核技术利用建设项目

扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目暨

江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）项目

环境影响报告书



中核扬州实业发展有限公司

2023 年 5 月

生态环境部监制

核技术利用建设项目

扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目暨

江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）项目

环境影响报告书

建设单位名称：中核扬州实业发展有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）：刘会凤

通讯地址：江苏省扬州市仪征市张集街道-111 号

邮政编码：211423　　联系人：那威

电子邮箱：[redacted]　　联系电话：[redacted]

打印编号：1685934679000

编制单位和编制人员情况表

项目编号	65xsn3
建设项目名称	扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目暨江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）项目
建设项目类别	55--172核技术利用建设项目
环境影响评价文件类型	报告书
一、建设单位情况	
单位名称（盖章）	中核扬州实业发展有限公司
统一社会信用代码	91321081MA204BW066
法定代表人（签章）	刘会凤
主要负责人（签字）	陆建辉
直接负责的主管人员（签字）	那威
二、编制单位情况	
单位名称（盖章）	中国原子能科学研究院
统一社会信用代码	12100000400000309R
三、编制人员情况	

1.编制主持人

姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
陈凌	06351123506110497	BH009720	

2.主要编制人员

姓名	主要编写内容	信用编号	签字
陈凌	主持编制	BH009720	
严源	审核	BH013174	
刘昕宇	第四章、第五章	BH049369	
王春霖	第二章、第六章	BH049368	

罗欣	第一章、第三章、第七章、第八章	BH009733	罗欣



持证人签名:
Signature of the Bearer

管理号: 06351123506110497
File No.:

姓名: 陈凌
Full Name

性别: 男
Sex

出生年月: 1967.07
Date of Birth

专业类别:
Professional Type

批准日期: 2006年5月14日
Approval Date

签发单位盖章:
Issued by

签发日期: 2006 年 9 月 11 日
Issued on

本证书由中华人民共和国人事部和国家环境保护总局批准颁发。它表明持证人通过国家统一组织的考试合格，取得环境影响评价工程师的职业资格。

This is to certify that the bearer of the Certificate has passed national examination organized by the Chinese government departments and has obtained qualifications for Environmental Impact Assessment Engineer.

中华人民共和国人事部
approved & authorized
by
Ministry of Personnel
The People's Republic of China

国家环境保护总局
approved & authorized
by
State Environmental Protection Administration
The People's Republic of China

编号:
No.: 0004200

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 建设单位及运营单位概况 1
1.2.2 项目背景、意义 2
1.2.3 本次评价内容 7
1.2.4 项目产业政策及选址合理性 9
1.2.5 核技术利用及辐射安全管理现状 15
1.3 编制依据 15
1.3.1 法律、法规和规章 15
1.3.2 技术导则、标准 17
1.3.3 其它文件、资料 18
1.4 评价标准 19
1.4.1 剂量限值和剂量约束值 19
1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量控制要求 20
1.4.3 核医学工作场所放射性表面污染控制水平 29
1.4.4 放射性三废控制要求 29
1.4.5 其他标准 36
1.5 评价范围和保护目标 37
1.5.1 评价范围 37
1.5.2 环境保护目标 38

2 自然环境与社会环境状况 44

2.1 地理位置 44
2.2 自然环境状况 44
2.2.1 地形地貌 44
2.2.2 地质构造 45
2.2.3 气候特征 45
2.2.4 水文 45
2.3 社会环境概况 46
2.3.1 区划人口 46
2.3.2 社会发展状况 46
2.3.3 经济发展状况 49
2.4 环境质量和辐射现状 50
2.4.1 监测内容 50
2.4.2 监测/取样点位 50
2.4.3 监测设备和监测方法 53
2.4.4 质量保证措施 54
2.4.5 监测结果 55
2.5 选址适宜性评价 58

3 工程分析与源项 59

3.1 项目规模与基本参数 59
3.1.1 项目规模 59
3.1.2 基本参数 65
3.2 工程设备与工艺分析 66
3.2.1 质子治疗系统 66
3.2.2 直线加速器 86
3.2.3 Ⅲ类射线装置 90
3.2.4 核医学 93
3.3 辐射源项分析 97
3.3.1 质子治疗系统 97
3.3.2 Ⅱ、Ⅲ类射线装置 125
3.3.3 核医学科 128
3.4 主要辐射污染因子小结 129
4 辐射安全与防护设施 131
4.1 质子治疗系统 131
4.1.1 辐射工作场所分区 131
4.1.2 布局合理性分析 137
4.1.3 辐射屏蔽设计方案 137
4.1.4 人身安全联锁系统 147
4.1.5 场所辐射监测系统 173
4.1.6 通风系统 174
4.1.7 放射性三废处理 182
4.2 直线加速器 189
4.2.1 辐射工作场所分区 189
4.2.2 布局合理性分析 189
4.2.3 辐射屏蔽设计方案 190
4.2.4 辐射安全与防护措施 193
4.2.5 通风系统 198
4.2.6 放射性三废处理 199
4.3 Ⅲ类射线装置 200
4.4 核医学 205
4.4.1 辐射工作场所分区 205
4.4.2 布局合理性分析 205
4.4.3 工作场所分级、分类 206
4.4.4 辐射屏蔽设计方案 209
4.4.5 人流、物流 211
4.4.6 辐射安全防护措施 214
4.4.7 放射性三废来源及处理措施 215
4.5 服务期满后的环境保护措施 218
5 辐射环境影响分析 224
5.1 质子治疗系统 224
5.1.1 正常运行环境影响分析 224

5.1.2 事故环境影响分析 265
5.2 直线加速器 268
5.2.1 正常运行环境影响分析 268
5.2.2 事故影响分析 292
5.3 核医学科 294
5.3.1 正常运行环境影响 294
5.3.2 事故影响分析 302
6 辐射安全管理 305
6.1 机构与人员 305
6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构 305
6.1.2 辐射工作人员管理 306
6.2 辐射安全管理规章制度 307
6.3 辐射监测 307
6.3.1 工作场所监测 307
6.3.2 环境监测 307
6.3.3 个人剂量监测 310
6.3.4 监测设备 311
6.3.5 竣工环保验收监测 312
6.4 辐射事故应急 316
6.5 年度评估报告 316
6.6 申请者从事辐射工作能力评价 317
6.6.1 辐射安全与环境保护管理 317
6.6.2 辐射工作人员培训 318
6.6.3 工作场所的安全防护措施 318
6.6.4 个人防护用品及监测仪器 319
6.6.5 规章制度 319
6.6.6 辐射事故应急预案 320
6.6.7 辐射工作能力综合评价 320
6.7 环保投资一览表 321
6.8 竣工环保验收一览表 321
7 利益-代价分析 323
7.1 利益分析 323
7.2 代价分析 323
7.3 正当性分析 324
8 结论与建议 325
8.1 项目工程概况 325
8.2 辐射安全与防护措施 325
8.2.1 选址、布局合理性分析 325
8.2.2 辐射防护措施 325
8.2.3 运行期放射性三废的治理和控制 326
8.2.4 施工期污染防治措施 327

8.3 辐射环境影响分析 327
8.4 辐射安全管理 327
8.5 公众参与 327
8.6 总结 328
8.7 建议 328

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目暨江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）项目

建设地点：江苏省扬州市仪征市张集街道-111 号

建设性质：新建

建设单位：中核扬州实业发展有限公司

建设规模：本项目核技术利用建设内容包括质子中心、放疗中心、影像中心和核医学科。其中，质子中心拟使用 2 套质子治疗系统用于肿瘤放射治疗、10 台 X 射线管用于治疗定位、1 台 PET/CT 用于治疗验证；放疗中心拟使用 3 台电子直线加速器用于放射治疗；影像中心拟使用 2 台模拟 CT 用于放疗前模拟定位，以及 1 台大孔径 CT、2 台 DR、1 台乳腺钼靶用于放射诊断；核医学科拟建门诊诊断场所，使用非密封放射性物质及 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT 用于显像诊断，属乙级非密封放射性物质工作场所。

项目投资：项目总投资约为 170000 万元，其中环保投资约 3000 万元，占总投资的 1.76%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位及运营单位概况

本项目建设单位为中核扬州实业发展有限公司（以下简称“中核扬州”，营业执照见附件 1），成立于 2019 年 9 月，是中核兴业控股有限公司控股子公司。中核兴业控股有限公司（以下简称“中核兴业”）成立于 1994 年，是中央直接管理的国有重要骨干企业、国家核科技工业的主体、国家核能发展与核电建设的

中坚——中国核工业集团有限公司旗下从事产业链延伸的重要专业平台之一。

本项目建成后的运营单位为江苏省人民医院。江苏省人民医院前身为 1936 年成立的江苏省立医政学院附设诊疗所，是江苏省属三级甲等综合性医院，总院占地面积 245 亩，现有建筑面积 41 万平方米，固定资产总额（净值）26.7 亿元，实际开放床位 5200 张，职工约 7000 人。

本项目设计及施工期由建设单位，即中核扬州作为本项目的责任主体，因此由中核扬州办理本项目的环境影响评价审批手续。项目建成后，运营期负责运营的责任主体为江苏省人民医院，因此由江苏省人民医院申请本项目的辐射安全许可证。（本报告关于核技术利用与辐射安全管理现状、辐射安全管理机构与人员、辐射安全管理规章制度、辐射事故应急等内容主要介绍江苏省人民医院的相关情况。）

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。据世界卫生组织（WHO）2019 年的估计，在 183 个国家中的 112 个国家中，年龄在 70 岁之前癌症是人类第一或第二大死亡原因。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。为提高扬州市医疗服务保障水平，建设单位拟建扬州质子治疗中心项目，是为了顺应放疗“精确诊断、精确定位、精确计划、精确治疗”的新时代，顺应政府鼓励社会办医打造多元化医疗服务的政策，顺应扬州、仪征及周边地区肿瘤患者高端治疗的迫切需求，通过引进质子治疗装置，满足扬州市仪征市及周边地区的恶性肿瘤精准高端治疗的需求，提升癌症治疗水平。

本项目已列入江苏省重大项目，是推广核技术应用、让宝贵原子能技术造福千家万户、使超导回旋加速器技术产业化的重要实践，为服务于人民群众日益增长的对高科技医疗技术的迫切需要、弥补宁仪扬城市功能不足带来了利好。

本项目建设目前全国唯一进口+国产深度融合的双源质子治疗系统为特色，具备常规放疗独立运营条件的专科放疗医院。同时，医院将依托江苏省人民医院临床与基础研究特长、中国核工业集团公司国产自研质子治疗设备研发技术优势、中广核集团和 IBA 公司进口成熟质子治疗系统、南京医科大学人才培养优势，打造集医疗、科研、教学与一身的全国质子中心典范。

医院建成后，将弥补江苏省及周边省市质子高端放疗治疗的能力空白，影响范围覆盖华东大部分区域。医院工作人员达 280 人左右，其中医师及医技等高端人才 100 人以上，每年门诊量达 3 万人左右，年培育物理师、放疗师等稀缺人才 150 人，并在自研高端医疗装备、科研人才培养，国内国际医学学术、技术学术等方面产生巨大而深远的影响。

2021 年 3 月 29 日，本项目在江苏省投资项目在线审批监管平台进行了企业投资项目备案，并获得了仪征市行政审批局的批复（备案证号：仪审备[2021]69 号，见附件 2），备案项目名称为“扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目”，项目代码：2020-321081-84-03-568879。2022 年 3 月 24 日，本项目在江苏省投资项目在线审批监管平台再次进行了企业投资项目备案，并获得了仪征市行政审批局的批复（备案证号：仪审备[2022]89 号，见附件 3），项目名称为“江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）项目”，项目代码为：2203-321081-89-01-757822。2022 年 8 月 1 日，本项目获得江苏省卫生健康委员会颁发的《关于同意江苏省人民医院设置扬州分院区的批复》（批复文号：苏卫医政[2022]17 号，见附件 4）。

项目拟建的江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）是以肿瘤患者为主、质子治疗为特色治疗手段的三级肿瘤专科医院，总建筑面积 4.7 万平方米，包括质子治疗科、放疗科、放射科、核医学科、检验科、功能检查科、综合内科（含肿瘤科）等科室，共设置床位 100 张，其中质子治疗中心设置床位 66 张，其他临床科室床位 34 张。项目鸟瞰图见图 1-1，总平面图见图 1-2。


北
①
②
③
④
⑤
⑥
⑦
⑧
⑨
图例：
①质子中心（质子治疗系统，地下一层）
②放疗中心（直线加速器，地下一层）
③影像中心（模拟定位CT等，地下一层）
④核医学科（PET/CT、SPECT/CT，地下一层）
⑤科研实验楼 ⑥VIP治疗中心
⑦门诊部 ⑧住院部 ⑨能源中心

图 1-1 项目鸟瞰图

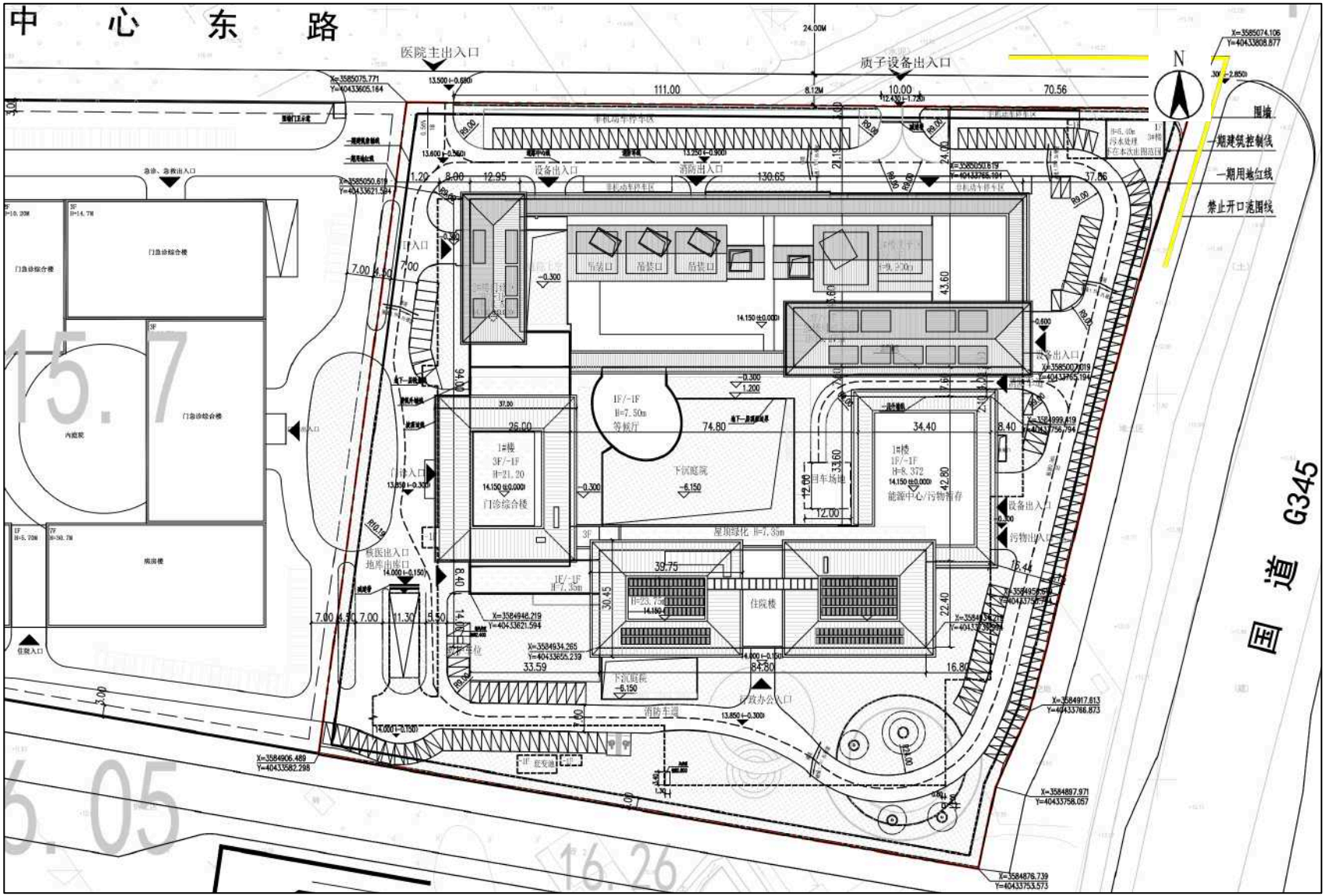

中 心 东 路
医院主出入口
质子设备出入口
设备出入口
消防出入口
急诊、急救出入口
门诊入口
污物出入口
行政办公入口
消防车道
围墙
一期建筑控制线
一期用地红线
禁止开口范围线
国 道 G345
N
门急诊综合楼
内庭院
I#楼
3F/-1F
H=21.20
门诊综合楼
II#楼
1F/-1F
H=8.372
能源中心/污物暂存
等候厅
下沉庭院
-6.150
住院楼
屋顶绿化 H=7.35m
机动车停车区
非机动车停车区
污水处理
设在本次出图范围
111.00
70.56
130.65
74.80
34.40
39.75
33.59
84.80
16.80
16.44
16.26
15.7
6.05

图 1-2 项目总平面图

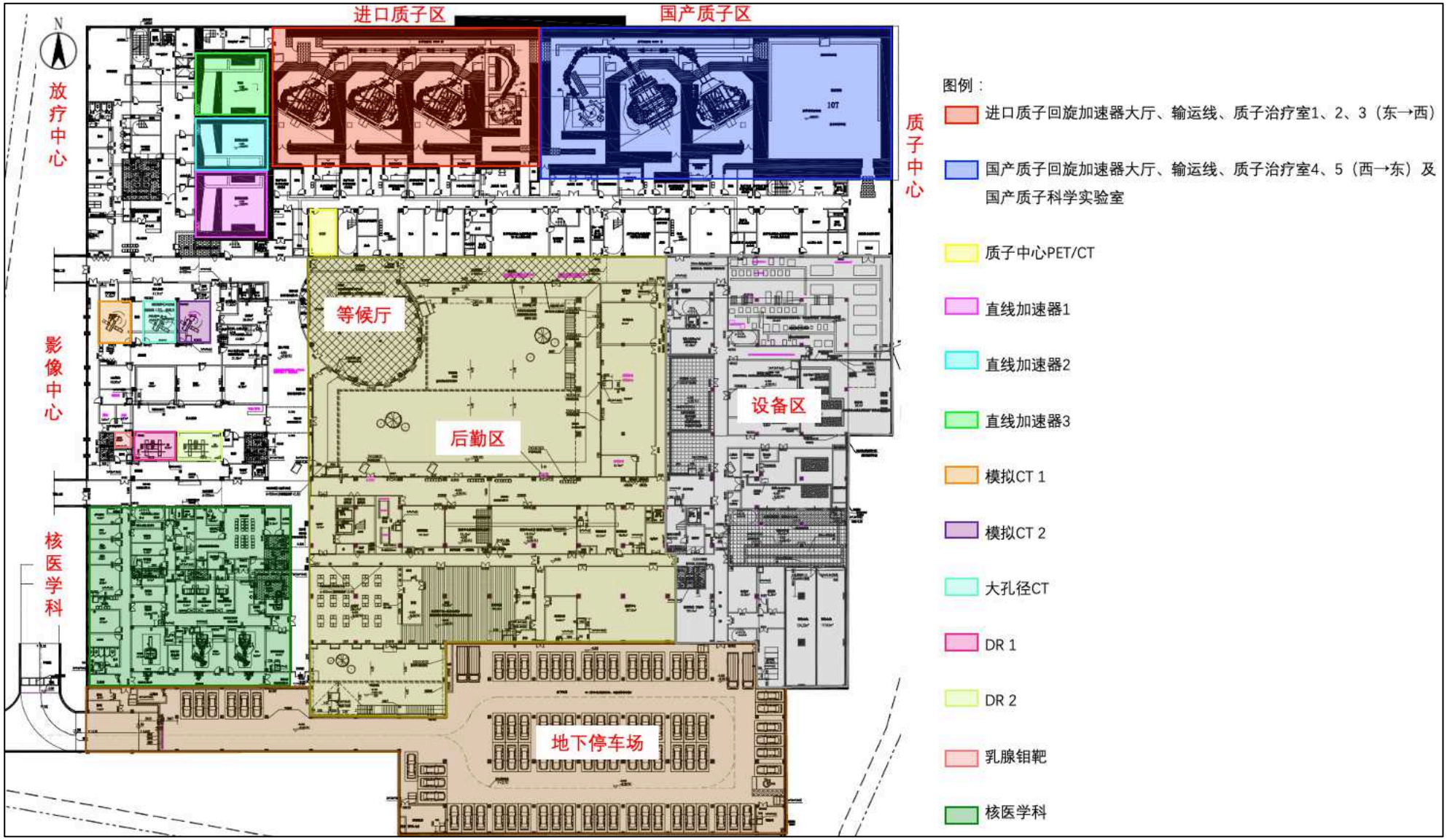


图 1-3 地下一层布局示意图

1.2.3 本次评价内容

2021 年 11 月 11 日，本项目土建工程环评文件《扬州质子治疗中心及产业项目-质子治疗中心项目环境影响报告表》已获得扬州市生态环境局的批复（批复文号：扬环审批[2021]03-114 号，见附件 5）。本次环评为辐射环境影响评价，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，各辐射工作场所布局见图 1-3。

1.2.3.1 使用射线装置

（1）质子中心

质子中心主要功能区域位于地下一层东北侧，占地范围约 120 米×45 米，拟使用 2 套质子治疗系统，建设 5 间质子治疗室及 1 间质子科学实验室。其中位于西侧的 1 套为进口质子治疗系统（Ⅰ类射线装置，质子最高能量 230MeV），供货商为中广核核技术发展股份有限公司（以下简称“中广核技”），拟建 3 间质子治疗室（从东到西依次为治疗室 1、2、3）；位于东侧的 1 套为国产质子治疗系统（Ⅰ类射线装置，质子最高能量 230MeV），供货商为中国原子能科学研究院（以下简称“原子能院”），拟建 2 间质子治疗室（从西到东依次为治疗室 4、5）和 1 间质子科学实验室。

此外，每间质子治疗室配套使用 2 个定位 X 射线管，则 5 间治疗室共计 10 个 X 射线管（Ⅲ类射线装置）。

质子中心还拟使用 1 台 PET/CT（Ⅲ类射线装置），利用患者接受质子治疗后自身产生的感生放射性开展治疗准确性验证（不另外注射或服用放射性药物）。

（2）放疗中心

放疗中心位于地下一层西北侧，占地范围约 36 米×43 米，拟使用 3 台电子直线加速器（II类射线装置，最高能量均为 10MV，等中心点最大输出剂量率 22Gy/min），拟建 3 间电子直线加速器机房。

（3）影像中心

影像中心位于地下一层西侧中部，占地范围约 35 米×38 米，拟使用 2 台模拟 CT、1 台大孔径 CT、2 台 DR、1 台乳腺钼靶共 6 台Ⅲ类射线装置，每间射线装置均设独立机房。其中，2 台模拟 CT 用于放射治疗的模拟定位，其他 4 台 III 类射线装置用于放射诊断。

（4）核医学科

核医学科位于地下一层西南侧，拟建一个门诊诊断场所，使用 1 台 PET/CT、1 台 SPECT/CT 共 2 台Ⅲ类射线装置。（核医学科还拟使用 1 台 PET/MR，不属于射线装置。）

表 1-1 本项目使用射线装置情况

序号	射线装置名称	数量	主要技术参数（最大能量/管电压/管电流/等中心输出剂量率）	类别	所在位置
1	进口质子治疗系统	1 套	230MeV	I	地下一层质子中心
2	国产质子治疗系统	1 套	230MeV	I	
3	质子治疗系统配套定位 X 射线管	10 台	治疗室 1、2、3、5，各 2 台：DR：140kV，370mA；CBCT：150kV，500mA。治疗室 4，2 台：80kV，1A。	III	
4	PET/CT	1 台	140kV，666mA	III	
5	电子直线加速器	3 台	X 射线：10MV，2200cGy/min 电子线：15MeV，600 Gy/min	II	地下一层放疗中心
6	模拟 CT	2 台	140kV，900mA	III	地下一层影像中心
7	大孔径 CT	1 台	140kV，900mA	III	
8	DR	2 台	150kV，800mA	III	
9	乳腺钼靶	1 台	50kV，200mA	III	
10	PET/CT	1 台	140kV，666mA	III	地下一层核医学科
11	SPECT/CT	1 台	140kV，440mA	III	
备注：考虑到表中序号 4 和序号 10 的 PET/CT 的选型未确定，设备校准用密封放射源的使用不在本次评价范围内，将另外通过江苏省建设项目环境影响登记表备案系统备案。					

1.2.3.2 使用非密封放射性物质

核医学科位于地下一层西南侧，拟建一个门诊诊断场所，应用放射性药物进行显像诊断，使用放射性物质的情况列于表 1-2。根据医院规划门诊量，依据 GB 18871-2002 附录 C，计算得到本项目核医学工作场所的放射性核素日等效最大操作量为 4.40E+07Bq，属乙级非密封放射性物质工作场所。

表 1-2 核医学科使用非密封放射性物质情况

序号	核素	状态	日最大操作量/Bq	日等效最大操作量/Bq	年最大操作量[1)]，Bq/a	用途	操作方式	操作因子	毒性因子	使用场所	贮存方式与地点
1	^{18}F	液体	1.48E+10	1.48E+07	2.96E+12	显像	很简单操作	10	0.01	地下一层核医学科	暂存于储源间
2	^{18}F[2)]	液体	1.48E+10	1.48E+06	——	贮存	源的贮存	100	0.01		
3	^{99m}Tc	液体	2.78E+10	2.78E+07	5.55E+12	显像	很简单操作	10	0.01		
总计				4.40E+07	8.51E+12	——					
注：1）年最大操作量按核医学年最大工作负荷计算得到。2）由于 ^{18}F 半衰期较短，因此送药量保守按给药量的 2 倍考虑，多于实际使用量的操作方式按源的贮存考虑。											

1.2.4 项目产业政策及选址合理性

1.2.4.1 产业政策符合性

本项目属于《产业政策调整目标》（发改委 2021 第 49 号令修改，2021 年 12 月 30 日）中“鼓励类”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 “三线一单”规划符合性分析

（1）与生态空间管控区域规划的相符性

根据《省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》（苏政发[2018]74 号）及《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》（苏政发[2020]1 号），本项目与生态空间保护区域相对位置关系见下表。

表 1-3 与生态空间保护区域相对位置关系表

地区	红线区域名称	主导生态功能	范围		面积（平方公里）			距离项目最近距离/km
			国家级生态保护红线范围	生态空间管控区域范围	国家级生态保护红线面积	生态空间管控区域面积	总面积	
仪征市	仪征西部丘岗水源涵养区	水源涵养	/	该区域内包括月塘镇境内的魏井村、长兴村、山郑村、东风村、乌山村和大营村；马集镇境内的秦桥村、新民村、爱国村、蔡湖村和方营等 5 个村；大仪镇境内的河北村、双涧村、老坝村、香沟村和张家村 5 个行政村（不包含区域内香沟社区 0.12 平方公里）；陈集镇境内的高集村、大房村、友好村、刘云村、杨庄村汪营村、开建村、立新村和沙集村	/	111.86	111.86	7
仪征市	扬州西郊省级森林公园	自然与人文景观保护	扬州西郊省级森林公园总体规划中确定的范围（包含生态保育区和核心景观区等）	/	4.67	/	4.67	11

由上表可知，本项目附近最近的国家级生态保护红线为扬州西郊省级森林公园，距离约 11km，不在其保护区内，符合生态红线相关要求；最近的生态空间管控区域为仪征西部丘岗水源涵养区，距离约 7km，不在其保护区内，符合生态空间管控区域相关要求。因此本项目符合《省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》（苏政发[2018]74 号）及《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》（苏政发[2020]1 号）要求。

（2）环境质量底线相符性

本项目可能产生的 O_3 和 NO_2 浓度均低于《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》（GBZ 2.1-2007）中规定的 O_3 和 NO_2 浓度限值和江苏省地方标准《大气污染物综合排放标准》（DB 32/4041-2021）中的相关要求，因此本项目的建设不会突破环境质量底线。

（3）资源利用上线相符性

本项目为新建项目，新建的质子治疗中心总建筑面积为 4.7 万平方米，根据《中华人民共和国土地管理法》、《中华人民共和国城乡规划法》和国家其他有关规定，本项目建设工程符合国土空间规划和用途管制要求。在项目运行期间需用水、电等能源。项目的建设不会突破区域资源利用上线。

（4）环境准入负面清单相符性

本项目属于《产业政策调整目标》（发改委 2021 第 49 号令修改，2021 年 12 月 30 日）中“鼓励类”的范畴，不属于国家及地方产业政策的“限制类”及“禁止类”。

（5）与《扬州市“三线一单”生态环境分区管控实施方案》相符性

根据《扬州市“三线一单”生态环境分区管控实施方案》中“扬州市仪征市一般管控单元生态环境准入清单”，本项目符合要求。

综上所述，本项目符合“三线一单”相关要求。

1.2.4.2.2 与土地利用规划的符合性

拟建项目位于江苏省扬州市仪征市张集街道-111 号，项目建设用地属于医疗卫生用地。建设单位已于 2020 年 10 月 21 日取得该建设用地的使用权，具体见附件 6。因此，拟建项目符合土地利用规划要求。

1.2.4.3 周围环境相容性分析

本项目建设地点位于江苏省扬州市仪征市张集街道-111 号，项目用地周围环境见图 1-4，周边规划见图 1-5，地理位置见图 1-6。

项目用地红线外部的北侧为规划中心东路和农用地，南侧为规划配套商业住宅用地，西侧为规划医院二期用地，东侧为国道 G345 和农用地。周边无自然保护区、风景名胜区、森林公园及国家和省重点保护的野生动植物等敏感目标。本项目运营期各类污染物均得到有效治理及做到达标排放，对周边环境无限制因素，周边环境无对本项目限制因素，因此本项目的建设与周边环境具有较好的相容性。



图 1-4 项目用地周围环境



图 1-5 本项目周边关系图

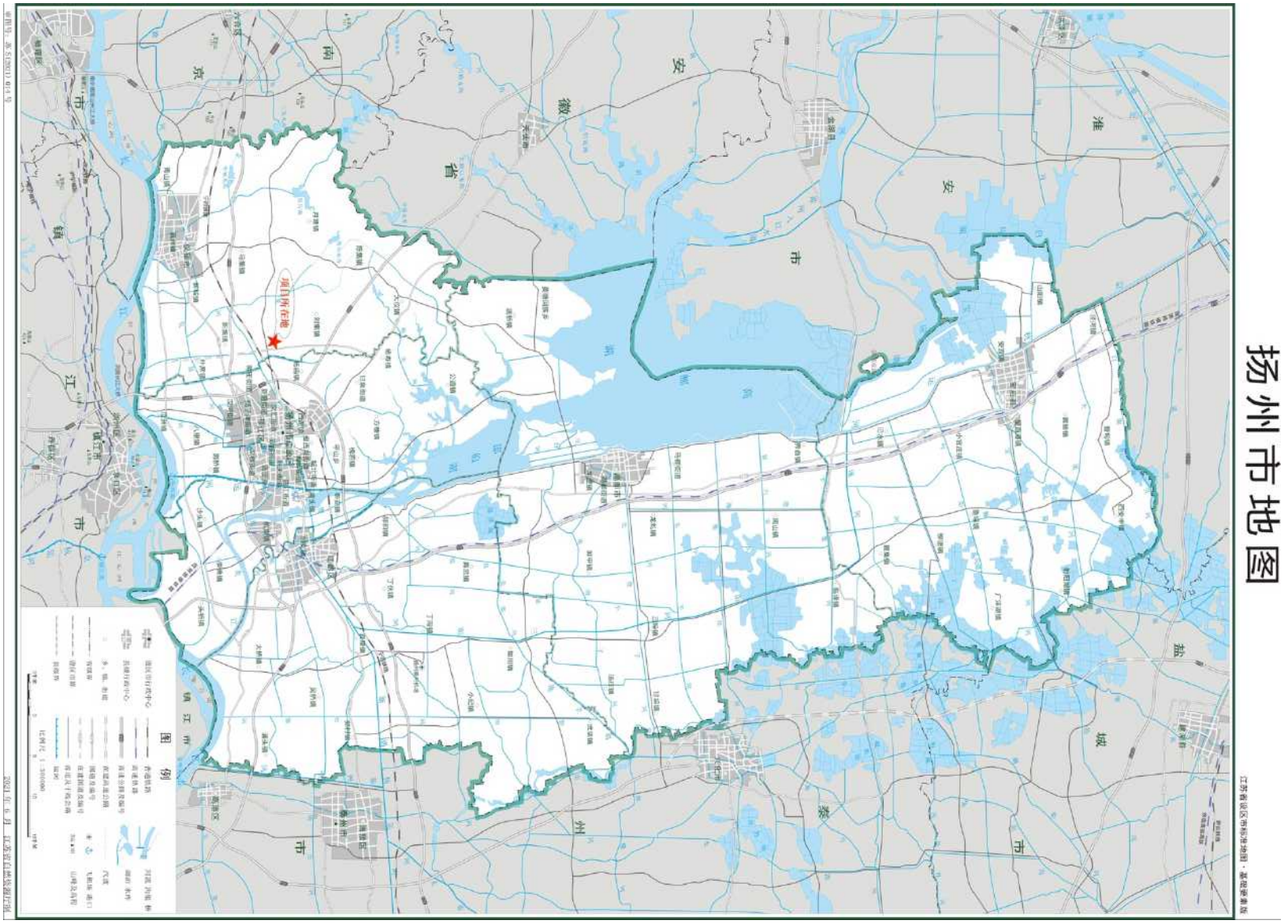


图 1-6 本项目地理位置图

1.2.5 核技术利用及辐射安全管理现状

建设单位中核扬州此前未开展过核技术利用相关活动，未申领过辐射安全许可证。在本项目环境影响评价文件获得江苏省生态环境厅批复后，将按照相关法规及审批部门要求，由运营单位江苏省人民医院申领辐射安全许可证，经相关审批部门许可后方可从事相关核技术利用活动。

江苏省人民医院现持有江苏省生态环境厅核发的辐射安全许可证，许可证号苏环辐证[00341]，有效期至 2027 年 12 月 25 日，许可种类和范围为使用Ⅰ类、Ⅲ类、Ⅴ类放射源；使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置；生产、使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。

表 1-4 江苏省人民医院辐射安全管理现状

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

1.3 编制依据

1.3.1 法律、法规和规章

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

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

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

（4） 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 第 709 号，2019年3月2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） 《关于明确辐射安全监管有关事项的通知》（生态环境部，环办辐射函[2016]430号）；

（10） 《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）；

（11） 《产业结构调整指导目录》(发改委2021年第49号令修改，2021年12月30日）；

（12） 《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）；

（13） 《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）；

（14） 《关于发布<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）；

（15） 《关于发布<建设项目竣工环境保护验收技术指南 污染影响类>的公告》，生态环境部公告 2018 年第 9 号，2018 年 5 月 16 日）；

（16） 江苏省生态环境厅《省生态环境厅关于进一步做好建设项目环境影响报告书（表）编制单位监管工作的通知》（江苏省生态环境厅，苏环办[2021]187 号文）。

1.3.2 技术导则、标准

（1） 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；

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

（3） 《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）；

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

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

（6） 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.5-2015）；

（7） 《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）；

（8） 《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）；

（9） 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）；

（10） 《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）；

（11） 《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

（12） 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

（13） 《电离辐射工作场所监测的一般规定》（EJ 381-1989）；

（14） 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

（15） 《放射性废物管理规定》（GB 14500-2002）；

（16） 《国家危险废物名录》（2021 年版）；

（17） 《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2001）及其修改单；

（18） 《危险废物鉴别技术规范》（HJ 298-2019）；

（19） 《危险废物鉴别标准通则》（GB 5085.7-2019）；

（20） 《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）；

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

（22） 《大气污染物综合排放标准》（江苏省地方标准 DB 32/4041-2021）。

1.3.3 其它文件、资料

（1） 本项目环境影响评价委托书，见附件 7；

（2） 建设单位提供的与本项目相关的管理制度和技术文件等资料；

（3） 《兆伏级 X、γ射线放疗设施屏蔽设计和评价》（周启甫，戈立新主编，北京：中国原子能出版社，2013）

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

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

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

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

本项目剂量限值遵循 GB 18871-2002，具体如下：

（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：

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

b）任何一年中的有效剂量，50 mSv。

（2）公众照射

实践使公众中有关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：

a）年有效剂量，1mSv；

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

1.4.1.2 剂量约束值

本项目剂量约束值按照 HJ 1188-2021 及 HJ 1198-2021 执行，职业照射的剂量约束值不超过 5mSv/a，公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

表 1-5《HJ 1198-2021》和《HJ 1188-2021》对剂量约束值的规定

标准名称	具体内容
《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）	一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5mSv/a。
	公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。
《核医学辐射防护与安全要求》	一般情况下，职业照射的剂量约束值不超过 5mSv/a。

