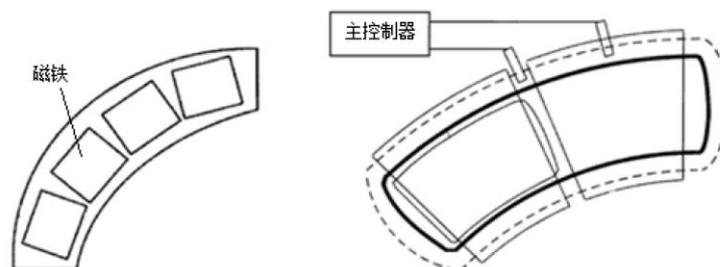


图 3-6 偏转磁体组示意图

第二部分为射频（RF）加速腔，如图 3-7 所示。射频加速腔由十组射频加速

子系统构成，每个子系统由导磁线圈、回路线圈、放大微电路组成，且并联到射频（RF）加速腔上。主控制器控制射频（RF）加速腔的相位，并发送信号到微电路，经过信号放大后在回路线圈形成回路电流，该回路电流在导磁线圈内激发出磁场脉冲，从而在质子束行进方向上产生加速电压脉冲。每个加速电压脉冲实际有效加速电压为 10V，共包含 10 个加速电压脉冲，每次经过射频（RF）加速腔，质子可获得 100eV 的能量。

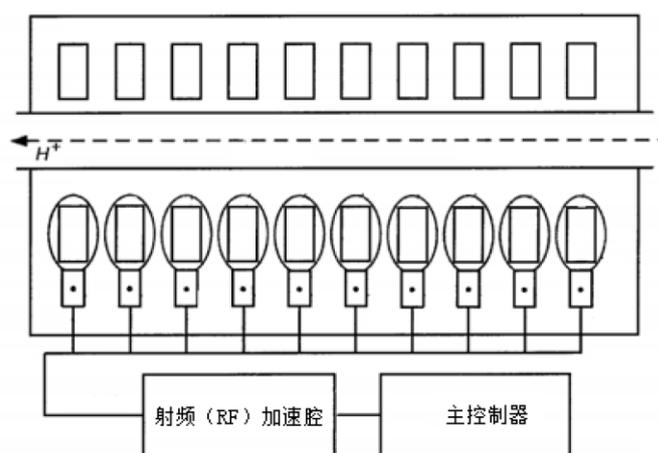


图 3-7 射频（RF）加速腔示意图

### 3.2.1.2.3 束流引出系统

束流引出系统主要包括两对射频（RF）偏转电极对。该系统的引出方案如图 3-8 所示。在引出过程中，质子束先通过第一 RF 偏转电极对，在第一 RF 偏转电场作用下，质子束行进路径发生第一次偏转；在第二 RF 偏转电场作用下，质子束路径发生第二次较大偏转，然后通过磁体偏转引出环形轨道。

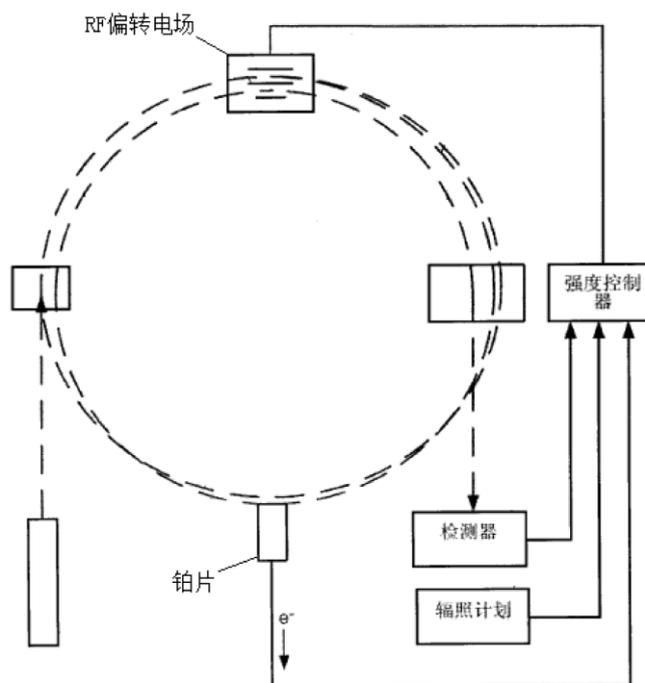


图 3-8 束流引出示意图

### 3.2.1.2.4 束流运输系统

束流运输系统的作用是将同步加速器系统引出的束团传输到治疗终端，它包括一个二极磁铁，三个四极磁铁，如图 3-9 红框部分。

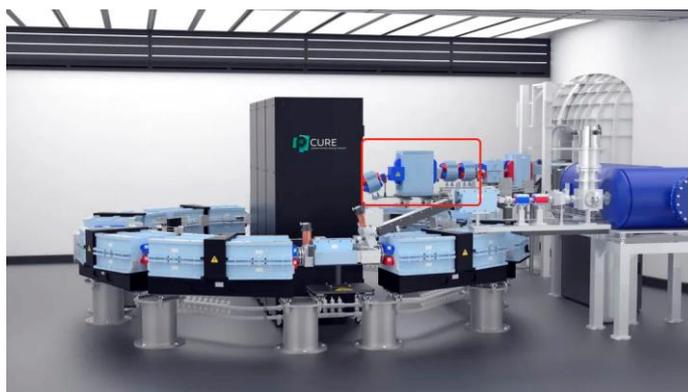


图 3-9 束流运输线实物参考图

### 3.2.1.2.5 治疗室终端

治疗室系统由扫描治疗头、全维度机械臂坐立位患者治疗系统、患者影像采

集系统和双正交治疗中实时影像验证系统等部分组成。

### (1) 扫描治疗头

扫描治疗头是束流经过的最后一个系统，它完成三个基本功能：1) 对束流进行调制，包括照射场，束流扫描速度等；2) 束流参数的测量，包括剂量，束流位置，截面等；3) 束流的控制，包括束流的开/关，束流能量等。

其主要部件包括扫描磁铁，电离室，及相应的控制器。扫描磁铁本质上是两个二极管，实现 X 和 Y 两个方向的束流扫描；电离室用于测量剂量、位置和束流形状。扫描治疗的示意图如图 3-10 所示。

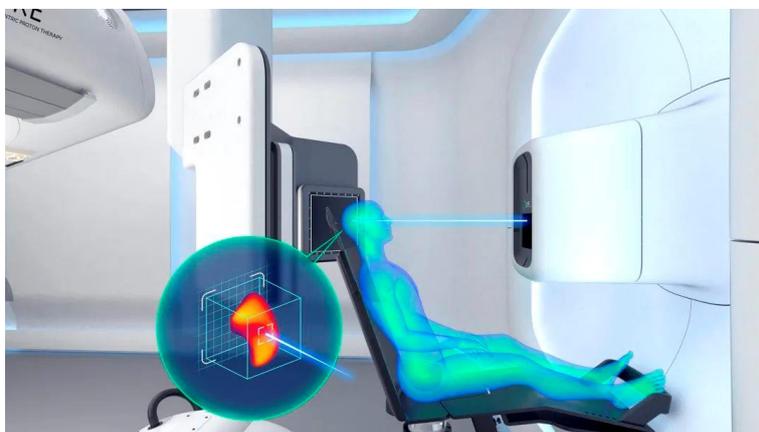


图 3-10 扫描治疗示意图

### (2) 机械臂坐立位患者治疗系统

机械臂坐立位患者治疗系统是质子放射治疗系统中用于支撑、固定和摆位患者的装置，如图 3-10 所示。与常规病人支撑系统不同的是，它以坐姿治疗病人。全维度机械臂坐立位患者治疗系统由精度小于 0.5mm 的全数字化控制机械臂和治疗角度连续任意可调的患者坐立位定位系统组成，以实现肿瘤患者靶区的全身治疗。

### (3) 患者影像采集系统

患者影像采集系统主要由诊断级大孔径 CT 断层扫描影像系统和全数字化控制的移动升降系统组成，可实现对患者全身各部位影像的采集，完成治疗计划的

制定，并完成对治疗前患者摆位的位置验证和治疗后肿瘤靶区的治疗效果验证，可实现每次治疗前对患者肿瘤靶区影像的采集，并生成经过校准和调整的患者治疗计划，实现自适应质子治疗。

#### (4) 双正交治疗中实时影像验证系统

双正交治疗中实时影像验证系统用于对患者治疗中实时肿瘤靶区位置的精确验证，实现质子对肿瘤的高精度治疗，提高临床治疗效果。

### 3.2.1.3 治疗流程

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 CT 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 CT 机出束产生的 X 射线。该环节在地下一层质子治疗中心的质子加速器机房的治疗室内进行，主要由治疗技师和护士进行操作。治疗技师主要负责在治疗室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 6min/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，在治疗室内完成留针，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 3-3。

表 3-3 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	6min/人次
	控制室内操作开机照射	1min/人次
护士	治疗室内留针	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治疗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、 $\gamma$  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。其中，治疗前摆位约需 6min，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，主要的辐射源项是定位 X 射线管出束产生的 X 射线。

### (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、 $\gamma$  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。根据“3.3.1.3.5 节”分析计算，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 3-11、表 3-4。

**表 3-4 质子治疗系统工作过程中污染物产生环节及主要污染因子**

污染物产生环节	主要污染因子
模拟定位	X 射线
治疗室内 X 射线定位	
同步加速器运行	质子、中子、 $\gamma$ 射线、 活化空气、活化冷却水、活化结构部件
束流引出系统运行	
束流运输系统运行	
治疗室终端出束	质子、中子、 $\gamma$ 射线、活化空气、活化结构部件、患者活化
治疗室内解除摆位	活化空气、活化结构部件、患者活化

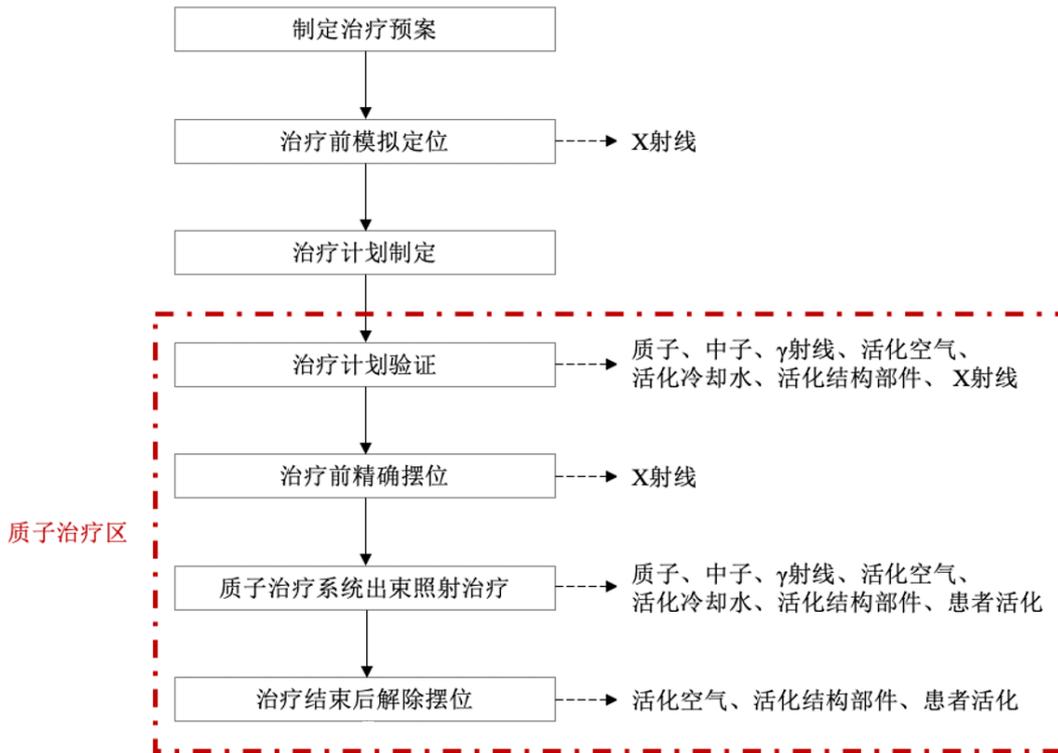


图 3-11 质子治疗系统工作流程及主要产污环节图

### 3.2.1.4 工作规划及人员配置

#### 3.2.1.4.1 工作规划

质子治疗系统的年使用规划及出束时间见下表。

表 3-5 质子治疗系统的年使用规划

序号	内容	单位	治疗室 1
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3
2	每室每天治疗时间	h/d/室	16
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	48
4	每室每年治疗天数	d/a/室	300
5	每室每年治疗人数	人/a/室	504
6	每人平均治疗次数	次/人	28
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	14400
8	每人治疗平均出束时间	min/人次	5
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	4
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	1200

11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	52
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	10
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	1252
14	年总出束时间	h/a	1252

### 3.2.1.4.2 人员配置

质子治疗辐射工作人员配置情况见下表。

表 3-6 质子治疗辐射工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、治疗室、医生办公室、抢救室	5 人	每天一班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、治疗室、治疗控制室	4 人	每天两班，每班 8h
治疗技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	质子治疗室及其控制室、技师办公室	6 人	每天两班，每班 8h
护士	治疗准备、注射、护理等	注射室、质子治疗室及其控制室、护士站	3 人	每天两班，每班 8h
维修工程师	设备日常运维	质子治疗室、维修办公室	2 人	每天两班，每班 8h

### 3.2.2 模拟定位 CT 机

本项目拟使用 1 台模拟定位 CT 机，用于肿瘤放疗前的模拟定位。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。

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。

### 3.3 辐射源项分析

#### 3.3.1 质子治疗系统

质子治疗系统运行过程中产生的辐射场，主要为装置运行时产生的“瞬发辐射场”和装置停机后依然存在的“残余辐射场”。瞬发辐射是装置运行时损失的粒子束流与结构部件和治疗室内患者等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但会随着装置的停机而完全消失；残余放射性主要来自与装置结构部件、冷却水、场所内空气等被质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。

##### 3.3.1.1 瞬发辐射源

###### 3.3.1.1.1 瞬发辐射场分析

对于质子治疗系统，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，会与部件材料中的原子核发生核反应。

质子治疗系统从同步加速器引出的质子最高能量为 250MeV，治疗终端输出的能量在 70MeV~250MeV 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,  $\gamma$ ) 等核反应产生瞬发中子、 $\gamma$  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 $\gamma$ 。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 $\gamma$ 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 $(n, \gamma)$ 反应等转变成了 $\gamma$ 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、 $\gamma$ 的混合辐射场。

此外，患者定位系统的X射线管出束期间，会产生X射线，也是质子治疗期间瞬发辐射场的组成部分。

### 3.3.1.1.2 各环节束流损失分析

根据建设单位和设备供货商提供的资料，本项目质子治疗系统各束流损失点的束流损失情况如下。

表 3-7 束流损失表

源项	靶材料	损失类型	能量, MeV	损失量, p/s
患者	组织/水	集中损失	250	2.00E+09
			120	2.00E+09
			70	1.80E+09
扫描头	不锈钢	集中损失	250	1.00E+08
			120	1.00E+08
			70	3.00E+08
束流运输	不锈钢	均匀损失	250	1.00E+08
			120	1.00E+08
			70	1.00E+08
束流引出	不锈钢	集中损失	250	2.30E+09
			120	2.20E+09
			70	1.80E+09
同步加速器	不锈钢	均匀损失	250	3.00E+08
			20	1.00E+08
			2.1	3.00E+09

注入	不锈钢	均匀损失	2	2.00E+09
----	-----	------	---	----------

### 3.3.1.1.3 辐射场源项估算

#### 3.3.1.1.3.1 FLUKA 程序

本次评价中，在对辐射场源项进行估算时，主要采用 FLUKA 程序，通过该程序模拟不同能量的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、质子在内的 60 余种不同的粒子及重离子，其中子能量范围从  $10^{-5}\text{eV}$  到  $20\text{TeV}$ ，光子能量范围从  $100\text{eV}$  到  $10000\text{TeV}$ ，电子从  $1\text{keV}$  到  $1000\text{TeV}$ ，带电粒子及其反粒子为  $1\text{keV}$  到  $20\text{TeV}$ ，重离子为  $<1000\text{TeV}/n$ 。该程序还可以传输偏振光子（如同步辐射）和光学光子，在线进行不稳定剩余核辐射的时间演化和跟踪。FLUKA 还可以处理非常复杂的几何图形，能正确跟踪带电粒子，还提供各种可视化和调试工具。

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

#### 3.3.1.1.3.2 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  $230\text{MeV}$  质子打铁靶和水靶产生的辐射场如图 3-12 和图 3-13 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。

