

编号: FA-HP-2021-10

核技术利用建设项目
福建童昌医院核技术利用新建项目
环境影响报告书
(公开本)



福建童昌医院有限公司

核技术利用建设项目
福建童昌医院核技术利用新建项目
环境影响报告书

建设单位名称 福建省童昌综合医院有限公司

建设单位法人代表/签名或签章 侯昌财

通讯地址：福建省泉州市南安市水头镇幸福路3号基金大厦15楼

邮政编码：362324

联系人：刘福水

电子邮箱：1337640732@qq.com

联系电话：13959766807



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	2
1.2.3	本次环评内容	3
1.2.4	产业政策和规划符合性	4
1.2.5	周围环境概况	7
1.2.6	核技术利用及辐射安全管理现状	7
1.3	编制依据	7
1.3.1	法律、法规和规章	7
1.3.2	技术导则、标准	9
1.3.3	其它文件、资料	10
1.4	评价标准	10
1.4.1	剂量限值和剂量约束值	10
1.4.2	辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	11
1.4.3	放射性废物排放标准	12
1.4.4	其他标准	14
1.5	评价范围和保护目标	14
1.5.1	评价范围	14
1.5.2	环境保护目标	16
1.6	安全责任划分	17
2	自然环境与社会环境状况	18
2.1	地理位置	18
2.2	自然环境状况	18
2.2.1	地质、地形地貌	18
2.2.2	气候特征	19
2.2.3	水文	19
2.3	社会环境概况	19
2.3.1	人口	19
2.3.2	经济发展状况	20
2.3.3	文化教育	20
2.3.4	医疗	20
2.4	环境质量和辐射现状	21
2.4.1	环境天然放射性水平	21
2.4.2	监测内容	21
2.4.3	监测/取样点位	22
2.4.4	监测设备和监测方法	24
2.4.5	质量保证措施	25
2.4.6	监测结果	26
2.5	场址适宜性分析	28

3	工程分析与源项	29
3.1	项目规模与基本参数	29
3.2	工程设备与工艺分析	30
3.2.1	质子治疗系统概况	30
3.3	辐射污染源项分析	40
3.3.1	质子治疗系统	40
3.4	主要辐射污染因子小结	64
4	辐射安全与防护设施	65
4.1	质子治疗系统	65
4.1.1	场所布局与屏蔽	65
4.1.2	辐射安全与防护措施	72
4.1.3	放射性三废处理	93
4.1.4	拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析	98
4.2	服务期满后的环境保护措施	98
5	辐射环境影响分析	101
5.1	质子治疗系统	101
5.1.1	正常运行的环境影响分析	101
5.1.2	事故工况下的环境影响	138
5.2	小结	140
5.2.1	工作人员受照剂量	140
5.2.2	公众受照剂量	140
6	辐射安全管理	141
6.1	机构与人员	141
6.1.1	辐射安全与环境保护管理机构	141
6.1.2	辐射工作人员管理	142
6.2	辐射安全管理规章制度	142
6.3	辐射监测	143
6.3.1	工作场所监测	143
6.3.2	环境监测	145
6.3.3	个人剂量监测	145
6.3.4	监测设备	146
6.3.5	竣工环保验收监测	146
6.4	辐射事故应急	149
6.5	申请者从事辐射工作能力评价	150
6.5.1	辐射安全与环境保护管理	150
6.5.2	辐射工作人员培训	151
6.5.3	工作场所的安全防护措施	151
6.5.4	个人防护用品及监测仪器	152
6.5.5	规章制度	152
6.5.6	辐射事故应急	153
6.5.7	放射性三废治理	153
6.6	环保投资一览表	153
6.7	竣工环保验收一览表	154

7	利益-代价分析.....	157
7.1	利益分析.....	157
7.2	代价分析.....	157
8	结论和建议.....	159
8.1	结论.....	159
8.1.1	项目工程概况.....	159
8.1.2	实践的正当性.....	159
8.1.3	选址、布局合理性分析.....	159
8.1.4	辐射安全与防护措施.....	160
8.1.5	辐射环境影响分析.....	160
8.1.6	放射性三废排放和处理.....	160
8.1.7	辐射安全管理.....	161
8.1.8	公众参与.....	161
8.1.9	总结.....	161
8.2	建议.....	162
附件 1	建设单位营业执照.....	163
附件 2	省卫健委同意重新设置福建童昌医院的函（闽卫审医函[2019]1 号）.....	164
附件 3	投资项目备案证明.....	167
附件 4	项目土建环评批复（泉南环评[2020]书 9 号）.....	168
附件 5	环评委托书.....	172
附件 6	建设用地规划许可证.....	173
附件 7	建设工程规划许可证.....	174
附件 8	监测报告.....	175
附图 1	童昌医院总平面图.....	185
附图 2	医院地下二层平面图.....	186
附图 3	医院地下一层平面图.....	187
附图 4	质子治疗区平面图（地下二层，标高-8.9 米）.....	188
附图 5	质子治疗区平面图（地下一层，标高-6.1 米）.....	189
附图 6	质子治疗区平面图（检修层，标高-2.6 米）.....	190
附图 7	质子治疗区剖面图（3-3 剖面）.....	191
附图 8	质子治疗区剖面图（4-4 剖面）.....	192
	建设项目环境影响报告书审批基础信息表.....	193

文中图目录

图 1-1 医院总体平面图	3
图 1-2 本项目地理位置图	5
图 1-3 医院周边关系图	6
图 1-4 本项目电离辐射评价范围示意图	15
图 2-1 监测布点图	23
图 3-1 MEVION S250i 质子治疗系统结构示意图	31
图 3-2 MEVION S250i 质子治疗系统结构组成示意图	31
图 3-3 MEVION S250i 质子治疗系统效果图	32
图 3-4 MEVION S250i 质子治疗机房剖面示意图	33
图 3-5 同步质子回旋加速器位置示意图	34
图 3-6 束流传输系统结构示意图	35
图 3-7 射程调节器示意图 图 3-8 自适应准直器示意图	35
图 3-9 患者定位系统结构组成图	37
图 3-10 质子治疗机房内 CT 控制室及其屏蔽设计示意图	37
图 3-11 质子治疗系统治疗流程	38
图 3-12 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布	42
图 3-13 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布	43
图 3-14 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布	43
图 3-15 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布	44
图 3-16 质子治疗系统冷却水回路示意图	53
图 3-17 回旋加速器剖面结构图	54
图 4-1 质子治疗机房辐射工作场所分区平面图（负二层：设备层）	66
图 4-2 质子治疗机房辐射工作场所分区平面图（负一层：治疗层）	66
图 4-3 质子治疗机房辐射工作场所分区平面图（检修层）	67
图 4-4 质子治疗机房辐射工作场所分区剖面图（3-3 剖面）	67
图 4-5 质子治疗机房辐射工作场所分区剖面图（4-4 剖面）	68
图 4-6 质子治疗机房辐射屏蔽设计（设备层）	69
图 4-7 质子治疗机房辐射屏蔽设计（治疗层）	70
图 4-8 质子治疗机房辐射屏蔽设计（检修层）	70
图 4-9 质子治疗机房辐射屏蔽设计（3-3 剖面）	71
图 4-10 质子治疗机房辐射屏蔽设计（4-4 剖面）	71
图 4-11 人身安全联锁系统结构示意图	74
图 4-12 控制室的控制面板示例图	75
图 4-13 质子治疗机房内急停按钮示例图	77
图 4-14 质子治疗机房内安全设施安装点位及清场搜索路线图	78
图 4-15 维修室内工作状态指示灯示例图	80
图 4-16 治疗层内工作状态指示灯示例图	81
图 4-17 设备层工作状态指示灯示例图	81
图 4-18 质子治疗系统安全联锁系统逻辑图	83
图 4-19 人身安全联锁系统的工作流程	84
图 4-20 质子治疗系统场所辐射监测系统结构	85

图 4-21 质子治疗机房场所辐射监测点位（治疗层）	86
图 4-22 质子治疗机房进风管、排风管道走向图	89
图 4-23 新风管、进风管预留洞口位置剖面图	90
图 4-24 质子治疗机房管道穿墙示意图	91
图 4-25 质子治疗系统冷却水蓄水罐位置示意图	95
图 4-26 设备层放射性固体废物暂存场所位置示意图	98
图 5-1 回旋加速器结构剖面	104
图 5-2 模拟计算建立的三维模型由南向北看的俯视图（整体外观）	104
图 5-3 模拟计算建立的三维模型由南向北看的俯视图（顶墙屏蔽未显示）	105
图 5-4 模拟计算建立的三维模型由西向东看的侧视图（后装机和西墙屏蔽未显示）	105
图 5-5 模拟计算建立的三维模型由南向北看的正视图（走廊外墙未显示）	106
图 5-6 模拟计算建立的三维模型的俯视图（显示地下一层）	106
图 5-7 模拟计算建立的三维模型的俯视图（显示地下二层）	107
图 5-8 垂直向下照射（0°）检修层剂量率分布（单位：mSv/h）	108
图 5-9 垂直向下照射（0°）地下一层剂量率分布（单位：mSv/h）	108
图 5-10 垂直向下照射（0°）地下二层剂量率分布（单位：mSv/h）	109
图 5-11 垂直向下照射（0°）过等中心点垂直束流的剂量率分布（单位：mSv/h）	109
图 5-12 垂直向下照射（0°）过等中心点垂直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h）	110
图 5-13 垂直向下照射（0°）屏蔽门和风管垂直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h，左图：距屏蔽墙外表面 0cm，右图：距屏蔽墙外表面 30cm）	111
图 5-14 水平朝北照射（90°）检修层剂量率分布（单位：mSv/h）	111
图 5-15 水平朝北照射（90°）地下一层剂量率分布（单位：mSv/h）	112
图 5-16 水平朝北照射（90°）地下二层剂量率分布（单位：mSv/h）	112
图 5-17 水平朝北照射（90°）过等中心点垂直束流的剂量率分布（单位：mSv/h）	113
图 5-18 水平朝北照射（90°）过等中心点垂直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h）	113
图 5-19 水平朝北照射（90°）屏蔽门和风管垂直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h，左图：距屏蔽墙外表面 0cm，右图：距屏蔽墙外表面 30cm）	114
图 5-20 垂直向上照射（180°）屋顶层剂量率分布（单位：mSv/h，左图：质子机房顶部地面，右图：后装机顶部地面）	115
图 5-21 垂直向上照射（180°）检修层剂量率分布（单位：mSv/h）	115
图 5-22 垂直向上照射（180°）地下一层剂量率分布（单位：mSv/h）	116
图 5-23 垂直向上照射（180°）地下二层剂量率分布（单位：mSv/h）	116
图 5-24 垂直向上照射（180°）过等中心点垂直束流的剂量率分布（单位：mSv/h）	117
图 5-25 垂直向上照射（180°）过等中心点垂直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h）	118
图 5-26 垂直向上照射（180°）屏蔽门和风管垂直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h，左图：距屏蔽墙外表面 0cm，右图：距屏蔽墙外表面 30cm）	119
图 5-27 质子治疗机房地下一层平面关注点示意图	120
图 5-28 质子治疗机房地下二层平面关注点示意图	120
图 5-29 质子治疗机房检修层平面关注点示意图	121
图 5-30 质子治疗机房过等中心点平行束流剖面关注点示意图	121
图 5-31 质子治疗机房过等中心点垂直束流剖面关注点示意图	122
图 5-32 质子治疗机房的风管关注点示意图	122
图 6-1 固定式环境监测仪表安装点位图	144

图 6-2 竣工环保验收工作流程	148
------------------------	-----

文中表目录

表 1-1 本项目使用射线装置情况	4
表 1-2 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	11
表 1-3 质子治疗系统产生的放射性废水中相关核素排放限值	12
表 1-4 《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005) 中综合医疗机构和其他医疗机构水 污染物排放限值中总 A、总 B 的排放限值	13
表 1-5 质子治疗系统活化靶件中放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度	13
表 1-6 NO _x 、O ₃ 排放标准和室内浓度限值	14
表 1-7 本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况	16
表 2-1 泉州市环境天然 Γ 辐射剂量率 (nGy/h)	21
表 2-2 监测对象和项目	22
表 2-3 仪器设备及性能指标	24
表 2-4 监测方法	25
表 2-5 拟建场地及周围环境 Γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果	26
表 2-6 土壤样品中总 A、总 B 活度浓度及核素分析结果, Bq/kg	27
表 3-1 本项目拟配备的医用射线装置一览表	29
表 3-2 MEVION S250i 质子治疗系统主要技术指标	30
表 3-3 治疗终端输出能量为 230MeV 时的束流损失表	44
表 3-4 治疗终端输出能量为 70MeV 时的束流损失表	45
表 3-5 中子天空反散射计算参数	46
表 3-6 不同距离 R 处天空反散射造成的剂量率	46
表 3-7 空气活化产生的主要放射性核素	48
表 3-8 质子治疗机房内空气感生放射性静态饱和活度	48
表 3-9 放射性核素衰变常数计算结果	49
表 3-10 质子治疗机房各区域通风换气设计情况	49
表 3-11 质子治疗机房内空气感生放射性核素动态饱和浓度, Bq/m ³	50
表 3-12 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	50
表 3-13 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数	51
表 3-14 冷却水感生放射性计算结果	52
表 3-15 回旋加速器的感生放射性模拟计算结果	55
表 3-16 射程调节器感生放射性模拟计算结果	56
表 3-17 自适应准直器感生放射性模拟计算结果	56
表 3-18 停机时刻, 与距离活化结构部件 1m 处的剂量率	57
表 3-19 恒健质子治疗装置拟建场址土壤中总 A、总 B 本底浓度*	58
表 3-20 质子治疗机房地面厚度及其与土壤接触边界处的剂量率水平	59
表 3-21 人体组织等效靶的组成成分	59
表 3-22 单次治疗后, 患者不移动, 治疗室内距靶 (患者) 表面 50cm 处的感生放射性剂量率 随停机时间的变化, mSv/h	60
表 3-23 空气感生放射性浸没外照射剂量率计算结果, mSv/h	61
表 3-24 230MeV-1.2nA 治疗 4min, 停机 1min、5min、10min 和 30min 后, 治疗机房内技师 工作区 (距离患者 50cm 处) 的剂量率	61
表 3-25 距靶点 1m 处的光子注量率计算结果	63

表 3-26 各参数取值	63
表 3-27 质子治疗机房内 O ₃ 和 NO ₂ 饱和浓度	64
表 3-28 本项目正常运行期间主要辐射污染因子	64
表 4-1 质子治疗机房辐射屏蔽设计及周围环境分布情况	72
表 4-2 质子治疗机房内安全设施的数量	77
表 4-3 质子治疗机房通风换气设计参数	88
表 4-4 运行维护期间进入治疗机房内部工作的许可条件和剂量率报警阈值	93
表 4-5 MEVION S250i 质子治疗系统维修期间产生的活化结构部件	96
表 4-6 活化结构部件主要感生放射性核素及其半衰期	96
表 4-7 质子治疗系统拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020) 中相关要求对比	99
表 5-1 本项目质子治疗系统的年使用规划	101
表 5-2 屏蔽计算时考虑的束流损失源项	102
表 5-3 屏蔽计算时使用的混凝土和土壤成分	102
表 5-4 质子治疗机房屏蔽体厚度设计方案	103
表 5-5 质子治疗机房周围各关注点剂量率计算结果	123
表 5-6 质子治疗机房工作人员岗位和工作量规划	124
表 5-7 科室医生年受照剂量估算结果	125
表 5-8 治疗技师在控制室内工作期间的受照剂量估算结果	126
表 5-9 所有治疗技师在机房内摆位的年工作量	126
表 5-10 每名治疗技师在机房内摆位的年工作量	126
表 5-11 患者治疗前摆位期间, 治疗技师的年受照剂量	127
表 5-12 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	127
表 5-13 吸入内照射剂量转换因子	128
表 5-14 治疗技师在机房内工作期间所受感生放射性气体吸入内照射剂量	128
表 5-15 每位治疗技师年总受照剂量	129
表 5-16 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量	129
表 5-17 物理师质检工作期间年受照剂量算结果	129
表 5-18 物理师的年受照剂量	130
表 5-19 迈胜的维修维护人员的年受照剂量	130
表 5-20 维修工程师的年受照剂量	130
表 5-21 工作人员受照剂量汇总	131
表 5-22 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果	132
表 5-23 质子治疗机房外各关注点处公众所受瞬发辐射外照射剂量	133
表 5-24 质子治疗机房放射性排风口参数	134
表 5-25 各关注点处地面空气浓度计算结果, BQ/m ³	135
表 5-26 剂量转换因子	136
表 5-27 空气浸没外照射剂量计算结果, mSv/A	136
表 5-28 吸入内照射剂量计算结果, mSv/A	137
表 5-29 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果, mSv/A	137
表 5-30 公众受照剂量汇总, mSv/A	137
表 5-31 工作人员受照剂量汇总	140
表 6-1 童昌医院放射防护领导小组概况	141

表 6-2 本项目辐射工作人员计划编配情况	142
表 6-3 本项目辐射工作场所监测计划表	144
表 6-4 本项目环境监测计划	145
表 6-5 本项目拟配备的辐射监测设备清单	146
表 6-6 竣工环保验收监测方案	149
表 6-7 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	154
表 6-8 本项目竣工环保验收一览表	155

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：福建童昌医院核技术利用新建项目

建设地点：福建省泉州市南安市罗东镇罗溪村

建设性质：新建

建设单位：福建省童昌综合医院有限公司

建设规模：拟在福建童昌医院建设质子中心，新建 1 间质子治疗机房及其配套辅助用房，开展肿瘤质子放射治疗工作，拟使用 1 套美国迈胜医疗系统公司生产的小型化单室质子治疗系统（I 类射线装置），质子最高能量为 230MeV。

项目投资：项目总投资约为 250000 万元，其中环保投资约 2655 万元，占总投资的 1.06%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

福建童昌医院（以下简称“童昌医院”）的建设单位是福建省童昌综合医院有限公司，营业执照见附件 1。童昌医院是福建省卫生健康委员会批准设置的三级综合医院，批准文件见附件 2。童昌医院位于福建省泉州市南安市罗东镇罗溪村，由厦门源昌集团投资建设、台湾童综合医院负责运营管理，被列为福建省 2020 年省级重点项目（民生事业类）。医院按三级综合医院一次性规划，总投资 25 亿元，建设用地面积 91135 平方米，总建筑面积 48.72 万平方米，规划床位 2000 张，投资项目备案证明见附件 3。

童昌医院将引进国际先进的医疗设备，为患者提供先进、快速、精准的肿瘤治

疗方案。医院正式运营后，将由台湾童综合医院及大陆专家团队共同负责运营管理，台湾童综合医院以技术入股方式参与，将重点打造肿瘤、心血管、泌尿等临床专科，为南安、泉州等地区百姓提供高品质、高水准的医疗服务。

台湾童综合医院成立于 1971 年，是一家拥有 1400 多张床位、2000 余名员工的大型综合性医院，通过了五次 JCI 国际医疗评鉴认证。目前，拥有一大批业内顶级专家，日门急诊量 7000 人次。童昌医院正式运营后，该院将派管理和医疗专家团队入驻，全程参与医院管理和临床医疗工作。

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。

质子治疗装置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。童昌医院投用后，除了惠及南安北部十几个周边乡镇，还将辐射永春、德化、安溪、洛江等泉州其他地区以及莆田，惠及人口 300 万以上，将大大缓解地区医疗资源紧张问题。

童昌医院计划分两期建设，一期工程建筑面积 439450 平方米，主要建设内容包括医疗综合楼（地下 2 层，地上 23 层）、质子中心（地下 2 层，地上 4 层）、高压氧舱（地上 1 层）、地下室（地下 2 层）及配套的污水处理设施工程等；二期工程建筑面积 47750 平方米，在第一期开业运行后进行，主要建设行政妇幼综合楼及地下室。医院总体平面图见图 1-1。本项目质子中心位于一期工程的西北侧，建筑

面积 4500 平方米。一期工程土建环评《福建童昌医院项目环境影响报告书》已于 2020 年 12 月 23 日得到泉州市生态环境局的批复（泉南环评[2020]书 9 号，见附件 4）。

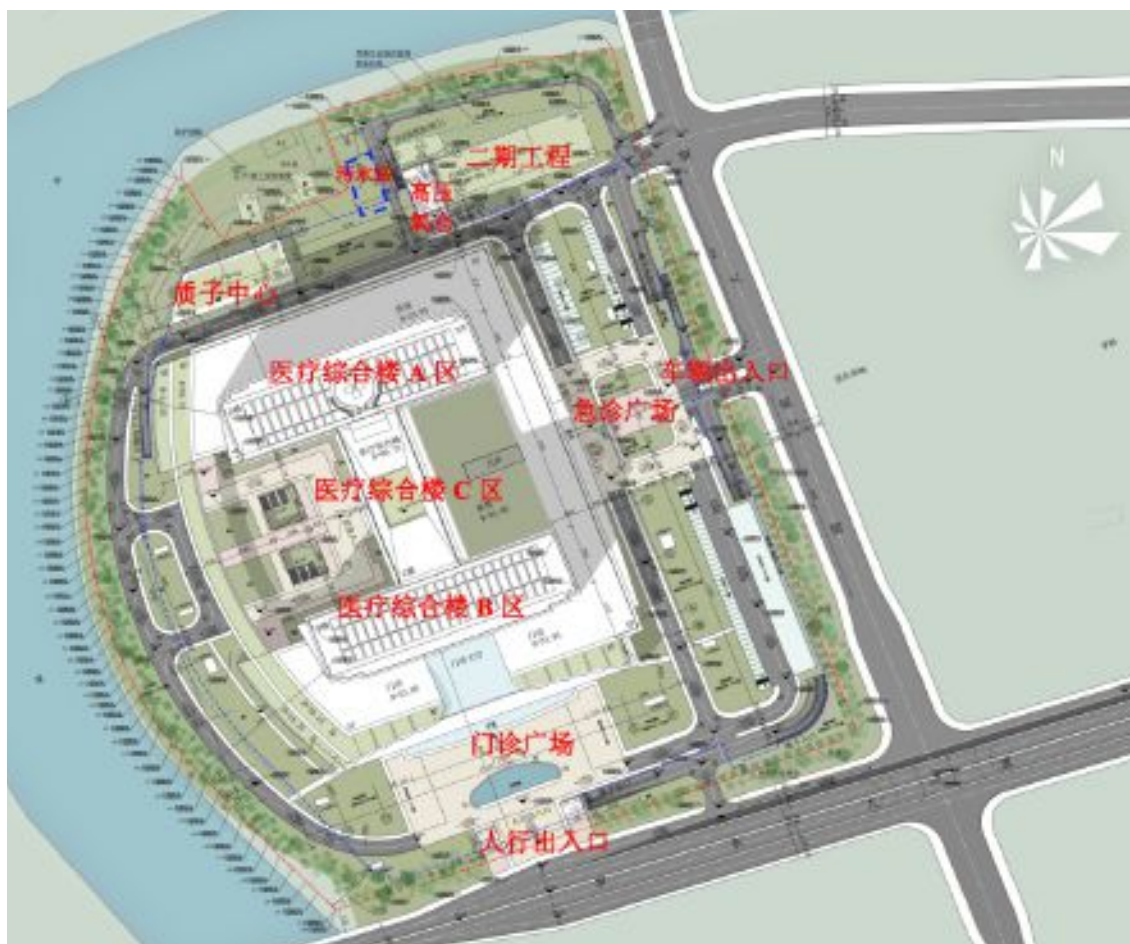


图 1-1 医院总体平面图

1.2.3 本次环评内容

本次环评为本项目的辐射环境影响评价，主要针对本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：

拟在质子治疗机房内使用 1 套小型化单室质子治疗系统，质子最高能量为 230MeV，属于 I 类射线装置。每套质子治疗系统配备两个 X 射线管，每个 X 射线管的最大管电压 150kV，最大管电流为 1000mA。

表 1-1 本项目使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量, 台	类别	所在位置
1	质子治疗系统	1	I	质子治疗机房

根据《射线装置分类》的规定, 质子治疗系统的管理类别属于 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 17 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 5)。

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》(2019 年本)中“鼓励类”中第六条第 6 项——“同位素、加速器及辐照应用技术开发”及第三十七条第 5 项——“医疗卫生服务设施建设”的范畴。因此, 本项目建设符合国家产业政策。

1.2.4.2 规划符合性分析

1.2.4.2.1 与土地利用规划的符合性

本项目拟建于童昌医院一期工程西北侧的质子中心内, 该地块用地性质为医院用地, 已分别于 2020 年 5 月、2020 年 6 月取得南安市自然资源局颁发的建设用地规划许可证(见附件 6)和建设工程规划许可证(见附件 7)。因此, 本项目符合土地利用规划要求。

综上所述, 本项目的建设符合相关政策和规划的要求。



图 1-2 本项目地理位置图



图 1-3 医院周边关系图

1.2.5 周围环境概况

本项目建设地点位于福建省泉州市南安市罗东镇罗溪村福建童昌医院院内，地理位置见图 1-2。童昌医院北侧、西侧紧邻罗溪，与机房最近距离约为 40m；一溪之隔的北侧为泉州宇格金属有限公司，与机房最近距离为 120m；一溪之隔的西侧为农林用地，与机房最近距离为 105m；东侧为迎宾大道，与机房最近距离为 210m；东侧隔路为居住用地、商住综合用地（主要包括居民楼、罗溪四中幼儿园等），与机房最近距离分别为 220m、225m；南侧为罗东大道，隔路为商住综合用地，与机房最近距离为 350m；东侧的南安市昌财实验中学与机房的最近距离为 455m。医院周边关系图见图 1-3。

本项目质子治疗机房及配套用房拟建于医院院区西北侧质子中心的负一层、负二层。拟建机房的东侧为拟建直线加速器机房，南侧为质子治疗机房配套用房，西南侧为后装治疗机房，西北侧和北侧均为地下土壤层，屋顶为院区内空地，底板下为地下土壤层。本项目项目总平面布置图见附图 1。

1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状

福建童昌医院此前未开展过核技术利用相关活动，未获得辐射安全许可证，为辐射安全许可证新申请单位。建设单位需在本项目取得环评批复后，申请辐射安全许可证；在获得辐射安全许可后，方可开展相关活动。

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(2021 年版)》(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》(2019 年本);

(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)《福建省环境保护条例》(2012 年 3 月 29 日修订);

(15)《福建省环保厅关于印发<核技术利用单位辐射事故/事件应急预案编制

大纲>（试行）的通知》（闽环保辐射〔2013〕10号，福建省环境保护厅，2013年4月10日）。

1.3.2 技术导则、标准

（1）《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）；

（2）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；

（3）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

（4）《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

（5）《土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法》（GB/T 11743-2013）；

（6）《水质 总 α 放射性的测定 厚源法》（HJ 898-2017）；

（7）《水质 总 β 放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）；

（8）《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》（GB/T 11713-2015）；

（9）《电离辐射工作场所监测的一般规定》（EJ 381-1989）；

（10）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

（11）《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）；

（12）《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）；

（13）《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）；

（14）《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）；

（15）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）；

（16）《放射性废物管理规定》（GB 14500-2002）；

(17)《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466-2005);

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

(19)《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996)。

1.3.3 其它文件、资料

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

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

(3) (美) 帕特森 (H.W.Patterson), (美) 托马斯 (R.H.Thomas) 著; 刁会昌等译. 加速器保健物理[M].北京, 原子能出版社.1983。

1.4 评价标准

1.4.1 剂量限值和剂量约束值

1.4.1.1 剂量限值

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

(1) 职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制, 使之不超过下述限值:

- 1) 审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量 (但不可作任何追溯性平均), 20mSv;
- 2) 任何一年中的有效剂量, 50mSv;
- 3) 眼晶体的年当量剂量, 150mSv;

4) 四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，500mSv。

(2) 公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

1) 年有效剂量，1mSv；

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

3) 眼晶体的年当量剂量，15mSv；

4) 皮肤的年当量剂量，50mSv。

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，剂量约束值通常应在公众照射剂量限值的 10%-30%范围之内。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《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）、《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）、《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）中的相关规定，本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平列于表 1-2。

表 1-2 本项目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, $\mu\text{Sv/h}$
质子治疗机房	机房四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶	居留因子 $T \geq 1/2$	≤ 2.5
		居留因子 $T < 1/2$	≤ 10
	机房底板外	机房底板外表面与土壤交界处*	$\leq 5 \times 10^3$

1.4.3 放射性废物排放标准

1.4.3.1 放射性废水

本项目可能产生的放射性废水为质子治疗系统的活化冷却水。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冷却水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。监测结果同时满足以下标准,方可作为一般废水排放:

(1)《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中的相关规定:

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

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中的方法,本次评价计算了活化冷却水中主要核素 ^3H 和 ^7Be 的单次排放限值 $1\text{ALI}_{\min}$ 和单月排放限值 $10\text{ALI}_{\min}$, 列于表 1-3。

表 1-3 质子治疗系统产生的放射性废水中相关核素排放限值

核素	单次排放限值 $1\text{ALI}_{\min}$, Bq	单月排放限值 $10\text{ALI}_{\min}$, Bq
^3H	$1.11\text{E}+09$	$1.11\text{E}+10$
^7Be	$3.85\text{E}+08$	$3.85\text{E}+09$

(2)《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)“表 2 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值(日均值)”中总 α 、总 β 的排放标准要求,具体列于表 1-4。

表 1-4 《医疗机构水污染物排放标准》（GB18466-2005）中综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值中总 α 、总 β 的排放限值

项目	排放标准, Bq/L
总 α	1
总 β	10

1.4.3.2 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，如离子源探针、射程调节器、自适应光栅等。

上述放射性固体废物的豁免原则主要参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中 A2.1 的规定：“任何时间段内在进行实践的场所存在的给定核素的总活度或在实践中使用的给定核素的活度浓度不超过表 A1 所给出的或审管部门所规定的豁免水平”。

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 表 A1 中给出的与质子治疗系统产生的放射性固体废物相关的放射性核素的豁免活度浓度和活度列于表 1-5。对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比之和小于 1 时，方可给予豁免。

表 1-5 质子治疗系统活化靶件中放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

核素	活度浓度, Bq/g	活度, Bq	核素	活度浓度, Bq/g	活度, Bq
^3H	1E+06	1E+09	^{52}Mn	1E+01	1E+05
^7Be	1E+03	1E+07	^{53}Mn	1E+04	1E+09
^{14}C	1E+04	1E+07	^{54}Mn	1E+01	1E+06
^{24}N	1E+01	1E+05	^{56}Mn	1E+01	1E+05
^{32}P	1E+03	1E+05	^{52}Fe	1E+01	1E+06
^{33}P	1E+05	1E+08	^{55}Fe	1E+04	1E+06
^{35}S	1E+05	1E+08	^{59}Fe	1E+01	1E+06
^{37}Ar	1E+06	1E+08	^{55}Co	1E+01	1E+06
^{42}K	1E+02	1E+06	^{56}Co	1E+01	1E+05
^{43}K	1E+01	1E+06	^{57}Co	1E+02	1E+06

⁴⁶ Sc	1E+01	1E+06	⁵⁸ Co	1E+01	1E+06
⁴⁷ Sc	1E+02	1E+06	⁶⁰ Co	1E+01	1E+05
⁴⁸ Sc	1E+01	1E+05	⁶¹ Co	1E+02	1E+06
⁴⁵ Ca	1E+04	1E+07	⁵⁹ Ni	1E+04	1E+08
⁴⁷ Ca	1E+01	1E+06	⁶³ Ni	1E+05	1E+08
⁴⁸ V	1E+01	1E+05	⁶⁵ Ni	1E+01	1E+06
⁵¹ Cr	1E+03	1E+07	⁶⁴ Cu	1E+02	1E+06

1.4.4 其他标准

1.4.4.1 NO_x 和 O₃ 排放标准

本项目 NO_x 排放限值执行《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996) 表 2 中氮氧化物无组织排放限值；室内 NO_x 和 O₃ 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 1-6。

表 1-6 NO_x 、 O₃ 排放标准和室内浓度限值

污染物	排放标准	室内浓度限值	
	最高允许排放浓度, mg/m ³	最高容许浓度, mg/m ³	时间加权平均容许浓度, mg/m ³
NO _x	0.12	——	5
O ₃	——	0.3	——

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系统为 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

排入环境的感生放射性气体对人员造成的照射。考虑到拟使用的质子治疗系统为小型一体化设备，其束流损失流强较低，感生放射性气体产生和排放量与传统质子治疗系统相比低 2~3 个量级，且严格按照我国相关法规标准的要求进行机房的辐射屏蔽设计，采用混凝土作为主屏蔽材料，确保机房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。

综上所述，参照（HJ 10.1-2016）的要求，并考虑到设备自身特点及其辐射污染源种类和大小以及同类型设备的环境影响评价，本项目质子治疗系统的电离辐射环境影响评价范围取质子治疗机房四周实体屏蔽墙向外 100m 的范围，如图 1-4 所示。

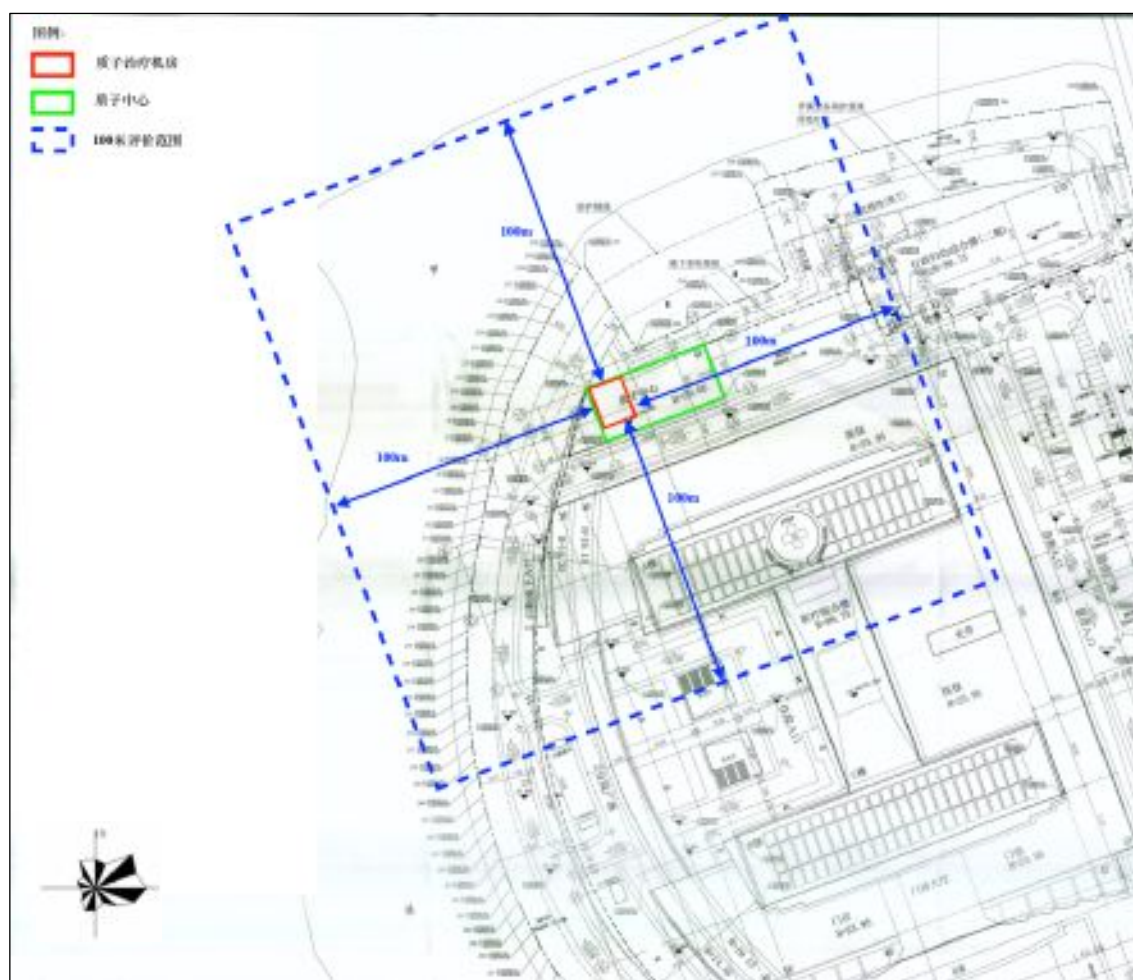


图 1-4 本项目电离辐射评价范围示意图

1.5.2 环境保护目标

本项目质子治疗机房及其配套治疗用房位于医院西北侧质子中心地下一层和地下二层。机房南侧 100m 范围内为质子治疗区的控制室、设备间等辅助用房；东侧 100m 范围内为直线加速器治疗室及其配套用房；西南侧 100m 范围内为后装治疗机房；机房西北侧和北侧为土壤层。机房顶外为院内绿化用地，底板之下为土壤层。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對象，无居民小区、学校等环境敏感点。评价范围内的环境保护目标以本项目相关工作人员、周边相关场所周围其他工作人员以及在相关场所周围活动的公众成员为主，具体列于表 1-7。

表 1-7 本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

场所	方位	周围环境	距离, m	照射类型	规模	照射途径	评价标准
质子治疗机房 (地下二层)	南侧	迷道口(通道)	0~3.5	职业	1~3 人	瞬发辐射	5mSv/a
		楼梯	3.5~6.0	职业、公众	流动人员	瞬发辐射	职业: 5mSv/a; 公众: 0.1mSv/a
		电气设备间	0~3.5	公众	1~3 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
		办公室	6~10	公众	1~3 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
		卫生间	4~10	公众	约 20 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
		地下停车场	10~100	公众	流动人员	瞬发辐射	0.1mSv/a
	东侧	地下土层	紧邻	——	——	——	——
	北侧	地下土层	紧邻	——	——	——	——
	西侧	地下土层	紧邻	——	——	——	——
	下方	地下土层	紧邻	——	——	——	——
质子治疗机房 (地下一层及 检修层)	东侧	直线加速器治疗室及其配套用房	0~65	公众	约 30 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
		备用房间、储藏间等	65~100	公众	约 10 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
	南侧	控制室、迷道口、CT 设备间、设备房、水冷机房、辅助机房	0~6	职业	约 10 人	瞬发辐射	5mSv/a
		通道、模具制作间、模具存放间、储藏间等	6~17	职业、公众	约 10 人	瞬发辐射	职业: 5mSv/a; 公众: 0.1mSv/a
		通道、楼梯、进风机房、加压机房、排烟机房等	17~27	公众	约 10 人	瞬发辐射	0.1mSv/a

		核医学科相关用房	27~55	公众	约 30 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
		餐厅、地下室外广场	55~100	公众	约 100 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
	西侧	后装治疗机房	0~6	公众	约 3 人	瞬发辐射	0.1mSv/a
		地下土层	紧邻	——	——	——	——
	北侧	地下土层	紧邻	——	——	——	——
	上方	院内室外空地	紧邻	公众	约 10 人	瞬发辐射、感生放射性气体	0.1mSv/a
质子治疗机房 (地上部分)	北侧	人行道、车道、绿化带等	0~20	公众	流动人群	感生放射性气体	0.1mSv/a
	东侧	地上停车场	0~65	公众	流动人群	感生放射性气体	0.1mSv/a
		二期工程用地	65~100	公众	流动人群	感生放射性气体	0.1mSv/a
	南侧	院内室外空地	0~50	公众	流动人群	感生放射性气体	0.1mSv/a
		医疗综合楼	50~100	公众	约 300 人	感生放射性气体	0.1mSv/a
	西侧	人行道、车道、绿化带等	0~10	公众	流动人群	感生放射性气体	0.1mSv/a

1.6 安全责任划分

本项目涉及质子治疗系统设备安装调试和维修维护方——迈胜医疗设备有限公司（以下简称迈胜）和童昌医院两方，其各自的安全责任划分如下：

（1）迈胜：主要负责 Mevion S250i 质子治疗系统的销售以及在童昌医院质子治疗机房的整机安装调试、维护维修，但不参与用户单位在质子治疗系统投入临床使用时进行的调试；负责组织装置投入临床使用前的验收；负责对迈胜从事安装调试、维护维修的工作人员以及童昌医院操作质子治疗系统的工作人员进行相关培训。综上，迈胜负责 Mevion S250i 质子治疗系统安装调试、维护维修、投入临床使用前的验收以及系统相关培训过程中的安全责任。

（2）童昌医院：用户单位作为 Mevion S250i 质子治疗系统的使用方，负责质子治疗机房的屏蔽设计和建设；负责提供能够满足我国法规标准要求的辐射工作场所；负责安装调试和维护维修过程中的安全保卫工作；负责质子治疗系统投入临床使用时的安全责任；负责质子治疗系统运行过程中产生的放射性三废的处理。

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

本项目建设地点位于福建省泉州市南安市罗东镇罗溪村。

泉州市位于东经 $117^{\circ} 25'$ - $119^{\circ} 05'$ ，北纬 $24^{\circ} 30'$ - $25^{\circ} 56'$ ，地处福建省东南沿海、台湾海峡西岸，离台湾最近处仅距 97 海里，距金门最近处仅 5.61 海里，东西宽 153 千米，南北长 157 千米，全市土地总面积 11015 平方千米。

南安市位于福建省东南沿海，晋江中游，地理坐标为北纬 $24^{\circ} 34' 30''$ - $25^{\circ} 19' 25''$ ，东经 $118^{\circ} 08' 30''$ - $118^{\circ} 36' 20''$ 。东接鲤城区、丰泽区、洛江区，东南与晋江市毗邻，南部与厦门翔安区的大、小嶝岛及金门县隔海相望，西南与同安区交界，西通安溪县，北连永春县，东北与仙游县接壤。辖区最南为石井镇的大佰岛，最北为向阳乡的洋坪自然村，最东端是洪濑镇的大洋村，最西端是翔云乡的椒岭村，南北最大距离 82 千米，东西最大距离 45 千米，全市面积 2036 平方千米。

罗东镇位于东经 $118^{\circ} 30'$ ，北纬 $26^{\circ} 10'$ ，东接洪梅镇，南邻梅山镇，西毗九都镇，北与乐峰镇交界。全镇辖振兴、罗溪、蔡厝、山坂、埔心、霞山、荆坑、高塘、潭溪、维新、新明、罗东 12 个行政村。

本项目地理位置图和周边关系图见图 1-2 和图 1-3。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地质、地形地貌

南安市所处纬度较低，东南濒临海洋，境内地势西北高、东南低，地形状态由中山、低山渐次过度到丘陵、河谷、平原，形成明显的阶状倾斜。南安市区位于南安市的中南部，周围山脉走向以北西为主，由中生界火山岩、花岗岩构成低丘、台地，海拔高度为 200~400 米，由于河流切割，地形破碎。西溪从西向东横贯中部，

沿溪阶地相当发育，形成串珠状的盆地，台地多属剥蚀性质，有丰厚的红色风化壳，冲刷破发育，盆地大多由积地形成。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)，基地地震基本烈度为 VII 度。

2.2.2 气候特征

南安地处纬度较低，东南濒临海洋，整个地势由西北向东南倾斜，这种纬度位置，海洋位置和地形特点，使南安气候具有以下特点：夏长无酷暑，冬短温暖而少雨，秋温高于春温；雨水充沛，春夏多，秋冬少，属南亚热带季风性湿润气候。