（HJ 1188-2021）	公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量控制要求

1.4.2.1 放射治疗场所屏蔽体外剂量控制要求

根据 HJ 1198-2021 的 6.1.4 小节，本项目放射治疗场所屏蔽体外剂量控制应符合以下要求：

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

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

机房外辐射工作人员：$\dot{H}c$≤100 μSv/周；

机房外非辐射工作人员：$\dot{H}c$≤5 μSv/周。

2）按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}c,max$ (μSv/h)：

人员居留因子 T＞1/2 的场所：$\dot{H}c,max$≤2.5 μSv/h；

人员居留因子 T≤1/2 的场所：$\dot{H}c,max$≤10 μSv/h。

b）穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量 250μSv 加以控制。

c）对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 100μSv/h 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。”

根据上述要求计算得到本项目放射治疗场所屏蔽体外剂量率控制水平见下表，各关注点位置见图 5-8~图 5-12。

1.4.2.2 III类射线装置屏蔽体外剂量率控制要求

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）6.3.1 小节：

“a) 具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于 2.5 μSv/h；测量时，X 射线设备连续出束时间应大于仪器响应时间；

b) CT 机、乳腺摄影、乳腺 CBCT、口内牙片摄影、牙科全景摄影、牙科全景头颅摄影、口腔 CBCT 和全身骨密度仪机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5 μSv/h；

c) 具有短时、高剂量率曝光的摄影程序（如 DR、CR、屏片摄影）机房外的周围剂量当量率应不大于 25μSv/h，当超过时应进行机房外人员的年有效剂量评估，应不大于 0.25 mSv。”

综上，本项目 PET/CT、SPECT/CT、模拟 CT、大孔径 CT、乳腺钼靶机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5 μSv/h，DR 机房外的周围剂量当量率应不大于 25 μSv/h。

表 1-6 进口质子治疗系统屏蔽体外剂量率控制水平

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间，h/周	$\dot{H}c$，μSv/周	$\dot{H}c,d$，μSv/h	$\dot{H}c,max$，μSv/h	Hc，μSv/h
进口质子加速器大厅及束流输运线	B1	进口回旋加速器大厅迷道口	1/8	1	32.4	100	24.7	10	10
	B2	进口回旋加速器主控室	1	1	32.4	100	3.1	2.5	2.5
	B3	质子治疗室 1 机架区	1/4	1	32.4	100	12.3	10	10
	B4	质子治疗室 1 工作区	1/2	1	32.4	100	6.2	10	6.2
	B28	进口回旋加速器大厅外走道	1/5	1	32.4	5	0.8	10	0.8
	B29	质子供应商办公室	1	1	32.4	100	3.1	2.5	2.5
	B30	男卫	1/20	1	32.4	5	3.1	10	3.1
	B31	维护室	1/16	1	32.4	100	49.4	10	10
	B42	束流运输线西侧迷道口	1/8	1	32.4	100	24.7	10	10
	B43	进口回旋加速器大厅东墙外（国产加速器大厅）	1/4	1	32.4	100	12.3	10	10
	U1*	回旋加速器大厅顶板上方（屋面）	-	-	-	-	-	-	100
	U2	回旋加速器大厅迷道顶板上方（水冷机房）	1/16	1	32.4	100	49.4	10	10
	U3	能量选择系统顶板上方（钢瓶间）	1/16	1	32.4	100	49.4	10	10
	U7	束流输运区顶板上方（设备零件储藏间）	1/20	1	32.4	100	61.7	10	10
	U4*	回旋加速器底板下方（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
	U5*	能选系统底板下方（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
	B44*	束流运输线北墙外偏西（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
	B45*	束流运输线北墙外中部（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
	B46*	束流运输线北墙外偏东（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
质子治疗室 1	B7	治疗控制室 1	1	1	10.8	100	9.3	2.5	2.5
	B8	服务器机房	1/16	1	10.8	100	148.1	10	10
	B9	质子治疗室 1 迷道口	1/8	1	10.8	100	74.1	10	10
	B10	患者治疗设备存储室	1/20	1	10.8	100	185.2	10	10
	B11	质子治疗室 1 外走道	1/5	1	10.8	5	2.3	10	2.3

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间，h/周	Ḣc，μSv/周	Ḣc,d，μSv/h	Ḣc,max，μSv/h	Hc，μSv/h
	B12	质子治疗室 2 机架区	1/4	1	10.8	100	37.0	10	10
	B13	质子治疗室 2 工作区	1/2	1	10.8	100	18.5	10	10
	B32	抢救室	1/4	1	10.8	100	37.0	10	10
	B33	医生办公室	1	1	10.8	100	9.3	2.5	2.5
质子治疗室 2	B5	质子治疗室 1 机架区	1/4	1	10.8	100	37.0	10	10
	B6	质子治疗室 1 治疗区	1/2	1	10.8	100	18.5	10	10
	B16	治疗控制室 2	1	1	10.8	100	9.3	2.5	2.5
	B17	剂量验证设备存储室	1/20	1	10.8	100	185.2	10	10
	B18	质子治疗室 2 迷道口	1/8	1	10.8	100	74.1	10	10
	B19	治疗计划计算机房	1/16	1	10.8	100	148.1	10	10
	B20	质子治疗室 2 外走道	1/5	1	10.8	5	2.3	10	2.3
	B21	质子治疗室 3 机架区	1/4	1	10.8	100	37.0	10	10
	B22	质子治疗室 3 工作区	1/2	1	10.8	100	18.5	10	10
	B34	等候区	1/20	1	10.8	5	9.3	10	9.3
	B35	治疗头存储室	1/20	1	10.8	100	185.2	10	10.0
	U6*	质子治疗室 2 顶板上方（屋面）	-	-	-	-	-	-	100
	U8	质子治疗室 2 迷道顶板上方（电源间）	1/16	1	10.8	100	148.1	10	10.0
	U9*	质子治疗室 2 底板下方（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
质子治疗室 3	B14	质子治疗室 2 机架区	1/4	1	10.8	100	37.0	10	10
	B15	质子治疗室 2 治疗区	1/2	1	10.8	100	18.5	10	2.5
	B23	治疗控制室 3	1	1	10.8	100	9.3	2.5	2.5
	B24	患者固定装置存储室	1/20	1	10.8	100	185.2	10	9.3
	B25	质子治疗室 3 迷道口	1/8	1	10.8	100	74.1	10	10
	B26	治疗计划计算机房	1/16	1	10.8	100	148.1	10	2.5
	B27	质子治疗室 3 外走道	1/5	1	10.8	5	2.3	10	2.3
	B36	PET/CT 机房	1/2	1	10.8	100	18.5	10	0.5

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间，h/周	Ḣc，μSv/周	Ḣc,d，μSv/h	Ḣc,max，μSv/h	Hc，μSv/h
	B37	PET/CT 控制室	1	1	10.8	100	9.3	2.5	3.7
	B38	VIP 接待室	1	1	10.8	5	0.5	2.5	0.5
	B39	直线加速器机房 3	1/2	1	10.8	100	18.5	10	3.7
	B40	直线加速器机房 2	1/2	1	10.8	100	18.5	10	3.7
	B41	直线加速器机房 1	1/2	1	10.8	100	18.5	10	3.7

*备注：1. 根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5mSv/h”作为各辐射工作场所地下区域屏蔽体外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

2. 根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），对于不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 100μSv/h 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。

表 1-7 国产质子治疗系统屏蔽体外剂量率控制水平

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间，h/周	Ḣc，μSv/周	Ḣc,d，μSv/h	Ḣc,max，μSv/h	Hc，μSv/h
国产质子加速器大厅及束流输运线	A1	国产回旋加速器主控室	1	1	32.4	100	3.1	2.5	2.5
	A2	回旋加速器大厅迷道入口	1/8	1	32.4	100	24.7	10	10
	A3	质子治疗室 4 机架区	1/4	1	32.4	100	12.3	10	10
	A4	进口回旋加速器大厅	1/4	1	32.4	100	12.3	10	10
	A5	站点经理办公室	1	1	32.4	100	3.1	2.5	2.5
	A27	回旋加速器顶板上方（空调机房）	1/16	1	32.4	100	49.4	10	10
	A32	回旋加速器顶板上方（高频房间）	1/16	1	32.4	100	49.4	10	10
	A38	回旋加速器顶板上方（走廊）	1/5	1	32.4	5	0.8	10	0.8
	A39*	回旋加速器顶板上方（封闭空间）	-	-	-	-	-	-	100

辐射源项 所在区域	关注点	周围环境	居留 因子	使用 因子	周出束时 间，h/周	Ḣc， μSv/周	Ḣc,d， μSv/h	Ḣc,max， μSv/h	Hc， μSv/h
	C1*	束流传输线北墙外（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
	C4*	回旋加速器底板下方 （土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
质子治疗室 4	A6	更衣室	1/20	1	8.2	100	243.9	10	10
	A7	治疗控制室 4	1	1	8.2	100	12.2	2.5	2.5
	A8	质子治疗室 4 迷道入口	1/8	1	8.2	100	97.6	10	10
	A9	服务器机房	1/16	1	8.2	100	195.1	10	10
	A10	患者固定装置储存室	1/20	1	8.2	100	243.9	10	10
	A11	质子治疗室 5 机架区	1/2	1	8.2	100	24.4	10	10
	A12	等候区	1/20	1	8.2	5	12.2	10	10
	A28	束流输运线顶板上方（电源间）	1/16	1	8.2	100	195.1	10	10
	A30	质子治疗室 4 南墙外上方（空调机房）	1/16	1	8.2	100	195.1	10	10
	A40*	质子治疗室 4 顶板上方（不上人屋面）	-	-	-	-	-	-	100
	C5*	质子治疗室 4 底板下方（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
质子治疗室 5	A13	治疗控制室 5	1	1	8.2	100	12.2	2.5	2.5
	A14	质子治疗室 5 迷道入口	1/8	1	8.2	100	97.6	10	10
	A15	更衣室	1/20	1	8.2	100	243.9	10	10
	A16	治疗计划计算机房	1/16	1	8.2	100	195.1	10	10
	A17	剂量验证设备存储室	1/20	1	8.2	100	243.9	10	10
	A18	质子科学实验室	1/2	1	8.2	100	24.4	10	10
	A19	质子治疗室 4 治疗区	1/2	1	8.2	100	24.4	10	10
	A20	医生办公室	1	1	8.2	100	12.2	2.5	2.5
	A29	束流输运线顶板上方（转运大厅）	1/16	1	8.2	100	195.1	10	10

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间，h/周	Ḣc，μSv/周	Ḣc,d，μSv/h	Ḣc,max，μSv/h	Hc，μSv/h
	A31	质子治疗室 5 南墙外上方（空调机房）	1/16	1	8.2	100	195.1	10	10
	A41*	质子治疗室 5 顶板上方（屋面）	-	-	-	-	-	-	100
	C6*	质子治疗室 5 底板下方（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
质子科学实验室	A21	电梯厅	1/40	1	16	5	12.5	10	10
	A22	楼梯	1/40	1	16	5	12.5	10	10
	A23	患者治疗设备存储室	1/20	1	16	100	125.0	10	10
	A24	机架治疗室 5 治疗区	1/2	1	16	100	12.5	10	10
	A25	质子科学实验室迷道入口	1/8	1	16	100	50.0	10	10
	A26	质子供应商办公室	1	1	16	100	6.3	2.5	2.5
	A33	地上一层科研办公室	1	1	16	5	0.3	2.5	0.3
	A34	地上一层货梯	1/40	1	16	5	12.5	10	10
	A35	地上一层楼梯	1/40	1	16	5	12.5	10	10
	A36	质子科学实验室北墙斜上方（院内道路）	1/40	1	16	5	12.5	10	10
	A37	质子科学实验室东墙斜上方（院内道路）	1/40	1	16	5	12.5	10	10
	A42*	质子科学实验室顶板上方（屋面）*	-	-	-	-	-	-	100
	C2*	质子科学实验室北墙外（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
	C3*	质子科学实验室东墙外（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000
	C7*	质子科学实验室底板下方（土壤）	-	-	-	-	-	-	5000

*备注：1. 根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5mSv/h”作为各辐射工作场所地下区域屏蔽体外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

2. 根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），对于不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 100μSv/h 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。

表 1-8 直线加速器机房屏蔽体外剂量率控制水平

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间，h/周	$\dot{H}_c$，μSv/周	$\dot{H}_{c,d}$，μSv/h	$\dot{H}_{c,max}$，μSv/h	H_c，μSv/h
直线加速器机房 1	a1	直加机房 2	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	a2	楼梯间	1/40	1	54	5	3.7	10	3.7
	a3	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	b1	直加机房 2	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	b2	直加机房 2	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	b3	楼梯间	1/40	1	54	5	3.7	10	3.7
	b4	VIP 电梯厅	1/40	1	54	5	3.7	10	3.7
	b5	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	b6	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	c	控制室 1	1	1	54	100	1.9	2.5	1.9
	d	水冷机房	1/16	1	54	100	29.6	10	10
	e	质子治疗室 3 外走道	1/5	1	54	5	0.5	10	0.5
	f	直加机房 1 防护门外	1/8	1	54	100	14.8	10	10
直线加速器机房 2	A1	直加机房 3	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	A2	直加机房 1	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	A3	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	B1	直加机房 3	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	B2	直加机房 3	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	B3	直加机房 1	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	B4	直加机房 1	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	B5	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	B6	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	C	控制室 2	1	1	54	100	1.9	2.5	1.9
	D	控制室 2	1	1	54	100	1.9	2.5	1.9

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	居留因子	使用因子	周出束时间，h/周	Ḣc，μSv/周	Ḣc,d，μSv/h	Ḣc,max，μSv/h	Hc，μSv/h
	E	质子治疗室 3 治疗区	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	F	直加机房 2 防护门外	1/8	1	54	100	14.8	10	10
直线加速器机房 3	a1'	转运大厅	1/16	1	54	5	1.5	10	1.5
	a2'	直加机房 2	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	a3'	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	b1'	转运大厅	1/16	1	54	5	1.5	10	1.5
	b2'	转运大厅	1/16	1	54	5	1.5	10	1.5
	b3'	直加机房 2	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	b4'	直加机房 2	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	b5'	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	b6'	屋顶内庭院	1/20	1	54	5	1.9	10	1.9
	c'	控制室 3	1	1	54	100	1.9	2.5	1.9
	d'	水冷机房	1/16	1	54	100	29.6	10	10
	e'	质子治疗室 3 机架区	1/2	1	54	100	3.7	10	3.7
	f'	直加机房 3 防护门外	1/8	1	54	100	14.8	10	10

1.4.2.3 核医学科屏蔽体外剂量率控制要求

核医学科屏蔽体外剂量率控制要求执行 HJ 1188-2021 的有关规定：

“6.1.5 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5 μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10 μSv /h。”

“6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5 μSv/h，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25 μSv/h。”

“6.1.7 固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 2.5 μSv/h。”

1.4.3 核医学工作场所放射性表面污染控制水平

本项目核医学工作场所的放射性表面污染控制水平按照 GB 18871-2002 执行，具体见表 1-9。

表 1-9 核医学工作场所的放射性表面污染控制水平（Bq/cm^2）

表 面 类 型		β 放射性物质
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	4×10
	监督区	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4
	监督区	
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-1}

1.4.4 放射性三废控制要求

1.4.4.1 放射性废气控制要求

1.4.4.1.1 放射治疗机房放射性废气控制要求

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

“8.4 气态废物管理要求

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

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

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

“6.2.2 放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数应不小于 4 次/h。”

1.4.4.1.2 核医学放射性废气控制要求

本项目核医学科放射性废气的管理按照 HJ 1188-2021 执行，具体如下：

“6.2.2 操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。

6.3.1 核医学工作场所应保持良好的通风，工作场所的气流流向应遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

6.3.4 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。

6.3.5 通风橱应有足够的通风能力。设有通风橱、手套箱等场所的通风系统

排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。

7.2.2.2 放射性废物贮存场所应安装通风换气装置，放射性废物中含有易挥发放射性核素的，通风换气装置应有单独的排风管道。

7.4.1 产生气态放射性废物的核医学场所应设置独立的通风系统，合理组织工作场所的气流，对排出工作场所的气体进行过滤净化，避免污染工作场所和环境。

7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。”

另外，本项目核医学科放射性废气的管理还按照 GBZ 120-2020 执行：

“5.2.3 核医学工作场所的通风按表 1 要求，通风系统独立设置，应保持核医学工作场所良好的通风条件，合理设置工作场所的气流组织，遵循自非放射区向监督区再向控制区的流向设计，保持含放射性核素场所负压以防止放射性气体交叉污染，保证工作场所的空气质量。合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5 m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。”

1.4.4.2 放射性废液控制要求

本项目的放射性废液主要包括质子治疗系统的活化冷却水以及核医学科排水管道及衰变池中的放射性废液。

上述放射性废液排放前需进行取样监测，满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）“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 β 的排放标准要求（列于表 1-10），方可排放。

表 1-10 综合医疗机构和其他医疗机构水污染物排放限值中总 β 的排放标准

控制项目	排放标准，Bq/L
总 β	10

此外，放射性废液需同时满足 GB 18871-2002 中的豁免水平方可排放。根据 GB 18871-2002，质子治疗系统及核医学科放射性废液中相关核素的豁免水平列

于表 1-11 和表 1-12。

表 1-11 质子治疗系统放射性废液中相关核素的豁免水平

核素	豁免活度浓度，Bq/g	豁免活度，Bq
^{3}H	1E+06	1E+09
^{7}Be	1E+03	1E+07

表 1-12 核医学科放射性废液中相关核素的豁免水平

核素	豁免活度浓度，Bq/g	豁免活度，Bq
^{18}F	1E+01	1E+06
^{99m}Tc	1E+02	1E+07

1.4.4.2.1 放射治疗机房放射性废液控制要求

本项目放射治疗机房放射性废液管理按照 HJ 1198-2021 执行，具体如下：

“8.3 液态废物管理要求

事故或检修状况下质子/重离子加速器的活化冷却水按照放射性废液管理要求妥善收集贮存，暂存衰变至低于豁免水平后可作为普通废液处理，并做好存档记录。”

1.4.4.2.2 核医学放射性废液控制要求

本项目核医学放射性废液管理按照 HJ 1188-2021 执行，具体如下：

“7.3.1 放射性废液收集

7.3.1.1 核医学工作场所应设置有槽式或推流式放射性废液衰变池或专用容器，收集放射性药物操作间、核素治疗病房、给药后患者卫生间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液。

7.3.1.2 核医学工作场所放射性药物标记、分装、注射后的残留液和含放射性核素的其他废液应收集在专用容器中。含有长半衰期核素的放射性废液应单独收集存放。盛放放射性废液的容器表面应张贴电离辐射标志。

7.3.1.3 核医学工作场所的上水需配备洗消处理设备（包括洗消液）。控制区和卫生通过间内的淋浴间、盥洗水盆、清洗池等应选用脚踏式或自动感应式的开

关，以减少场所内的设备放射性污染。头、眼和面部宜采用向上冲淋的流动水。

7.3.1.4 放射性废液收集的管道走向、阀门和管道的连接应设计成尽可能少的死区，下水道宜短，大水流管道应有标记，避免放射性废液集聚，便于检测和维修。

7.3.2 放射性废液贮存

7.3.2.1 经衰变池和专用容器收集的放射性废液，应贮存至满足排放要求。衰变池或专用容器的容积应充分考虑场所内操作的放射性药物的半衰期、日常核医学诊疗及研究中预期产生贮存的废液量以及事故应急时的清洗需要；衰变池池体应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施。

7.3.3 放射性废液排放

7.3.3.1 对于槽式衰变池贮存方式：

所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放。

7.3.3.3 放射性废液的暂存和处理应安排专人负责，并建立废物暂存和处理台账，详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。”

1.4.4.3 放射性固体废物控制要求

本项目的放射性固体废物主要为质子治疗系统拆卸下来的活化部件、处理活化冷却水的废树脂、加速器靶及核医学科的废注射器、通风系统更换下来的过滤器等。

1.4.4.3.1 放射治疗机房放射性固体废物控制要求

本项目放射治疗机房放射性固体废物管理按照 HJ 1198-2021 执行：

“8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或

退役时，应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。

8.2.2.2 低水平的活化部件如质子/重离子加速器治疗头器件、磁铁等，以及处理质子/重离子加速器冷却水的废树脂，集中放置在固态废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平的（放射性废物豁免的活度、活度浓度见附录 B）送交有资质的单位收贮。

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

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

表 1-13 部分含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平

核素	活度浓度[a]（Bq/g）	活度浓度[b]（Bq/g）	活度[b]（Bq）
^{3}H	1E+02	1E+06	1E+09
^{14}C	1E+00	1E+04	1E+07
^{54}Mn	1E-01	1E+01	1E+06
^{55}Fe	1E+03	1E+04	1E+06
^{59}Fe	1E+00	1E+01	1E+06
^{58}Co	1E+00	1E+01	1E+06
^{60}Co	1E-01	1E+01	1E+05
^{59}Ni	1E+02	1E+04	1E+08
^{63}Ni	1E+02	1E+05	1E+08
a 固体物质的解控水平以及批量固体物质的解控水平。 b 小批量固体物质的豁免水平（通常适用于小规模使用放射性物质的实践，所涉及的数量最多为吨量级）。			

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

1.4.4.3.2 核医学放射性固体废物控制要求

本项目核医学放射性固体废物管理按照 HJ 1188-2021 执行，具体如下：

“7.2.1 固体放射性废物收集

7.2.1.1 固体放射性废物应收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶。废物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物。

7.2.1.2 含尖刺及棱角的放射性废物，应预先进行包装处理，再装入废物桶，防止刺破废物袋。

7.2.1.3 放射性废物每袋重量不超过 20kg。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至放射性废物暂存间贮存。

7.2.2 固体放射性废物贮存

7.2.2.1 产生少量放射性废物和利用贮存衰变方式处理放射性废物的单位，经审管部门批准可以将废物暂存在许可的场所和专用容器中。暂存时间和总活度不能超过审管部门批准的限制要求。

7.2.2.2 放射性废物贮存场所应安装通风换气装置，放射性废物中含有易挥发放射性核素的，通风换气装置应有单独的排风管道。入口处应设置电离辐射警告标志，采取有效的防火、防丢失、防射线泄漏等措施。

7.2.2.3 废物暂存间内应设置专用容器盛放固体放射性废物袋（桶），不同类别废物应分开存放。容器表面应注明废物所含核素的名称、废物的类别、入库日期等信息，并做好登记记录。

7.2.2.5 废物暂存间内不得存放易燃、易爆、腐蚀性物品。

7.2.3 固体放射性废物处理

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平，α 表面污染小于 0.08 Bq/cm^2、β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：

所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天。

7.2.3.3 固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息。

7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理。”

1.4.5 其他标准

1.4.5.1 III类射线装置机房使用面积、单边长度的要求

本项目III类射线装置机房的使用面积、单边长度要求按照 GBZ 130-2020 表 2 执行，具体列于表 1-14。

表 1-14 III类射线装置机房使用面积、单边长度的要求

设备类型	机房内最小有效使用面积，m^2	机房内最小单边长度，m
PET/CT、SPECT/CT、模拟 CT、大孔径 CT	30	4.5
DR	30	4.5
乳腺钼靶	10	2.5

1.4.5.2 III类射线装置机房屏蔽要求

本项目III类射线装置机房的屏蔽防护铅当量厚度根据 GBZ 130-2020 表 3 执行，具体见表 1-15。

表 1-15 III类射线装置机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

设备类型	有用线束方向铅当量，mmPb	非有用线束方向铅当量，mmPb
PET/CT、SPECT/CT、模拟 CT、大孔径 CT	2.5	2.5
DR	3.0	2.0
乳腺钼靶	1.0	1.0

1.4.5.3 O_3 和 NO_2 管理要求

本项目 NO_x 排放限值执行江苏省地方标准《大气污染物综合排放标准》（DB 32/4041-2021）表 1 中氮氧化物（以 NO_2 计）“其他”有组织排放限值；室内 O_3 和 NO_x 浓度限值执行《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）中工作场所空气中化学物质容许浓度限值。具体列于表 1-16。

表 1-16 O_3 和 NO_2 排放浓度及室内浓度限值

污染物	排放标准	室内浓度限值	
	最高允许排放浓度，mg/m^3	最高容许浓度，mg/m^3	时间加权平均容许浓度，mg/m^3
O_3	——	0.3	——
NO_2	100	——	5

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）中的相关规定：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类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大；非密封放射性物质工作场所项目的评价范围，乙级取 50m 的范围。

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来源为瞬发辐射以及感生放射性。考虑到拟使用的质子治疗系统严格按照我国相关法规标准的要求进行治疗机房的辐射屏蔽设计，采用混凝土作为主屏蔽材料，以确保机房屏蔽体外剂量率满足相关法规标准要求。综上所述，根据 HJ 10.1-2016，并考虑到设备自身特点及其辐射源项种类和大小，质子治疗系统的电离辐射环境影响评价范围取机房四周实体屏蔽墙向外 100m 的范围，质子区气态流出物的评价范围取以放射性废气排气口为中心、半径 100m 范围；其余Ⅱ类、Ⅲ类射线装置取机房四周实体屏蔽墙向外 50m 的范围；核医学科依据乙级非密封放射性物质工作场所的评价范围，取其工作场所半径 50m 的范围。本项目电离辐射环境影响评价范围见图 1-7。

表 1-17 本项目电离辐射环境影响评价范围

设备或区域	电离辐射环境影响评价范围	依据
进口质子治疗系统 国产质子治疗系统	质子治疗机房四周屏蔽体向外 100m 范围	I类射线装置
进口质子治疗系统及国产质子治疗系统气态流出物	以放射性废气排气口为中心半径 100m 范围	——
质子中心 PET/CT	PET/CT 机房四周屏蔽体向外 50m 范围	III类射线装置
放疗中心直线加速器（3 台）	机房四周屏蔽体向外 50m 范围	II类射线装置
影像中心模拟 CT（2 台）、大孔径 CT、DR（2 台）、乳腺钼靶	射线装置机房四周屏蔽体向外 50m 范围	III类射线装置
核医学科	工作场所向外 50m 的范围	乙级非密封放射性物质工作场所

1.5.2 环境保护目标

本项目电离辐射评价范围内无自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象，无居民小区、学校等环境敏感点。评价范围内的环境保护目标以本项目辐射工作人员以及在相关场所周围活动的非辐射工作人员以及公众为主。各辐射工作场所辐射环境影响评价范围内环境保护目标分布情况列于表 1-18。

表 1-18 本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

辐射工作场所	方位	周围环境情况	与项目边界距离，m	保护目标	照射途径
质子中心地下部分	/	质子回旋加速器大厅、束流输运线、治疗室、质子科学实验室	控制区内部	职业	瞬发辐射、感生放射性
	南	主控室、治疗控制室、设备机房、治疗计划计算机用房、储藏室、抢救室、质子中心 PET/CT 机房、PET/CT 控制室、实验准备洁净区、医生办公室、质子供应商办公室、护士站等	0~20	职业	瞬发辐射、感生放射性
		等候区、更衣室、	0~20	公众	瞬发辐射
		护士站、等候厅、下沉庭院、后勤区、设备机房、科研办公室、医生办公室、厨房及餐厅、地下车库等	20~100	公众	瞬发辐射
	西	直线加速器机房 2、直线加速器机房 3、控制室、会议示教、空调机房、设备机房、医生办公室等	0~35	公众	瞬发辐射

辐射工作场所	方位	周围环境情况	与项目边界距离，m	保护目标	照射途径
		地下土层	35~100	/	/
	北	地下土层	0~100	/	/
	东	地下土层	0~100	/	/
	下	地下土层	0~100	/	/
	上	高频机房、设备零件储藏间	0~100	职业	瞬发辐射
		空调机房、水冷机房、钢瓶间、电源间、屋面等	0~100	公众	瞬发辐射
质子中心地上部分	东	院内道路及绿化等	0~30	公众	瞬发辐射、感生放射性气体
		国道 G345 和院外农用地	30~100	公众	感生放射性气体
	南	设备用房、科研办公室、实验室、办公大厅、电梯等	0~20	公众	瞬发辐射
		下沉庭院、能源中心、绿化、住院楼、静配中心等	20~100	公众	感生放射性气体
	西	内庭院、VIP 接诊大厅、接待室等	0~25	公众	瞬发辐射
		院内道路、绿化、门急诊综合楼等	25~100	公众	感生放射性气体
	北	院内道路、非机动车停车区、中心东路、院外农用地等	0~100	公众	瞬发辐射、感生放射性气体
进口质子放射性废气排气口	东	医院内部道路、下沉庭院等	0~100	公众	感生放射性气体
	南	医院内部道路等	0~100	公众	感生放射性气体
	西	医院内部道路、二期用地等	0~100	公众	感生放射性气体
	北	医院内部道路、中心东路等	0~100	公众	感生放射性气体
国产质子放射性废气排气口	东	医院内部道路、国道 G345 等	0~100	公众	感生放射性气体
	南	医院内部道路等	0~100	公众	感生放射性气体
	西	医院内部道路、下沉庭院等	0~100	公众	感生放射性气体
	北	医院内部道路、中心东路等	0~100	公众	感生放射性气体
质子中心 PET/CT	/	质子中心 PET/CT 机房内部	机房内部	职业	瞬发辐射、患者感生放射性
	西	控制室、设备间	0~3	职业	瞬发辐射
	北	质子治疗室、治疗控制室等	0~35	职业	瞬发辐射
	东	医生办公室、抢救室等	0~50	职业	瞬发辐射
	西	VIP 接待、放疗中心	0~39	公众	瞬发辐射
		地下土层	39~50	/	/
	北	地下土层	35~50	/	/
	东	等候区、楼梯等	0~50	公众	瞬发辐射
	南	走廊、护士站、等候厅、后勤区等	0~50	公众	瞬发辐射
	上	储藏间、屋面	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
直线加速器 1	/	直线加速器机房 1	机房内部	职业	瞬发辐射
	北	直线加速器机房 2、直线加速器机房 3	0~22	职业	瞬发辐射

辐射工作场所	方位	周围环境情况	与项目边界距离，m	保护目标	照射途径
	西	控制室、水冷机房、制模室、模具室、主任办公室等	0~20	职业	瞬发辐射
		病人候诊区、走廊等	0~20	公众	瞬发辐射
		地下土层	20~50	/	/
	东	质子区治疗计划计算机用房、VIP 接待室、走廊、更衣室等	0~50	公众	瞬发辐射
	南	楼梯、走廊、影像中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	北	进口质子转运大厅	22~25	公众	瞬发辐射
		地下土层	25~50	/	/
	上	内庭院、屋面	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
直线加速器 2	/	直线加速器机房 2	机房内部	职业	瞬发辐射
	北	直线加速器机房 3	0~14	职业	瞬发辐射
	南	直线加速器机房 1	0~12	职业	瞬发辐射
	西	控制室、水冷机房、医生办公室	0~20	职业	瞬发辐射
		楼梯、走廊等	0~20	公众	瞬发辐射
		地下土层	20~50	/	/
	东	进口质子治疗室、质子加速器大厅	0~50	公众	瞬发辐射
	南	楼梯、走廊、影像中心等	12~50	公众	瞬发辐射
	北	进口质子转运大厅	14~19	公众	瞬发辐射
		地下土层	19~50	/	/
	上	内庭院、屋面	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
直线加速器 3	/	直线加速器机房 3	机房内部	职业	瞬发辐射
	南	直线加速器机房 2、直线加速器机房 1	0~22	职业	瞬发辐射
	西	控制室、水冷机房、会议示教等	0~12	职业	瞬发辐射
		走廊、电梯间、空调机房等	0~20	公众	瞬发辐射
		地下土层	20~50	/	/
	东	进口质子治疗室、质子加速器大厅、束流输运线	0~50	公众	瞬发辐射
	南	直线加速器机房 2、直线加速器机房 1、走廊、影像中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	北	转运大厅	0~4	公众	瞬发辐射
		地下土层	4~50	/	/
	上	内庭院、屋面	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
影像中心模拟 CT 1	/	模拟 CT 1 机房内部	机房内部	职业	瞬发辐射
	南	控制廊	0~5	职业	瞬发辐射
	西	医护走廊	0~2	职业	瞬发辐射
	南	MRI 机房、设备间、钢瓶间、更衣室、乳	5~50	公众	瞬发辐射

辐射工作场所	方位	周围环境情况	与项目边界距离，m	保护目标	照射途径
		腺钼靶、核医学科等			
	西	地下土层	2~50	/	/
	北	补风机房、病人候诊区、走廊、放疗中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	东	楼梯、候梯厅、病人等候区等	0~50	公众	瞬发辐射
	上	户外区域	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
影像中心模拟 CT 2	/	模拟 CT 2 机房内部	机房内部	职业	瞬发辐射
	南	控制廊	0~5	职业	瞬发辐射
	西	大孔径 CT、设备间、模拟 CT1、医护走廊	0~17	职业	瞬发辐射
	南	MRI 控制室、病人候诊区、乳腺钼靶、核医学科等	5~50	公众	瞬发辐射
	西	地下土层	17~50	/	/
	北	更衣室、注射室、病人候诊区、走廊、放疗中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	东	楼梯、候梯厅、病人等候区等	0~50	公众	瞬发辐射
	上	走廊	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
影像中心大孔径 CT	/	大孔径 CT 机房内部	机房内部	职业	瞬发辐射
	南	控制廊	0~5	职业	瞬发辐射
	西	设备间、模拟 CT1、医护走廊	0~11	职业	瞬发辐射
	南	MRI、病人候诊区、DR、核医学科等	5~50	公众	瞬发辐射
	西	地下土层	11~50	/	/
	北	病人候诊区、走廊、放疗中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	东	模拟 CT 2、楼梯、候梯厅、病人等候区等	0~50	公众	瞬发辐射
	上	检验科、库房、走廊等	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
影像中心乳腺钼靶	/	乳腺钼靶机房内部	机房内部	职业	瞬发辐射
	南	控制室、医护走廊	0~5	职业	瞬发辐射
	西	卫生间、医护走廊	0~5	职业	瞬发辐射
	南	走廊、核医学科、地下车库等	5~50	公众	瞬发辐射
	西	地下土层	5~50	/	/
	北	病人候诊区、走廊、放疗中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	东	DR1、DR2、更衣室、注射件、卫生间、病人等候区等	0~50	公众	瞬发辐射
	上	户外区域	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
影像中心	/	DR1 机房内部	机房内部	职业	瞬发辐射

辐射工作场所	方位	周围环境情况	与项目边界距离，m	保护目标	照射途径
DR1	南	控制廊	0~3	职业	瞬发辐射
	西	控制室、卫生间、医护走廊	0~8	职业	瞬发辐射
	南	走廊、核医学科、地下车库等	3~50	公众	瞬发辐射
	西	地下土层	8~50	/	/
	北	病人候诊区、走廊、放疗中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	东	DR2、更衣室、注射件、卫生间、病人等候区等	0~50	公众	瞬发辐射
	上	接诊大厅	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
影像中心DR2	/	DR2 机房内部	机房内部	职业	瞬发辐射
	南	控制廊	0~3	职业	瞬发辐射
	西	DR1、控制室、卫生间、医护走廊	0~17	职业	瞬发辐射
	南	走廊、核医学科、地下车库等	3~50	公众	瞬发辐射
	西	地下土层	17~50	/	/
	北	病人候诊区、走廊、放疗中心等	0~50	公众	瞬发辐射
	东	更衣室、注射件、卫生间、病人等候区等	0~50	公众	瞬发辐射
	上	接诊大厅	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/
核医学科	/	注射室、固废间、储源间、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、PET/MR 机房、办公室、读片室等	核医学工作场所	职业	瞬发辐射、表面沾污
	北	走廊、影像中心、放疗中心	0~50	公众	瞬发辐射
	东	走廊、大餐厅、厨房、设备用房、电梯厅、超市、下沉庭院、地下车库等	0~50	公众	瞬发辐射
	南	工具间、地下车库	0~17	公众	瞬发辐射
		地下土层	17~50	/	/
	西	地下土层	0~50	/	/
	上	户外空地、停车区等	0~50	公众	瞬发辐射
	下	地下土层	0~50	/	/