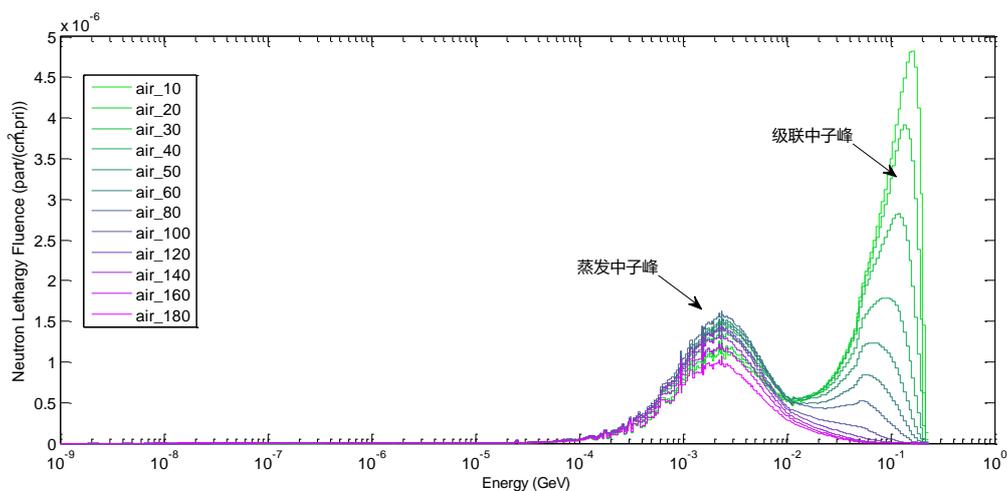


图 3-12 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布

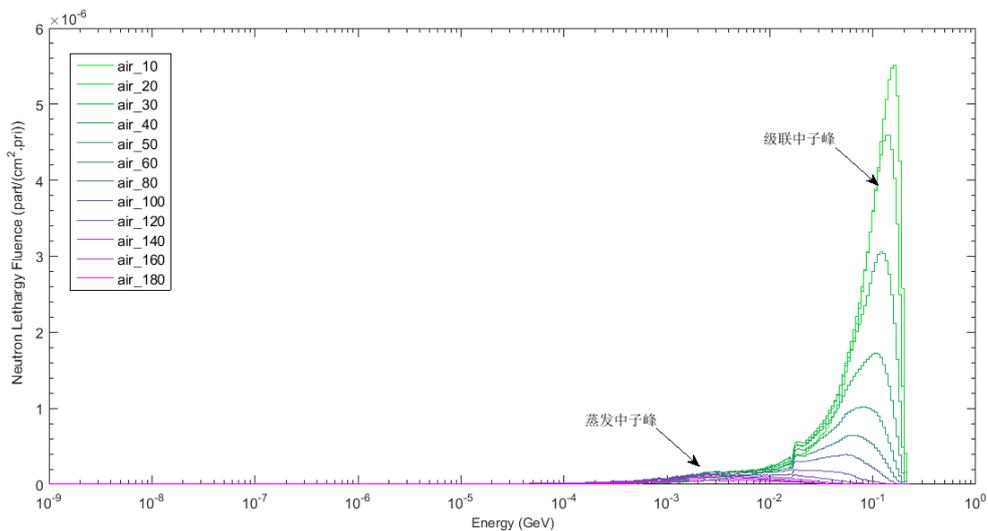


图 3-13 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布

### 3.3.1.1.3.3 光子能谱

利用 FLUKA 程序模拟了 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的光子能谱，如图

3-14 和图 3-15 所示。从角分布来看，光子几乎是各向同性的。无论是打铁靶和水靶，谱峰出现在 1MeV~10MeV 之间。

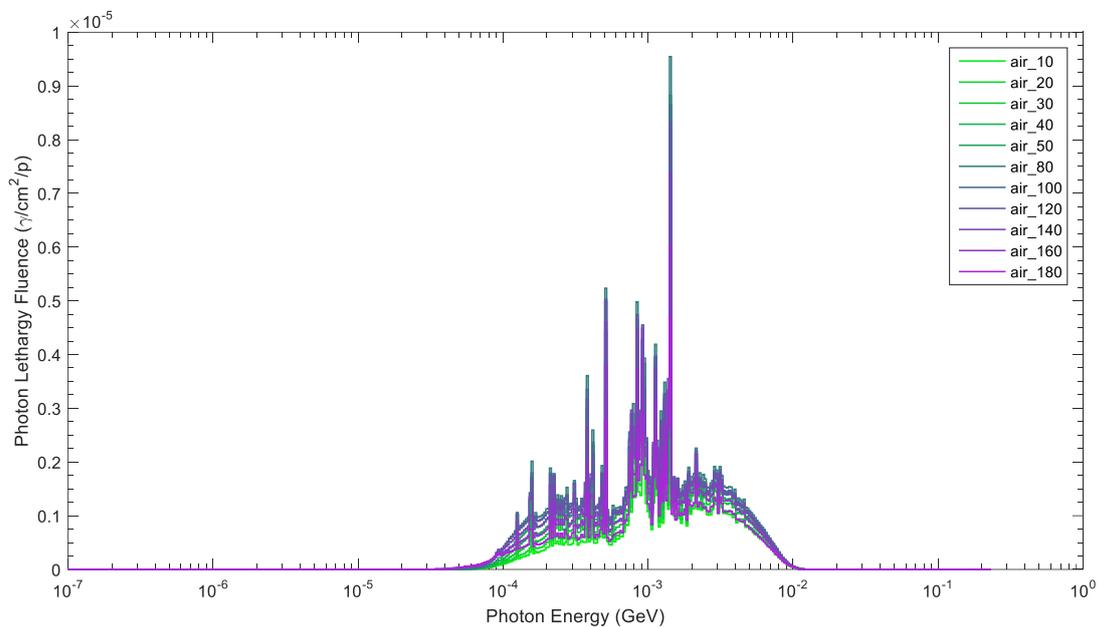


图 3-14 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

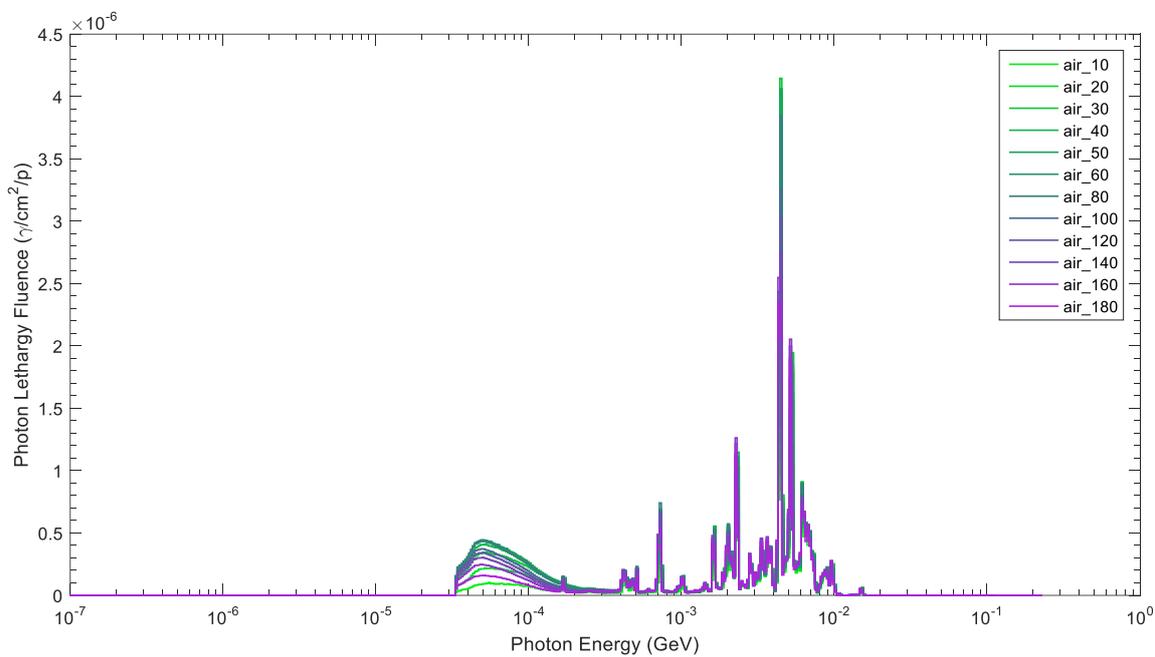


图 3-15 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

### 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。且对质子加速器而言，其 $\gamma$ 剂量率比中子剂量率低约1个量级。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 3-8。

表 3-8 质子治疗装置各区域顶板外表面 30cm 剂量率

关注点	区域描述	剂量率计算结果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
B1	治疗区顶板外停车场	1.14	10
B2	加速器区顶板外停车场	0.18	10

由计算结果可知，本项目质子治疗系统辐射工作场所顶板外的剂量率均低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，不需要考虑中子反散射的影响。

### 3.3.1.3 感生放射性

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

质子治疗系统产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响对象是对停机后，需要进入加速器大厅和治疗室内工作的物理师、技师以及维修维护工程师等工作人员。本次评价主要对质子治疗系统空气、冷却水、结构部件、QA 水箱、土壤和地下水的感生放射性进行分析评价。

此外，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）和文献《质子加速器治疗系统感生放射性辐射剂量研究》（宋钢，2013年，山东大学硕士学位论文）对治疗室内患者的感生放射性的计算和测量结果，当质子能量较高（230MeV）时，单次短时治疗结束后治疗室内感生放射性水平较高，停机1min后距离治疗中心30cm处剂量率水平可达200 $\mu$ Sv/h，停机5min后剩余剂量率可衰减为停机1min的1/4。考虑到每次治疗任务结束后，短时间可能进入治疗室的摆位技师人员对治疗结束后的患者进行解除摆位操作时可能受到照射，本次评价对治疗室内患者的感生放射性进行了分析计算。

### 3.3.1.3.1 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、 $(\gamma, n)$ 反应和高能中子散裂反应等产生 $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 和 $^{41}\text{Ar}$ 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素如 $^3\text{H}$ 和 $^7\text{Be}$ ，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 和 $^{41}\text{Ar}$ 四种核素，具体见表3-9。

表 3-9 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 $\sigma^2$ , mb
$^{11}\text{C}$	20.39min	N	$7.55 \times 10^{-1}$	$(\gamma, T)$	0.7
		N	$7.55 \times 10^{-1}$	散裂反应	10
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	$(\gamma, an)$	0.7
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	散裂反应	5
$^{13}\text{N}$	9.96min	N	$7.55 \times 10^{-1}$	散裂反应	10
		N	$7.55 \times 10^{-1}$	$(\gamma, n)$ 反应	9
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	散裂反应	9
$^{15}\text{O}$	2.04min	O	$2.3 \times 10^{-1}$	散裂反应	40
		O	$2.3 \times 10^{-1}$	$(\gamma, n)$ 反应	17
$^{41}\text{Ar}$	1.83h	Ar	$1.3 \times 10^{-2}$	热中子俘获	610

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告。

### 3.3.1.3.1.1 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，停机后 2 分钟调试机房内空气感生放射的静态饱和浓度。计算条件为加速器连续运行 125h，质子能量为 250MeV，在加速器二极磁铁上束流损失率为 6E+09p/s。加速器机房及治疗室空气体积为 1088m<sup>3</sup>，计算结果列于表 3-10。

表 3-10 空气感生放射性静态饱和浓度计算结果

核素	加速器机房及治疗室, Bq/m <sup>3</sup>
<sup>11</sup> C	1.42E+01
<sup>13</sup> N	2.23E+01
<sup>15</sup> O	2.88E+01
<sup>41</sup> Ar	2.51E+00
总计	6.78E+01

### 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

质子治疗系统运行期间，加速器大厅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 NCRPNO.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 3-12。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} C_{sat}$$

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<sup>3</sup>；

$C_{sat}$  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<sup>3</sup>；

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

$r_1$  为正常运行时房间内的换气次数,  $s^{-1}$ ;

表 3-11 质子治疗系统各区域通风系统设计情况

区域名称	体积, $m^3$	送风量, $m^3/h$	排风量, $m^3/h$	换气次数, 次/小时
加速器机房	732	3200	4200	5.7
治疗室 1	356	2300	3000	8.4

表 3-12 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, $Bq/m^3$	
	加速器机房	治疗室 1
$^{11}C$	3.74E+00	2.77E+00
$^{13}N$	9.43E+00	7.40E+00
$^{15}O$	2.25E+01	2.04E+01
$^{41}Ar$	1.56E-01	1.08E-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和停机通风期间向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由下式计算。

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

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

式中,

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

$t$  为质子治疗系统年运行时间, s; 根据建设单位提供的资料可知, 质子治疗年出束时间为 1252h。

$R_i$  为质子治疗系统正常运行状态下的通风速率,  $cm^3/s$ ;

由此可计算得出质子治疗系统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 3-13。

表 3-13 质子治疗系统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
$^{11}\text{C}$	2.94E+07	9.31E-01
$^{13}\text{N}$	7.59E+07	2.41E+00
$^{15}\text{O}$	1.93E+08	6.13E+00
$^{41}\text{Ar}$	1.19E+06	3.78E-02
总计	3.00E+08	9.51E+00

### 3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

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

表 3-14 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

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

质子治疗系统的放射性废液主要是被活化的冷却水。本项目所用冷却水为去离子水, 去离子水在运行期间循环使用。正常运行期间, 冷却水闭路循环不排放, 如系统发生漏水或出现异常运行情况, 可将冷却水排至事故集水坑。

质子治疗系统冷却水用于冷却加速器磁铁, 冷却水管缠绕于磁铁内部。质子治疗系统运行期间, 在束流经过磁铁时, 部分质子损失在磁铁内部的真空管道上, 产生的次级射线穿过部分磁铁使得冷却水活化。根据加速器磁铁内部设计结构, 为简化计算模型并得到保守计算结果建立如图 3-16。

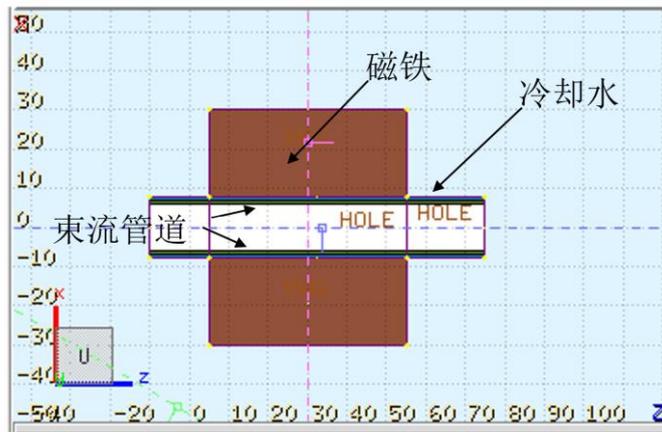


图 3-16 冷却水计算模型

束流真空管内径为 6cm、壁厚 1mm、材质为不锈钢，冷却水水层厚度 1cm、冷却水总水量为 1m<sup>3</sup>，冷却水管距束流管道 85cm。计算时保守假设加速器环中运行的束流损失区域全部为磁铁，不考虑磁铁间的连接管线等。加速器连续运行 125h，且按照最大能量 250MeV 出束工况，束流损失率为 6E+09p/s。停机 2min 后，冷却水活度见表 3-15，低于豁免限值。

表 3-15 加速器冷却水活化计算结果

核素	半衰期	活度 Bq
H-3	12.33y	6.10E+03
Be-7	53.29d	2.83E+05

### 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。相关实验研究表明，停机后被活化部件中的核素主要是 <sup>54</sup>Mn、<sup>51</sup>Cr、<sup>52</sup>Mn 和 <sup>60</sup>Co 等半衰期较长的核素。

质子治疗系统运行期间，在束流经过磁铁时，部分质子损失在磁铁内部的真空管道上，产生的次级射线穿过部分磁铁使得冷却水活化。根据加速器磁铁内部设计结构，为简化计算模型并得到保守计算结果建立如图 3-16。

束流真空管内径为 6cm、壁厚 1mm、材质为不锈钢，冷却水水层厚度 1cm、冷却水（单台质子治疗系统）总水量为 1m<sup>3</sup>，冷却水管距束流管道 85cm。外围磁

铁材料为铁，大小为：60cm×36cm×50cm。计算时保守假设加速器环中运行的束流损失区域全部为磁铁，不考虑磁铁间的连接管线等。加速器连续运行 125h，且按照最大能量 250MeV 出束工况，束流损失率为 6E+09p/s。

计算调试工况下停机 2min、30min、2h、24h 后剂量分布，加速器磁铁 1m 处最大剂量率见表 3-16，停机 2min 后，距离加速器磁铁 1m 处剂量率衰减到 1.01μSv/h，停机 30min 后，剂量率降至 0.65μSv/h，停机 24h 后，剂量率降到 0.18μSv/h。

表 3-16 调试工况下加速器磁铁 1m 处最大剂量率，μSv/h

结构部件		停机 2min 后最大剂量率	停机 30min 后最大剂量率	停机 2h 后最大剂量率	停机 24h 后最大剂量率
磁铁	距离 1m 处	1.01	0.65	0.44	0.18

停机后感生放射性主要来自 Sc-47，Cr-51，Mn-52，Mn-54，Fe-55，Co-56 等放射性核素，这些核素的饱和活度基本都高于其豁免活度，其余大部分核素的停机时刻饱和活度均低于其豁免活度。

表 3-17 加速器磁铁感生放射性核素

核素	饱和活度 Bq	豁免活度 Bq	饱和活度/豁免活度
H-3	3.14E+04	1.00E+09	3.14E-05
Be-7	1.73E+04	1.00E+07	1.73E-03
Na-22	2.78E+01	1.00E+05	2.78E-04
Na-24	1.40E+04	1.00E+05	1.40E-01
Si-31	7.68E+03	1.00E+06	7.68E-03
P-32	1.58E+04	1.00E+05	1.58E-01
P-33	6.28E+03	1.00E+08	6.28E-05
S-35	2.88E+03	1.00E+08	2.88E-05
Ar-37	2.65E+04	1.00E+08	2.65E-04
Ar-41	1.05E+04	——	——
K-42	2.70E+05	1.00E+06	2.70E-01
K-43	8.36E+04	1.00E+06	8.36E-02
Sc-43	8.66E+05	——	——
K-44	2.14E+03	——	——
Sc-44	3.69E+06	——	——
Ti-44	2.14E+02	——	——