罗东镇系内陆盆地，境内山明水秀，土地肥沃，气候温和，四季常青，年平均温度 20.2℃，年平均降雨量 1400mm，无霜期 350 天。

2.2.3 水文

南安溪涧纵横，流向复杂，水系呈羽状。河流主要属晋江水系及沿海水系。水系的发育受到新华夏系两组活动断裂的控制，主要河流晋江及其干流东、西溪切过构造线，河流流向作北西往南东流经北部和中部，其支流呈北东或南西自四周流入东、西溪。东、西溪在丰州溪州村汇合成金溪，为晋江下游，向东南流经金鸡拦河桥闸于丰州出境，经鲤城区注入泉州湾。该县河道总长 400 千米，形成水源丰富的水系。水资源总量丰水年 25.03 亿立方米，枯水年 9.7 亿立方米，地表水年平均 15.47 亿立方米。多年平均径流深在 600~1200 毫米，径流总趋势和降雨相适应，自西、西北向东南递减，沿海石井、水头为 600~800 毫米，西北山区的东田 900~1200 毫米，蓬华、诗山为 900~1000 毫米，径流主要集中在 4 月、5 月、6 月，丰水年这三个月的径流量占年径流量的 50%左右，4~9 月进入汛期，此时径流量占年径流量的 77%。

2.3 社会环境概况

2.3.1 人口

截至 2020 年 11 月 1 日零时，根据第七次人口普查数据结果，南安市常住人口 1517514 人。罗溪村常住人口为 1108 户 3463 人。

2.3.2 经济发展状况

2017 年，南安市实现地区生产总值（GDP）977.38 亿元，按可比价格计算，比上年增长 8.5%。其中：第一产业增加值 27.78 亿元，增长 3.8%；第二产业增加值 575.36 亿元，增长 7.9%；第三产业增加值 374.25 亿元，增长 9.8%。第二、三产业对 GDP 增长的贡献率分别为 57.6%和 41.1%，分别拉动 GDP 增长 4.9 和 3.5 个百分点。按常住人口计算，人均地区生产总值 65202 元，比上年增长 8.1%。第一产业增加值占地区生产总值的比重为 2.8%，第二产业增加值比重为 58.9%，第三产业增加值比重为 38.3%。

2018 年，南安市实现地区生产总值 1067.82 亿元，同比增长 8.4。

2019 年，南安市地区生产总值 1295.44 亿元、增长 8%，一般公共预算总收入 89.23 亿元、增长 11.6%，一般公共预算收入突破 50 亿元、增长 8.8%。

2020 年，南安市实现地区生产总值 1340 亿元、增长 3.5%，一般公共预算总收入 90.1 亿元、增长 1%，一般公共预算收入 52.7 亿元、增长 5.3%。

2.3.3 文化教育

2019 年南安市拥有幼儿园 259 所，在校学生 73202 人；普通小学 283 所，在校学生 134273 人；拥有普通中学 66 所，在校学生 68247 人；拥有职业中专 5 所，在校学生 8952 人。2019 年幼儿园新生 24483 人；小学新生 25557 人；初一新生 16366 人；高一新生 7406 人；中职新生 3605 人。

截止 2019 年底，南安市已规划建设至第十三小学，新（改、扩）建幼儿园 6 所、中小学 14 所，新增幼儿园学位 1800 个、中小学学位 5130 个。

2.3.4 医疗

2019 年南安市共有医疗机构 1063 个，病床数 6144 张，医院、卫生院卫生技术人员 2442 人。2019 年 5 岁以下儿童死亡率 3.46‰，婴儿死亡率 2.13‰，产妇住院分娩比率 100%，乡镇卫生院覆盖率为 100%。

2.4 环境质量和辐射现状

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 8。

2.4.1 环境天然放射性水平

根据《福建省环境天然贯穿辐射水平调查》（福建省环境监测中心站，1991 年），泉州市环境天然 γ 辐射剂量率列于表 2-1。

表 2-1 泉州市环境天然 γ 辐射剂量率（nGy/h）

监测区域	范围	平均值	标准差
原野	25.9~107.0	63.2	19.4
道路	40.2~102.3	74.7	17.4
室内	96.6~193.4	136.6	31.2

注：测量值扣除宇宙射线。

2.4.2 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贯穿辐射和土壤。此外，考虑到本项目排放的放射性废气中主要放射性核素均为短半衰期核素（半衰期在 2min~1.8h 之间），取样分析具有一定的困难，因此本次辐射环境现状调查未对大气进行取样分析。辐射环境现状监测对象和监测项目列于表 2-2。

质子治疗系统运行期间的辐射场为中子和 γ 辐射混合场，因此贯穿辐射监测内容包括 γ 辐射剂量率和中子剂量当量率。

质子治疗系统运行期间，贯穿质子治疗机房地板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，土壤活化的主要核素考虑 ^7Be 、 ^{22}Na ，因此本次辐射环境现状调查中，对土壤中相关核素的活度浓度进行分析。此外，考虑到总 α 、总 β 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中总 α 、总 β 的活度浓度也进行了分析。

表 2-2 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
1	贯穿辐射	γ 辐射剂量率
		中子剂量当量率
2	土壤	^7Be 、 ^{22}Na 、总 α 、总 β 活度浓度

2.4.3 监测/取样点位

γ 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、厂界外均设置了监测点位，能够反映拟建场址及周围邻近环境的辐射环境背景水平。因此，监测点位布设是合理的。

土壤取样点位见图 2-1。取土壤样品时，根据现场条件，在童昌医院质子中心北侧、南侧、西侧和东侧分别取样，每个点位取土样约 3kg，取样时去除石头、树枝等杂质。



图 2-1 监测布点图

2.4.4 监测设备和监测方法

2.4.4.1 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-3。现场监测和取样时间为 2020 年 8 月 21 日，土壤样品实验室分析时间为 2020 年 9 月~11 月，监测、分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

表 2-3 仪器设备及性能指标

仪器名称及型号	仪器型号	检定有效期	主要技术性能指标
辐射测量仪	FH40G-X+FHZ672 E-10	2022.1.21	测量范围：10nGy/h~100μGy/h； 能量范围：48keV~6MeV； 相对响应之差：<±15%。
中子周围剂量当量仪	LB123+LB6411	2022.1.17	测量范围：50nSv/h~100mSv/h； 能量范围：热中子~20MeV。
高纯锗 γ 能谱仪	BE6530	2023.5.29	分辨力：2.18keV； 短期稳定性：0.02%； 活度：0.47%。
高纯锗 γ 能谱仪	GEM-S7030-LB-C	2021.9.10	分辨力：1.77keV； 短期稳定性：0.02%； 活度：0.03%。
四路低本底 α/β 测量仪	BH1227	2023.5.29	对于 ^{90}Sr - ^{90}Y β 源（活性区 Φ20mm）2π 效率比≥65%时，本底≤0.1cm ⁻² min ⁻¹ ； 对于 ^{239}Pu α 源（活性区 Φ30mm）2π 效率比≥85%时，本底≤0.005cm ⁻² min ⁻¹ ； α/β 交叉性能：α 进入 β 道的计数比≤1.5%（对 ^{239}Pu ）；β 进入 α 道的计数比≤0.2%（对于 ^{90}Sr - ^{90}Y ）； 效率稳定性：仪器通电 8h，各路探测效率变化<±5%； 本底稳定性：仪器通电 8h，本底计数率变化应在（nb±3σ）范围内。

2.4.4.2 监测方法

监测方法见下表 2-4。

表 2-4 监测方法

序号	监测对象	监测方法	标准依据
1	γ 辐射剂量率、中子剂量当量率	采用便携式监测仪表，以定点的测量方式进行。监测时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 10 次，每次间隔 5 秒钟，取平均值。	《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）
2	土壤中 ^7Be 、 ^{22}Na 、总 α 、总 β 活度浓度	分别在指定的点位采集样品，使用土壤采集器，在 $10\times 10\text{ m}^2$ 范围内，采用梅花五点法采集。条件不具备时用蛇型布样采集。每点采 $10\times 10\text{ cm}^2$ 的表层土样 1~5 cm，在现场充分混合，去除石头、草根等杂物后取 1kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。采集的样品主要为表层土壤，每个样品的采样量一般为 3 kg。 样品送实验室预处理后，采用高纯锗 γ 谱仪进行 ^7Be 、 ^{22}Na 活度浓度测量，采用低本底 $\alpha\beta$ 测量仪进行活度浓度测量进行总 α 总 β 活度浓度。	《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》（GB/T11713-2015）； 《水质 总 α 放射性的测定 厚源法》（HJ898-2017）； 《水质 总 β 放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）。

2.4.5 质量保证措施

- （1）监测单位具备所监测项目的资质；
- （2）合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性；
- （3）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。

2.4.6 监测结果

2.4.6.1 贯穿辐射

本项目拟建场址及周围环境 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果列于表 2-5。

表 2-5 拟建场地及周围环境 γ 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	经度	纬度	地貌	γ 辐射剂量率 ¹ (nGy/h)	中子周围剂量当量率 ³ (μ Sv/h)
1	拟建机房中心	E 118.466735	N 25.143903	水泥	103.0 $\pm$ 0.7	<LLD _n
2	拟建机房南侧	E 118.466630	N 25.143789	土地	109.7 $\pm$ 3.7	<LLD _n
3	拟建机房东侧	E 118.466775	N 25.143922	水泥	99.7 $\pm$ 1.4	<LLD _n
4	拟建机房北侧	E 118.466677	N 25.144168	土地	114.4 $\pm$ 1.0	<LLD _n
5	拟建机房西侧	E 118.466564	N 25.143966	土地	121.0 $\pm$ 1.8	<LLD _n
6	评价范围网格点	E 118.466542	N 25.144435	水泥	98.6 $\pm$ 0.6	<LLD _n
7	评价范围网格点	E 118.466973	N 25.144506	土路	125.9 $\pm$ 2.4	<LLD _n
8	评价范围网格点	E 118.467504	N 25.144729	土路	109.1 $\pm$ 2.8	<LLD _n
9	评价范围网格点	E 118.467845	N 25.144255	土路	118.0 $\pm$ 1.2	<LLD _n
10	评价范围网格点	E 118.467997	N 25.143858	石地	145.7 $\pm$ 5.4	<LLD _n
11	评价范围网格点	E 118.468193	N 25.143439	土地	108.4 $\pm$ 2.0	<LLD _n
12	评价范围网格点	E 118.467836	N 25.143215	水泥路	100.4 $\pm$ 2.4	<LLD _n
13	医疗综合楼内	/	/	建筑内部	165.5 $\pm$ 2.5	<LLD _n
14	评价范围网格点	E 118.467286	N 25.143067	土地	128.6 $\pm$ 3.5	<LLD _n
15	评价范围网格点	E 118.466904	N 25.142917	水泥	125.7 $\pm$ 1.3	<LLD _n
16	评价范围网格点	E 118.466723	N 25.143532	土地	131.1 $\pm$ 1.5	<LLD _n
17	评价范围网格点	E 118.466961	N 25.143649	碎石	162.3 $\pm$ 4.5	<LLD _n
18	评价范围网格点	E 118.467468	N 25.143731	水泥	112.0 $\pm$ 1.1	<LLD _n
19	评价范围网格点	E 118.467366	N 25.144177	土地	116.7 $\pm$ 3.3	<LLD _n
20	评价范围网格点	E 118.466429	N 25.143873	土地	131.9 $\pm$ 2.7	<LLD _n
21	评价范围网格点	E 118.466296	N 25.143400	土地	110.0 $\pm$ 0.8	<LLD _n
22	评价范围网格点	E 118.466228	N 25.143004	土地	142.4 $\pm$ 1.5	<LLD _n

23	医院东北角	E 118.468760	N 25.144671	水泥	128.3±8.4	<LLD _n
24	医院东北门	E 118.468912	N 25.144274	水泥	131.6±2.0	<LLD _n
25	幼儿园门口	E 118.469118	N 25.143968	水泥	119.7±3.6	<LLD _n
26	医院东门	E 118.469216	N 25.143460	水泥	126.1±1.3	<LLD _n
27	医院东门南侧	E 118.469627	N 25.142580	水泥	138.5±3.6	<LLD _n
28	医院南门东侧	E 118.469400	N 25.141851	柏油路	137.3±1.3	<LLD _n
29	医院南门	E 118.468749	N 25.141713	柏油路	132.0±0.9	<LLD _n
30	医院南门西侧	E 118.468067	N 25.141482	柏油路	122.3±4.0	<LLD _n

注：1. 监测结果含宇宙射线响应值；
2. 评价范围网格点位置分布详见图 2-1；
3. LLD_n=0.05μSv/h。

由监测结果可知，本项目拟建场址及周围 γ 辐射剂量率水平在（98.6~162.3）nGy/h 范围内（含仪表对宇宙射线的响应值），中子周围剂量当量率均小于仪表探测限。扣除宇宙射线响应后，未超过泉州市环境天然 γ 辐射剂量率的范围。

2.4.6.2 土壤

童昌医院院内土壤样品中总 α、总 β 的活度浓度以及核素分析测量结果见表 2-6。

表 2-6 土壤样品中总 α、总 β 活度浓度及核素分析结果，Bq/kg

取样点位	取样点	测量项目	活度浓度（Bq/ kg ）
1	拟建质子机房中间	总 α	(4.54±0.59)E+02
		总 β	(1.03±0.04)E+03
		⁷ Be	≤LD=4.7
		²² Na	≤LD=3.4E-01
2	拟建质子机房南侧	总 α	(4.47±0.67)E+02
		总 β	(9.24±0.33)E+02
		⁷ Be	≤LD=3.7
		²² Na	≤LD=3.5E-01
3	拟建质子机房东侧	总 α	(6.44±0.62)E+02
		总 β	(9.42±0.33)E+02
		⁷ Be	≤LD=2.6

		^{22}Na	$\leq \text{LD}=2.5\text{E}-01$
4	拟建质子机房北侧	总 α	$(5.97\pm 0.81)\text{E}+02$
		总 β	$(1.04\pm 0.03)\text{E}+03$
		^7Be	$\leq \text{LD}=3.8$
		^{22}Na	$\leq \text{LD}=3.3\text{E}-01$
5	拟建质子机房西侧	总 α	$(4.63\pm 0.76)\text{E}+02$
		总 β	$(1.26\pm 0.04)\text{E}+03$
		^7Be	$\leq \text{LD}=4.8$
		^{22}Na	$\leq \text{LD}=3.6\text{E}-01$

注：LD 为仪器探测限。

根据监测结果，童昌医院院区内土壤中总 α 活度浓度在 $(4.47\sim 6.44)\text{E}+02\text{Bq/kg}$ 范围内，总 β 活度浓度在 $(0.92\sim 1.26)\text{E}+03\text{Bq/kg}$ 范围内， γ 放射性核素 ^7Be 和 ^{22}Na 均小于探测限。

2.5 场址适宜性分析

本项目拟建于童昌医院院区内，该地块规划用地性质为医疗卫生用地，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。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。

质子治疗机房为全地下设计，机房北侧、西侧 100m 范围内主要为地下土层；东、南侧 100m 均位于医院内部。由此可见，项目周边环境项目简单，电离辐射评价范围基本位于医院内，评价范围内无居民区、学校等敏感目标，条件较好。

综上所述，本项目质子治疗机房及其配套用房均建于地下，机房周边 100m 范围内为土层、地下车库及医院院内工作区域等。避开了人群集中点，选址周围无限制性因素，本项目选址合理。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

本项目拟在医院西北侧质子中心内建设一间质子治疗机房及其配套设备间、排风机房等辅助用房以及医护办公室、治疗计划室、诊室等配套治疗用房。质子治疗机房为全地下建筑，内部共三层。质子中心总建筑面积约 4500m²。质子治疗机房各层平面布局和剖面图见附图 2~附图 8。

本项目拟使用射线装置的主要参数列于表 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/等中心点输出剂量率/ 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	MEVION S250i	能量：50~230MeV； 配套 X 射线管： 150kV/1000mA	待定	1	I	质子治疗机房

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 质子治疗系统概况

3.2.1.1 装置组成

本项目拟使用 1 套迈胜（美国）生产的 Mevion S250i 质子治疗系统，该质子治疗系统是集成化的单室质子治疗系统，主要由束流发生系统、束流传输系统、患者定位系统和控制系统组成。束流发生系统是一台超导同步质子回旋加速器，加速器安装在可 190°旋转的机架上。束流传输系统包含束流射程调节系统、治疗头和一个可 190°旋转的机架。加速器产生的束流加速至 230MeV 后引出，经束流传输系统调节，根据实际治疗时患者肿瘤的深度和厚度，在输出端可得到 50~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。装置结构组成示意图如图 3-1~图 3-3 所示。其主要技术指标列于表 3-2。

表 3-2 Mevion S250i 质子治疗系统主要技术指标

指标	数值/方案
加速器主体	超导同步质子回旋加速器
引出能量	230 MeV
治疗能量范围	50MeV ~230 MeV
治疗时引出流强	0~3.05nA
输出剂量率	$\geq 2 \text{ Gy} / \text{min} / \text{liter}$
射程范围	0.8 g /cm ² - 32.2 g/cm ²
照射野范围	20.0 ×20.0 cm ²
加速器射频频率	94 MHz ~129 MHz.
加速器射频功率	20kW
机架旋转范围	190° (-5°~185°)
预计使用寿命	20 年

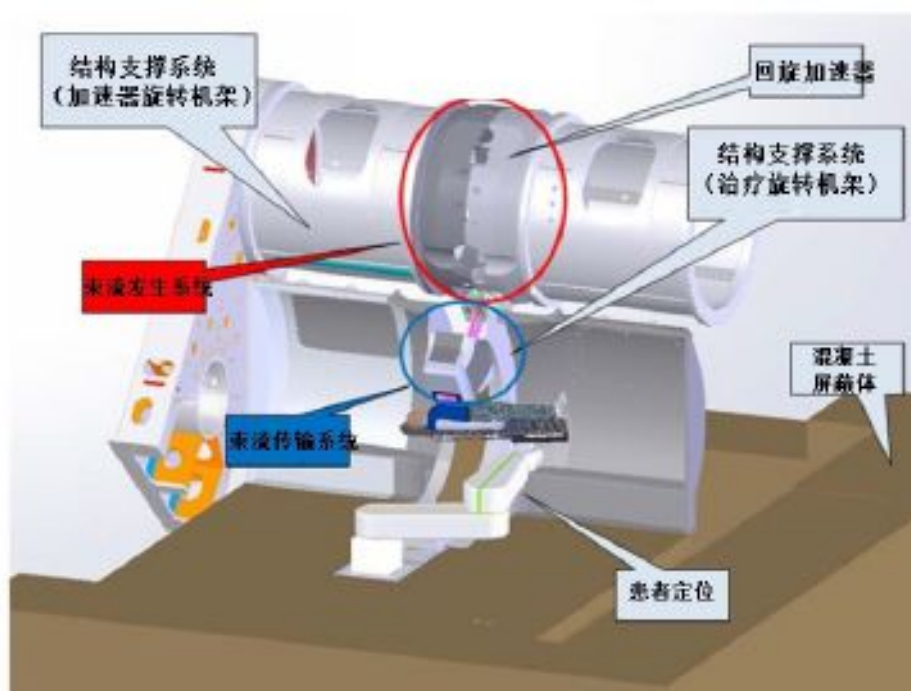


图 3-1 Mevion S250i 质子治疗系统结构示意图

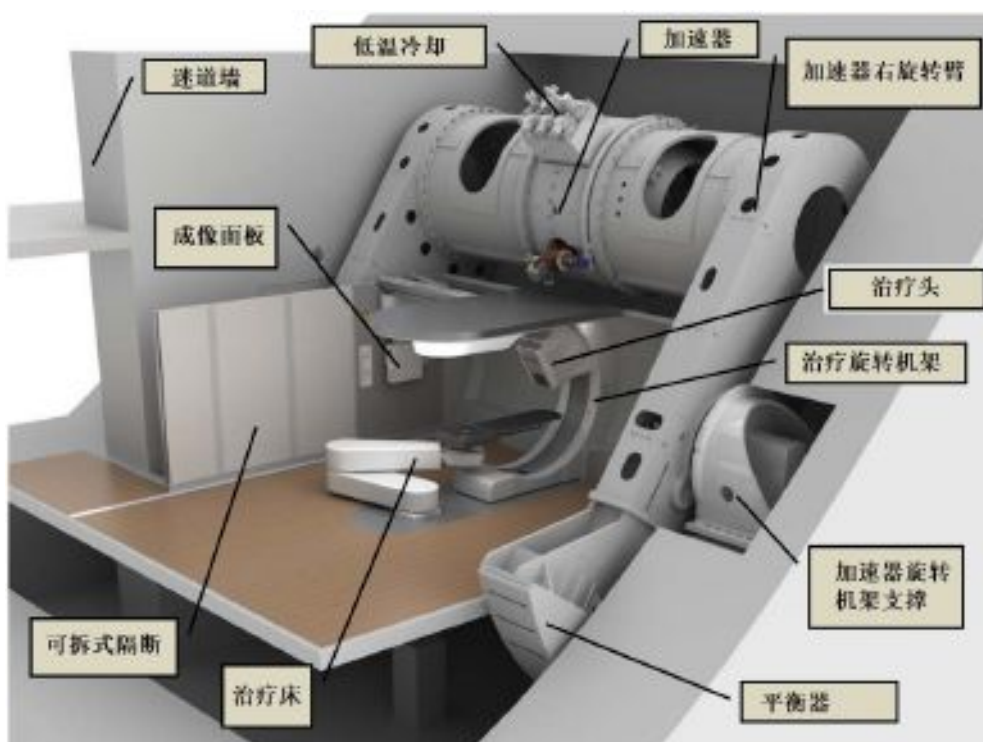


图 3-2 Mevion S250i 质子治疗系统结构组成示意图

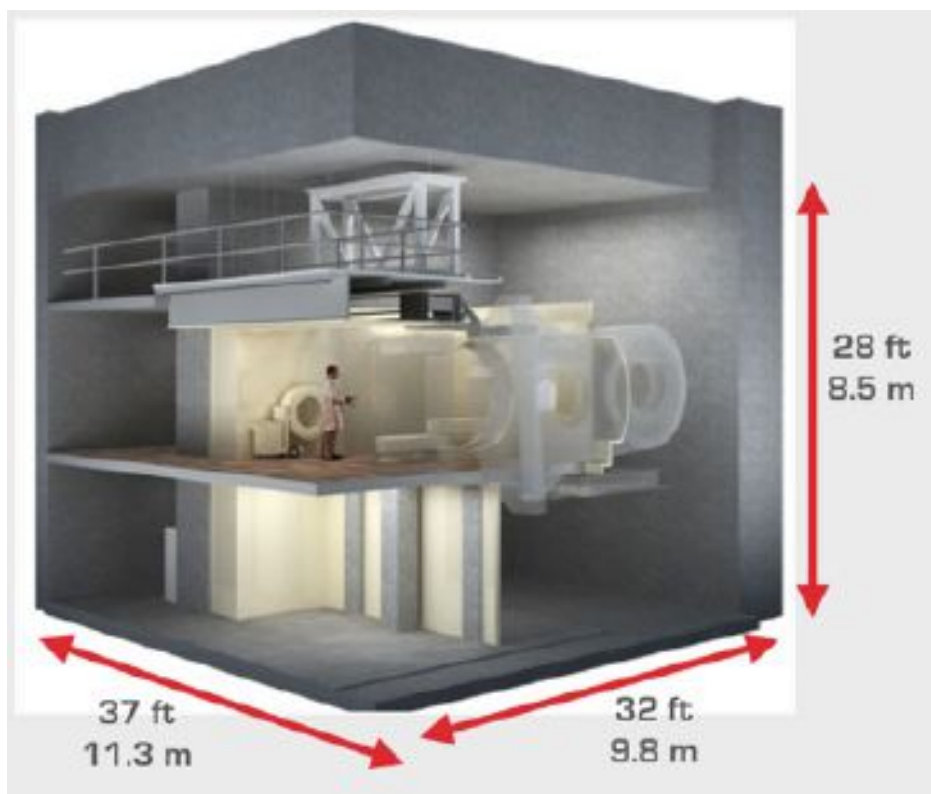


图 3-3 Mevion S250i 质子治疗系统效果图

Mevion S250i 质子治疗机房内部为全地下三层结构，包括工作区（图 3-4 中绿色区域）和机架运动区两部分（图 3-4 中红色区域）。其中机架运动区为上、中、下三层贯通，主要为回旋加速器、旋转机架、治疗头的等设备所在区域，供旋转机架自上而下进行 190° 旋转使用。工作区为三层，其中：

- （1）顶层为检修层，设有钢检修平台，主要用于回旋加速器、旋转机架以及束流传输系统等结构部件的维护维修；
- （2）中间层为治疗层，主要为医生工作和患者治疗区域；
- （3）底层为设备层，主要放置射频发射机、系统控制柜、电源机柜、冷却水机组等设备。

顶层与中间层之间通过 20cm 厚混凝土和钢格栅平台间隔，中间层和底层之间通过 20cm 厚的混凝土间隔。

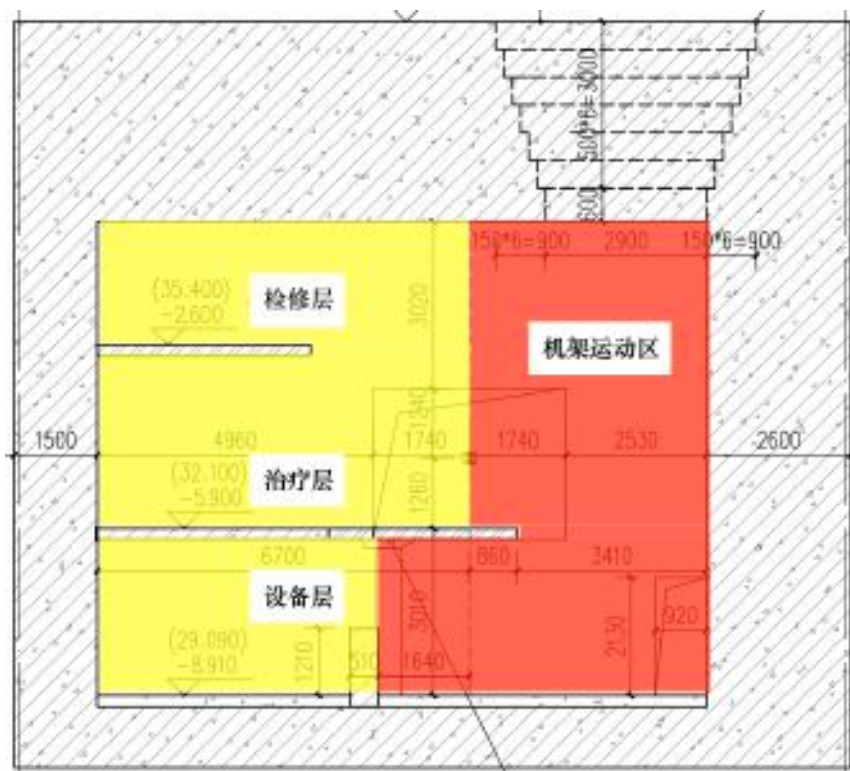


图 3-4 Mevion S250i 质子治疗机房剖面示意图

3.2.1.2 工作原理

3.2.1.2.1 束流发生系统

束流发生系统是 Mevion S250i 质子治疗系统的核心部件，主要由一台超导同步质子回旋加速器及其结构支撑旋转机架组成，回旋加速器安装于旋转机架上，如图 3-5 所示。回旋加速器由磁铁、离子源、射频系统、束流引出系统和真空系统组成。两个离子源经两个磁极插入加速器，在加速器内将氢气进行游离，成为氢离子，即一个带正电的质子。在两个实心磁极中间安装有两个 D 形真空盒，盒内抽真空。质子在 D 形盒内旋转，每次通过 D 形真空盒间隙时，因间隙上的高频电压而获得加速，能量增加，旋转半径也随之增加。当质子多次通过高频间隙，能量不断增加，一直加速到最高能量 230MeV 时也对应旋转到最外面一圈，再利用磁和电偏转将质子束从加速器引出。同步回旋加速器与普通等时回旋加速器的区别在于采用了调频技术，即在质子加速的过程中，加速电场的射频频率随质子回旋的频率同步下

降，以保持谐振加速。而普通等时回旋加速器不改变电场射频频率，仅改变磁场大小。

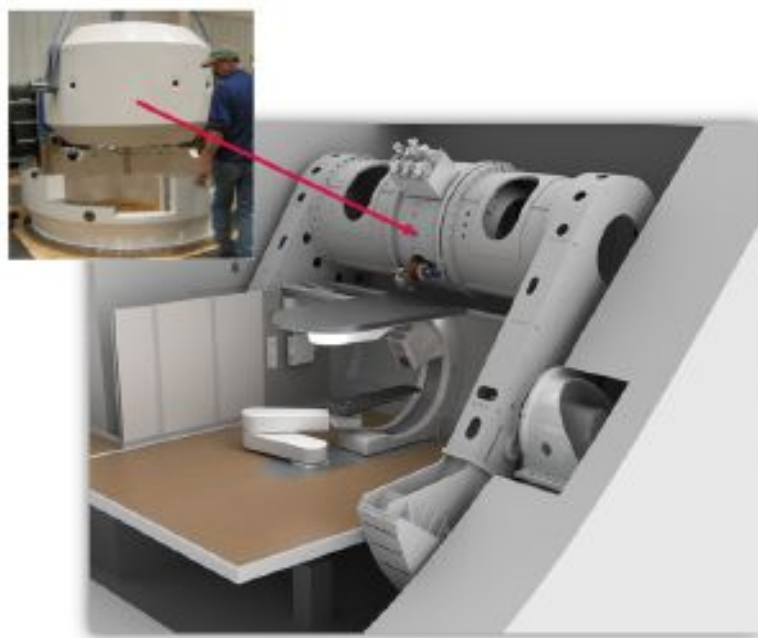


图 3-5 同步质子回旋加速器位置示意图

3.2.1.2.2 束流传输系统

束流传输系统包括束流射程调节系统、治疗头和一个 190°旋转机架，如图 3-6 所示。

质子治疗时要根据肿瘤本身深度和厚度选用不同能量的质子，由于回旋加速器引出的质子能量是固定的，因此在回旋加速器和治疗头之间设有一个束流射程调节系统，该系统主要由扫描磁体、射程调节器、自适应准直器组成。其中，扫描磁铁用于进行对束流进行线性扫描，X\Y 方向进行控制。射程调节器由一组间隔紧密不同厚度的聚碳酸酯平板组成，如图 3-8 所示。聚碳酸酯具有耐久性、低散射效率和高传输效率等特点，利用精密电机控制其在束流方向上垂直移动，快速改变束流能量，层切换时间低于 50ms，束流射程调节范围为 0.8~32.2g/cm²。自适应准直器用于修整单个束流斑点的大小，由一组 14 片镍质叶片组成，如图 3-9 所示。位于整个射程调节系统的后端，使得其与目标体积之间的距离最小化，从而保留锐利的横向侧半影。

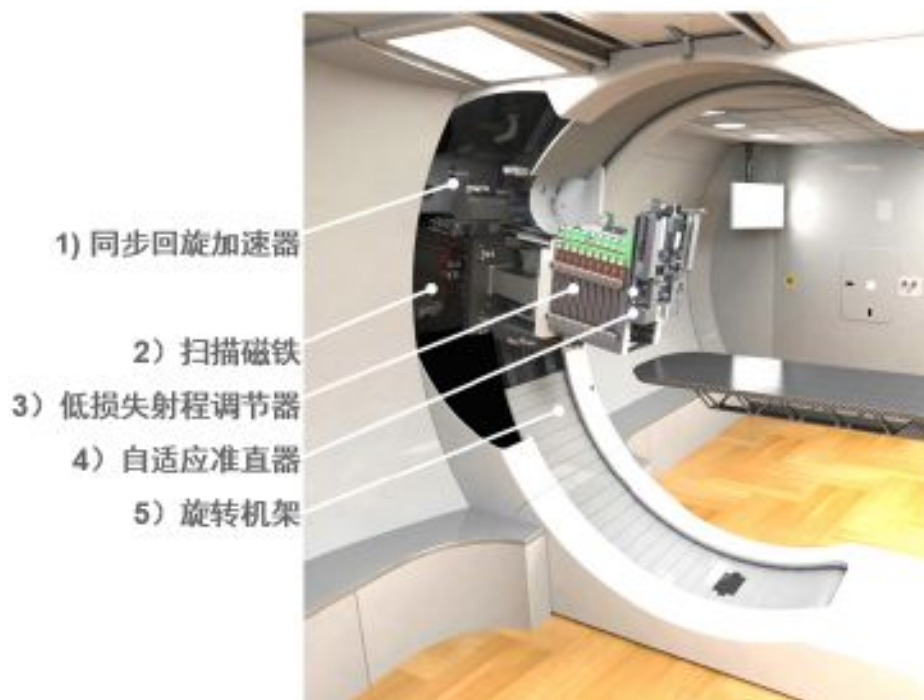


图 3-6 束流传输系统结构示意图

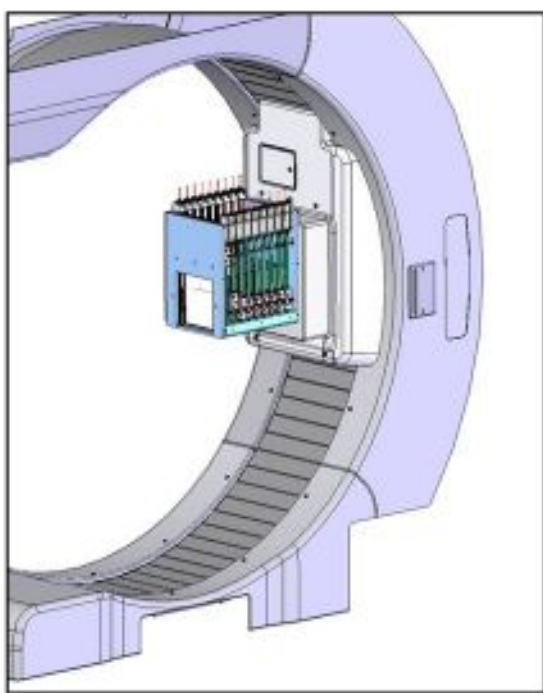


图 3-7 射程调节器示意图



图 3-8 自适应准直器示意图

3.2.1.2.3 患者定位系统

患者定位系统为患者治疗提供物理支撑，并允许基于在治疗之前获得的图像

将患者移动到适当的位置进行治疗。主要包括六自由度治疗床和 2D/3D 成像系统。患者定位系统基于在治疗室中获取的 2D 双正交 X 射线或 3D CT 图像与为治疗计划获取的图像的进行比较来帮助临床医生确定患者在治疗室中的正确位置。

2D 双正交 X 射线成像系统由 X 射线源、X 射线面板组件组成。每套质子治疗系统配备两个 X 射线管，用于从不同角度对患者进行定位，分别位于地下和右侧墙，如图 3-9 所示。每个 X 射线管的最大管电压 150kV，最大管电流为 1000mA。由高压发生器提供高压电源到 X 射线管上，X 射线管发出 X 射线到接收器上形成图像，最后在治疗控制系统内进行图像处理，使其满足放疗中图像使用的要求。医生可以通过自动或手动调整两个正交图像集的配准来计算精确对准患者进行治疗所需的治疗床位置的调整位移。

3D CT 成像系统包括一台移动 CT 机和光学跟踪系统，通过 3D 成像提供患者定位，用于对患者进行治疗前的精准定位。CT 机的最大管电压为 140kV，最大管电流为 660mA，与 2D 系统类似，室内 3D 图像被传输到治疗控制系统进行处理。

X 射线管和移动 CT 的操作台位于质子治疗机房负二层治疗层内的 CT 控制室，如图 3-10 所示。CT 控制室的位置避开了束流直接照射的方向，控制室南侧和东侧屏蔽体采用厚度 2.5mm 铅当量的铅板或混凝土，南侧屏蔽体上设观察窗，采用厚度 2.5mm 铅当量的铅玻璃。

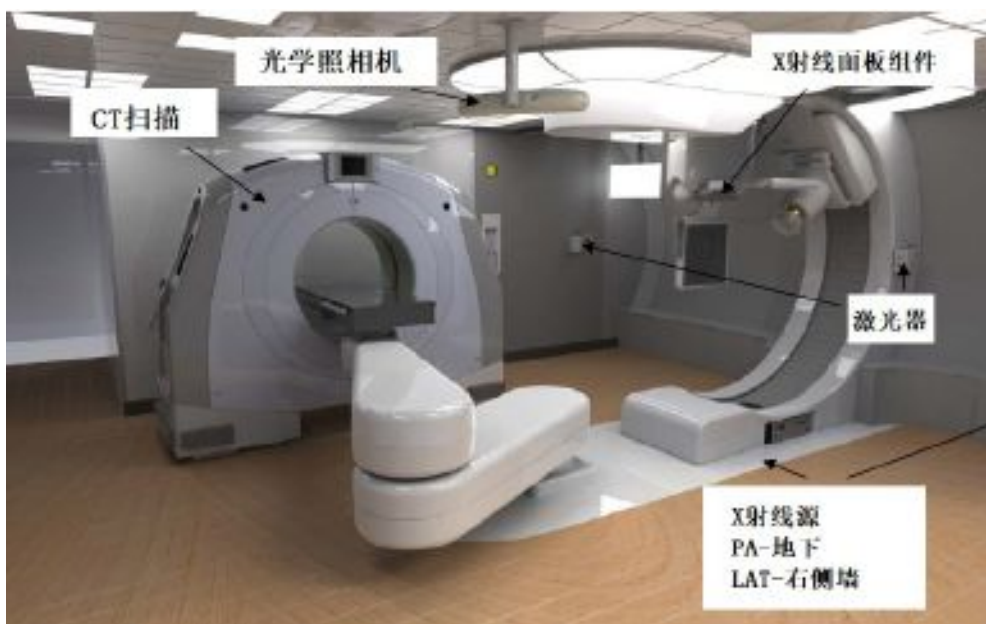


图 3-9 患者定位系统结构组成图

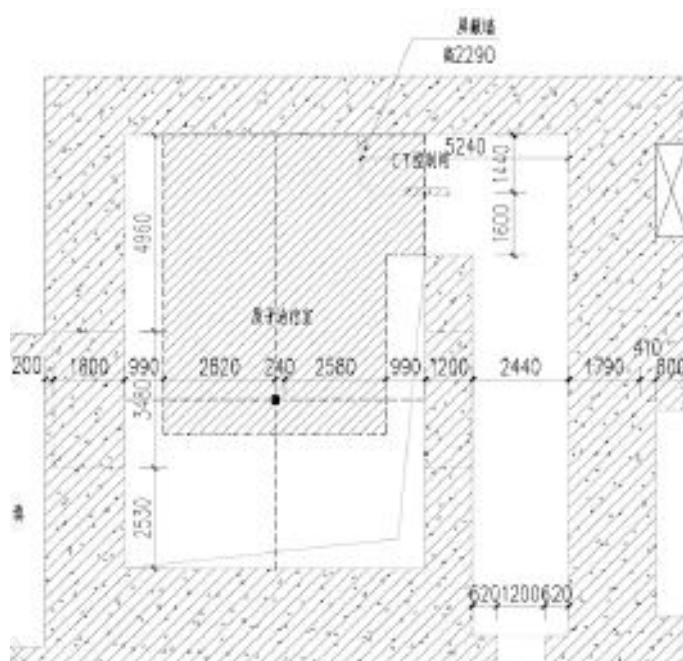


图 3-10 质子治疗机房内 CT 控制室及其屏蔽设计示意图

3.2.1.2.4 控制系统

控制系统使用通信接口控制和协调设备的所有子系统的操作和操作状态。能够提供用户界面以及控制元素，使物理师能够（从外部信息系统）导入并安全地管理预期的治疗计划。

3.2.1.3 治疗流程

质子治疗系统治疗流程如图 3-11 所示。

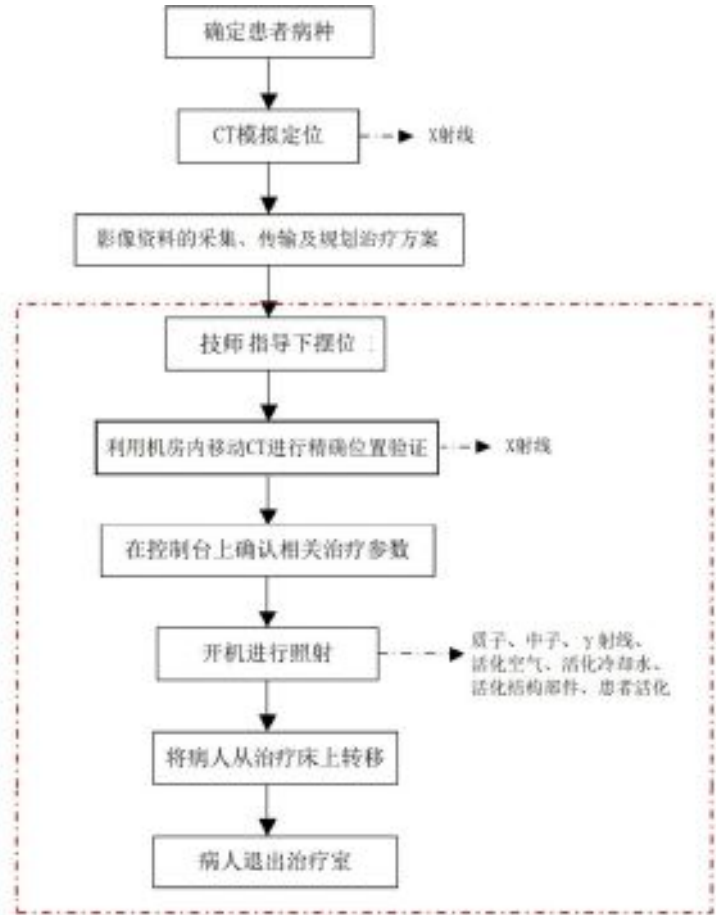


图 3-11 质子治疗系统治疗流程

(1) 患者经专家医师会诊，判断其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、技师联合讨论，制定治疗预案，并预约登记模拟定位时间和治疗时间；

(2) 治疗前模拟定位：对于首次预约质子治疗的患者，需要利用模拟定位 CT 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。该环节在负一层模拟定位 CT 机房内进行，主要由模拟定位 CT 的技师进行操作。该环节主要的辐射污染源为模拟定位 CT 机开机出束产生的 X 射线。

(3) 制定治疗计划：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，通过剂量计算制定出各种剂量分布图；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，最终确定一个完整的治疗计划方案。该环节在负二层东侧治疗计划室内进行，由科室医生和物理师进行操作。该环节在治疗计划系统上完成，不会开机出束。

(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，再实测其治疗参数，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。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室控制室内出束照射，一次时间约为 20min。每次计划验证由 2 名物理师共同完成，共 5 名物理师轮班。该环节主要的辐射污染源为质子治疗系统开机出束产生的中子、 γ 瞬发辐射和感生放射性空气。

(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，根据治疗计划在治疗室内进行摆位，并使用治疗室内患者定位系统进行精确的位置验证。该环节由治疗技师进行全程操作，其中，治疗前摆位约需 5min，在机房负一层治疗层进行。精确位置验证在质子治疗机房负一层治疗层的 CT 控制室内进行，约需 5min。整个摆位过程约需 10min。每班次 4 名治疗技师共同工作，共 8 名技师轮班。该环节主要的辐射污染源是 X 射线管或移动 CT 机出束期间产生的 X 射线。

(6) 照射治疗。摆位验证完成后，技师离开治疗机房进行控制室内，确定所有的安全联锁建立后，启动质子束流进行出束治疗。每个患者治疗出束时间约为 4min。该环节在负二层控制室内进行，由治疗技师全程操作，每班次 4 名治疗技师共同工作，共 8 名技师轮班。该环节主要的辐射污染源为质子治疗系统开机出束期间产生的中子、 γ 瞬发辐射和感生放射性空气。

(7) 治疗结束后解除摆位。患者治疗结束后，治疗技师进入治疗机房内，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时会产生感生放射性。因此，该环节主要的辐射污染源为患者感生放射性，影响对象为与其近距离接触的治疗技师。

3.3 辐射污染源项分析

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，主要为装置运行期间产生的“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终端的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、机房内空气等被主束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，如磁铁、射程调节器、准直器等物质上，会与部件材料中的原子核发生核反应，