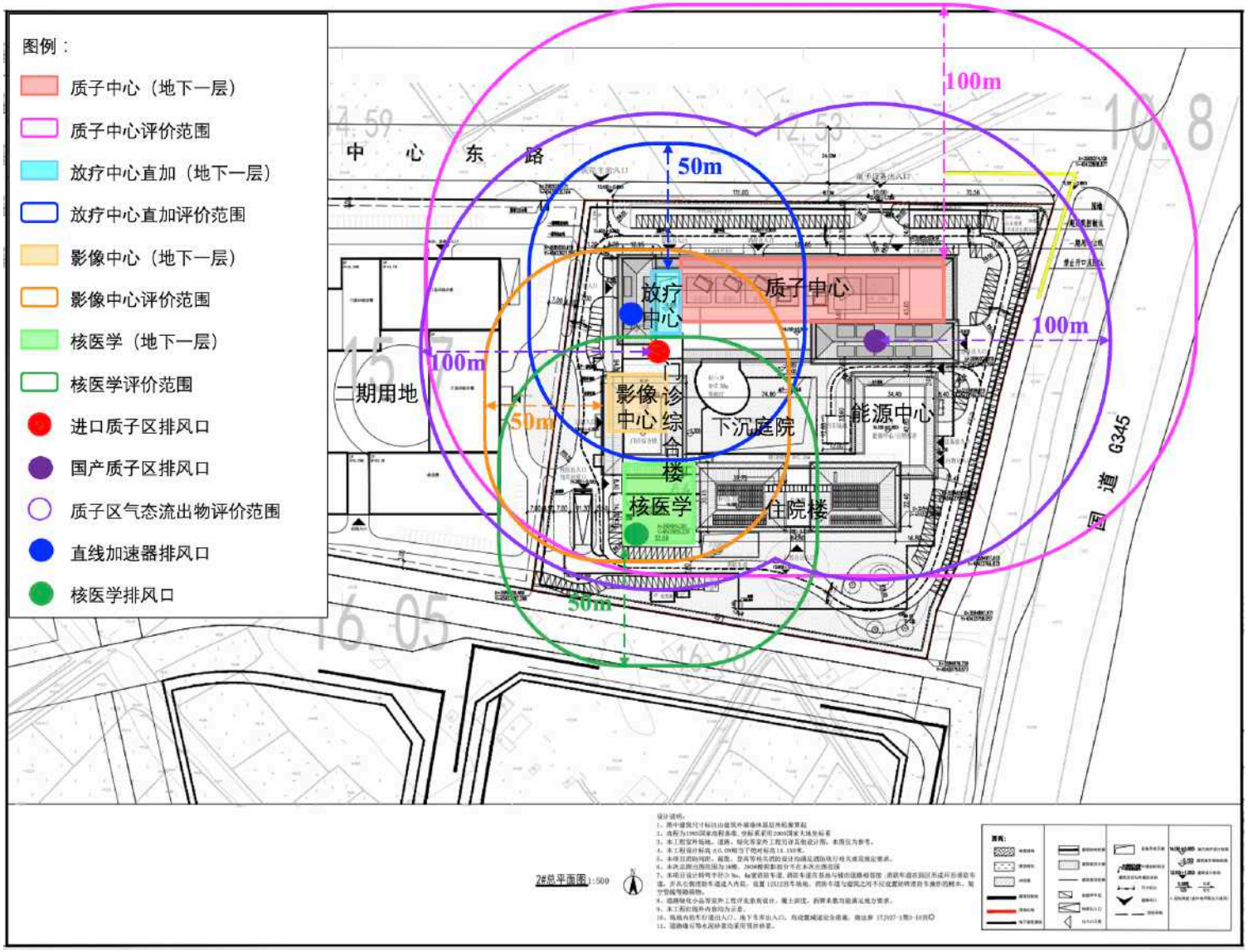


图 1-7 本项目电离辐射评价范围示意图

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

本项目位于江苏省扬州市仪征市张集街道-111 号。

仪征，江苏省县级市，由扬州市代管，位于江苏省中西部，长江三角洲顶端，北纬 32°14′～32°36′，东经 119°02′～119°22′。南濒长江，东邻扬州市邗江区，西毗南京市六合区，北与高邮市和安徽省天长市接壤。全市东西宽 30 千米，南北长 39 千米，总面积 857 平方千米（其中长江水域面积 21 平方千米）。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

（1）地形特征

仪征地势西北高、东南低，分为平原、丘陵、岗地 3 个地貌区。南部沿江冲积平原区，北抵沿山河，南临长江，西至小河口，东达乌塔沟，地面高程 3-10 米，微地貌可分圩田和滩地；中北部平岗丘陵区，南界沿山河，东部以友谊河与邗江为界，西至胥浦河月塘水库一线，北部与天长、高邮、邗江交界，地面高程大部分在15-45米之间，多为第四系下蜀黄土所覆盖，岗、谤、冲相间；西部高岗丘陵区，位于市境西部边缘地区，南至青山镇，北与天长、六合交界，东部以月塘水库、大铜山、胥浦河一线为界，地面高程大部分在 30-100 米，地貌较复杂，岭窄、冲短、小冲小洼多，水土流失严重。

（2）地貌类型

丘陵、岗地、平原。丘陵：仪征的丘陵多集中分布于月塘、青山、铜山等地。主要山丘有位于仪征、六合交界处的峨嵋山、桃花山等，以及崛起于岗地上的大铜山、捺山、乌山等。大铜山最高，海拔 149.5 米，捺山海拔 146 米，乌山海拔 84.3 米，峨嵋山、桃花山海拔在 62-95 米之间。

2.2.2 地质构造

仪征地表出露地层有三系五统六组，大地构造处于扬子古陆内次一级构造单元苏北坳陷南缘，宁通构造带与淮阴山字形东翼反射弧交合复合部位的江都与宁镇隆起之间的拗陷区。地势西北高、东南低，地貌分丘陵、岗地、平原三大类型。地面高程相差较大，最低的 3.5～5 米，大部分在 40～45 米之间，最高的山地 100 米以上。丘陵地区岗、塝、冲多，地貌复杂。

2.2.3 气候特征

仪征属北亚热带季风气候区，雨量充沛，光照充足，气候温暖。

2021 年，年平均气温显著偏高，但夏季不热，秋冬寒潮多；年降水总量正常，但时空分布不均；年日照时数正常。年内气象灾害总体偏轻，气候年景良。年平均气温 16.9℃，较常年平均(15.7℃)偏高 1.2℃，为有记录以来最高的年份；年极端最高气温为 37.2℃，出现在 8 月 31 日；35.0℃以上的高温日 10 天；年极端最低气温-10.8℃，出现在 1 月 9 日。年总降水量 930.3mm，比常年平均值 1058.9mm 偏少 128.6mm，偏少 12.1%,为全省年降水量最少的台站；日降水量≥50.0 ㎜的暴雨日 3 天，其中大暴雨 1 天，达 101.2mm，出现在 7 月 28 日。年总日照时数 1843.6 小时，较常年平均值 1964.3 小时少 120.7 小时，偏少 6.1%。

2.2.4 水文

仪征区域河段属长江下游感潮河段，处在长江口和大通感潮界点的中部，其水情除受上游径流作用外，还妥河口潮汐影响，汛期影响小，枯季影响大，但主要仍由长江径流控制。由于地处亚热带湿润气候区,具有明显的季风特征，雨量充沛，无霜期长，光照充足。

仪征水资源比较丰富，除地表水和地下水外，还有大量的长江过境水和少量的淮河余水。但过境的长江水资源分布不均，绝大部分集中于沿江圩区，丘陵山区利用比较困难。土地资源不足，低于全国平均水平。

2.3 社会环境概况

2.3.1 区划人口

全市共有 9 个镇、2 个园区；59 个社区居民委员会、136 个村民委员会，其中 9 个村（居）合一。

2021 年，仪征市人口规模基本保持稳定。年末全市户籍人口 548201 人，减少 4998 人。其中：男性人口 274150 人，减少 2799 人；女性人口 274051 人，减少 2199 人。全年人口出生率为 4.83‰，较上年下降 1.8 个千分点；人口死亡率为 8.51‰，下降 0.2 个千分点；人口自然增长率为-3.68‰，下降 1.6 个千分点。年末全市常住人口 53.42 万人，较上年增加 0.16 万人。

2.3.2 社会发展状况

（1）科技事业

2021 年，仪征市科技创新取得实效。实施创新驱动发展战略，企业研发经费增长 9.8%，技术合同成交额实现翻番。通过知识产权强省建设区域示范验收。新认定国家高新技术企业 70 家，高新技术产业产值占比 37%。深化校地合作，推进协同创新，达成产学研合作项目 73 项。做优“凤来仪”人才品牌，上线“凤来 e”人才服务云平台，获批省市创新创业领军人才项目 18 个，新引进高层次人才创新创业项目 28 个。

（2）教育事业

2021 年，仪征市教育事业全面发展。“双减”政策落地见效，课后服务全面开展，培训机构大幅压减。育才小学北区校、古湄幼儿园等 4 所新校区投入使用，东区普通高中主体封顶。加强与宁镇扬名校合作共建，培育高水平合作办学项目。全市省优质幼儿园比例 61.36%，省现代化小学比例 100%，省现代化初中比例 100%，省三星级以上高中比例 75%。全市各类学校 95 所，招生 14906 人，在校生 58773 人。其中：幼儿园 44 所，招生 3873 人，在校生 13339 人；小学 29 所，招生 4282 人，在校生 24925 人；初中 16 所（含九年一贯制学

校），招生 3674 人，在校生 11402 人；高中 4 所，招生 2628 人，在校生 7932 人；特教 1 所，招生 10 人，在校生 92 人；中职 1 所（按教育统计要求技师学院只统计中职学生），招生 439 人，在校生 1083 人。3-5 周岁幼儿毛入学率 99.11%，小学净入学率 100%，初中净入学率 100%，初中升学率 100%。共有省人民教育家培养对象 2 人，省、扬州市特级教师 34 人，扬州市中小学特级班主任 7 人，扬州市有突出贡献中青年专家、英才培养对象 6 人，扬州市级骨干教师 792 人。

（3）文化事业

2021 年，仪征市公共文化服务水平不断提升。全年广播节目制作时间 3833 小时，电视节目制作时间 655 小时，广播节目综合覆盖率 100%，电视节目综合覆盖率 100%。电影放映单位 11 个、艺术表演场馆 1 个、博物馆 1 个、公共图书馆 1 个、文化站 9 个，全年艺术表演观众 6.5 万人次，文物展览参观 9.6 万人次，公共图书馆总藏书量 66.4 万册、件，书刊文献外借 36.44 万册次。公共文化服务水平不断提升。全年广播节目制作时间 3813 小时，电视节目制作时间 655 小时，广播节目综合覆盖率 100%，电视节目综合覆盖率 98%。电影放映单位 9 个、艺术表演场馆 1 个、博物馆 1 个、公共图书馆 1 个、文化站 9 个，全年艺术表演观众 7.02 万人次，文物展览参观 12.53 万人次，公共图书馆总藏书量 50.5 万册、件，书刊文献外借 14.9 万册次。

（4）体育事业

2021 年，仪征市体育事业蓬勃发展。年末全市共有体育场 8 个、体育馆 10 个、游泳池馆 10 个，教练员 31 人、等级裁判员 201 人、等级运动员 342 人。全年运动员获奖牌总数 69 枚，举办体育竞赛表演 112 次。中国青少年（U14）棒球队训练基地入驻仪征。举办全国棒垒球锦标赛、仪征市第七届运动会等体育赛事。完善村、社区全民健身活动设施和学校文体设施 2652 个，全市体育人口达 26.13 万人。

（5）基础设施

2021 年，基础设施更加完善。宁扬城际、宁启铁路仪征站复建项目开工建

设，北沿江高铁仪征段线型和仪征北站站房设计方案基本确定。328 国道改扩建工程、南京绕越高速新篁互通连接线全线通车，大新公路大数据产业园段启动建设，仪禄高速、龙潭过江通道、345 国道新集南段工程加快实施。启动“四好农村路”全国示范县创建，提档升级乡村道路 18.5 公里，实施农村公路安全生命防护工程 24 公里、县道大中修 7 公里。综合客运枢纽建成投用，胥浦车站改造完成。长江防洪能力提升堤防加固二期、龙河治理二期、乌塔沟整治工程加快推进。严格落实河湖长制，创建幸福河湖 2 条。

（6）医疗卫生

2021 年，仪征市疫情防控保持“双零”。绷紧疫情防控之弦，落细落实防控措施。守牢“外防输入”防线，建立多点触发预警机制，动态排查重点人员，闭环管理靠港船舶，检测消杀进口货物。持续开展重点行业人群核酸检测、重点场所环境监测，提升社会面防控水平。建成城市核酸检测基地、人民医院万管实验室，完成三轮全员及一轮环扬园镇核酸检测任务。开展疫苗接种，全市 3 周岁及以上人群接种率 93.6%。保持本土“零感染、零病例”。深化医药卫生体制改革，落实分级诊疗制度，构建“1+1+2”医共体新模式。市人民医院创建三级乙等综合医院通过省级验收。提升公共卫生服务均等化水平，建立居民健康档案 51.2 万份。共有各类卫生机构（不含村卫生室）99 个，比上年增加 1 个；拥有床位数 3101 张，增加 69 张；共有卫生技术人员 4124 人，减少 79 人，其中执业医师、执业助理医师 1469 人，减少 149 人。全年诊疗 164.44 万人次，下降 31%。

（7）社会保障

2021 年，居民生活水平持续改善。根据城乡一体化住户抽样调查，全市全体居民人均可支配收入 40255 元，增长 9.2%；人均消费支出 24432 元，增长 18.4%。按常住地分，城镇居民人均可支配收入 52037 元，增长 8.4%，人均消费支出 28875 元，增长 16.9%；农村居民人均可支配收入 26376 元，增长 10.2%，人均消费支出 19199 元，增长 20.7%。年末城镇居民人均居住房屋面积为 51 平方米，农村居民人均居住房屋面积为 57 平方米。

2021 年，社会保障扩面提标。年末城镇登记失业率 3.49%，城乡基本养老

保险参保率、失业保险参保率均为 98%，参保人数分别达到 12.64 万人、9.9 万人。落实技能提升补贴、稳岗返还等政策，发放稳岗补贴 1237 万元。新增城镇就业 8000 人，农村劳动力转移 900 人，扶持自主创业 1900 人。健全城乡居民医保筹资增长机制，提高财政补助标准。推进落实企业职工养老保险省级统筹。建立城乡居民养老金正常调整机制。新建标准化居家养老服务中心 11 个、颐养示范社区 4 个。推动“同舟计划”，建筑业新开工项目工伤保险参保率 100%。4.7 万人纳入被征地农民生活保障，实现“应保尽保”。推动建设分层分类梯度救助体系，提高社会救助和社会福利标准。开展低保边缘家庭和支出型困难家庭认定，惠及群众 1.8 万人。新增经济适用房、公租房保障 80 户。新增住房公积金归集扩面 3800 人。

（8）重大项目

2021 年，重大项目稳步推进。开展春季招商突击月、夏季产业链专题招商、流动红旗季度赛、四季度“百日冲刺”等活动，新签约亿元以上项目 105 个，新落户 3000 万美元以上外资项目 14 个。落实重大项目“一月一督察、一季一汇报、半年一开工”机制，开展“家家到”观摩活动，江扬电缆、质子医疗等列省项目进展顺利，63 个列扬项目加快推进，111 个项目参加集中开工。

2.3.3 经济发展状况

2021 年，全市实现地区生产总值 910.71 亿元，按可比价计算，增长 7.6%。其中：第一产业增加值 23.84 亿元，可比价增长 4.1%；第二产业增加值 483.77 亿元，可比价增长 7.8%；第三产业增加值 403.10 亿元，可比价增长 7.5%。产业结构不断优化。三次产业结构由上年的 2.9∶52.7∶44.4 调整为 2.6∶53.1∶44.3。经济活力持续增强。年末私营企业工商登记数 20884 户，从业人员 135265 人，其中当年登记 4311 户，从业人员 6194 人。个体工商户登记数 54262 户，从业人员 100495 人，其中当年登记 7104 户，从业人员 9215 人。按常住人口计算，年末城镇化率为 67.14%，比上年提高 0.11 个百分点。

居民消费价格温和上涨。居民消费价格比上年上涨 1.5%，其中食品烟酒价格上涨 0.8%，非食品烟酒价格上涨 1.8%。八大类消费品及服务项目价格同比

“七升一降”，其中交通和通信类上涨 4.1%，衣着类上涨 2.2%，居住类上涨 1.4%，教育文化和娱乐类上涨 1.3%，食品烟酒类上涨 0.8%，医疗保健类上涨 0.7%，生活用品及服务类上涨 0.5%，其他用品和服务类下降 0.4%。

2.4 环境质量和辐射现状

为了解本项目拟建场址及周围环境的辐射环境现状，评价单位委托南京泰坤环境检测有限公司（CMA 资质：221020340004）、中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室（CMA 资质：170012184003）分别对项目拟建场址及周围环境进行了辐射环境本底检测和土壤及地表水取样检测，检测报告分别见附件 8、附件 10，监测单位 CMA 资质证书见附件 9、附件 11。

2.4.1 监测内容

表 2-1 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
1	外照射	X、γ 辐射剂量率及中子周围剂量当量率
2	土壤	^{7}Be、^{22}Na、^{51}Cr、^{54}Mn、总 α、总 β 活度浓度
3	地表水	^{3}H、^{7}Be、^{22}Na、^{51}Cr、^{54}Mn、总 α、总 β 活度浓度

2.4.2 监测/取样点位

环境地表 γ 辐射剂量率和中子当量剂量率的监测点位见图 2-1。环境介质取样点位见图 2-2。由监测和取样点位可知，在项目拟建场址、场址周围环境均设置了监测或取样点位，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，监测及取样点位布设是合理的。



图 2-1 环境地表γ辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位



图 2-2 环境介质取样点位

2.4.3 监测设备和监测方法

2.4.3.1 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-2。现场辐射水平监测时间为 2022 年 6 月 18 日，样品实验室分析时间为 2022 年 7 月 15 日至 7 月 28 日。监测、分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

表 2-2 仪器设备及性能指标

仪器名称	仪器型号	仪器编号	主要技术参数	检定/校准证书编号	检定时间和有效期
X、γ辐射检测仪	FH40G-L10+FHZ672E-10	NJTK/YQ041	能量范围：40keV~4.4MeV 测量范围：1nSv/h~100μSv/h 最低检出限：2.28nSv/h-+	Y2021-0090716	检定：2022 年 9 月 22 日 有效期：2021 年 9 月 23 日~2022 年 9 月 22 日
中子周围剂量当量仪	XH-3028	NJTK/YQ049	能量范围：0.025eV~14MeV 测量范围：0Sv/h~100mSv/h 最低检出限：1nSv/h	DL js2021-11307	检定：2021 年 8 月 2 日 有效期：2021 年 8 月 2 日~2022 年 8 月 1 日
超低本底液闪谱仪	Quantulus 1220	2200266	量程：0~2000keV 误差：10%	JZ-A14-201106A501	检定：2022 年 11 月 6 日 有效期：2022 年 11 月 6 日~2024 年 11 月 5 日
低本底α/β测量仪	BH1227	1003	量程：α≤2.5%，β≤3.5%	DLhd2021-12198	检定：2022 年 3 月 19 日 有效期：2022 年 3 月 19 日~2024 年 3 月 18 日
低本底α/β测量仪	BH1227	2020-022	量程：α≤2.5%，β≤3.5%	DLhd2021-12200	检定：2021 年 5 月 30 日 有效期：2021 年 5 月 30 日~2023 年 5 月 29 日
高纯锗γ能谱仪	BE3830P	13490	量程：3keV~3MeV 误差：10%	GFJGJL1005210002635	检定：2021 年 5 月 27 日 有效期：2021 年 5 月 27 日~2023 年 5 月 26 日

2.4.3.2 监测方法

监测方法见表 2-3。

表 2-3 监测方法

序号	监测对象	监测方法	标准依据
1	环境地表γ辐射剂量率	采用网格均匀布点的方式布设环境地表γ辐射剂量率监测点位，共计21个监测点位。采用便携式监测仪表，以定点或巡测的测量方式进行。每个监测点位测量10次，每次间隔10秒钟，监测结果取平均值。	HJ 61-2021《辐射环境监测规范》 HJ 1157-2021《环境γ辐射剂量率测量技术规范》 GB/T14318-2019《辐射防护仪器中子周围剂量当量(率)仪》
2	中子周围剂量当量率	采用网格均匀布点的方式布设中子周围剂量当量率监测点位，共计21个监测点位。采用便携式监测仪表，以定点或巡测的测量方式进行。每个点位读取10个数据，读取间隔不小于10s，并待计数稳定后读取数值，监测结果取平均值。	
3	土壤	分别在指定的点位采集样品，使用土壤采集器，在10×10 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10×10 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。地表土样品送实验室预处理后采用低本底α、β测量仪进行总α、总β活度浓度测量，^{7}Be、^{22}Na、^{51}Cr和^{54}Mn采用高纯锗γ能谱仪进行活度浓度测量。	GB/T 11713-2015《高纯锗γ能谱分析通用方法》； GB/T 11743-2013《土壤中放射性核素的γ能谱分析方法》； HJ 898-2017《水质 总α放射性的测定 厚源法》； HJ 899-2017《水质 总β放射性的测定 厚源法》
4	地表水	在河流中间取100L样品，在实验室处理后，采用低本底α、β测量仪进行总α、总β活度浓度测量，^{7}Be、^{22}Na、^{51}Cr和^{54}Mn采用高纯锗γ能谱仪进行活度浓度测量。 ^{3}H采用 8ml样品+12ml闪烁液直接测量。	HJ 1126-2020《水中氚的分析方法》； HJ 898-2017《水质 总α放射性的测定 厚源法》； HJ 899-2017《水质 总β放射性的测定 厚源法》； GB/T 16140-2018《水中放射性核素的γ能谱分析方法》

2.4.4 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。

2.4.5 监测结果

2.4.5.1 外照射

本项目拟建场址及周围环境的 X、γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率检测结果见表 2-4 和表 2-5。

表 2-4 X、γ 辐射剂量率检测结果

编号	检测点位	X、γ 辐射剂量率检测结果，nGy/h
1	质子治疗系统拟建场地及周围环境 1	83.1±3.3
2	质子治疗系统拟建场地及周围环境 2	81.8±3.4
3	质子治疗系统拟建场地及周围环境 3	80.4±4.9
4	质子治疗系统拟建场地及周围环境 4	68.7±3.0
5	质子治疗系统拟建场地及周围环境 5	77.7±3.0
6	质子治疗系统拟建场地及周围环境 6	77.4±5.0
7	质子治疗系统拟建场地及周围环境 7	83.8±5.0

8	质子治疗系统拟建场地及周围环境 8	84.4±5.0
9	质子治疗系统拟建场地及周围环境 9	81.5±1.3
10	质子中心拟建场址内 10	65.8±3.0
11	质子中心拟建场址内 11	74.8±5.1
12	质子治疗系统拟建场址南侧边界道路 12	80.9±4.4
13	质子治疗系统拟建场址南侧边界道路 13	81.3±3.6
14	质子治疗系统拟建场址西侧建筑 14	69.4±3.6
15	质子治疗系统拟建场址西侧建筑 15	79.0±3.6
16	质子治疗系统拟建场址北侧建筑 16	78.3±3.9
17	质子治疗系统拟建场址北侧建筑 17	83.3±4.0
18	质子治疗系统拟建场址东侧建筑 18	84.0±4.1
19	质子治疗系统拟建场址东侧建筑 19	82.6±4.4
20	质子治疗系统拟建场址北侧建筑 20	93.5±3.2
21	质子治疗系统拟建场址东侧建筑 21	88.5±3.1
注：环境γ辐射剂量率测量结果按照 HJ1157-2021 中 5.5 小节的公式（1）计算，检测结果已扣除宇宙射线响应值。		

表 2-5 中子辐射剂量率检测结果

编号	检测点位	中子辐射剂量率，μSv/h
1	质子治疗系统拟建场地及周围环境 1	低于探测下限
2	质子治疗系统拟建场地及周围环境 2	低于探测下限
3	质子治疗系统拟建场地及周围环境 3	低于探测下限
4	质子治疗系统拟建场地及周围环境 4	低于探测下限
5	质子治疗系统拟建场地及周围环境 5	低于探测下限
6	质子治疗系统拟建场地及周围环境 6	低于探测下限
7	质子治疗系统拟建场地及周围环境 7	低于探测下限
8	质子治疗系统拟建场地及周围环境 8	低于探测下限
9	质子治疗系统拟建场地及周围环境 9	低于探测下限
10	质子中心拟建场址内 10	低于探测下限
11	质子中心拟建场址内 11	低于探测下限
12	质子治疗系统拟建场址南侧边界道路 12	低于探测下限
13	质子治疗系统拟建场址南侧边界道路 13	低于探测下限
14	质子治疗系统拟建场址西侧建筑 14	低于探测下限
15	质子治疗系统拟建场址西侧建筑 15	低于探测下限
16	质子治疗系统拟建场址北侧建筑 16	低于探测下限
17	质子治疗系统拟建场址北侧建筑 17	低于探测下限
18	质子治疗系统拟建场址东侧建筑 18	低于探测下限

19	质子治疗系统拟建场址东侧建筑 19	低于探测下限
20	质子治疗系统拟建场址北侧建筑 20	低于探测下限
21	质子治疗系统拟建场址东侧建筑 21	低于探测下限
注：中子周围剂量当量仪探测下限为 1nSv/h。		

由检测结果可知，本项目拟建场址及周围环境所测点位 X、γ 辐射剂量率为（65.8~93.5）nGy/h（已扣除宇宙射线响应值）；中子辐射剂量率均低于仪器探测下限。根据《2020 年全国辐射环境质量报告》（中华人民共和国生态环境部，2021 年），江苏省环境地表γ辐射空气吸收剂量率年均值范围为 49.8~101.8nGy/h。本项目拟建场址及周围环境地表 γ 辐射剂量率水平监测结果处于江苏省环境地表γ辐射空气吸收剂量率范围内，项目周围环境的辐射环境质量现状无异常。

2.4.5.2 土壤

项目拟建场址土壤样品总 α、总 β 及相关核素的活度浓度分析结果见表 2-6。

表 2-6 土壤样品中总 α、总 β 及相关核素的活度浓度分析结果

取样点	监测项目	监测结果
拟建场址北侧	总 α	(3.28±0.25)E+02 Bq/kg
	总 β	(6.75±0.26)E+02 Bq/kg
	^{7}Be	≤LD=3.5 Bq/kg
	^{22}Na	≤LD=8.3E-01 Bq/kg
	^{51}Cr	≤LD=4.5 Bq/kg
	^{54}Mn	≤LD=9.9E-01 Bq/kg
拟建场址南侧	总 α	(2.92±0.24)E+02 Bq/kg
	总 β	(6.53±0.21)E+02 Bq/kg
	^{7}Be	≤LD=3.2 Bq/kg
	^{22}Na	≤LD=6.6E-01 Bq/kg
	^{51}Cr	≤LD=3.6 Bq/kg
	^{54}Mn	≤LD=8.8E-01 Bq/kg

注：LLD 为仪器探测限。

监测结果表明，项目拟建场址土壤样品中总 α、总 β 及相关核素的活度浓度水平未见异常。

2.4.5.3 地表水

拟建场址地表水总 α、总 β 及相关核素的活度浓度分析结果见表 2-7。

表 2-7 地表水中总 α、总 β 及相关核素的活度浓度分析结果

取样点	监测项目	监测结果
拟建场址南侧地表水	^{3}H	≤LD=2.1 Bq/L
	总 α	≤LD=2.5E-02 Bq/L
	总 β	(2.00±0.11)E-01 Bq/L
	^{7}Be	≤LD=2.1E-02 Bq/L
	^{22}Na	≤LD=3.7E-03 Bq/L
	^{51}Cr	≤LD=2.6E-02 Bq/L
	^{54}Mn	≤LD=2.4E-03 Bq/L

注：LLD 为仪器探测限。

监测结果表明，项目拟建场址地表水中总 α、总 β 及相关核素的活度浓度水平未见异常。

2.5 选址适宜性评价

本项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响射线装置和非密封放射性物质工作场所稳定运行和安全使用的颠覆性因素。

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

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

综上所述，本项目选址适宜开展所申请的核技术利用活动。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

3.1.1 项目规模

本项目拟建的质子治疗中心位于江苏省扬州市仪征市中心东路南侧、国道G345西侧，项目规划建设用地52.48亩，总建筑面积4.7万平方米。建设内容包括质子中心、放疗中心、影像中心、核医学科、培训中心、能源中心、门诊部、住院部等。总平面布局示意图见图 3-1，各层布局示意图见图 3-2~图 3-7。