Ca-45	9.08E+03	1.00E+07	9.08E-04
Ti-45	3.62E+06	——	——
Sc-46	1.67E+05	1.00E+06	1.67E-01
Ca-47	2.18E+03	1.00E+06	2.18E-03
Sc-47	1.01E+06	1.00E+06	1.01E+00
V-49	6.44E+05	——	——
Cr-49	5.88E+06	——	——
Cr-51	1.41E+07	1.00E+07	1.41E+00
Ti-52	3.97E+01	——	——
Mn-52	2.07E+07	1.00E+05	2.07E+02
Mn-54	2.27E+06	1.00E+06	2.27E+00
Fe-55	1.60E+06	1.00E+06	1.60E+00
Co-56	1.02E+06	1.00E+05	1.02E+01
Co-57	1.23E+04	——	——

### 3.3.1.3.4 土壤和地下水的感生放射性

由表 5-1 可知，各区域底板外表面与土壤边界处的剂量率均低于 5mSv/h，本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

### 3.3.1.3.5 治疗室内患者的感生放射性

患者感生放射性是由于患者自身组织与质子束流相互作用产生，以半衰期在半小时内的短寿命核素  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$  和  $^{15}\text{O}$  为主。根据质子治疗系统的使用规划，每间治疗室满负荷运行的情况下，每小时规划治疗 3 个病人。因此，平均每 20min 需要对病人进行摆位/解除摆位一次。由于解除摆位时，工作人员处于治疗室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室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室对患者解除摆位，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。

#### 3.3.1.3.5.1 计算条件

治疗室内患者感生放射性的计算条件如下：

- (1)采用治疗室终端最保守的束流条件：束流能量 250MeV，束损  $2.00\text{E}+09\text{p/s}$ ，

连续治疗 5min。

(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 3-18, 靶的尺寸为厚度 40cm, 半径 35cm 的圆柱体。

表 3-18 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

### 3.3.1.3.5.2 计算结果

采用 FLUKA 程序计算了停机 1min、5min、10min 后, 患者体表 50cm 处的剂量率最大值, 计算结果见表 3-19。

表 3-19 质子束单次治疗患者表面 50cm 处感生放射性剂量率随停机时间的变化,  $\mu\text{Sv/h}$

停机时间	距靶 50cm 处剂量率最大值, $\mu\text{Sv/h}$
1min	1.55E+01
5min	5.60E+00
10min	2.62E+00

由计算结果可知, 停机 5min 后患者体表 50cm 处剂量率最高为  $5.60\mu\text{Sv/h}$ 。

### 3.3.1.3.6 QA 水箱的感生放射性

做 QA 时，加速后的束流，一部分损失在束流运输线上（注入、同步加速器、引出、传输线等），剩余的束流完全损失在终端的水箱上束流损失率为  $6E+09p/s$ 。水箱几何尺寸为  $60cm$ （长） $\times 50cm$ （宽） $\times 60cm$ （高），水箱外壳为厚  $2cm$  的 PMMA、内部为水，外壳密度  $1.17g/cm^3$ ，水体密度  $1g/cm^3$ 。水箱实物见下图，水箱材料成分见表 3-20。

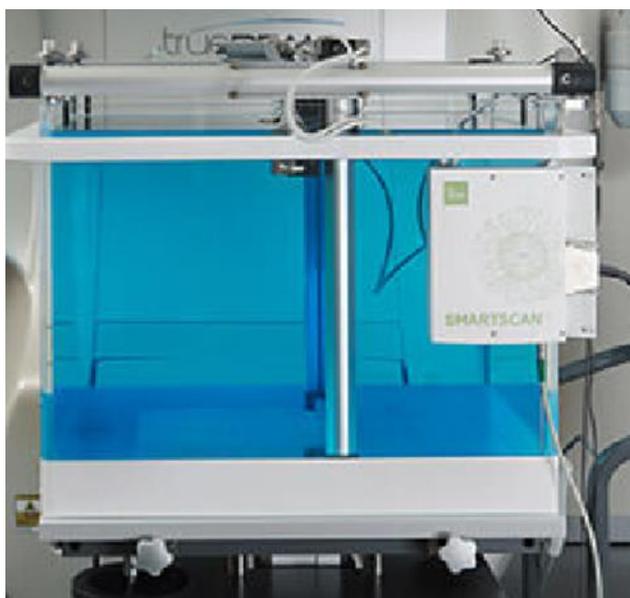


图 3-17 终端水箱示意图

表 3-20 终端水箱材料

水箱	化学元素	质量分数	化学元素	质量分数
外壳	C	85.7 %	H	14.3 %
水体	O	88.8 %	H	11.2 %

对于终端水箱的计算，保守采用能量为  $250MeV$ ，束流损失率为  $6E+09p/s$  进行计算，每次 QA 出束时间为  $2min$ ，计算结果见表 3-21、表 3-22、表 3-23。活化核素以短半衰期核素为主。

停束  $30min$  后，水箱表面剂量率衰减到  $5.34\mu Sv/h$ 。

表 3-21 水箱表面和 1m 处最大剂量率,  $\mu\text{Sv/h}$

结构部件		停机 2min 后 最大剂量率	停机 30min 后 最大剂量率	停机 2h 后最大 剂量率	停机 24h 后最 大剂量率
水箱	表面	138.33	5.34	0.24	1E-4
水箱	距离 1m 处	4.6	0.18	0.007	1.8E-6

终端水箱将长期重复使用, 分别考虑水箱运行 1 年后的活化核素活度和长时间运行后的饱和活度 (活化可达到的最大值)。从表可知, 在长时间运行后达到饱和的情况下, 水箱水体内核素除 Be-7 外, 其余核素活度均低于 GB18871 中的豁免水平; 水箱外壳内所有核素活度均低于 GB18871 中的豁免水平。Be-7 核素半衰期为 53.29 天, 水箱水体内该核素达到饱和后放置衰变 1 年, 活度可以降低至最大值的 0.9%, 低于 GB18871 中的豁免水平。

表 3-22 质子治疗系统终端水箱内水体活化结果

活化核素	核素半衰期	运行 1 年后活度 Bq	饱和活度 Bq	饱和并衰变 1 年活 度/Bq	GB 18871 豁免值/Bq
H-3	12.33 y	1.75E+03	2.18E+06	2.06E+06	1E+09
Be-7	53.29 d	8.32E+05	1.27E+07	1.10E+05	1E+07
C-11	20.39 min	3.42E+07	3.42E+07	-	-
N-13	9.965 min	7.22E+06	7.22E+06	-	-
O-14	70.6s	4.41E+06	4.41E+06	-	-
O-15	122.2 s	1.27E+08	1.27E+08	-	1E+09
F-18	109.77min	2.40E+04	2.40E+04	-	1E+06

表 3-23 质子治疗系统终端水箱外壳活化结果

活化核素	核素半衰期	运行 1 年后活度 Bq	饱和活度 Bq	GB 18871 豁免值 Bq
H-3	12.33 y	3.42E+03	4.27E+06	1E+09
Be-7	53.29 d	2.23E+05	3.41E+06	1E+07
C-11	20.39 min	1.05E+07	1.05E+07	-
N-13	9.965 min	7.99E+02	7.99E+02	-

### 3.3.1.4 臭氧等有害气体的产生

#### 3.3.1.4.1 计算公式

在光子作用下，空气中的氧气可吸收辐射能量，发生辐射分解，生成氧原子，氧原子与空气中的 O<sub>2</sub> 结合生成 O<sub>3</sub>，O<sub>3</sub> 再与空气中的 NO 结合生成 NO<sub>2</sub>。根据 NCRP NO.144 报告，场所内的 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 饱和浓度可利用下式计算。

$$N_{sat} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + R} \quad (\text{公式 3-1})$$

$$C = N \frac{M}{N_A} \quad (\text{公式 3-2})$$

式中，

C 为场所内 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 饱和浓度，g/m<sup>3</sup>；

N 为房间内单位体积的气体分子个数，个/m<sup>3</sup>；

g 为空气中单位光子能量沉积形成的气体分子数，eV<sup>-1</sup>；

α 为气体分子的化学分解速率，s<sup>-1</sup>；

κ 为单位光子能量沉积形成的分子数目，eV<sup>-1</sup>·m<sup>3</sup>；

R 为房间换气次数，s<sup>-1</sup>；

M 为气体的摩尔质量，g/mol；

N<sub>A</sub> 为阿伏伽德罗常数，6.022×10<sup>23</sup>mol<sup>-1</sup>；

I 为空气中单位体积单位时间的光子能量沉积，eV/m<sup>3</sup>·s，根据《辐射防护基础》（李星洪等，原子能出版社）P39 页公式（2.19），I 可由下式计算：

$$I = 6.25 \times 10^{18} K \rho = 6.25 \times 10^{18} \varphi \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right) E \rho \quad (\text{公式 3-3})$$

式中，

$K$  为光子在空气中的比释动能率， $J/kg \cdot s$ ；

$\varphi$  为光子注量率， $p/m^2 \cdot s$ ；

$\rho$  为空气的密度， $kg/m^3$ ；

$\mu_{en}/\rho$  为光子在空气中的质能吸收系数， $m^2/kg$ ；

$E$  为光子能量， $J$ （ $1MeV=1.6 \times 10^{-13}J$ ）。

### 3.3.1.4.2 各参数取值

各参数取值和来源列于表 3-24。

表 3-24 质子治疗机房臭氧饱和浓度计算参数取值

参数	取值	来源
$g$	$O_3$ : $0.103 eV^{-1}$ ; $NO_2$ : $0.048 eV^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P358
$\alpha$	$2.3 \times 10^{-4} s^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P359
$\kappa$	$5.0 \times 10^{-24} eV^{-1} \cdot m^3$	《Advanced Photon Source: Radiological Design Considerations》(APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July 1991)
$R$	$2.78 \times 10^{-3} s^{-1}$	表 3-11
$M$	$M(O_3)=48 g/mol$ $M(NO_2)=46 g/mol$	——
$N_A$	$6.022 \times 10^{23} 1/mol$	——
$\varphi$	$7.96E+07 p/m^2 \cdot s$	采用距靶点 1m 处的光子注量率作为机房内平均光子注量率进行保守计算
$\rho$	$1.29 kg/m^3$	——
$\mu_{en}/\rho$	$2.966E-03 m^2/kg$	《辐射防护基础》P45 页表 2-2，保守取 0.05MeV 光子在空气中的质能吸收系数
$E$	$10MeV=1.6 \times 10^{-12}J$	FLUKA 程序模拟

### 3.3.1.4.3 计算结果

质子治疗机房内  $O_3$ 、 $NO_2$  的饱和浓度计算结果列于表 3-25。由计算结果可知，质子治疗机房内  $O_3$ 、 $NO_2$  饱和浓度远低于表 1-12 中所列工作场所  $O_3$  和  $NO_2$  的相关限值。

表 3-25 质子治疗机房内 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 饱和浓度计算结果

场所名称	饱和浓度, mg/m <sup>3</sup>	
	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>
质子治疗机房	9.75E-06	4.36E-06

### 3.3.2 模拟定位 CT 机

使用模拟定位 CT 机期间, 主要的放射性污染是 X 射线, 仅在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。

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 小结

综上所述, 本项目主要的辐射污染因子列于表 3-26。

表 3-26 本项目主要的辐射污染因子

装置名称	主要辐射污染因子	产生情况	处理方式及去向
质子治疗系统	质子	最高能量 250MeV	机房屏蔽体防护
	中子	最高能量 250MeV	机房屏蔽体防护
	光子	最高能量 20MeV	机房屏蔽体防护
	X 射线	治疗室内 X 射线管出束期间产生	机房屏蔽体防护
	活化气体	主要为 <sup>11</sup> C、 <sup>13</sup> N、 <sup>15</sup> O 和 <sup>41</sup> Ar 等短半衰期核素, 年总排放量为 3.00E+08Bq。	通风系统排入环境
	活化冷却水	主要核素为 <sup>3</sup> H、 <sup>7</sup> Be, H-3 的活度为 6.10E+03Bq, Be-7 的活度为 2.83E+05Bq。	排入事故集水坑。
	活化结构部件、废树脂	主要核素为 <sup>54</sup> Mn、 <sup>51</sup> Cr、 <sup>52</sup> Mn、 <sup>57</sup> Co 和 <sup>58</sup> Co, 大多数核素的饱和活度均低于其豁免活度。	暂存于质子治疗系统加速器机房西侧的固废暂存间。

	患者感生放射性	人体与质子束流直接作用产生，随着停机时间的增加快速下降。	自然衰变，患者照射结束后，停机等待一定时间后再进入机房内工作。
模拟定位 CT 机	X 射线	——	机房屏蔽体防护

## 4 辐射安全与防护设施

### 4.1 质子治疗系统

#### 4.1.1 场所布局与屏蔽

##### 4.1.1.1 场所布局

###### 4.1.1.1.1 辐射工作场所分区

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

质子治疗中心辐射工作场所分区图如图 4-1 所示，具体分区如下：

- （1）控制区：加速器机房（含治疗室区）、固废存储间和事故集水坑；
- （2）监督区：上述各控制区屏蔽墙体外四周紧邻的场所。

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

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

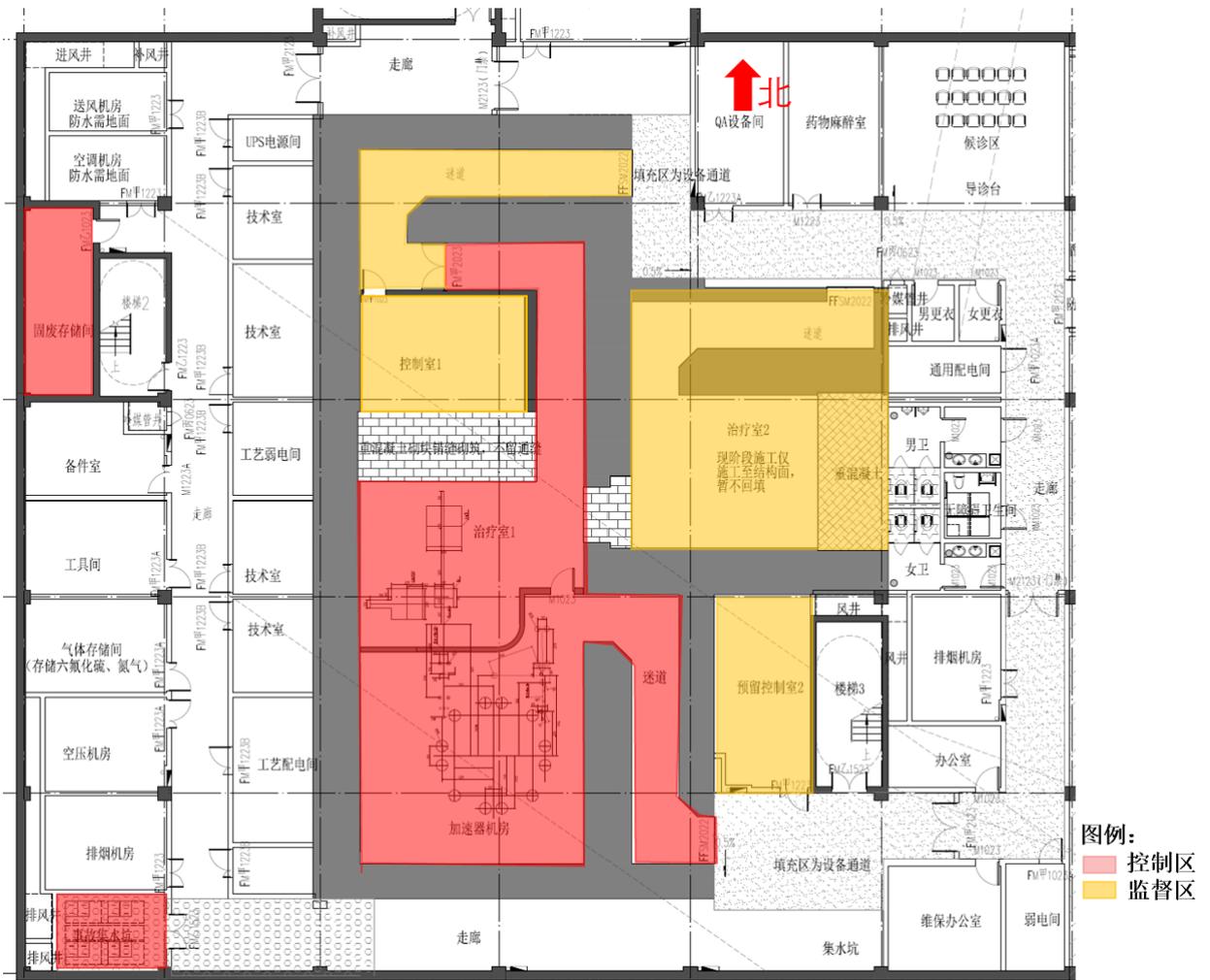


图 4-1 质子治疗中心地下一层辐射工作场所分区

#### 4.1.1.1.2 布局合理性分析

质子治疗中心单独设置在地下一层的西北角，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。加速器机房（含治疗室区）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。整个质子治疗中心房间功能布局紧凑、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。