MEVION S250i 质子治疗系统从回旋加速器引出的质子能量为 230MeV，治疗终端输出的能量在 50MeV~230MeV 范围内。该能区的质子与物质的相互作用，以原子的电离和激发过程为主，同时穿过原子核的库仑势垒，进原子核内部，发生核内级联，通过 (p, n) 、 (p, pn) 、 $(p, 2n)$ 、 (p, α) 、 (p, γ) 等核反应产生瞬发中子、 γ 和其他粒子。

在产生的次级粒子中，带电粒子因电离作用迅速停止，因此打靶产生的辐射场组成主要为次级中子和 γ 。其次级中子能量由高到低可分为热中子、蒸发中子和级

联中子三部分。在屏蔽墙体的作用下，初始的热中子、蒸发中子和 γ 的数量迅速减少，不能穿透深屏蔽，级联中子成为穿透屏蔽墙的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽体的过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数量，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过 (n, γ) 反应等转变成了 γ 光子，使得达到一定屏蔽深度后，中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变，形成“平衡谱”，最终在屏蔽墙体内、外的瞬发辐射场都为中子、 γ 的混合辐射场。

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

3.3.1.1.2 辐射场源项估算

3.3.1.1.2.1 FLUKA 程序

本次评价中，在对辐射场源项进行估算时，主要采用 FLUKA 程序，通过该程序模拟质子与不同材质的靶体作用的中子能谱分布。

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 10-5eV 到 20TeV，光子能量范围从 100eV 到 10000TeV，电子从 1keV 到 1000TeV，带电荷粒子及其反粒子为 1keV 到 20TeV，重离子为 <1000TeV/n。该程序还可以传输偏振光子（如同步辐射）和光学光子，在线进行不稳定剩余核辐射的时间演化和跟踪。FLUKA 还可以处理非常复杂的几何图形，能正确跟踪带电粒子，还提供各种可视化和调试工具。

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

3.3.1.1.2.2中子能谱

根据对质子治疗系统瞬时辐射场的分析结果，其瞬发辐射场起决定性作用的是中子。中子产额、能谱和角分布与质子的能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。利用 FLUKA 程序模拟了 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的辐射场，如图 3-12 和图 3-13 所示。由此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，这所示因为水中只有 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。

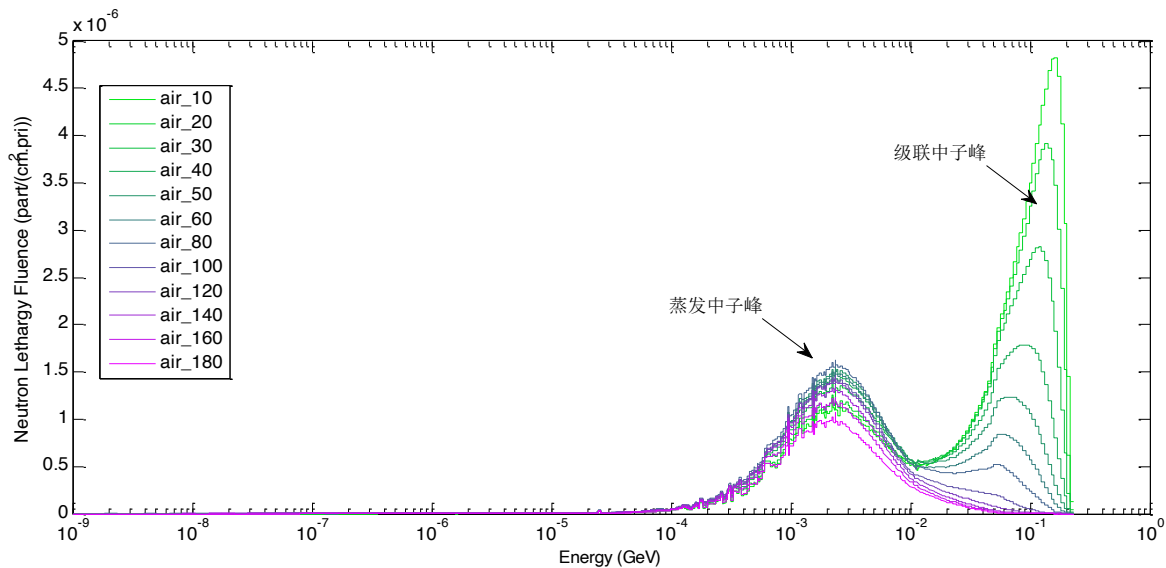


图 3-12 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布

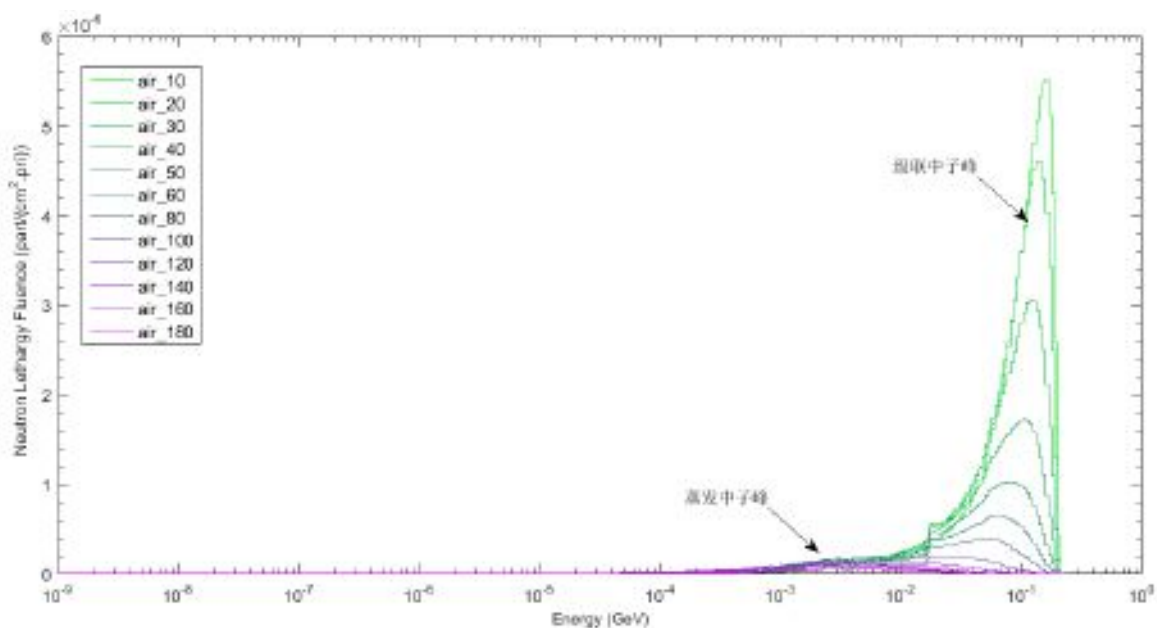


图 3-13 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布

3.3.1.1.2.3 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。

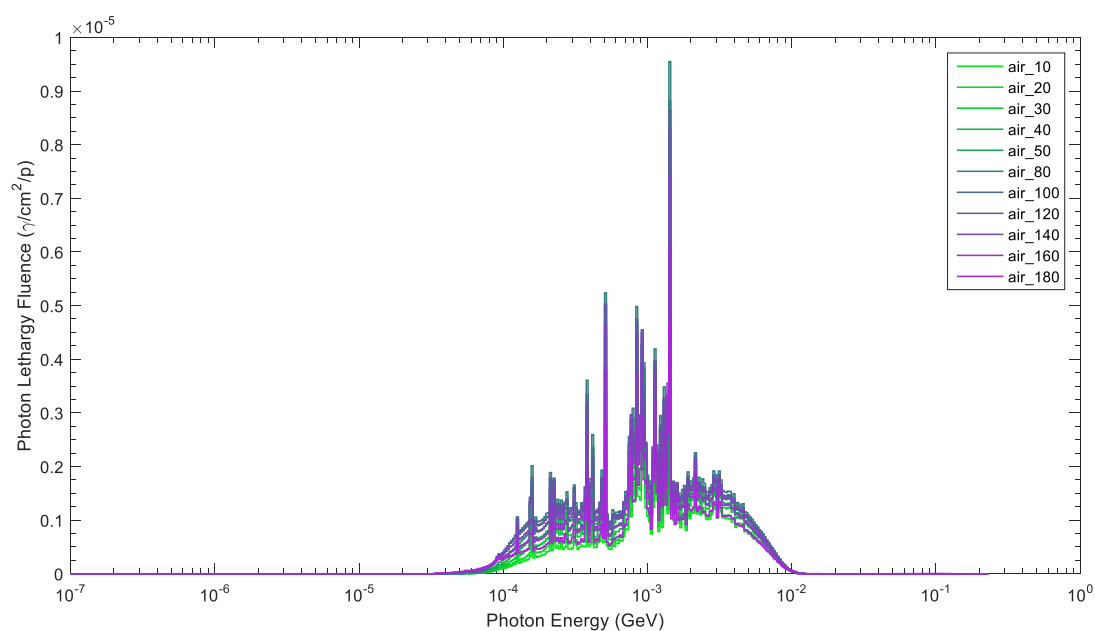


图 3-14 230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

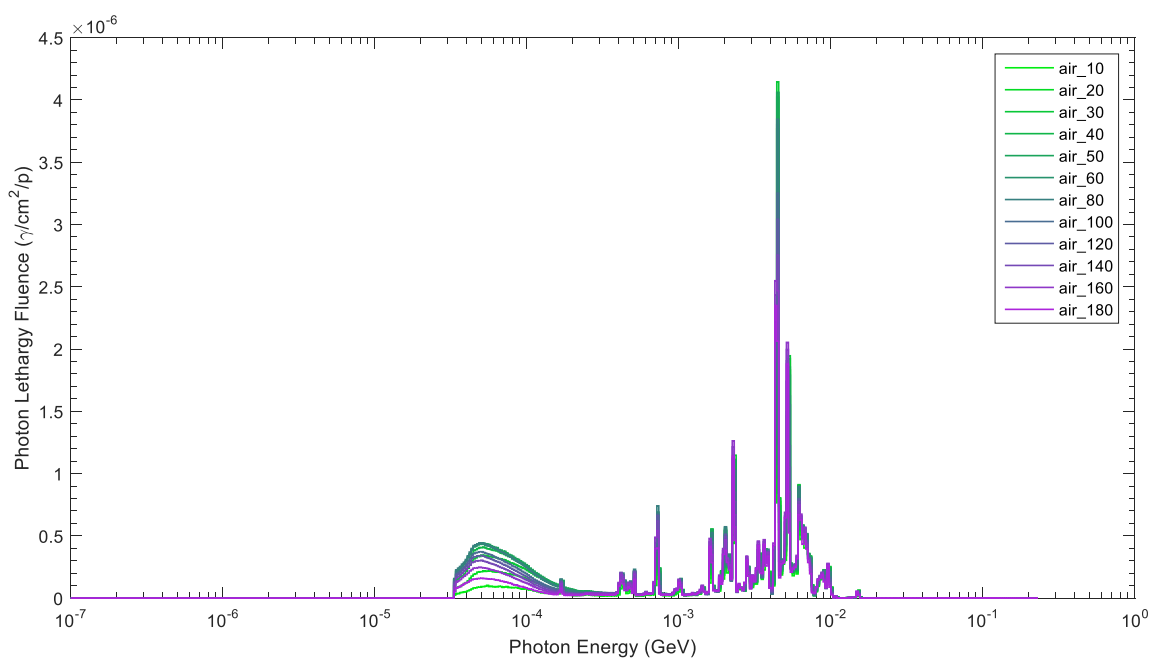


图 3-15 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

3.3.1.1.3 各环节束流损失分析

根据建设单位提供的资料，Mevion S250i 质子治疗系统主要的束流损失点位分布在回旋加速器、射程调节器、自适应准直器、以及治疗室患者终端。本次评价给出了治疗终端输出能量分别为最高能量（230MeV）和治疗时常用最低能量（70MeV）的情况下，各束流损失点的束流损失情况，见表 3-3 和表 3-4。

表 3-3 治疗终端输出能量为 230MeV 时的束流损失表

损失部位	能量，MeV	束流强度，nA	损失流强，nA	靶材料	损失方式
回旋加速器内部	230	2.25	0.75	Fe	均匀损失
束流到射程调节器	230	1.5	<0.1	空气	均匀损失
射程调节器	230	1.4	0.0	聚碳酸酯 (C, H, O)	集中损失
自适应准直器	230	1.4	0.2	Ni	集中损失
患者	230	1.2	1.2	人体组织	集中损失

表 3-4 治疗终端输出能量为 70MeV 时的束流损失表

损失部位	能量, MeV	束流强度, nA	损失流 强, nA	靶材料	损失方式
回旋加速器内部	230	3.0	1.0	Fe	均匀损失
束流到射程调节器	230	2.0	<0.1	空气	均匀损失
射程调节器	230	1.9	0.5	聚碳酸酯 (C, H, O)	集中损失
自适应准直器	70	1.4	0.2	Ni	集中损失
患者	70	1.2	1.2	人体组织	集中损失

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。天空散射随装置开机产生，装置停机后便立刻消失，其大小取决于屏蔽体的厚度。

本次评价主要考虑中子天空反散射，利用 NCRP NO.144 报告 P331 页 Stapleton 公式对上述区域的中子天空反散射进行计算，具体见公式 3-1~3-3。各计算参数的取值列于表 3-5，天空反散射所致不同距离处的剂量率水平计算结果列于表 3-6。居留因子保守取 1，年受照时间为质子治疗系统运行时间 1050h，可计算得出由天空反散射所致周围公众年受照剂量。

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

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

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

式中，

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

h 为常数，取值 40m；

r 为源到关注点的距离，m；

λ 为与中子能量上限对应的空气的中子有效吸收长度，m；

Q 为穿透屋顶屏蔽达到顶板外表面的中子个数，n/h；

d 为源到顶板外表面的距离，m；

g 为单位中子通量的剂量当量，Sv·m²；

$H(d,t)$ 为顶板屏蔽体外表面的剂量率，Sv/h；

Ω 为源从顶屏蔽辐射出的立体角。

表 3-5 中子天空反散射计算参数

参数	取值	来源
λ , m	450	NCRP NO.144 报告表 6.5，能量保守按 230MeV 考虑，
d , m	7.86	CAD 图纸测量
g , Sv·m ²	1.24E-14	文献《ACCELERATOR SKYSHINE:TYGER,TYGER,BURNING BRIGHT》(Particle Accelerator,1994,vol.44(1),pp1-15,GEOFFREY B.STAPLETON)表 4，保守取质子能量 230MeV，利用内插法计算得出
Ω , sr	6.28	θ 保守取值 90°
$H(d,t)$, Sv/h	2.59E-07	FLUKA 程序计算

表 3-6 不同距离 r 处天空反散射造成的剂量率

距离 r , m	$H(r)$, Sv/h	$D(r)$, mSv/a
5	7.92E-09	8.32E-03
10	6.34E-09	6.66E-03
15	5.18E-09	5.44E-03
20	4.31E-09	4.53E-03
50	1.79E-09	1.88E-03
100	6.62E-10	6.95E-04
200	1.80E-10	1.89E-04

由计算结果可知，即使在距离仅 5m 处，天空反散射造成的剂量率最高也仅有 $7.92\text{E-}09\text{Sv/h}$ ，年受照剂量为 $8.32\text{E-}03\text{mSv/a}$ ，仅为公众剂量约束值 0.1mSv/a 的 8.3%。因此，天空反散射造成的环境影响是可以忽略的。

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。

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，需要进入治疗机房内工作的物理师、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、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 $200\mu\text{Sv/h}$ ，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

质子治疗系统运行期间产生的次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获和高能中子散裂反应等产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素 ^3H 和 ^7Be ，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O

和 ^{41}Ar 四种核素，具体见表 3-7。

表 3-7 空气活化产生的主要放射性核素

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

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告。

3.3.1.3.1.1 空气感生放射性静态饱和浓度

本次评价利用 FLUKA 计算了无通风的情况下，质子治疗机房内空气感生放射性静态饱和活度，计算时考虑了所有束流损失点，并以各束流损失点处最高能量（230MeV）和最高损失流强为依据进行保守估算。计算结果列于表 3-8。

表 3-8 质子治疗机房内空气感生放射性静态饱和活度

核素	质子治疗机房内	
	静态饱和活度, Bq	静态饱和浓度, Bq/m ³
^{11}C	8.20E+04	4.56E+02
^{13}N	2.32E+05	1.29E+03
^{15}O	9.73E+04	5.41E+02
^{41}Ar	7.33E+04	4.07E+02

3.3.1.3.1.2 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和活度

质子治疗系统运行期间，机房内一直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 3-4 计算。

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

式中，

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

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

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

r_1 为正常运行时房间内的换气次数， s^{-1} ；

（一）各参数的取值

（1） λ

λ 计算结果如表 3-9 所示。

表 3-9 放射性核素衰变常数计算结果

放射性核素	$T_{1/2}$, s	λ , s^{-1}
^{11}C	1.22E+03	5.66E-04
^{13}N	6.00E+02	1.16E-03
^{15}O	1.26E+02	5.50E-03
^{41}Ar	6.48E+03	1.07E-04

（2） r

根据建设单位提供的资料，质子治疗机房的通风换气设计情况如表 3-10 所示。具体通风系统设计情况见“4.1.2.3 通风系统”的描述。

表 3-10 质子治疗机房各区域通风换气设计情况

区域名称	通风方式	气流走向	送风量， m^3/h	排风量， m^3/h	换气次数，次/时
质子治疗机房	新风机进风+ 排风机排风	上进风 下排风	1600	2000	12

(二) 计算结果

利用以上公式可计算得出考虑通风的情况下，质子治疗机房内感生放射性气体的动态饱和浓度。具体结果见表 3-11。

表 3-11 质子治疗机房内空气感生放射性核素动态饱和浓度，Bq/m³

核素	核素动态饱和浓度，Bq/m ³
¹¹ C	6.62E+01
¹³ N	3.33E+02
¹⁵ O	3.37E+02
⁴¹ Ar	1.27E+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”，质子治疗系统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式 3-5 和式 3-6 计算。

$$\begin{aligned}
 Q_t &= \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) R_t dt = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \int_0^t (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) dt \\
 &= \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \left(t - \frac{1}{\lambda + r_1} + \frac{e^{-(\lambda + r_1)t}}{\lambda + r_1} \right)
 \end{aligned} \quad (3-5)$$

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

式中，

Q_t 和 Q_{t_c} 分别质子治疗系统运行 t 时间和停机排放 t_c 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度，Bq；

R_t 和 R_{t_c} 分别为质子治疗系统正常运行和停机通风状态下的通风速率，cm³/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 3-12。

表 3-12 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}C	2.94E+08	9.34E+00
^{13}N	1.45E+09	4.59E+01
^{15}O	1.38E+09	4.37E+01
^{41}Ar	5.79E+07	1.84E+00
总计	3.17E+09	1.01E+02

3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

Mevion S250i 质子治疗系统设有 3 个冷却水回路, 如图 3-16 所示, 分别用于冷却低温压缩机、回旋加速器部件和射频放大器, 3 个回路中冷却水总水量约为 0.5m^3 。质子治疗系统的冷却水回路与医院的冷却水回路相对独立, 两者通过热交换器进行热量交换。热交换器位于质子治疗机房负三层的设备层, 共三台, 分别用于 3 个冷却水回路。

3 个冷却水回路中, 用于冷却回旋加速器部件的回路中的冷却水, 在束流损失产生的中子辐射场的照射下会被活化。根据《加速器保健物理》(H.W.帕特森, R.H.托马斯), 高能中子与冷却水中的 ^{16}O 发生散裂反应, 主要产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 等放射性核素, 各放射性核素的参数见表 3-13。其中, ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 的半衰期很短, 装置停机后, 这些核素将迅速衰变, 浓度也会很快降低。因此, 冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 。

表 3-13 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}	生成核反应	反应截面, mb
^3H	12.3a	1.78E-09	(n, sp)	33
^7Be	53.1d	1.51E-07	(n, sp)	9.3
^{11}C	20.4min	5.67E-04	(n, sp)	10
^{13}N	9.97min	1.16E-03	(n, sp)	5
^{15}O	2.04min	5.67E-03	(n, sp)	28

注: 反应截面数据取自 IAEA 技术报告系列 NO.283 号报告。

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

(1) 束流损失：回旋加速器处损失束流能量为 230MeV，损失流强为 1nA；

(2) 模型简化：考虑到回旋加速器冷却水回路主要用于冷却扫描磁铁，扫描磁铁的厚度为 8cm，扫描磁铁周围的冷却水管径约为 2cm。因此在模拟计算时采用厚度为 8cm 的铁板作为扫描磁铁，厚度 2cm 的水板作为冷却水管，紧贴在铁板表面；

(3) 保守取质子治疗系统连续运行 10 年。

计算结果列于表 3-14。由此可知冷却水中 ^3H 和 ^7Be 的感生放射性活度仅为 $1.79\text{E}+03\text{Bq}$ 。该回路冷却水总量约为 0.16m^3 ，由此可计算得出冷却水的感生放射性浓度约为 11.2Bq/L ，远低于其单次排放限值 $1\text{ ALI}_{\text{min}}$ 和豁免活度。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修时才需要排放。本项目在负二层质子治疗机房南侧设有污水间，污水间集水坑内设置 $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}\times 0.8\text{m}$ （长 $\times$ 宽 $\times$ 高）成品不锈钢蓄水罐，用于暂存质子机房更换下来的活化冷却水。

表 3-14 冷却水感生放射性计算结果

核素	饱和活度, Bq	饱和浓度, Bq/L	ALI_{min} , Bq	豁免活度, Bq
^3H	$1.09\text{E}+03$	$6.80\text{E}+00$	$1.11\text{E}+09$	$1\text{E}+09$
^7Be	$7.04\text{E}+02$	$4.40\text{E}+00$	$3.85\text{E}+08$	$1\text{E}+07$
总计	$1.79\text{E}+03$	$1.12\text{E}+01$	——	——

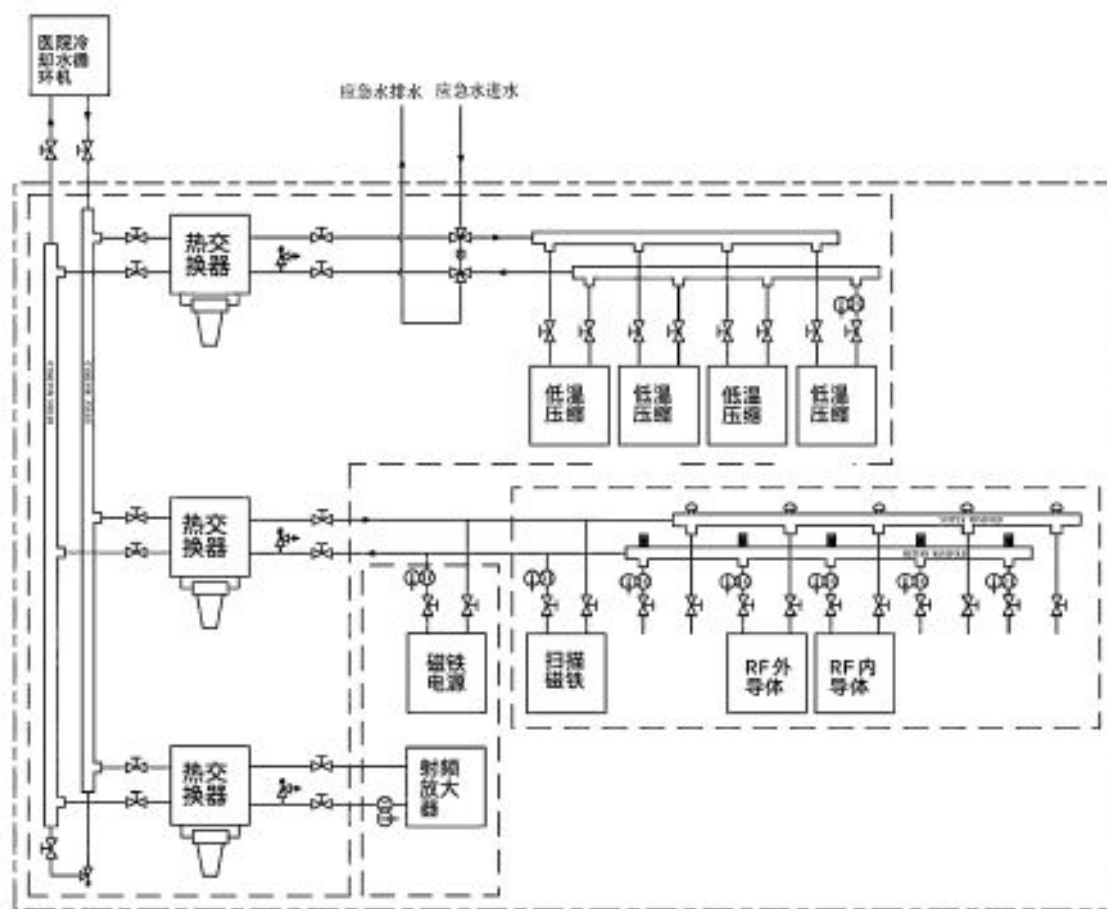


图 3-16 质子治疗系统冷却水回路示意图

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装置结构材料相互作用产生，主要部位是束流损失较大的部位，如磁铁、射程调节器、自适应准直器等，其主要材料为铁、聚碳酸酯、镍等。相关实验研究表明，停机后活化结构部件中的核素主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

根据质子治疗系统主要的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序计算了主要束流损失点的感生放射性，计算时所用参数如下：

(1) 回旋加速器

质子治疗系统运行工况：连续运行 10 年：

束流参数：能量为 230MeV，束流损失率为 $6.25 \times 10^9 \text{p/s}$ ；

加速器结构：如图 3-17 所示。

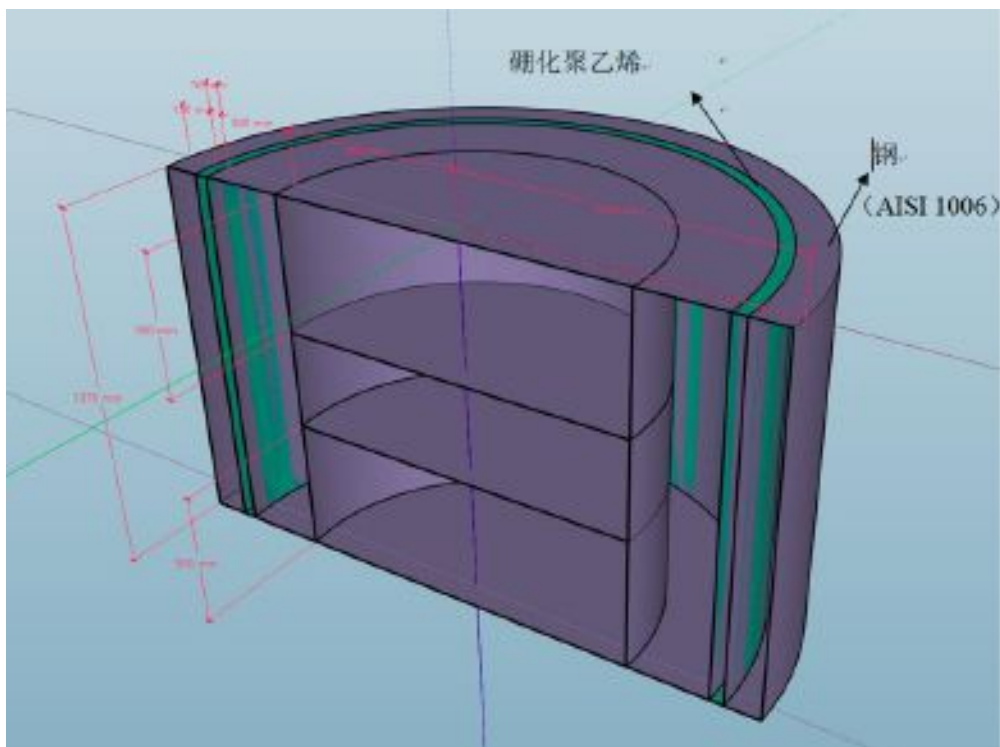


图 3-17 回旋加速器剖面结构图

(2) 射程调节器

质子治疗系统运行工况：连续运行 10 年：

束流参数：能量为 230MeV，束流损失率为 $3.13 \times 10^9 \text{p/s}$ ；

靶材料：厚度为 29cm 的聚碳酸酯板。

(3) 自适应准直器

质子治疗系统运行工况：连续运行 10 年；

束流参数：能量为 230MeV，束流损失率为 $1.25 \times 10^9 \text{p/s}$ ；

靶材料：厚度为 10cm 的镍板。

各结构部件感生放射性饱和活度的计算结果见表 3-15~表 3-17，停机时刻距离活化结构部件 1m 距离处的剂量率计算结果列于表 3-18。由计算结果可知，结构部件感生放射性水平较低，多数核素的饱和活度均低于其豁免活度，停机后感生放射性主要来自 ^{48}V 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 等半衰期在月级别的中长寿命放射性核素。

表 3-15 回旋加速器的感生放射性模拟计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	冷却 4 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后活度, Bq	豁免活度, Bq	停机时刻活度/豁免活度
^3H	8.05E+06	8.05E+06	8.05E+06	1E+09	8.05E-03
^7Be	1.44E+06	1.44E+06	1.43E+06	1E+07	1.44E-01
^{24}Na	3.87E+04	3.17E+04	2.14E+04	1E+05	3.87E-01
^{32}P	3.75E+05	3.72E+05	3.65E+05	1E+05	3.75E+00
^{33}P	1.96E+05	1.95E+05	1.94E+05	1E+08	1.96E-03
^{35}S	3.15E+05	3.15E+05	3.14E+05	1E+08	3.15E-03
^{37}Ar	1.19E+06	1.19E+06	1.18E+06	1E+08	1.19E-02
^{42}K	7.89E+05	6.26E+05	3.95E+05	1E+06	7.89E-01
^{43}K	2.35E+05	2.07E+05	1.61E+05	1E+06	2.35E-01
^{44}Ti	3.49E+05	3.49E+05	3.49E+05	——	——
^{43}Sc	2.80E+06	1.35E+06	3.14E+05	——	——
^{44}Sc	1.63E+07	8.01E+06	1.93E+06	——	——
^{46}Sc	7.56E+06	7.55E+06	7.53E+06	1E+06	7.56E+00
^{47}Sc	2.84E+06	2.74E+06	2.56E+06	1E+06	2.84E+00
^{48}Sc	6.54E+05	6.13E+05	5.39E+05	1E+05	6.54E+00
^{45}Ca	8.56E+05	8.55E+05	8.54E+05	1E+07	8.56E-02
^{47}Ca	1.21E+04	1.18E+04	1.12E+04	1E+06	1.21E-02
^{48}V	5.82E+07	5.78E+07	5.70E+07	1E+05	5.82E+02
^{49}V	1.02E+08	1.02E+08	1.02E+08	——	——
^{48}Cr	2.49E+06	2.18E+06	1.68E+06	——	——
^{49}Cr	2.76E+07	5.68E+05	2.41E+02	——	——
^{51}Cr	1.93E+08	1.92E+08	1.90E+08	1E+07	1.93E+01
^{52}Mn	7.24E+07	7.09E+07	6.80E+07	1E+05	7.24E+02
^{54}Mn	3.11E+08	3.11E+08	3.10E+08	1E+06	3.11E+02
^{56}Mn	7.21E+07	2.38E+07	2.59E+06	1E+05	7.21E+02
^{52}Fe	3.73E+06	2.66E+06	1.35E+06	1E+06	3.73E+00
^{55}Fe	8.13E+08	8.13E+08	8.13E+08	1E+06	8.13E+02

⁵⁹ Fe	1.01E+07	1.00E+07	1.00E+07	1E+06	1.01E+01
⁵⁵ Co	1.21E+07	1.03E+07	7.52E+06	1E+06	1.21E+01
⁵⁶ Co	3.96E+07	3.95E+07	3.94E+07	1E+05	3.96E+02
⁵⁷ Co	1.18E+06	1.18E+06	1.18E+06	1E+06	1.18E+00
⁵⁸ Co	1.24E+05	1.23E+05	1.23E+05	1E+06	1.24E-01
总计	1.76E+09	1.67E+09	1.63E+09	——	3.62E+03

表 3-16 射程调节器感生放射性模拟计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	冷却 4 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后活度, Bq	豁免活度, Bq	停机时刻活度/豁免活度
³ H	2.68E+07	2.68E+07	2.68E+07	1E+09	2.68E-02
⁷ Be	5.96E+07	5.95E+07	5.92E+07	1E+07	5.96E+00
¹⁰ Be	3.46E+01	3.46E+01	3.46E+01	——	——
¹⁴ C	3.55E+03	3.55E+03	3.55E+03	1E+07	3.55E-04
总计	8.65E+07	8.63E+07	8.61E+07	——	5.99E+00

表 3-17 自适应准直器感生放射性模拟计算结果

核素	停机时刻的活度值, Bq	冷却 4 小时后活度, Bq	冷却 12 小时后活度, Bq	豁免活度, Bq	停机时刻活度/豁免活度
³ H	2.77E+05	2.77E+05	2.77E+05	1E+09	2.77E-04
⁷ Be	3.22E+04	3.21E+04	3.20E+04	1E+07	3.20E-03
²⁴ Na	1.44E+03	1.18E+03	7.95E+02	1E+05	7.95E-03
³² P	2.84E+03	2.82E+03	2.77E+03	1E+05	2.77E-02
³³ P	1.42E+03	1.41E+03	1.40E+03	1E+08	1.40E-05
³⁵ S	2.48E+03	2.47E+03	2.47E+03	1E+08	2.47E-05
³⁷ Ar	8.16E+03	8.13E+03	8.08E+03	1E+08	8.08E-05
³⁹ Ar	2.80E+02	2.80E+02	2.80E+02	——	0.00E+00
⁴² K	3.93E+03	3.12E+03	1.97E+03	1E+06	1.97E-03
⁴³ K	1.07E+03	9.43E+02	7.33E+02	1E+06	7.33E-04
⁴⁴ Ti	2.23E+03	2.23E+03	2.23E+03	——	0.00E+00
⁴⁵ Ca	5.29E+03	5.28E+03	5.27E+03	1E+07	5.27E-04
⁴³ Sc	2.20E+04	1.06E+04	2.46E+03	——	0.00E+00
⁴⁴ Sc	9.30E+04	4.57E+04	1.10E+04	——	0.00E+00
⁴⁶ Sc	4.82E+04	4.82E+04	4.80E+04	1E+06	4.80E-02
⁴⁷ Sc	1.81E+04	1.75E+04	1.63E+04	1E+06	1.63E-02
⁴⁸ Sc	5.68E+03	5.33E+03	4.68E+03	1E+05	4.68E-02
⁴⁸ V	6.54E+05	6.50E+05	6.40E+05	1E+05	6.40E+00

⁴⁹ V	1.28E+06	1.28E+06	1.28E+06	——	0.00E+00
⁴⁸ Cr	2.77E+04	2.43E+04	1.86E+04	——	0.00E+00
⁵¹ Cr	3.11E+06	3.10E+06	3.07E+06	1E+07	3.07E-01
⁵² Mn	1.94E+06	1.90E+06	1.82E+06	1E+05	1.82E+01
⁵³ Mn	1.73E+01	1.73E+01	1.73E+01	1E+09	1.73E-08
⁵⁴ Mn	5.77E+06	5.77E+06	5.76E+06	1E+06	5.76E+00
⁵⁶ Mn	2.98E+05	9.83E+04	1.07E+04	1E+05	1.07E-01
⁵⁵ Co	2.25E+06	1.92E+06	1.40E+06	1E+06	1.40E+00
⁵⁶ Co	1.84E+07	1.83E+07	1.83E+07	1E+05	1.83E+02
⁵⁷ Co	6.65E+07	6.64E+07	6.64E+07	1E+06	6.64E+01
⁵⁸ Co	5.28E+07	5.27E+07	5.26E+07	1E+06	5.26E+01
⁶⁰ Co	2.54E+06	2.54E+06	2.54E+06	1E+05	2.54E+01
⁶¹ Co	9.22E+05	1.63E+05	5.09E+03	1E+06	5.09E-03
⁵² Fe	1.15E+05	8.20E+04	4.17E+04	1E+06	4.17E-02
⁵⁵ Fe	2.32E+07	2.32E+07	2.32E+07	1E+06	2.32E+01
⁵⁹ Fe	1.22E+05	1.21E+05	1.21E+05	1E+06	1.21E-01
⁵⁶ Ni	6.01E+05	5.90E+05	5.67E+05	——	0.00E+00
⁵⁷ Ni	7.11E+06	6.57E+06	5.61E+06	——	0.00E+00
⁵⁹ Ni	7.19E+03	7.19E+03	7.19E+03	1E+08	7.19E-05
⁶³ Ni	8.37E+05	8.37E+05	8.37E+05	1E+08	8.37E-03
⁶⁵ Ni	3.36E+05	1.11E+05	1.21E+04	1E+06	1.21E-02
⁶¹ Cu	1.97E+04	8.50E+03	1.58E+03	——	0.00E+00
⁶⁴ Cu	6.47E+03	5.14E+03	3.24E+03	1E+06	3.24E-03
总计	1.89E+08	1.87E+08	1.85E+08	——	3.83E+02

表 3-18 停机时刻，与距离活化结构部件 1m 处的剂量率

活化结构部件	回旋加速器	射程调节器	自适应准直器
距离 1m 处的剂量率，μSv/h	0.2	5.6	4.5

3.3.1.3.4 土壤和地下水的感生放射性

3.3.1.3.4.1 评价标准

本次评价对于土壤和地下水感生放射性的评价标准的选取，参照了“广东恒健质子治疗装置”的辐射屏蔽设计，其对于加速器室和各治疗室与土壤相交的底板屏蔽厚度设计时，选取“底板外与土壤相交处的剂量率为 5.5mSv/h”为设计标准。当底板外与土壤相交处的剂量率低于 5.5mSv/h 时，可忽略装置运行对土壤和地下水

的感生放射性影响。

根据已批复的《广东恒健质子医疗装置示范工程项目环境影响报告书》，在以“5.5mSv/h”作为加速器室和各治疗室底板厚度的设计标准时，利用 FLUKA 程序对装置运行期间对土壤和地下水的感生放射性进行了模拟计算。根据计算结果，在感生放射性最严重的加速器室与混凝土交界面处，土壤中主要感生放射性核素 ^3H 和 ^{22}Na 分别比《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 表 A1 中给出的相应核素的豁免浓度低 8 个多量级和 3 个多量级。该区域土壤总活度浓度约为 117Bq/kg，比表 3-19 中所列该项目拟建场址土壤中总 α 、总 β 本底浓度低 1 个量级。地下水中主要感生放射性核素 ^3H 和 ^7Be 的饱和浓度分别比《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》附录 A 表 A1 中给出的相应核素的豁免浓度低 7 个多量级和 5 个多量级。

表 3-19 恒健质子治疗装置拟建场址土壤中总 α 、总 β 本底浓度*

项目	活度浓度，Bq/kg
总 α	2.48×10^3
总 β	1.27×10^3

注：*该数值取自已批复的《广东恒健质子医疗装置示范工程项目环境影响报告书》。

由恒健质子治疗装置运行期间土壤和地下水感生放射性的模拟计算结果以及该装置拟建场址土壤中总 α 、总 β 本底浓度监测结果相比可知，恒健质子治疗装置运行期间对土壤和地下水的感生放射性影响可以忽略，即采取“5.5mSv/h”作为质子治疗机房底板屏蔽设计的标准时可行的。

3.3.1.3.4.2 本项目对土壤和地下水的影响分析

本项目质子治疗机房地板厚度及地板外表面与土壤边界处的剂量率列于表 3-20。由此可知，质子治疗机房地板外表面与土壤接触的边界处的剂量率低于 5.5mSv/h，本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

表 3-20 质子治疗机房地板厚度及其与土壤接触边界处的剂量率水平

关注点	地板厚度, m	地板外表面与土壤边界处剂量率, mSv/h
质子治疗机房地板	1.1m 混凝土	6.0E-01

3.3.1.3.5 治疗机房内病人的感生放射性

本项目每间治疗机房每天规划治疗 16h, 每小时治疗 3 个病人, 每天规划治疗 48 个病人。因此, 平均每 20min 内都需要对病人进行摆位/解除摆位一次。由于解除摆位时, 工作人员处于治疗机房内且近距离接触刚受到照射的患者, 因此需计算分析此时治疗机房内患者感生放射性强度, 以此确定摆位前有无必要等待合适时间再进入治疗机房内对患者解除摆位, 并评估治疗后患者带有的感生放射性对治疗技师的辐射影响。

3.3.1.3.5.1 计算条件

治疗机房内由于照射病人所致感生放射性强度的计算条件如下:

(1) 采用最保守的束流条件: 束流能量最高 230MeV, 终端损失流强 1.2nA, 连续治疗 4min。

(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 3-21, 靶的尺寸为厚度 40cm, 半径 35cm 的圆柱体。

表 3-21 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 单次治疗后治疗室内剩余剂量率

结合实际治疗情况,以最保守的治疗条件 230MeV-1.2nA 的束流连续治疗 4min,假设患者不移动,计算了停机时刻、停机 1min、5min、10min、30min 和 1h 时刻治疗室内剩余剂量率分布。计算结果表 3-22 所示。

表 3-22 单次治疗后,患者不移动,治疗室内距靶(患者)表面 50cm 处的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
1min	2.13E+01
5min	1.04E+01
10min	6.20E+00
30min	3.02E+00
1h	1.10E+00
4h	2.20E-03

由此可知,以 230MeV-1.2nA 连续治疗 4min,治疗结束 1min 后,若患者不移动,治疗室内距离患者 50cm 处的剂量率最高可达 2.13E+01 $\mu\text{Sv/h}$;停机 5min 后,距离患者 50cm 处剂量率降至 1.04E+01 $\mu\text{Sv/h}$;停机 1h 后,距离患者 50cm 处剂量率低于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$;

3.3.1.3.5.3 治疗机房内技师工作区瞬时剂量率来源

当技师在该治疗机房内对照射结束后的患者进行解除摆位的操作时,其工作区瞬时剂量率主要考虑以下 3 个来源:

- (1) 照射结束后的患者产生的感生放射性剂量率,见表 3-22;
- (2) 治疗机房内活化结构部件,主要考虑回旋加速器、射程调节器和自适应准直器,见表 3-18;
- (3) 感生放射性空气所致的浸没外照射剂量率。计算结果列于表 3-23。

表 3-23 空气感生放射性浸没外照射剂量率计算结果, $\mu\text{Sv/h}$

核素	停机 1min 后	停机 5min 后	停机 10min 后	停机 30min 后
^{11}C	9.23E-03	3.62E-03	1.13E-03	1.05E-05
^{13}N	4.49E-02	1.53E-02	3.97E-03	1.82E-05
^{15}O	3.51E-02	4.21E-03	2.98E-04	7.45E-09
^{41}Ar	2.41E-03	1.06E-03	3.77E-04	6.10E-06
合计	9.16E-02	2.42E-02	5.78E-03	3.48E-05

本次评价对 **230MeV-1.2nA** 连续治疗 4min 后, 患者不移动, 不同停机时刻下治疗机房内技师工作区 (距离患者约 50cm 处) 的剂量率及其来源进行分析, 结果列于表 3-24。

由计算结果可知, 治疗室内对患者单次治疗 4min 后停机 5min 内, 技师工作区的瞬时剂量率主要来自患者感生放射性, 剂量率贡献最大占 67.29%。停机 5min 后, 技师工作区的瞬时剂量率主要来自活化结构部件。

表 3-24 230MeV-1.2nA 治疗 4min, 停机 1min、5min、10min 和 30min 后, 治疗机房内技师工作区 (距离患者 50cm 处) 的剂量率