图 3-1 本项目总平面布局示意图

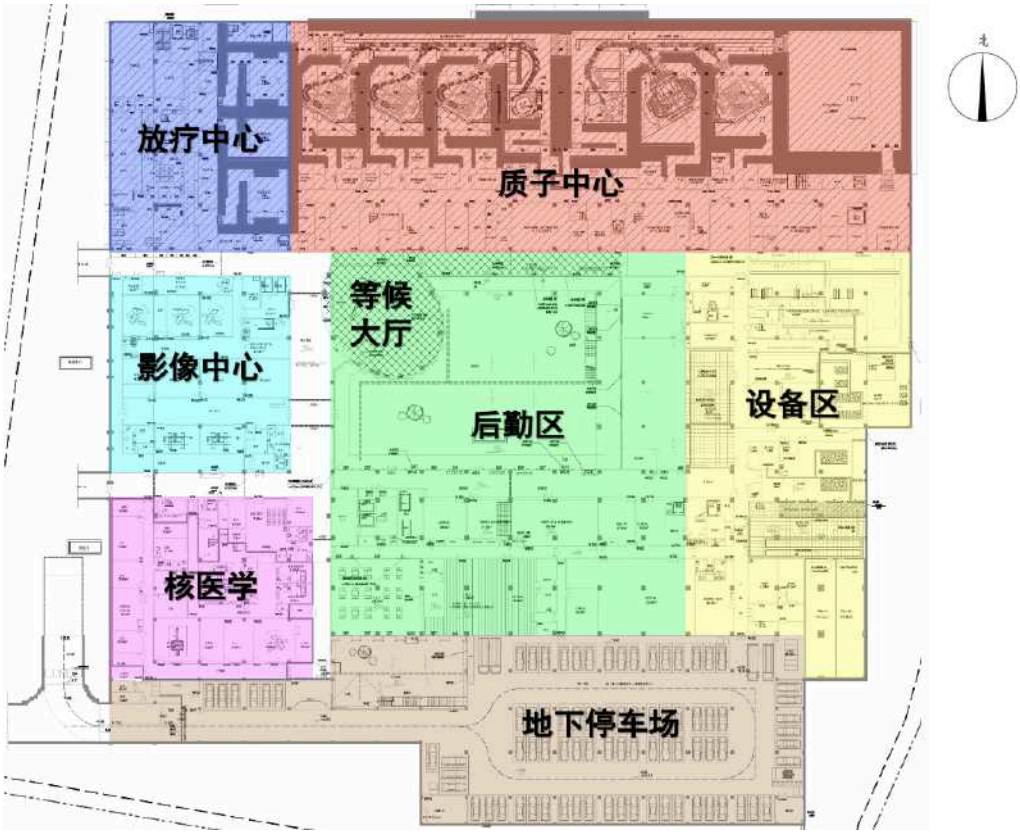


图 3-2 地下一层平面布局示意图

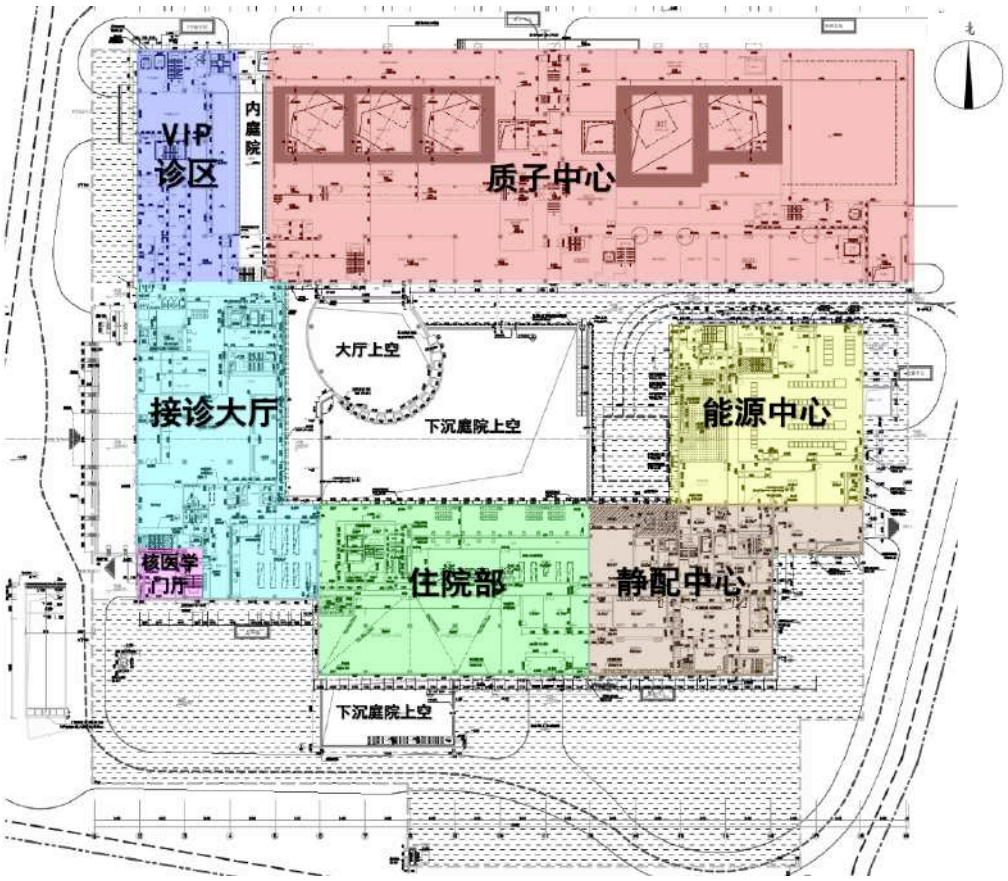


图 3-3 一层平面布局示意图

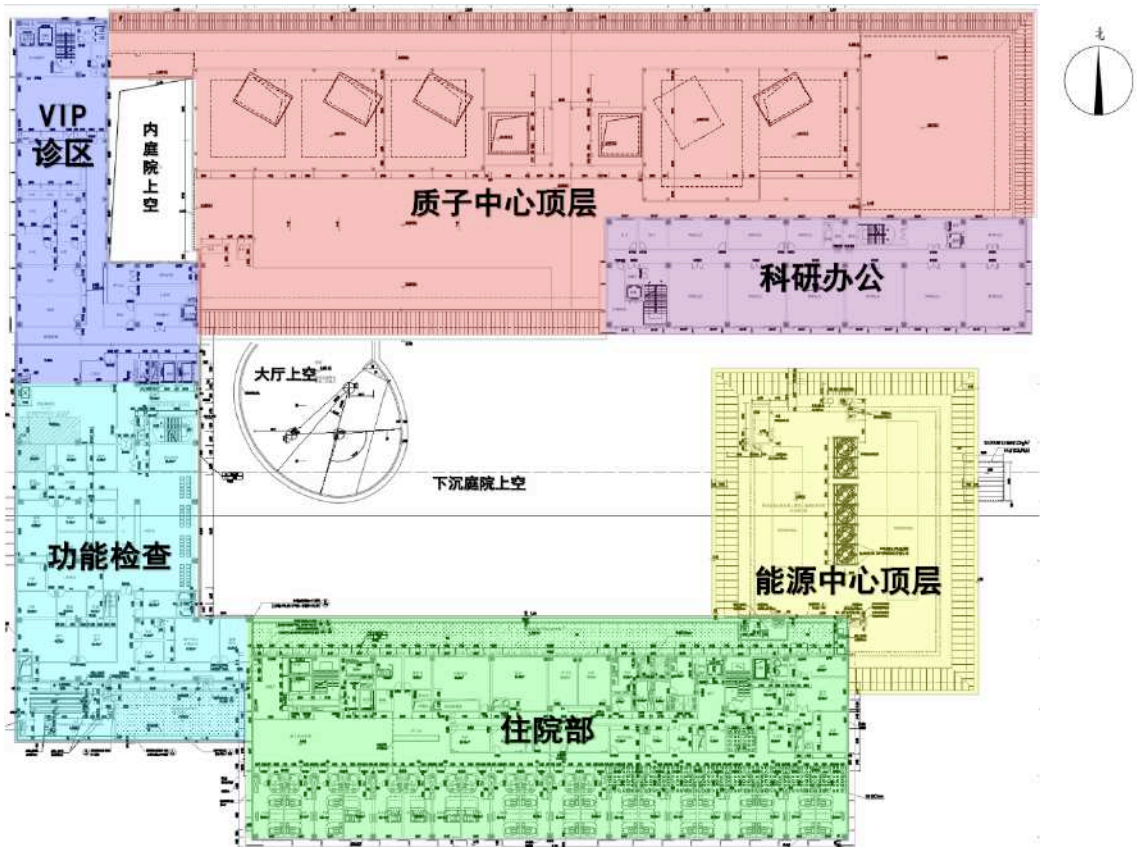


图 3-4 二层平面布局示意图

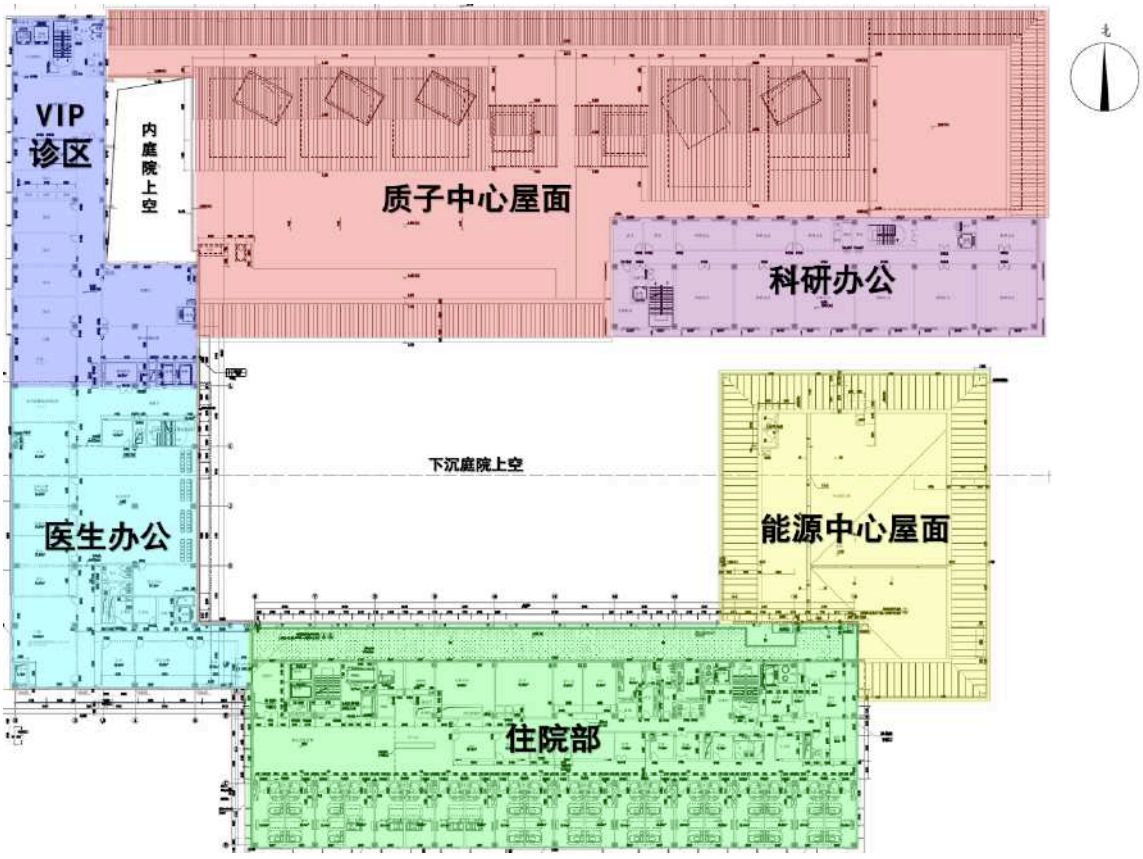


图 3-5 三层平面布局示意图

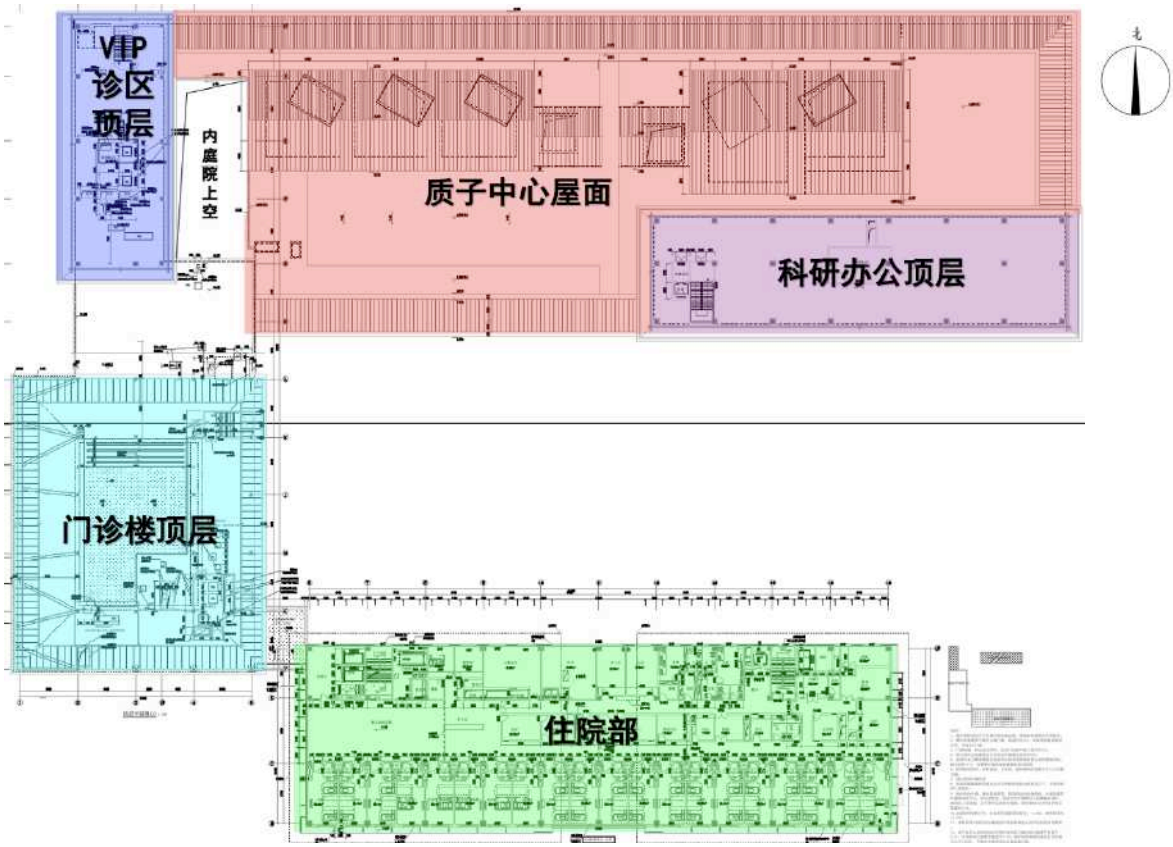


图 3-6 四层平面布局示意图

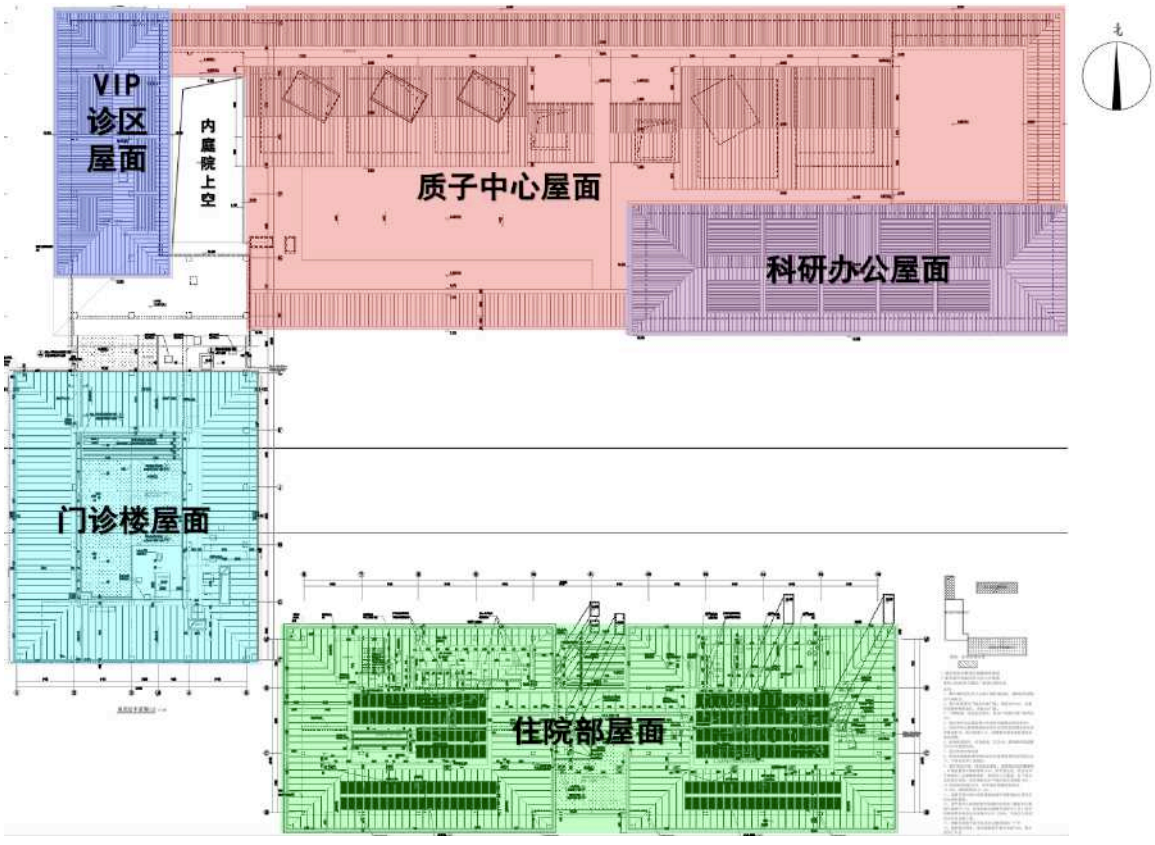


图 3-7 屋顶层平面布局示意图

3.1.1.1 质子中心

质子中心位于拟建场址北侧，为地下一层、地上一层（东南侧局部三层）建筑，分东西两部分。西侧为进口质子治疗系统，含 1 间进口质子回旋加速器大厅、1 条束流输运线和 3 间质子治疗室；东侧为国产质子治疗系统，含 1 间国产质子回旋加速器大厅、1 条束流输运线、2 间质子治疗室和 1 间质子科学实验室。

地下一层：加速器大厅及其主控室、束流输运区、转运大厅、质子治疗室及其控制室、质子科学实验室、实验准备洁净空间、服务器机房、治疗计划计算机用房、剂量验证设备储藏室、患者固定装置储存室、治疗头存储房间、维护室、质控室、质子供应商办公室、站点经理办公室、医生办公室、抢救室、治疗验证用 PET/CT 机房及其控制室、设备间、等候区、更衣室等。

地上一层：加速器大厅上空、治疗室旋转仓上空、质子科学实验室顶板上方屋面、高频房间、空调机房、电源间、转运大厅、装卸大厅、设备零件储藏间、消防控制室、循环水泵房、压缩空气机房、UPS 室、总务监控机房、钢瓶间、变电间、科研办公室等。

地上二层、地上三层：加速器大厅吊装口、机架吊装口、科研办公室、卫生间、空调机房、客梯、楼梯、强电间、弱电间等。

屋顶层：屋面、电梯机房、排烟机房、通风系统排风口等。

3.1.1.2 放疗中心

放疗中心位于地下一层西北角，质子中心西侧、影像中心北侧。

地下一层：3 间直线加速器机房及其控制室、设备间、质控室、制模室、模具室、医生办公室、会议示教间、候诊区、卫生间、空调机房、服务器机房、弱电间等。

地上一层：内庭院、VIP 接诊大厅、VIP 电梯厅、接待室、诊室、卫生间、空调机房等。

地上二层： VIP 接诊大厅、VIP 电梯厅、接待室、诊室、检查室、护士站、

预约室、卫生间、新风机房、工具间等。

地上三层：VIP 接诊大厅、VIP 电梯厅、医生办公室、轻食餐厅、更衣室、卫生间等。

地上四层：屋面、排烟机房、排风口等。

3.1.1.3 影像中心

影像中心位于地下一层西侧，放疗中心南侧、核医学科北侧。

地下一层：模拟 CT 机房、大孔径 CT 机房、乳腺钼靶机房、DR 机房、MRI 机房、控制廊、控制室、设备间、患者候诊区、更衣室、卫生间、注射室、空调机房、补风机房、候梯厅、钢瓶间等。

地上一层：门诊主入口、接诊大厅、挂号收费、自助打印、档案室、等候区、检验取样室、库房、工具间、卫生间、电梯厅等。

地上二层：护士站、候诊区、超声室、准备间、检验实验室、候梯厅、精神慰藉室、工具间、新风机房等。

地上三层：医生办公室、会议室、计划室、医学影像处理实验室、医生休闲区、集中就餐休息区、开水间、医生活动区、卫生间、新风机房、候梯厅等。

地上四层：绿化屋面、排烟机房等。

3.1.1.4 核医学科

核医学科位于地下一层西南角，影像中心南侧。

地下一层：候诊大厅、咨询登记室、打印室、问诊室、治疗室、观察室、更衣室、卫生间、卫生通过间、注射室、储源间、固废间、注射后候诊室（5 间）、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、PET/MR 机房、控制廊、设备间、留观室（2 间）、抢救室、污物电梯、楼梯间、钢瓶间、清洁间、护士更衣室、主任办公室、医生办公室、技师办公室、读片室、茶水间、工具间、空调机房等。

地上一层：核医学科顶板上方绿化区域、核医学门厅、核医学出口、安保室、

污物电梯、门诊药房、取药大厅、卫生间等。

3.1.2 基本参数

本项目拟使用射线装置及放射性同位素的情况分别列于表 3-1、表 3-2。

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	数量	主要技术参数（最大能量/管电压/管电流/等中心输出剂量率）	类别	所在位置
1	进口质子治疗系统	1 套	230MeV	I	地下一层质子中心
2	国产质子治疗系统	1 套	230MeV	I	
3	质子治疗系统配套定位 X 射线管	10 台	治疗室 1、2、3、5，各 2 台：DR：140kV，370mA；CBCT：150kV，500mA。治疗室 4，2 台：80kV，1A。	III	
4	PET/CT	1 台	140kV，666mA	III	
5	电子直线加速器	3 台	10MV，2200cGy/min	II	地下一层放疗中心
6	模拟 CT	2 台	140kV，900mA	III	地下一层影像中心
7	大孔径 CT	1 台	140kV，900mA	III	
8	DR	2 台	150kV，800mA	III	
9	乳腺钼靶	1 台	50kV，200mA	III	
10	PET/CT	1 台	140kV，666mA	III	地下一层核医学科
11	SPECT/CT	1 台	140kV，440mA	III	
备注：考虑到表中序号 4 和序号 10 的 PET/CT 的选型未确定，设备校准用密封放射源的使用不在本次评价范围内，将另外通过江苏省建设项目环境影响登记表备案系统备案。					

表 3-2 核医学科使用非密封放射性物质情况

序号	核素	状态	日最大操作量/Bq	日等效最大操作量/Bq	年最大操作量[1)]，Bq/a	用途	操作方式	操作因子	毒性因子	使用场所	贮存方式与地点
1	^{18}F	液体	1.48E+10	1.48E+07	2.96E+12	显像	很简单操作	10	0.01	地下一层核医学科	暂存于储源间
2	^{18}F[2)]	液体	1.48E+10	1.48E+06	——	贮存	源的贮存	100	0.01		
3	^{99m}Tc	液体	2.78E+10	2.78E+07	5.55E+12	显像	很简单操作	10	0.01		
总计				4.40E+07	8.51E+12	——					
注：1）年最大操作量按核医学年最大工作负荷计算得到。2）由于 ^{18}F 半衰期较短，因此送药量保守按给药量的 2 倍考虑，多于实际使用量的操作方式按源的贮存考虑。											

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 质子治疗系统

3.2.1.1 进口质子治疗系统设备情况

3.2.1.1.1 主要技术参数及结构布局

进口质子治疗系统主要由回旋加速器、能量选择系统、束流输运系统和治疗系统组成。质子在回旋加速器中加速到 230MeV 后引出，引出流强约为 300nA，引入能量选择系统。通过调节能量选择系统中降能器的厚度，可根据实际治疗肿瘤的深度和厚度，在输出端得到 70~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。束流输运系统用于将能量选择器引出的质子输运到各治疗室内。进口质子治疗系统共配置 3 个质子治疗室，从东到西分别为治疗室 1、治疗室 2、治疗室 3。主要技术参数见表 3-3，装置结构组成示意图见图 3-9，平面布局示意图见图 3-8。

表 3-3 进口质子治疗系统主要技术参数

指标	数值/方案
加速器主体	质子回旋加速器
加速器最大引出能量	230 MeV
加速器最大引出流强	300 nA
加速器引出电荷量	≤300 nC/s (加速器出口)
治疗能量范围	70 ~ 230 MeV
治疗流强	0.27 nA @ 70 MeV，0.47 nA @ 230 MeV
加速器射频频率	106 MHz
照射野	30 cm × 40 cm
源皮距	100 cm
治疗头输出剂量率	2 Gy/min/L
束斑直径	4~9mm
束斑定位精度	1mm
治疗模式	笔形束模式（Pencil Beam Scanning，PBS）
治疗终端	3 间质子治疗室（治疗室 1~3）
治疗定位系统	每间治疗室配备两个定位 X 射线球管，3 间治疗室共配备 6 个 X 射线管：一个用于 DR 成像，另一个用于 DR 成像及 CBCT。 用于 DR 的球管：40~140kV，1~370mA； 用于 CBCT 的球管：40kV~150kV，1~500mA。

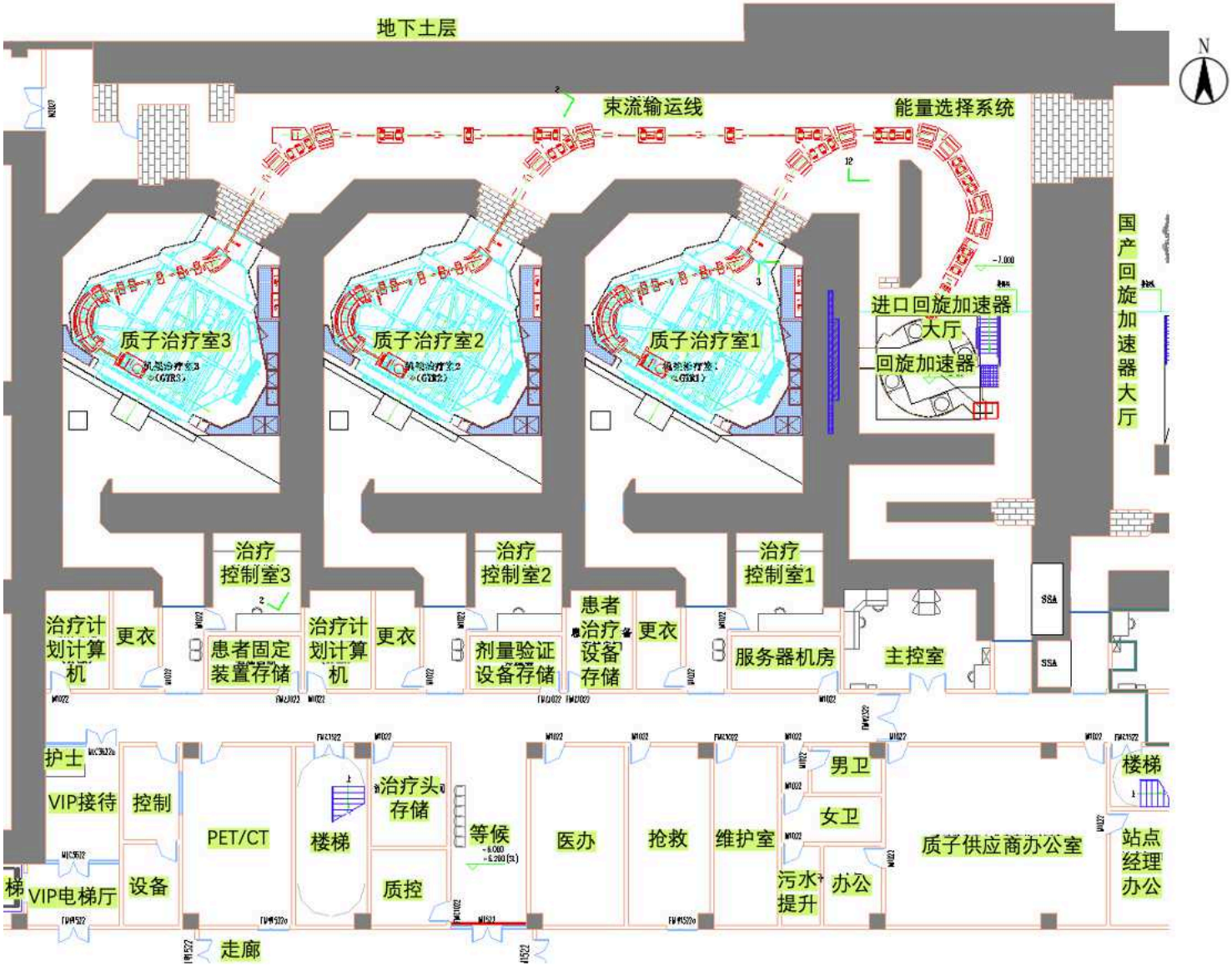


图 3-8 进口质子治疗系统平面布局示意图

3.2.1.1.2 装置组成及工作原理

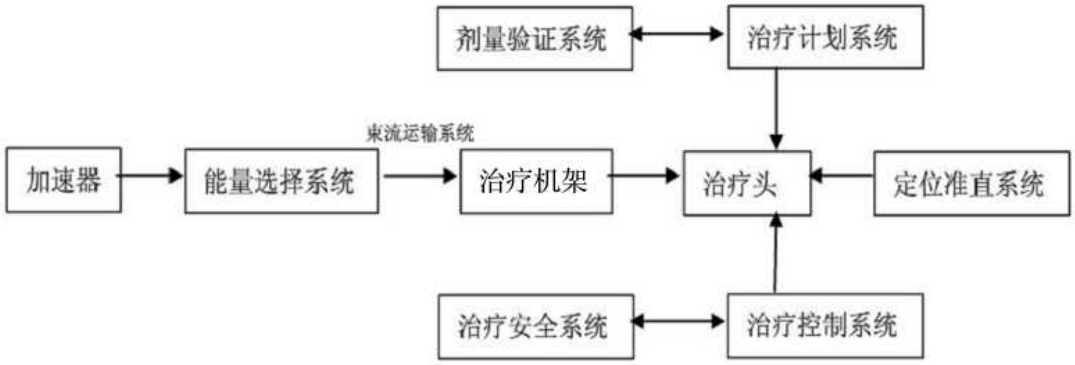


图 3-9 进口质子治疗系统装置结构组成示意图

质子治疗系统中质子由回旋加速器→能量选择系统→束流输运线→治疗终端，经历质子加速、注入、能量选择、引出和治疗。各部分详细工作原理如下。

3.2.1.1.2.1 回旋加速器

回旋加速器是质子治疗系统的核心，其结构示意图见图 3-10，实物参考图见图 3-11。在回旋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。氢离子通过一个由高频电场供电的间隙，每次通过间隙得到高频能量进而实现加速。为把质子限制在一个有限的空间进行加速，在质子运动的垂直平面上加一个固定磁场，使质子在该磁场中做螺旋圆周运动。质子初始流强约为 750nA，初始能量约为 50keV。多次通过高频间隙后，能量逐渐变高，直至加速到最高 230MeV 时，再利用磁和电偏转将质子束从加速器引出。质子治疗系统正常运行期间，回旋加速器每天 24 小时始终处于开机运行状态，仅在检修保养期间才会停机，且仅在治疗期间才会产生质子束流。

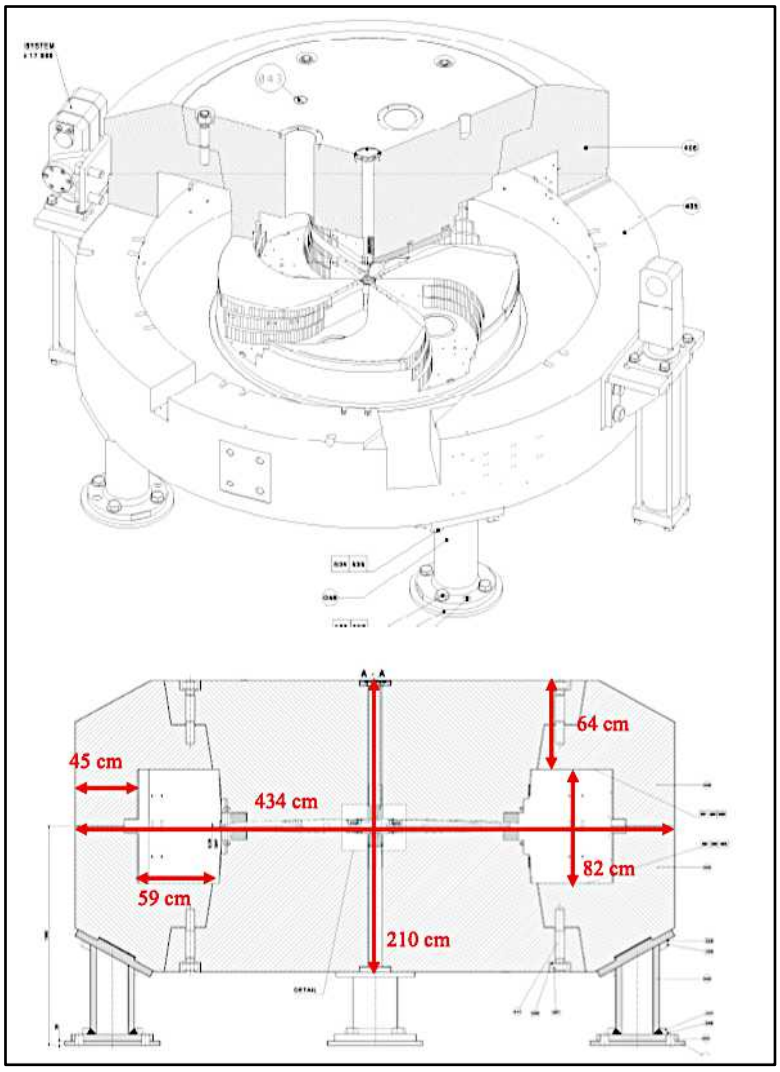


图 3-10 进口质子治疗系统回旋加速器结构示意图



图 3-11 进口质子治疗系统回旋加速器实物参考图

3.2.1.1.2.2 能量选择系统

质子治疗时要根据肿瘤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，因此需在回旋加速器和治疗室之间设置一个能量选择系统，该系统由降能器、准直器与离子光学用的各种磁铁和测量元件组成，其结构示意图见图 3-12，实物参考图见图 3-13。

（1）降能器

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

降能器是由不同厚度和材质的挡块拼接而成的环状物体，当其在质子束流前旋转时，依据厚度和材质的不同以降低通过的束流的能量大小。挡块从大到小依次排列，挡块 1 和 2 是铍，密度 1.85 g/cm^3；挡块 3 到 8 是碳，密度 1.7g/cm^3；挡块 9 是铝，密度 2.7g/cm^3。

（2）准直器

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

（3）散度准直器

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

（4）能量狭缝

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

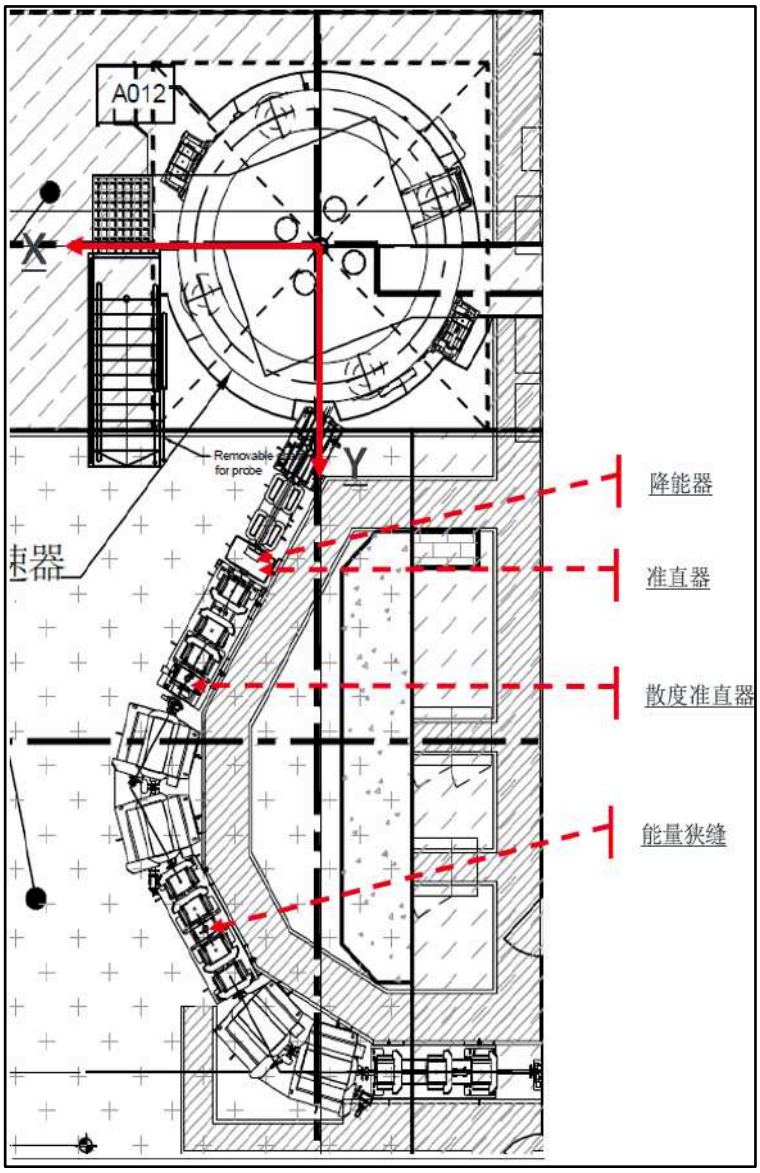


图 3-12 进口质子治疗系统能量选择系统结构示意图



图 3-13 进口质子治疗系统能量选择系统实物参考图

3.2.1.1.2.3束流输运系统

束流输运系统用于将加速器产生的质子束流输送到患者治疗部位附近。沿束流输运线管道放置四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备，四级磁铁用于对质子束流进行聚焦，偏转磁铁用于改变束流的方向，导向磁铁用于纠正质子束流在系统安装时产生的偏离。进口质子治疗系统束流输运系统实物参考图见图 3-14。

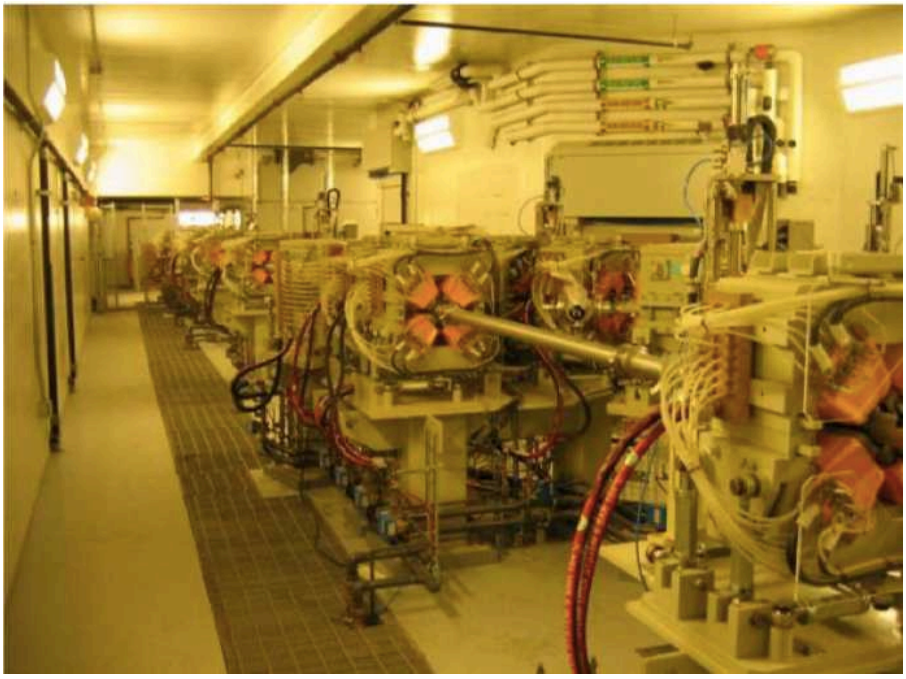


图 3-14 进口质子治疗系统束流输运系统实物参考图

3.2.1.1.2.4治疗室终端

进口质子治疗系统的治疗室终端为 3 间质子治疗室（治疗室 1~3），是治疗患者的场所。旋转质子治疗室内含有旋转机架及旋转治疗头。旋转机架能够环绕卧姿患者进行转动，可实现 360° 旋转。每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一个治疗室提供束流。

（1）质子治疗室

质子治疗室通过机架使质子束流依照同中心旋转，以进行多野不同入射角的照射。在旋转中心的治疗床能进行上下、前后、左右的调节，还能作前后水平和左右水平方向的倾斜，以方便精确地重复患者治疗的体位。旋转机架和质子治疗

室实物参考图见图 3-15。

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

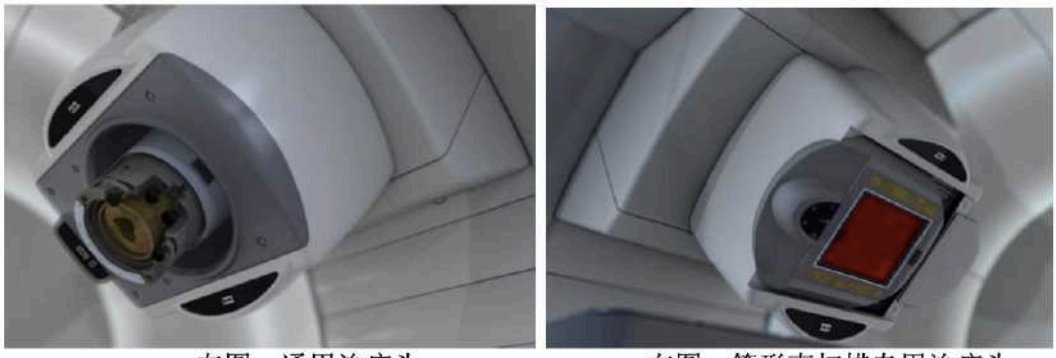


图 3-15 进口质子治疗系统旋转机架和质子治疗室实物参考图

（2）治疗头

治疗头位于束流输运系统的最末端，根据不同需求和治疗计划，使用不同的治疗模式，准确地将质子束照射到目标肿瘤中。鉴于肿瘤的多样性，需要不同的治疗模式去治疗每个患者，治疗头的设计也会根据不同的治疗模式有所差别。厂家针对散射和扫描治疗模式生产了通用治疗头和专用于笔形束扫描的治疗头，模拟图见图 3-16。本项目进口质子治疗系统使用的均为笔形束扫描治疗头。

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



左图：通用治疗头　　右图：笔形束扫描专用治疗头

图 3-16 进口质子治疗系统治疗头模拟图

（3）治疗定位系统

每间治疗室内均设有一套治疗定位系统，用于患者治疗前的定位。治疗定位系统由 X 光球管、接收器和高压发生器组成。由高压发生器提供高压电源到球管上，球管发出 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。

进口质子治疗系统每间质子治疗室设有 2 个定位 X 光球管（Tube A、Tube B），用于从不同角度对患者进行定位。其中一个用于 DR 成像，另一个用于 DR 成像及 CBCT。用于 DR 的球管管电压 40~140kV、管电流 1~370mA；用于 CBCT 的球管管电压 40~150kV，管电流 1~500mA。X 光球管在治疗室内的安装位置如图 3-17 所示。每间治疗室内部设有单独的操作间，用于操作治疗定位系统，进行治疗前的模拟定位。操作间的位置避开 X 射线的照射方向，如图 3-18 所示。X 射线管操作间屏蔽体铅当量为 2.75mmPb，观察窗铅当量为 4.6mmPb。



图 3-17 进口质子治疗系统质子治疗室内 X 光球管安装位置示意图

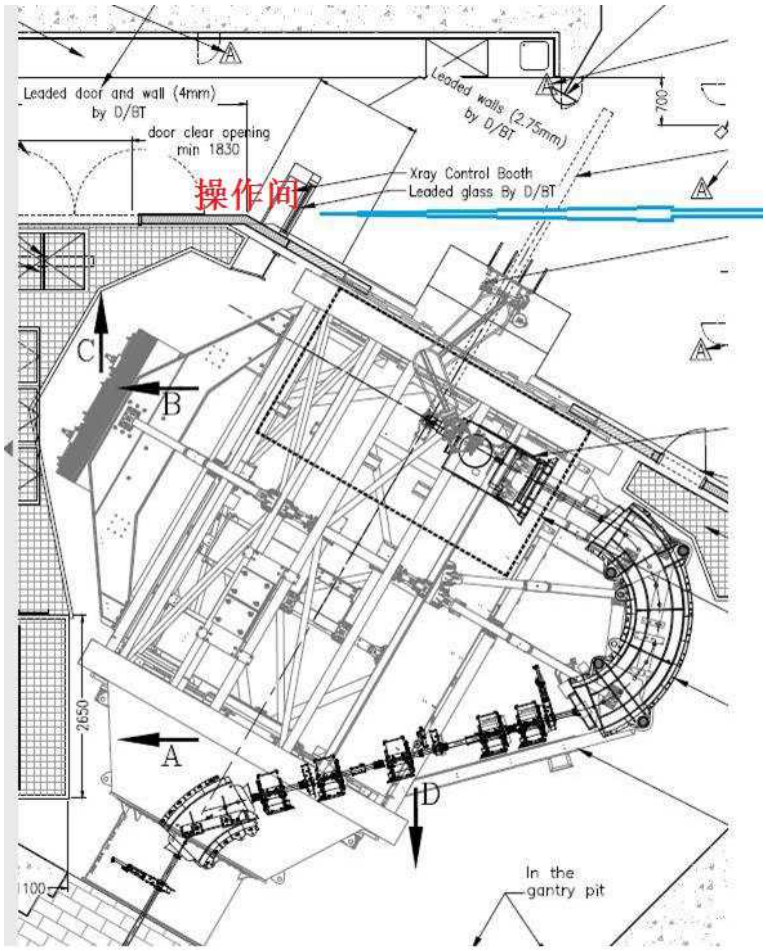


图 3-18 进口质子治疗系统质子治疗室定位系统操作间位置示意图

3.2.1.2 国产质子治疗系统设备情况

3.2.1.2.1 主要技术参数及结构布局

本项目拟使用的国产质子治疗系统由中国原子能科学研究院自行研制，质子治疗系统的最高能量为 230MeV，束流的引出流强最高为 300nA，主要技术参数见表 3-4。平面布局示意图见图 3-19。