#### 4.1.1.2 辐射屏蔽

#### 4.1.1.2.1 设计标准

质子治疗系统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)中对照射剂量约束和潜在照射危险约束的防护要求，以职业照射剂量限值的 1/4 即 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值，以公众照射剂量限值的 1/4 即 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

质子治疗系统辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平列于表 4-1。

表 4-1 质子治疗系统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, $\mu\text{Sv/h}$
质子治疗系统 辐射工作场所	机房屏蔽墙体外、入口防护门外、机房顶	居留因子 $T \geq 1/2$	$\leq 2.5$
		居留因子 $T < 1/2$	$\leq 10$
	机房地板	机房地板外表面与土壤交界处*	$\leq 5 \times 10^3$

#### 4.1.1.2.2 屏蔽设计

质子治疗系统辐射工作场所屏蔽设计如图 4-2~图 4-3 和表 4-2 所示。主要采用混凝土 (密度不低于  $2.35\text{g/cm}^3$ ) 和重混凝土 (密度不低于  $3.9\text{g/cm}^3$ ) 作为屏蔽材料，具体设计情况如下：

表 4-2 质子治疗系统辐射工作场所屏蔽设计及周围环境情况

场所名称	位置	墙体屏蔽厚度和材料	周围环境
加速器机房	北墙	从内至外依次为 3m 厚重混凝土 (长×宽为 7.5m×3m)、0.25m 厚混凝土、1.2m~2m 厚混凝土、1.5m 厚混凝土	控制室、迷道、走廊

	南墙	1.5m 厚混凝土	走廊
	西墙	2m 厚混凝土	预留设备房间、工艺配电间
	东墙 1	2m 厚混凝土	预留治疗室 2
	东墙 2	迷道内墙：1.2m~2m 厚混凝土 迷道外墙：0.7~1.5m 厚混凝土	预留控制室 2、走廊
	顶板	2m 厚混凝土	停车场
	底板	1.5m 厚混凝土	土壤

表 4-3 X 射线管使用场所的尺寸和面积建设要求对标

场所名称	机房设计		标准要求		是否满足要求
	最小单边长度, m	有效使用面积, m <sup>2</sup>	最小单边长度, m	有效使用面积, m <sup>2</sup>	
X 射线管使用场所	4.5	59.7	4.5	≥30	是

由表 4-3 可知，X 射线管使用场所（治疗室）最小单边长度和有效使用面积均能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中的相关要求。

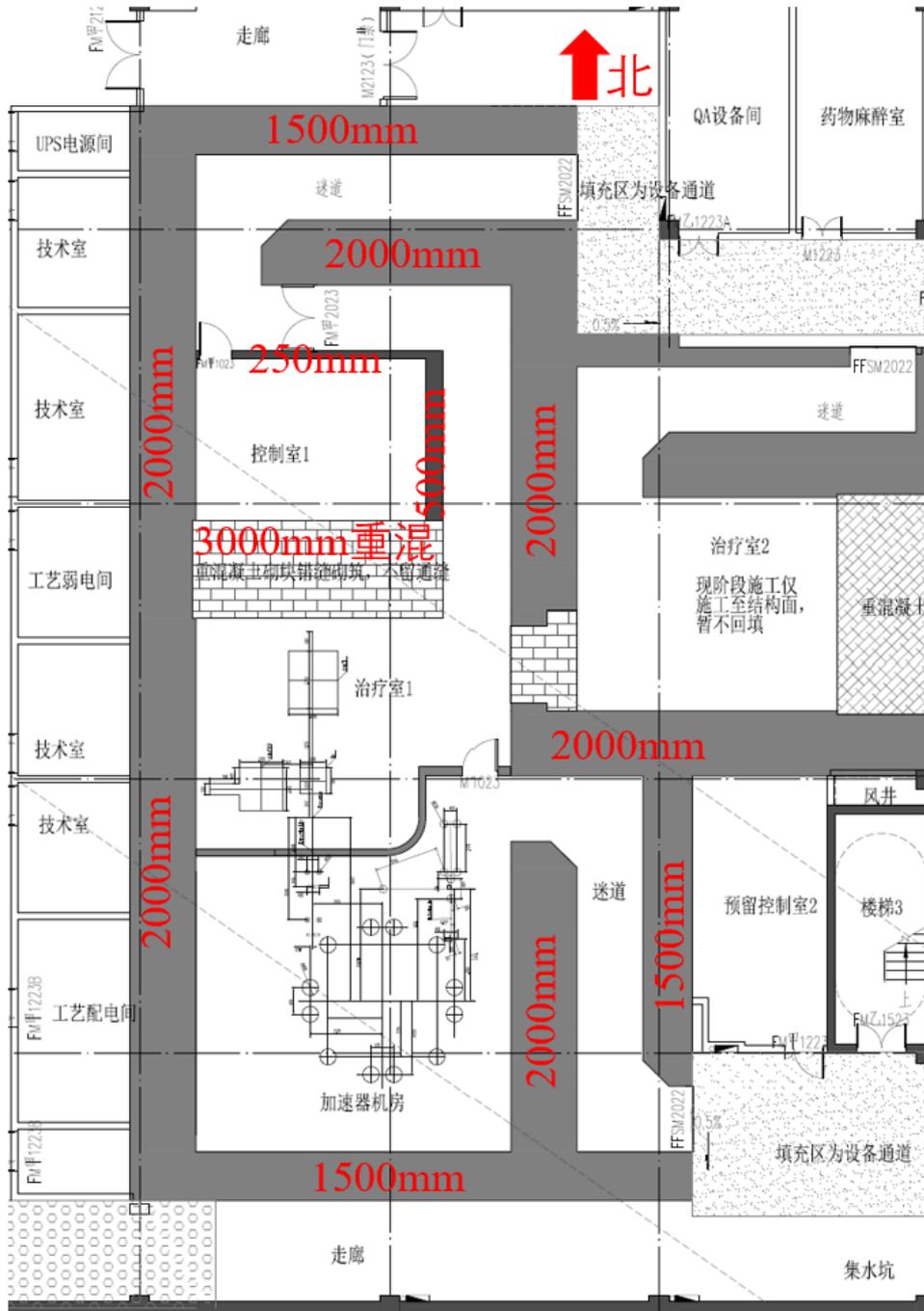


图 4-2 质子治疗系统工作场所辐射屏蔽设计（平面）

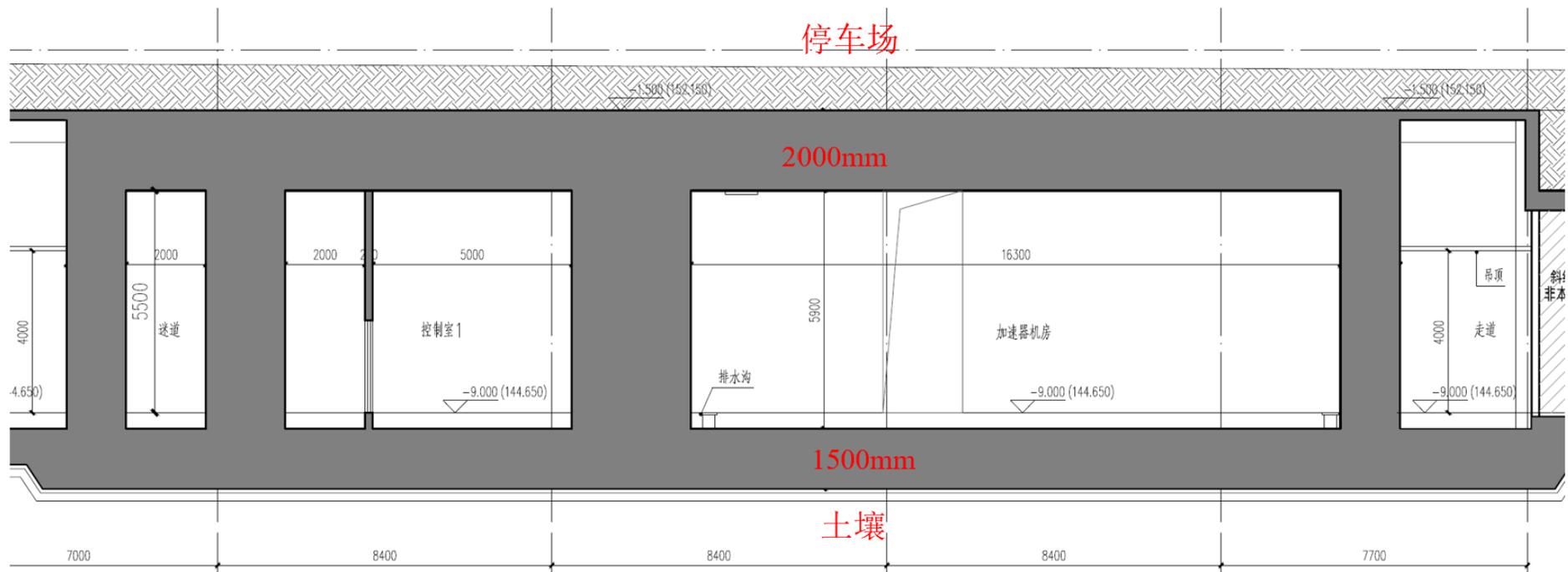


图 4-3 质子治疗系统工作场所辐射屏蔽设计图（剖面）

## 4.1.2 辐射安全与防护措施

### 4.1.2.1 人身安全联锁系统

#### 4.1.2.1.1 设计准则

质子治疗系统人身安全联锁系统的设计准则如下：

- (1) 简单可靠：系统设计要力求在简洁基础上保证运行可靠性及稳定性。
- (2) 最优切断：当加速器处于“准备”或“运行”状态时，安全联锁系统在加速器中央控制系统联锁逻辑中具有最优先的权力切断加速器束流。
- (3) 失效保护：当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，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：安全联锁系统是在保障工作人员人身安全的基础上兼顾加速器的运行安全，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。

#### 4.1.2.1.2 系统结构和功能

安全联锁系统由逻辑控制系统、人员出入管理箱、出门按钮、紧急开门按钮、急停清场盒、声光报警灯、区域状态显示屏、门机联锁等设备和加速器状态等信号构成。逻辑控制系统实现对这些系统信号和设备的联锁控制，保障人员在控制

区时加速器无法开机。

### 4.1.2.1.3 系统组成

#### 4.1.2.1.3.1 人员出入管理箱

人员出入管理箱在安全连锁系统中主要用于对人员进入辐射区域的监控与管理，对所有进出辐射区域的人员或者进行相关操作的人员进行人员授权，外形结构见图 4-4。服务器软件发行 IC 卡，将用户信息及权限信息写入 IC 卡数据中。人员出入管理箱控制器通过读取 IC 卡中数据，判断用户权限。识别用户权限后，根据主开关及当前刷卡信息是否分发钥匙，并随机分发按钮，钥匙指示灯闪烁提示用户取钥匙，在用户按下取钥匙按钮后，打开防护门，指示灯常亮。在人员离开时，刷卡实现钥匙归还，相应按钮指示灯熄灭。

人员进入工作区域时在刷卡器读取卡片，其信息发送微控制器内，进行权限及累积剂量比对，符合进入条件即输出开门的状态至 PLC 使防护门打开，相应的指示灯也常亮，在液晶屏上显示人员信息并记录。离开工作区域时刷卡，分配指示灯提示工作人员按下对应按钮，指示灯灭。权限不符合或累积剂量超限则不分配按钮，不能进入辐照区域。

使用个人剂量计作为进门介质，工作人员进入辐射区域前刷卡领取个人剂量计，此时在分发软件中即将个人剂量计的编号和工作人员的卡片信息绑定在一起。将放在人员出入管理箱的读出范围内，工作人员的信息包括权限，累积剂量等都可读入到微控制器内进行判断比对，符合进入条件即输出开门的状态至 PLC 使防护门打开，相应的指示灯也常亮，在液晶屏上显示人员信息并记录。离开工作区域时刷卡，分配指示灯提示工作人员按下对应按钮，指示灯灭。权限不符合或累积剂量超限则不分配按钮，不能进入辐照区域。

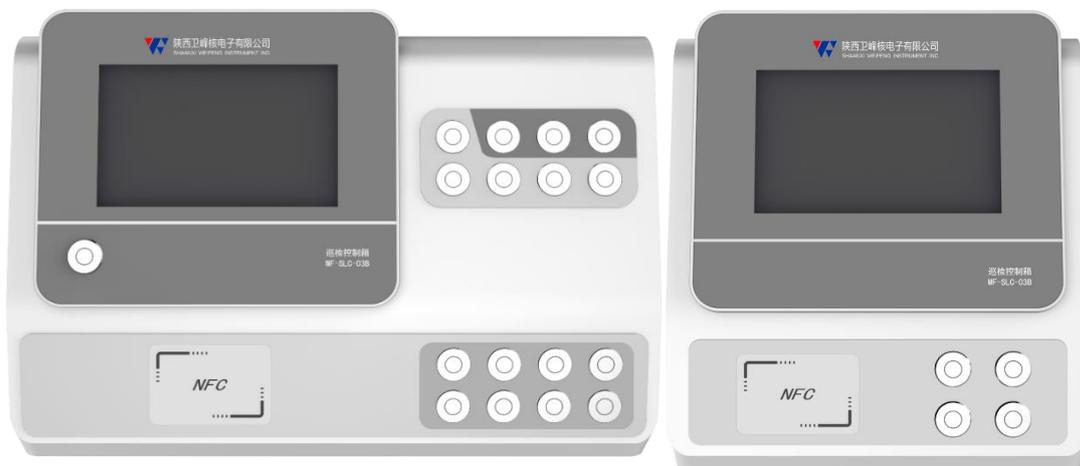


图 4-4 人员出入管理箱外形结构图

#### 4.1.2.1.3.2 医生控制盒

医生控制盒主要用于治疗室区域医护人员巡检，外形结构图见图 4-5。操作与人员出入管理箱相比没有分配钥匙按钮这一步骤，只需刷卡判断人员的权限，累积剂量等是否符合输出开门的状态至 PLC 使防护门打开，相应的指示灯也常亮，在液晶屏上显示人员信息并记录。离开工作区域时刷卡，指示灯灭。权限不符合或累积剂量超限则不分配按钮，不能进入辐照区域。



图 4-5 医生控制盒外形结构图

#### 4.1.2.1.3.3 门内开门按钮

门内开门按钮设置在治疗室区的联锁门内和加速器机房的联锁门内，外形结构见下图。

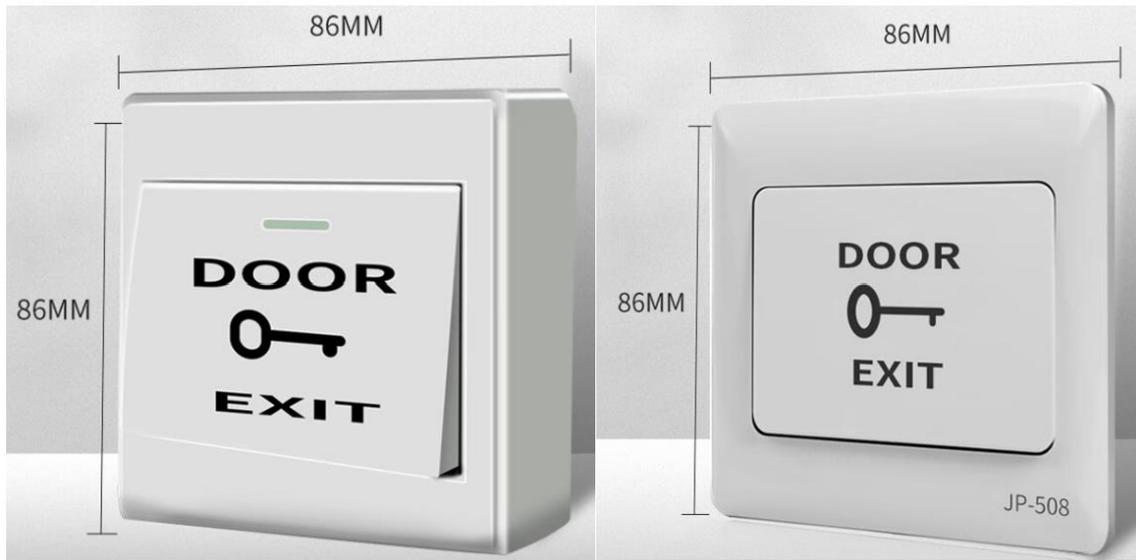


图 4-6 门内开门按钮外形结构图

#### 4.1.2.1.3.4 紧急开门按钮

紧急开门按钮是一种机械开关，通常用于检测玻璃破碎并触发信号。其工作原理是当玻璃受到足够的冲击力时，玻璃破碎开关会感应到玻璃的破碎，并触发门禁自动开门或其他安全措施来切断束流。主要设置在治疗室区的联锁门内和加速器机房的联锁门内，外观结构图如下。



图 4-7 紧急开门按钮外形结构图

#### 4.1.2.1.3.5 门机联锁

治疗室区和加速器机房的出入门均为联锁门，都设置限位开关。只有当开关到位，才能确认门的状态信息，如果某个区域联锁门处于打开状态，则束流无

法运输到该区域。

#### 4.1.2.1.3.6 急停按钮

急停按钮放置在控制区内比较醒目并便于识别的位置上。发生紧急情况时，该区域人员可按下急停按钮切断束流。急停按钮有明确的操纵位置和手动复位功能，在未经手动复位时，在其他地方无法复位此处被按下的按钮。只有当引发急停事件的按钮被复位后，才有可能使设备重新运行。