来源	停机 1min 后		停机 5min 后		停机 10min 后		停机 30min	
	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	贡献率, %	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	贡献率, %	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	贡献率, %	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	贡献率, %
患者	21.3	67.29	10.4	50.18	6.2	37.56	0.3	2.85
活化结构部件	10.3	32.54	10.3	49.7	10.3	62.40	10.3	97.15
空气感生放射性	9.16E-02	0.29	2.42E-02	0.12	5.78E-03	0.04	3.48E-05	0.01
总计	31.7	100	20.7	100	16.5	100	10.6	100

3.3.1.4 臭氧等有害气体的产生

3.3.1.4.1 计算公式

在光子的作用下, 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_2 结合生成 O_3 , O_3 再与空气中的 NO 结合生成 NO_2 。根据 NCRP NO.144 报告, 场所内的 O_3 和 NO_2 饱和浓度可利用公式 3-7 和 3-8 计算。

$$N_{sat} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + R} \quad (3-7)$$

$$C = N \frac{M}{N_A} \quad (3-8)$$

式中，

C 为场所内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度，g/m³；

N 为房间内单位体积的气体分子个数，个/m³；

g 为空气中单位光子能量沉积形成的气体分子数，eV⁻¹；

α 为气体分子的化学分解速率，s⁻¹；

κ 为单位光子能量沉积形成的分子数目，eV⁻¹·m³；

R 为房间换气次数，s⁻¹；

M 为气体的摩尔质量，g/mol；

N_A 为阿伏伽德罗常数，6.022×10²³mol⁻¹；

I 为空气中单位体积单位时间的光子能量沉积，eV/m³·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 可由公式 3-9 计算：

$$I = 6.25 \times 10^{18} K \rho = 6.25 \times 10^{18} \varphi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) E \rho \quad (3-9)$$

式中，

K 为光子在空气中的比释动能率，J/kg·s；

φ 为光子注量率，p/m²·s；

ρ 为空气的密度，kg/m³；

μ_{en}/ρ 为光子在空气中的质能吸收系数，m²/kg；

E 为光子能量，J，（1MeV=1.6×10⁻¹³J）。

3.3.1.4.2 各参数取值

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，计算结果列于表 3-25。

表 3-25 距靶点 1m 处的光子注量率计算结果

束流损失点	能量, MeV	束流损失率, 1/s	光子注量率, n/m ² ·s
回旋加速器	230	6.25E+09	3.63E+08
射程调节器	230	3.13E+09	3.98E+07
自适应准直器	230	1.25E+09	7.27E+07
体模	230	7.50E+09	9.55E+07

其他各参数取值和来源列于表 3-26。

表 3-26 各参数取值

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
α	2.3×10 ⁻⁴ s ⁻¹	NCRP NO.144 报告 P359
κ	5.0×10 ⁻²⁴ eV ⁻¹ · m ³	文献*
R	1.39×10 ⁻³ s ⁻¹	表 3-10
M	M(O ₃)=48 g/mol M(NO ₂)=46 g/mol	——
N _A	6.022×10 ²³ 1/mol	——
ρ	1.29kg/m ³	——
μ _{en} /ρ	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	0.9MeV=1.44×10 ⁻¹³ J	FLUKA 程序模拟

注：文献来自《Advanced Photon Source: Radiological Design Considerations》(APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July 1991)。

3.3.1.4.3 计算结果

质子治疗机房内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度和排放速率计算结果列于表 3-27。由计算结果可知，质子治疗机房内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度远低于表 3-27 中所列工作场所 O₃ 和 NO₂ 的最大容许浓度限值。

表 3-27 质子治疗机房内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度

场所名称	饱和浓度, mg/m ³	
	O ₃	NO ₂
质子治疗机房	1.65E-06	7.37E-07

3.4 主要辐射污染因子小结

综上所述, 本项目运行期间主要的辐射污染因子列于表 3-28。

表 3-28 本项目正常运行期间主要辐射污染因子

装置名称	主要污染因子	产生情况	处理方式及去向
质子治疗系统	质子	最高能量 230MeV	机房屏蔽体防护
	中子	最高能量 230MeV	机房屏蔽体防护
	光子	最高能量 0.9MeV	机房屏蔽体防护
	X 射线	X 射线管出束期间产生	机房屏蔽体防护
	活化气体	主要为 ¹¹ C、 ¹³ N、 ¹⁵ O 和 ⁴¹ Ar 等短半衰期核素, 年总排放量为 3.17E+09Bq。	机房通风系统排入环境
	活化冷却水	主要核素为 ³ H、 ⁷ Be 活度浓度为 11.2Bq/L。	暂存于质子治疗机房负二层南侧污水间的蓄水罐内, 使其自然衰变。排放前取样监测, 满足排放标准后排入医院污水管网。
	活化结构部件	主要核素为 ⁴⁸ V、 ⁵⁵ Fe、 ⁵⁹ Fe、 ⁵⁴ Mn、 ⁵⁶ Co、 ⁵⁷ Co、 ⁵⁸ Co、 ⁶⁰ Co, 多数核素的饱和活度均低于其豁免活度, 年产生量不超过 374kg。	暂存于质子治疗机房内负二层设备层西南角的 1m ³ 带锁铁箱内, 使其自然衰变。衰变一段时间后, 可回收利用部分, 回收后复用。不可回收利用部分, 满足解控标准的解控后按一般废物处理, 不满足解控标准的委托有资质单位收贮。
	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。停机 1h 后, 距离患者 50cm 处剂量率低于 2.5μSv/h;	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。

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。

质子治疗机房辐射工作场所分区图如图 4-1~图 4-5 所示，具体如下：

- （1）控制区：质子治疗机房内部；
- （2）监督区：质子治疗机房屏蔽墙体外四周相邻场所。

控制区管理要求：控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志，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，需经授权方可进入，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

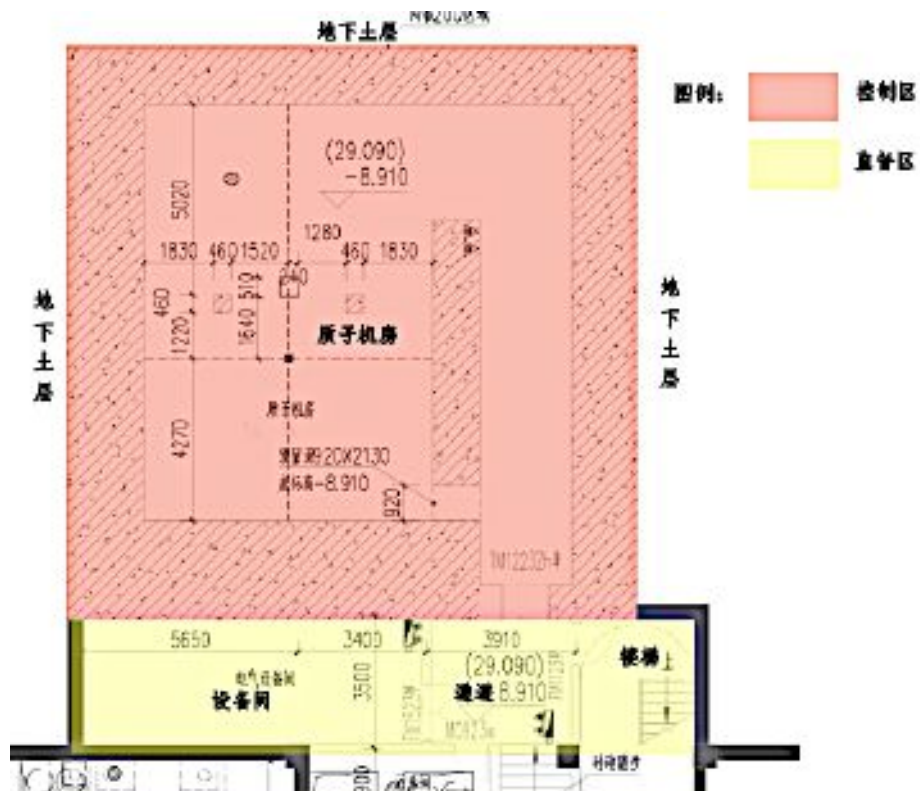


图 4-1 质子治疗机房辐射工作场所分区平面图（负二层：设备层）

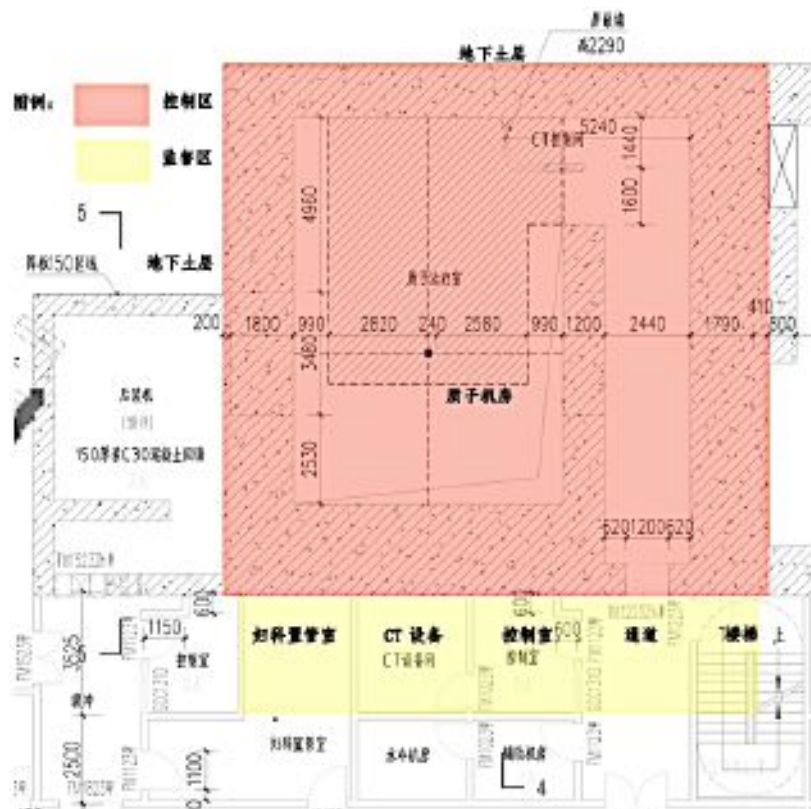


图 4-2 质子治疗机房辐射工作场所分区平面图（负一层：治疗层）

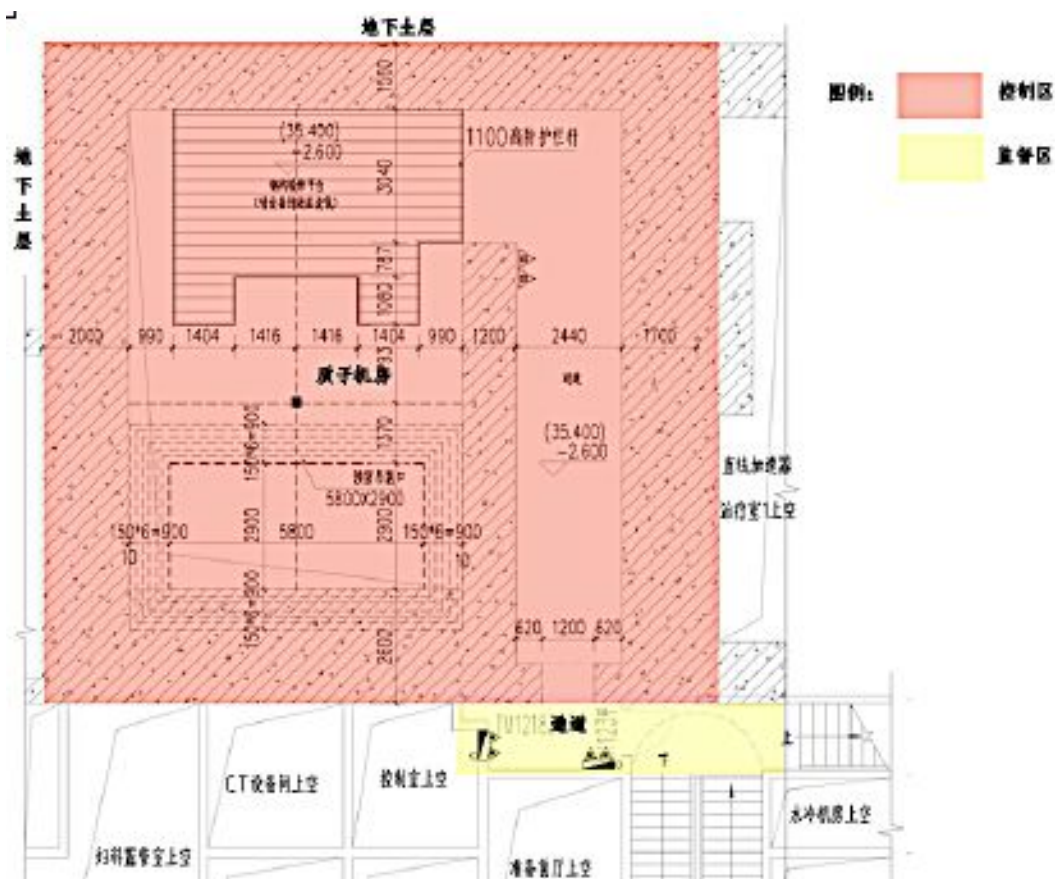


图 4-3 质子治疗机房辐射工作场所分区平面图（检修层）

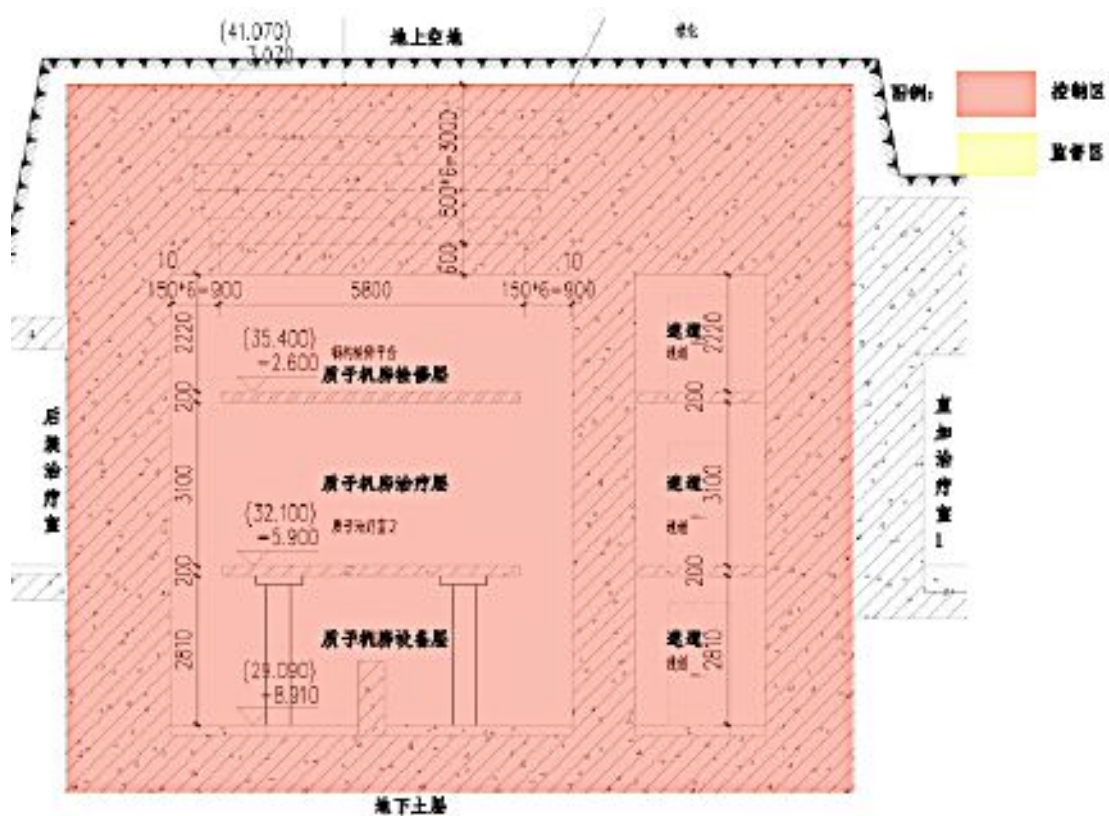


图 4-4 质子治疗机房辐射工作场所分区剖面图（3-3 剖面）

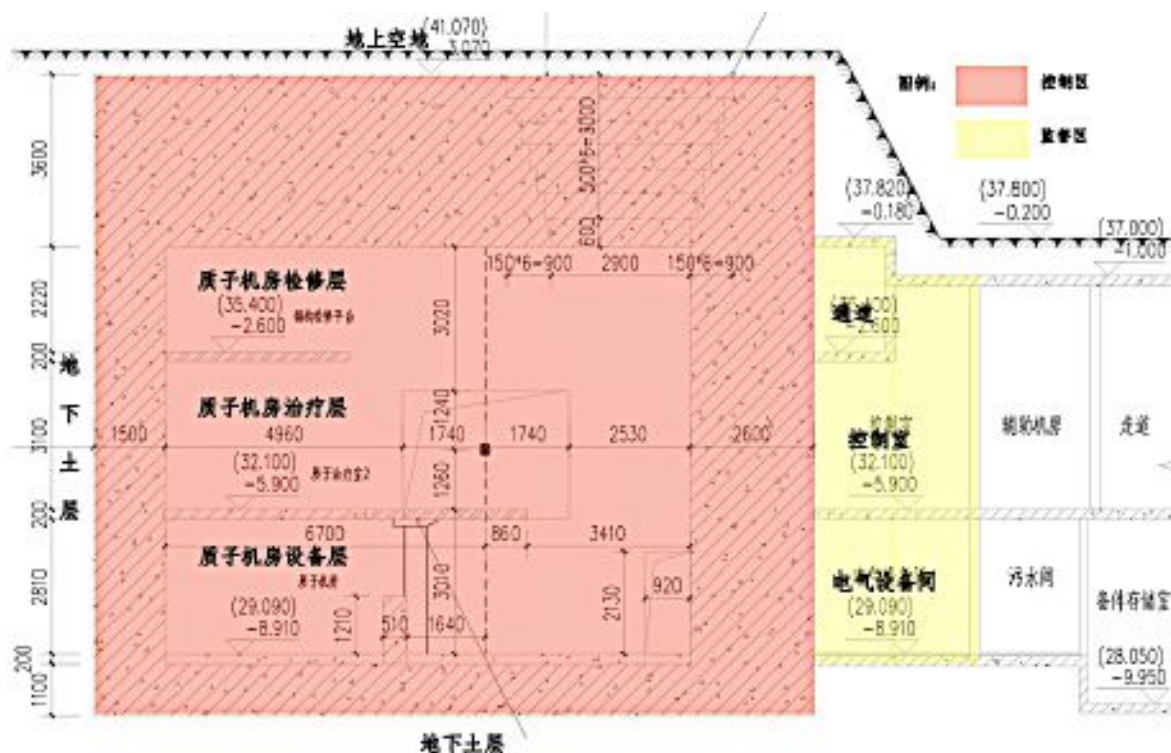


图 4-5 质子治疗机房辐射工作场所分区剖面图（4-4 剖面）

4.1.1.1.2 布局合理性分析

质子治疗机房位于整个地下区域西北侧单独设置，机房设有迷道，控制室与机房分离。机房四周屏蔽墙体外主要设置控制室、人防楼梯间、卫生间、设备储存间、设备用房等，无人员常居留场所。设置了物理隔离和相对独立的人流路线，辐射工作场所的进出口处均设置门禁管理，防止无关人员进入，便于场所的防护管理与安全控制。整个质子治疗区房间功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关要求，因此，该区域布局是合理的。

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 1/10 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

质子治疗机房屏蔽体外剂量率水平的计算依据见“1.4.2 节 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平”，计算结果见表 1-2。

4.1.1.2.2 屏蔽设计

质子治疗机房辐射屏蔽设计如图 4-6~图 4-9 和表 4-1 所示，机房屏蔽墙体、屋顶和底板均采用密度 2.35g/cm³ 的普通混凝土，各层迷道口采用聚乙烯防护门。

此外，每间机房治疗层的南侧墙和迷道内墙的机架钢基座预埋处（如图 4-7 所示），后期利用密度 2.35g/cm³ 的普通混凝土进行填充补偿，补偿至与原屏蔽墙体齐平。考虑到钢基座自身的屏蔽作用，补偿后该部分墙体等效混凝土厚度高于原墙体。

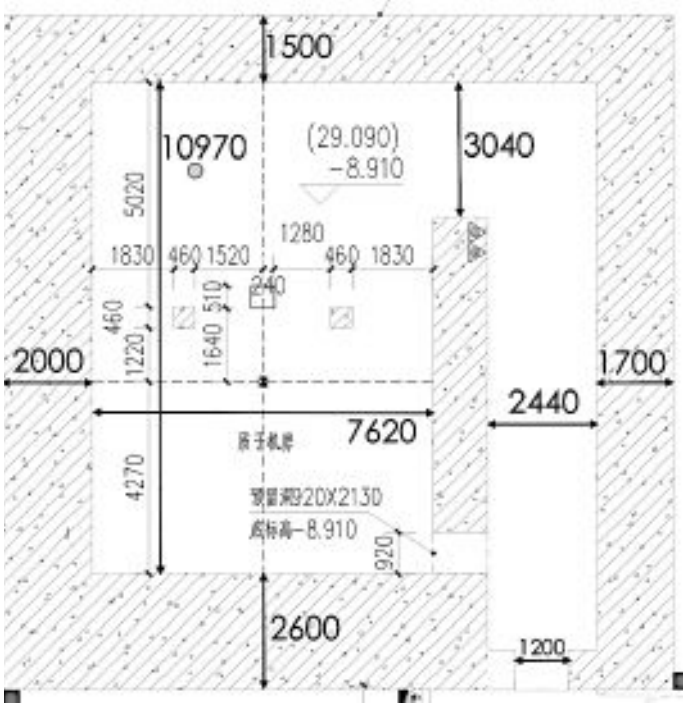


图 4-6 质子治疗机房辐射屏蔽设计（设备层）

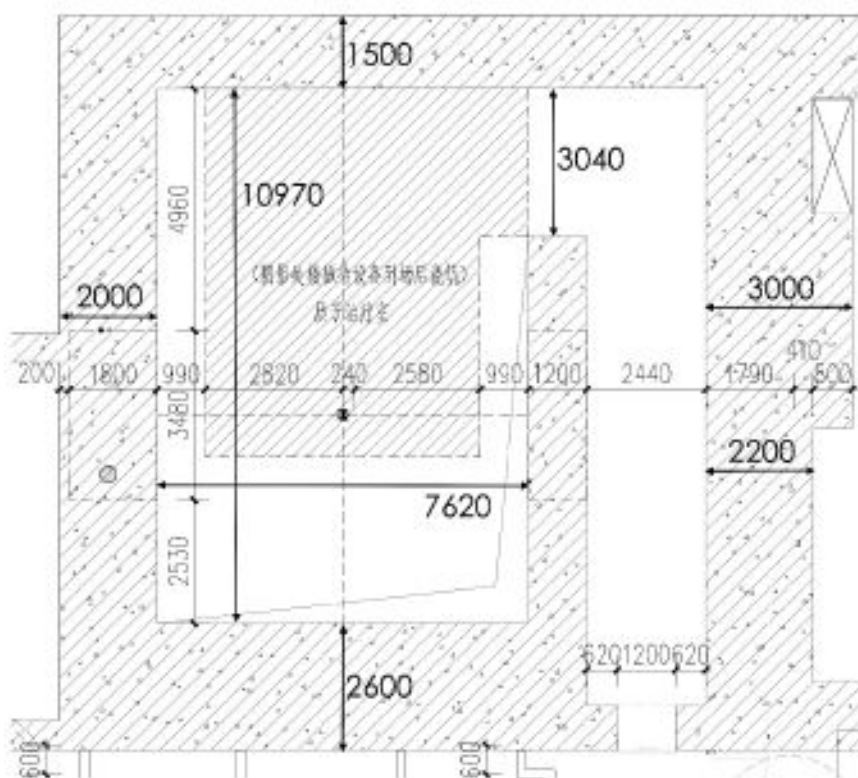


图 4-7 质子治疗机房辐射屏蔽设计（治疗层）

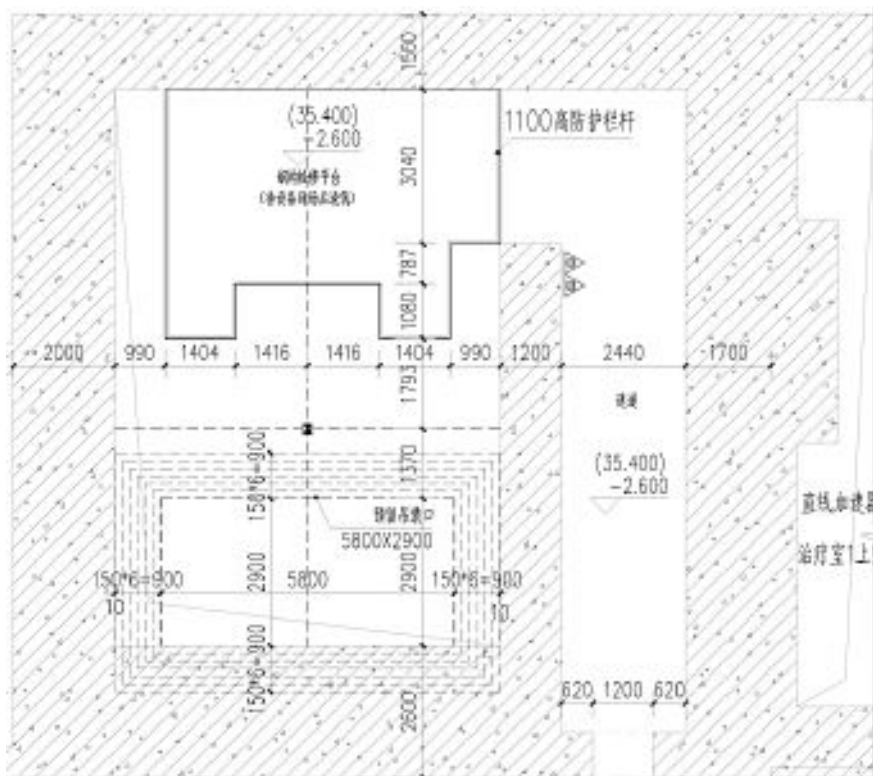


图 4-8 质子治疗机房辐射屏蔽设计（检修层）

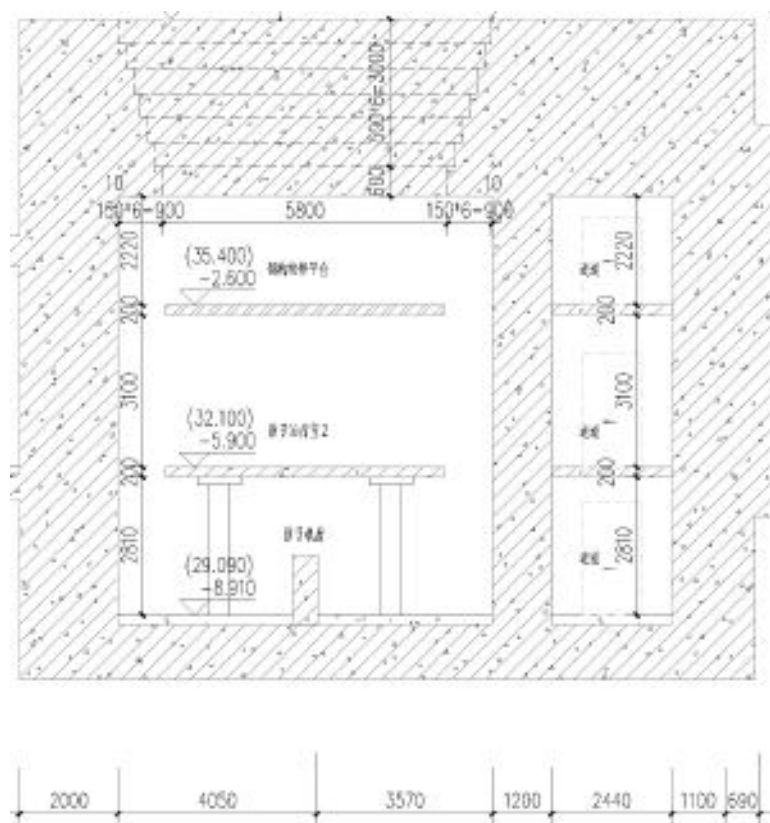


图 4-9 质子治疗机房辐射屏蔽设计（3-3 剖面）

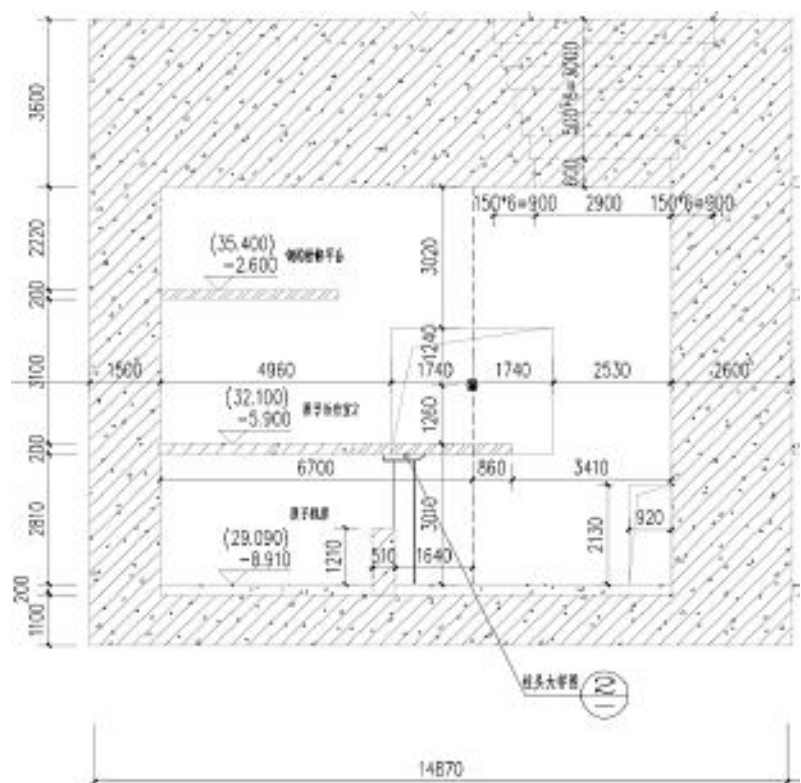


图 4-10 质子治疗机房辐射屏蔽设计（4-4 剖面）

表 4-1 质子治疗机房辐射屏蔽设计及周围环境分布情况

机房尺寸 (长×宽×高)	位置	屏蔽体厚度 (混凝土密度不低于 2.35g/cm ³)	周围环境	
10.97m× 7.62m×8.53m (净高); 不含 迷道、不含墙 体; 面积: 83.59m ²	北墙	1.50m 混凝土	土壤层	
	南墙	2.60m 混凝土	设备层	通道、电气设备间
			治疗层	通道、控制室、CT 设备间、 妇科置管室
			检修层	通道
	西墙	2.00m 混凝土	设备层	土壤层
			治疗层	后装机治疗室、土壤层
			检修层	土壤层
	迷道	迷道内墙: 1.20m 混凝土 迷道外墙: 2.20m 混凝土	设备层	土壤层
			治疗层	直加治疗室 1
			检修层	土壤层
	屋顶	3.6m 混凝土	医院内部地面上方绿化用地	
	地板	1.1m 混凝土	土壤层	
	防护门	设备层: 15cm 聚乙烯	设备层	通道
		治疗层: 7cm 聚乙烯	治疗层	通道
		检修层: 7cm 聚乙烯	检修层	通道
	CT 控制室	各墙体和观察窗厚度不低于 2.5mm 铅当量	质子治疗机房内	

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 设计原则

质子治疗系统人身安全联锁系统设计时，遵循以下原则：

(1) 纵深防御：充分考虑并合理设置联锁设施实现对人身辐射安全的多重冗余保护且各重保护措施之间具有相互独立性。

(2) 硬件最可靠：重要的位置把最大的信赖寄托在“硬件”上。

(3) 最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是设备最初始的运行功

能（如离子源的高压等），更好的保证区域内的辐射安全。

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

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

4.1.2.1.2 系统结构和功能

MEVION S250i 质子治疗系统人身安全联锁系统的主要功能是保护进入治疗机房内部的人员免受辐射危害。系统的设计遵循模块化、冗余及独立安全的原则，考虑了整个系统的使用流程、工作流程及操作状态，且由于其与控制系统之间唯一的交互即为接收并发送状态信息，使得人身安全联锁系统独立于其他控制系统运行，能最大限度的降低在各种情况下的风险。

人身安全联锁系统采用可编程控制技术、门禁控制技术及自动门技术、集散式控制技术、计算机网络与通讯技术、探测与数据处理技术、设备自诊断与自恢复技术等，对质子治疗的各联锁部件进行实时监测，并将信号输入安全联锁系统，只有在联锁条件全部满足的情况下，才允许束流的产生和加速。人身安全联锁系统的结构如图 4-11 所示。

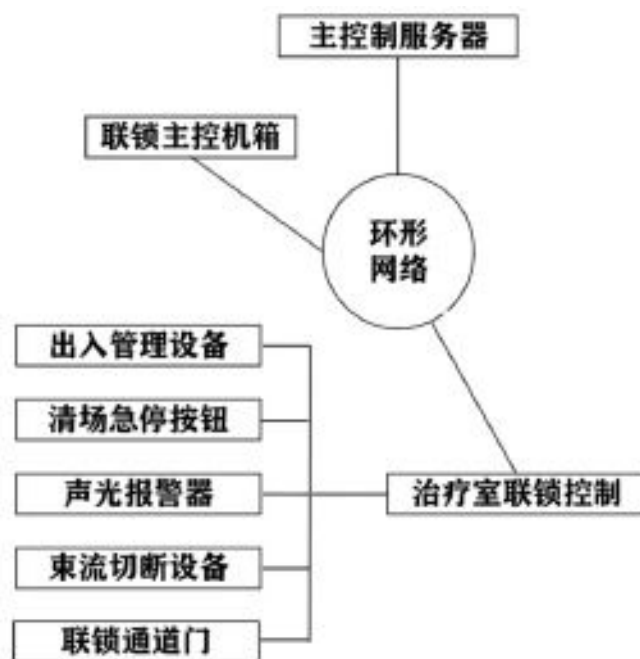


图 4-11 人身安全联锁系统结构示意图

4.1.2.1.3 系统组成

MEVION S250i 质子治疗系统的人身安全联锁系统主要由 PLC、出入管理设备、紧急开出门按钮、急停开关、清场按钮、声光报警器等组成。PLC 可以收到各个联锁装置的状态情况，并通过现场总线和主控 PLC 进行通信，得知哪些主要设备在工作，治疗机房内是否有束流供给，一旦出现与安全逻辑相冲突的事件，安全 PLC 就触发一系列保护动作包括停止束流和发出警报。

4.1.2.1.3.1 PLC

PLC 是人身安全联锁系统的核心控制系统，能够完成联锁门、急停开关、清场按钮等信号的回收，根据预先编程定义好的安全策略执行相应的动作，可以通过控制加速器束流控制部件，允许或切断束流的供应。也可以给主控系统提供信号，进行控制层的通信。PLC 还可与中央监控终端通讯，将数据通过现场总线或串行总线发送给监控终端计算机。

4.1.2.1.3.2 钥匙控制

质子治疗机房的控制室内设有一个控制面板，控制面板上设有一个带主控钥

匙的转换开关，如图 4-12 所示。主控钥匙有“开”和“关”两种状态。在非治疗时间内，系统停机期间进入治疗机房内的工作人员，需先登记并在控制室内确认主控钥匙已处于“关”的位置，拔下钥匙随身携带，以防止他人误操作。从治疗机房出来后，在机房内所有联锁都建立后，只有当主控钥匙归位并旋转至“开”的状态，才能最终给出允许开机的信号。主控钥匙未归位时，系统无法出束。系统出束期间，主控钥匙也无法拔出。



图 4-12 控制室的控制面板示例图

4.1.2.1.3.3 出入管理设备

出入管理设备主要实现对进出质子治疗机房内部人员的统计和管理。

对于机房层和检修层，通常选择钥匙箱类设备作为出入管理设备。钥匙箱设在区域入口处，根据实际使用需求设若干钥匙/按钮。若进入机房层或检修层内部，必须通过刷相应的身份卡使用钥匙面板上的一枚钥匙/按钮才能打开门。且只有当所有的钥匙都插回面板上或所有按钮均复位，且其他联锁条件也满足时，才能允许出束。其中任何一把钥匙没有归位或任一按钮没有复位，则不允许出束。同时在中央监控计算机上显示出此处钥匙/按钮的使用情况。钥匙/按钮授权给有权限的人员使用，这些人员需用身份识别卡获取钥匙。

对于治疗层，为方便医生和患者出入，采用门禁系统控制。门禁系统包括门禁卡、读卡器、门禁控制器等，门禁卡仅授权给有权限的人使用。读卡器负责将现场识读的门禁卡信息传送给门禁控制器。

4.1.2.1.3.4 紧急开、出门按钮

质子治疗机房各层入口门外，还设有紧急开门按钮。该按钮设在墙壁上人员不易接触的位置和高度，仅在紧急情况下用于打开机房各层控制区的大门，如图 4-14 所示。

治疗机房各层的入口门内，设有室内出门按钮，用于机房内开门，该按钮不需要验证权限，控制区内的人员可随时开门离开，如图 4-14 所示。

4.1.2.1.3.5 门限位开关

质子治疗机房各层控制区入口处的联锁门都设两个位置开关。只有当两个位置开关全部到位，才能确认门的位置。门位置信息通过 PLC 送入中央监控室计算机中显示。一旦其中一个门的位置开关不到位，则会启动安全联锁系统，切断束流。

4.1.2.1.3.6 急停按钮

急停按钮设计为红色和文字显示，使其位置比较醒目。发生紧急情况时，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。每间质子治疗机房设 9 个急停按钮，主要分为三类，如图 4-13 所示：

（1）质子治疗机房检修层、治疗层和设备层的墙壁上均设有急停按钮，共 10 个，如图 4-14 所示。

（2）控制室的控制面板上设有 1 个急停按钮，如图 4-12 所示。

（3）治疗室内用于控制旋转机架、治疗床、治疗头等机械运动的两个手控器顶端均设有 1 个。

机房内急停按钮的数量列于表 4-2。目前机房内急停按钮点位的设计基本能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中对急停按钮点位的要求。

表 4-2 质子治疗机房内安全设施的数量

区域名称	急停按钮/个	清场搜索按钮/个	声光报警灯/个	摄像头/个	联锁门/个
设备层	4	4	5	1	1
治疗层	3+2（手控器）	3	4	1	1
检修层	3	3	4	2	1
控制室	1	——	——	——	——
总计	13	10	13	4	3



- A: 控制室内控制面板上的急停按钮
 B: 维修层、治疗层、设备层内部的急停按钮
 C: 治疗室内手控器顶端的急停按钮

图 4-13 质子治疗机房内急停按钮示例图

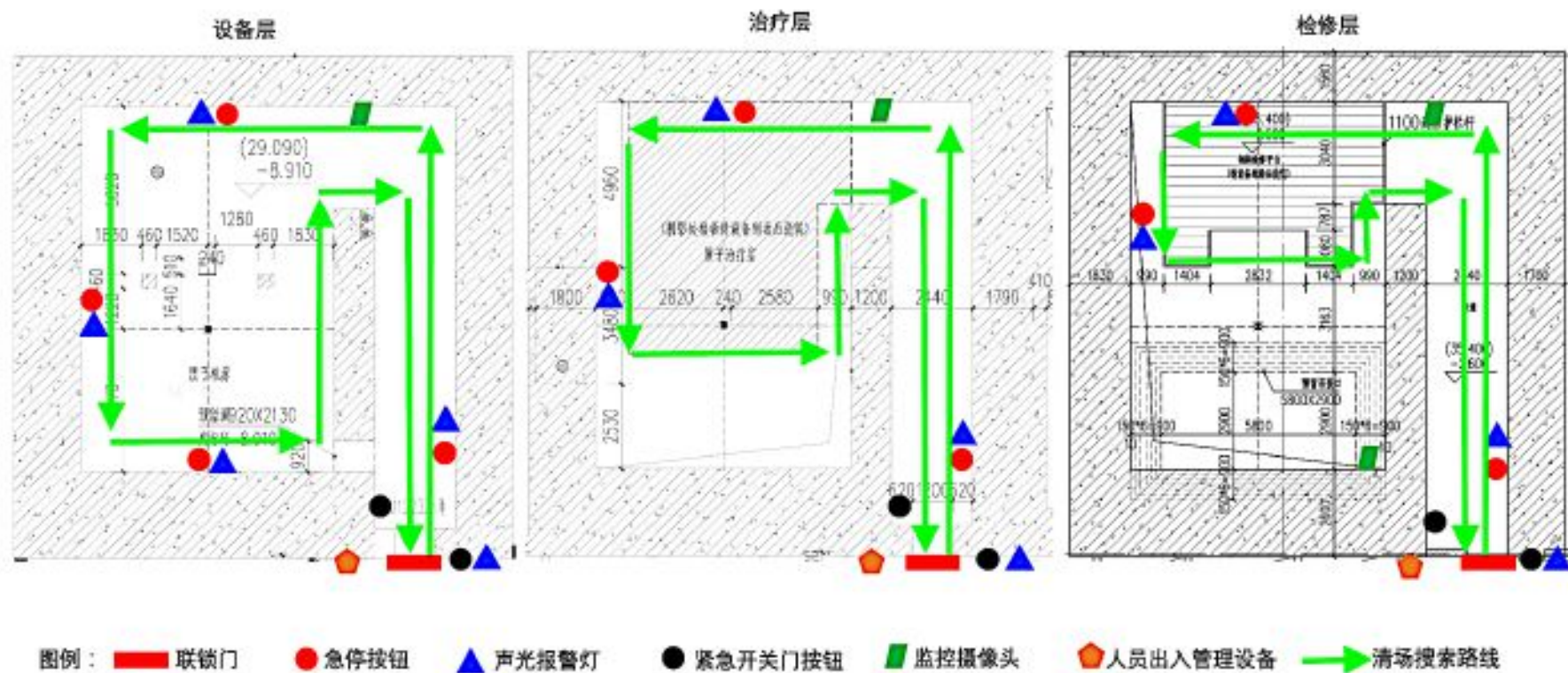


图 4-14 质子治疗机房内安全设施安装点位及清场搜索路线图

4.1.2.1.3.7 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。质子治疗机房内清场搜索按钮的安装点位和急停按钮安装点位一致，共设 10 个，如图 4-14 所示。

(1) 设备层和检修层的清场搜索按钮上方均设有带有报警器的指示灯，可对该区域的清场状态进行指示并发出报警信号。当清场搜索按钮被按下时，信号指示灯会变成长亮，通过时发出报警信号，提示无关人员离开，下一个等待按下的搜索按钮的指示灯会一直闪烁。

(2) 治疗层的清场搜索按钮上方设不带报警器的指示灯，当治疗层的清场搜索按钮被按下时，信号指示灯会变成长亮。

质子治疗机房的检修层、治疗层和设备层为三个独立的子区，各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。机房各区域的清场搜索路线如图 4-14 所示。只有三层都完成清场，且三个区域的门都已处于关闭状态时，才可满足供束条件。其中：

(1) 检修层和设备层的清场由质子治疗系统运维方迈胜公司的工作人员完成，工作人员需先经待搜索区域的授权，才能进入该区域内部进行清场搜索，按照既定的顺序按下清场搜索按钮，确认区域内无人，关闭区域联锁门，即完成该区域的清场搜索。每次清场搜索通常由两名工作人员共同完成。