质子治疗系统主要由超导回旋加速器、能量选择系统、束流输运系统和治疗系统组成。超导回旋加速器能量选择范围为 70~230MeV。质子束流在超导回旋加速器中加速到 230MeV 后引出，束流的引出流强最高为 300nA。通过调节能量选择系统中降能器的厚度，可根据治疗室患者肿瘤的深度和厚度，得到 70~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。束流输运系统用于将能量选择器引出的质子束流输运到质子治疗室和质子科学实验室。

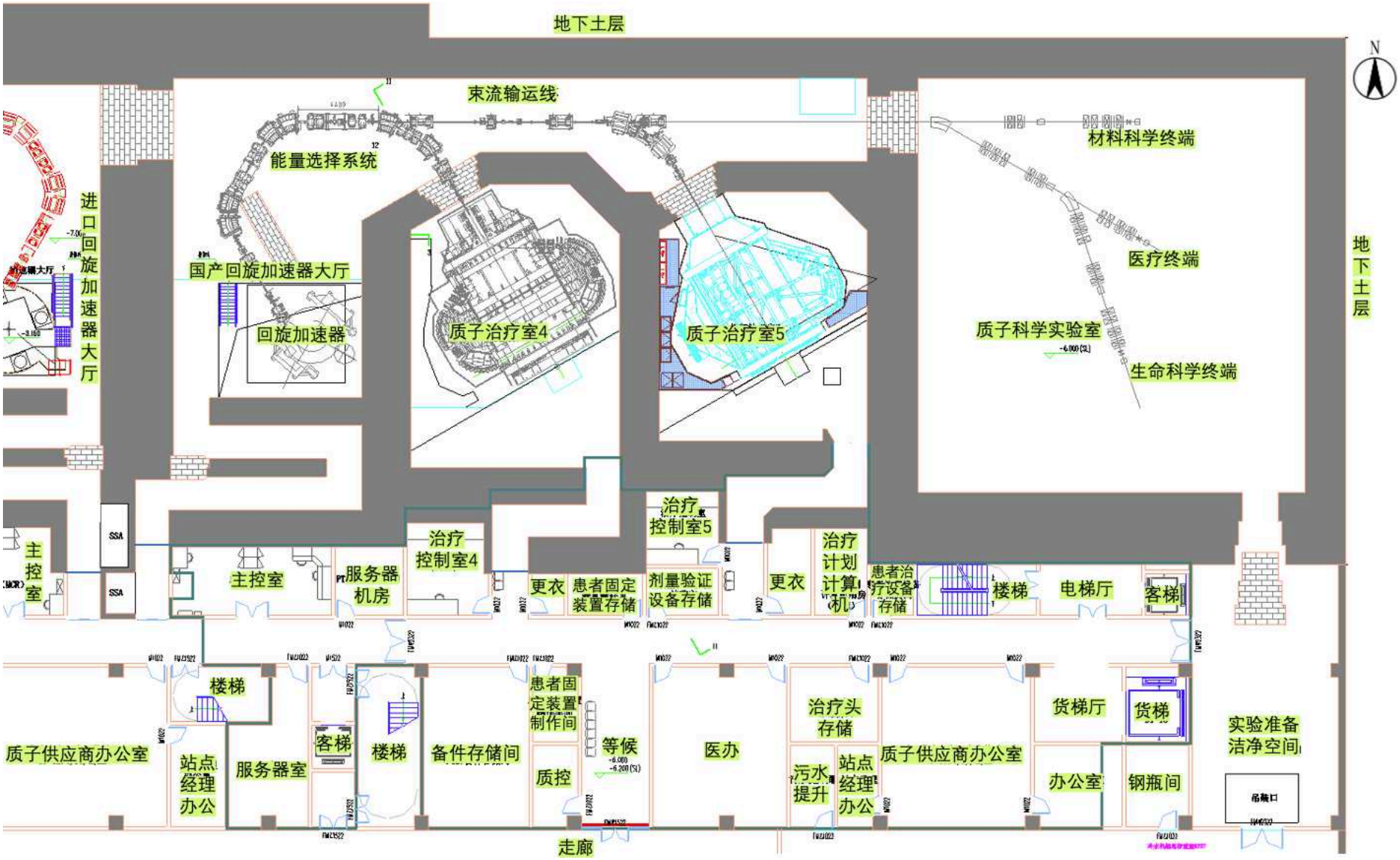


图 3-19 国产质子治疗系统平面布局示意图

表 3-4 国产质子治疗系统主要技术参数

指标	数值/方案
加速器主体	质子超导回旋加速器
最大引出能量	230MeV
最大引出流强	300nA
加速器射频频率	71.25MHz
治疗能量范围	70~230MeV
治疗流强	0.47nA @ 230 MeV
最大输出剂量率	2Gy/min/L
最大射程	32 g/cm^2
治疗终端	2 间质子治疗室（治疗室 4、5）
治疗定位系统	每间治疗室配备 2 个定位 X 射线管，2 间治疗室共 4 个。治疗室 4：80kV，1A。治疗室 5：DR：140kV，370mA；CBCT：150kV，500mA。
实验终端	拟建 1 间质子科学实验室，内含 1 个材料科学终端、1 个医疗终端和 1 个生命科学终端。实验终端束流最高能量 230MeV、最大束流 10nA。

3.2.1.2.2 装置组成及工作原理

3.2.1.2.2.1超导回旋加速器

超导回旋加速器是国产质子治疗系统的核心，具有体积更小、重量更轻、能耗更低、精度更高、能量切换更快的优势，其结构示意图见图 3-20。该回旋加速器包括中间的 D 形盒和周围的磁铁。其中 D 形盒用于产生交变电场，将从回旋加速器中心离子源引出的质子加速；磁铁用于产生竖直方向的磁场，使质子加速后作半径随能量逐渐增加的圆周运动。D 形盒产生的交变电场和磁铁产生的磁场共同作用，最终能将从离子源出来的几十 keV 的质子能量加速到 230 MeV，然后通过加速器引出系统引出。

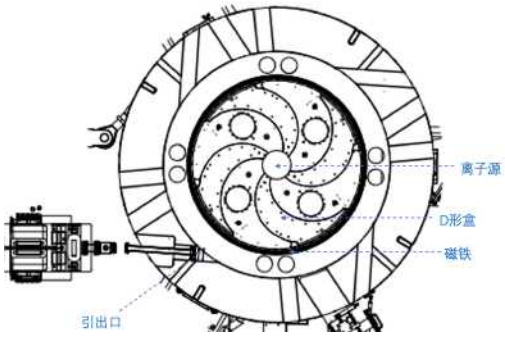


图 3-20 国产质子治疗系统超导回旋加速器结构平面示意图

3.2.1.2.2.2 能量选择系统

治疗时要根据肿瘤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，因此需在回旋加速器和治疗室之间设置一个能量选择系统，该系统由降能器、准直器与离子光学用的各种磁铁和测量元件组成，如图 3-21 所示。

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

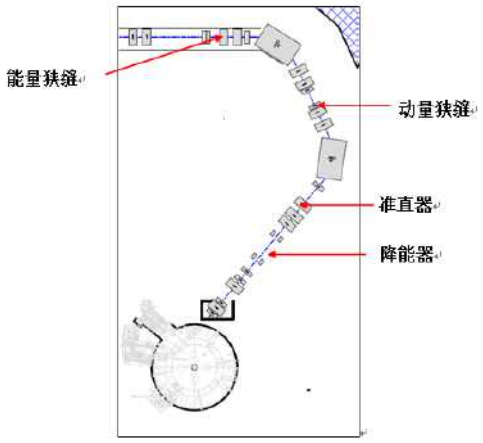


图 3-21 能量选择系统结构示意图

3.2.1.2.2.3 束流输运系统

束流输运线沿途放置四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备。四级磁铁用于对质子束流进行聚焦，偏转磁铁用于改变束流的方向，导向磁铁用于纠正质子束流在系统安装时产生的偏离。

3.2.1.2.2.4 治疗室终端

（1）质子治疗室

国产质子治疗系统的治疗终端为 2 间质子治疗室（治疗室 4、5），内含旋转治疗舱，包括旋转机架及治疗头。其中治疗室 4 采用国产自主研发的旋转机架，

治疗室 5 采用与进口质子治疗系统一样的旋转机架。旋转机架能够环绕治疗头等中心点（体模）进行转动，可实现 360° 旋转。

每间治疗室在照射时间上相互错开，即同一时刻只能向一个治疗室提供束流。

（2）治疗定位系统

治疗室 5 采用与进口质子治疗系统一样的治疗定位系统，相关内容已在 3.2.1.1.2.4 小节介绍。

治疗室 4 采用国产自主研发的治疗定位系统。治疗室设有 2 个定位 X 光球管（Tube A、Tube B，最大管电压 80kV，最大管电流 1A），安装于机架上，随机架旋转，用于从不同角度对患者进行定位，见图 3-22。操作 X 射线管的控制台位于治疗床侧边操作间，避开 X 射线的照射方向，见图 3-22。X 射线管操作间屏蔽体铅当量为 2.75mmPb，观察窗铅当量为 4.6mmPb。

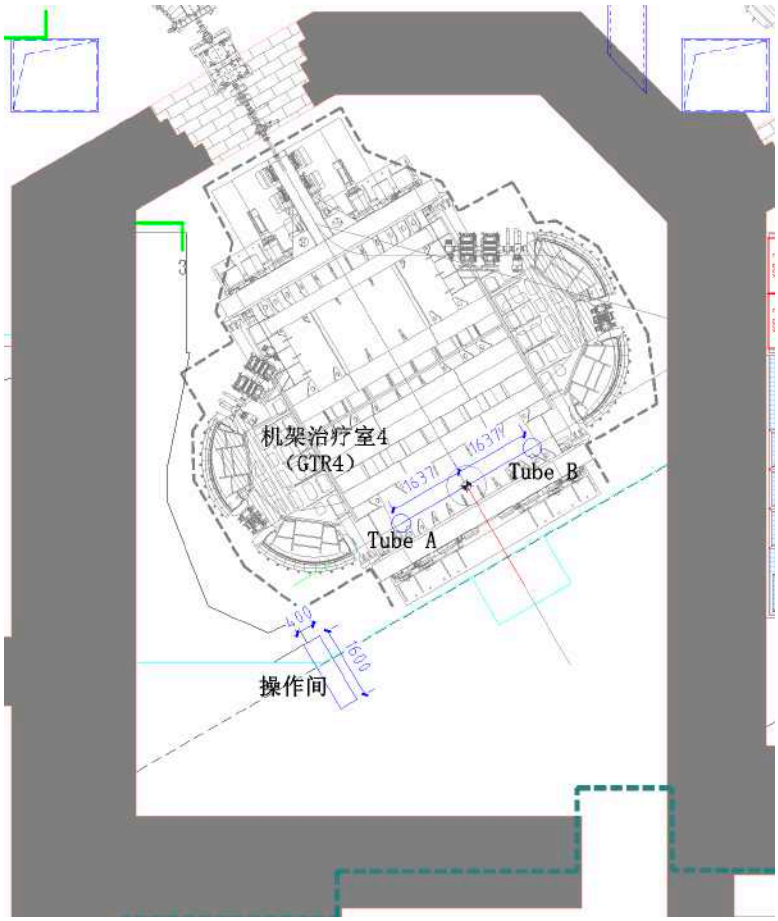


图 3-22 国产质子治疗室 X 射线管及操作间位置平面示意图

3.2.1.2.2.5质子科学实验室

国产质子治疗系统在治疗患者的时间段外，可将超导回旋加速器产生的质子束流经束流输运线引到质子科学实验室，进行科研实验。质子科学实验室内含材料科学终端、医疗终端、生命科学终端各 1 个，布局见图 3-23。材料科学终端的实验靶材主要为 Si、Ta、Al、Cu，医疗终端的实验靶材主要为水、Ta、Al、Cu，生命科学终端的实验靶材主要为水、人体组织、Cu。实验终端质子束流最高能量 230MeV、最大束流 10nA，同一时刻只能向一个实验终端提供束流。

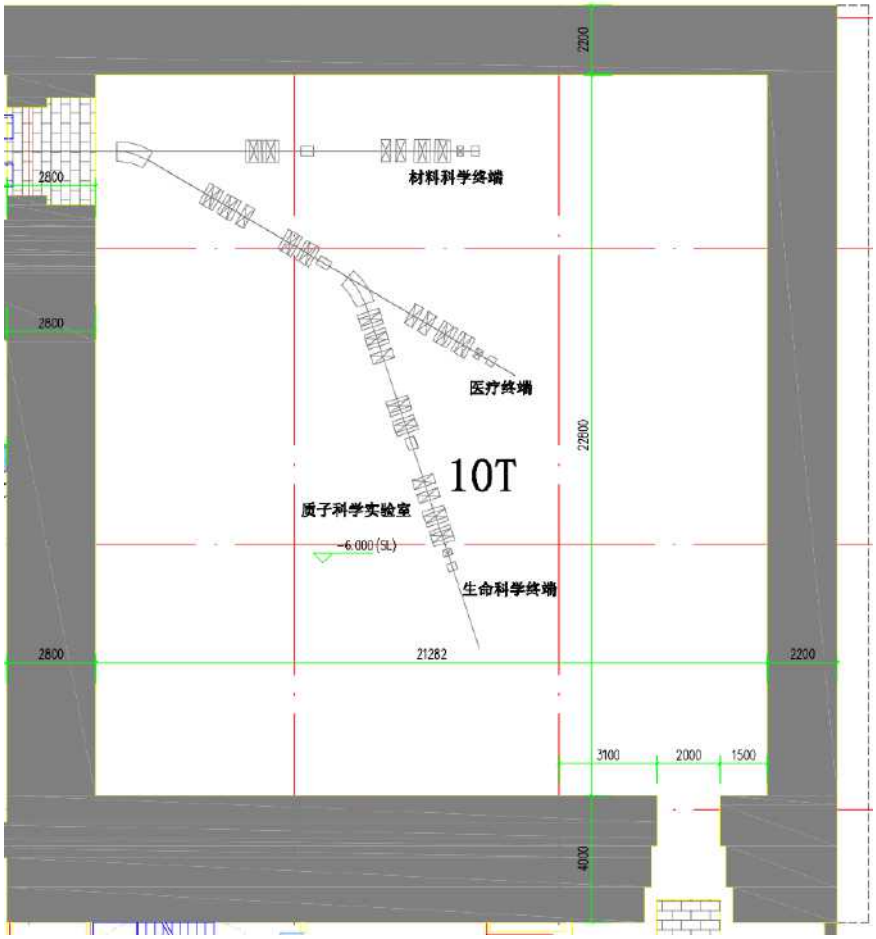


图 3-23 质子科学实验室平面布局图

3.2.1.3 工作流程及产污环节分析

进口和国产质子治疗系统的治疗流程及产污环节基本一致，具体如下。

（1）制定治疗预案

患者预约、就诊，经专家医师会诊，判断患者符合质子治疗适应症后（诊断、

治疗正当性判断），由质子治疗科室医生、物理师、治疗技师联合讨论，制定治疗预案，并预约登记模拟定位时间和治疗时间。

（2）治疗前模拟定位

对于首次预约质子治疗的患者，需要利用模拟CT对其进行治疗前的模拟定位，采集患者数据并确定初始等中心，主要的辐射源项为模拟CT机出束产生的X射线。该环节在地下一层影像中心的模拟CT机房内进行，主要由治疗技师和护士进行操作。治疗技师主要负责在模拟CT机房内进行照射前的摆位和在CT控制室内操作开机照射，照射前摆位约5min/人次，照射时间约1min/人次。护士主要负责在有需要的情况下为患者留针并注射造影剂，在模拟CT机房北侧的注射室内完成留针，留针时间约1min/人次；在模拟CT控制廊远程注射造影剂，注射时间约1min/人次。具体的人员配备、操作方式和工作时间列于表3-5。

表3-5 治疗前模拟定位的工作人员工作内容和操作时间

工作岗位	工作内容	操作时间
治疗技师	模拟CT机房内摆位	5min/人次
	模拟CT控制廊操作开机照射	1min/人次
护士	注射室内留针	1min/人次
	模拟CT控制廊远程注射造影剂	1min/人次

（3）治疗计划制定

物理师利用治疗计划系统制定治疗计划，确定治疗参数，如照射次数、照射方向、照射剂量，通过剂量计算制定剂量分布图；确定治疗等中心点的精确位置、照射野大小和方向等参数，并利用治疗计划系统提供的图像编辑和后处理工具对所制定的治疗计划进一步优化，最终确定完整的治疗计划方案。该环节在地下一层质子中心的治疗计划计算机用房内进行，利用治疗计划系统完成，不需开机出束。

（4）治疗计划验证

每名患者的治疗计划在正式使用前，为确保治疗安全，都需进行一次治疗前的计划验证，即物理师利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行固体水模体模拟治疗，实测其治疗参数，再和治疗计划中规定的治疗参数进行比较，若差值在允许容差内，则允许正式用于患者治疗。物理师操作一次治疗

计划验证的过程与技师操作一次正式的治疗过程基本一致，只是把患者换成了固体水模体，总时间约为 20min。由物理师完成所有操作，包括在治疗室内对固体水模体的摆位等操作和在治疗控制室内操作出束照射。该环节主要的辐射源项为治疗室内定位 X 射线管出束产生的 X 射线以及质子治疗系统出束产生的中子、γ 瞬发辐射和感生放射性。

（5）治疗前精确摆位

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

（6）质子治疗系统出束照射治疗

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

（7）治疗结束后解除摆位

患者治疗结束后，治疗技师进入治疗室内，对患者解除摆位并协助其离开机房，为下一个患者治疗做准备。该环节在治疗室内进行，由治疗技师全程操作，时间约为 1min。根据“3.3.1.3.5 节”分析计算，患者在接受治疗期间，其自身组织受到质子束流照射会产生感生放射性。因此，该环节主要的辐射源项为治疗室内的患者感生放射性及活化空气。

（8）治疗后精确度验证

治疗结束后的精确度验证是利用患者接受质子束流照射后自身产生感生放

射性核素，通过PET/CT扫描显像，通过将活化组织的区域与肿瘤位置进行比对，验证质子治疗的精确度。该环节在质子中心的 PET/CT 机房进行，操作人员为技师，主要的辐射源项为患者感生放射性及 PET/CT 出束产生的 X 射线。

（9）质子科学实验

国产质子治疗系统在治疗患者的时间段外，可将国产超导回旋加速器产生的质子束流经束流输运线引到质子科学实验室，进行相关科研实验研究。该环节工作人员主要为医院的实验人员，主要辐射源项为国产质子治疗系统出束期间产生的中子、γ瞬发辐射和感生放射性。

（10）小结

质子治疗系统工作流程污染物产生环节及主要污染因子见图 3-24、表 3-6。

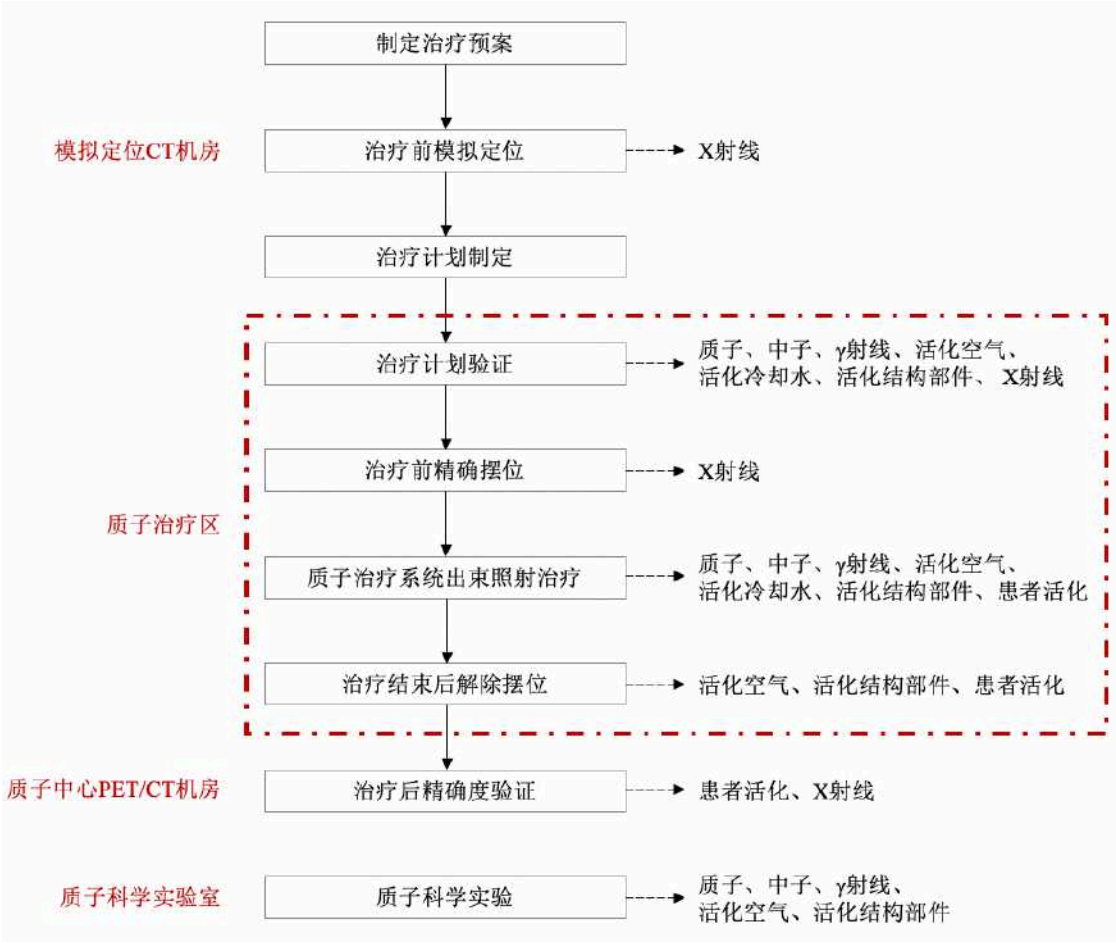


图 3-24 质子治疗系统工作流程及主要产污环节图

表 3-6 质子治疗系统工作过程中污染物产生环节及主要污染因子

污染物产生环节	主要污染因子
模拟 CT 机房内模拟定位	X 射线
治疗室内 X 射线定位	
回旋加速器运行	质子、中子、γ 射线、 活化空气、活化冷却水、活化结构部件
能量选择系统运行	
束流输运系统运行	
治疗室终端出束	质子、中子、γ 射线、活化空气、活化结构部件、患者活化
质子科学实验终端出束	质子、中子、γ 射线、活化空气、活化结构部件
治疗室内解除摆位	活化空气、活化结构部件、患者活化
治疗后精确度验证	患者活化、X 射线

3.2.1.4 工作负荷及人员配置

3.2.1.4.1 工作负荷

进口、国产质子治疗系统的年使用规划及出束时间分别见表 3-7、表 3-8。

表 3-7 进口质子治疗系统的年使用规划

序号	内容	单位	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3	3	3
2	每室每天治疗时间	h/d/室	8	8	8
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	24	24	24
4	每室每年治疗天数	d/a/室	250	250	250
5	每室每年治疗人数	人/a/室	250	250	250
6	每人平均治疗次数	次/人	24	24	24
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	6000	6000	6000
8	每人次治疗平均出束时间	min/人次	5	5	5
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	2	2	2
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	500	500	500
11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	40	40	40
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	10.8	10.8	10.8
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	540	540	540
14	年总出束时间	h/a	1620		

表 3-8 国产质子治疗系统的年使用规划

序号	内容	单位	治疗室 4	治疗室 5	质子科学实验室
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3	3	/
2	每室每天治疗时间	h/d/室	6	6	/
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	18	18	/
4	每室每年治疗天数	d/a/室	250	250	/
5	每室每年治疗人数	人/a/室	225	225	/
6	每人平均治疗次数	次/人	20	20	/
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	4500	4500	/
8	每人次治疗平均出束时间	min/人次	5	5	/
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	1.5	1.5	/
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	375	375	/
11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	35	35	/
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	8.2	8.2	/
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	410	410	/
14	质子科学实验室每天出束时间	h/d	/	/	3.2
15	质子科学实验室每周出束时间	h/w	/	/	16
16	质子科学实验室每年工作天数	h/d	/	/	250
17	质子科学实验室每年出束时间	h/d	/	/	800
18	年总出束时间	h/a	1620		

3.2.1.4.2 人员配置

质子中心辐射工作人员配置情况见表 3-9。

表 3-9 质子中心辐射工作人员配置情况

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医生办公室、抢救室	20 人	每天两班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、治疗室、治疗控制室	20 人	每天两班，每班 8h
治疗技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	CT 模拟定位机房及其控制室、质子治疗室及其控制室、技师办公室	20 人	每天两班，每班 8h
护士	治疗准备、注射、护理等	注射室、质子治疗室及其控制室、护士站	10 人	每天两班，每班 8h
工程师	水电、暖通、网络	设备间、工程师办公室	6 人	每天两班，

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
	等的日常运维			每班 8h
实验人员	质子科学实验	质子科学实验室、加速器主控室、科研办公室	6 人	每天一班，每班 8h

3.2.2 直线加速器

3.2.2.1 装置组成原理及主要参数

电子直线加速器是产生高能电子束的装置。电子枪发射电子，在由磁控管速调管为功率源的加速管中加速，当达到所需能量时，经散射箔和准直器得治疗电子束。电子束射到金属靶上产生轫致辐射，经准直得到治疗 X 射线。加速器放射治疗的工作方式为：以一个或几个疗野定向照射，获得计划所需的治疗剂量。常见医用电子直线加速器示意图如图 3-25 所示。

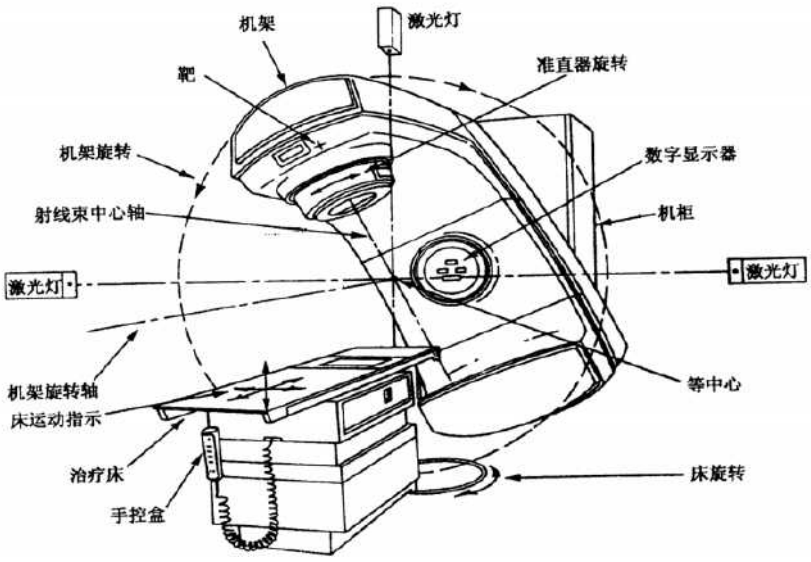


图 3-25 常见医用电子直线加速器结构示意图

电子直线加速器是以磁控管为微波功率源的直线加速器，它的结构单元为：加速管、电子枪、微波系统、调制器、束流输运系统及准直系统、真空系统、恒温水冷系统和控制保护系统。电子枪产生的电子由微波加速波导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子束由电子窗口射出，通过 2cm 左右的空气射到金属钨靶，产生大量高能 X 射线，经初级准直器和均整器形成剂量均匀的 X 射线束，再通过监测电离室和次级准直器限束，最后到达患者病灶实现治疗目的。医用电子直线加速器内部结构如图 3-26 所示。

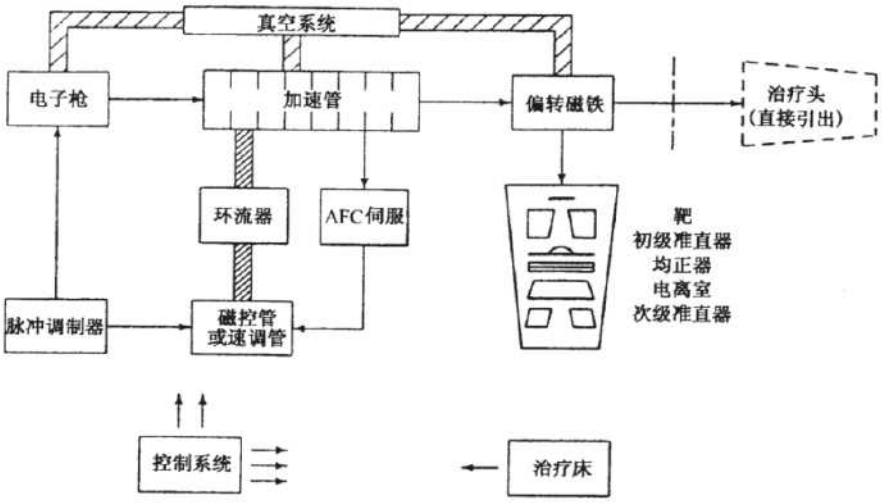


图 3-26 医用电子直线加速器内部结构图

本项目拟使用的电子直线加速器主要技术参数列于表 3-10，外观示例图见图 3-27。

表 3-10 本项目拟使用电子直线加速器的主要技术参数

射线装置名称	厂家及型号	主要技术参数	数量	工作场所
电子直线加速器	医科达 Infinity	X 射线最大能量：10MV， 等中心最大输出剂量率：2200cGy/min； 电子线最大能量：15MeV， 等中心最大输出剂量率：600cGy/min； 最大照射野：40cm×40cm； 有用束最大张角：28°； 源皮距：100cm； 治疗头旋转角度：360°； 主束方向：南北、上下。	3	直加机房 1、2、3



图 3-27 医用电子直线加速器外观示例图

3.2.2.2 治疗流程及产污环节分析

直线加速器应用的工艺流程及产污环节如图 3-28 所示，具体如下：

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

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

（3）模拟定位：在模拟 CT 机房内对患者的肿瘤进行定位检查，确定肿瘤的具体位置和形状，此环节辐射源项为 X 射线。

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

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

（6）患者摆位：摆位前认真查对患者信息、照射条件及摆位要求，调整治疗床高度，严格按照摆位要求实施摆位。

（7）治疗前或治疗过程中使用电子射野影像系统(EPID)、KV 级 X 射线锥形束 CT（CBCT）等设备拍摄放疗体位下的照射部位数字影像，与放疗计划系统进行对比，并校正放疗体位，此环节辐射源项为 X 射线。

（8）实施治疗：根据放疗计划，运用有关技术实施精确照射，此环节辐射源项为 X 射线、电子线、臭氧及氮氧化物等废气（X 射线能量≤10MV 时）。

（9）结束治疗：患者离开治疗室，摆位人员进行下一个患者摆位准备。

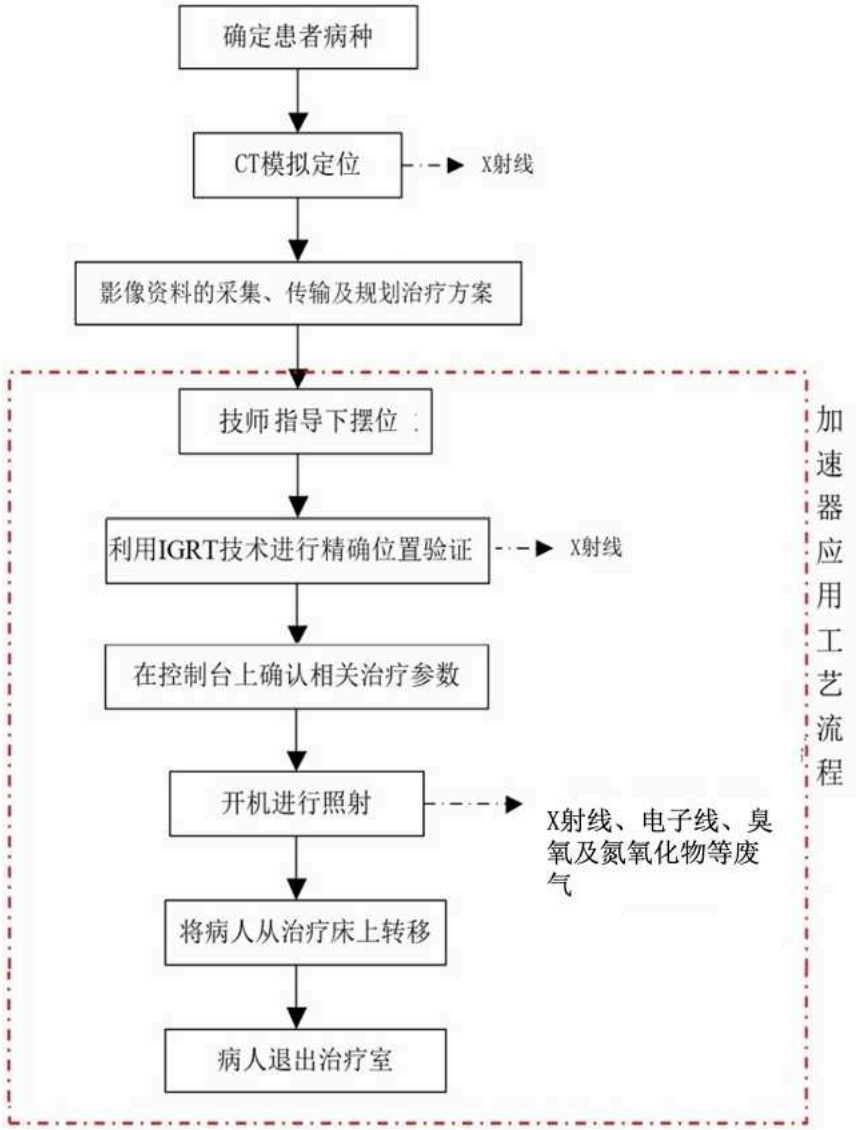


图 3-28 直线加速器的工艺流程及产污环节图

3.2.2.3 工作负荷及人员配置

3.2.2.3.1 工作负荷

医院预计每台直线加速器每天最多治疗 70 人，每周治疗 5 天，每年治疗 50 周。采用调强放射治疗和常规放射治疗两种模式的比例保守按 50%+50%考虑，取调强因子 N=5。则每台直线加速器的年治疗出束时间为 70 人/天×5 天/周×50 周/年×(3/60) h×（50%×1+50%×5）=2625h。此外，每台直线加速器每年 QA 的出束时间按 75h 计。则直线加速器年总出束时间见表 3-11。

表 3-11 直线加速器年出束时间

装置名称	单次治疗出束时间，min/次	调强因子	年治疗人数	年治疗出束时间/h	年 QA 出束时间/h	年总出束时间/h
直线加速器 1	3	5	17500	2625	75	2700
直线加速器 2	3	5	17500	2625	75	2700
直线加速器 3	3	5	17500	2625	75	2700

3.2.2.3.2 人员配置

直线加速器的辐射工作人员主要包括医生、物理师、技师、护士、工程师，人员配备计划见表 3-12。

表 3-12 直线加速器工作人员配备计划

岗位	人数	工作内容	工作地点
医生	12	诊断、放射治疗方案确定、治疗效果评定等	诊室、医生办公室、机房
物理师	6	制定治疗计划、计划验证、QA 等	治疗计划室、物理师办公室、机房及控制室
技师	12	患者摆位、控制室操作等	机房及控制室、技师办公室
护士	6	注射、护理等	注射室、护士站等
工程师	3	水电、暖通、网络等的日常运维	水冷机房、设备间、工程师办公室等

3.2.3 Ⅲ类射线装置

本项目涉及的Ⅲ类射线装置均是利用 X 射线的穿透等性质取得人体内器官

与组织的影像信息以诊断疾病的设备，包括：影像中心的 6 台Ⅲ类射线装置，包括 2 台模拟 CT、1 台大孔径 CT、2 台 DR 和 1 台乳腺钼靶；质子中心的 10 台质子治疗系统配套定位 X 射线管和 1 台 PET/CT；核医学的 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT。