#### 4.1.2.1.3.7 声光报警灯

加速器机房和治疗室区内都设有声光报警灯，通过不同颜色对控制区内不同状态进行指示，并同时发出警报声，用以警示。外观示意图如下。



图 4-8 声光报警灯外观示意图

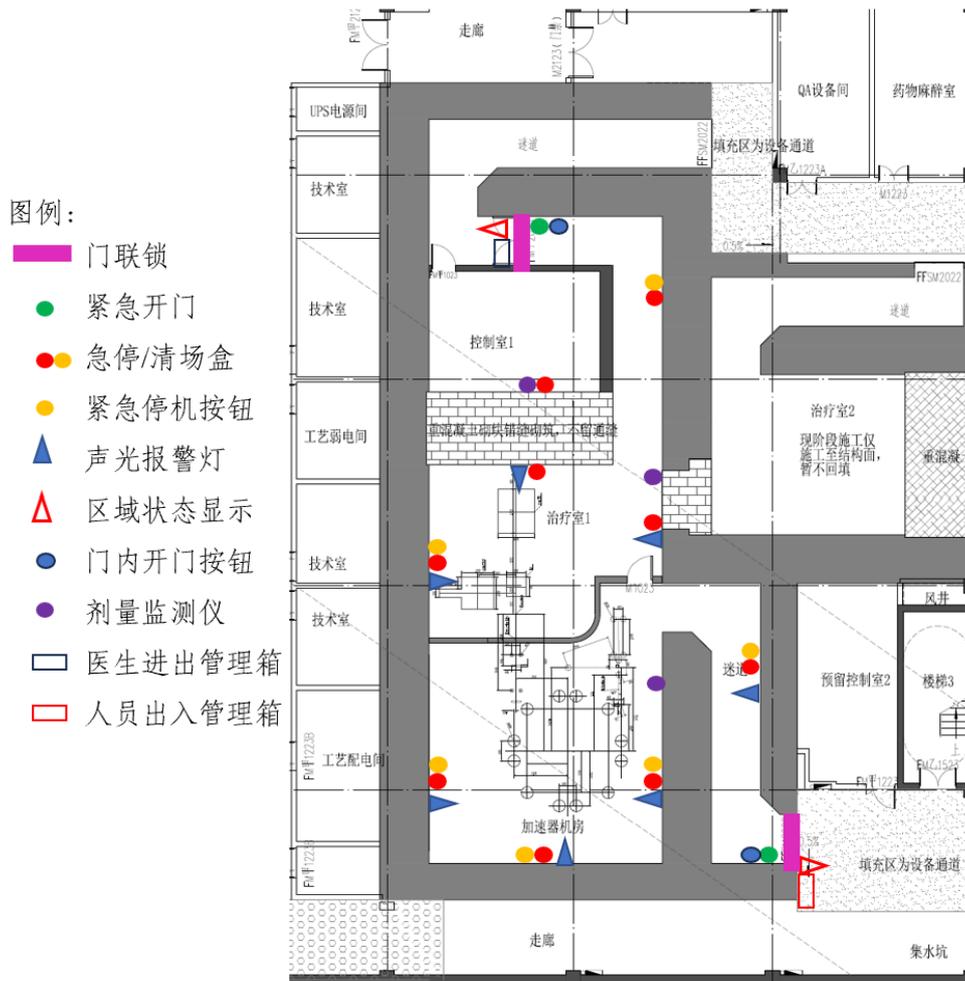


图 4-9 地下一层辐射安全联锁设施点位图

#### 4.1.2.1.3.8 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。

装置一共设置 2 个控制子区，其中：

(1) 加速器机房设置 1 个子区，从加速器机房联锁门外的人员出入管理箱刷卡，并按下随机分配的钥匙按钮进入控制区内，依照既定的顺序依次按下序号①-④的清场按钮，再通过加速器机房联锁门外的人员出入管理箱刷卡完成该区域的巡检。

(2) 治疗室区设置 1 个子区，从治疗室区联锁门外的医生控制盒刷卡进入

控制区内，依照既定的顺序依次按下序号①-②的清场按钮，再通过在治疗室区联锁门外的医生控制盒刷卡完成该区域的巡检。

上述 2 个子区的清场状态相互独立，每个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搜索。具体的搜索路线见图 4-10。

**表 4-4 质子治疗系统安全联锁设备数量表**

区域		设备名称	设备数量, 个
地下一层	治疗室 1	联锁门	1
		紧急开门按钮	1
		门内开门按钮	1
		紧急停机按钮	2
		急停清场盒	2
		声光报警灯	3
		医生进出管理箱	1
		区域状态显示	1
		$\gamma$ 探测器及中子探测器	各 1 台
	加速器机房	联锁门	1
		紧急开门按钮	1
		门内开门按钮	1
		急停清场盒	4
		清场搜索按钮	1
		声光报警灯	4
		区域状态显示	1
		人员进出管理箱	1
		$\gamma$ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗控制室 1	紧急停机按钮	1
		$\gamma$ 探测器及中子探测器	各 1 台

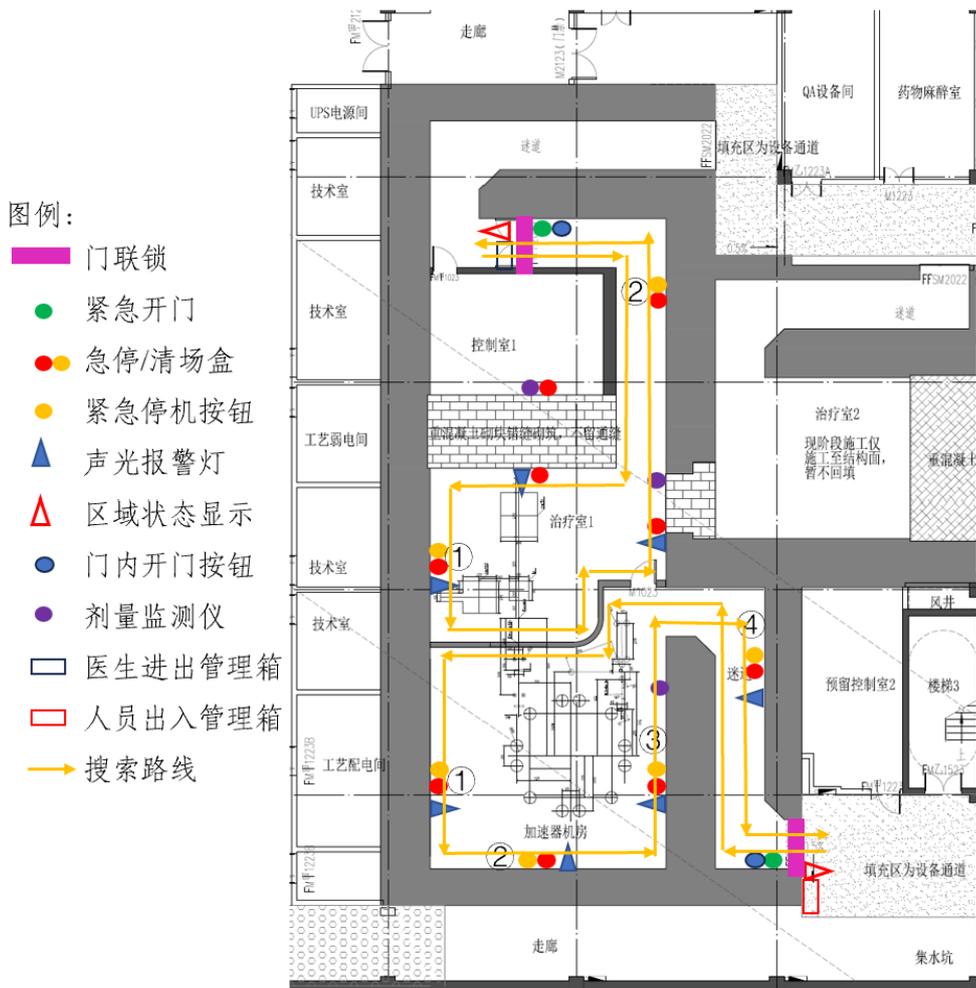


图 4-10 质子治疗系统辐射工作场所地下一层清场搜索按钮点位和搜索路线图

#### 4.1.2.1.3.9 视频监控和对讲装置

控制区内设有摄像头，以便工作人员直观的观察各区域内人员的活动情况。

治疗室内设置双向患者监测对讲系统，即在治疗室内设语音激活或连续接通的对讲机，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内的病人进行实时交流。

#### 4.1.2.1.3.10 区域状态显示

区域状态显示屏在安全连锁系统中用于显示加速器的工作状态，采用大尺寸长条形 LCD 显示屏，主要设置在治疗室区连锁门外和加速器机房连锁门外，

显示内容包括：准备供束、正在供束、停止供束和当前日期与时间等信息。

#### 4.1.2.1.4 安全联锁逻辑

在各设施设备正常的情况下，加速器开机前开始清场，播放离场广播，关闭联锁门，完成后相关控制区安全联锁系统进入待机状态，等待控制系统命令。接收到“开机”信号时，按预定要求管制相关区域，监督区内的实时监测也可触发停机或紧急停机的各项信号。接收到“停机”信号后，允许授权人员按规定方式进入控制区。出现异常情况时，可通过紧急停机按钮、门机联锁或拉线开关触发紧急停机动作，待异常情况解除后才可重新复位开机。加速器机房安全联锁系统的逻辑图见图 4-11。

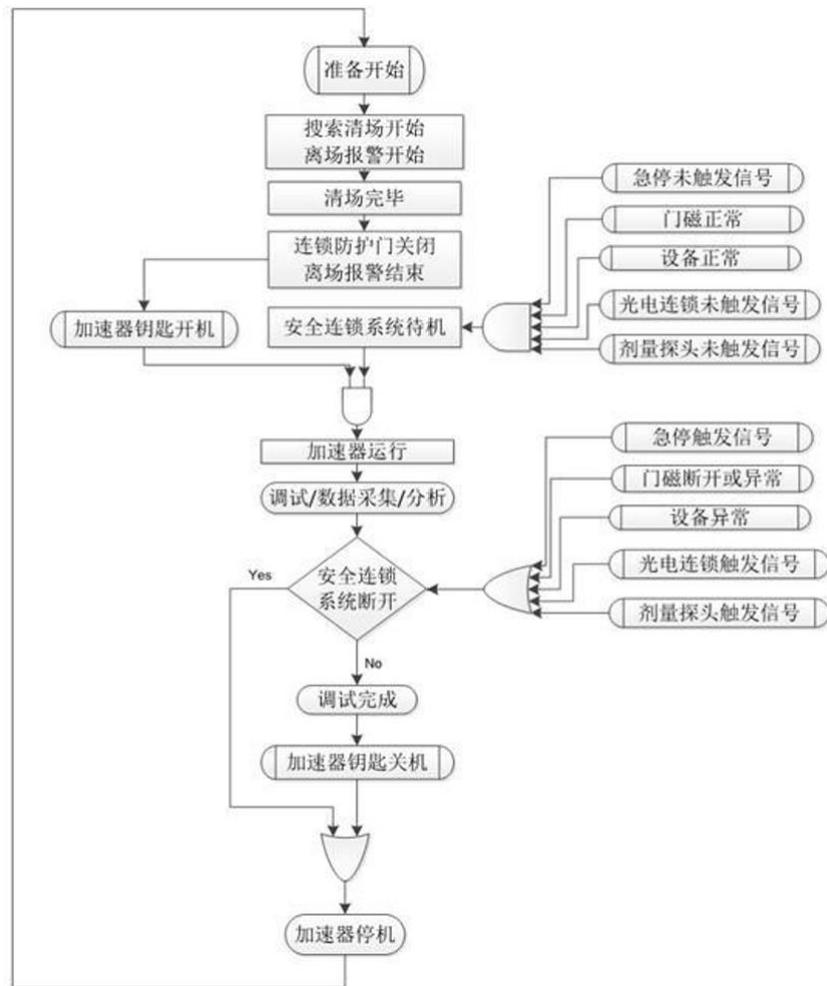


图 4-11 安全联锁逻辑图

## 4.1.2.2 场所辐射监测系统

### 4.1.2.2.1 监测点位

质子治疗系统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 4-12 所示。探测器用于测量辐射水平；数据采集单元用于采集探测器的输出信号和完成信号的加权处理、剂量率显示、本地报警及通讯；内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；监控计算机用于完成监测数据的日常分析与管理；中心管理计算机用于发布剂量监测数据；辐射防护数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据，包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型（ $\gamma$ /中子）。

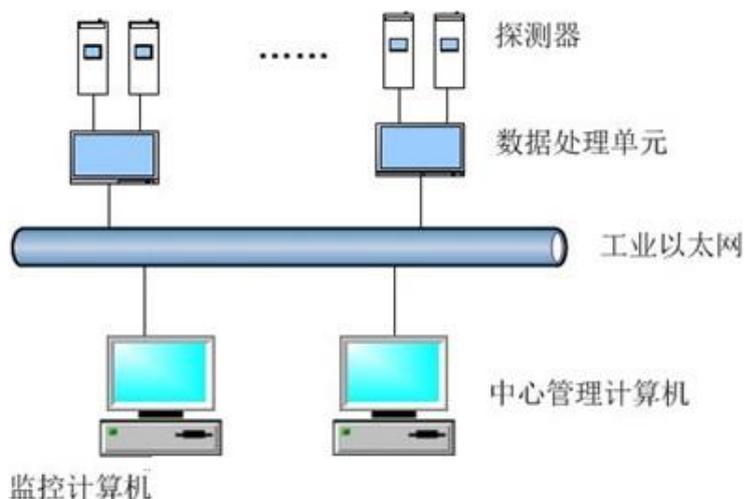


图 4-12 质子治疗系统场所辐射监测系统结构

辐射监测点位如图 4-9 所示，每个监测点由一台中子探测器和  $\gamma$  探测器组成：

- (1) 地下一层加速器机房设置 1 个高剂量辐射区域  $\gamma$  和中子监测点位；
- (2) 治疗室区设置 1 个一般剂量辐射区域  $\gamma$  和中子监测点位；
- (3) 加速器机房屏蔽体外的南侧（走廊）、西侧（技术室）和顶板外各设置 1 个环境剂量辐射区域  $\gamma$  和中子监测点位。

#### 4.1.2.2 探测器性能

(1) 加速器机房内高剂量辐射区域中子探测器的剂量率范围至少覆盖 100nSv/h~50mSv/h;  $\gamma$  探测器剂量率范围覆盖 0.01mSv/h~100mSv/h。

(2) 加速器机房治疗区域和控制室的  $\gamma$  探测器剂量率范围为 0.1 $\mu$ Sv/h~10mSv/h; 中子探测器的剂量率范围覆盖 0.01 $\mu$ Sv/h~50mSv/h。

(3) 环境剂量辐射区域  $\gamma$  和中子探测器,  $\gamma$  探测器剂量率范围覆盖 0.01 $\mu$ Sv/h~10 $\mu$ Sv/h; 中子探测器的剂量率范围覆盖 0.01 $\mu$ Sv/h~50mSv/h。

#### 4.1.2.3 通风系统

质子治疗系统的加速器机房及治疗室均设计了通风系统。各区域通风管道的布局见图 4-13 和图 4-14, 通风系统具体设计参数见表 4-5。治疗室换气次数均大于 4 次/h, 符合 GBZ 121-2020 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。

加速器机房的送风机房位于夹层的空调机房, 采用从迷道引入加速器机房内, 治疗室内的送风机房位于质子治疗系统北侧的空调机房, 采用从迷道引入治疗室内, 治疗室和加速器机房均采用上送下排的方式, 以上两个区域的排风经管道从加速器机房的迷道引出立管升至屋顶排放, 排风口距地面约 3m。

表 4-5 质子治疗系统工作场所通风系统设计参数

区域名称	体积, m <sup>3</sup>	送风量, m <sup>3</sup> /h	排风量, m <sup>3</sup> /h	换气次数, 次/小时
加速器机房	732	3200	4200	5.7
治疗室 1	356	2300	3000	8.4