(2) 治疗层的清场搜索由负责治疗的技师完成。确认治疗层内除患者外无其他人员停留，按下清场按钮，关闭防护门，完成治疗层的清场搜索。

(3) 清场人员确认治疗机房内所有清场按钮全部按下后，并将主控钥匙插回控制室的控制台上，此时安全联锁系统会给控制系统发送允许开机的信号。

各区域的清场搜索状态最终在控制室的终端显示屏上显示。任一清场状态被破坏（如门打开或清场按钮未按下），都需要重新进行清场。对于完成清场后的子

区，若其清场状态从未被破坏，则该层一直保持“已清场”的状态，下次开机出束前不需要对该层进行重新清场。

4.1.2.1.3.8 声光报警器

质子治疗机房的检修层、治疗层、设备层的内部和门外，都设有声光报警灯，报警灯通过不同颜色（通常采用红、黄、绿色）对控制区内的不同状态进行指示。其中，设备层和检修层的声光报警灯带有蜂鸣器可发出警报声。治疗层的声光报警灯不带蜂鸣器。

4.1.2.1.3.9 工作状态指示灯

质子治疗机房的检修层、治疗层、设备层的内部和门外均设有工作状态指示灯，以提示机房内磁场、质子束流和 X 射线的工作状态，如图 4-15~图 4-17 所示。



图 4-15 维修室内工作状态指示灯示例图



图 4-16 治疗层内工作状态指示灯示例图

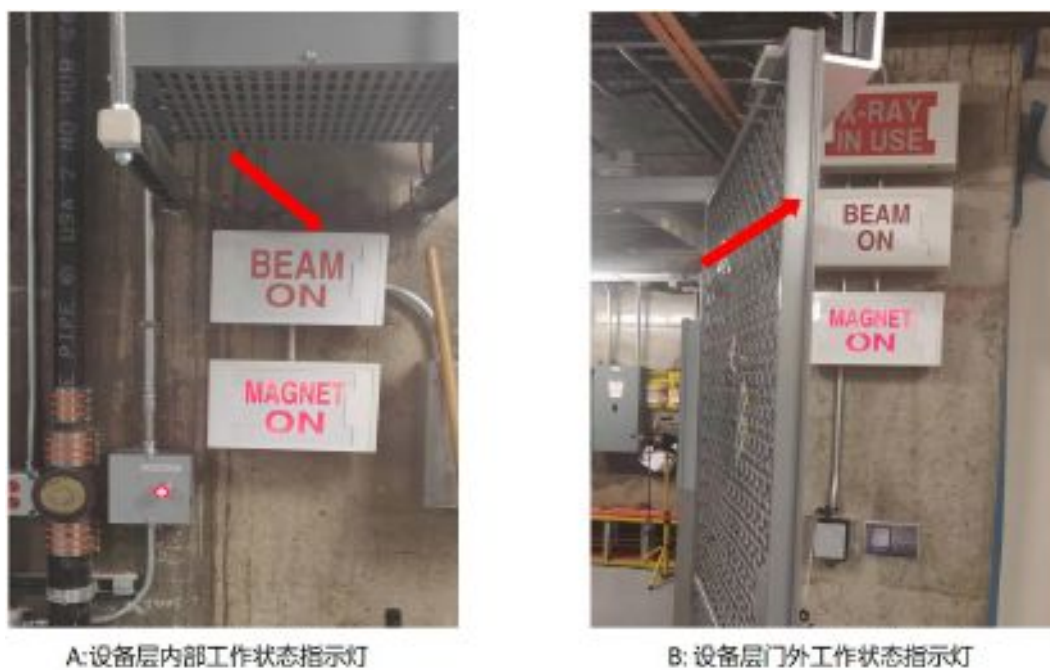


图 4-17 设备层工作状态指示灯示例图

4.1.2.1.3.10 状态监控和对讲装置

状态监控包括 LED 显示屏和摄像头。LED 显示屏设在控制室内，人身安全联锁系统中所有设备状态、联锁关系以及信息都在此显示，以确保工作人员随时监控安全联锁系统的运行状态。

治疗机房内检修层、治疗层以及机房层均设有摄像头，以便工作人员直观的观察各区域内人员的活动情况，摄像头的点位如图 4-14 所示。

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。

4.1.2.1.4 安全联锁逻辑

质子治疗系统人身安全联锁系统逻辑如下图 4-18 所示。只有当设备层、治疗层和检修层都完成“清场”、三个区域的联锁门都已处于关闭状态、设备层和检修层的人员出入管理设备均处于复位状态且控制室内控制钥匙归位，质子治疗系统才满足供束条件。任何一个条件被破坏，都将切断离子源高压，设备停止供束。

允许出束的逻辑如下：

- (1) 机房各层的清场按钮按规定顺序全部按下，清场程序生效；
- (2) 机房各层的急停按钮全部复位；
- (3) 机房各层出入口处的通道门全部处于关闭状态；
- (4) 检修层和机房层人员进出管理设备复位；
- (5) 控制室内控制面板上的主控钥匙归位。

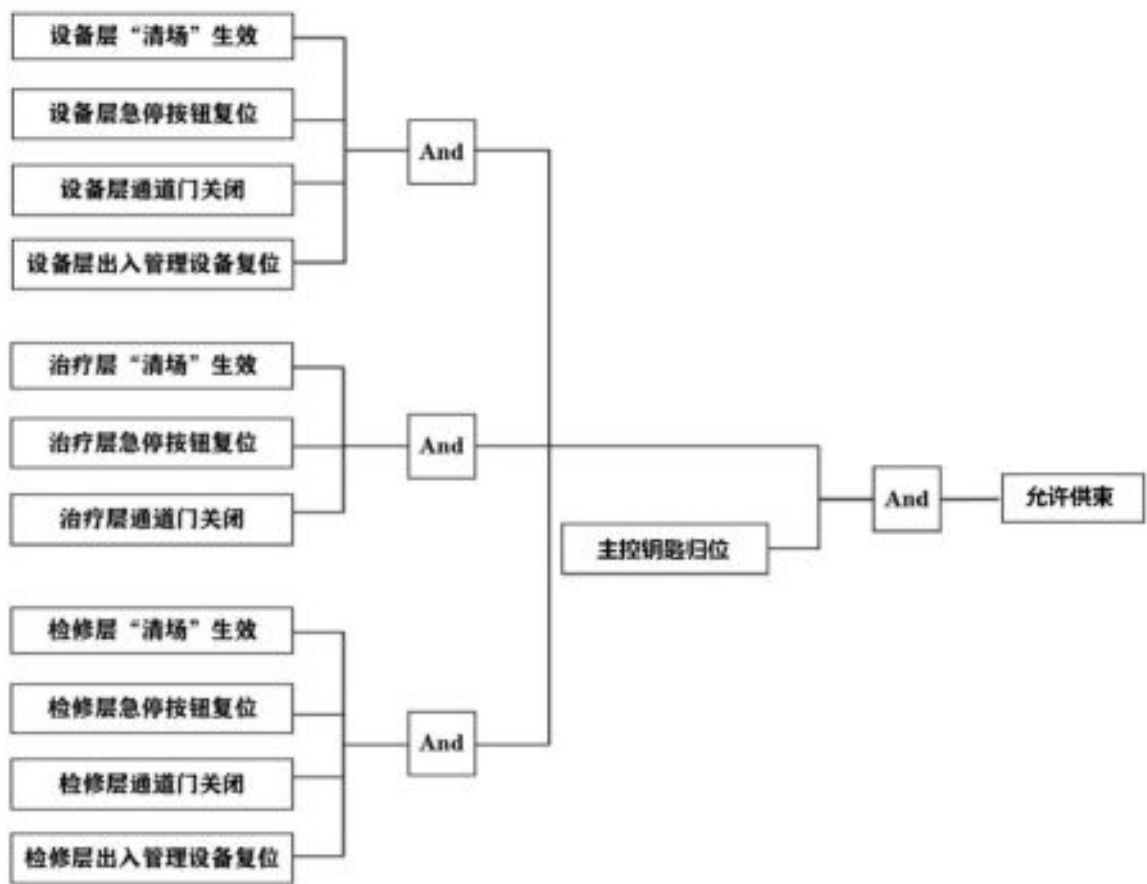


图 4-18 质子治疗系统安全联锁系统逻辑图

4.1.2.1.5 工作流程

人身安全联锁系统运行时，需按照特定的工作流程进行。质子治疗系统人身安全联锁系统的工作流程如图 4-19 所示。

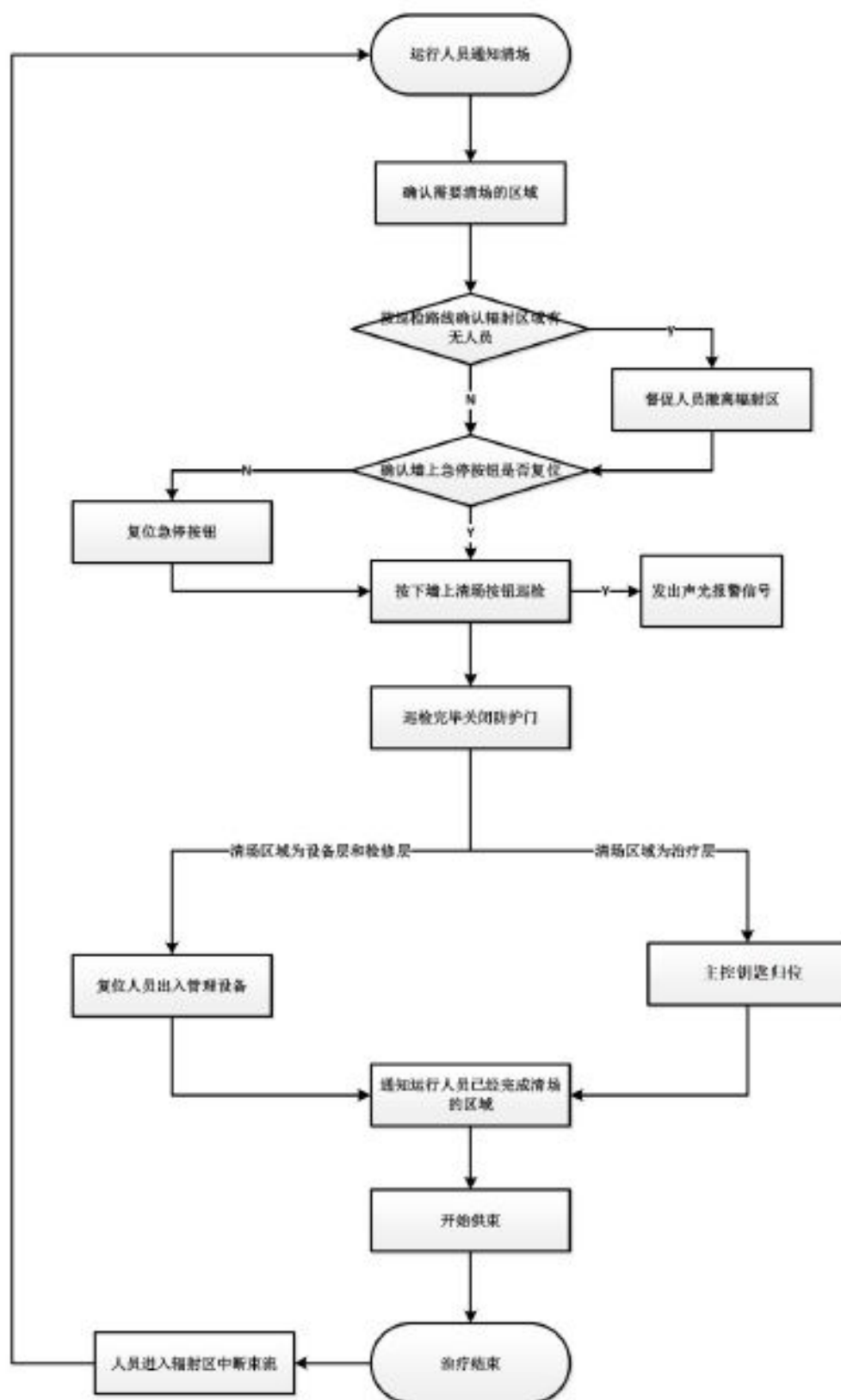


图 4-19 人身安全联锁系统的工作流程

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 4-20 所示。探测器用于测量辐射水平；数据采集单元用于采集探测器的输出信号和完成信号的加权处理、剂量率显示、本地报警及通讯；内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；监控计算机用于完成监测数据的日常分析与管理；中心管理计算机用于发布剂量监测数据；辐射防护数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据，包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型（ γ /中子）。

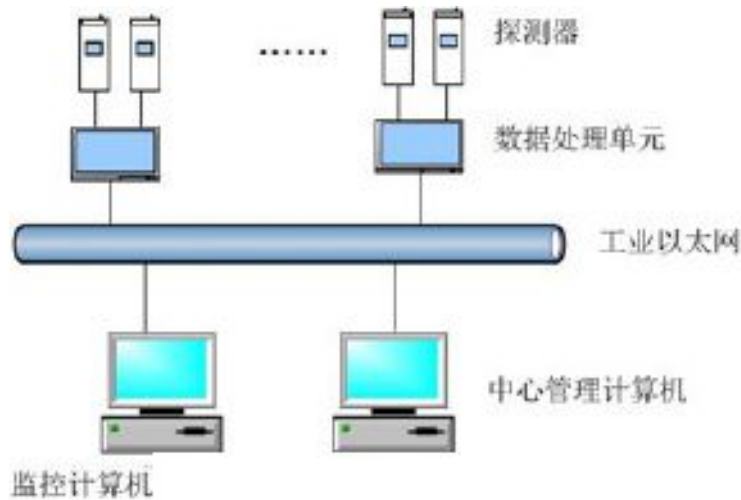


图 4-20 质子治疗系统场所辐射监测系统结构

质子治疗机房固定式辐射监测点位如图 4-21 所示，每个监测点由一台中子探测器和 γ 探测器组成，共设两个点位：

(1) 机房治疗层迷宫入口处设 1 个点位。主要功能是使工作人员进入可能会存在束流的高辐射水平场所内部之前先了解场所的辐射水平，避免开机时误入造成的误照射；

(2) 控制室内设 1 个点位。控制室紧邻治疗机房迷道外墙，且属于人员长居

留场所。避免在发生事故或意外情况下该区域剂量率水平超标,确保工作人员安全,在控制室内设固定式辐射监测仪器。

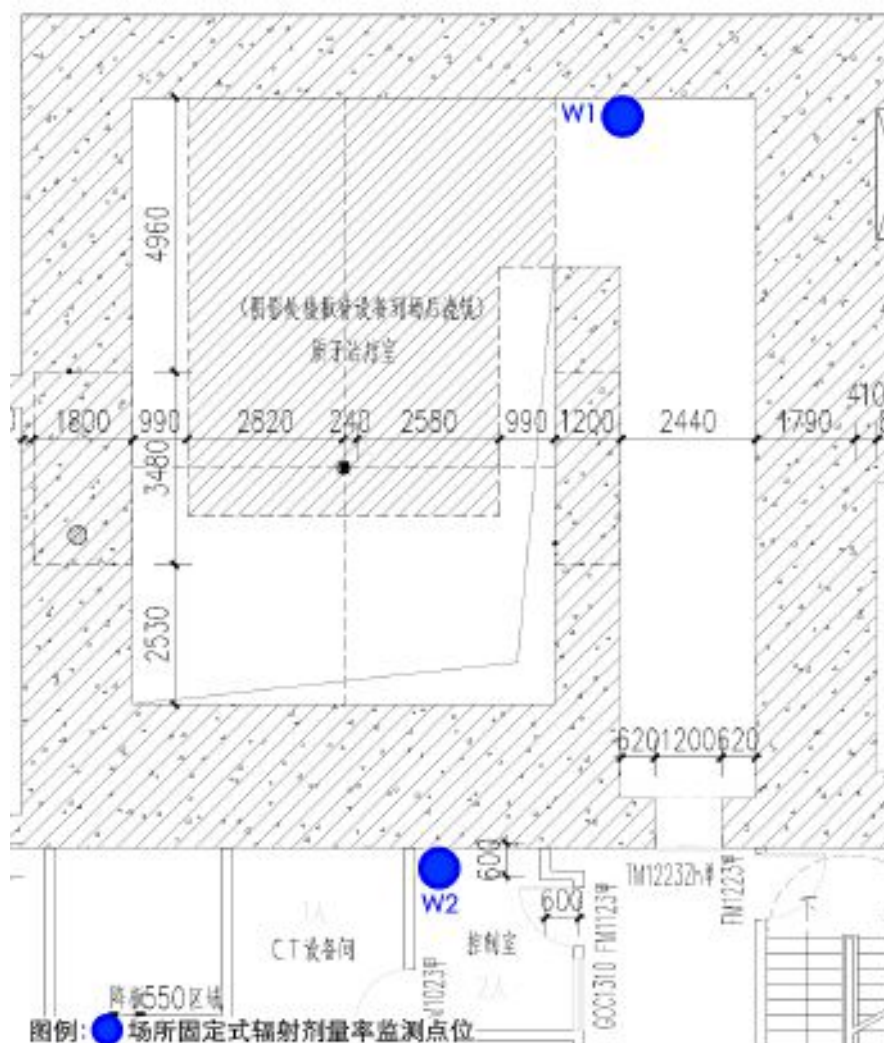


图 4-21 质子治疗机房场所辐射监测点位（治疗层）

4.1.2.2.2 探测器性能

4.1.2.2.2.1 区域中子探测器

本项目使用质子治疗系统的能量范围是 50~230MeV，其产生的最大中子能量范围热中子~230MeV。此外，针对质子治疗系统产生辐射场的特点，其性能指标应当满足以下条件：

- (1) 探测器对中子响应的能量范围不低于热中子~230MeV;

(2) 剂量率范围至少覆盖 $1\mu\text{Sv/h}\sim 100\text{mSv/h}$;

(3) 探测器具有强的中子分辨能力, 对 γ 射线的响应不至影响其对中子的测量结果;

(4) 探测器具备良好的可靠性, 包括环境适应性、抗电磁干扰能力等;

(5) 包括可设置报警阈值的声光报警部件, 在超过阈值时发出警报信号;

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

4.1.2.2.2 区域 γ 探测器

区域 γ 探测器的性能指标应当满足以下条件:

(1) 探测器对 γ 射线响应的能量范围不低于 $50\text{keV}\sim 3\text{MeV}$;

(2) 剂量率范围至少覆盖 $1\mu\text{Sv/h}\sim 10\text{Sv/h}$;

(3) 探测器具有强的 γ 射线分辨能力, 对中子的响应不至影响其对 γ 射线的测量结果;

(4) 探测器具备良好的可靠性, 包括环境适应性、抗电磁干扰能力等;

(5) 包括可设置报警阈值的声光报警部件, 在超过阈值时发出警报信号;

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

4.1.2.3 通风系统

质子治疗机房通风系统采用新风机进风、排风机排风的方式。进风管、排风管均通过治疗层迷道上方穿墙进入, 风管顶标高贴板顶。机房设置进风口一个, 位于机房治疗层吊顶西南侧; 设置排风口一个, 位于机房治疗层东北角, 与进风口形成对角, 底标高距地面 30cm 。机房进风风压 300Pa , 排风风压 367Pa , 机房内保持微负压状态。新风机位于负一层的新风机房; 排风机均位于裙房屋面, 风机出口设置

中效过滤和活性炭吸附装置。排风管由治疗层西南角经迷道向南引出至风井，最终向上引至裙房屋面排放。机房进风管道和排风管道布局如图 4-22 所示。质子治疗机房进风口和排风口在空间上呈对角设置，上进风、下排风，换气次数约为 12 次/h，满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中相关要求。

总排风口位于裙房屋面，排放高度约为 20m。排风口周围地面环境为院内道路和绿化用地，无人员长居留场所。且根据“5.1.1.4.2 节”放射性气体排放对周围各关注点处公众所致受照剂量的计算结果，放射性气体排放对周围环境的影响很小。因此，排风口的位置设置是合理的。

此外，质子治疗机房进风管、排风管、空调管均经迷道上方吊顶由防护门上方的防护墙穿出，穿墙方式为直穿，穿墙高度均在 2.6m 以上，如图 4-23 所示。为防止辐射泄漏，在各层管道出口处底部与吊顶之间铺设与该层防护门厚度相当的聚乙烯板作为屏蔽补偿。

表 4-3 质子治疗机房通风换气设计参数

区域名称	通风方式	气流走向	送风量， m³/h	排风量， m³/h	换气次数，次/时
质子治疗机房	新风机送风 排风机排风	上进风 下排风	1600	2000	12

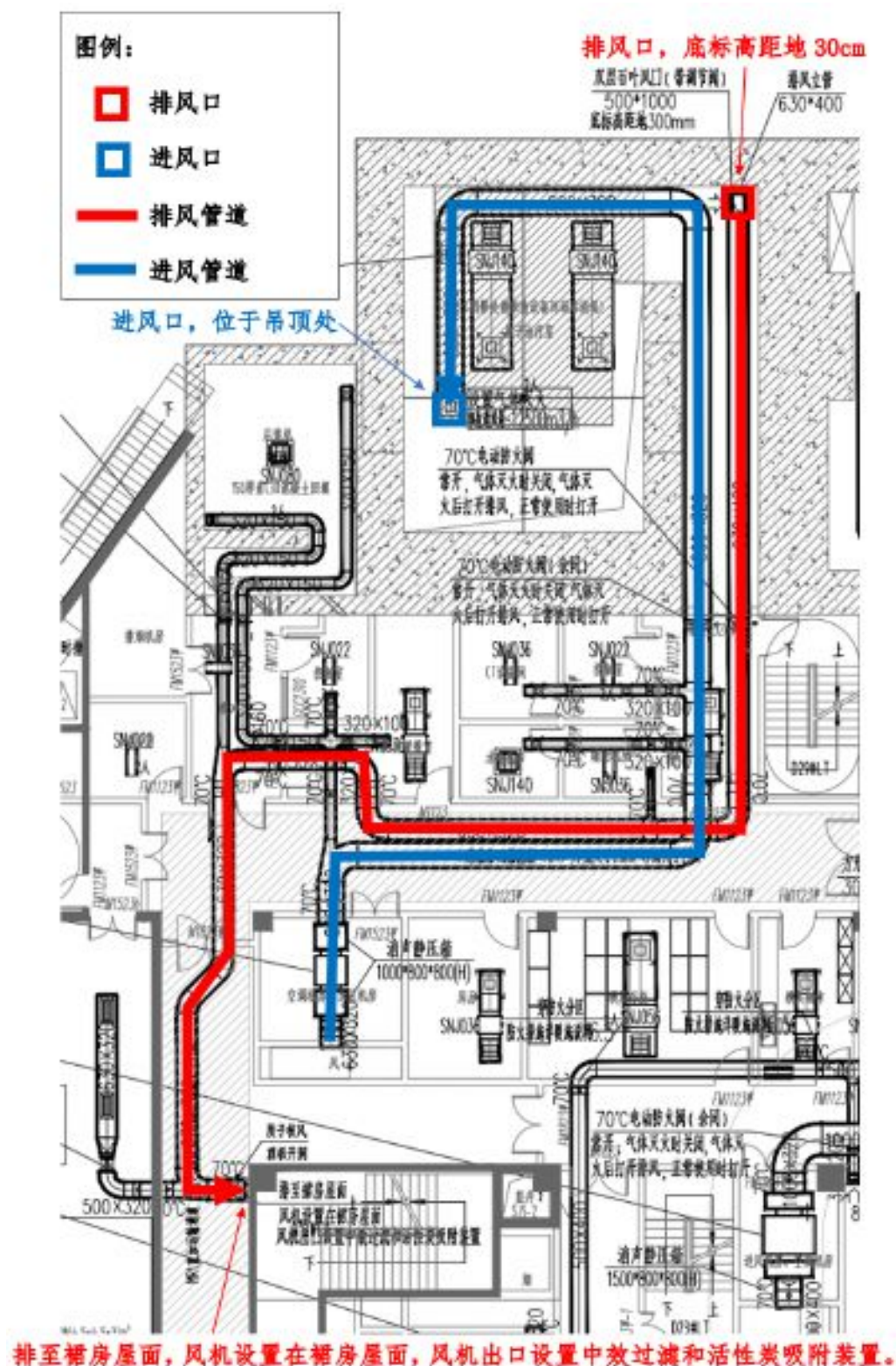
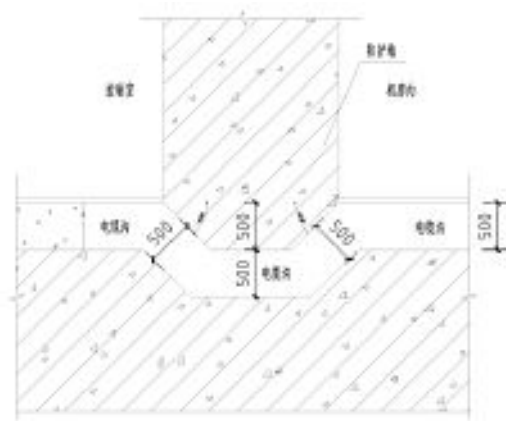
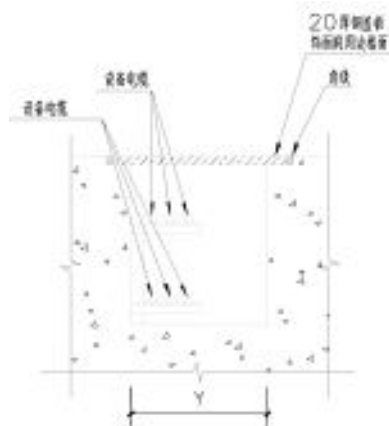


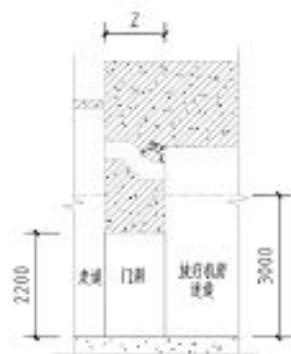
图 4-22 质子治疗机房进风管、排风管道走向图



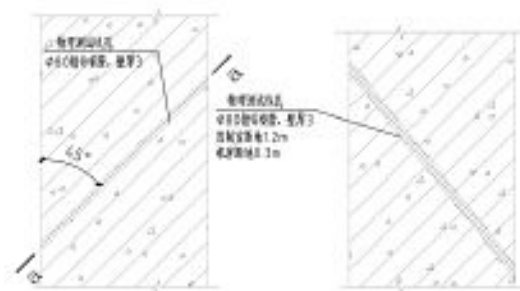
1、电缆沟穿墙大样图



2、电缆沟剖面大样图

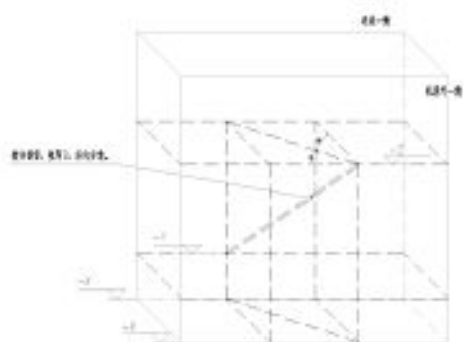


3、通风管穿墙节点大样图

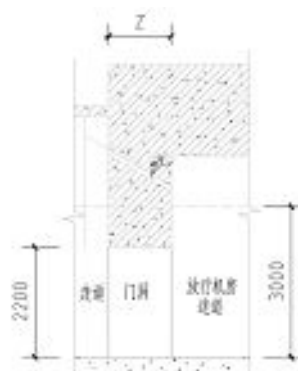


4、物理测试管线大样图

□-□



5、物理测试管线立面大样图



6、强弱电穿墙节点大样图

图 4-24 质子治疗机房管道穿墙示意图

4.1.2.4 警告标志

在质子治疗区的控制区进出口明显位置处设置醒目的电离辐射警告标志，在监督区入口处的适当位置设置表明监督区的标牌。

4.1.2.5 质子治疗系统运行维护期间的安全防护措施

本项目质子治疗系统的维修维护由迈胜负责。迈胜《销售（含建造）和使用 S250i 型质子治疗系统项目环境影响报告书》（以下简称“《报告书》”）已于 2021 年 1 月 28 日取得江苏省生态环境厅的批复（苏环审[2021]9 号），目前正在申请辐射安全许可证，在取得辐射安全许可证后方可从事本项目质子治疗系统的安装调试和维修维护工作。根据《报告书》及迈胜的工作许可制度文件，运行维护期间采取的主要安全防护措施如下。

4.1.2.5.1 剂量限值和报警阈值

迈胜的辐射工作人员在工作期间必须佩带个人剂量计和直读式个人剂量报警仪。个人剂量计每季度委托有相关资质单位监测一次，并由专门的辐射安全员负责存档；直读式个人剂量报警仪能够实时显示工作人员的累积受照剂量和场所的剂量率水平，当监测的剂量率水平超过报警阈值时，即发出报警信号。

4.1.2.5.1.1 剂量限值

迈胜对其辐射工作人员实行累积剂量控制方式，其剂量管理目标值为：

- （1）年受照剂量管理目标值为 5mSv；
- （2）单次工作受照剂量管理目标值为 1mSv。

每天的工作任务结束后，辐射工作人员需记录该次任务的时间和受照剂量，由用户现场的辐射安全人员负责对各辐射工作人员的受照剂量进行汇总统计。一旦发现工作人员的单次受照剂量或年受照剂量接近其管理目标值，则对该辐射工作人员进行提醒。并在下次工作计划中，合理安排其工作量。

4.1.2.5.1.2 报警阈值

根据迈胜的规章制度，针对运行维护期间进入治疗机房内部不同类型的工作设置了一定的许可条件和剂量率报警阈值，具体列于表 4-4。当拟工作区域的剂量率超过报警阈值时，个人报警仪即发出报警信号，提醒其结束工作。

表 4-4 运行维护期间进入治疗机房内部工作的许可条件和剂量率报警阈值

维护维修区域		辐射工作许可条件
需要打开加速器的工况	加速器中心区域维修	入口处辐射剂量率应低于 50 μ Sv/h； 加速器内部关键零部件表面 30cm 处的剂量率低于 300 μ Sv/h。
	加速器引出系统维修	
不需要打开加速器的工况	扫描磁铁维修	入口处辐射剂量率应低于 50 μ Sv/h； 关键零部件表面 30cm 处的剂量率低于 200 μ Sv/h。
	剂量监测系统维修	
	射程调节器维修	
	自适应准直器维修	
治疗机房内其他维修工作		机房入口处辐射剂量率应低于 30 μ Sv/h，当需要使用 X 射线时，应在治疗室内 X 射线操作间。

4.1.2.5.2 工作人员受照剂量控制

对所有可能接触放射性污染工作，尤其是接触加速器内部和高放射性水平的活化部件，工作人员必须穿戴工作服、手套及鞋套等防护用品。对于有可能接触高放射性水平结构部件的工作，在工作前，必须由现场工程师对即将工作区域的辐射剂量率水平进行监测并记录，再根据本次任务可能的工作时间，估算出本次任务期间工作人员最大受照剂量，并以此为依据制定工作计划，安排工作量，设置工作人员单次工作累积剂量报警阈值。当报警仪发出提示音，工作人员即结束本次工作任务，剩下的工作由其他工作人员继续完成。

4.1.3 放射性三废处理

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

放射性核素为 ^{13}N ($T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$)、 ^{15}O ($T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$)、 ^{11}C ($T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$) 和 ^{41}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。质子治疗机房各层均设有排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体经机房排风管排入环境。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，结合第五章的计算结果，其对环境的影响很小。

4.1.3.2 放射性废液及其处理措施

本项目产生的放射性废液主要是活化的冷却水。质子治疗系统所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素见表 3-13。除 ^7Be 、 ^3H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。根据对冷却水感生放射性核素活度浓度的计算结果，活化冷却水的活度浓度仅为 11.2Bq/L ，远低于 ^3H 和 ^7Be 的单次和单月排放限值。

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时才需要排放。本项目在负二层质子治疗机房南侧设有污水间，污水间集水坑内设置 $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}\times 0.8\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 成品不锈钢蓄水罐，容积约 0.5m^3 ，用于暂存质子机房更换下来的活化冷却水，如图 4-25 所示。可能被活化的冷却水回路中总水量约为 0.16m^3 ，每年最多检修排放次数为 2 次，年最大排放量为 0.32m^3 ，该蓄水罐能够满足活化冷却水的暂存要求。蓄水罐通过管道与质子治疗机房地漏相连。蓄水罐的标高低于质子治疗机房地板标高，且质子治疗机房设自流坡度确保冷却水能够自流并通过机房内地漏排入该蓄水罐内暂存。

蓄水罐上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.4.1 节”所列中放射性废水排放标准，方可排放。

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，且采取了有效的冷却水收集和暂

存措施。因此，放射性废液对环境的影响很小。

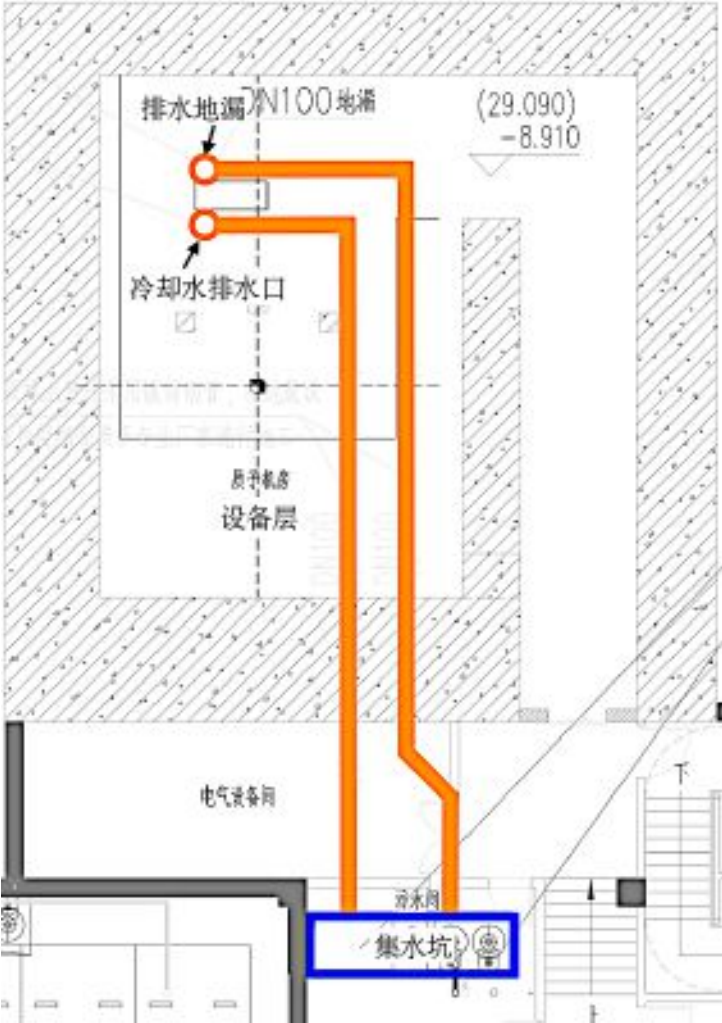


图 4-25 质子治疗系统冷却水蓄水罐位置示意图

4.1.3.3 放射性固体废物及其处理措施

4.1.3.3.1 放射性固体废物来源

Mevion S250i 质子治疗系统的常规操作期间不会产生放射性固体废物。参照国外同类型质子治疗系统的运行经验，其产生的主要放射性固体废物为维护维修环节更换下来的一些易损易活化的结构部件，主要部件名称和最大年产生量列于表 4-5。这些放射性固体废物的主要材料是钢、碳和镍，其主要的感生放射性核素及其半衰期列于表 4-6。停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是 ^{54}Mn 、

^{51}Cr 、 ^{52}Mn 、 ^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。

表 4-5 Mevion S250i 质子治疗系统维修期间产生的活化结构部件

部件名称	数量	重量, kg
中心加速场组件	2	7
离子源探针	1	13
自适应光栅	1	34
射程调节器	1	163
扫描磁铁	1	136
传输电离室	2	7
总计	——	374

表 4-6 活化结构部件主要感生放射性核素及其半衰期

靶材料	放射性核素	半衰期	靶材料	放射性核素	半衰期
碳	^3H	12.3a	钢	^{51}Cr	27.8d
	^7Be	53.6d		^{52}Mn	5.55d
	^{11}C	20.4min		$^{52\text{m}}\text{Mn}$	21.3min
钢	同上述核素加 以下核素	——		^{54}Mn	300d
	^{22}Na	2.60a		^{56}Co	77d
	^{24}Na	15.0h		^{57}Co	270d
	^{42}K	12.47h		^{58}Co	72d
	^{43}K	22.4h		^{55}Fe	2.94a
	^{44}Sc	3.92h	镍	^{58}Fe	5.1d
	$^{44\text{m}}\text{Sc}$	2.44d		同上加以下	
	^{46}Sc	83.8d		^{65}Ni	2.56h
	^{47}Sc	3.43d		^{61}Cu	3.33h
	^{49}Sc	0.956h		^{62}Cu	9.80min
	^{48}V	16.0d		^{64}Cu	12.82h

4.1.3.3.2 放射性固体废物处理措施

活化结构部件的年产生量约为 374kg，暂存在质子治疗机房最底层即设备层的西北角区域带锁的铁箱内，如图 4-26 所示。铁箱的尺寸约为 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ ，铁箱的厚度应确保箱体外剂量率水平不高于 $10\mu\text{Sv/h}$ 。铁箱上贴有电离辐射警告标志和标签，标明废物名称、数量、剂量率水平和存放日期等信息。并配备专门的管理人员，负责放射性固体废物的安全管理以及铁箱钥匙的保管。

当废物箱内废物暂存量接近废物箱容积的 $2/3$ 时，由医院委托有资质单位进行集中测量分析：

（1）对于满足“1.4.4.2 节”所列解控标准的：

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

（2）对于不满足“1.4.4.2 节”所列解控标准的，由医院委托有资质单位处理。

医院需对每次放射性固体废物的处理情况进行记录并存档，具体记录内容包括每次处理的固体废物名称种类、废物量、剂量率监测结果以及最终去向等。

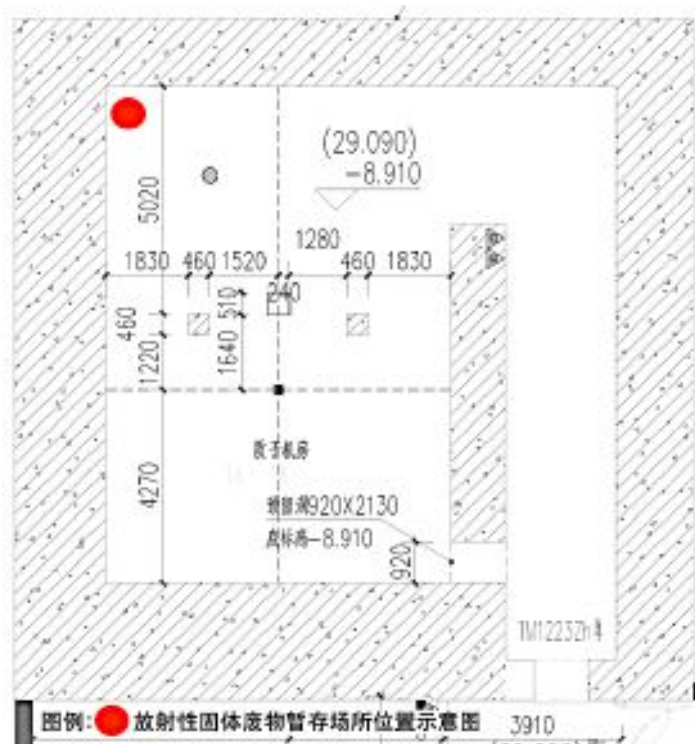


图 4-26 设备层放射性固体废物暂存场所位置示意图

4.1.4 拟采取的辐射安全与防护措施与相关要求的符合性分析

质子治疗系统拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中相关要求的对比情况列于表 4-7。

4.2 服务期满后的环境保护措施

质子治疗系统终止运行后可能产生放射性污染，因搬迁等原因不再使用时，医院应编制相应的退役方案、制定退役目标，确保放射性废物得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

表 4-7 质子治疗系统拟采取的辐射安全与防护措施与《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）中相关要求对比

标准名称	标准要求		本项目建设情况
《放射治疗放射防护要求》 （GBZ121-2020）	6.1 布局要求	6.1.1 放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。	质子治疗机房拟建于地下车库的西北角区域，其辐射屏蔽墙体、放射性三废处理设施均与机房主体同时设计和建造。
		6.1.2 放射治疗工作场所应分为控制区和监督区。治疗机房、迷路应设置为控制区；其他相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需经常检查其职业照射条件的区域设为监督区。	质子治疗系统辐射工作场所按控制区和监督区划分，其中质子治疗机房内部为控制区，质子治疗机房四周屏蔽体外相邻场所为监督区。
		6.1.3 治疗机房有用线束照射方向的防护屏蔽应满足主射线束的屏蔽要求，其余方向的防护屏蔽应满足漏射线及散射线的屏蔽要求。	质子治疗机房北墙、顶板和地板为主束照射方向，机房防护屏蔽时均考虑了这三个方向照射时的防护设计。
		6.1.4 治疗设备控制室应与治疗机房分开设置，治疗设备辅助机械、电器、水冷设备，凡是可以与治疗设备分离的，尽可能设置于治疗机房外。	本项目控制室、设备间、配电间等辅助用房均与质子治疗机房分开设置。
		6.1.5 应合理设置有用线束的朝向，直接与治疗机房相连的治疗设备的控制室和其他居留因子较大的用室，尽可能避开被有用线束直接照射。	质子治疗机房北墙、顶板和地板为主束照射方向，这些墙外无人员长居留场所和其他居留因子角打的用房，控制室设在机房东墙（迷道外墙）外，避开主束照射方向。
		6.1.6 X 射线管治疗设备的治疗机房、术中放射治疗手术室可不设迷路； γ 刀治疗设备的治疗机房，根据场所空间和环境条件，确定是否选用迷路；其他治疗机房均应设置迷路。	质子治疗机房设置迷路。
	6.2 空间、通风要求	6.2.1 放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需要。	质子治疗机房有效使用面积约为 76m ² ，能够满足临床应用需要。
		6.2.2 放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部，进风口与排风	质子治疗机房设置强制排风系统，新风口设在机房治疗层西南侧的吊顶处，排风口设在机房治疗

		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。	层迷道东北侧距地 30cm 处，空间上呈上进下出、对角设置，换气次数为 12 次/h。
	6.3 屏蔽要求	6.3.1 治疗机房墙和入口门外关注点周围剂量当量率参考控制水平；治疗机房顶屏蔽的周围剂量当量率参考控制水平。	按照 6.3.1 节和 6.3.2 节要求确定了质子治疗机房屏蔽体外关注处剂量率控制水平。
		6.3.3 屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能和经济因素，符合最优化要求，新建机房一般选用普通混凝土。	质子治疗机房屏蔽墙体采用普通混凝土作为屏蔽材料。
	6.4 安全装置和警示标志要求	6.4.2 放射治疗设备都应安装门机联锁装置或设施，治疗机房应有从室内开启治疗机房门的装置，防护门应有防挤压功能。	质子治疗机房设有门机联锁装置，门内设有开门装置，防护门有防挤压功能。
		6.4.3 医疗机构应当对下列放射治疗设备和场所设置醒目的警告标志： a) 放射治疗工作场所的入口处，设有电离辐射警告标志； b) 放射治疗工作场所应在控制区进出口及其他适当位置，设有电离辐射警告标志和工作状态指示灯。	质子治疗机房各层迷道入口处均设有电离辐射中文警告标志和工作状态指示灯。
		6.4.4 放射治疗设备控制台上应设置急停开关，除移动加速器机房外，放射治疗机房内设置的急停开关应能使机房内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。通常应在机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧和控制台等处设置。	质子治疗机房控制室的控制台设有 1 个急停开关。机房内各方向的墙壁、迷道入口门旁以及治疗层的手控器上均设有急停开关。
		6.4.6 控制室应设有在实施治疗过程中观察患者状态、治疗床和迷路区域情况的视频装置；还应设置对讲交流系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。	质子治疗机房各层均设有摄像头，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。