质子中心使用的治疗验证用 PET/CT 的原理与核医学科 PET/CT 相同，区别在于核医学科PET/CT需要患者注射放射性药物方可显像，而质子中心的PET/CT不需要患者注射放射性药物，仅依靠接受质子治疗后自身产生的感生放射性核素显像；质子治疗系统使用的定位 X 射线管在上文“3.2.1.1.2.4 节”、“3.2.1.2.2.4 节”已描述，本节不再重复描述。核医学科使用的 PET/CT 和 SPECT/CT 将在下文“3.2.3 节”描述。本小节主要介绍影像中心模拟 CT 的相关内容。

3.2.3.1 模拟 CT

3.2.3.1.1 装置组成原理及主要参数

模拟 CT 机主要由 X 射线发生装置、金属影像增强器、数据图像处理器、床体系统等组成。X 射线发生装置由 X 射线球管和高压电源组成。X 射线管由安装在真空玻璃壳中的阴极和阳极组成。阴极是钨制灯丝，装在聚焦杯中。当灯通电加热时，电子即“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚焦成束，直接向嵌在金属阳极中的靶体射击。高电压加在 X 射线管的两极之间，使电子在射到靶体之前被加速达到很高的速度。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成，高速电子轰击靶体产生 X 射线。

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

本项目使用的模拟 CT 主要参数见表 3-13。

表 3-13 本项目影像中心模拟 CT 主要参数

序号	射线装置名称	数量	主要技术参数（最大管电压/管电流）
1	模拟 CT	2 台	140kV，900mA

3.2.3.1.2 工作流程及产污环节分析

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

产污环节分析：本项目III类射线装置的产污环节为设备出束时，会产生 X 射线，对周围环境产生辐射影响。

本项目模拟 CT 主要用于质子中心和放疗中心对患者进行放射治疗前的模拟定位，其工作流程及产污环节分析包含在了 3.2.1.3 及 3.2.2.2 小节的内容中。

3.2.3.1.1 工作负荷及人员配置

本项目由质子中心工作人员操作 10 台质子治疗系统配套定位 X 射线管和质子中心的 1 台 PET/CT；由质子中心、放疗中心的工作人员操作 2 台模拟 CT；由核医学工作人员操作核医学的 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT。上述工作人员的工作负荷及人员配置在 3.2.1.4 小节、3.2.2.3 小节和 3.2.4.3 小节介绍。

其余影像中心的 4 台III类射线装置，包括 1 台大孔径 CT、2 台 DR 和 1 台乳腺钼靶由影像中心工作人员操作，具体配置见下表。

表 3-14 影像中心工作人员配备计划

岗位类别	人数	工作内容	工作地点
医生	4	诊断、出具影像报告等	问诊室、医生办公室
技师	7	患者摆位、控制台操作等	机房、控制台、技师办公室
护士	2	患者登记、注射造影剂等	护士站、注射室

3.2.4 核医学

3.2.4.1 设备组成原理及主要参数

本项目拟配置 1 台 PET/CT、1 台 SPECT/CT，用于放射性药物给药后患者的显像诊断，主要参数见表 3-15。

表 3-15 本项目核医学科射线装置主要参数表

序号	射线装置名称	主要技术参数（最大管电压/管电流）	数量
1	PET/CT	140kV，666mA	1 台
2	SPECT/CT	140kV，440mA	1 台

各设备组成具体如下：

① PET/CT

PET 是正电子发射断层扫描（Positron Emission Tomography）的英文缩写，其工作原理为：将发射正电子的核素引入体内，正电子经湮灭辐射转换成的成对光子照射至体外，由 PET 的探测器采集，经过计算机重建而成断层图像，显示正电子核素在体内的分布情况，常用核素为 ^{18}F。PET 通常由探测器、电子学系统、扫描机架、计算机数据处理系统、显示记录装置和同步检查床等组成。

PET/CT 将 PET 和 CT 两种影像技术相融合，一次成像同时完成 CT 扫描及 PET 扫描，通过识别图像的位置标志进行对位、融合，获得相应部位的融合图像，实现对病灶的准确定位和诊断。PET/CT 也可单独进行 PET 或 CT 显像。

PET/CT 示例图见图 3-29。



图 3-29 PET/CT 示例图

② SPECT/CT（ECT）

SPECT 是单光子发射型计算机断层扫描（Single Photon Emission Computed Tomography)的英文缩写，其工作原理为：利用放射性核素从断层处发出的γ光子，通过探测装置进行探测和记录，并通过计算机处理系统，获取病灶部位的形态、位置等图像数据，用于病体的显像和诊断，常用核素为^{99m}Tc。SPECT 通常由探测器、旋转运动机架、计算机及其辅助设备组成。

ECT（Emission Computed Tomography）是发射型计算机断层成像的英文字头缩写。通常 ECT 指的是 SPECT。

SPECT/CT 将 SPECT 和 CT 两种影像技术相融合，一次成像同时完成 CT 扫描及 SPECT 扫描，经图像处理系统完成图像融合，实现病灶的病理检查，提高诊断的准确性。SPECT/CT 示例图见图 3-30。



图 3-30 SPECT/CT 示例图

3.2.4.2 工作流程及产污环节分析

（1）核素显像诊断流程

放射性同位素显像医学检查的工作流程：含示踪核素的放射性药物经由静脉注射方式进入受检者体内，药物分布到特定器官并释放γ射线，利用 PET/CT 和 SPECT/CT 等探测成像仪器进行扫描和显像。检查工作流程如图 3-31 所示。

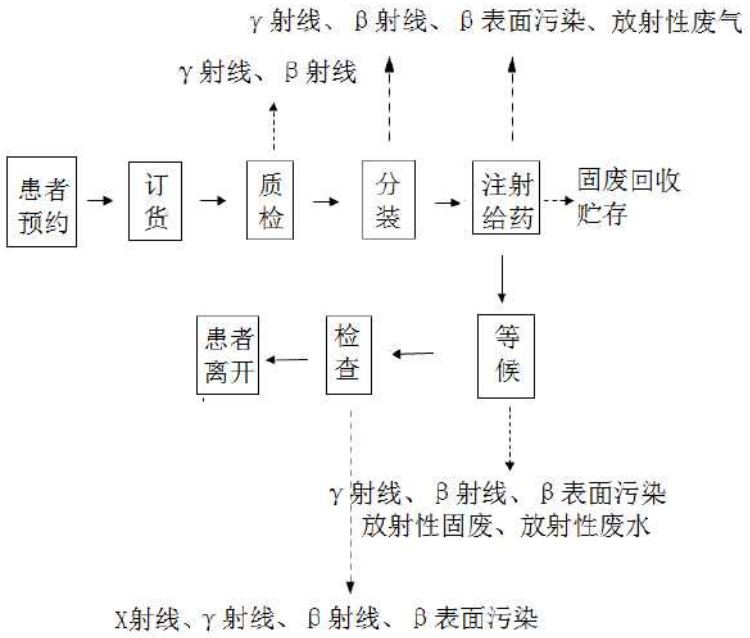


图 3-31 核素显像诊断工作流程及产污环节图

①订货：医院根据预约的检查人数及检查项目，提前向放射性药物公司订购 ^{18}F、^{99m}Tc 等诊断用标记放射性药物。订购的 ^{18}F 药物一般为成罐药剂，装在无菌瓶内，包装容器为铅罐；^{99m}Tc 药物为成品针剂，注射器外有针剂铅套。未使用完的药物作为废液流入衰变池，铅罐和铅套由药物厂家带回。

②质检：药物公司负责把药物送至核医学科。核医学科专职人员核对放射性药物名称、规格和数量，检查包装和外观质量，办理交接手续，暂存于储源间。

③分装：核医学工作人员在手套箱内进行放射性药物的分装及活度测量。首先将正电子药液抽取到带防护套的一次性注射器里，达到一定体积后，用活度计测量所抽吸的药液活度是否满足要求，若不满足，再次抽吸调整药量直到符合活度要求，每次分装保守用时约 1min，单日最大分装次数由日最大门诊量决定。本项目 ^{18}F 药物为成罐药剂，需分装；^{99m}Tc 药物为成品针剂，不需分装。

④注射：注射场所设有注射窗，在注射窗防护下给受检患者注射放射性药物，然后将废注射器装入铅屏蔽盒，送固废间暂存。

⑤检查：患者在给药后患者候诊室等候，待药物在身体内有一定程度的代

谢后，进行 PET/CT、PET/MR 或 SPECT/CT 扫描检查。

⑥离开：受检者在扫描检查后，经观察无不良反应即可离开，如有不适则在留观室观察。

（2）产污环节分析

a、质检环节主要是医院质检人员对药物外包装及送药清单进行核实和交接，因此主要污染是药物中的放射性核素自发衰变产生的 γ 射线和 β 射线。

b、分装和注射过程中，护士涉及药物的直接操作，主要污染除 γ 射线和 β 射线外，还存在 β 表面污染，以及挥发至空气中含 ^{18}F 等极少量放射性核素的废气。

c、等候环节的主要污染包括：患者体内放射性药物产生的 γ 和 β 射线，患者候诊期间被粘污的纸杯等固体废物和 β 表面污染，以及患者的排泄物等放射性废液。

d、检查环节的主要污染，除患者体内放射性药物发射的 γ、β 射线外，还有 SPECT/CT 和 PET/CT 设备产生的 X 射线，以及 β 表面污染。

3.2.4.3 工作负荷及人员配备

核医学工作负荷及工作人员配备计划分别见表 3-16、表 3-17。

表 3-16 核医学核素显像诊断每台设备预期工作负荷

设备名称	核素	最大给药量（MBq/人）	日最大接诊量	年最大接诊量
PET/MR	^{18}F	370（10mCi/人）	10 人次	2500 人次
PET/CT	^{18}F	370（10mCi/人）	30 人次	7500 人次
SPECT/CT	^{99m}Tc	925（25mCi/人）	30 人次	7500 人次
注：年工作负荷按每周工作 5 天，每年工作 50 周考虑。				

表 3-17 核医学科工作人员配备计划

岗位类别	人数	工作内容	工作地点
医生	4	诊断、出具影像报告、抢救等	问诊室、医生办公室、抢救室
技师	3	患者摆位、控制台操作等	扫描机房、控制廊、技师办公室
护士	2	注射放射性药物等	注射室、护士站

3.3 辐射源项分析

3.3.1 质子治疗系统

质子治疗系统运行过程中产生的辐射场，主要为装置运行期间产生的“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屏蔽体等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但会随着装置的停机而完全消失；残余辐射主要来自结构部件、设备冷却水、治疗室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。

质子治疗系统在开机运行状态下，除患者外无人员在治疗室等控制区内部停留，工作人员在控制室内进行控制操作。设备对环境的辐射影响途径主要是次级中子外照射影响，以及排入环境的气载感生放射性核素的辐射影响。

质子治疗系统在停机状态下，物理师、技师等人进入治疗室内进行计划验证、摆位等工作以及工程师进入机房内进行维修维护工作期间，可能受到感生放射性的影响。

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，都可能发生束流的损失。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。

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

在产生的次级粒子中，带电粒子因电离作用迅速停止，因此打靶产生的辐射场组成主要为次级中子和γ。其次级中子能量由低到高可分为热中子、蒸发中子和级联中子三部分。在屏蔽墙体的作用下，初始的热中子、蒸发中子和 γ 的数量迅速减少，不能穿透深屏蔽，级联中子成为穿透屏蔽墙的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽体的过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数量，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过（n，γ）反应等转变成了 γ 光子，使得达到一定屏蔽深度后，中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变，形成“平衡谱”，最终在屏蔽墙体内、外的瞬发辐射场都为中子、γ的混合辐射场。

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

3.3.1.1.2 各环节束流损失分析

根据建设单位提供的资料，本项目 2 套质子治疗系统各束流损失点的束流损失情况如下。

（1）进口质子治疗系统

①对于回旋加速器室，最恶劣的情况是降能器降能到 70MeV 的情况，计算时各个束损点位的最大损失情况按表 3-18 考虑。

表 3-18 进口质子治疗系统束损参数表 1

束流损失点	质子能量/MeV	流强/nA	靶材料	损失率/%	损失流强/nA	损失方式
回旋加速器 D 型盒	230	49.0	Cu	20	9.8	集中损失
回旋加速器引出口	230	39.2	Cu/Fe/Al	50	19.6	集中损失
降能器	230	19.6	C+Be+Al	29.8	5.8	集中损失
准直器	70	13.8	Ta	87.85	12.0	集中损失
散度准直器+能量狭缝	70	1.67	Ni	83.8	1.4	集中损失
治疗头	70	0.27	Cu+Zn	0	0	——
患者	70	0.27	人体组织	100.0	0.27	集中损失

②对于治疗室，最恶劣的情况是能量为 230MeV 的情况，计算时各个束损点位的最大损失情况按表 3-19 考虑。

表 3-19 进口质子治疗系统束损参数表 2

束流损失点	质子能量/MeV	流强/nA	靶材料	损失率/%	损失流强/nA	损失方式
回旋加速器 D 型盒	230	11.75	Cu	20	2.35	集中损失
回旋加速器引出口	230	9.40	Cu/Fe/Al	50	4.70	集中损失
降能器	230	4.70	C+Be+Al	0	0	集中损失
准直器	230	4.70	Ta	24.3	1.14	集中损失
散度准直器+能量狭缝	230	3.56	Ni	86.8	3.09	集中损失
治疗头	230	0.47	Cu+Zn	0	0	——
患者	230	0.47	人体组织	100.0	0.47	集中损失

本次评价在辐射屏蔽复核计算时，将综合考虑以上①、②两种情况。

（2）国产质子治疗系统

根据建设单位提供的资料，国产质子治疗系统束流损失情况按表 3-20 考虑。

表 3-20 国产质子治疗设备的束流损失表

损失部位		质子能量/MeV	引出流强/nA	损失流强/nA	损失方式
回旋加速器	第一偏转板	230	240	28	集中损失
	第二偏转板			9.34	集中损失
	引出口			22.66	集中损失
降能器及束流线	降能器	70	240	72.00	集中损失
	准直器			162.96	集中损失
	狭缝			2.02	集中损失
	靶			3.02	集中损失
	降能器	150	92	22.08	集中损失
	准直器			62.93	集中损失
	狭缝			1.96	集中损失
	靶			5.03	集中损失
	降能器	230	15	1.20	集中损失
	准直器			6.90	集中损失
	狭缝			2.07	集中损失
	靶			4.83	集中损失
质子治疗室	降能器	70	240	72.00	集中损失
	准直器			164.64	集中损失
	狭缝			1.41	集中损失
	靶			1.95	集中损失
	降能器	150	85	20.40	集中损失
	准直器			59.43	集中损失
	狭缝			1.96	集中损失
	靶			3.20	集中损失

	降能器	230	11	0.88	集中损失
	准直器			5.26	集中损失
	狭缝			1.85	集中损失
	靶			0.47	集中损失
质子科学实验室	材料科学终端	230	/	10	集中损失
		70	/	32	集中损失
	医疗终端	230	/	10	集中损失
		70	/	32	集中损失
	生命科学终端	230	/	10	集中损失
		70	/	32	集中损失

3.3.1.1.3 辐射场源项估算

3.3.1.1.3.1 FLUKA 程序简介

本次评价利用 FLUKA 程序模拟了质子分别与铁靶和水靶作用的中子和光子能谱分布。FLUKA 程序是 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、辐射活化、辐射剂量学、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理、高能物理模拟、放射治疗等领域。可模拟包括中子、电子、质子在内的 60 余种不同的粒子及重离子，其中子能量范围从 10^{-5}eV 到 20TeV，光子能量范围从 100eV 到 10000TeV，电子从 1keV 到 1000TeV，带电粒子及其反粒子为 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，采用卡片式输入与用户程序相结合的输入结构，使用较为方便。

3.3.1.1.3.2 中子能谱模拟结果

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

图 3-32 和图 3-33 所示。由结果可以看出高能质子核反应产生的瞬发中子有几个主要特点：

（1）从角分布看，前向的中子产额较高。随着出射角增加，谱峰向低能端移动；

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

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

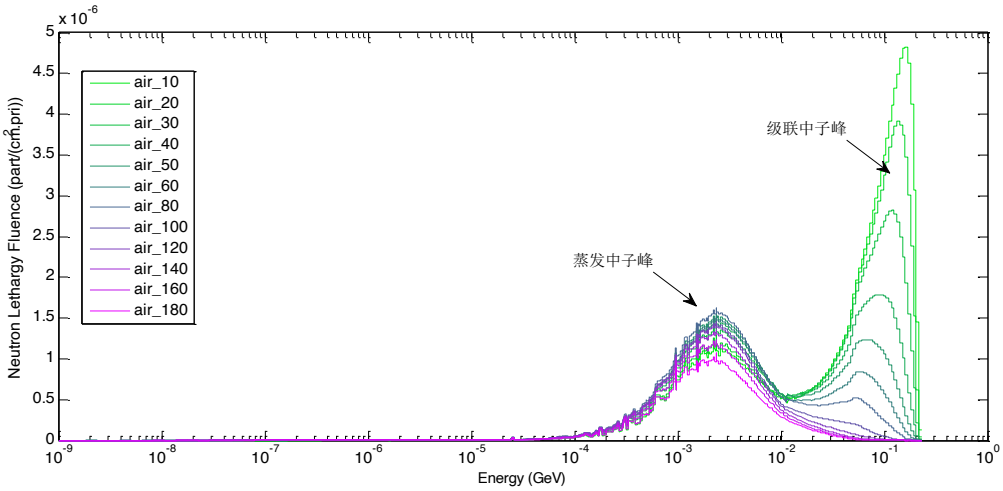


图 3-32 230MeV 质子打铁靶产生的中子能谱角分布

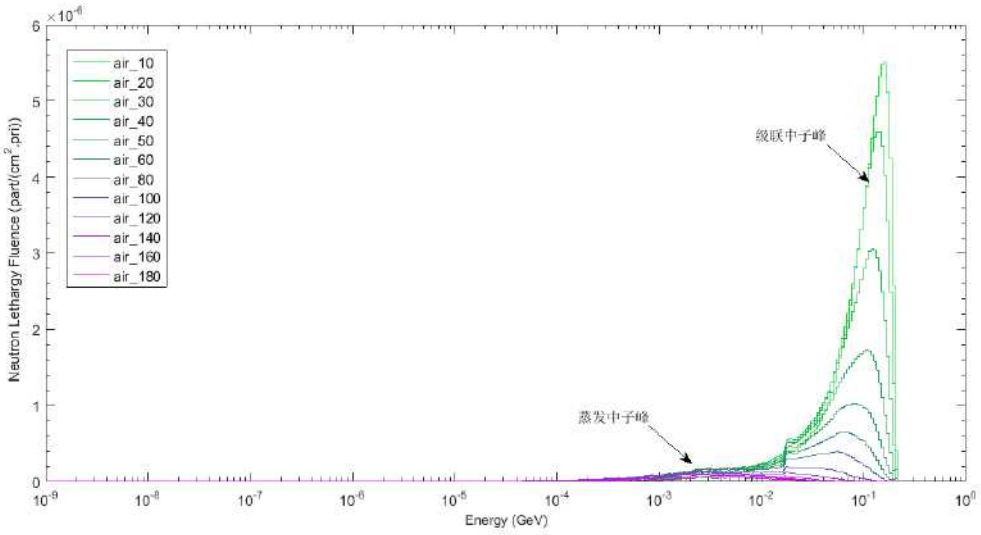


图 3-33 230MeV 质子打水靶产生的中子能谱角分布

3.3.1.1.3.3光子能谱模拟结果

FLUKA 程序模拟的 230MeV 质子打铁靶和水靶产生的光子能谱如图 3-34 和图 3-35 所示。从角分布来看，光子几乎是各向同性的。无论是打铁靶或水靶，谱峰均出现在 1MeV~10MeV 之间。

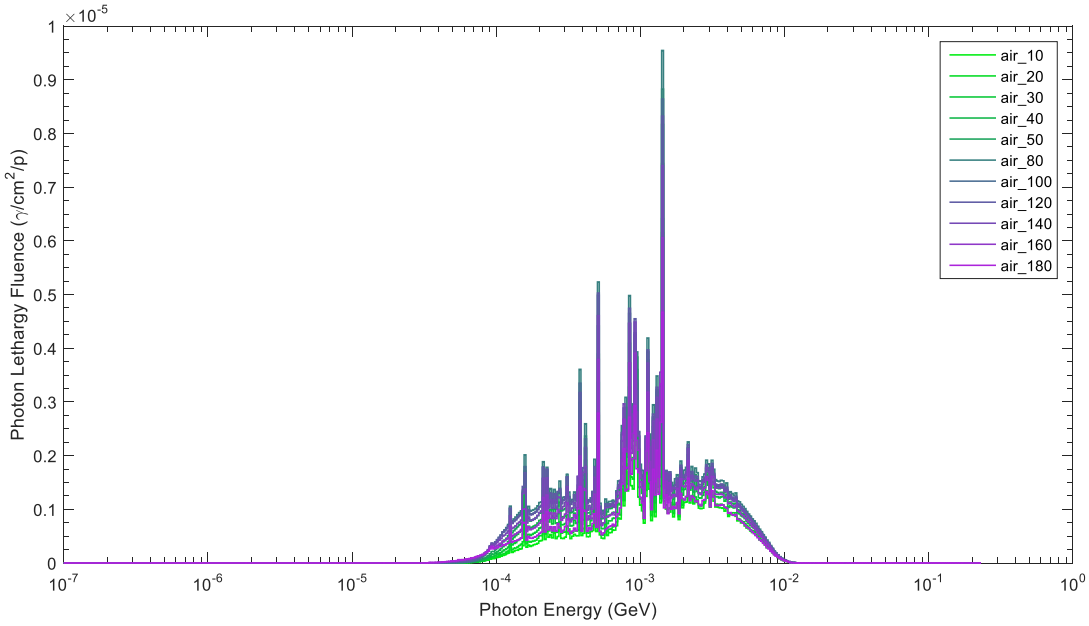


图 3-34　230MeV 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

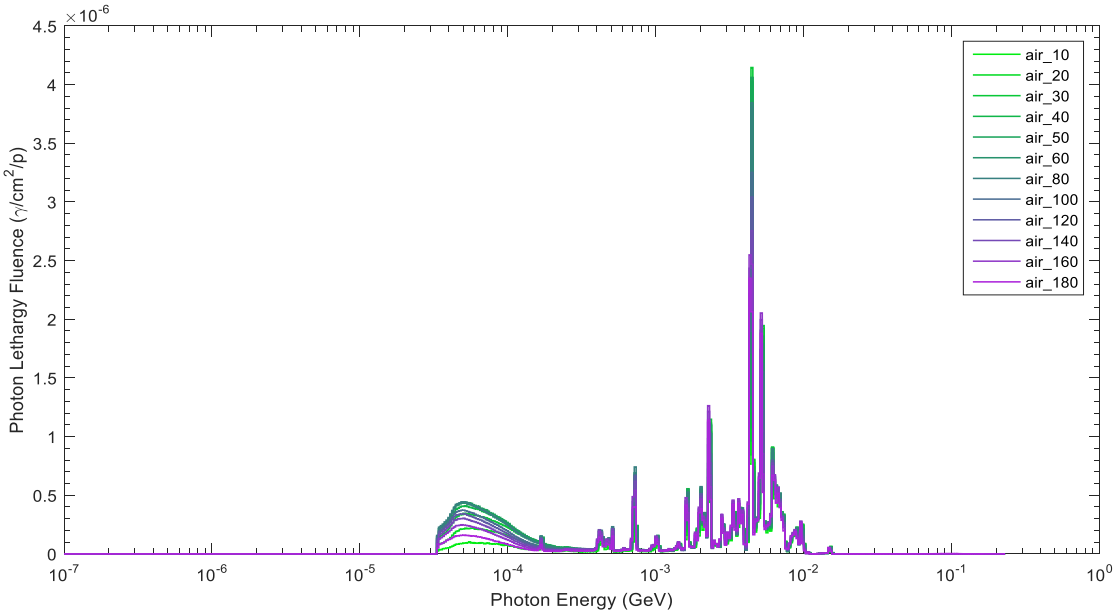


图 3-35 230MeV 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

3.3.1.2 天空反散射

天空反散射来自于大气对辐射的反散射，当加速器所在机房屋顶未加屏蔽或屏蔽体很薄时，穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射由于空气的散射作用，将有部分又回到地面。根据文献《天空反照》(郑华智.核物理动态,1985(02):39-40+43.)，对质子加速器、重离子加速器、甚至是一些能量较高的电子加速器，天空反散射剂量的主要成分都是中子，其能谱分布在热中子和加速器粒子能量之间。且对质子加速器而言，其γ剂量率比中子剂量率低约 1 个量级。因此，本次评价主要考虑中子天空反散射。

透过屏蔽墙的快中子以及少量残存的高能中子在空气中不能被有效地阻止，在空气中发生一次次散射，低能中子被散射回地面。这些中子就是天空散射辐射的来源。天空散射随加速器开机产生，加速器停机便立刻消失。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。本项目质子治疗系统各区域顶板屏蔽体外剂量率模拟计算结果列于表 3-21。由表 3-21 可知，国产质子治疗系统加速器大厅和质子科学实验室顶板上方屋面剂量率大于 2.5μSv/h，需要考虑中子反散射影响。

表 3-21 质子治疗装置各区域顶板外表面 30cm 剂量率

区域	关注点	周围环境	剂量率计算结果，μSv/h
进口质子治疗系统	U1	加速器大厅顶板上方（屋面）	0.2
	U2	加速器大厅迷道顶板上方（水冷机房）	0.005
	U3	能量选择系统顶板上方（钢瓶间）	0.5
	U7	束流输运区顶板上方（设备零件储藏间）	0.1
	U6	质子治疗室 2 顶板上方（屋面）	1.8
	U8	质子治疗室 2 迷道顶板上方（电源间）	0.5
国产质子治疗系统	A39	加速器大厅顶板上方（屋面）	5
	A40	质子治疗室 4 顶板上方（屋面）	2
	A41	质子治疗室 5 顶板上方（屋面）	1.3
	A42	质子科学实验室顶板上方（屋面）	8.7

本次评价利用 NCRP NO.144 报告第 331 页 Stapleton 公式对国产质子治疗系统顶板上方区域的中子天空反散射进行计算，具体见公式 3-1~公式 3-3。各计算参数的取值列于表 3-22，计算结果列于表 3-23。

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

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

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

式中，κ'为常数，取值 $2\times10^{-15}Sv\cdot m^2$；

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，$Sv\cdot m^2$；

H(d,t)为顶板屏蔽体外表面的剂量率，Sv/h；

Ω 为源从顶屏蔽辐射出的立体角。

表 3-22 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	6.75m	CAD 图纸测量
g，$Sv\cdot m^2$	取值为 1.23E-14	文献《ACCELERATOR SKYSHINE:TYGER,TYGER,BURNING BRIGHT》(Particle Accelerator,1994,vol.44(1),pp1-15,GEOFFREY B.STAPLETON)表 4，保守取质子能量 226MeV，利用内插法计算得出
Ω，sr	6.28	θ 保守取值 90°
H(d,t)，Sv/h	表 3-21	FLUKA 程序计算

表 3-23 不同距离 r 处天空反散射造成的剂量率

距离 r，m	H(r)，μSv/h	
	国产加速器大厅	质子科学实验室
5	1.19E-01	1.72E-01
10	9.51E-02	1.38E-01
20	6.46E-02	9.37E-02
50	2.69E-02	3.90E-02

100	9.93E-03	1.44E-02
200	2.71E-03	3.93E-03

经计算，质子治疗系统周围地面处由于天空反散射造成的剂量率最大值为1.72E-01μSv/h，该处由于天空反散射造成的公众年受照剂量为7E-03mSv（户外区域居留因子 T=1/40，年受照时间 t 取国产质子治疗系统年出束时间 1620h）。

3.3.1.3 感生放射性

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

质子治疗系统产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响对象是对停机后，需要进入治疗室内工作的物理师、技师以及工程师等工作人员。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 200μSv/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 N、O、H 等通过热中子俘获、（γ，n）反应和高能中子散裂反应等产生 ^{3}H、^{7}Be、^{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）P226，对于长半衰期核素 ^{3}H 和 ^{7}Be，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主

要考虑 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素，具体见表 3-24。

表 3-24 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	20.5min	C	1.2×10^{-4}	（γ，n）反应	10
		N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.7
^{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
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.8
^{15}O	2.04min	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	（γ，n）反应	10
^{41}Ar	1.83h	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	660

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告和 IAEA 283 号技术报告。

3.3.1.3.1.1 空气感生放射性静态饱和活度浓度

本次评价利用 FLUKA 计算了无通风的情况下，质子治疗各区域空气感生放射性静态饱和活度，计算时考虑了所有束流损失点，并以各束流损失点处最高能量（230MeV）和最高损失流强为依据进行保守估算，加速器连续运行时间取 2400h，计算结果列于表 3-25。

表 3-25 质子治疗系统各区域内空气感生放射性静态饱和活度浓度，Bq/m^3

进口质子治疗系统				
核素	加速器大厅及束流线	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3
^{11}C	5.31E+03	4.08E+01	4.08E+01	4.08E+01
^{13}N	5.02E+03	8.33E+01	8.33E+01	8.33E+01
^{15}O	3.43E+03	2.02E+02	2.02E+02	2.02E+02
^{41}Ar	2.46E+03	4.75E+00	4.75E+00	4.75E+00
总计	1.62E+04	3.31E+02	3.31E+02	3.31E+02
国产质子治疗系统				
核素	加速器大厅及束流线	治疗室 4	治疗室 5	质子科学实验室
^{11}C	1.56E+04	3.81E+01	3.81E+01	2.68E+00
^{13}N	1.39E+04	7.77E+01	7.77E+01	5.47E+00
^{15}O	8.42E+03	1.88E+02	1.88E+02	1.33E+01
^{41}Ar	1.24E+04	4.44E+00	4.44E+00	3.12E-01
总计	5.03E+04	3.09E+02	3.09E+02	2.17E+01

3.3.1.3.1.2考虑通风的空气感生放射性动态饱和活度浓度

质子治疗系统运行期间，控制区内保持通风系统开启状态。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻各场所内空气感生放射性动态饱和浓度可由公式 3-4 计算。计算结果列于表 3-27。

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

式中，

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

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

λ 为放射性核素的衰变常数，s^{-1}；$\lambda=\ln2/T_{1/2}$；

r_1 为正常运行时房间内的换气次数，s^{-1}。

表 3-26 各区域通风设计情况

区域名称		通风方式	气流走向	体积，m^3	送风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/h
进口加速器大厅和束流传输区		空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	1050	6700	7200	正常：6 应急：12
国产加速器大厅和束流传输区		新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	1610	9300	9700	6
治疗室1~3	治疗区	空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	175	1700	1400	8
	机架区	空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	1340	1500	2100	1
治疗室4	治疗区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	187.5	2200	1900	10
	机架区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	2175	2500	3100	1
治疗室5	治疗区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	187.5	1700	1400	8

	机架区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	1435	1500	2100	1
质子科学实验室		新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	2665	3000	3400	1.3

表 3-27 考虑通风的空气感生放射性动态饱和浓度计算结果，Bq/m^3

进口质子治疗系统				
核素	加速器大厅及束流线	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3
^{11}C	1.21E+03	8.28E+00	8.28E+00	8.28E+00
^{13}N	1.89E+03	2.86E+01	2.86E+01	2.86E+01
^{15}O	2.55E+03	1.44E+02	1.44E+02	1.44E+02
^{41}Ar	1.30E+02	2.18E-01	2.18E-01	2.18E-01
总计	5.78E+03	1.81E+02	1.81E+02	1.81E+02
国产质子治疗系统				
核素	加速器大厅及束流线	治疗室 4	治疗室 5	质子科学实验室
^{11}C	3.95E+03	6.44E+00	7.58E+00	1.63E+00
^{13}N	5.69E+03	2.29E+01	2.62E+01	4.17E+00
^{15}O	6.46E+03	1.25E+02	1.33E+02	1.24E+01
^{41}Ar	7.49E+02	1.65E-01	1.99E-01	7.13E-02
总计	1.69E+04	1.55E+02	1.67E+02	1.83E+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公式 3-5 和 3-6 计算。

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

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

式中，

Q_t 和 Q_{tc} 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_{tc} 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，cm^3/s；

计算结果列于表 3-28。按每年通风排放时间为 8760h 计，本项目 2 套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总量为 3.45E+11Bq。

表 3-28 本项目 2 套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	进口质子治疗系统		国产质子治疗系统	
	年排放量，Bq	年平均排放速率，Bq/s	年排放量，Bq	年平均排放速率，Bq/s
^{11}C	1.42E+10	4.50E+02	6.44E+10	2.04E+03
^{13}N	2.23E+10	7.07E+02	9.29E+10	2.95E+03
^{15}O	3.07E+10	9.74E+02	1.06E+11	3.37E+03
^{41}Ar	1.52E+09	4.82E+01	1.22E+10	3.87E+02
总计	6.87E+10	2.18E+03	2.76E+11	8.74E+03

3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

质子治疗系统中，用于冷却偏转磁铁等结构部件的冷却水，在由束流损失产生的中子辐射场照射下会被活化。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯），高能中子与冷却水中的氧发生散裂反应，产生 ^{3}H、^{7}Be、^{11}C 、^{13}N、^{15}O 等放射性核素，各放射性核素的参数见表 3-29。其中，^{11}C 、^{13}N、^{15}O 的半衰期很短，加速器停机后，这些核素将迅速衰变，浓度很快降低。因此，冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的 ^{3}H 和 ^{7}Be。

表 3-29 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 σ_i，mbarns
^{3}H	12.3a	1.78E-09	$^{16}O(N,X)^{3}H$	33
^{7}Be	53.1d	1.51E-07	$^{16}O(N,X)\,^{7}Be$	9.3
^{11}C	20.4min	5.67E-04	$^{16}O(N,X)\,^{11}C$	10
^{13}N	9.97min	1.16E-03	$^{16}O(N,X)\,^{13}N$	5
^{15}O	2.04min	5.67E-03	$^{16}O(N,X)\,^{15}O$	28

注：反应截面数据取自 IAEA 技术报告系列 NO.283 号报告。

3.3.1.3.2.1 计算条件

根据建设单位提供的资料，进口质子治疗系统共有三套相互独立的冷却水系统：1 号系统为回旋加速器主盘管冷却环路（1.45m^3），2 号系统为真空泵冷却环路（0.73m^3），3 号系统为能量选择器和束流输运线冷却环路（3.5m^3），其中 2 号系统不涉及冷却水的活化，主要考虑 1 号和 3 号冷却水系统的活化。国产质子治疗系统使用的是超导回旋加速器，超导回旋加速器采用液氦冷却，不涉及