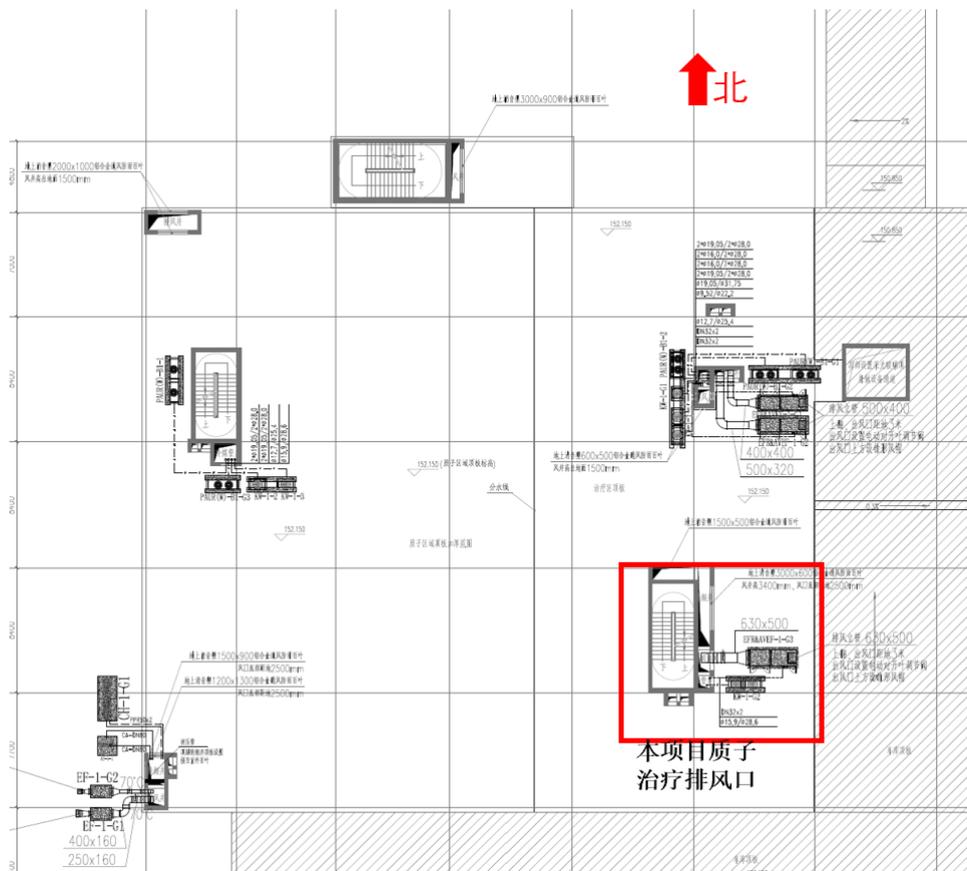


图 4-14 质子治疗系统工作场所排风口位置示意图

#### 4.1.2.4 警告标志设置情况

在质子治疗系统辐射工作场所控制区的进出口设置如图 4-15 中所示警告标志，并给出辐射水平指示；在监督区的入口处的适当位置设置表明监督区的标牌。

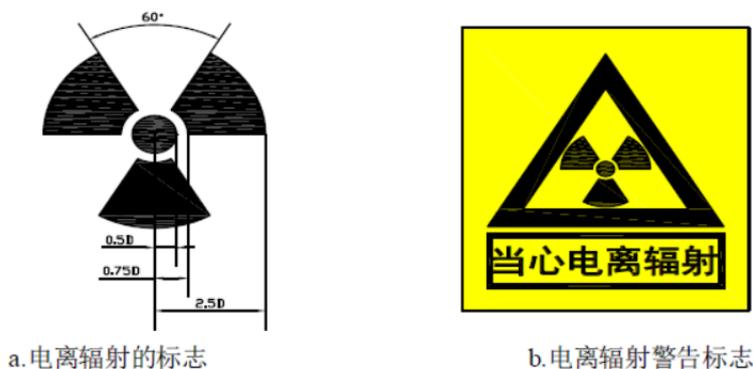


图 4-15 质子治疗系统辐射工作场所警告标志示意图

### 4.1.3 放射性三废治理

#### 4.1.3.1 放射性废气及其处理措施

##### (1) 废气来源

根据第三章的分析，质子治疗系统运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为  $^{13}\text{N}$  ( $T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$ )、 $^{15}\text{O}$  ( $T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$ )、 $^{11}\text{C}$  ( $T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$ ) 和  $^{41}\text{Ar}$  ( $T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$ )。各核素年产生量见表 3-12。

##### (2) 废气处理措施

质子治疗系统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。质子治疗系统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质子治疗中心屋顶排入环境，年排放速率见表 3-13。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。

#### 4.1.3.2 放射性废液及其处理措施

##### (1) 来源

质子治疗系统运行期间可能产生的放射性废液主要是活化的冷却水。冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于  $^{16}\text{O}$  散裂反应可能形成的放射性核素列于表 3-15。除  $^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}$  外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间可自行衰变至较低水平。根据对冷却水感生放射性核素活度浓度的计算结果， $\text{H-3}$  和  $\text{Be-7}$  的活度均小于 GB18871 规定的豁免浓度值  $1.00\times 10^9\text{Bq}$  和  $1.00\times 10^7\text{Bq}$ 。

##### (2) 处理措施

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修或发生冷却水泄漏事故的情况下才需要排放。加速器机房设有地漏，通过地漏自流进入地下一层西侧的事故集水坑，具体布置情况见图 4-16。事故集水坑的有效容积为  $4.56\text{m}^3$ （分四格，每格有效容积为  $1.14\text{m}^3$ ），用于暂存活化冷却水。根据质子治疗系统厂

商提供的信息，质子治疗系统中可能产生活化冷却水的总量为  $1\text{m}^3$ ，每年因检修将回路中的冷却水排放的次数最多为一次，排放的冷却水体积小于集水坑的容积，因此的集水坑设置能够满足活化冷却水的暂存要求。

集水坑上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.3 节”所列中放射性废水排放标准，方可排放。集水坑设有管道与医院污水管网相连，且配备手动启动的排水泵，需要排放时手动开启排水泵，通过管道将冷却水排入医院污水管网。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，质子治疗系统正常运行时不会产生放射性废水，检修或发生泄漏的情况下可能排放的冷却水活度远低于排放限值。因此，放射性废水对环境的影响很小。

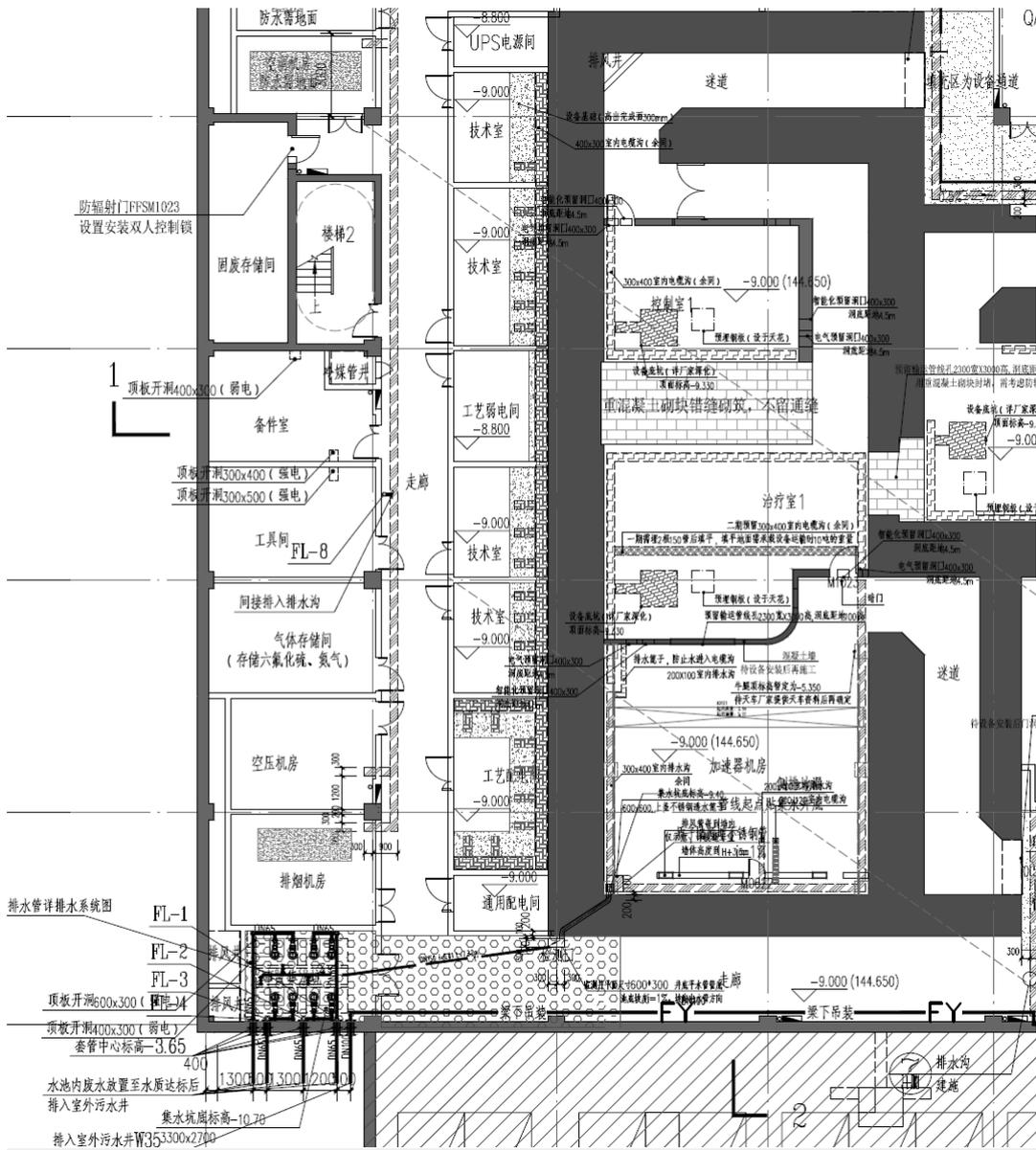


图 4-16 质子治疗系统冷却水管道走向示意图

#### 4.1.3.3 放射性固体废物及其处理措施

##### (1) 来源

放射性固体废物主要来自质子治疗系统运行、维修过程中产生的系统活化部件、废冷却水滤芯及交换树脂等，总产生量不超过 70kg/年。统一收集后存放至固废暂存间中。

## (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，暂存在固体废物暂存桶中，经铅屏蔽容器转运至固废暂存间暂存，该房间作为控制区管理，设置门禁和摄像头监控，门口张贴电离辐射警告标志，禁止无关人员进入。

当暂存间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体废物台账，存放及处置前进行监测，记录部件名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息。

## 5 辐射环境影响

### 5.1 质子治疗系统辐射环境影响分析

#### 5.1.1 正常运行的环境影响分析

##### 5.1.1.1 屏蔽体外剂量率计算

###### 5.1.1.1.1 计算方法

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 3-7，屏蔽墙体厚度见表 4-2，建立的计算模型见图 5-1 和图 5-2。



图 5-1 质子治疗系统屏蔽模拟计算模型图

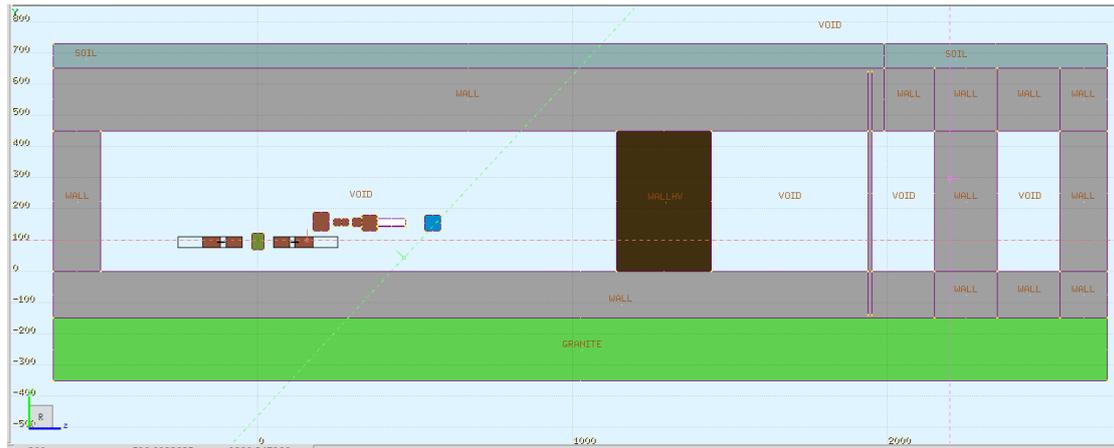


图 5-2 质子治疗系统屏蔽模拟计算模型剖面图

#### 5.1.1.1.2 关注点设置

根据质子治疗机房的平面布局及周围环境情况设置了关注点，各关注点的位置示意图见图 5-3。

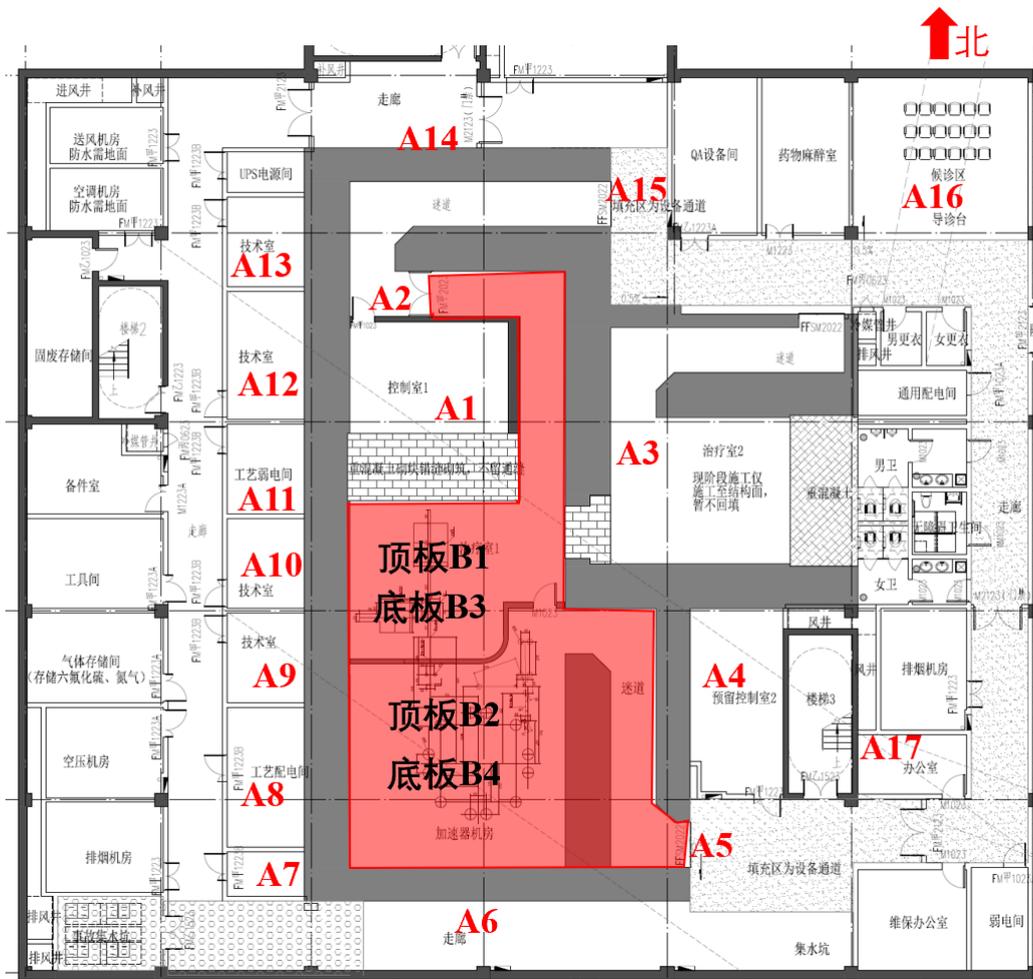


图 5-3 关注点分布位置平面示意图

### 5.1.1.1.3 计算结果

表 5-1 关注点处的剂量率水平计算结果

关注点	周围环境	剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
A1	控制室 1	0.38	2.5
A2	治疗区门外	0.60	10
A3	预留治疗室 2	0.09	10
A4	预留控制室 2	0.05	10
A5	加速器机房迷道门外	0.79	10
A6	走廊	0.17	10
A7	工艺配电间	1.9E-04	10
A8	工艺配电间	0.40	10
A9	技术室	0.35	10
A10	技术室	0.80	10
A11	工艺弱电间	0.36	10

A12	技术室	≤0.0001	10
A13	技术室	≤0.0001	10
A14	走廊	≤0.0001	10
A15	走廊	9.28E-04	10
A16	候诊区	≤0.0001	10
A17	办公室	0.017	2.5
B1	治疗区顶板外停车场	1.14	10
B2	加速器区顶板外停车场	0.18	10
B3	治疗区底板外土壤	1.50	5000
B4	加速器区底板外土壤	1.14	5000

#### 5.1.1.1.4 小结

由上述计算结果可知，质子治疗系统辐射工作场所屏蔽体外剂量率均低于其剂量率控制水平。

#### 5.1.1.2 工作人员受照剂量估算

本项目辐射工作人员主要包括治疗技师、物理师、科室医生、护士和维修工程师五类，如表 3-6 所示。

质子治疗系统正常运行期间，对这五类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：

$$H=D \times T \times t$$

式中，

H 为工作人员年受照剂量，mSv/a；

D 为工作人员所在区域剂量率，mSv/h；

T 为工作人员的居留因子；

t 为工作人员年受照时间，h/a。

### 5.1.1.2.1 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、在控制室内操作设备、在治疗室内部给患者摆位和操作 X 射线定位系统等工作。

#### 5.1.1.2.1.1 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，在地下一层质子治疗机房内进行。本项目每年总治疗患者人数约为 504 人。

每次模拟定位期间，在 CT 机房内的工作时间为 6min，CT 机出束时间为 1min，每年进行模拟定位次数取每年治疗人数的 2 倍，为 1008 次。每次模拟定位由 3 名技师共同完成，本项目共配备 6 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 504 次。由此可计算得出每位技师从事模拟定位期间的受照剂量，列于下表。

表 5-2 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平, mSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
控制室 1	2.5E-03 <sup>1)</sup>	8.4	2.10E-02