5 辐射环境影响分析

5.1 质子治疗系统

5.1.1 正常运行的环境影响分析

5.1.1.1 系统年使用规划

根据建设单位提供的资料，本项目质子治疗系统的年使用规划列于表 5-1。

表 5-1 本项目质子治疗系统的年使用规划

质子治疗系统每小时治疗人次	3 人次/小时
每天治疗时间	16 小时/天
每天治疗人次	48 人次/天
每年治疗天数	250 天
每年治疗人次	12000 人次
每次治疗的平均出束时间	4min
每间质子治疗机房每年治疗病人的出束时间	800h
每间质子治疗机房每年质检的出束时间	250h
每间质子治疗机房每年总出束时间	1050

5.1.1.2 机房屏蔽体外剂量率计算

5.1.1.2.1 计算时使用的源项和模型

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辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平。通过分析表 3-3~表 3-4 给出的束流损失参数可知，当治疗能量为 230MeV 时，治疗机房内辐射场源项最大。因此，本次评价以该能量下的束流损失参数为依据进行计算。同时，当治疗能量为 70MeV 时，回旋加速器处的束流损失高于治疗能量 230MeV 时的束流损失，为 1nA。因此，计算将治疗能量 230MeV 时回旋加速器处的束流损失设为 1nA，具体列于表 5-2。

表 5-2 屏蔽计算时考虑的束流损失源项

损失位置	质子能量 /MeV	损失流强 /nA	靶材料	损失方式	照射患者的 方向
回旋加速 器内部	230	1	Fe（用厂家给的 结构模拟）	均匀损失（圆周均匀 线损，采用 35cm 半 径的圆周切向源）	0°~180°可 调，模拟 0°（竖直 向下）、 90°（水 平朝 北）、 180°（竖 直向上）
自适应准 直器	230	0.2	Ni（采用内半径 0.2cm、外半径 10cm、高 10cm 的空心圆柱代 替）	集中损失（准直孔周 边，采用半径 2cm 的圆周轴向源）	
患者	230	1.2	人体组织（采用 40cm×40cm 的 圆柱体模）	集中损失（采用单向 点源）	

计算各束流损失点的结构具体如下：

（1）加速器处的 1nA 的束流损失为平面上的均匀损失，计算时考虑了加速器自身结构的屏蔽作用。加速器为半径 66.5cm、高 137cm 的真空盒，真空盒上下各 1 块半径 66.5cm、高 50cm 的铁磁极，自屏蔽层由内向外分别为厚 30cm 的铁磁轭、厚 5cm 的含硼聚乙烯和厚 13cm 的不锈钢，如图 5-1 所示。

（2）自适应准直器厚度为 10cm，材质为 Ni，束流损失为 0.2nA；

（3）治疗终端的患者以直径 40cm 的水球代替，放置于等中心点，束流损失为 1.2nA；

（4）屏蔽体材料选用密度为 2.35g/cm³ 的普通混凝土，元素组成列于表 5-3。土壤元素组成选用《Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling》中推荐元素，密度保守取 1.0g/cm³，如表 5-3 所示。

表 5-3 屏蔽计算时使用的混凝土和土壤成分

元素	混凝土（密度 2.35g/cm ³ ）	土壤（密度 1.0g/cm ³ ）
	含量（质量比）	含量（质量比）
H	0.01	0.0238
O	0.529107	0.599

Al	0.033872	0.08
Si	0.337021	0.297
C	0.001	——
Mg	0.002	——
Ca	0.044	——
Na	0.01	——
K	0.013	——
Fe	0.014	——

表 5-4 质子治疗机房屏蔽体厚度设计方案

屏蔽体	屏蔽厚度	外部环境	剂量率控制水平
治疗室北墙	1.5m 混凝土	土壤层	1mSv/h
治疗室西墙	2m 混凝土	后装机	2.5μSv/h
		土壤	1mSv/h
治疗室东墙	2.2m、3m 混凝土	直加治疗室	2.5μSv/h
	1.7m 混凝土	土壤层	1mSv/h
治疗室南墙	2.6m 混凝土	控制室、走道、等候区等	2.5μSv/h
治疗室迷宫内墙	1.2m 混凝土（地下夹层开有宽 92cm、高 2.13m 的洞）	迷宫通道	控制区
治疗室顶墙	3.6m 混凝土+0.5m 土壤层	地面	2.5μSv/h
地板	1.3m 混凝土	土壤层	1mSv/h
防护门	地下二层：14cm 聚乙烯 地下一层：7cm 聚乙烯 检修层：7cm 聚乙烯	控制室、走道等	2.5μSv/h
风管	前向 5cm、侧向 3cm 聚乙烯	控制室、走道等	2.5μSv/h

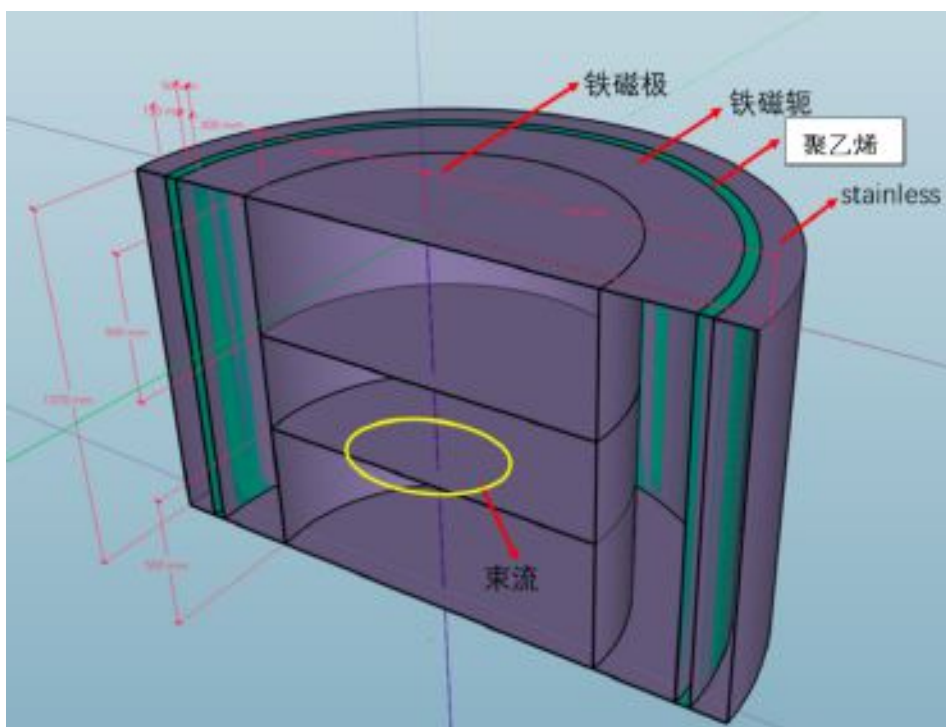


图 5-1 回旋加速器结构剖面

计算时使用计算模型如下图所示。

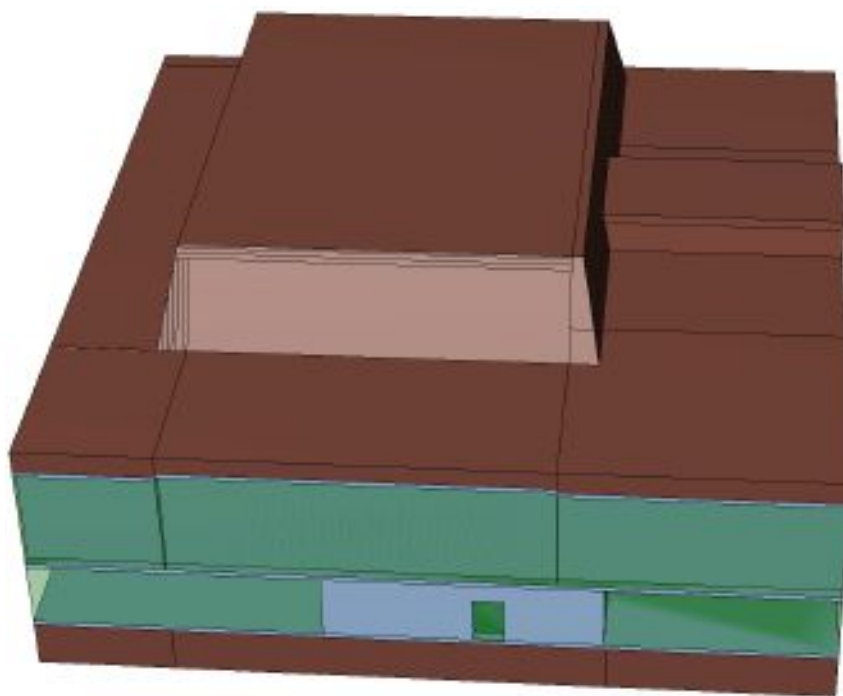


图 5-2 模拟计算建立的三维模型由南向北看的俯视图（整体外观）

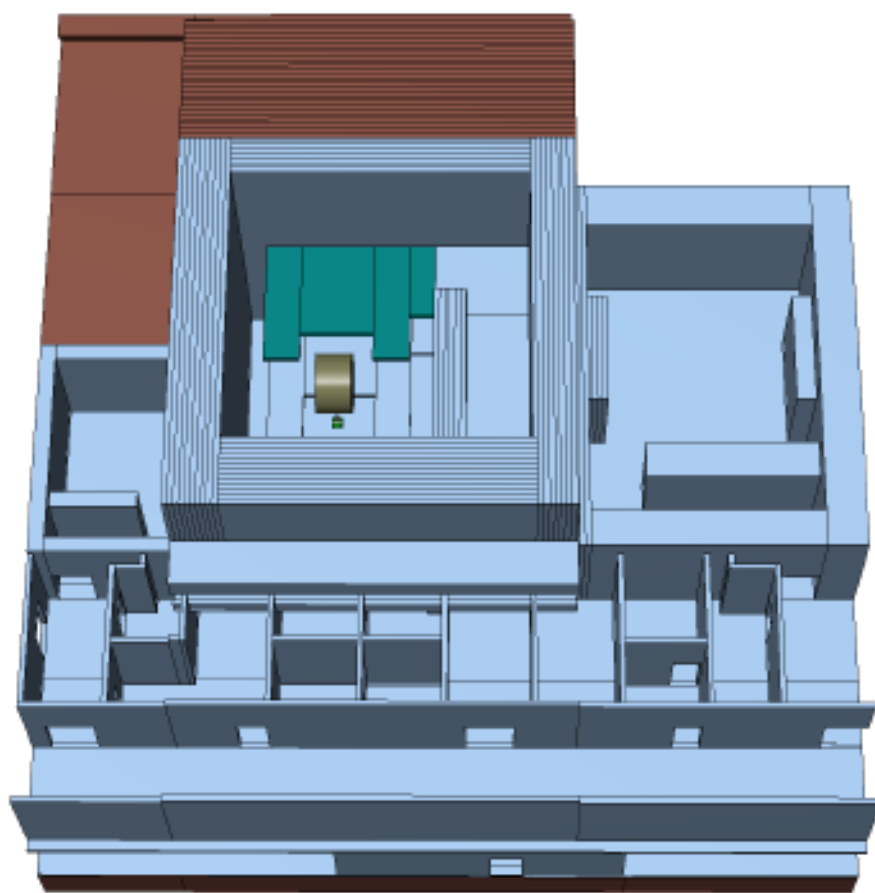


图 5-3 模拟计算建立的三维模型由南向北看的俯视图（顶墙屏蔽未显示）

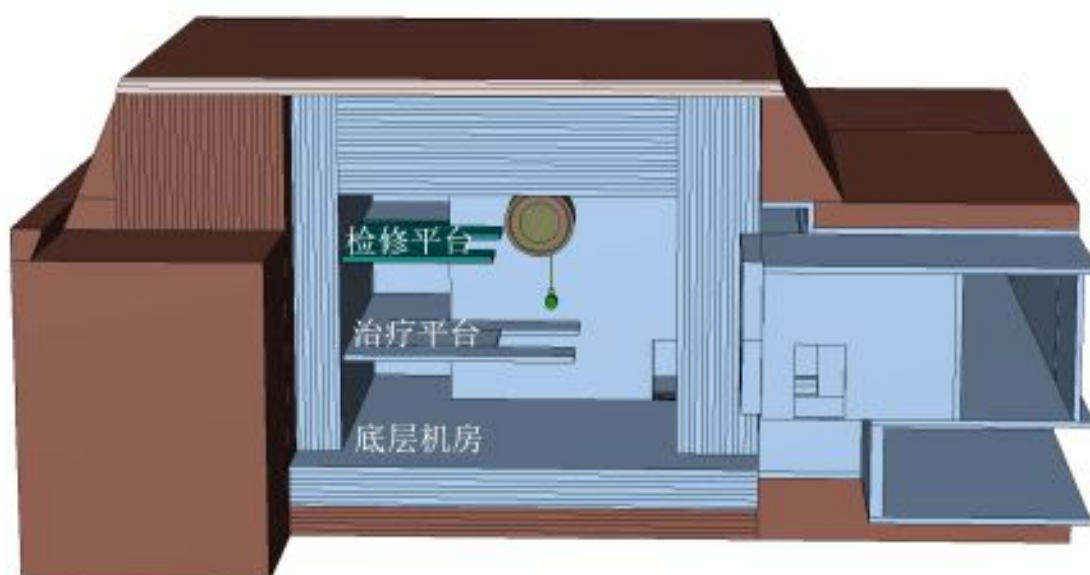


图 5-4 模拟计算建立的三维模型由西向东看的侧视图（后装机和西墙屏蔽未显示）



图 5-5 模拟计算建立的三维模型由南向北看的正视图（走廊外墙未显示）

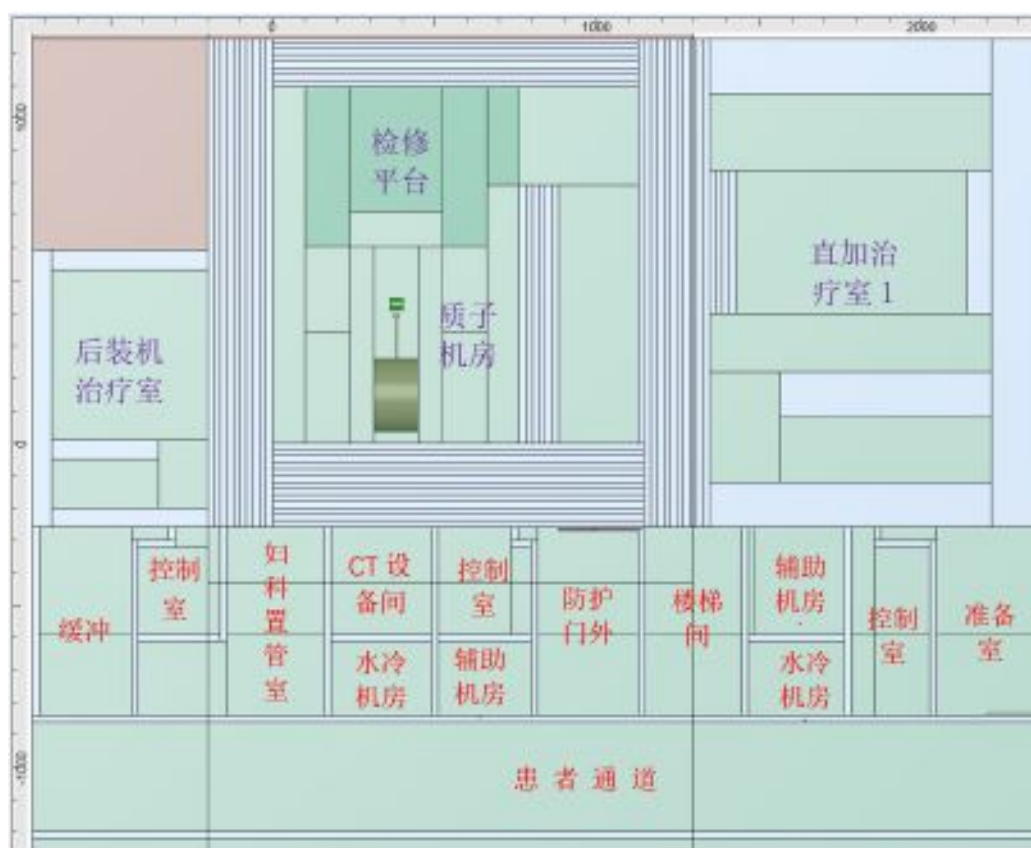


图 5-6 模拟计算建立的三维模型的俯视图（显示地下一层）

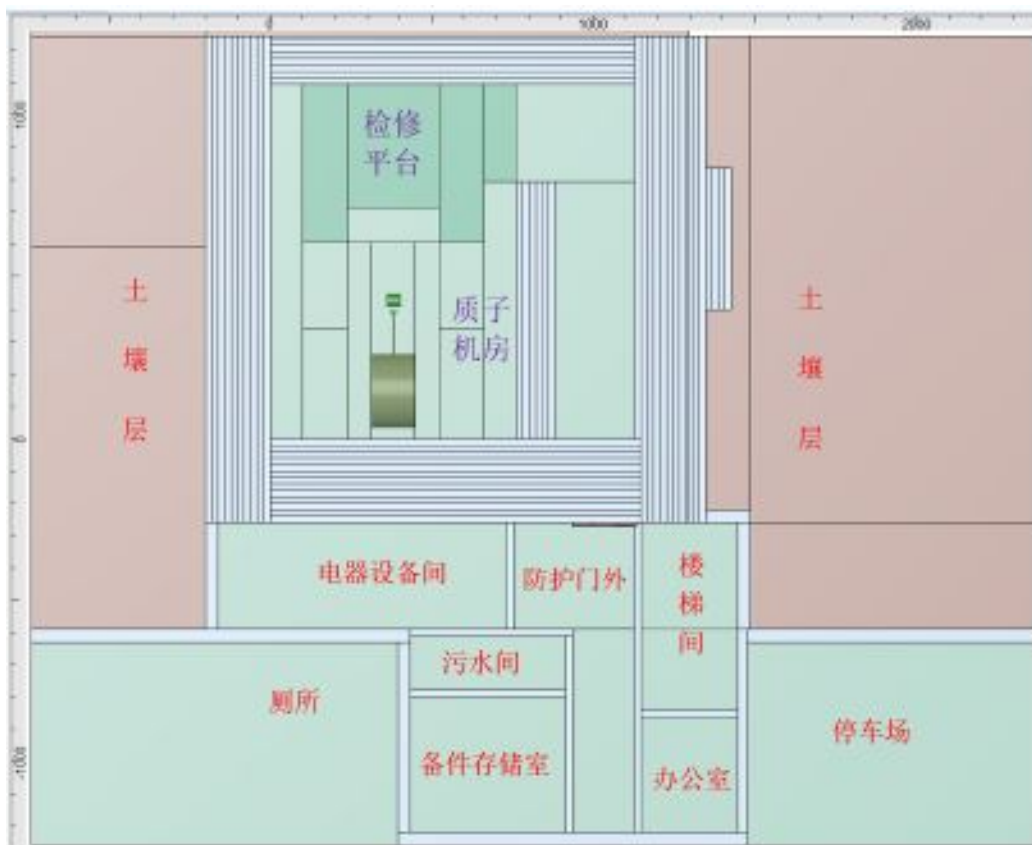


图 5-7 模拟计算建立的三维模型的俯视图（显示地下二层）

5.1.1.2.2 计算结果

本项目使用的 MEVION S250i 质子治疗系统的加速器和治疗头可自垂直向下（ 0° ）至竖直向上（ 180° ）旋转，其束流方向主要朝向治疗机房的地板、北侧墙和机房顶。考虑到束流方向为垂直向下（ 0° ）、水平向西（ 90° ）、竖直向上（ 180° ）和时，束流穿透屏蔽墙体的厚度最小。因此，本次评价主要针对 0° 、 90° 和 180° 照射的情况进行屏蔽计算。计算结果考虑了中子剂量率和 γ 剂量率之和。

5.1.1.2.2.1 竖直向下照射（ 0° ）

竖直向下照射时质子治疗机房各层剂量率分布图如下图所示。

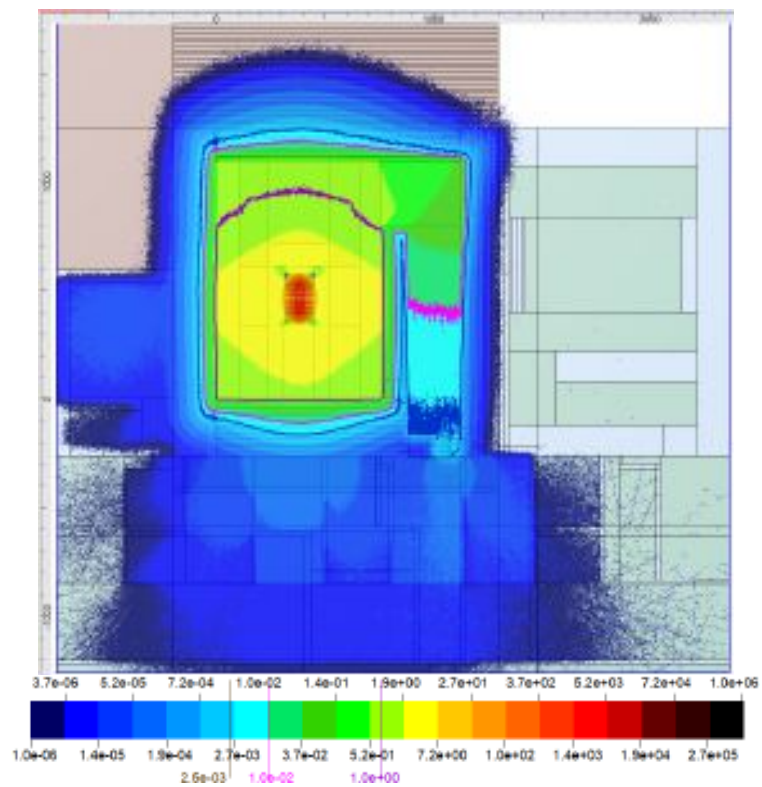


图 5-8 竖直向下照射 (0°) 检修层剂量率分布 (单位: mSv/h)

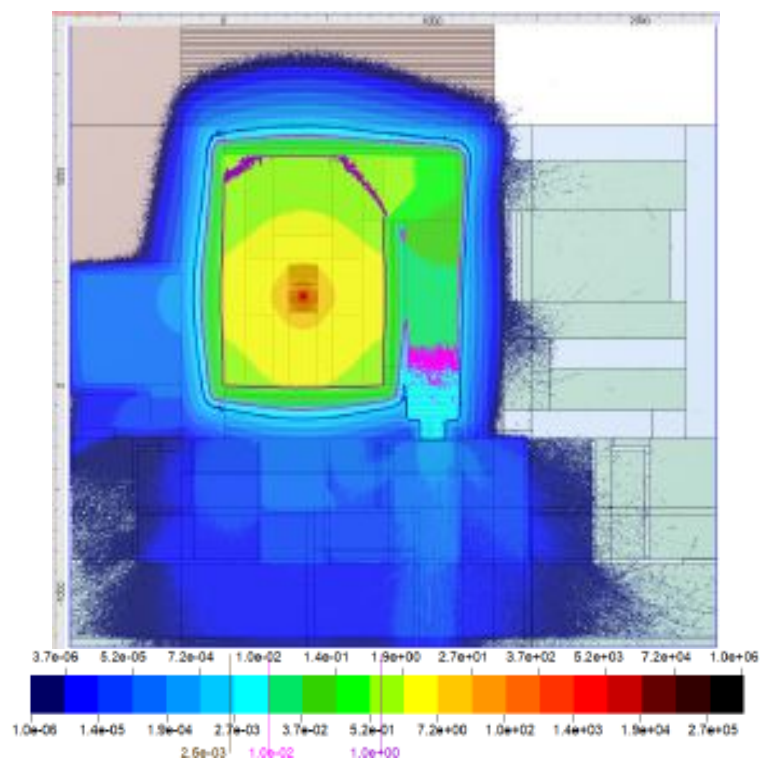


图 5-9 竖直向下照射 (0°) 地下一层剂量率分布 (单位: mSv/h)

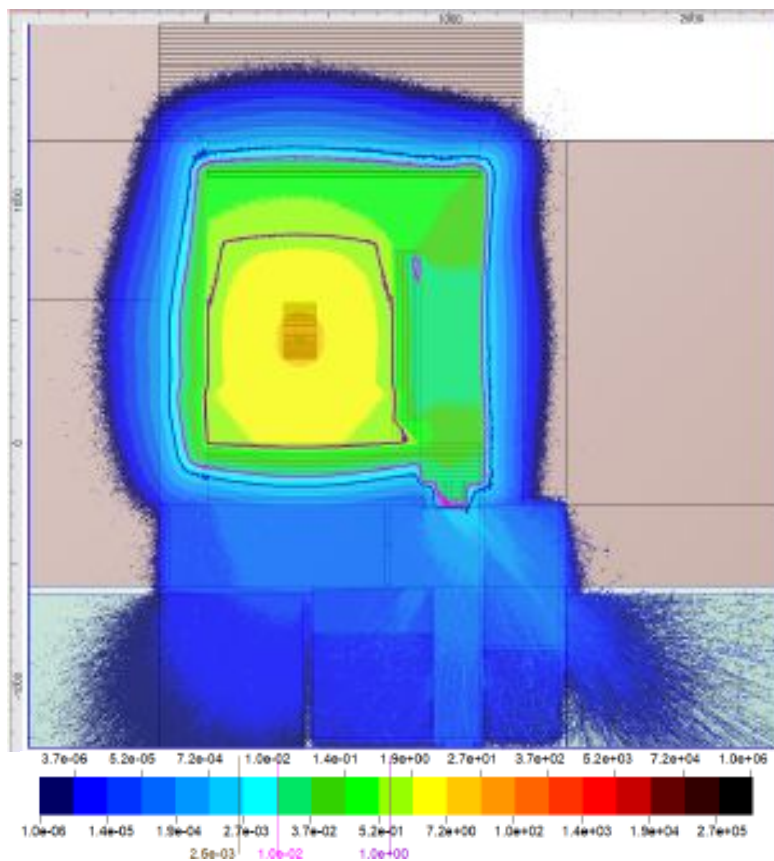


图 5-10 竖直向下照射 (0°) 地下二层剂量率分布 (单位: mSv/h)

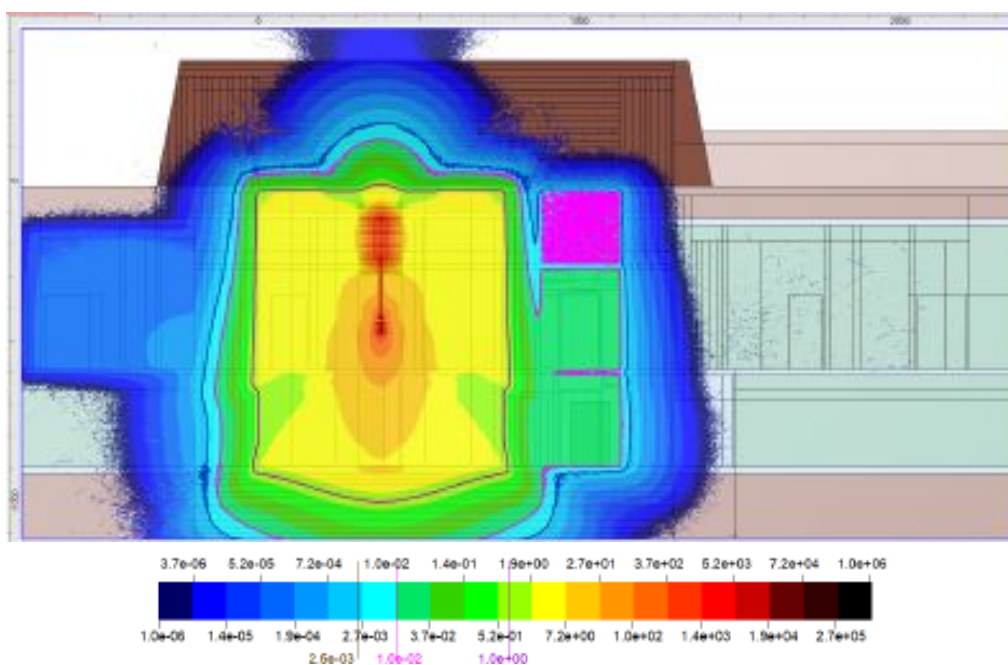


图 5-11 竖直向下照射 (0°) 过等中心点垂直束流的剂量率分布 (单位: mSv/h)

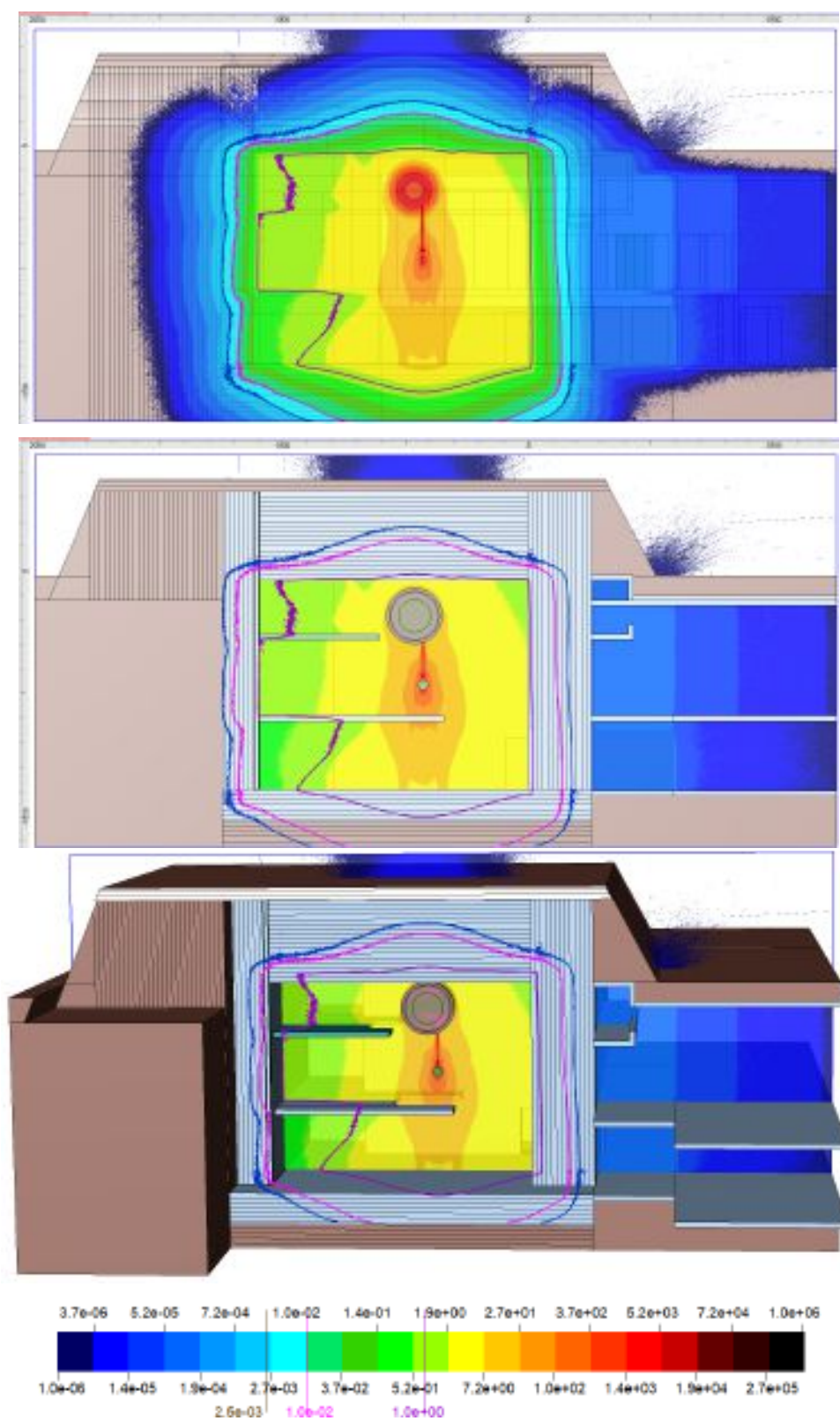


图 5-12 竖直向下照射 (0°) 过等中心点竖直剖面的剂量率分布 (单位: mSv/h)

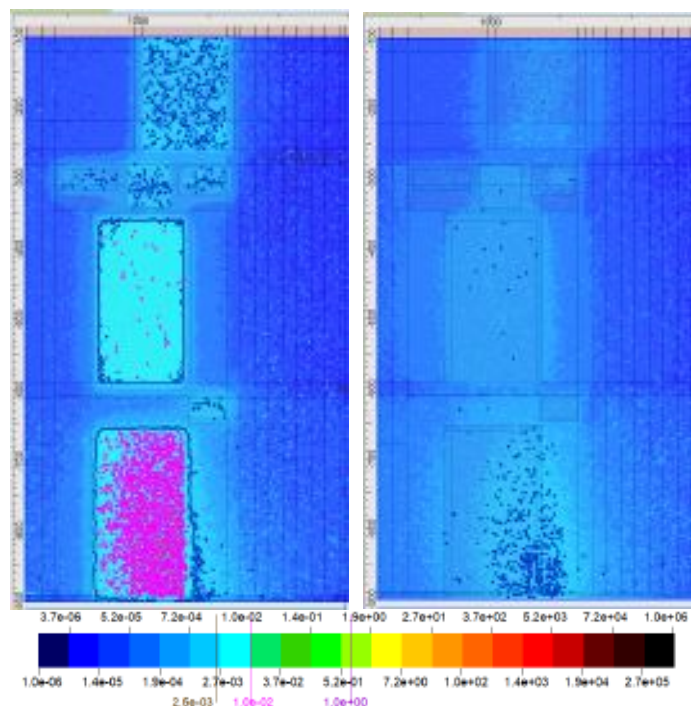


图 5-13 竖直向下照射 (0°) 屏蔽门和风管竖直剖面的剂量率分布 (单位: mSv/h, 左图: 距屏蔽墙外表面 0cm, 右图: 距屏蔽墙外表面 30cm)

5.1.1.2.2.2 水平向北照射 (90°)

水平向北照射时, 质子治疗机房各层剂量率分布如下图所示。

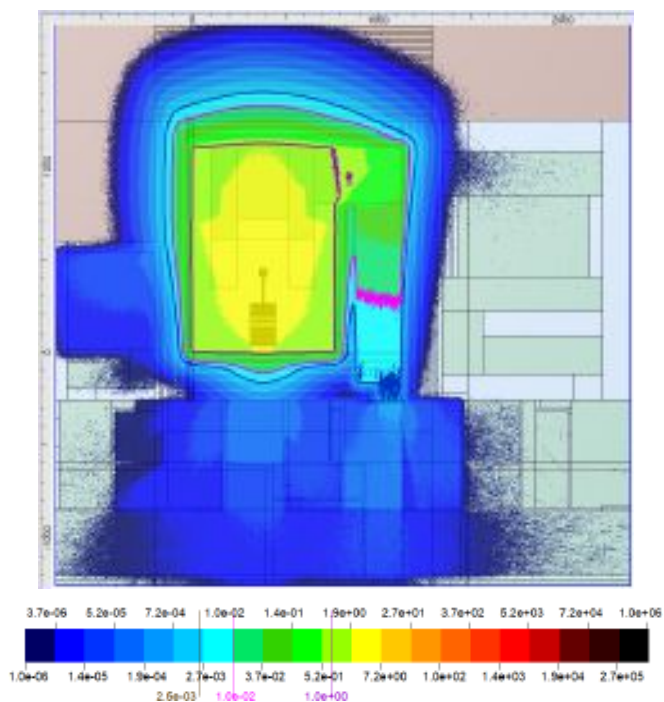


图 5-14 水平朝北照射 (90°) 检修层剂量率分布 (单位: mSv/h)

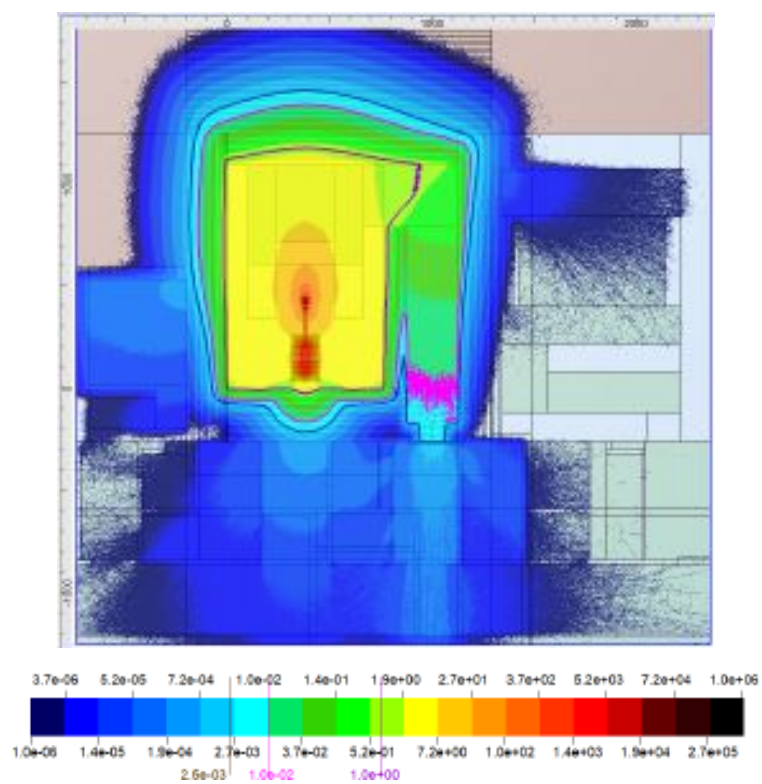


图 5-15 水平朝北照射（90°）地下一层剂量率分布（单位：mSv/h）

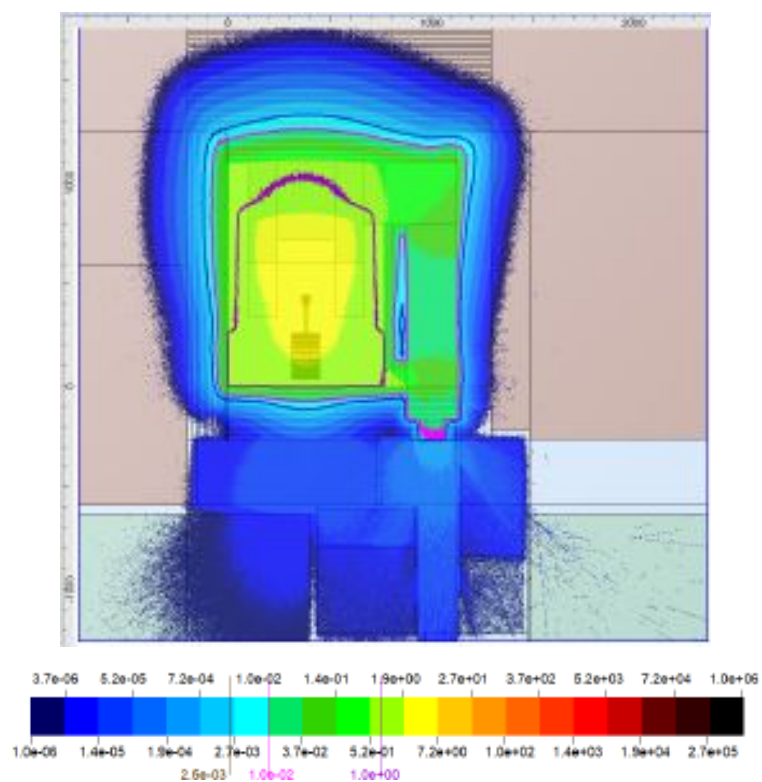


图 5-16 水平朝北照射（90°）地下二层剂量率分布（单位：mSv/h）

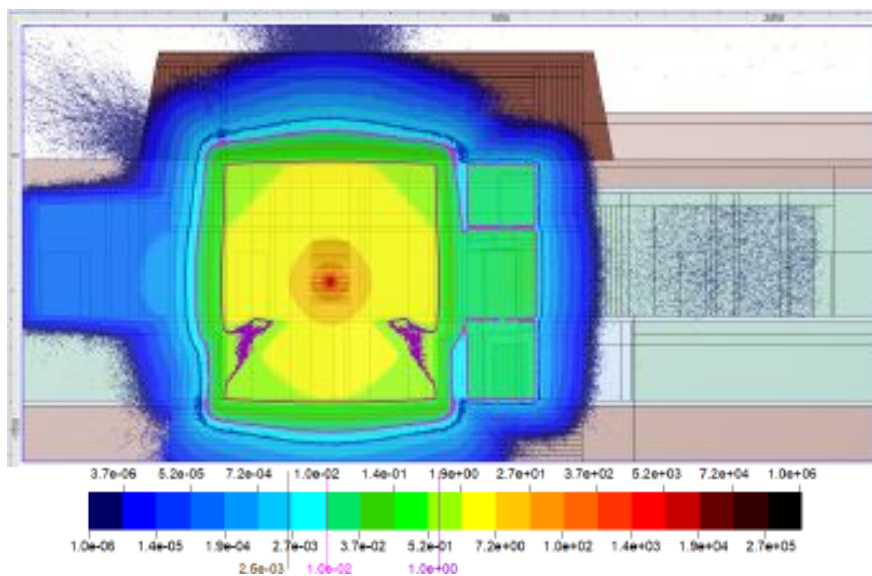


图 5-17 水平朝北照射（90°）过等中心点垂直束流的剂量率分布（单位：
mSv/h）

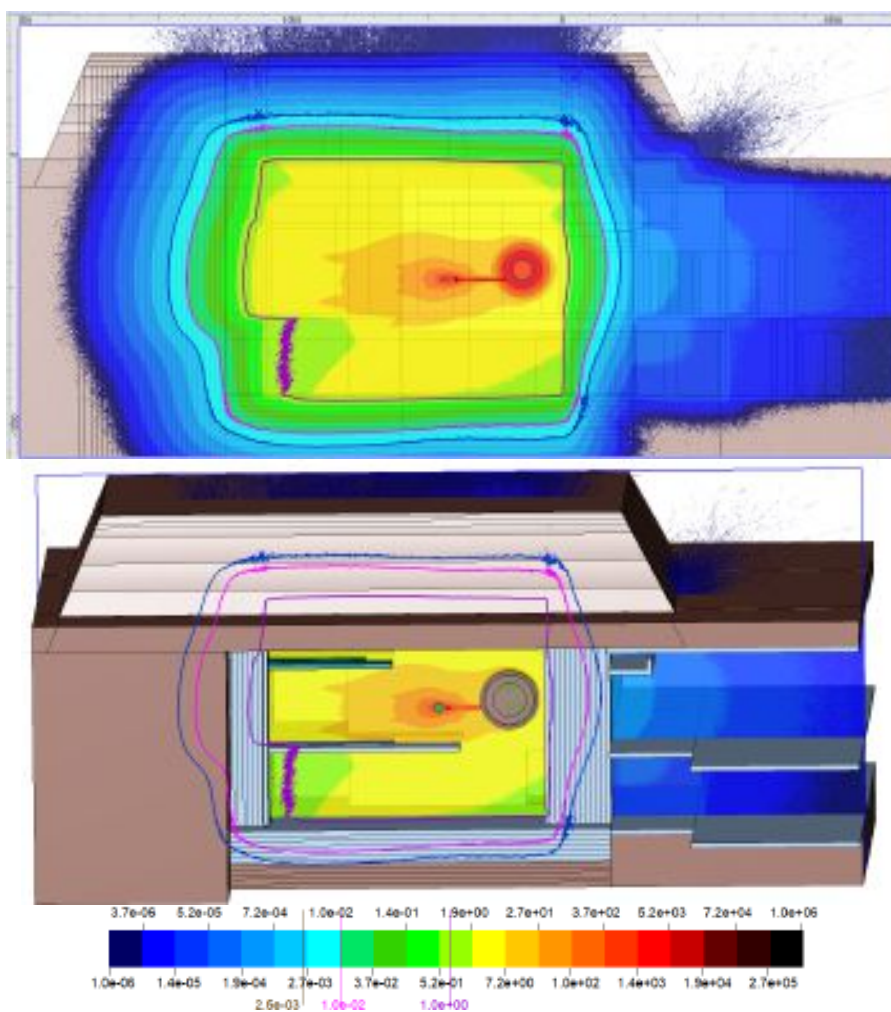


图 5-18 水平朝北照射（90°）过等中心点竖直剖面的剂量率分布（单位：
mSv/h）

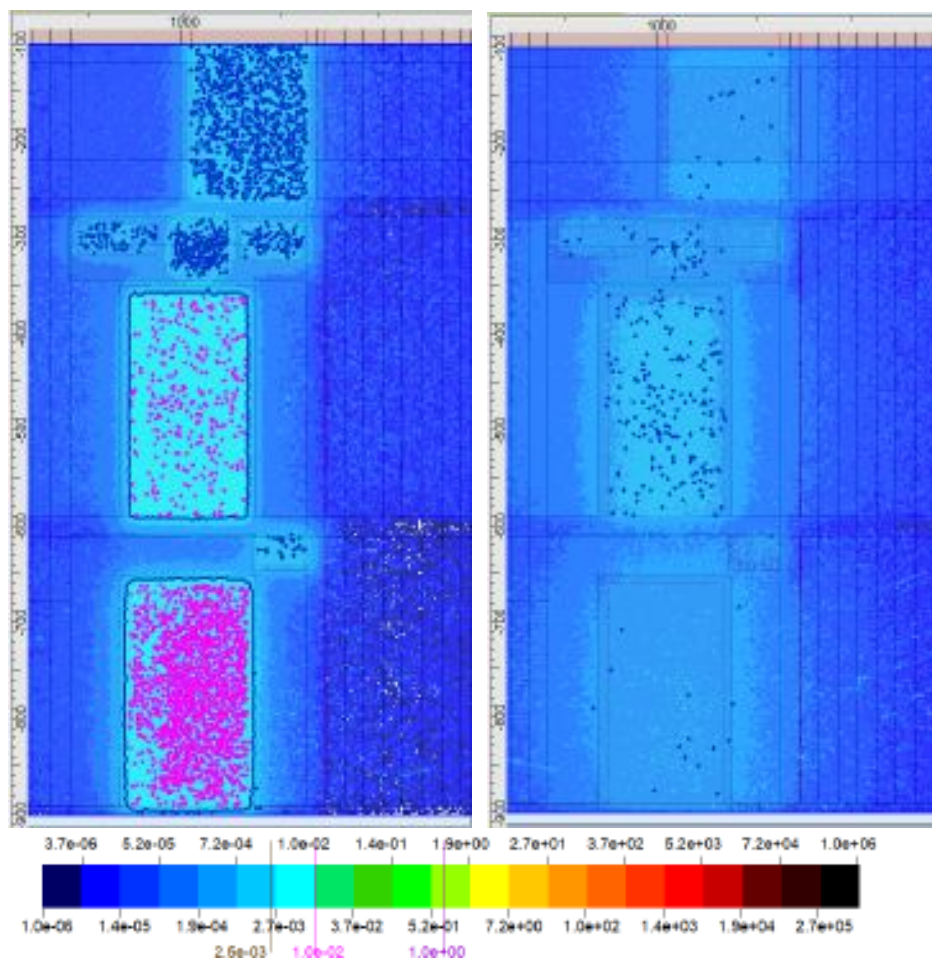


图 5-19 水平朝北照射（90°）屏蔽门和风管竖直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h，左图：距屏蔽墙外表面 0cm，右图：距屏蔽墙外表面 30cm）