冷却水，只需考虑能量选择器和束流输运线冷却水系统的活化，该回路的设计可参照进口质子治疗系统 3 号冷却水系统。

本次评价采用 FLUKA 程序对两套质子治疗系统的冷却水活化进行了计算，结果见表 3-30，计算时使用的参数如下：

（1）质子束损能量为 230MeV，流强为 29.4nA，连续运行时间为 2400h；

（2）简化模型：假设一根平行于束流管、轴线距束流管轴线 22cm，里面装半径 1cm 的冷却水，见图 3-36~图 3-38。

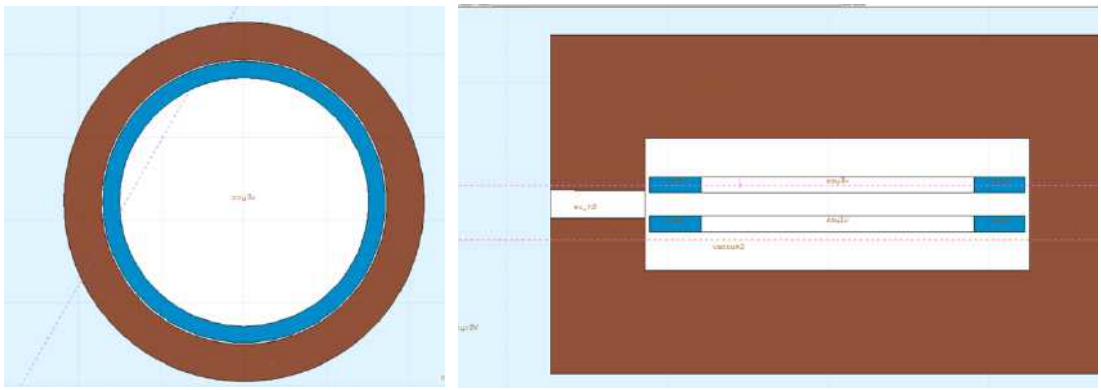


图 3-36 冷却水感生放射性计算模型（左：1 号回路俯视图，右：1 号回路侧视图）

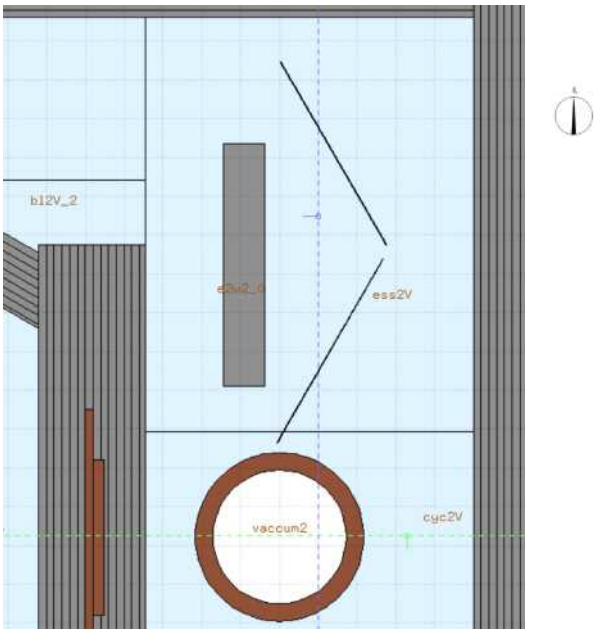


图 3-37 冷却水感生放射性计算模型（3 号回路俯视图）

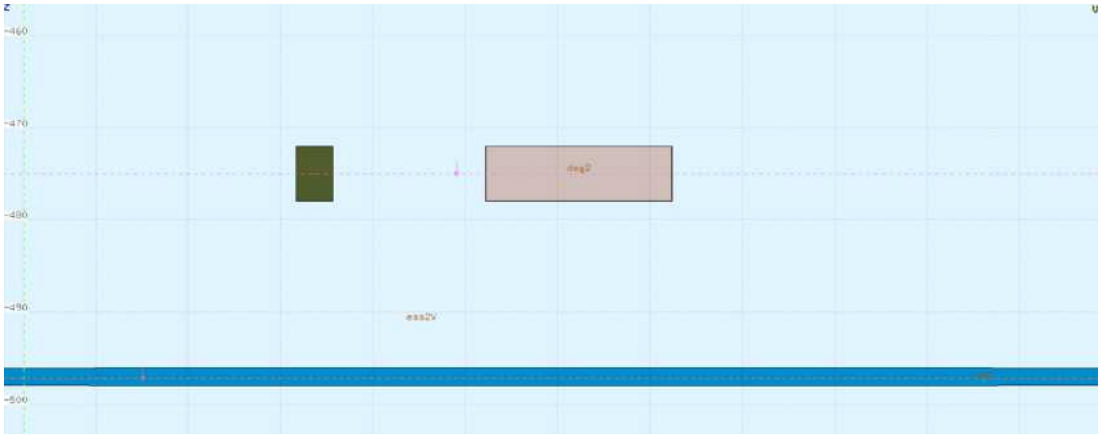


图 3-38 冷却水感生放射性计算模型（3 号回路在降能器附近侧视图）

3.3.1.3.2.2 计算结果

冷却水活化相关计算结果见表 3-30、表 3-31，进口、国产质子治疗系统活化冷却水感生放射性饱和活度浓度计算结果分别为 6.30E+04 Bq/L、3.97E+03 Bq/L。

进口质子治疗系统活化冷却水中 ^{3}H、^{7}Be 在停机时刻的饱和活度分别为（6.72E+05）+（4.66E+03）=6.77E+05Bq、（7.51E+06）+（6.62E+04）=7.58E+06Bq；国产质子治疗系统活化冷却水中 ^{3}H、^{7}Be 的饱和活度分别为 5.71E+04Bq、8.11E+05Bq。两套质子治疗系统 ^{3}H、^{7}Be 的总饱和活度分别为（6.77E+05）+（5.71E+04）=7.34E+05 Bq 和（7.58E+06）+（8.11E+05）=8.39E+06Bq，均低于 GB 18871-2002 中相关核素的豁免水平。

表 3-30 质子治疗系统冷却水感生放射性核素饱和活度计算结果，Bq

核素	半衰期	进口质子治疗系统				国产质子治疗系统	
		1 号冷却水系统		3 号冷却水系统		降能器+束流线冷却水系统	
		停机时刻	停机 16h	停机时刻	停机 16h	停机时刻	停机 16h
^{3}H	12.3 a	6.72E+05	6.72E+05	4.66E+03	4.66E+03	5.71E+04	5.71E+04
^{7}Be	53.12 d	7.51E+06	7.44E+06	6.62E+04	6.56E+04	8.11E+05	8.03E+05
^{11}C	20.4 min	2.67E+07	/	2.65E+05	/	3.24E+06	/
^{13}N	9.97 min	3.20E+06	/	5.86E+04	/	7.18E+05	/
^{15}O	2.04 min	5.28E+07	/	7.45E+05	/	9.12E+06	/
总计		9.09E+07	8.11E+06	1.14E+06	7.03E+04	1.39E+07	8.60E+05

表 3-31 质子治疗系统冷却水感生放射性核素饱和活度浓度计算结果，Bq/L

核素	半衰期	进口质子治疗系统				国产质子治疗系统	
		1 号冷却水系统		3 号冷却水系统		降能器+束流线冷却水系统	
		停机时刻	停机 16h	停机时刻	停机 16h	停机时刻	停机 16h
^{3}H	12.3 a	4.63E+02	4.63E+02	1.33E+00	1.33E+00	1.63E+01	1.63E+01
^{7}Be	53.12 d	5.18E+03	5.13E+03	1.89E+01	1.87E+01	2.32E+02	2.29E+02
^{11}C	20.4 min	1.84E+04	/	7.57E+01	/	9.26E+02	/
^{13}N	9.97 min	2.21E+03	/	1.67E+01	/	2.05E+02	/
^{15}O	2.04 min	3.64E+04	/	2.13E+02	/	2.61E+03	/
总计		6.27E+04	5.59E+03	3.26E+02	2.01E+01	3.97E+03	2.46E+02

3.3.1.3.3 结构部件的感生放射性

结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。质子回旋加速器产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如加速器偏转磁铁、引出口、降能器、准直器等，其主要材料有铁、铜、不锈钢、碳、钽、镍等。相关实验研究表明，加速器停机后活化部件中的放射性核素主要是 ^{54}Mn、^{51}Cr、^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

3.3.1.3.3.1 计算条件

根据质子治疗系统主要的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序计算了相应结构部件的感生放射性，建立的模型见图 3-39~图 3-42，计算时所用参数如下：

（1） 质子最高能量为 230MeV，损失束流详见表 3-18~表 3-20；

（2） 连续运行时长 20 年；

（3） 各结构部件靶的材质：①进口质子治疗系统：偏转磁铁（Fe）、引出口（Cu）、降能器（Be）、准直器（Ta）；②国产质子治疗系统：偏转磁铁（Fe）、引出口（Cu）、降能器（C）、准直器（Cu）。

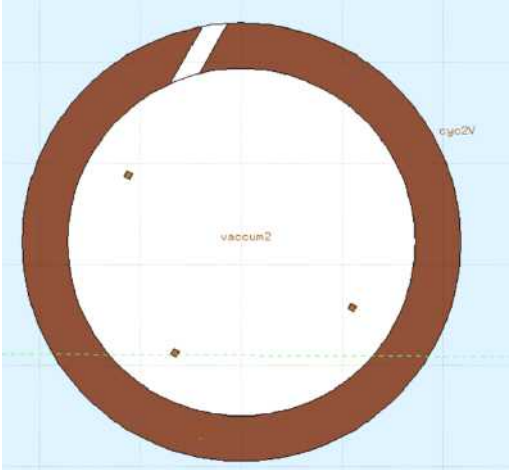


图 3-39 进口加速器模型示意图

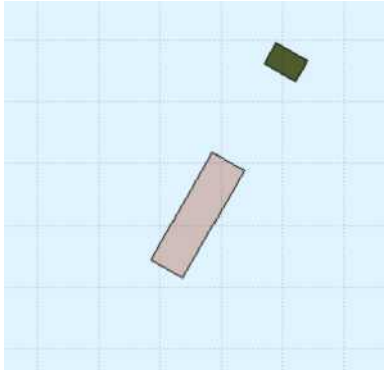


图 3-40 进口降能器及准直器模型示意图

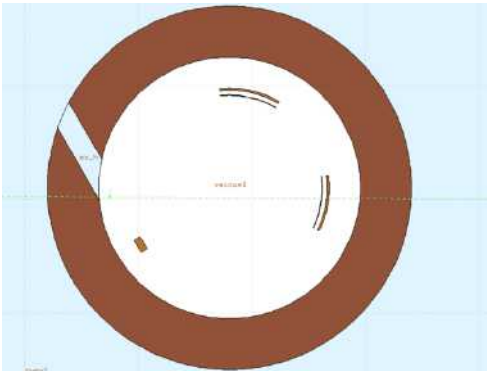


图 3-41 国产加速器模型示意图

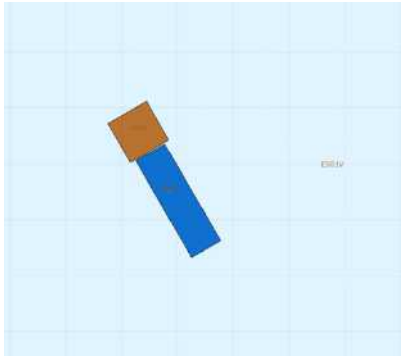


图 3-42 国产降能器及准直器模型示意图

3.3.1.3.3.2 计算结果

进口、国产质子治疗系统结构部件感生放射性计算结果见表 3-32、表 3-33。

表 3-32 进口质子治疗系统结构部件感生放射性模拟计算结果

加速器磁铁		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	8.78E+07	8.78E+07
^{7}Be	1.18E+06	1.17E+06
^{24}Na	6.66E+04	3.18E+04
^{32}P	3.91E+05	3.79E+05
^{33}P	2.42E+05	2.38E+05
^{35}S	3.73E+05	3.71E+05
^{37}Ar	1.15E+06	1.14E+06
^{41}Ar	1.42E+05	3.29E+02
^{42}K	2.35E+06	9.58E+05
^{43}K	1.02E+06	6.19E+05
^{45}Ca	4.39E+06	4.38E+06
^{47}Ca	6.67E+04	6.02E+04
^{46}Sc	3.55E+07	3.53E+07
^{44}Sc	2.53E+07	4.49E+06
^{47}Sc	1.77E+07	1.54E+07
^{48}Sc	5.64E+06	4.38E+06
^{44}Ti	2.13E+05	2.13E+05
^{49}V	4.92E+08	4.92E+08
^{48}V	2.07E+08	2.01E+08
^{51}Cr	1.25E+09	1.23E+09
^{49}Cr	9.39E+07	1.38E+01
^{48}Cr	5.35E+06	3.20E+06
^{54}Mn	4.19E+09	4.18E+09
^{56}Mn	1.52E+09	2.07E+07
^{52}Mn	2.61E+08	2.40E+08
^{55}Fe	1.08E+10	1.08E+10
^{59}Fe	4.24E+08	4.20E+08
^{52}Fe	2.46E+07	6.43E+06
^{56}Co	1.23E+07	1.23E+07
^{55}Co	1.49E+06	7.90E+05
^{57}Co	1.02E+06	1.02E+06
^{58}Co	2.55E+05	2.53E+05
加速器引出口		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	3.19E+08	3.19E+08
^{7}Be	1.09E+07	1.08E+07
^{24}Na	2.64E+05	1.26E+05
^{32}P	4.28E+05	4.14E+05

^{33}P	2.85E+05	2.80E+05
^{35}S	5.12E+05	5.09E+05
^{37}Ar	1.59E+06	1.57E+06
^{39}Ar	2.78E+04	2.78E+04
^{42}K	1.76E+06	7.18E+05
^{43}K	6.12E+05	3.72E+05
^{44}Sc	1.63E+07	2.98E+06
^{46}Sc	1.49E+07	1.48E+07
^{47}Sc	7.49E+06	6.53E+06
^{43}Sc	3.71E+06	2.15E+05
^{48}Sc	2.27E+06	1.76E+06
^{44}Ti	1.59E+05	1.59E+05
^{49}V	1.59E+08	1.58E+08
^{48}V	8.17E+07	7.94E+07
^{51}Cr	3.30E+08	3.25E+08
^{48}Cr	2.54E+06	1.52E+06
^{54}Mn	5.64E+08	5.63E+08
^{52}Mn	8.67E+07	7.98E+07
^{56}Mn	8.28E+07	1.12E+06
^{53}Mn	5.83E+02	5.83E+02
^{55}Fe	9.23E+08	9.23E+08
^{59}Fe	2.42E+07	2.39E+07
^{52}Fe	9.88E+06	2.59E+06
^{57}Co	2.07E+09	2.07E+09
^{58}Co	1.82E+09	1.81E+09
^{56}Co	7.21E+08	7.17E+08
^{60}Co	1.85E+08	1.85E+08
^{61}Co	1.17E+08	1.40E+05
^{55}Co	8.23E+07	4.37E+07
^{57}Ni	9.52E+07	6.97E+07
^{65}Ni	2.63E+07	3.21E+05
^{63}Ni	2.57E+07	2.57E+07
^{56}Ni	1.35E+07	1.25E+07
^{59}Ni	1.08E+05	1.08E+05
^{61}Cu	2.39E+09	8.63E+07
^{64}Cu	2.05E+09	8.58E+08
降能器		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	5.24E+08	5.24E+08
^{7}Be	5.50E+08	5.45E+08
准直器		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq

^{3}H	2.12E+06	2.12E+06
^{7}Be	1.21E+04	1.20E+04
^{65}Ni	3.03E+03	3.70E+01
^{63}Ni	9.32E+01	9.32E+01
^{165}Er	1.06E+05	9.32E+04
^{163}Er	2.73E+04	1.78E+02
^{167}Tm	2.55E+05	2.43E+05
^{166}Tm	1.79E+05	1.55E+05
^{165}Tm	1.06E+05	7.39E+04
^{169}Yb	8.00E+05	7.98E+05
^{166}Yb	1.67E+05	1.37E+05
^{173}Lu	1.47E+07	1.47E+07
^{172}Lu	7.76E+06	7.74E+06
^{171}Lu	2.07E+06	2.02E+06
^{170}Lu	1.19E+06	1.09E+06
^{169}Lu	7.48E+05	5.41E+05
^{175}Hf	2.03E+08	2.03E+08
^{173}Hf	1.57E+07	1.00E+07
^{172}Hf	7.47E+06	7.47E+06
^{171}Hf	1.71E+06	6.94E+05
^{181}Hf	1.37E+06	1.36E+06
^{170}Hf	9.94E+05	4.98E+05
^{177}Ta	7.31E+08	6.20E+08
^{179}Ta	7.14E+08	7.14E+08
^{176}Ta	5.78E+08	2.02E+08
^{182}Ta	3.11E+08	3.10E+08
^{180}Ta	2.50E+08	6.41E+07
^{175}Ta	1.98E+08	7.26E+07
^{178}Ta	1.60E+08	1.45E+06
^{174}Ta	1.87E+07	1.91E+03
^{173}Ta	2.43E+06	7.10E+04
^{178}W	6.51E+08	6.37E+08
^{177}W	5.65E+08	3.66E+06
^{176}W	5.12E+08	6.06E+06
^{181}W	7.18E+07	7.15E+07
进口质子回旋加速器大厅西墙钢板 1		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	7.48E+04	7.48E+04
^{7}Be	3.03E+03	3.00E+03
^{45}Ca	3.03E+03	3.02E+03
^{44}Sc	2.50E+04	2.27E+03
^{46}Sc	2.12E+04	2.11E+04

^{48}Sc	9.09E+03	7.05E+03
^{45}Ti	2.42E+04	6.62E+02
^{49}V	3.38E+05	3.37E+05
^{48}V	2.03E+05	1.97E+05
^{51}Cr	9.30E+05	9.15E+05
^{48}Cr	7.27E+04	1.81E+03
^{54}Mn	2.10E+06	2.10E+06
^{56}Mn	5.06E+05	6.86E+03
^{52}Mn	1.99E+05	1.83E+05
^{55}Fe	2.96E+06	2.96E+06
^{59}Fe	3.33E+04	3.30E+04
^{52}Fe	3.03E+04	7.93E+03
^{56}Co	1.21E+04	1.20E+04
进口质子回旋加速器大厅西墙钢板 2		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	1.44E+04	1.44E+04
^{46}Sc	9.09E+03	9.04E+03
^{44}Sc	1.21E+04	7.42E+02
^{45}Ti	6.06E+03	1.66E+02
^{49}V	9.99E+04	9.98E+04
^{48}V	4.24E+04	4.13E+04
^{51}Cr	1.73E+05	1.70E+05
^{48}Cr	6.06E+03	3.62E+03
^{54}Mn	4.52E+05	4.51E+05
^{52}Mn	1.96E+04	1.80E+04
^{56}Mn	1.24E+05	1.69E+03
^{55}Fe	8.23E+05	8.23E+05
^{59}Fe	1.52E+04	1.50E+04
^{52}Fe	3.03E+03	7.93E+02

表 3-33 国产质子治疗系统结构部件感生放射性模拟计算结果

加速器磁铁		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	2.61E+08	2.61E+08
^{7}Be	4.08E+06	4.05E+06
^{24}Na	2.41E+05	1.15E+05
^{32}P	1.03E+06	1.00E+06
^{33}P	5.84E+05	5.73E+05
^{35}S	1.01E+06	1.00E+06
^{37}Ar	3.49E+06	3.44E+06
^{42}K	5.88E+06	2.40E+06

^{43}K	2.00E+06	1.22E+06
^{45}Ca	9.67E+06	9.64E+06
^{47}Ca	1.18E+05	1.06E+05
^{46}Sc	8.78E+07	8.73E+07
^{44}Sc	7.25E+07	1.26E+07
^{47}Sc	4.05E+07	3.53E+07
^{48}Sc	1.20E+07	9.34E+06
^{44}Ti	7.70E+05	7.70E+05
^{49}V	1.37E+09	1.37E+09
^{48}V	6.30E+08	6.12E+08
^{51}Cr	3.43E+09	3.37E+09
^{49}Cr	3.04E+08	4.48E+01
^{48}Cr	1.96E+07	1.17E+07
^{54}Mn	1.08E+10	1.08E+10
^{56}Mn	3.97E+09	5.39E+07
^{52}Mn	7.98E+08	7.35E+08
^{55}Fe	3.07E+10	3.07E+10
^{59}Fe	1.27E+09	1.26E+09
^{52}Fe	8.96E+07	2.34E+07
^{56}Co	4.06E+08	4.04E+08
^{55}Co	9.93E+07	5.28E+07
^{57}Co	1.39E+07	1.38E+07
^{58}Co	2.06E+06	2.05E+06
加速器引出口		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	3.68E+08	3.68E+08
^{7}Be	1.25E+07	1.24E+07
^{24}Na	2.57E+05	1.23E+05
^{32}P	4.83E+05	4.67E+05
^{33}P	3.11E+05	3.05E+05
^{35}S	5.95E+05	5.92E+05
^{37}Ar	1.76E+06	1.74E+06
^{39}Ar	2.87E+04	2.87E+04
^{42}K	1.83E+06	7.47E+05
^{43}K	7.55E+05	4.59E+05
^{44}Sc	1.72E+07	2.98E+06
^{46}Sc	1.65E+07	1.64E+07
^{47}Sc	7.70E+06	6.72E+06
^{43}Sc	3.98E+06	2.30E+05
^{48}Sc	2.49E+06	1.93E+06
^{44}Ti	1.70E+05	1.70E+05
^{49}V	1.76E+08	1.76E+08

^{48}V	8.84E+07	8.59E+07
^{51}Cr	3.65E+08	3.59E+08
^{48}Cr	2.76E+06	1.65E+06
^{54}Mn	6.45E+08	6.44E+08
^{52}Mn	9.66E+07	8.90E+07
^{56}Mn	9.60E+07	1.30E+06
^{53}Mn	6.56E+02	6.56E+02
^{55}Fe	1.05E+09	1.05E+09
^{59}Fe	2.88E+07	2.85E+07
^{52}Fe	1.08E+07	2.84E+06
^{60}Co	2.27E+08	2.27E+08
^{57}Co	2.40E+09	2.40E+09
^{58}Co	2.12E+09	2.11E+09
^{56}Co	8.24E+08	8.19E+08
^{61}Co	1.43E+08	1.71E+05
^{55}Co	9.30E+07	4.94E+07
^{57}Ni	1.10E+08	8.06E+07
^{65}Ni	3.57E+07	4.36E+05
^{63}Ni	3.31E+07	3.31E+07
^{56}Ni	1.50E+07	1.39E+07
^{59}Ni	1.26E+05	1.26E+05
^{61}Cu	2.83E+09	1.02E+08
^{64}Cu	2.59E+09	1.08E+09
降能器		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	2.37E+09	2.37E+09
^{7}Be	1.14E+10	1.13E+10
准直器		
核素	停机时刻的活度，Bq	停机 16 小时后活度，Bq
^{3}H	8.97E+07	8.97E+07
^{7}Be	1.23E+06	1.22E+06
^{24}Na	3.21E+04	1.53E+04
^{33}P	1.07E+04	1.05E+04
^{35}S	1.07E+04	1.07E+04
^{37}Ar	1.07E+04	1.06E+04
^{42}K	6.48E+04	2.67E+04
^{43}K	2.14E+04	1.30E+04
^{45}Ca	3.75E+04	3.74E+04
^{46}Sc	4.13E+05	4.10E+05
^{47}Sc	2.68E+05	2.34E+05
^{44}Sc	1.51E+05	2.39E+04
^{48}Sc	8.04E+04	6.23E+04

^{44}Ti	1.68E+03	1.68E+03
^{49}V	3.44E+06	3.44E+06
^{48}V	1.08E+06	1.05E+06
^{51}Cr	1.50E+07	1.47E+07
^{48}Cr	1.07E+04	6.41E+03
^{54}Mn	1.47E+08	1.47E+08
^{56}Mn	2.22E+07	3.02E+05
^{52}Mn	1.57E+06	1.45E+06
^{55}Fe	1.76E+08	1.76E+08
^{59}Fe	1.38E+07	1.36E+07
^{52}Fe	1.23E+05	3.23E+04
^{58}Co	2.02E+09	2.01E+09
^{57}Co	1.79E+09	1.79E+09
^{56}Co	2.68E+08	2.66E+08
^{60}Co	1.96E+08	1.95E+08
^{61}Co	1.06E+08	1.27E+05
^{55}Co	3.54E+06	1.88E+06
^{57}Ni	6.12E+07	4.48E+07
^{65}Ni	4.11E+07	5.02E+05
^{63}Ni	3.24E+07	3.24E+07
^{56}Ni	2.39E+06	2.22E+06
^{59}Ni	1.43E+05	1.43E+05
^{61}Cu	5.33E+09	1.93E+08
^{64}Cu	3.99E+09	1.66E+09

3.3.1.3.4 土壤和地下水的感生放射性

根据表 5-2 质子治疗系统屏蔽体外剂量率计算结果，筛选具有代表性的关注点计算结果列于表 3-34。由结果可知，质子治疗系统屏蔽体外表面与土壤边界处最大剂量率均低于 5 mSv/h（即 5000 μSv/h），本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

表 3-34 质子治疗系统屏蔽体外表面与土壤边界处最大剂量率

区域	关注点	周围环境	屏蔽体外剂量率，μSv/h
进口质子治疗系统	U4	加速器底板下方（土壤）	500
	U5	能选系统底板下方（土壤）	500
	U9	质子治疗室 2 底板下方（土壤）	10
	B46	束流运输线北墙外偏东（土壤）	0.1
国产质子治疗系统	C4	加速器底板下方 （土壤）	3000
	C1	束流传输线北墙外（土壤）	1

	C5	质子治疗室 4 底板下方（土壤）	1500
	C6	质子治疗室 5 底板下方（土壤）	400
	C2	质子科学实验室北墙外（土壤）	10
	C3	质子科学实验室东墙外（土壤）	1000
	C7	质子科学实验室底板下方（土壤）	2000

3.3.1.3.5 治疗室内患者的感生放射性

本项目质子治疗室规划每小时治疗 3 人次，因此平均每 20min 需要对患者进行摆位/解除摆位一次。由于解除摆位时，治疗技师在治疗室内且与接受照射后的患者距离较近，因此需分析计算治疗技师进入治疗室内患者的感生放射性水平，以此确定摆位前有无必要等待合适时间再进入治疗室内对患者解除摆位，并评估治疗后患者的感生放射性对治疗技师的辐射影响。

3.3.1.3.5.1 计算条件

治疗室内患者感生放射性的 FLUKA 程序计算条件如下：

（1）采用最保守的束流条件：束流能量 230MeV、流强 0.47nA，连续治疗 5min。

（2）人体组织等效靶的组成成分采用文献《Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling》（Pacific Northwest National Laboratory, 2011）中推荐的 ICRP 标准软组织成分，列于表 3-35，靶的尺寸为厚度 40cm，半径 35cm 的圆柱体。

表 3-35 人体组织等效靶的组成成分

元素	质量分数，%
H	10.4
C	23.2
N	2.5
O	63.0
Na	0.1
Mg	0.01
P	0.1
S	0.2
Cl	0.1
K	0.2

Ca	0.02
Fe	0.005
Zn	0.003
总计	100

3.3.1.3.5.2计算结果

采用FLUKA程序计算了停机时刻和停机1min、5min、10min、30min、1h，患者体表50cm处的感生放射性剂量率，结果见表 3-36。

表 3-36 单次治疗后，患者体表50cm处感生放射性剂量率计算结果，μSv/h

时间	患者体表50cm处
停机时刻	87
停机 1min	31
停机 5min	6.6
停机 10min	4.3
停机 22min	2.5
停机 30min	1.8
停机 1h	0.61

由计算结果可知，以230MeV-0.47nA的束流连续治疗5min，停机5min后，患者体表50cm处剂量率为6.6μSv/h；停机10min后，患者体表50cm处剂量率降低为4.3μSv/h；停机22min后，患者体表50cm处剂量率低于2.5μSv/h。

3.3.1.3.6 混凝土的感生放射性

本项目使用普通混凝土作为主要屏蔽材料。混凝土含有多种元素，特别是氢可以慢化质子治疗产生的中子，同时混凝土含有的多种元素也会吸收中子，而产生活化，但总体来说中子引起混凝土的活化水平较低。

参考文献[1]采用 FLUKA 程序对 230MeV 质子治疗系统混凝土的感生放射性进行了模拟，结果表明：混凝土活化产生的主要放射性核素包括 ^{24}Na、^{40}K、^{54}Mn、^{55}Fe 等，回旋加速器大厅、高能质子束流输运通道和旋转治疗室混凝土墙的各感生放射性核素活度浓度均低于豁免活度浓度，其与豁免活度浓度的比值之和分别

[1] 冀东,侯铁钢,宋旺旺,何占飞,王宏良.质子治疗中感生放射性辐射防护[J].核电子学与探测技术,2021,41(2):344-349.

为 2.31×10^{-1}、2.76×10^{-5}、1.20×10^{-4}，均小于 1，表明混凝土墙的感生放射性核素满足豁免要求。

本项目质子治疗系统最高能量与参考文献[1]相同，均为 230MeV，因此可参考其结论，可推知本项目混凝土墙的感生放射性核素能满足豁免要求。

3.3.1.4 臭氧等有害气体

3.3.1.4.1 计算公式

在光子作用下，空气中的氧气可吸收辐射能量，发生辐射分解，生成氧原子，氧原子与空气中的 O_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。

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

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

式中，

C 为场所内 O_3 和 NO_2 饱和浓度，g/m^3；

N 为房间内单位体积的气体分子个数，个/m^3；

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，$eV^{-1}\cdot m^3$；

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，$6.022\times10^{23}mol^{-1}$；

I 为空气中单位体积单位时间的光子能量沉积，$eV/m^3\cdot s$，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：

$$I = 6.25\times10^{18} K\rho = 6.25\times10^{18}\varphi(\frac{\mu_{en}}{\rho})E\rho \qquad (3\text{-}9)$$

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，$p/m^2\cdot s$；

ρ 为空气的密度，kg/m^3；

μ_{en}/ρ 为光子在空气中的质能吸收系数，m^2/kg；

E 为光子能量，J（$1MeV=1.6\times10^{-13}J$）。

3.3.1.4.2 各参数取值

各参数取值和来源列于表 3-37。

表 3-37 质子治疗机房臭氧饱和浓度计算参数取值

参数	取值	来源
g	O_3：0.103 eV^{-1}； NO_2：0.048 eV^{-1}	NCRP NO.144 报告 P358
α	2.3×10^{-4} s^{-1}	NCRP NO.144 报告 P359
κ	5.0×10^{-24} $eV^{-1}\cdot m^3$	《Advanced Photon Source：Radiological Design Considerations》（APS-LS-141 Revised，H.J.MoE, July 1991）
R	$2.22\times10^{-3}s^{-1}$	表 3-26
M	$M(O_3)$=48 g/mol $M(NO_2)$=46 g/mol	——
N_A	6.022×10^{23}1/mol	——
φ	7.96E+07 $p/m^2\cdot s$	采用距靶点 1m 处的光子注量率作为机房内平均光子注量率进行保守计算
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	$10MeV=1.6\times10^{-12}J$	FLUKA 程序模拟

3.3.1.4.3 计算结果

质子治疗机房内 O_3、NO_2 的饱和浓度计算结果列于表 3-38。由计算结果可知，质子治疗机房内 O_3、NO_2 饱和浓度远低于表 1-16 中所列工作场所 O_3 和 NO_2 的相关限值。

表 3-38 质子治疗机房内 O_3 和 NO_2 饱和浓度计算结果

场所名称	饱和浓度，mg/m^3	
	O_3	NO_2
质子治疗机房	4.69E-07	2.19E-08

3.3.2 Ⅱ、Ⅲ类射线装置

3.3.2.1 电子直线加速器

电子直线加速器运行期间产生的辐射源项主要包括初级粒子、次级粒子和感生放射性。

3.3.2.1.1 初级粒子

初级粒子是被加速的粒子，主要是加速器治疗时使用的 X 射线和电子线。本项目使用 X 射线最大能量为 10MV，使用电子线的最高能量为 15MeV。电子线与治疗头、治疗床、人体组织等作用产生的韧致辐射的能量和强度均低于电子束打靶时产生的 X 射线的能量和强度，且电子线在混凝土中的最大射程约为 5.1cm。因此，加速器机房及其防护门若能满足 X 射线的屏蔽防护，则也能够满足电子束治疗中产生的韧致辐射的屏蔽防护。

3.3.2.1.2 有害气体

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

O_3 来源包括有用线束产生 O_3 和泄露辐射产生的 O_3 两部分，本次评价依据

文献《辐射所致臭氧的估算与分析》（王时进等，中华放射医学与防护杂志，1994年4月第14卷第2期）中给出的方法和公式估算O_3产额。

（1）有用线束的O_3产额P_1

有用线束的O_3产额可用公式3-10计算。

$$P_1 = 2.43\dot{D}_0(1-\cos\theta)RG \qquad (3\text{-}10)$$

式中，

P_1为有用线束的O_3产额，mg/h；

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

R为射线束中心点到屏蔽物（墙）的距离，m；

G为空气吸收100eV辐射能量产生的O_3分子数，取值为10；

θ为有用束的半张角，为14°。

各参数的取值和计算结果见表 3-39。

表 3-39 有用线束的O_3产额的计算参数和计算结果

机房	$\dot{D}_0$，Gy/min	R，m	G	θ	P_1，mg/h
直加机房1	22	4	10	14°	64.2
直加机房2	22	4	10	14°	64.2
直加机房3	22	4	10	14°	64.2

（2）泄漏辐射的O_3产额P_2

将泄漏辐射看作4π方向均匀分布的点源，并考虑加速器机房墙壁的散射线使室内的O_3产额增加10%，泄漏辐射的O_3产额P_2可用公式3-11计算。

$$P_2 = 3.32\times10^{-3}\dot{D}_0 GV^{1/3} \qquad (3\text{-}11)$$

式中，

P_2为泄漏辐射的O_3产额，mg/h；

V 为加速器机房体积（不含迷道），m^3；

泄漏辐射 O_3 产额的计算参数和计算结果见表 3-40。

表 3-40 泄漏辐射的 O_3 产额的计算参数和计算结果

机房	$\dot{D}_0$，Gy/min	G	V，m^3	泄漏辐射所致 O_3 产额 P_2，mg/h	考虑散射增加 10%后 O_3 产额 P_3，mg/h
直加机房 1	22	10	339.2	5.1	5.6
直加机房 2	22	10	256	4.6	5.1
直加机房 3	22	10	339.2	5.1	5.6

（3）O_3 总产额

根据表 3-39 和表 3-40 可计算得出直线加速器机房 1、3 的 O_3 总产额为 64.2+5.6=69.8 mg/h，直线加速器机房 2 的 O_3 总产额为 64.2+5.1=69.3mg/h。

（4）O_3 饱和浓度

考虑加速器机房运行时的连续排风和 O_3 的分解，机房内空气中 O_3 的平均浓度可由公式 3-12 计算。

$$Q(t)=\frac{Q_0T}{V}(1-e^{-t/T}) \qquad (3\text{-}12)$$

式中，

Q(t)为 t 时刻机房内 O_3 的平均浓度，mg/m^3；

Q_0 为 O_3 的产生率，mg/h；

V 为加速器机房体积（不含迷道），m^3；

T 为有效清除时间，h。

若照射时间很长，即 t>>T，O_3 浓度达到饱和，则可由公式 3-13 计算 O_3 的饱和浓度。

$$Q(t)=\frac{Q_0T}{V} \qquad (3\text{-}13)$$

其中，有效清除时间 T 可由公式 3-14 计算。

$$T = \frac{t_v \cdot t_d}{t_v + t_d} \qquad (3\text{-}14)$$

式中，

t_v 为换气一次所需要的时间，h；

t_d 为 O_3 的有效分解时间，取 0.83h。

各参数的取值和 O_3 饱和浓度的计算结果见表 3-41。

表 3-41 加速器机房内 O_3 饱和浓度计算结果

机房	Q_0，mg/h	V，m^3	t_v，h	t_d，h	T，h	Q(t)，mg/m^3
直加机房 1	69.8	339.2	0.0819	0.83	7.45E-02	1.53E-02
直加机房 2	69.3	256	0.0694	0.83	6.40E-02	1.73E-02
直加机房 3	69.8	339.2	0.0819	0.83	7.45E-02	1.53E-02

由计算结果可知，电子直线加速器机房 O_3 的饱和浓度最大为 1.73E-02mg/m^3。氮氧化物（以 NO_2 为主）产额约为 O_3 的一半，约为 8.67E-03mg/m^3，低于表 1-16《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》（GBZ 2.1-2007）中规定的 O_3 和 NO_2 浓度限值 0.3mg/m^3 和 5mg/m^3。

3.3.2.2 模拟 CT

本项目使用模拟 CT 期间，主要的放射性污染是 X 射线，仅在开机并处于出束状态时才会发出 X 射线。X 射线贯穿机房的屏蔽体进入外环境中，将对工作人员和机房周围人员造成辐射影响。

此外，X 射线与空气作用会产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。

3.3.3 核医学科

3.3.3.1 放射性同位素

核医学在分装、注射等过程中的辐射源项主要来自放射性核素自发衰变发射的 γ 光子或 β 电子对人体所致的直接外照射，各放射性核素的参数见表 3-42，

数据取自 GBZ120-2020 附录 H 表 H.1、附录 L 表 L.1。

表 3-42 核医学放射性核素参数

核素名称	半衰期	衰变模式	毒性分组	β 最大能量，MeV	光子能量/MeV	裸源周围剂量当量率常数，μSv•m^2/MBq•h	人体源周围剂量当量率常数，μSv•m^2/MBq•h
^{18}F	109.8min	β+、EC	低毒	0.63（+）	0.511	0.143	0.092
^{99m}Tc	6.02h	IT	低毒	—	0.140	0.0303	0.0207

3.3.3.2 PET/CT 和 SPECT/CT

核医学使用 PET/CT 和 SPECT/CT 过程中的辐射源项主要为 CT 模式扫描产生的 X 射线，包括有用线束、漏射线和散射线。

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 3-43。

表 3-43 本项目正常运行期间主要的辐射污染因子小结

名称	主要污染因子	产生情况	防护方式
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	能量 1~10MeV	机房屏蔽体防护
	X 射线	定位 X 射线管最大管电压 150kV	机房屏蔽体防护
	活化空气	主要为 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等短半衰期核素。	机房通风系统排入环境
	活化冷却水	主要核素为 ^{3}H、^{7}Be。	暂存于集水井内，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。	暂存于放射性固废间，使其自然衰变。待衰变一段时间后，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，解控后冷却水去离子树脂按危险废物处理，其余按一般废物处理，不满足解控标准的委托有资质单位收贮。
	患者感生放射性	质子束照射人体产生，随停机时间的增加快速下降，停机 1h 后，患者体表 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工作人员再进入机房内工作。
直线加速器	X 射线	X 射线最大能量为 10MV	机房屏蔽体防护
模拟 CT、PET/CT、SPECT/CT	X 射线	X 射线管最大管电压为 140kV	机房屏蔽体防护
核医学放射性核素	γ、β 射线	^{18}F：β 最大能量 0.63MeV、光子能量 0.511MeV ^{99m}Tc：光子能量 0.140MeV	屏蔽体防护、穿戴个人防护用品、通风系统等
	表面污染	本项目为 β 表面污染	配备表面污染监测仪器，如表面污染水平超过控制标准，应采取相应的去污措施。