注：1) 根据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)，对管电压 150kV 的有用线束，222mm 普通混凝土相当于 2.5mm 铅当量，能够确保机房屏蔽体外剂量率低于 2.5 $\mu$ Sv/h。控制室位于质子治疗机房北侧，与机房相邻墙体厚度为 3000mm 重混凝土。则控制室处的剂量率可保守取值 2.5E-03 mSv/h。

#### 5.1.1.2.1.2 控制室内

质子治疗系统出束期间，治疗技师在治疗室控制室内的工作，其工作期间的受照剂量估算结果列于表 5-3。

表 5-3 治疗技师在控制室内工作期间的受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平, mSv/h	受照时间, h	受照剂量, mSv/a
控制室 1	3.8E-04	1252	4.76E-01

### 5.1.1.2.1.3摆位

在摆位期间的受照剂量来自患者治疗前摆位和治疗后解除摆位两个过程。根据质子治疗系统满负荷运行情况下规划的工作量，所有治疗技师的年总工作量计算结果列于表 5-4。共 6 名治疗技师，保守假设每次摆位由 3 名技师同时在场完成，每名治疗技师的年工作量列于表 5-5。

**表 5-4 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
6	14400	1440	1	14400	240

**表 5-5 每名治疗技师摆位的年工作量**

年进行治疗前摆位时间, h	年进行解除摆位时间, h
720	120

#### (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空气感生放射性，具体数值和计算结果列于表 5-6。

**表 5-6 患者治疗前摆位期间，治疗技师的年受照剂量**

来源	瞬时剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
空气感生放射性*	9.35E-13	720	6.73E-10

注：\*空气感生放射性所致瞬时剂量率取表 3-10 中的数值。

#### (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 0.5m。保守取表 3-19 中连续治疗 5min，停机 1min 后距离患者 50cm 处摆位区的剂量率，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受照剂量，

结果列于表 5-7。

**表 5-7 每位治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量**

来源	瞬时剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
患者	1.55E-02	120	1.86E+00
空气感生放射性	9.35E-13	120	1.12E-10
总计			1.86E+00

#### 5.1.1.2.1.4 治疗室内操作 X 射线定位系统

此外, 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, 还需在控制室 1 利用 X 射线定位系统进行精确的位置验证, 由建设单位提供的资料可知, 单次操作 X 射线定位出束时间单次工作时间约为 0.67min。由此可计算得出每名治疗技师在的年总工作量列于表 5-8, 由此可计算得出技师在控制室 1 工作期间的年受照剂量列于表 5-9。

**表 5-8 每名治疗技师的操作 X 射线管的年工作量**

单次治疗期间在控制室 1 操作 X 射线管内的的工作时间, min	年治疗总次数	在控制室 1 操作 X 射线的年总工作时间, h	每名治疗技师在控制室 1 操作 X 射线管的年总工作时间, h
0.67	14400	160	80

**表 5-9 每位治疗技师操作 X 射线管工作期间的年受照剂量**

来源	瞬时剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
X 射线管出束	2.50E-03	80	2.00E-01

#### 5.1.1.2.1.5 小结

每位治疗技师年总受照剂量计算结果列于表 5-10。

**表 5-10 每位治疗技师年总受照剂量**

来源	年受照剂量, mSv/a
模拟定位期间	2.10E-02
控制室内	4.76E-01
治疗前摆位	6.73E-10
治疗后解除摆位	1.86E+00

X 射线管出束	2.00E-01
总计	2.56E+00

### 5.1.1.2.2 物理师

物理师受照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

质子治疗系统每年患者人次为 14400 人次，每名患者每年治疗次数按 28 次计，则每年治疗病人数量为 504 人，每个病人需进行 1 次治疗计划验证，每年进行治疗计划验证 504 次。共 4 名物理师，每次计划验证由 2 名物理师完成，则每名物理师每年进行治疗计划验证的次数约为 252 次。每次治疗计划验证期间的受照剂量保守与每次治疗期间技师的受照剂量取值一致，由表 5-10 可推知每名技师每次治疗期间的受照剂量约为  $1.78E-04\text{mSv/次}$ ，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的受照剂量计算结果列于表 5-11。

表 5-11 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量

工作内容	单次工作受照剂量, mSv/次	年工作次数	受照剂量, mSv/a
治疗计划验证	1.78E-04	252	4.49E-02

#### (2) QA

QA 期间，物理师的工作地点包括机房内部和控制室。每名物理师在机房内部工作的时间按每年 125h 考虑。根据表 3-5，质子治疗系统的 QA 年总出束时间为 52h。共 4 名物理师，分两班，每次 QA 工作由 2 名物理师共同完成。则物理师 QA 工作期间的年受照剂量估算结果列于表 5-12。

表 5-12 物理师年受照剂量计算结果

工作地点	剂量率, mSv/h	年工作/受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
治疗室内部 <sup>1)</sup>	4.6E-03	12.5	5.75E-02
控制室 1 内	3.8E-04	26	9.88E-03
总计			6.74E-02

注：物理师在治疗室内工作时，机房内剂量率主要考虑水箱的感生放射性，保守取表 3-21

停机 2min 距离 1m 处的剂量率水平。由建设单位提供的资料可知，QA 期间，物理师每天在机房内的工作时间为 5min，则 QA 期间物理师的年工作时间为 5min/天×300 天=25h，医院共 4 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 QA 期间在机房内工作时间为 12.5h。

### (3) 小结

根据上述计算结果，可得出物理师的年受照剂量，列于表 5-13。

**表 5-13 物理师的年受照剂量**

治疗计划验证, mSv/a	QA, mSv/a	总受照剂量, mSv/a
4.49E-02	6.74E-02	1.12E-01

#### 5.1.1.2.3 科室医生

质子放疗科室医生的工作地点主要在医生办公室，通常情况下在病人首次治疗期间会进入治疗室内部，参与治疗前的摆位工作。考虑到医生办公室位于质子治疗中心相邻的建筑，与质子治疗系统辐射工作场所距离较远，该区域剂量率水平基本与本底水平相当，因此仅考虑医生在治疗室内参与病人治疗前摆位期间的受照剂量，每次在病人摆位期间的受照剂量以治疗技师每次治疗前摆位期间的受照剂量取值一致，由表 5-6 可推知治疗技师每次治疗前摆位期间的受照剂量为 4.67E-14mSv/次，由此可计算得出科室医生年受照剂量，列于表 5-14。

**表 5-14 科室医生年受照剂量估算结果**

工作内容	单次工作受照剂量, mSv/次	年工作次数 <sup>1</sup>	受照剂量, mSv/a
治疗前摆位	4.67E-14	100	4.67E-12

注：1. 每年治疗病人数量为 504 人，科室医生共 5 名，则每名医生平均每年参与病人首次治疗前的摆位次数约为 100 次。

#### 5.1.1.2.4 护士

根据质子治疗系统的治疗流程，护士的工作内容主要包括治疗前模拟定位和精确定位期间，在操作模拟定位 CT 机时，根据工作需要为患者注射造影剂，包

括进入机房内留针和在控制室内远程操作注射造影剂。护士的年受照剂量计算结果列于表 5-15。

**表 5-15 护士年受照剂量计算结果**

工作区域		剂量率水平 <sup>1)</sup> , mSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
治疗前模拟定位	控制室 1	2.50E-03	0.28 <sup>2)</sup>	7.00E-04
治疗前精确定位	控制室 1	2.50E-03	4 <sup>3)</sup>	1.00E-02
总计	—	—	—	1.07E-02

注：1) 护士在控制室内剂量率保守取剂量率 2.5 $\mu$ Sv/h。

2.) 根据医院提供的资料，治疗前模拟定位期间，注射造影剂的次数为模拟定位总次数（1008 次）的 1/10，为 100 次。共 3 名护士轮班，每名护士的工作次数为 34 次。每次工作期间，在控制室内远程注射造影剂的时间为 30s。

3) 治疗前精确定位期间，护士注射造影剂的次数为精确定位总次数（14400 次）的 1/10，为 1440 次。共 3 名护士轮班，每名护士的工作次数为 480 次。每次工作期间，在控制室内远程注射造影剂的时间为 30s。

#### 5.1.1.2.5 维护工程师

医院拟为本项目配备 2 名维护工程师，其主要工作内容为质子治疗系统日常基础维护保养，仅在治疗室内工作，不会进入加速器机房。根据建设单位提供的资料，每名维护工程师每年在治疗室内的工作时间不超过 200h，由此可计算得出维修工程师的年受照剂量，列于表 5-16。

**表 5-16 维护工程师的年受照剂量**

工作区域	剂量率水平 <sup>1)</sup> , mSv/h	受照时间, h	受照剂量, mSv/a
治疗室	1.01E-03	200	2.02E-01

注：保守取表 3-16 停机 2min 距离 1m 处的剂量率水平。

#### 5.1.1.2.6 工作人员受照剂量汇总

质子治疗系统辐射工作人员受照剂量汇总如下表 5-17 所示。由上述计算结果可知，质子治疗系统运行期间，医院配备的治疗技师受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 2.56mSv/a。

表 5-17 装置运行期间对工作人员所致年受照剂量汇总

人员类别	从事质子放疗期间的受照剂量, mSv/a
治疗技师	2.56E+00
物理师	1.12E-01
科室医生	4.67E-12
护士	1.07E-02
维护工程师	2.02E-01

### 5.1.1.3 公众受照剂量估算

质子治疗系统正常运行期间,对公众的辐射影响主要来自质子治疗系统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。

#### 5.1.1.3.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象质子治疗系统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系统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主要为患者陪诊人员和附近道路上的公众。其中:

(1) 患者陪诊人员。每名患者按每年接受 28 次治疗计,患者家属每年陪诊 28 次,每次在家属等候区停留时间按 1h 计;

(2) 附近的公众。主要是加速器机房顶板停车场的公众。

其所受瞬发辐射照射剂量由下式计算。计算结果列于表 5-18。

$$H = D \times t \times T \times 1$$

$H$  为公众的年受照剂量, 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 5-18 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

公众类别	瞬时剂量率, mSv/h	居留因子	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
患者陪诊人员	1E-07	1	28	2.80E-06
停车场的公众	1.14E-03	1/40	1252	3.57E-02

### 5.1.1.3.2 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系统正常运行工况下放射性气态流出物的影响。放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射。计算时主要关注排风口近距离范围内公众的受照剂量。

表 5-19 质子治疗系统放射性排风口参数

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
3	13500	71.8

#### 5.1.1.3.2.1 空气浸没外照射

由表 5-19 所示, 质子治疗系统排风口高度  $H < 2.5H_b$  ( $H_b$  为临近最高建筑物高度), 对于近距离范围的公众 (即关注点与排放点之间的距离  $x < 1000m$ ), 根据 IAEA NO.19 号报告, 当  $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$  时, 关注点地面空气浓度可由下式计算:

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

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 3-13;

$P_p$  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，取值 2m/s；

$K$  为经验常数，m，取值  $K=1m$ ；

关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-20。

**表 5-20 关注点处地面空气浓度计算结果**

核素	近距离范围内公众, Bq/m <sup>3</sup>
<sup>11</sup> C	5.16E-04
<sup>13</sup> N	1.34E-03
<sup>15</sup> O	3.40E-03
<sup>41</sup> Ar	2.10E-05

空气浸没外照射剂量可由下式计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T$$

式中：

$H_A$  为空气浸没照射所致年受照剂量，Sv/a；

$t$  为年受照时间，s/a；保守按 2000h 计；

$S_f$  为建筑物屏蔽因子；本次评价取值 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 5-21，取值来自 IAEA NO.19；

$T$  为居留因子。

**表 5-21 剂量转换因子**

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

建筑外停车场上公众的空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-22。

表 5-22 空气浸没外照射剂量计算结果

核素	公众空气浸没外照射剂量, mSv/a
<sup>11</sup> C	4.54E-09
<sup>13</sup> N	1.18E-08
<sup>15</sup> O	3.00E-08
<sup>41</sup> Ar	2.45E-10
总计	4.66E-08

### 5.1.1.3.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由下式计算：

$$H_{hi} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T$$

式中：

$H_{hi}$  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<sup>3</sup>/h, 成人: 1.2m<sup>3</sup>/h ;

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

建筑外停车场上的公众吸入内照射剂量计算结果见表 5-23。

表 5-23 空气吸入内照射剂量计算结果

核素	公众空气吸入内照射剂量, mSv/a
<sup>11</sup> C	2.01E-06
<sup>13</sup> N	—
<sup>15</sup> O	—
<sup>41</sup> Ar	—
总计	2.01E-06

### 5.1.1.3.3 公众受照剂量汇总

公众受照剂量计算结果见表 5-24，质子治疗系统正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为  $3.57\text{E-}02\text{mSv/a}$ ，低于本项目公众剂量约束值  $0.1\text{mSv/a}$ 。

表 5-24 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果

公众所在位置	关注点	瞬发辐射所致年受照剂量, mSv/a	放射性气体排放所致年受照剂量, mSv/a	年受照剂量总计, mSv/a
质子候诊区	A16	$2.80\text{E-}06$	—	
顶板停车场	B1	$3.57\text{E-}02$	$2.05\text{E-}06$	$3.57\text{E-}02$

## 5.1.2 事故工况的环境影响分析

### 5.1.2.1 事故情景

质子治疗系统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。

质子治疗系统运行期间可能发生的事故主要有：

(1) 安全连锁系统失效、人员误入回旋加速器大厅或治疗室内部造成的误照射事故；

(2) 工作人员在回旋加速器大厅或治疗室内部工作期间，质子治疗系统出束造成的误照射事故；

(3) 冷却水泄漏事故。

### 5.1.2.2 事故后果分析

#### 5.1.2.2.1 人员误照射事故

##### 5.1.2.2.1.1 事故后果估算

在人员误照射事故中，加速器机房或治疗室内部工作期间，质子治疗系统出束

造成的误照射事故所致人员受照剂量最大，本次评价对该事故期间的人员受照剂量进行估算。

质子治疗系统出束时，距离治疗头 1m 处输出剂量率为 2Gy/min。假设工作人员在距离治疗头 1m 处工作，取单次治疗时间 5min 为工作人员在该事故发生期间的受照时间，由此可计算得出事故期间工作人员的受照剂量约为 10Gy。

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，其发生几率与受照剂量的大小有关，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受照剂量的大小而异，剂量愈高则效应的严重程度愈大。根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ104-2017）和《辐射防护导论》，成人全身受到不同照射剂量的损伤估计情况列于表 5-25。

表 5-25 不同照射量对人体损伤的估计

剂量, Gy	类型		初期症状和损伤程度
<0.25	——		不明显和不易察觉的病变
0.25~0.5			可恢复的机能变化, 可能有血液学的变化
0.5~1			机能变化、血液变化, 但不伴有临床迹象
1~2	骨髓型急性放射病	轻度	乏力、不适、食欲减退
2~4		中度	头昏、乏力、食欲减退、恶心、呕吐、白细胞短暂上升后下降
4~6		重度	多次呕吐、可有腹泻、白细胞明显下降
6~10		极重度	多次呕吐、腹泻、休克、白细胞急剧下降
10~50	肠型急性放射病		频繁呕吐、腹泻严重、腹痛、血红蛋白升高
>50	脑型急性放射病		频繁呕吐、腹泻、休克、共济失调、肌张力增高、震颤、抽搐、昏睡、定向和判断力减退

由此可知，发生人员误照射事故时，考虑最不利的情况下，将导致受照人员受到严重放射性损伤，甚至导致死亡。根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定，该类事故属于较大辐射事故。

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

#### 5.1.2.2.1.2 事故可信性分析

质子治疗系统设计有功能齐全，具有安全冗余的高安全等级的安全连锁系统，采用清场搜索、紧急停机、分区控制、声光报警器等安全设备和措施，确保当质子治疗装置辐射工作场所控制区内某区域内有束流时，该区域的门无法打开，人员无法进入；当控制区内某区域有人时，质子治疗装置无法出束，能够有效防止误入事故的发生。

此外，医院建立了一系列辐射安全管理制度，包括《操作规程》、《人员培训计划》、《辐射防护与安全保卫制度》等，规定操作质子治疗系统的工作人员均由经过辐射防护考核和专业培训的人员担任，并严格按操作管理规程对设备进行操作运行。本项目正式运行前，编制完成《辐射事故应急预案》并严格执行，确保在发生辐射事故时，能有序、迅速地采取正确的处理措施，缓解事故后果，控制辐射事故的发展，将事故对人员、财产和环境的损失减少到最低限度。

综上所述，针对该类事故可能发生的风险已经采取了一系列辐射安全防护措施，这些措施具有可行性和安全冗余性，该类事故发生的概率非常低。

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

(2) 开机出束前，撤离控制区时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和程序对各区域进行清场。出束期间一旦发现有人滞留在控制区内，就近按下急停按钮。工作人员进入加速器机房或治疗室等控制区内部工作时应随身佩戴有效的剂量报警仪，以便随时了解区域内的辐射水平并在辐射水平超出阈值时发出报警信号。

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

(4) 做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

#### **5.1.2.2.2 冷却水泄漏事故**

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，即使发生泄漏，也不会对工作人员造成辐射影响。加速器机房设有地漏，通过地漏将冷却水送至事故集水坑暂存，有效贮存容积大于质子治疗系统内活化冷却水的体积，确保泄漏的冷却水通过自流经地漏流入该集水坑内。因此，冷却水泄漏事故也不会对环境造成污染。