5.1.1.2.2.3 竖直向上照射（180°）

竖直向上照射时，质子治疗机房各层剂量率分布如下图所示。

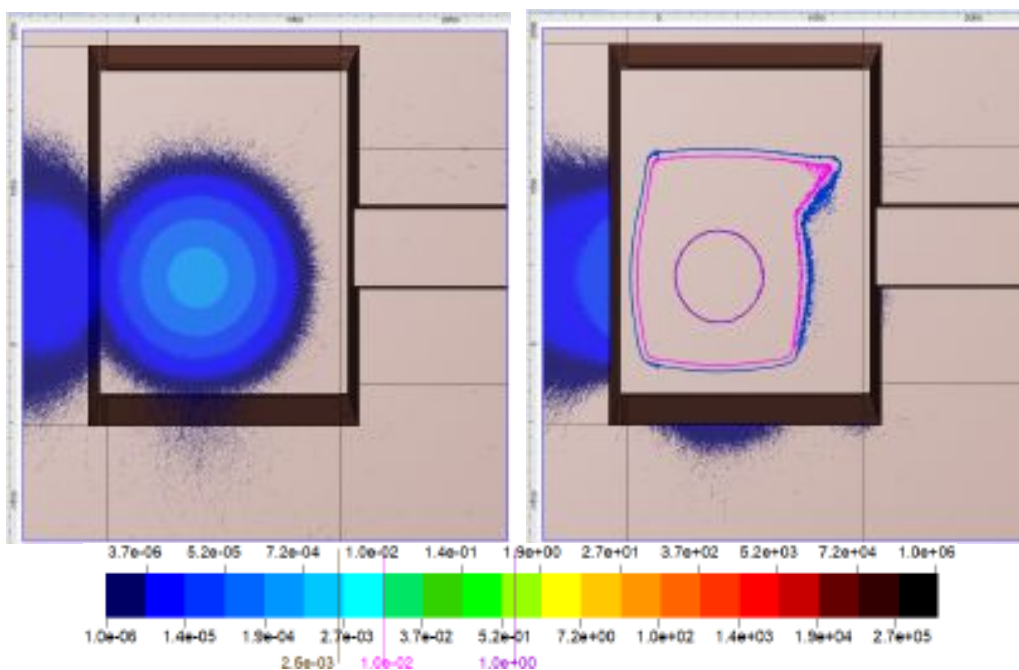


图 5-20 竖直向上照射（180°）屋顶层剂量率分布（单位：mSv/h，左图：质子机房顶部地面，右图：后装机顶部地面）

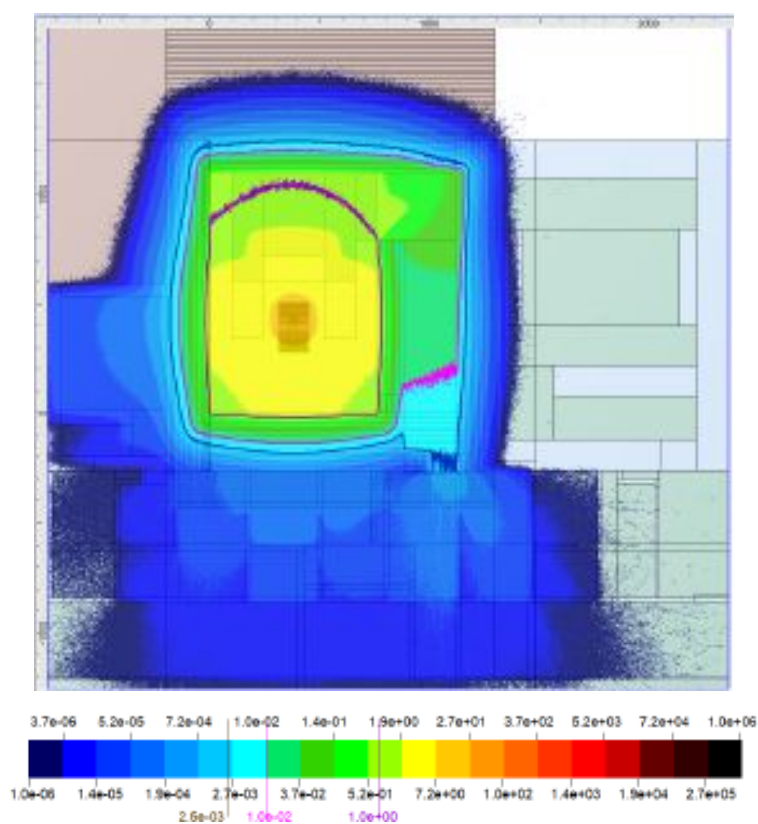


图 5-21 竖直向上照射（180°）检修层剂量率分布（单位：mSv/h）

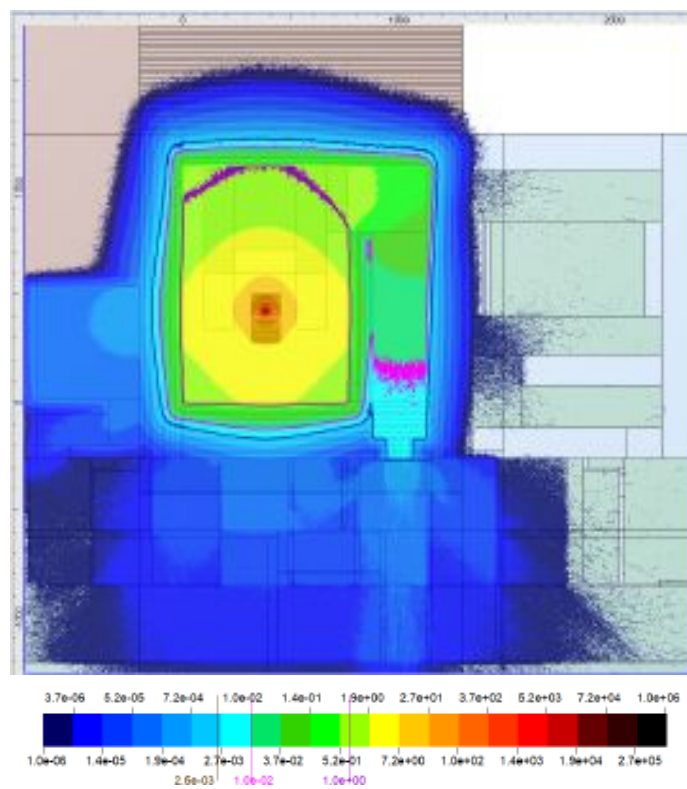


图 5-22 竖直向上照射（180°）地下一层剂量率分布（单位：mSv/h）

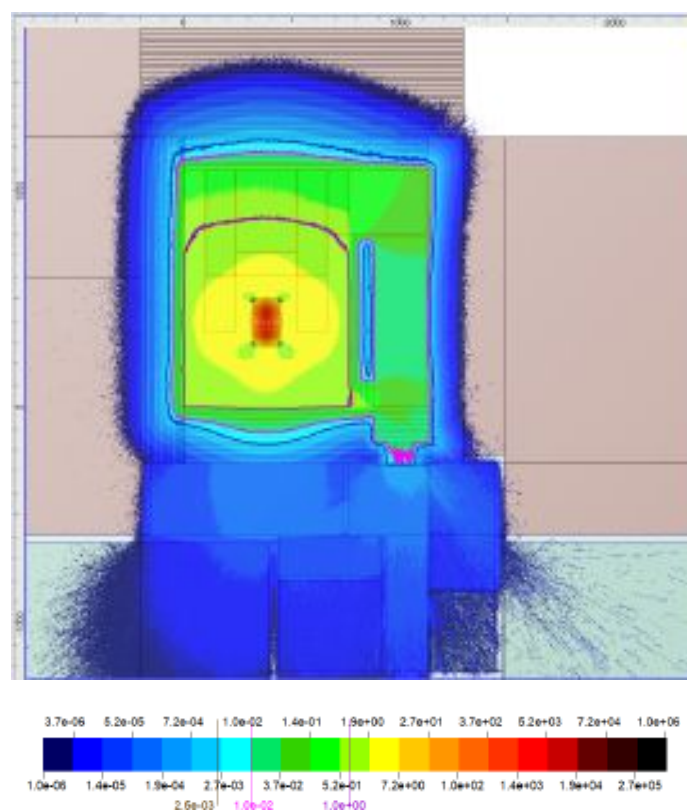


图 5-23 竖直向上照射（180°）地下二层剂量率分布（单位：mSv/h）

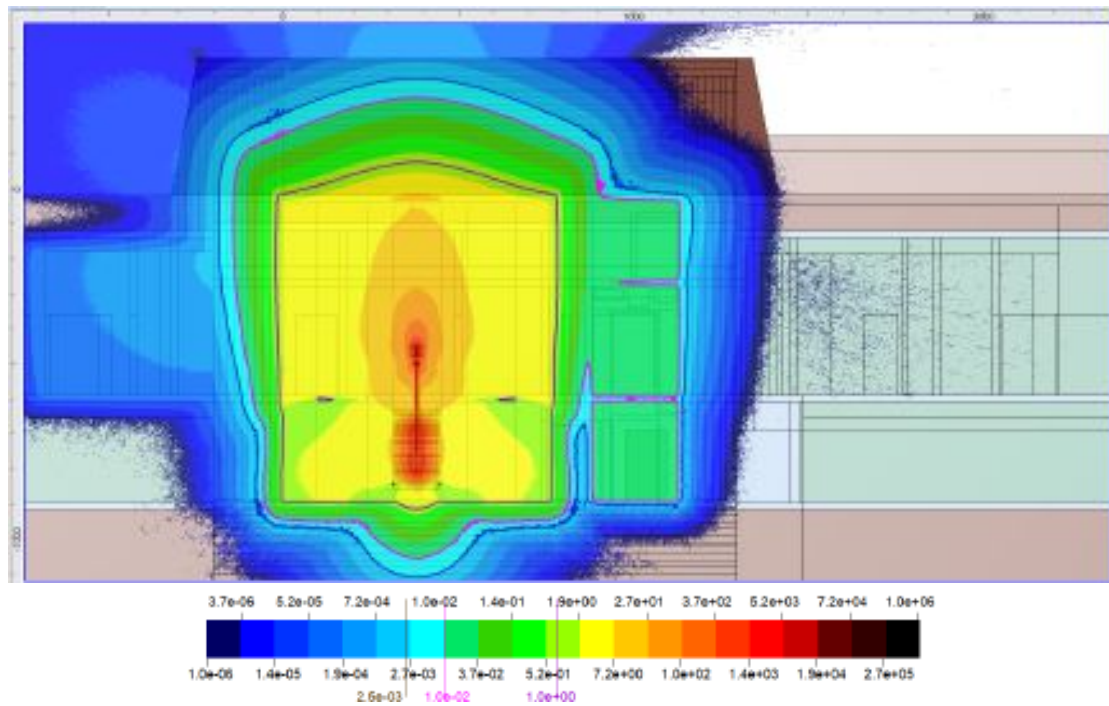


图 5-24 竖直向上照射（180°）过等中心点垂直束流的剂量率分布（单位：
mSv/h）

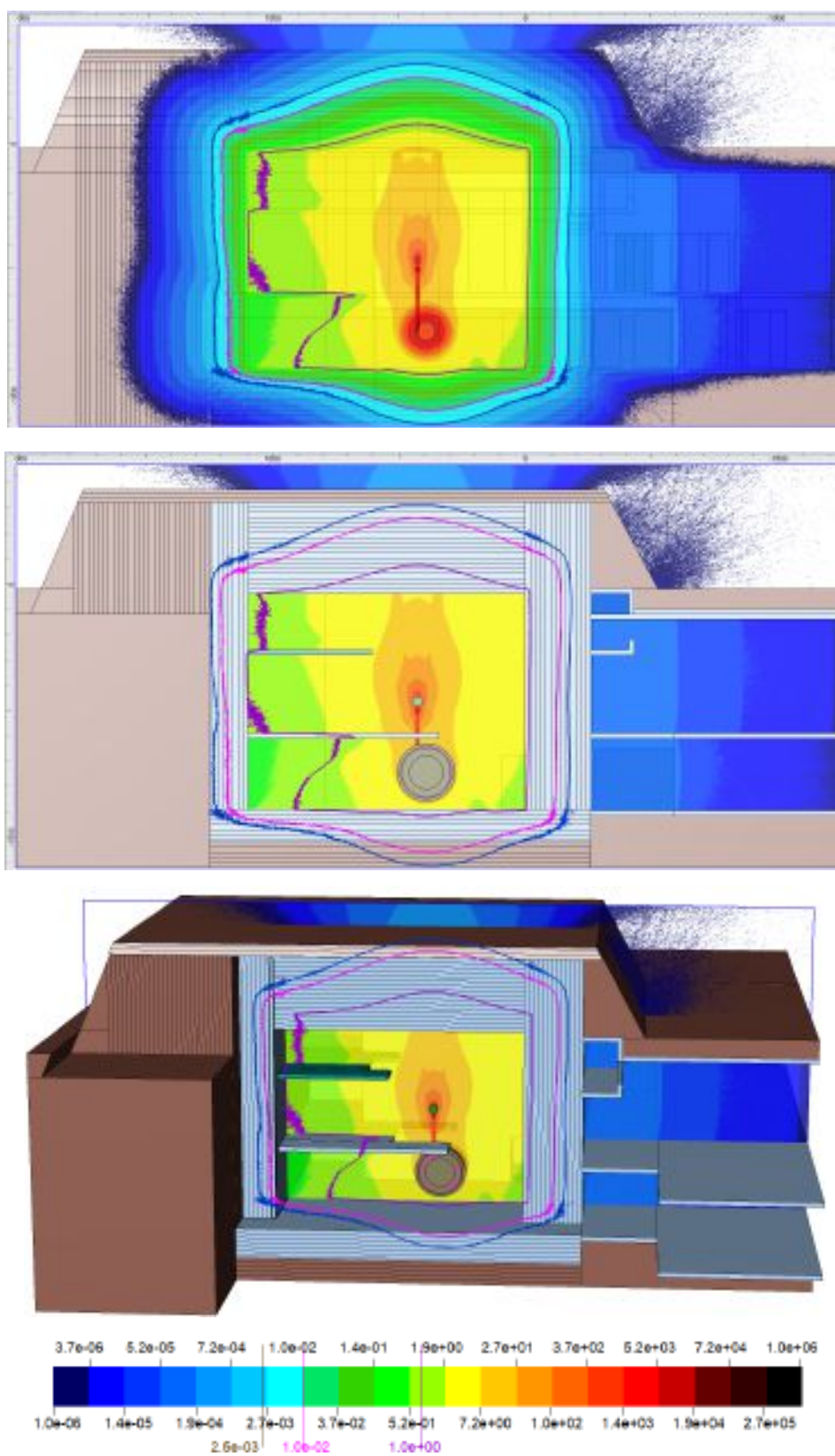


图 5-25 竖直向上照射（180°）过等中心点竖直剖面的剂量率分布（单位：
mSv/h）

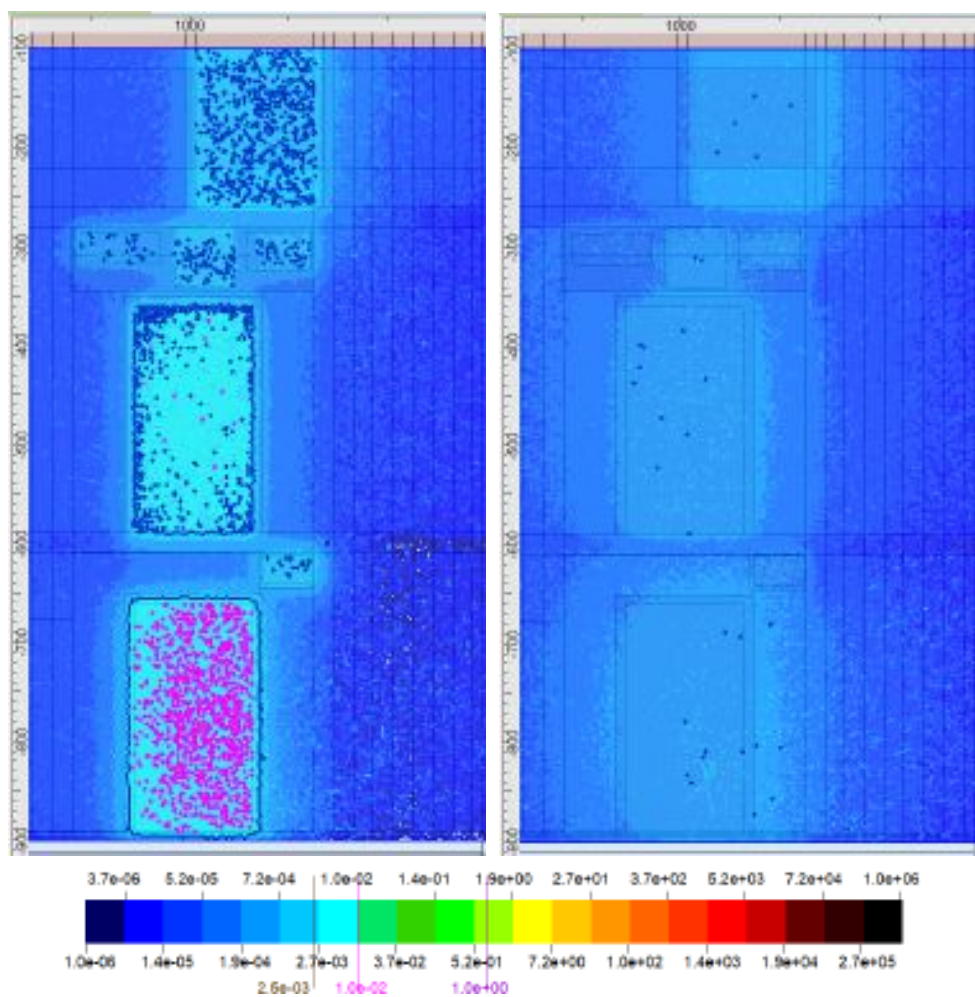


图 5-26 竖直向上照射（180°）屏蔽门和风管竖直剖面的剂量率分布（单位：mSv/h，左图：距屏蔽墙外表面 0cm，右图：距屏蔽墙外表面 30cm）

5.1.1.2.2.4 小结

根据质子治疗机房周围环境分布情况，在其周围设置了若干关注点，如下图所示。各关注点处的剂量率列于表 5-5，由计算结果可知，各关注点的剂量率均低于其剂量率控制水平。

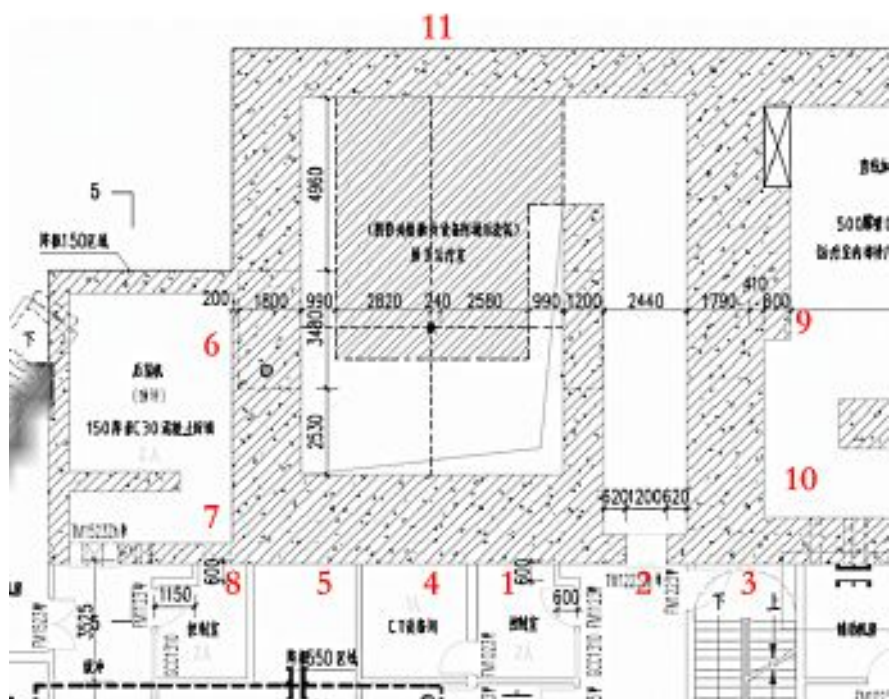


图 5-27 质子治疗机房地下一层平面关注点示意图

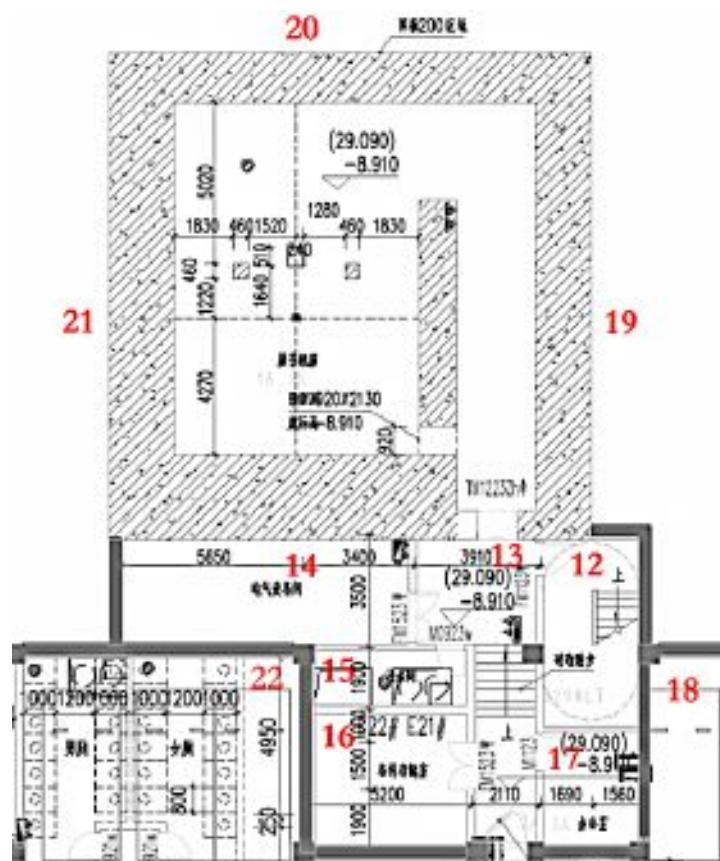


图 5-28 质子治疗机房地下二层平面关注点示意图

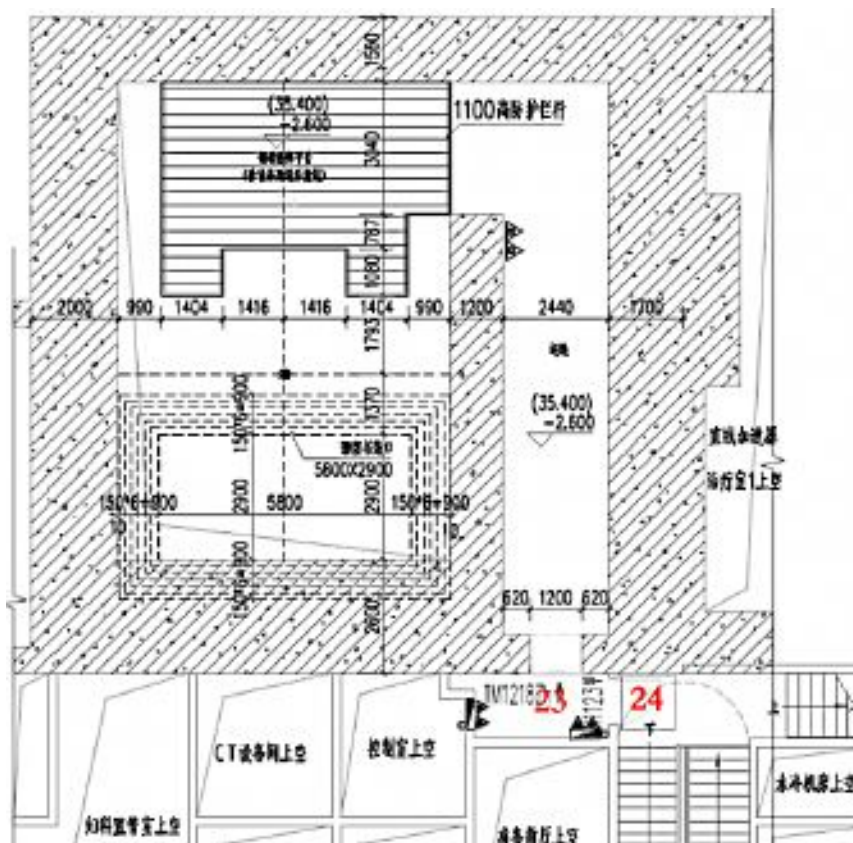


图 5-29 质子治疗机房检修层平面关注点示意图

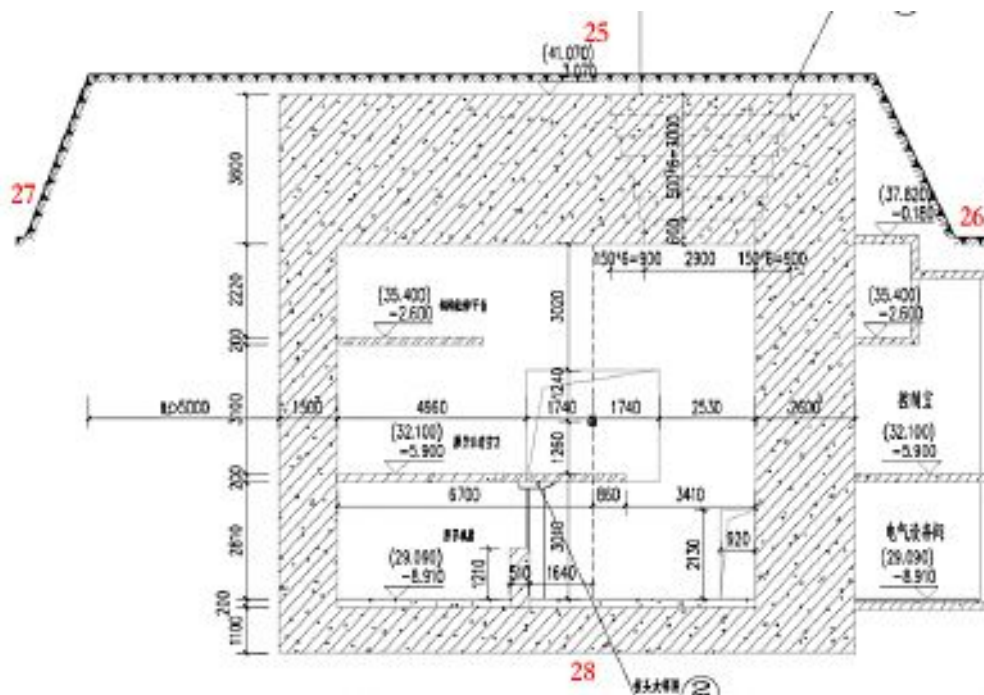


图 5-30 质子治疗机房过等中心点平行束流剖面关注点示意图



图 5-31 质子治疗机房过等中心点垂直束流剖面关注点示意图

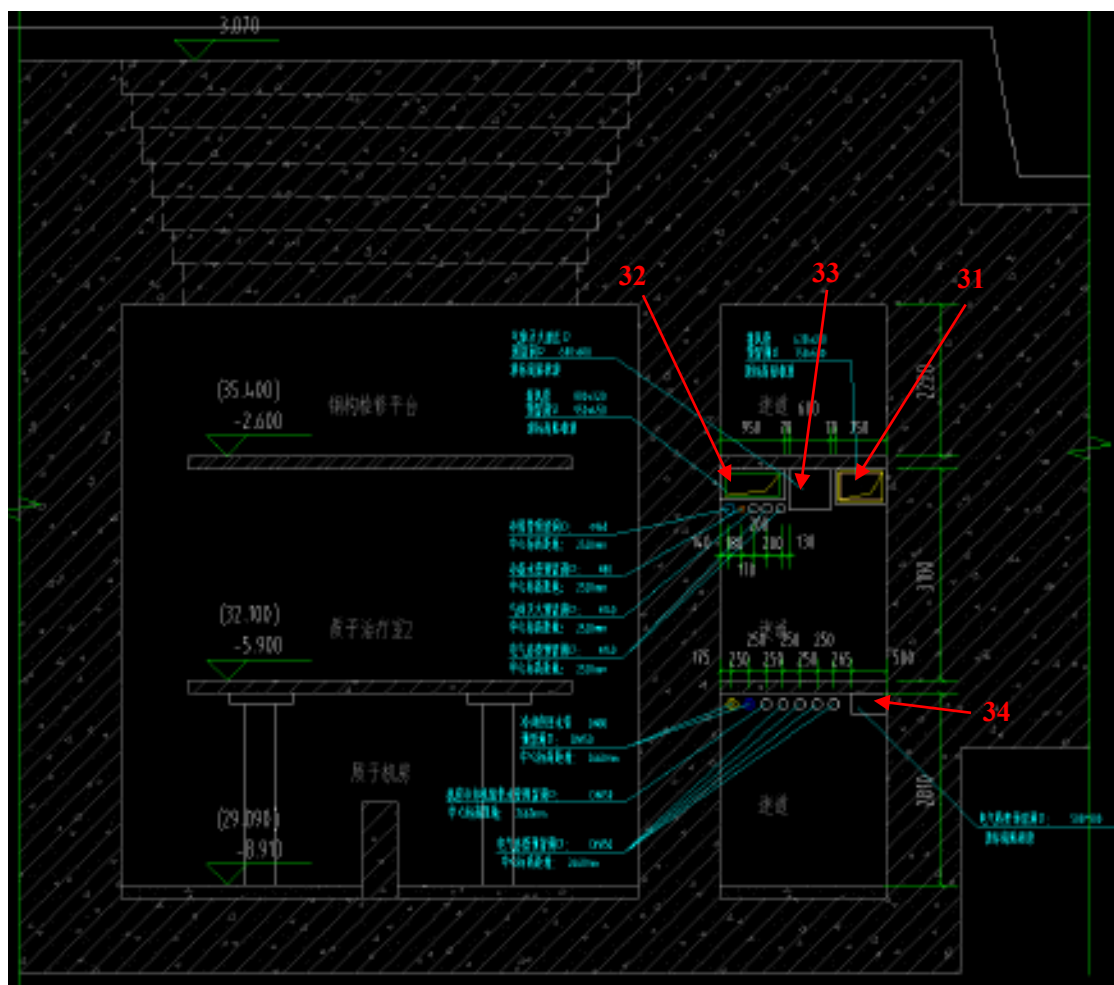


图 5-32 质子治疗机房的风管关注点示意图

表 5-5 质子治疗机房周围各关注点剂量率计算结果

楼层	关注点编号	关注点名称	各照射方向的剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)			剂量率限值, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率与限值的最大比值	是否符合限值要求
			0°	90°	180°			
负一层	1	质子机房控制室	7.8E-02	1.4E-01	9.4E-02	2.5	5.6E-02	符合
	2	质子机房防护门外	5.6E-01	1.1E+00	6.1E-01	2.5	4.2E-01	符合
	3	质子机房东南侧楼梯间	7.1E-02	6.4E-02	6.3E-02	2.5	2.9E-02	符合
	4	CT 设备间	1.2E-01	3.8E-01	1.4E-01	2.5	1.5E-01	符合
	5	妇科置管室	4.4E-02	3.3E-02	5.0E-02	2.5	2.0E-02	符合
	6	后装机治疗室	2.7E-01	3.9E-01	2.7E-01	2.5	1.6E-01	符合
	7	后装机迷道	5.4E-02	1.6E-02	6.8E-02	2.5	2.7E-02	符合
	8	后装机控制室	4.9E-03	1.7E-03	5.3E-03	2.5	2.1E-03	符合
	9	直加治疗室 1	1.1E-03	2.1E-02	7.9E-02	2.5	3.1E-02	符合
	10	直加治疗室 1 迷道	9.8E-04	2.0E-04	1.4E-03	2.5	5.6E-04	符合
	11	质子机房北侧土壤层	2.2E+00	2.0E+02	1.1E+00	5000	2.0E-01	符合
负二层	12	楼梯间	4.4E-01	6.7E-02	8.6E-02	2.5	1.7E-01	符合
	13	防护门外	1.5E+00	5.5E-01	5.0E-01	2.5	6.1E-01	符合
	14	电气设备间	1.4E-01	4.7E-02	1.6E-01	2.5	6.5E-02	符合
	15	污水间	8.5E-02	5.4E-02	6.1E-02	2.5	3.4E-02	符合
	16	备件存储室	2.5E-02	5.3E-03	1.3E-02	2.5	1.0E-02	符合
	17	办公室	7.8E-03	2.8E-03	8.0E-03	2.5	3.2E-03	符合
	18	停车场	5.5E-02	9.2E-04	2.9E-03	2.5	2.2E-02	符合
	19	机房东侧墙外土壤层	2.8E-02	1.1E-01	5.3E-03	5000	1.1E-04	符合
	20	机房北侧墙外土壤层	1.1E+00	1.6E+01	1.8E+00	5000	1.6E-02	符合
	21	机房西侧墙外土壤层	6.5E-01	2.3E-01	2.0E-02	5000	6.5E-04	符合
	22	负二层厕所	2.5E-02	1.2E-02	3.6E-02	2.5	1.4E-02	符合
检修层	23	防护门外	2.1E-01	3.4E-01	5.1E-01	2.5	2.1E-01	符合
	24	楼梯间	8.1E-02	1.1E-01	2.9E-01	2.5	1.2E-01	符合
剖面	25	质子机房顶板上方地面处	7.6E-03	2.6E-03	3.6E-01	2.5	1.4E-01	符合
	26	控制室上方地面处	2.6E-03	3.8E-03	3.9E-03	2.5	1.6E-03	符合
	27	质子机房北侧上方地面处	0.0E+00	1.8E-04	0.0E+00	2.5	7.3E-05	符合
	28	质子机房底板下方	6.0E+02	1.3E+01	2.7E+01	5000	6.0E-01	符合

		土壤层						
	29	后装机治疗室上方地面处	4.0E-04	2.9E-04	4.9E-02	2.5	1.9E-02	符合
	30	直加治疗室 1 上方地面处	0.0E+00	0.0E+00	2.0E-04	2.5	8.1E-05	符合
其他关注点	31(a)	负一楼排风管距墙面 0cm	1.1E+00	1.3E+00	8.0E-01	2.5	5.1E-01	符合
	31(b)	负一楼排风管距墙面 30cm	2.1E-01	4.3E-01	2.5E-01	2.5	1.7E-01	符合
	32(a)	负一楼新风管距墙面 0cm	5.4E-01	6.9E-01	4.9E-01	2.5	2.8E-01	符合
	32(b)	负一楼新风管距墙面 30cm	1.6E-01	2.4E-01	1.4E-01	2.5	9.5E-02	符合
	33(a)	负一楼气体灭火泄压口距墙面 0cm	1.5E+00	2.2E+00	1.2E+00	2.5	8.8E-01	符合
	33(b)	负一楼气体灭火泄压口距墙面 30cm	3.5E-01	6.2E-01	2.9E-01	2.5	2.5E-01	符合
	34(a)	负二楼电器桥架预留口距墙面 0cm	1.6E+00	1.7E+00	1.7E+00	2.5	6.8E-01	符合
	34(b)	负二楼电器桥架预留口距墙面 30cm	2.7E-01	3.1E-01	2.1E-01	2.5	1.2E-01	符合

(注：关注点 31~34 在紧贴墙面有 5cm 厚聚乙烯板。)

5.1.1.3 工作人员受照剂量估算

本项目质子治疗系统的工作人员主要包括质子治疗科室医生、物理师、治疗技师和维修工程师四类，如表 5-6 所示。

表 5-6 质子治疗机房工作人员岗位和工作量规划

岗位类别	人数	工作地点	工作内容
质子治疗科室医生	2 人	医生办公室、治疗机房内	诊断、放射治疗方案的确定、治疗效果评定、临床试验、突发状况应急处理等
治疗技师	8 人	治疗机房内部、控制室	治疗准备、CT 扫描和病人摆位
物理师	5 人	治疗计划室、物理师办公室、治疗机房的控制室	制定治疗计划、治疗计划验证、质检
维修工程师	2 人	维修人员办公室	负责质子治疗系统运行期间日常的维保

质子治疗系统正常运行期间,对工作人员所致外照射剂量可由下式 5-1 进行计算:

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

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。

5.1.1.3.1 科室医生

质子治疗科室医生的工作地点主要在放疗中心诊室内, 诊室位于负一层质子治疗机房东南侧, 与质子治疗机房内辐射源之间的最近距离约为 60m, 且治疗机房与诊室之间有楼梯间、辅助机房、更衣室等多个房间间隔, 各个房间的墙体能够起到一定的屏蔽作用, 因此医生在诊室内工作时, 治疗机房内出束对医生的瞬发辐射影响可以忽略不计。医生仅在临床试验期间以及治疗机房内出现突发状况时会进入治疗机房内部, 每名医生在治疗机房内部的工作时间不会超过 50h/年。科室医生年受照剂量估算结果列于表 5-7。

表 5-7 科室医生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
治疗机房内部	3.17E-02	50	1.58

注: 保守以医生在患者治疗结束 1min 内进入治疗机房内部时, 距离患者 50cm 处的剂量率水平作为医生在治疗机房内所处位置的剂量率, 取自表 3-24, 值为 3.17E-02 mSv/h。

5.1.1.3.2 治疗技师

治疗技师的工作内容主要包括在控制室内操作设备以及在治疗机房内给患者摆位、操作移动 CT 或 X 射线管等工作。其受照途径包括瞬发辐射外照射和吸入

内照射两种。

5.1.1.3.2.1瞬发辐射外照射

5.1.1.3.2.1.1 控制室内

质子治疗系统出束期间，治疗技师在治控制室内的工作，其工作期间的受照剂量估算结果列于表 5-8。

表 5-8 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	居留因子	受照剂量，mSv/a
控制室	1.4E-04	1050	1	1.47E-01

5.1.1.3.2.1.2 机房内摆位

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，每年治疗 12000 人次，所有治疗技师的年总工作量计算结果列于表 5-9。质子治疗机房共配备 8 名技师，技师的工作机制为两班倒，每班次有 4 名技师工作，其中 2 名技师在控制室内，2 名技师在机房内从事摆位等工作，则每名治疗技师的在机房内摆位的年工作量列于表 5-10。

表 5-9 所有治疗技师在机房内摆位的年工作量

单次治疗前摆位 所需时间，min	年进行治疗前 摆位总次数	年进行治疗前 摆位总时间，h	单次解除摆位 所需时间，min	年总进行解除摆 位工作的次数	年进行解除摆 位总时间，h
5	12000	1000	1	12000	200

表 5-10 每名治疗技师在机房内摆位的年工作量

年进行治疗前摆位总时间，h	年进行解除摆位总时间，h
250	50

(1) 患者治疗前摆位

患者每次治疗前，治疗技师在治疗室接触的是未受到照射的患者，该过程中治疗技师所在区域的瞬时剂量率主要来自“3.3.1.3.5.3 节”所列的（2）和（3），具体数值和计算结果列于表 5-11。

表 5-11 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
活化结构部件	1.03E-02	250	2.58E+00
空气感生放射性*	5.29E-05	250	1.32E-02
总计	1.04E-02	250	2.59E+00

注：*空气感生放射性所致瞬时剂量率取表 3-23 中停机 1min 后的数值；

（2）患者治疗后解除摆位

患者每次治疗结束后，治疗技师需要进入治疗室内，对患者解除摆位及谈话。此时，患者自身由于受到质子束流的照射产生的感生放射性会对治疗技师产生一定照射。根据建设单位提供的资料，通常情况下，患者单次治疗结束停机 5min 后，治疗技师方可进入治疗室内对其进行解除摆位的操作。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。根据表 3-24 中计算得出“230MeV-1.2nA 连续治疗 4min，停机 5min 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 5-12。

表 5-12 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	1.04E-02	50	5.20E-01
活化结构部件	1.03E-02	50	5.15E-01
空气感生放射性*	2.39E-05	50	1.20E-03
总计	2.07E-02	——	1.04