#### **5.1.2.2.3 事故防范措施**

定期检查冷却水系统运行情况，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。

## 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

医院已设置专门的辐射安全与环境保护管理小组，组长由分管安全的医院领导担任，全面负责辐射防护和安全管理的工作；小组成员由医务处、放疗科等涉及核技术利用工作的科室领导和工作人员组成，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。本项目建成后，由该领导小组负责本项目相关的辐射安全和管理工作。

辐射安全与环境保护管理小组的主要职责如下：

(1) 负责全员放射工作人员的健康查体、个人剂量监测以及各辐射工作场所的防护、设计、报批、检测、检查等工作；

(2) 制定辐射安全防护与管理规章制度，并定期检查各项规章制度的贯彻落实情况；

(3) 负责放射工作人员的培训和管理；

(4) 管理、监督、协调医用射线装置使用过程中的辐射安全工作；

(5) 负责放射性三废的监督管理和环境保护。

辐射防护负责人的主要职责如下：

(1) 负责辐射、安全及环境相关法律法规的追踪；

(2) 提出对相关法规在医院内部实施的方案；

(3) 就辐射、安全及环境相关报批事项的对外联络，包括许可证申请与更新；

(4) 负责个人剂量及场所监控记录的收集与管理；

- (5) 负责射线装置台账统一管理；
- (6) 组织年度安全演练及事故应急处理；
- (7) 组织编写并提交年度评估报告；
- (8) 组织发放和回收个人剂量计。

### 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、从事放射诊疗的医生、物理师、护士、技师以及质子治疗系统的维护工程师，计划的编配情况如下表 6-1。

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。

表 6-1 本项目辐射工作人员计划编配情况

岗位类别	人数，人	新增/现有调配	是否与医院其他放疗工作交叉
辐射防护负责人（注册核安全工程师）	1	新增	——
科室医生	2	新增/现有调配	否
物理师	4	新增	否
治疗技师	6	新增	否
护士	3	现有调配	否
维修工程师	2	新增	否

## 6.2 辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》、《放射性同位素与射线

装置安全和防护管理办法》等法规的要求，医院已从院级层面，制定了一系列的辐射安全管理规章制度。

泰安市中心医院还应根据本项目建设内容和特点，在本项目建成运行前，制定和完善操作规程、辐射防护、设备检修维护、监测方案、放射性废物处理等相关规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。

## 6.3 辐射监测

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。

### 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，自行监测采用安装固定式监测仪表和便携式监测仪表相结合的方式。每年至少进行一次，监测数据记录存档。具体辐射工作场所监测计划列于表 6-2。

表 6-2 本项目辐射工作场所监测计划

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	质子治疗系统辐射工作场所	固定式仪表监测	外照射	$\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量当量率	共 3 处，如图 6-1 所示	实时
		便携式仪表监测			机房四周和屋顶屏蔽墙体外、防护门外、监督区边界、护士站、维护人员办公室、医护人员办公室等人员长居留场所	1 次/年
委托监测	质子治疗系统辐射工作场所	便携式仪表巡测	外照射	$\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量当量率	同自行监测点位	1 次/年

图例：  
● 剂量监测仪

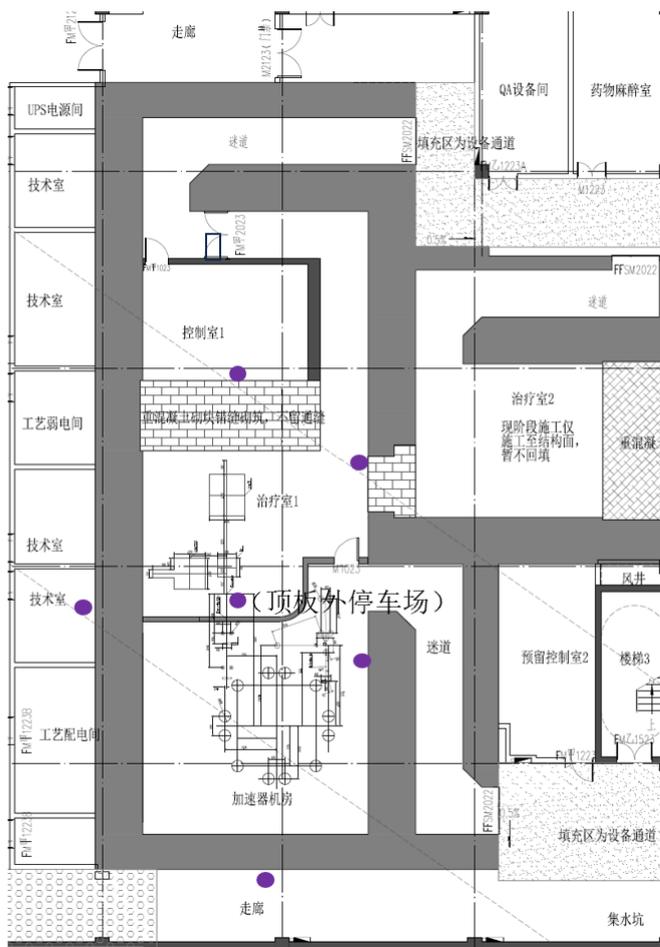


图 6-1 本项目固定式监测点位

### 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，具体环境监测计划列于表 6-3。

在院区内质子放疗区附近设环境固定式监测点位，如图 6-1 所示。每个监测点均设固定式中子、 $\gamma$  探测器各 1 个，用于对环境 neutron、 $\gamma$  辐射水平进行实时监测。监测数据通过有线或无线通讯设备实时传输至终端数据处理中心。

表 6-3 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	外照射	便携式仪表 巡测	$\gamma$ 辐射剂量率和 中子剂量率	医院院内质子放疗区附近	1 次 / 年

		固定式仪表 监测		共 3 个点，如图 6-1 所示	实时
委托监 测	外照射		$\gamma$ 辐射剂量率和 中子剂量率	同自行监测点位	1 次/ 年
	环境介质	土壤	$^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 总 $\alpha$ 、总 $\beta$	院区加速器顶板的土壤	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。质子放疗区配备的个人剂量计和个人剂量报警仪均需具有监测 X- $\gamma$  和中子的功能。

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 3 个月。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受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

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。个人剂量档案应终身保存。

此外，医院对放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

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式  $\gamma$  探测器、固定式中子探测器、便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- $\gamma$  辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见表 6-4。

表 6-4 本项目拟配备的辐射监测设备清单

序号	仪器名称	数量, 台	总计, 台
1	固定式 $\gamma$ 探测器	质子放疗区: 共 3 台; 院区环境: 共 3 台;	6
2	固定式中子探测器	质子放疗区: 共 3 台; 院区环境: 共 3 台;	6
3	X/ $\gamma$ 巡检仪	质子放疗区: 1 台;	1
4	中子巡检仪	质子放疗区: 1 台;	1
5	直读式个人剂量报警仪	2 台/每间治疗室/加速器机房, 共 2 台	2
6	个人剂量计	1 支/人	——

## 6.4 辐射事故应急预案

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)等的有关规定, 在院级层面制定了《放射性事故应急预案》。

已制定的《应急预案》内容较为详实, 可操作性较强, 基本满足要求, 但还有以下几点需要补充完善:

(1) 确实“应急准备”相关内容: 如应急物资和装备、应急培训与演练以及应急资金保障等相关内容。

(2) 《应急预案》中未规定“应急终止条件”和“应急终止后应执行的行动”的内容, 应予以补充;

此外, 还应根据本项目的建设内容和特点对现有的《应急预案》进行补充完善或制定单独的应急预案, 在本项目建成运行前, 制定好可行、符合要求的应急预案。

## 6.5 申请者从事辐射工作能力评价

### 6.5.1 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，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。

医院目前已成立了专门的放射防护与辐射安全领导小组，领导小组组长由医院领导担任，全面负责医院的辐射安全管理工作。小组成员由人事科、医务科等职能部门负责人等组成。

一名注册核安全工程师尚未落实到位。目前，医院已制定相关工作计划，确保在取证前配备齐全具有相应资质的专业人员。

医院按此要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。

### 6.5.2 辐射工作人员培训

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培训计划，规定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。

在严格落实人员培训计划后，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

### 6.5.3 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。

经预测分析评价，本项目质子治疗系统和 CT 等射线装置辐射工作场所的辐射屏蔽设计均能确保机房屏蔽体外剂量率水平满足国家相关标准的要求。各机房都设计了完备、冗余的安全连锁系统，通过门-机连锁/门-灯连锁、清场搜索、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。

建设单位应按照辐射防护设计方案进行施工建设，并确保机房经验收合格后投入使用。在此基础上，各射线装置机房能满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

#### 6.5.4 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。

本项目拟为每名放射性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，委托有资质单位监测，监测周期不超过 3 个月。建立辐射工作人员个人剂量档案，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受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目拟在质子治疗系统辐射工作场所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，并设定了报警阈值。此外，拟配备便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- $\gamma$ 辐射巡测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

建设单位按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

### 6.5.5 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。

医院还应根据本项目的建设内容及特点补充相应的操作规程并对相关规章制度进行更新完善。在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。

### 6.5.6 辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有辐射事故应急措施。

医院目前已从院级层面制定了相应的《放射性事故应急预案》，成立了应急领导小组并明确了各小组成员的职责，规定了各类事故的应急处置措施和流程，配备充足的辐射事故应急监测、救援等方面的专用装备、器材和工具等，并定期组织开展辐射事故应急演练，增加应急工作人员的实战经验。确保一旦发生辐射事故，能立即启动辐射事故应急预案，并采取相应的应急措施。

医院根据本项目的建设内容和特点对现有的应急预案进行补充完善或制定单独的应急预案，可满足相关要求。

### 6.5.7 放射性三废治理

本项目运行期间产生的放射性三废主要来自质子治疗系统的运行。

放射性废气主要为质子治疗系统运行期间产生的感生放射性气体，质子治疗系统辐射工作场所内设置了独立的排风系统，感生放射性气体经机房内的排风管道排入环境，排风高度约为 3m。

可能产生的放射性废水为质子治疗系统的活化冷却水，本项目设置了集水坑，可确保冷却水在排放前安全暂存。暂存一定时间，排放前进行取样监测，满足解

控标准后排入医院污水管网。

可能产生的放射性固体废物主要为质子治疗系统运行期间产生的活化结构部件，暂存于质子放疗区地下一层西北角的固废暂存间内。暂存一段时间后，满足解控标准的，解控后按一般固体废物处理或由回收利用，不满足解控标准的委托有资质单位处理。

## 6.6 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**

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资（万元）
1	辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全防护领导小组	--
		辐射安全管理制度：制定操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案，辐射事故应急预案等	
2	人员考核	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核	5
3	监测仪器和防护用品	固定式区域 $\gamma$ 监测仪、固定式中子区域监测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- $\gamma$ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪	200
		工作服、口罩、手套等	
4	辐射防护设施工程（辐射屏蔽墙体和放射性三废处理设施）		300
5	环境影响评价、竣工环保验收		60
总计			565

## 6.7 竣工环保验收一览表

本项目建成后，医院应按规定组织自主验收，编制验收监测报告表。本项目的竣工环保验收内容及要求列于表 6-6。

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等。	
2	辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。	
3	人员要求	1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名； 2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
4	机房面积及尺寸	模拟定位 CT 机房面积不小于 30m <sup>2</sup> ，且单边长度不小于 4.5m。	
4	屏蔽体外剂量率	质子治疗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 T>1/2，剂量率水平不高于 2.5μSv/h； b、居留因子 T≤1/2，剂量率水平不高于 10μSv/h。	
5	辐射防护与安全措施	质子治疗装置	1.辐射工作场所分区： 控制区：加速器机房、事故冷却水暂存池和固废暂存间；监督区：上述控制区四周屏蔽体外相邻场所； 2.人身安全联锁系统：由门内开门按钮、出入管理设备、紧急开门按钮、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：机房采用新风机送风、排风机排风的方式，上送下排，呈对角线布置的方式，治疗室 1 的换气次数不少于 4 次/h； 4.场所辐射监测系统：加速器机房、治疗室、控制室 1 内设置固定式辐射监测点，每个点位设一台 γ 探测器和 1 台中子探测器。
6	放射性三废处理设施	废气	质子治疗装置辐射工作场所设有独立的通风系统，各区域排风管最终引至质子放疗区屋顶，排风口位置高出质子中心整个建筑的最高处 3m，排放高度不低于 3m。
		废水	事故集水坑的有效容积为 4.56m <sup>3</sup> （分四格，每格有效容积为 1.14 m <sup>3</sup> ），用于暂存活化冷却水。根据质子治疗系统厂商提供的信息，质子治疗系统中可能产生活化冷却水的总量为 1m <sup>3</sup> ，每年因检修将回路中的冷却水排放的次数最多为一次，排放的冷却水体积小于集水坑的容积，因此的集水坑设置能够满足活化冷却水的暂存要求。
		固体废物	质子放疗区西北角设有固废暂存间，用于暂存放射性固体废物。该储存间设有门禁系统，门禁卡

			由专人负责保管，领用时需登记。
7	辐射监测	环境监测	制定环境辐射监测计划，包括自行监测和委托监测，至少每年开展 1 次。院内质子放疗区周围设 3 处固定式环境监测点位，每个点位安装一台 $\gamma$ 探测器和 1 台中子探测器。
		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 3 个月，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。配备一定数量的个人剂量报警仪。
		监测设备	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.固定式 <math>\gamma</math> 探测器：6 台；</li> <li>2.固定式中子探测器：6 台；</li> <li>3.X/<math>\gamma</math> 巡检仪：1 台；</li> <li>4.中子巡检仪：1 台；</li> <li>5.直读式个人剂量报警仪：2 台；</li> <li>6.个人剂量计：1 支/人。</li> </ul>

## 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，2010 年我国恶性肿瘤新发病例达 220 万人，因恶性肿瘤死亡人数达 160 万人。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，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）本项目的建设是泰安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）通过本项目的建设，提高医院基础设施条件，引进先进设备、先进技术，提高病人就医条件，对满足人民群众不断增长的医疗需求和提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

（3）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、药品收入、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：本项目的建筑为一栋地下一层的质子治疗中心。总建筑面积为 1889m<sup>2</sup>，主要建设加速器机房（含治疗室）及其配套用房、设施等。

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。

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，本项目的实施是正当的。

## 8 结论

### 8.1 项目工程概况

泰安市中心医院（青岛大学附属泰安市中心医院，泰山医养中心）拟在泰安高新区泰安市中心医院高新院区院内，计划改造原地下停车场，主要建设质子加速器机房（含治疗室）以及其他配套功能房间，开展肿瘤质子放射治疗工作。规划建筑面积 1889m<sup>2</sup>。主要建设一栋地下一层的质子治疗中心及其配套的辅助用房。项目总投资约 3 亿元，其中环保投资 565 万元，约占总投资的 1.88%。

项目拟使用 1 套质子治疗装置和 1 台模拟定位 CT 机开展放射诊疗工作。项目运行期间的辐射污染源主要是使用各类医用射线装置时产生的“瞬发辐射”和装置停机后依然存在的“感生放射性”，以及运行期间产生放射性三废。

### 8.2 实践的正当性

质子治疗肿瘤技术具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应和更加精准的宽度方向控制，比传统放疗技术具有更为理想的肿瘤局控率和较少的副作用，在国际上被誉为 21 世纪最理想的放疗手段之一。质子治疗装置是当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。项目拟配置的模拟定位 CT 机也是医院放射诊疗常用的主要设备。

本项目拟使用各类射线装置均设计采取了安全、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。本项目对患者和社会所带来的利益（主要是患者的健康有利）是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术利用实施活动是正当的。

### 8.3 选址、布局合理性分析

本项目拟建于泰安高新区泰安市中心医院高新院区东侧区域，与周围环境敏

感点距离较远，设置了相对独立的质子放疗区等，并拟设置物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目布局辐射肿瘤放射诊疗场所功能需要，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。

## 8.4 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：各射线装置工作场所均设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括人员出入管理、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) 通风系统：各射线装置工作场所均设有通风系统，其排风量、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。

(5) 工作场所辐射监测系统：质子治疗装置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。

## 8.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，工作人员中治疗技师的年受照剂量最大，为 2.56mSv/a。公众所受年最大有效剂量为 3.57E-02mSv/a，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。

## 8.6 放射性三废排放和处理

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自质子治疗装置。

质子治疗装置辐射工作场所内设置了独立的排风系统，感生放射性气体经机房内的排风管道引至质子放疗区屋顶，排风口位置高出质子中心整个建筑的最高处 3m，排放高度约为 3m。

本项目设置了集水坑，冷却水经加速器机房内的地漏和管道排入集水坑内，可确保冷却水在排放前安全暂存。暂存一定时间，排放前进行取样监测，满足解控标准后排入医院污水管网。

质子放疗区地下一层西北角设有固废暂存间，确保放射性固体废物在得到处置前能够安全暂存。暂存一段时间后，满足解控标准的，解控后按一般固体废物处理或由回收利用，不满足解控标准的委托有资质单位处理。

## 8.7 辐射安全管理

泰安市中心医院已成立了专门的放射防护与辐射安全领导小组，并建立了一系列辐射安全管理制度，内容涵盖人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等；制定了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；目前制定的辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

## 8.8 公众参与

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

## 8.9 总结

综上所述，泰安市中心医院（青岛大学附属泰安市中心医院，泰山医养中心）

拟开展的“泰安市中心医院质子治疗中心项目”，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周围环境的辐射影响符合环境保护的要求，该项目对环境的辐射影响是可以接受的。泰安市中心医院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。