注：*空气感生放射性所致瞬时剂量率取表 3-23 中停机 5min 后的数值；

5.1.1.3.2.2 吸入内照射

工作人员在治疗机房内工作期间，除受到感生放射性气体的浸没外照射，还会

由于吸入感生放射性气体受到内照射，吸入内照射剂量可由下式 5-2 计算。

$$H_{h,i} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \tag{5-2}$$

式中：

$H_{h,i}$ 为年吸入内照射年有效剂量，Sv/a；

T 为年受照时间，h/a；

u 为正常情况下的呼吸率，m³/h，成人的呼吸率取值 1.2m³/h；

$C_{a,i}$ 为工作场所内部空气感生放射性核素的浓度，Bq/m³；保守以机房内动态空气饱和浓度计算，见表 3-11。

$g_{h,i}$ 为吸入放射性核素 i 产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq，见表 5-13。

表 5-13 吸入内照射剂量转换因子

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

空气吸入内照射剂量计算结果列于表 5-14。

表 5-14 治疗技师在机房内工作期间所受感生放射性气体吸入内照射剂量

核素	$C_{a,i}$ ， Bq/m ³	T， h/a	u ， m ³ /h	$g_{h,i}$ ， Sv/Bq	$H_{h,i}$ ， Sv/a
¹¹ C	6.62E+01	300	1.2	1.80E-11	4.29E-07
¹³ N	3.33E+02	300	1.2	——	——
¹⁵ O	3.37E+02	300	1.2	——	——
⁴¹ Ar	1.27E+01	300	1.2	——	——
总计	——	300	1.2	——	4.29E-07

5.1.1.3.2.3小结

每位治疗技师年总受照剂量计算结果列于表 5-15。

表 5-15 每位治疗技师年总受照剂量

来源	年受照剂量, mSv/a
控制室内	1.47E-01
治疗前摆位	2.59
治疗后解除摆位	1.04
总计	3.78

5.1.1.3.3 物理师

物理师受照剂量主要来自其在治疗计划验证和质检工作期间:

(1) 治疗计划验证

保守假设每年治疗病人数量为 1000 人, 共 5 名物理师, 假设每次工作由 2 名物理师共同完成, 每名物理师每年进行治疗计划验证的次数保守按 500 次计。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 5-15 可推知每名技师每次治疗期间的受照剂量约为 1.5E-03mSv/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 5-16。

表 5-16 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	1.5E-03	500	7.5E-01

(2) 质检

物理师质检工作期间的受照剂量估算结果列于表 5-17。

表 5-17 物理师质检工作期间年受照剂量算结果

工作地点	剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
质子治疗机房内	1.03E-02 ¹	125 ²	1.29E+00
控制室内质检	1.4E-04	125 ²	1.75E-02
总计	——	——	1.31E+00

注: 1.物理师在治疗机房内工作时, 机房内剂量率主要考虑活化结构部件, 取值为 1.03E-02mSv/h;

2.质检期间, 物理师在机房内的年工作时间为 250h, 质子治疗系统的年出束时间为 250h, 共 5 名物理师, 假设每次工作由 2 名物理师共同完成, 每名物理师的年工作时间保守取 125h。

(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 5-18。

表 5-18 物理师的年受照剂量

治疗计划验证, mSv/a	质检, mSv/a	总受照剂量, mSv/a
7.5E-01	1.31E+00	2.06

5.1.1.3.4 维修工程师

(1) 迈胜的维护维修人员

本项目质子治疗系统的维修维护工作由设备生产商迈胜的相关工作人员负责，其从事维修维护工作的受照剂量已在已批复的迈胜医疗设备有限公司《销售（含建造）和使用 S250i 型质子治疗系统项目环境影响报告书》中进行评价分析。本次评价仅引用其评价结论，具体列于表 5-19。本项目配备 1 套质子治疗系统，因此，迈胜的工作人员从事本项目维修维护工作期间的受照剂量为 1.89mSv/a。

表 5-19 迈胜的维修维护人员的年受照剂量

质子治疗系统数量	维护维修工作人员年受照剂量, mSv/a
1	1.89
2	2.53
3	2.84

(2) 本项目维修工程师

童昌医院拟为本项目配备 2 名维修工程师，其主要工作内容为质子治疗系统日常基础维护保养，仅在治疗层内工作，不会进入设备层和检修层。根据建设单位提供的资料，维修工程师每年在治疗层内的工作时间不超过 200h，由此可计算出维修工程师的年受照剂量，列于表 5-20。

表 5-20 维修工程师的年受照剂量

工作区域	剂量率水平 ¹ ,	受照时间 ² , h	受照剂量, mSv/a
------	----------------------	-----------------------	-------------

	mSv/h		
治疗机房	1.04E-02	100	1.04
维修工程师办公室	8.0E-07	1900	1.52E-03
总计	——	——	1.04

注：1. 维修工程师在治疗室内工作期间，工作区域的剂量水平保守取治疗技师治疗前摆位时工作区域的剂量率（表 5-11）；维修工程师办公室位于质子治疗机房负二层南墙外，保守取表 5-5 中关注点 17 处的剂量率，为 8.0E-03 μ Sv/h。

2. 共 2 名维修工程师轮班，每名工程师每年在治疗室内的工作时间不超过 100h。

5.1.1.3.5 工作人员受照剂量汇总

本项目工作人员受照剂量汇总如下表 5-21 所示。由上述计算结果可知，本项目治疗技师受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 3.78mSv/a，低于工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-21 工作人员受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量，mSv/a
科室医生	1.58
治疗技师	3.78
物理师	2.06
维修工程师	1.04

5.1.1.4 公众的受照剂量估算

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。

5.1.1.4.1 瞬发辐射照射

瞬发辐射主要影响对象为质子治疗机房周围近距离范围内的公众，主要可能为医护人员中的非辐射工作人员、患者陪诊人员和保洁人员，具体分析如下：

（1）非辐射工作人员主要为护士。护士的工作场所主要在负一层的护士站和诊室等处。根据负一层平面布局图，护士站和诊室均位于负一层质子治疗机房东南侧，与质子治疗机房内辐射源之间的最近距离分别约为 50m、60m，且治疗机房与

护士站、诊室之间有楼梯间、辅助机房、更衣室、直加治疗室 1、直加治疗准备室、直加控制室等多个房间间隔，各个房间的墙体能够起到一定的屏蔽作用，因此护士在护士站和诊室内工作时，治疗机房内出束对护士的瞬发辐射影响可以忽略不计。

(2) 患者陪诊人员。患者陪诊人员在放疗中心等候大厅等候患者，不会跟随患者进入治疗机房。等候大厅位于负一层质子治疗机房东南侧，与质子治疗机房内辐射源之间的最近距离约为 40m，且治疗机房与等候大厅之间有直加治疗室 1、直加治疗准备室、直加控制室、直加水冷机房等多个房间间隔，各个房间的墙体能够起到一定的屏蔽作用，因此患者陪诊人员在等候大厅等候时，治疗机房内出束对患者陪诊人员的瞬发辐射影响可以忽略不计。

(3) 保洁人员。按每年工作 250 天，每天治疗结束后工作，仅负责治疗室层的清洁工作，每间治疗室工作时间按 30min 计，共两名保洁人员轮班。工作期间会受到活化结构部件的照射。取治疗室中心位置（距离活化部件约 3m）处的剂量率作为平均剂量率进行计算，约为 1.13E-03mSv/h。

其所受瞬发辐射照射剂量由下式 5-2 计算。计算结果列于表 5-22。

$$H=D\times T\times t \quad (5-2)$$

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 5-22 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
保洁人员	1.13E-03	1	62.5	7.06E-02

除此之外，根据表 1-7 中给出的机房周围关注点处公众的分布情况，本次评价选取了机房周围公众可达处作为关注点，计算了关注点处的公众所受瞬发辐射

外照射剂量，列于表 5-23。

表 5-23 质子治疗机房外各关注点处公众所受瞬发辐射外照射剂量

关注点	周围环境	剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	居留因子	年受照时间，h	年受照剂量， mSv/a	照射类型
3	治疗层质子机房东南侧楼梯间	7.1E-02	1/40	1050	1.86E-03	公众照射
5	妇科置管室	5.0E-02	1/16	1050	3.28E-03	公众照射
6	后装机治疗室	3.9E-01	1/8	1050	5.12E-02	公众照射
7	后装机迷道	6.8E-02	1/8	1050	8.93E-03	公众照射
8	后装机控制室	5.3E-03	1	1050	5.57E-03	公众照射
9	直加治疗室 1	7.9E-02	1/8	1050	1.04E-02	公众照射
10	直加治疗室 1 迷道	1.4E-03	1/8	1050	1.84E-04	公众照射
12	设备层楼梯间	4.4E-01	1/40	1050	1.16E-02	公众照射
14	电气设备间	1.6E-01	1/16	1050	1.05E-02	公众照射
15	污水间	8.5E-02	1/20	1050	4.46E-03	公众照射
16	备件存储室	2.5E-02	1/20	1050	1.31E-03	公众照射
17	办公室	8.0E-03	1	1050	8.40E-03	公众照射
18	负二层停车场	5.5E-02	1/40	1050	1.44E-03	公众照射
22	负二层厕所	3.6E-02	1/20	1050	1.89E-03	公众照射
24	检修层楼梯间	2.9E-01	1/40	1050	7.61E-03	公众照射
25	质子机房顶板上方地面	3.6E-01	1/40	1050	9.45E-03	公众照射
26	质子治疗控制室上方地面	3.9E-03	1/40	1050	1.02E-04	公众照射
27	质子机房北侧上方地面	1.8E-04	1/40	1050	4.73E-06	公众照射
29	后装机治疗室上方地面	4.9E-02	1/40	1050	1.29E-03	公众照射
30	直加治疗室 1 上方地面	2.0E-04	1/40	1050	5.25E-06	公众照射

5.1.1.4.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用 IAEA NO.19 技术报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》中推荐的简单稀释模式，估算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所在建筑里的公众以及排风口近距离范围内公众的受照剂量。

表 5-24 质子治疗机房放射性排风口参数

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
20	12800 (医疗综合楼)	100 (医疗综合楼)

5.1.1.4.2.1 空气浸没外照射

由表 5-24 可知, 质子治疗机房排风口高度 $H < 2.5H_b$ (临近最高建筑物高度):

(1) 排风口所在建筑内的公众

根据 IAEA NO.19 号报告, 对于关注点和排风口在同一建筑的情况, 可利用公式 5-3 计算排风口所在建筑内核素空气浓度:

$$C_{a,i} = \frac{B_0 Q_i}{u_a x^2} \quad (5-3)$$

式中,

$C_{a,i}$ 为距离排风口 x 米处核素 i 的地面空气浓度, Bq/m³;

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率, Bq/s, 见表 3-12。

B 为考虑了建筑尾流造成的空气流动停滞区, 而导致沿垂直墙面空气浓度增加, 取自 IAEA No.19 号报告 P24, 取值为 30;

u_a 为释放高度上年平均风速, 取值 2m/s。

(2) 排风口与关注点的距离 $x \leq 2.5 \sqrt{A_b}$

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

$$C_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (5-4)$$

式中,

$C_{a,i}$ 为距离排风口 x 米处核素 i 的地面空气浓度, Bq/m³;

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率, Bq/s, 见表 3-12;

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 $K=1m$;

(3) 排风口与关注点的距离 $x > 2.5 \sqrt{A_b}$

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

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

式中:

B 为在下风距离 x 处的高斯扩散因子, $1/m^2$; 由下式 5-6 计算。

σ_z 为垂直扩散参数, m,

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

评价范围 100 米内各关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-25。

表 5-25 各关注点处地面空气浓度计算结果, Bq/m³

关注点	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	⁴¹ Ar
质子中心内公众 (地上)	5.60E+00	2.75E+01	2.62E+01	1.10E+00
医疗综合楼公众	3.72E-03	1.83E-02	1.74E-02	7.32E-04

空气浸没外照射剂量可由下式 5-7 计算:

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

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；取值 $3.15\text{E}+07\text{s}$ ；

S_F 为建筑物屏蔽因子，本次评价取 1；

G 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-26，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子。

表 5-26 剂量转换因子

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

空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-27。

表 5-27 空气浸没外照射剂量计算结果，mSv/a

关注点	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	⁴¹ Ar	总计
质子中心内公众（地上）	1.51E-04	7.44E-04	7.10E-04	3.96E-05	1.64E-03
医疗综合楼公众	1.43E-07	7.05E-07	6.72E-07	3.75E-08	1.56E-06

5.1.1.4.2.2吸入内照射

吸入内照射剂量可由式 5-8 计算：

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

式中：

$H_{h,i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量, Sv/a;

u 为公众个人正常情况下的呼吸率, m^3/h , 成人: $1.2m^3/h$;

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

吸入内照射剂量计算结果见表 5-28。

表 5-28 吸入内照射剂量计算结果, mSv/a

关注点	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar	总计
质子中心内公众(地上)	2.65E-05	——	——	——	2.65E-05
医疗综合楼公众	1.76E-08	——	——	——	1.76E-08

5.1.1.4.2.3 总受照剂量

放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果列于表 5-29。由此可见放射性气体排放对本项目周围各关注点处公众所致年受照剂量均低于公众年剂量约束值 $0.1mSv/a$ 。

表 5-29 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果, mSv/a

关注点	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar	总计
质子中心内公众(地上)	1.78E-04	7.44E-04	7.10E-04	3.96E-05	1.67E-03
医疗综合楼公众	1.61E-07	7.05E-07	6.72E-07	3.75E-08	1.58E-06

5.1.1.4.3 公众受照剂量汇总

公众受照剂量计算结果汇总见表 5-30。除质子治疗机房周边公众外, 其余公众与质子治疗机房之间的距离较远, 考虑到瞬发辐射随距离衰减的特点, 其余公众的受照途径途径仅考虑放射性气体的排放。由表 5-30 可已看出质子治疗系统运行期间对公众所致的最大个人剂量为 $5.12E-02mSv/a$, 低于公众剂量约束值 $0.1mSv/a$ 。

表 5-30 公众受照剂量汇总, mSv/a

关注点	不同受照途径的受照剂量, mSv/a		年总受照剂量, mSv/a
	瞬发辐射	放射性气体	
治疗层质子机房东南侧楼梯间	1.86E-03	——	1.86E-03

妇科置管室	3.28E-03	——	3.28E-03
后装机治疗室	5.12E-02	——	5.12E-02
后装机迷道	8.93E-03	——	8.93E-03
后装机控制室	5.57E-03	——	5.57E-03
直加治疗室 1	1.04E-02	——	1.04E-02
直加治疗室 1 迷道	1.84E-04	——	1.84E-04
设备层楼梯间	1.16E-02	——	1.16E-02
电气设备间	1.05E-02	——	1.05E-02
污水间	4.46E-03	——	4.46E-03
备件存储室	1.31E-03	——	1.31E-03
办公室	8.40E-03	——	8.40E-03
负二层停车场	1.44E-03	——	1.44E-03
负二层厕所	1.89E-03	——	1.89E-03
检修层楼梯间	7.61E-03	——	7.61E-03
质子机房顶板上方地面	9.45E-03	——	9.45E-03
质子治疗控制室上方地面	1.02E-04	——	1.02E-04
质子机房北侧上方地面	4.73E-06	——	4.73E-06
后装机治疗室上方地面	1.29E-03	——	1.29E-03
直加治疗室 1 上方地面	5.25E-06	——	5.25E-06
质子中心内公众（地上）	——	1.67E-03	1.67E-03
医疗综合楼公众	——	1.58E-06	1.58E-06

5.1.2 事故工况下的环境影响

5.1.2.1 事故情景

质子治疗系统的核心是加速器，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）安全联锁系统失效、人员误入机房内部造成的误照射事故；
- （2）工作人员在机房内部工作期间，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

质子治疗系统设计有功能齐全、安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，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。通过搜索清场功能保障了人员在束流开启前及时离开控制区，防止人员被困在高辐射水平的控制区内；通过急停按钮、紧急开门等功能保障万一发生人员被困或误入正在出束的控制区内、或设备异常等情况时可以紧急关闭辐射源；声光报警和状态指示功能使工作人员了解工作情况，提示人员远离高辐射水平的区域。通过这些措施能够有效防止误入事故的发生。因此，人员误照射事故发生的概率非常小。

此外，为防止人员误照射事故的发生，可采取以下措施加强防范：

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

(2) 开机出束前，撤离治疗机房时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和顺序对机房各区域进行清场。出束期间一旦发现有人员滞留在机房内，就近按下急停按钮。工作人员进入治疗机房内部工作时应随身佩戴有效的剂量报警仪，以便随时了解机房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。

5.1.2.3 冷却水泄漏事故

5.1.2.3.1 事故后果分析

冷却水管路上安装有水压传感器，一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻发出报警信号同时启动安全联锁系统，防止形成大规模漏水。根据“3.3.1.3.2 节”的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员造成辐射影响。

本项目在负二层质子治疗机房南侧设有污水间，污水间集水坑内设置 $0.8\text{m} \times$

0.8m×0.8m（长×宽×高）成品不锈钢蓄水罐，用于暂存质子机房更换下来的活化冷却水。蓄水罐通过管道质子治疗机房的地漏相连。蓄水罐的标高低于质子治疗机房地板标高，且质子治疗机房设自流坡度确保泄漏的冷却水能够自流并通过机房内地漏排入该蓄水罐内。因此，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

5.1.2.3.2 事故防范措施

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

5.2 小结

5.2.1 工作人员受照剂量

本项目工作人员受照剂量汇总如下表所示。由计算结果可知，本项目治疗技师受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 3.78mSv/a，低于工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-31 工作人员受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量，mSv/a
科室医生	1.58
治疗技师	3.78
物理师	2.06
维修工程师	1.04

5.2.2 公众受照剂量

根据“5.1.1.4.3 节”和“5.1.2 节”的计算结果，本项目质子治疗系统运行期间对公众所致的最大受照剂量为 5.12E-02mSv/a，低于公众年剂量约束值 0.1mSv/a。

6 辐射安全管理

6.1 机构与人员

6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构

童昌医院目前已成立了放射防护领导小组，小组成员由院长、副院长、医务科、行政办、设备科、放疗科、肿瘤科、医学影像科、工程科、保卫科等部门（科室）的领导和相关工作人员组成。领导小组组长由院长孙贵林担任，全面负责医院的辐射安全管理工作，辐射安全管理员由注册核安全工程师担任，专职负责辐射安全与防护相关工作。小组成员列于表 6-1。

表 6-1 童昌医院放射防护领导小组概况

小组成员	姓名	职务或职称
组长	孙贵林	院长
副组长	王建华	副院长
辐射安全管理员	拟招聘	注册核安全工程师
成员	医务科主任、行政办主任、设备科主任、放疗科主任、肿瘤科主任、医学影像科主任、工程科科长、保卫科科长	

辐射安全与环境保护管理小组的主要职责如下：

- （1）负责辐射工作人员的职业健康体检、个人剂量计的收发工作；
- （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）负责辐射工作人员的培训和管理；
- （4）管理、监督、协调射线装置运行期间的辐射安全工作；
- （5）负责放射性三废的监督管理和环境保护；
- （6）负责组织开展辐射工作场所、环境和个人剂量的辐射监测与评价。

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。

本项目辐射工作人员均为新增工作人员。童昌医院已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 6-2 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	否
物理师	5	新增	否
治疗技师	8	新增	否
维修工程师	2	新增	否

6.2 辐射安全管理规章制度

为加强辐射安全管理，按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法规的要求，童昌医院目前已制定了包括岗位职责、操作规程、放射防护管理、安全管理、质量控制、放射工作人员培训、放射工作人员个人剂量管理、档案管理、台账管理、应急预案等一系列的辐射安全管理规章制度，并将严格按照规章制度执行。

此外，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，制定或完善操作规程、设备检修维护、放射性废物处理、辐射监测、应急预案等规章制度，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、环境监测和个人剂量监测。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 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 6-3。

表 6-3 本项目辐射工作场所监测计划表

监测类别	监测对象	监测方式	监测内容	监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	质子治疗机房	固定式仪表监测	贯穿辐射	γ 辐射剂量率、 中子剂量当量率	共 2 处，如图 4-21 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、医生办公室、治疗计划室等人员长居留场所	1 次/年
委托监测	质子治疗机房	便携式仪表巡测	贯穿辐射	γ 辐射剂量率、 中子剂量当量率	同自行监测点位	1 次/年

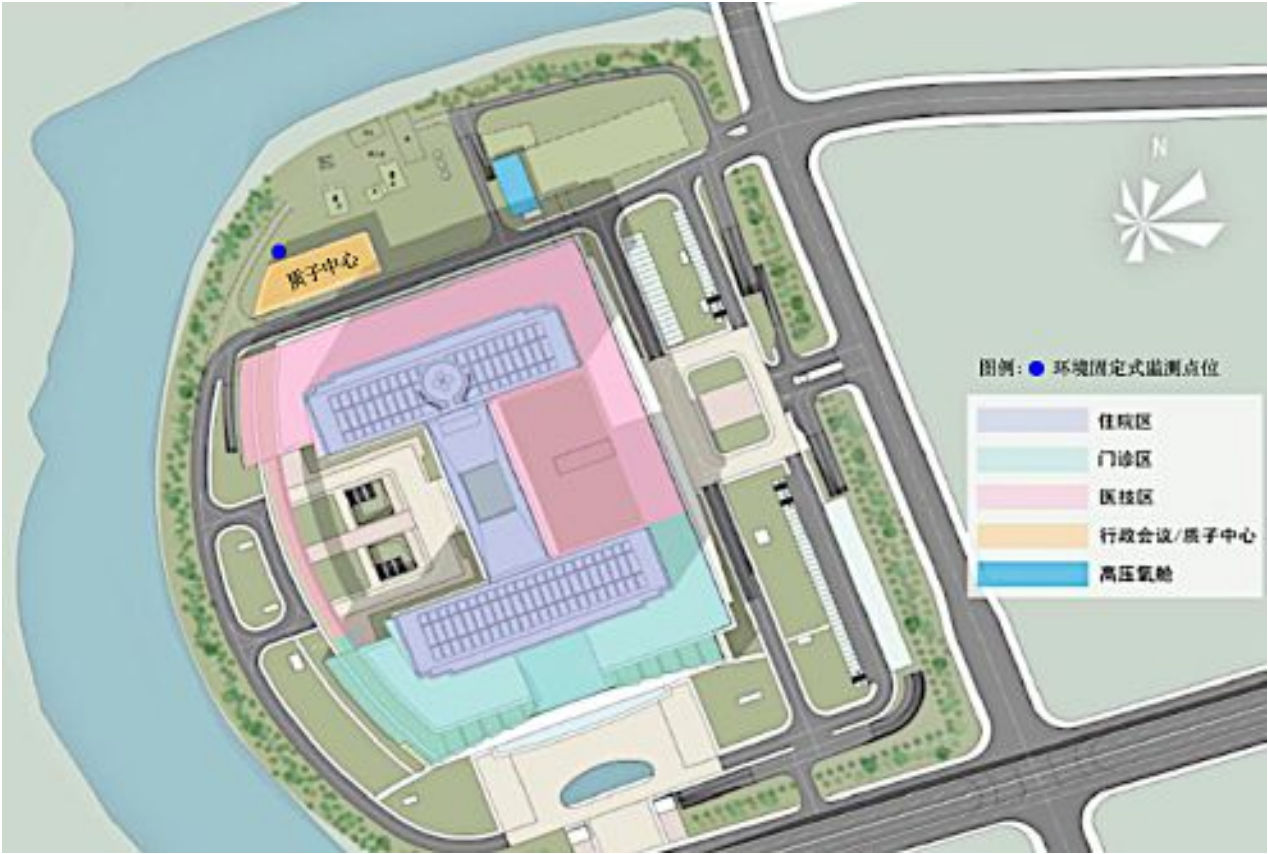


图 6-1 固定式环境监测仪表安装点位图

6.3.2 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 6-4。

其中，在院区内质子治疗机房顶板上方附近设一个固定式监测点位，如图 6-1 所示。该监测点设固定式中子、 γ 探测器各 1 个，用于对环境中的中子、 γ 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 6-4 本项目环境监测计划

监测方式	监测对象		监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	贯穿辐射	便携式仪表 巡测	γ 辐射剂量率和中子剂量率	医院院内质子治疗机房周围	1 次/年
		固定式仪表 监测		共 1 个点，如图 6-1 所示	实时
委托监测	贯穿辐射		γ 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	^7Be 、 ^{22}Na 、 总 α 、总 β	院区东、南、西、北四侧的土壤	1 次/年

6.3.3 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。质子治疗机房配备的个人剂量计和个人剂量报警仪均需具有监测 X- γ 和中子的功能。

个人剂量计用于对辐射工作人员和相关医护人员的常规个人剂量监测，医院为每名放射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天。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治疗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。个人剂量档案应终生保存。

此外，医院组织放射工作人员进行职业健康体检，两次体检的时间间隔不超过2年，建立个人职业健康档案，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。

6.3.4 监测设备

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式 γ 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- γ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见表6-5。

表 6-5 本项目拟配备的辐射监测设备清单

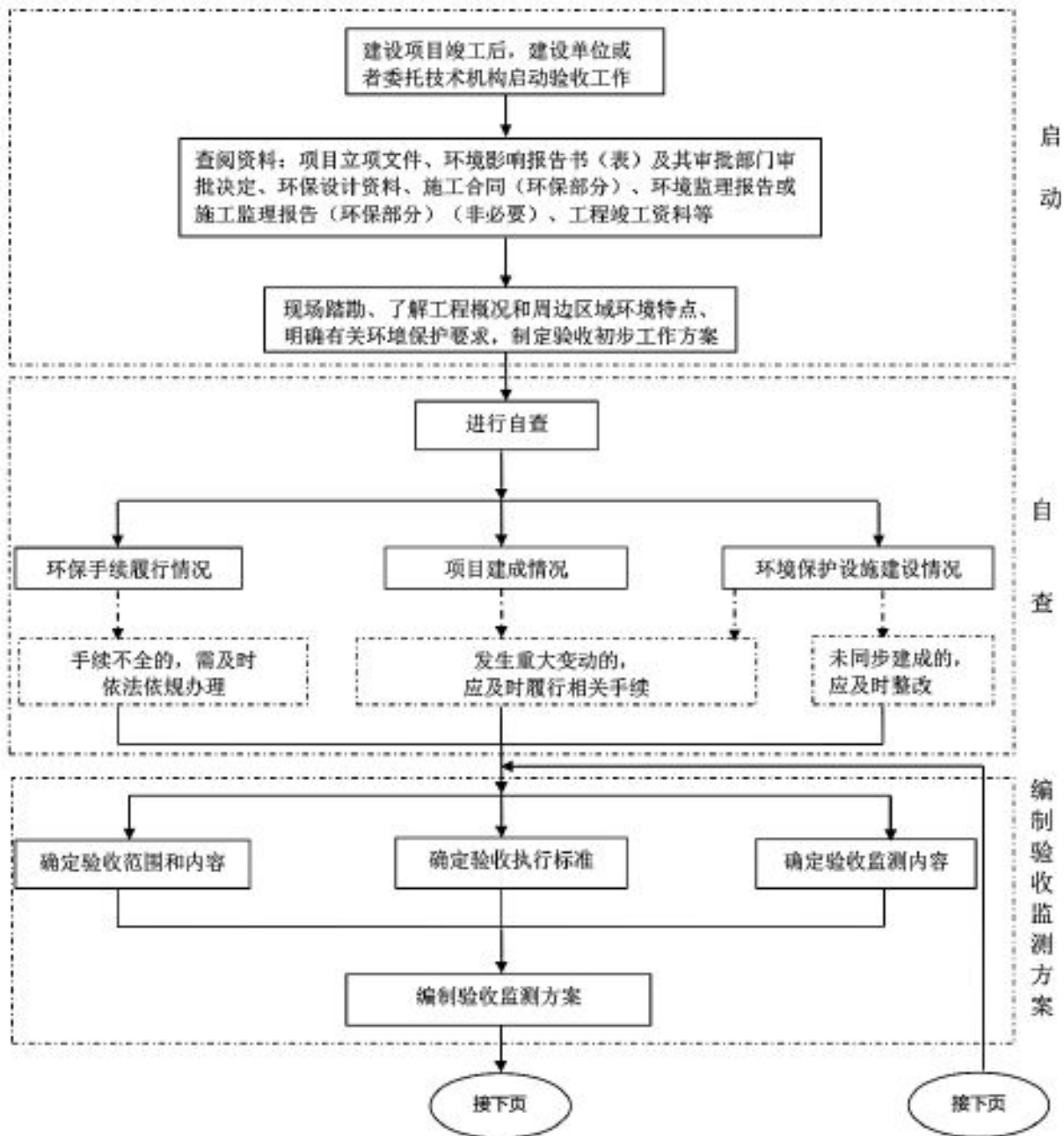
序号	仪器名称	数量，台
1	固定式 γ 探测器	3
2	固定式中子探测器	3
3	X/ γ 巡检仪	1
4	中子巡检仪	1
5	直读式个人剂量报警仪	2
6	个人剂量计	1支/人

6.3.5 竣工环保验收监测

为有效落实环境保护“三同时”要求，确保环保设施的有效性，根据《建设项目环境保护管理条例》、《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》等法规的要求，本项目竣工后，医院应自主开展竣工环保验收工作，对本项目相关环境保护设施的建设、调试、管理及其效果和污染物排放情况开展查验和监测工作，编制验收监测报告。

6.3.5.1 工作流程

医院承诺将在质子治疗系统调试阶段委托有资质的检测机构对质子治疗机房周围环境开展竣工环保验收监测。参照《建设项目竣工环境保护验收技术指南 污染影响类》，本项目竣工环保验收监测的工作流程如图 6-2 所示。



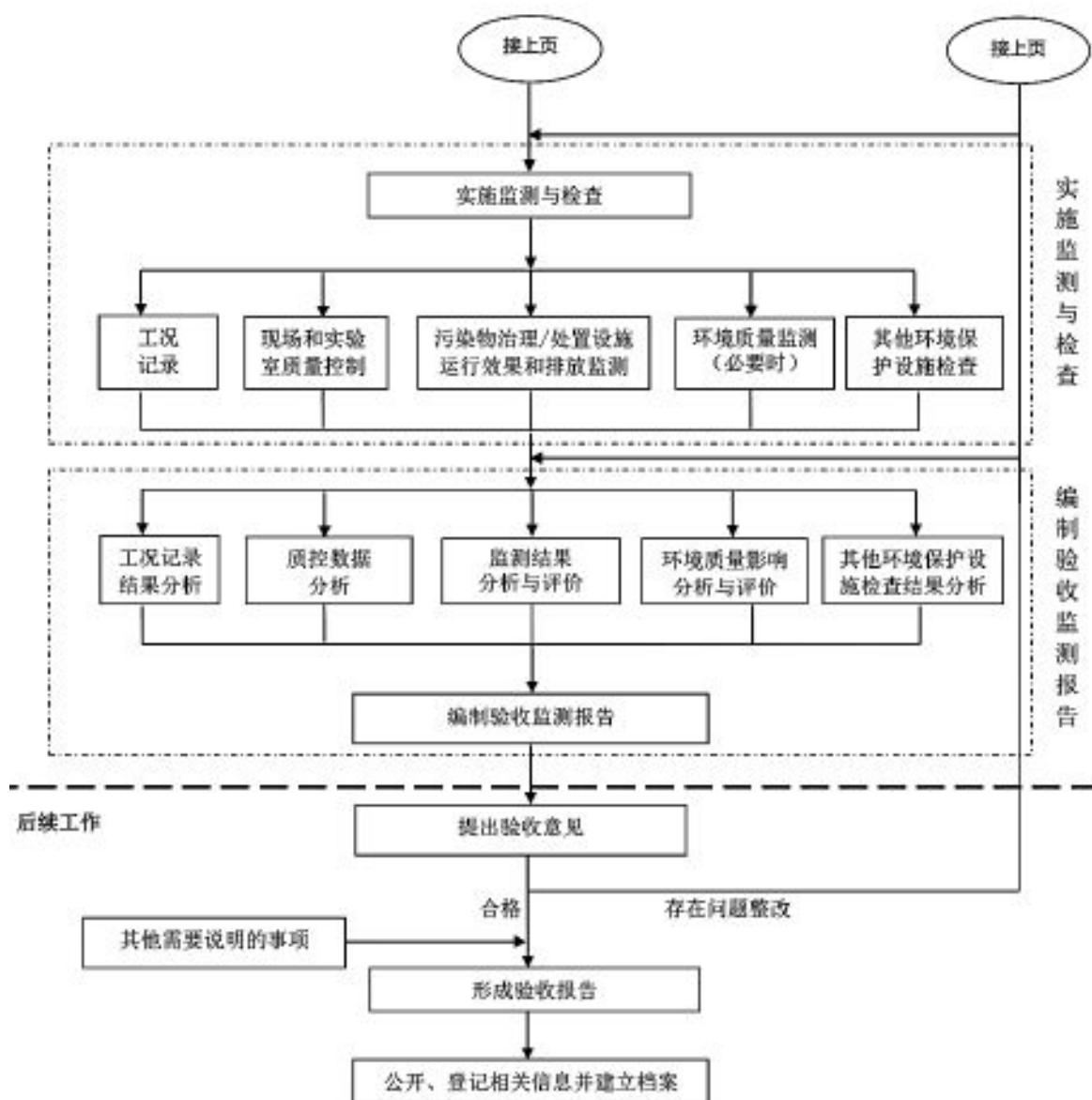


图 6-2 竣工环保验收工作流程

6.3.5.2 验收监测方案

结合质子治疗系统运行期间的污染源特点、辐射环境质量现状调查因子等，制定了本项目竣工环保验收监测方案，具体见表 6-6。

表 6-6 竣工环保验收监测方案

监测对象	监测项目	监测点位	监测工况
质子治疗机房外场所辐射水平	γ 辐射剂量率和中子剂量率	质子治疗机房屏蔽体外，监测点位不少于图 5-27 至图 5-32 中的关注点点位	一、质子治疗系统开机运行： （1）治疗终端引出能量为 230MeV，机架旋转角度 0°、90° 和 180°； （2）治疗终端引出能量为 70MeV，机架旋转角度 0°、90° 和 180°
医院院内环境辐射水平	γ 辐射剂量率和中子剂量率	以质子治疗机房地面相对位置为中心，东、西、南、北四侧 0~100m 范围内，每隔 20m 取一个点位，共 24 个点位	二、质子治疗系统停机
质子治疗机房内部辐射水平	γ 辐射剂量率	机房内人员工作位、主要的维修维护位、CT 控制台、治疗头、治疗床、加速器周围等区域	质子治疗系统连续运行一段时间，停机 1 天后
冷却水	^3H 、 ^7Be 、总 α 、总 β	负二层活化冷却水蓄水罐（若暂存有冷却水）	调试、运行期间若有冷却水排放，即取样并委托有资质单位监测
环境介质（土壤）	^7Be 、 ^{22}Na 、总 α 、总 β	质子治疗机房地面相对位置周围东、南、西、北四侧的土壤	调试完成后

6.4 辐射事故应急

童昌医院已根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）、原国家环保总局《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》（环发【2006】145 号）及《突发环境事件信息报告办法》（环保部令第 17 号）等的有关规定，制定了《福建童昌医院放射事故应急处理预案》，并承诺在项目建成前结合本项目建设内容和特点对其进行补充完善，主要包括：

（1）应急管理机构与职责：医院成立辐射事故应急处理领导小组，专门负责辐射事故应急工作的组织、指挥和协调。领导小组组长由副董事刘焕文担任，副组长由院长孙贵林担任，领导小组下设应急办公室，应急办公室主任由副院长王建华担任，应急办公室下设善后处理组、医疗救护组、应急处置组、物资保障组、事故调查组，组员由医务部、设备科、放疗科、肿瘤科等相关科室领导组成。预案中规定了组长、副组长、应急办公室和各个小组的职责，并提供各相关部门的联系方式。

(2) 辐射事故分级：规定了放射事故的分级。

(3) 应急处理程序：规定应急启动程序、事故报告程序、不同类型辐射事故发生时应采取的应急处置措施、应急人员防护以及放射事故的调查等内容。

(4) 应急报告：明确了应急事故报告的相关部门及联系方式。

(5) 应急终止程序和后续整改：规定了应急终止条件、终止后的行动等内容。

(6) 保障措施：规定了通信与信息保障、应急队伍保障、应急物资和装备保障、经费保障等内容。

(7) 预案管理：规定了应急培训、演练计划、预案修订等内容。

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。

童昌医院目前已成立了放射防护领导小组，小组成员由院长、副院长、医务科、行政办、设备科、放疗科、肿瘤科、医学影像科、工程科、保卫科等部门（科室）的领导和相关工作人员组成。领导小组组长由院长孙贵林担任，全面负责医院的辐射安全管理工作，辐射安全管理员由注册核安全工程师担任，专职负责辐射安全与防护相关工作。

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。

童昌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。

童昌医院已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。

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。

本项目使用质子治疗系统用于肿瘤的放射治疗，经预测分析评价，质子治疗机房的辐射屏蔽设计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。机房设计了完备、冗余的安全联锁系统，通过门-机联锁、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。

童昌医院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，质子治疗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。

本项目拟为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，并委托有资质单位监测，监测周期不超过 90 天。建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。配备个人剂量报警仪，用于工作人员在治疗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。

本项目拟在质子治疗机房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- γ 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。

童昌医院按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

6.5.5 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。

童昌医院目前已制定了包括岗位职责、操作规程、放射防护管理、安全管理、质量控制、放射工作人员培训、放射工作人员个人剂量管理、档案管理、台账管理、应急预案等一系列的辐射安全管理规章制度，并将严格按照规章制度执行。

此外，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，制定或完善操作规程、设备检修维护、放射性废物处理、辐射监测、应急预案等规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。

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。

童昌医院目前已制定了《福建童昌医院放射事故应急处理预案》，成立了辐射事故应急领导小组并明确了各小组成员的职责，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。

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，质子治疗机房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，排风口位于裙房屋面，高度约为 20m。

可能产生的放射性废水为质子治疗系统的活化冷却水，本项目设置了冷却水蓄水罐，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，暂存于机房内固定场所。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 6-7。

表 6-7 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：成立放射防护领导小组	--
		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 γ 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- γ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪	100
		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）		2500
5	环境影响评价、竣工环保验收		50
	总计		2655

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。本项目的竣工环保验收内容及要求列于表 6-8。

表 6-8 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	屏蔽体外剂量率	质子治疗机房四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶各关注点处的剂量率水平不高于表 1-2 中所列剂量率控制水平。	
5	辐射防护与安全措施	质子治疗系统	1.辐射工作场所分区： 控制区：质子治疗机房内部；监督区：质子治疗机房四周屏蔽体外相邻场所； 2.人身安全联锁系统：由 PLC、出入管理设备、紧急开门按钮、急停开关、清场按钮、工作状态指示灯等组成，且所有安全设备均能正常投入使用； 3.通风系统：机房采用送风机送风、排风机排风的方式，换气次数约为 12 次/小时； 4.场所辐射监测系统：机房负二层治疗层内和控制室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	质子治疗机房设有独立的通风系统，各区域排风管最终引至裙房屋面排放，排放高度约 20m。
		废水	负二层设有冷却水蓄水罐，用于暂存质子治疗系统产生的活化冷却水。
		固体废物	质子治疗机房的底层设有带锁铁箱，铁箱的尺寸约为 1m×1m×1m，用于暂存放射性固体废物，铁箱上贴有电离辐射警告标志。配备专门的管理人员，负责放射性废物的安全管理以及铁箱钥匙的保管。
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。质子治疗机房顶部周围设一个固定式环境监测点位，该点位安装一台 γ 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 90 天，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。并配备一定数量的个人剂量报警仪。
		监测设备	1.固定式 γ 探测器：3 台；

			2.固定式中子探测器：3 台； 3.X/γ 巡检仪：1 台； 4.中子巡检仪：1 台； 5.直读式个人剂量报警仪：2 台； 6.个人剂量计：1 支/人。
--	--	--	--

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。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%。

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）本项目建成后，将给区域的肿瘤患者提供更高质量的放疗服务和更便捷的就医环境，对推动区域医疗卫生健康事业的发展具有积极作用，对提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

（2）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：本项目使用质子治疗系统开展肿瘤放射治疗，建设一间质子治疗机房及其配套设备间、排风机房等辅助用房以及医护办公室、治疗计划室、诊室等配

套治疗用房，质子中心总建筑面积约 4500m²。

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 结论和建议

8.1 结论

8.1.1 项目工程概况

本项目拟建一间质子治疗机房及其配套设备间、排风机房等辅助用房、医护办公室、治疗计划室、诊室等配套治疗用房，总建筑面积约 4500m²。项目总投资约为 250000 万元，其中环保投资约 2655 万元，占总投资的 1.06%。

项目拟使用 1 套质子治疗系统开展放射诊疗。项目运行期间的辐射污染源主要是使用射线装置时产生的“瞬发辐射”和装置停机后依然存在的“感生放射性”，以及运行期间产生的放射性三废。

8.1.2 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。

本项目拟使用的质子治疗系统设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽可能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）大于可能引起的辐射危害。因此，本项目核技术利用实践活动是正当的。

8.1.3 选址、布局合理性分析

本项目拟建于童昌医院院区内的地下区域，与周围环境敏感点距离较远（最近的居民楼位于项目东侧约 200m 处），设置了相对独立的质子治疗区，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；项目布局综合考虑了肿瘤质子放疗场所功能需要，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。

8.1.4 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：质子治疗机房设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括门禁控制、门机联锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器、工作状态指示灯、视频监控以及电离辐射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：质子治疗机房设有独立的通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计能够确保排入环境的放射性废气对环境的影响满足相关标准的要求。

（5）工作场所辐射监测系统：质子治疗机房内和控制室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。

8.1.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，工作人员年最大有效剂量为 3.78mSv/a，公众所受年最大有效剂量为 0.0512mSv/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。

8.1.6 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系统的运行。

质子治疗机房设置了独立的排风系统，其运行期间产生的放射性气体经机房内排风管道引至裙楼屋面排放，排放高度约为 20m。

本项目设有冷却水蓄水罐，放射性废水经管道排入蓄水罐内，确保其在得到处置前能够安全暂存。经暂存衰变，取样监测后满足排放要求的排入医院污水管网。

质子治疗机房底层设有放射性固体废物暂存设施，确保放射性固体废物在得到处置前能够安全暂存。暂存一定时间后，满足解控标准的，解控后按一般固体废物处理或回收利用，不满足解控标准的委托有资质单位处理。

8.1.7 辐射安全管理

童昌医院已成立了专门的放射防护领导小组；已基于人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面内容建立了一系列的辐射安全管理制度并拟根据本项目的建设内容进行补充完善；制定了辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在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、辐射工作场所监测和个人剂量监测方案能够满足本项目运行的要求。

8.1.8 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。

8.1.9 总结

综上所述，本项目在严格按照环评报告书中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和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。福建童昌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。

8.2 建议

（1）医院在本项目施工过程中必须加强监督，保证建筑材料和施工质量，混凝土施工时要确认成型密度、均匀、表观密度符合设计要求。对于嵌入式安装造成的局部屏蔽减弱部位，应进行屏蔽补偿。

（2）接受质子治疗的患者具有一定的感生放射性，应加强对治疗后患者的防护和管理。建议通过增加治疗技师人数、增加治疗结束后停机等待时间、增加与治疗结束后患者的接触距离，以降低人员受照剂量。

（3）根据环境影响评价结果，技师的年受照剂量接近其剂量约束值，建议运行后根据个人剂量监测情况酌情增加人员数量，合理安排工作负荷，以满足剂量约束值的要求。

（4）加强对治疗机房内尤其是治疗头处感生放射性水平的监测，了解机房内的辐射水平。

（5）落实环评中提出的管理措施和辐射防护措施要求，在实践中建立和不断完善各项辐射管理规章制度和事故应急预案，并采取切实措施保证各种规章制度的有效执行。