4 辐射安全与防护设施

4.1 质子治疗系统

4.1.1 辐射工作场所分区

根据 GB 18871-2002：“应把辐射工作场所分为控制区和监督区，以便于辐射防护管理和职业照射控制”。根据 HJ 1198-2021：“5.2.1 放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下，控制区包括加速器大厅、治疗室（含迷路）等场所，如质子/重离子加速器大厅、束流输运通道和治疗室，直线加速器机房、含源装置的治疗室、放射性废物暂存区域等。开展术中放射治疗时，术中放射治疗室应确定为临时控制区。5.2.2 与控制区相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区（如直线加速器治疗室相邻的控制室及与机房相邻区域等）。 ”

本项目质子治疗系统辐射工作场所分区见图 4-1~图 4-4，具体描述如下：

（1）控制区：进口质子治疗系统的加速器大厅和束流输运线、国产质子治疗系统的加速器大厅和束流输运线、5 间质子治疗室、质子科学实验室，放射性固废暂存间。

（2）监督区：上述各控制区屏蔽墙体外四周紧邻的场所，如加速器主控室、治疗室控制室、治疗计划计算机用房、实验准备洁净空间等。

控制区管理要求：控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志，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。

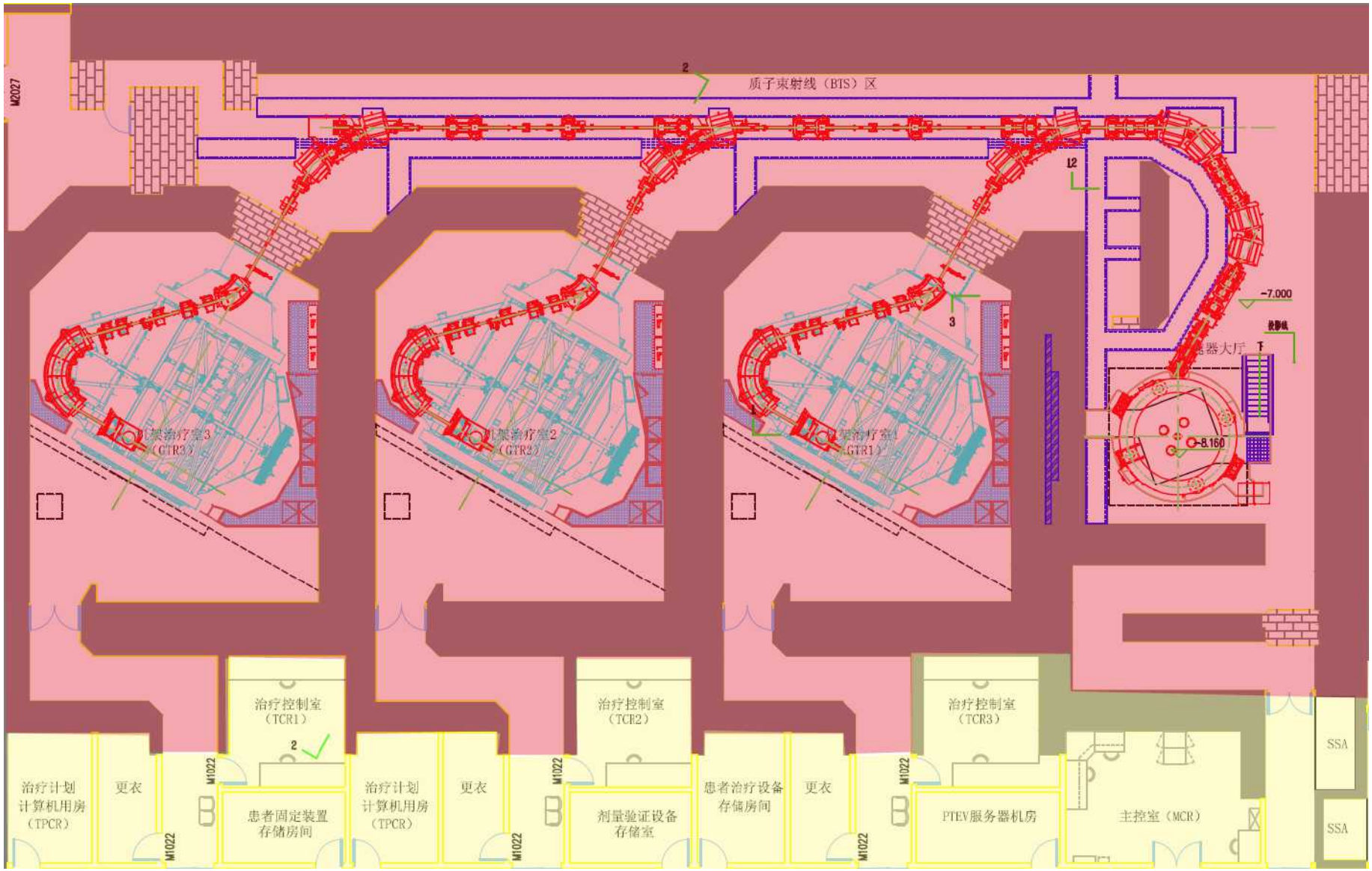


图 4-1 进口质子治疗系统地下一层辐射工作场所分区图（红色为控制区，黄色为监督区）

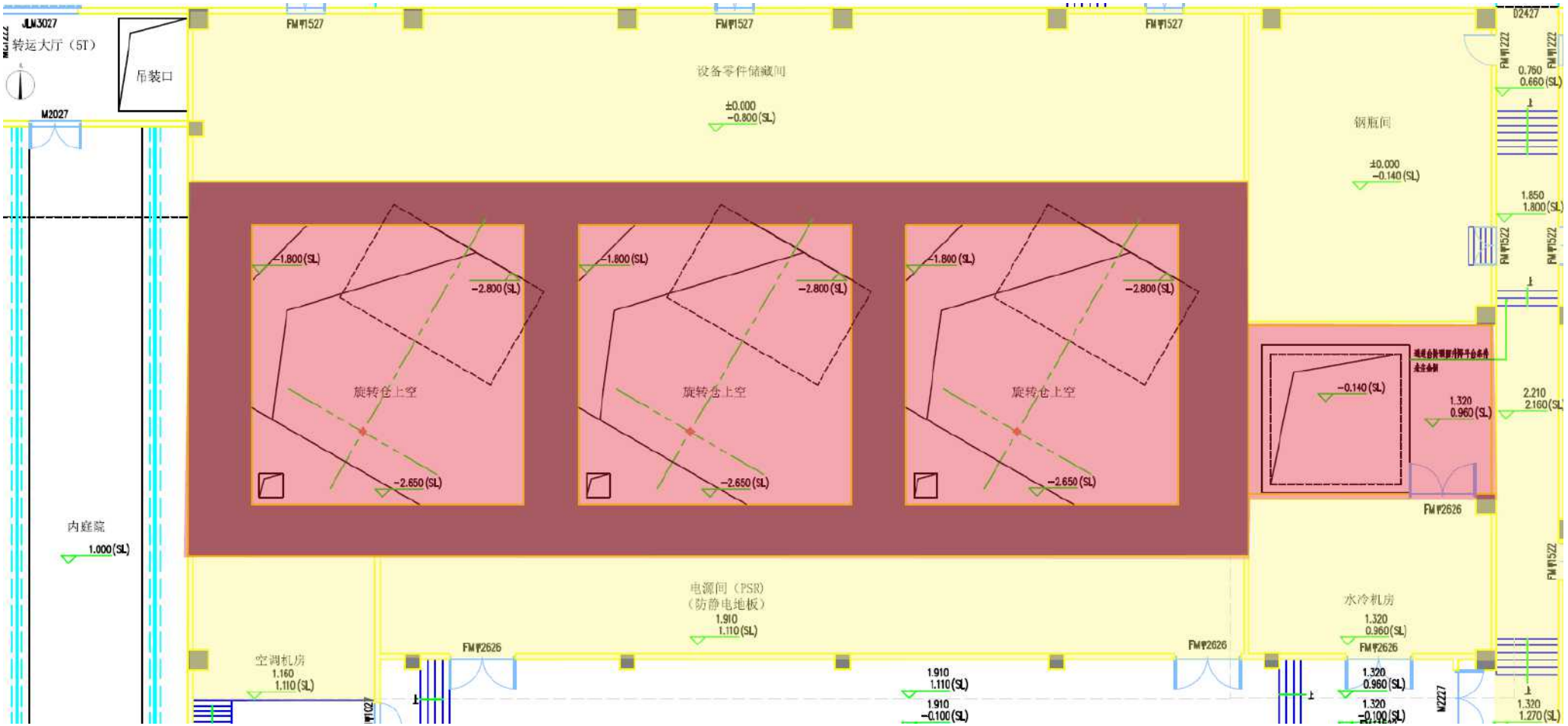


图 4-2 进口质子治疗系统地上一层辐射工作场所分区图（红色为控制区，黄色为监督区）

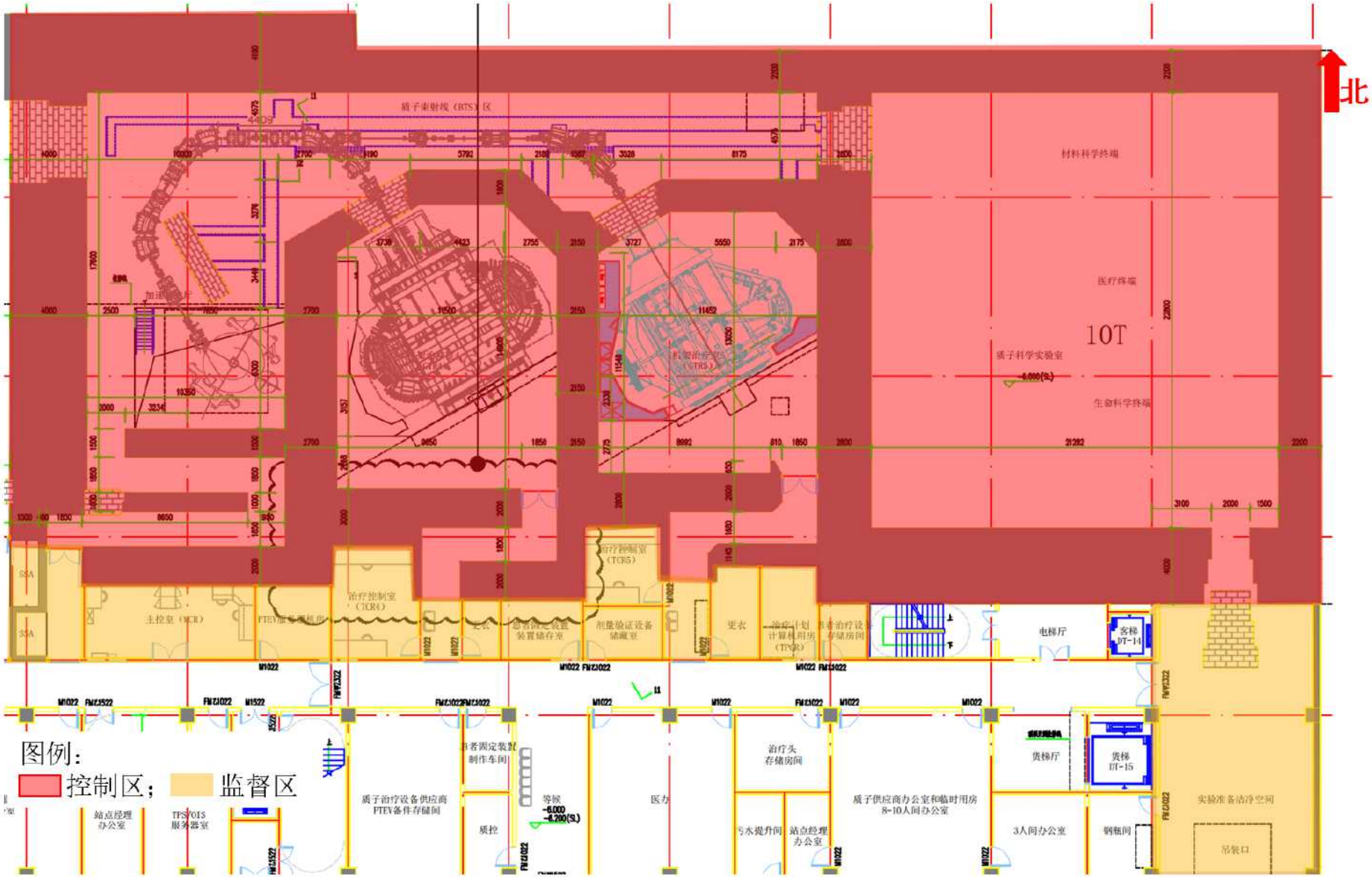


图 4-3 国产质子治疗系统地下一层辐射工作场所分区图

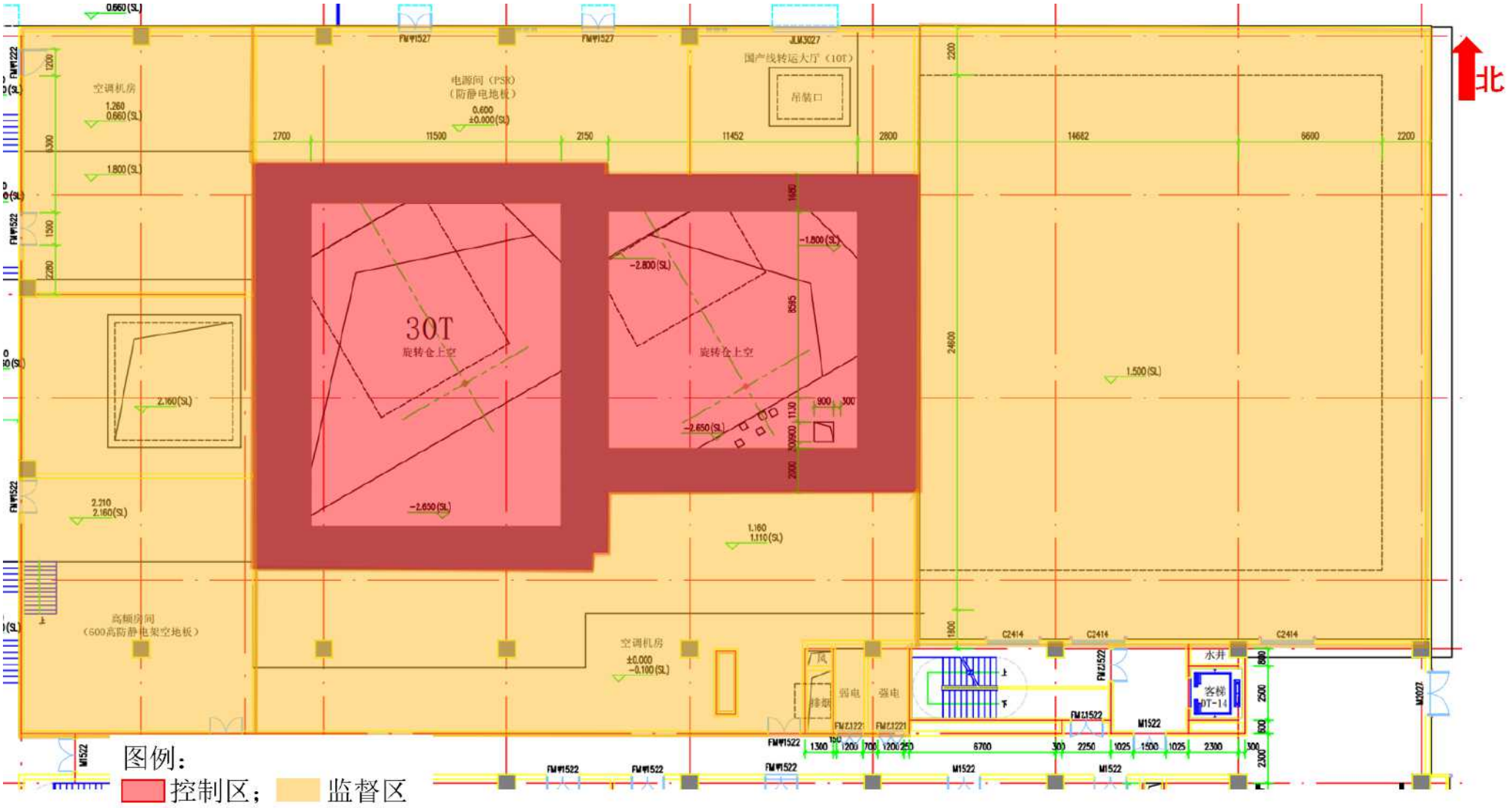


图 4-4 国产质子治疗系统地上一层辐射工作场所分区图

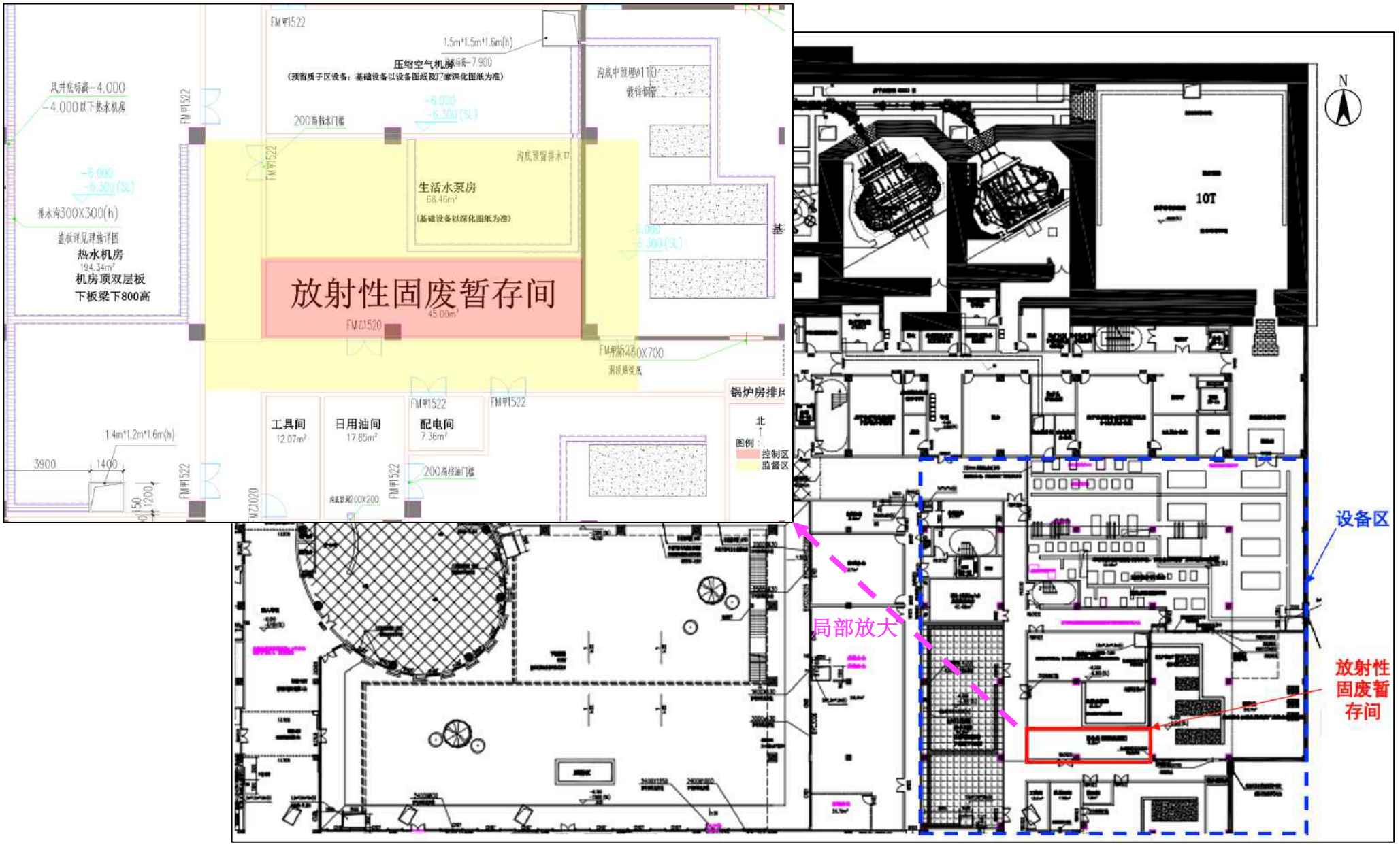
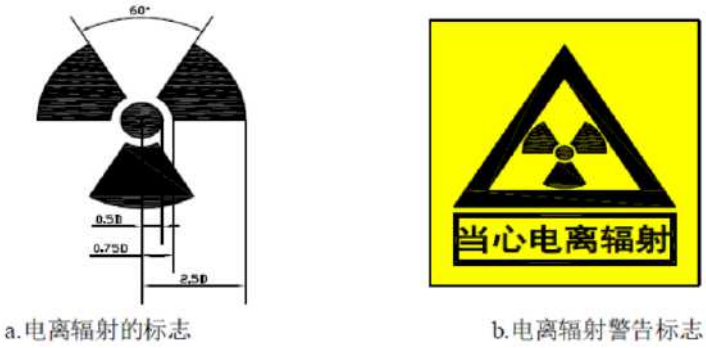


图 4-5 放射性固废暂存间辐射工作场所分区图

在质子治疗系统控制区的进出口设置如图 4-6 中所示警示标志，并给出辐射水平指示；在监督区的入口处的适当位置设置表明监督区的标牌。



a.电离辐射的标志　　b.电离辐射警告标志

图 4-6 电离辐射警告标志

4.1.2 布局合理性分析

本项目质子治疗系统设置在医院内东北角的质子中心内。质子中心的主要功能区位于地下一层，地上一层主要为电源间、空调机房、储藏间等配套用房。质子治疗机房设置了物理隔离和相对独立的人流路线，与其他各医疗单元之间分隔明确，不会相互穿插和干扰，周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域或人员流动性大的商业活动区域。

质子加速器大厅入口和各个治疗室均设有迷道，紧邻场所的四侧屏蔽墙体、门和屋顶除控制室外无办公室等人员长居留场所。质子治疗机房顶板上方不需要人员到达并只有借助工具才能进入。辐射工作场所的进出口均设置了门禁管理，便于场所的防护管理与安全控制。整个质子治疗区房间功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关标准要求。从辐射安全防护和满足安全诊疗的角度来看，该区域的布局合理。

4.1.3 辐射屏蔽设计方案

本项目进口、国产质子治疗机房辐射屏蔽主材料均为普通混凝土（密度不低于 2.35g/cm^3）。质子治疗机房辐射屏蔽设计及周围环境分布情况见表 4-1 和表 4-2，屏蔽体厚度如图 4-7~图 4-10 所示。

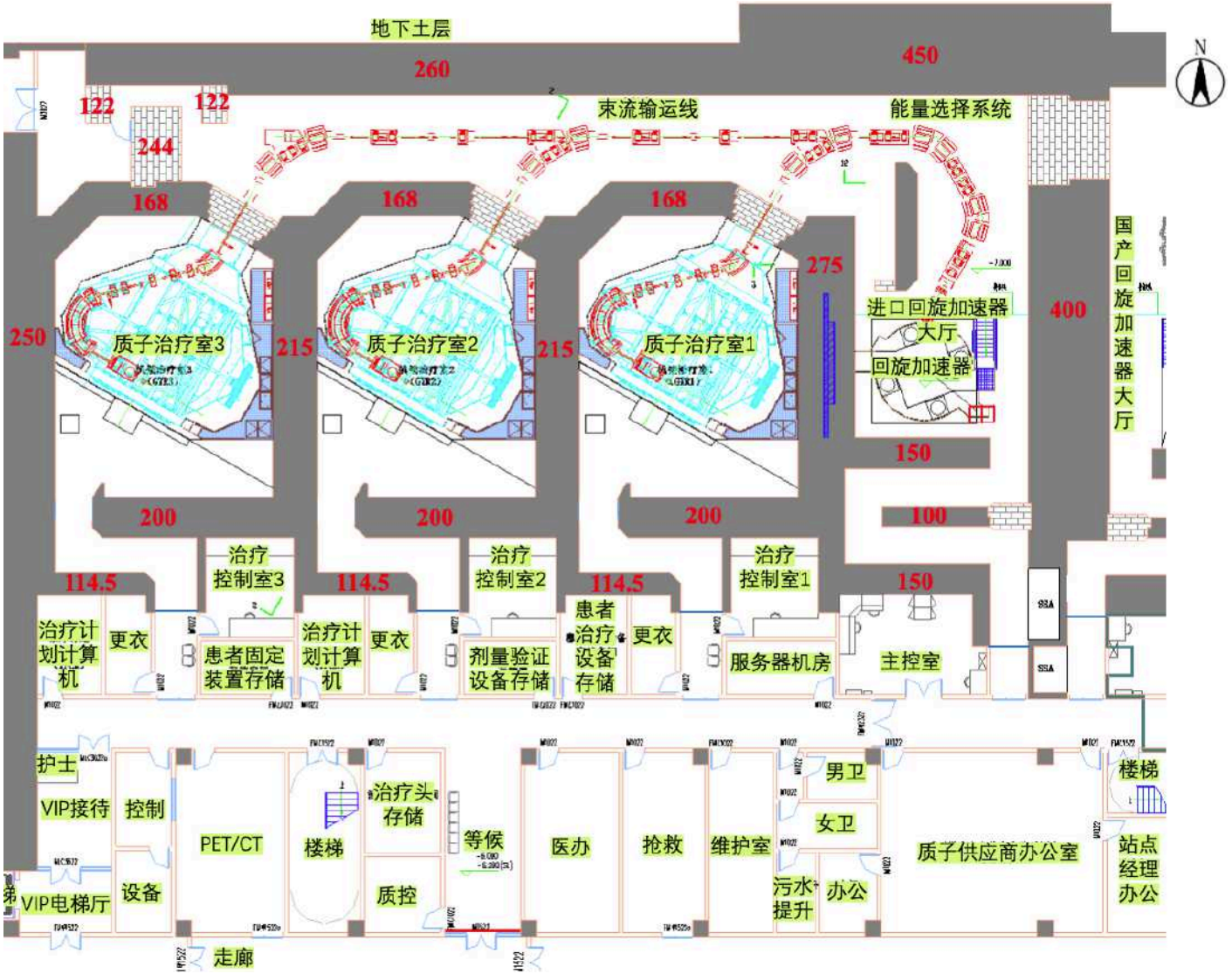


图 4-7 进口质子治疗系统屏蔽厚度平面示意图（单位：cm）



图 4-8 进口质子治疗系统屏蔽厚度剖面示意图（单位：cm）

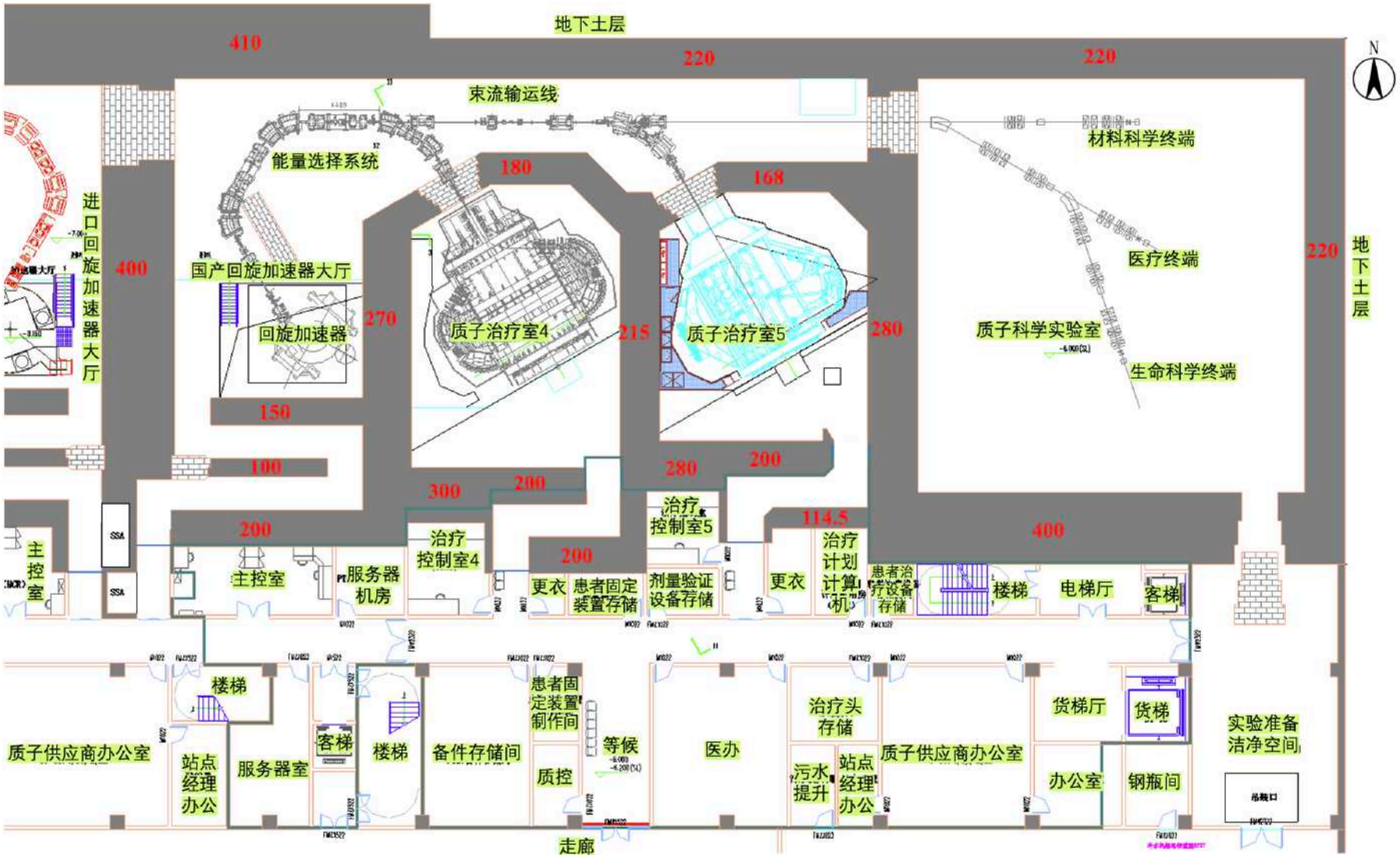


图 4-9 国产质子治疗系统屏蔽厚度平面示意图（单位：cm）



图 4-10 国产质子治疗系统屏蔽厚度剖面示意图（单位：cm）

表 4-1 进口质子治疗机房屏蔽设计及周围环境情况

区域名称	长×宽×高尺寸及面积	位置	屏蔽体厚度	周围环境
进口质子治疗系统回旋加速器大厅（含降能区）	16.7m×8.4m×3.4m 面积 140.28m^2（不含迷道）	西墙	2.75m 混凝土，局部内嵌钢板[1]： 钢板 1：尺寸 400cm×320cm×30cm（宽×高×厚），钢板 1 南端距离回旋加速器大厅迷道内墙北侧表面 164cm，钢板 1 东面距离加速器机房西墙内侧表面 100cm，底端与该层地面平齐。 钢板 2：尺寸 700cm×320cm×20cm（宽×高×厚），钢板 2 南端与加速器大厅迷道内墙北侧表面平齐，钢板 2 东面紧贴钢板 1，底端与该层地面平齐。	质子治疗室 1
		北墙	4.5m 混凝土	土层
		东墙	4.0m 混凝土	国产回旋加速器大厅
		南墙	迷道墙由内到外：1.5m+1.0m+1.5m 混凝土	回旋加速器主控室、走道
		顶板	2.46m 混凝土	水冷机房、钢瓶间
		底板	2.66~3.00m 混凝土	加速器底坑
		门	普通门	走道
进口质子治疗系统束流输运区	30.7m×4.2m×3.2m 面积 128.94m^2（不含迷道）	西墙	迷道墙由内到外：1.22m+2.44m+1.22m 混凝土	转运大厅
		北墙	2.6m 混凝土	土层
		东墙	4.0m 混凝土	国产回旋加速器降能区
		南墙	1.68m 混凝土	质子治疗室 1~3
		顶板	2.8m 混凝土	设备零件储存间
		底板	1.25m 混凝土	土层
		门	普通门	转运大厅
质子治疗室 1	13.7m×10.6m×11.4m； 治疗区域净高 3.05m；	西墙	2.15m 混凝土	质子治疗室 2
		北墙	1.68m 混凝土	束流输运区

	面积 145.22m^2（不含迷道）	东墙	2.75m 混凝土（局部内嵌钢板见加速器大厅西墙）	回旋加速器机房
		南墙	迷道墙由内到外：2.00m+1.145m 混凝土	控制室、患者治疗设备储藏室、更衣间、走道
		顶板	2.44m 混凝土	吊装口
		底板	1.33m 混凝土	土层
		门	普通门	走道
质子治疗室 2	13.7m×10.6m×11.4m； 治疗区域净高 3.05m； 面积 145.22m^2（不含迷道）	西墙	2.15m 混凝土	质子治疗室 3
		北墙	1.68m 混凝土	束流输运区
		东墙	2.15m 混凝土	质子治疗室 1
		南墙	迷道墙由内到外：2.00m+1.145m 混凝土	控制室、治疗计划电脑室、更衣间、走道
		顶板	2.44m 混凝土	吊装口
		底板	1.33m 混凝土	土层
		门	普通门	走道
质子治疗室 3	13.7m×10.6m×11.4m； 治疗区域净高 3.05m； 面积 145.22m^2（不含迷道）	西墙	2.5m 混凝土	直加机房 1、直加机房 3
		北墙	1.68m 混凝土	束流输运区
		东墙	2.15m 混凝土	质子治疗室 2
		南墙	迷道墙由内到外：2.00m+1.145m 混凝土	控制室、治疗计划电脑室、更衣间、走道
		顶板	2.44m 混凝土	吊装口
		底板	1.33m 混凝土	土层
		门	普通门	走道
备注：1. 由于进口质子治疗系统的设备布局及屏蔽体尺寸均采用厂家标准化设计方案，根据屏蔽体外剂量率控制水平及设计阶段的初步屏蔽计算结果，该标准化设计方案中加速器大厅西墙屏蔽效果不足。在建设单位及进口设备方要求保持原墙体厚度不变的情况下，设计方采用增加局部屏蔽体的方式进行屏蔽补偿，具体措施为在加速器大厅西墙内嵌钢板。				

表 4-2 国产质子治疗机房屏蔽设计及周围环境情况

场所名称		位置	屏蔽体厚度	周围环境
国产质子治疗系统回旋加速器大厅及束流输运线	回旋加速器（地下一层）	北墙	4.1m 混凝土（大厅内局部屏蔽体：1.2m 厚、4.9m 长混凝土）	输运线隧道区
		南墙	迷道墙由内到外：1.5m+1.0m+2.0m 混凝土	主控室、PTEV 服务器机房
		西墙	4.0m 混凝土	进口质子治疗装置加速器大厅
		东墙	2.7m 混凝土	治疗室 4
		顶板	2.46m 混凝土	不上人屋面
	回旋加速器（基坑）	北墙	1.4m 混凝土	土壤
		南墙	1.5m 混凝土	土壤
		西墙	8.1m 混凝土	进口质子治疗装置加速器基坑
		东墙	2.7m 混凝土	治疗室 4 基坑区
		底板	0.8m 混凝土	土壤
	束流输运线（地下一层）	北墙	2.2m 混凝土	土壤
		西墙	4.0m 混凝土	进口质子治疗系统输运线隧道区
		东墙	2.8m 混凝土	质子科学实验室
		顶板	2.6~3.8m 混凝土	空调机房、电源间、国产线转运大厅
		底板	1.2m 混凝土	土壤
质子治疗室 4	基坑区	北墙	1.8m 混凝土	土壤
		南墙	房间内 0.75m（局部 1.3m）混凝土；边界 1.1m 混凝土	土壤
		西墙	2.7m 混凝土	国产加速器基坑
		东墙	2.15m 混凝土	治疗室 5 基坑区
		底板	1.0m 混凝土	土壤
	地下一层	北墙	1.8m 混凝土	输运线隧道区
		南墙	迷道内墙 2.0m（局部 3.0m）混凝土；迷道外墙 2.0m 混凝土	治疗室控制室、迷道入口、更衣室、患者固定装置储存室

场所名称		位置	屏蔽体厚度	周围环境
		西墙	2.7m 混凝土	加速器大厅
		东墙	2.15m 混凝土	治疗室 5
	地上一层	北墙	1.8m 混凝土	电源间
		南墙	2.0m 混凝土	空调机房
		西墙	2.7m 混凝土	不上人屋面
		东墙	2.15m 混凝土	治疗室 5 上空
		顶板	2.74m 混凝土	不上人屋面
质子治疗室 5	基坑区	北墙	1.68m 混凝土	土壤
		南墙	房间内 1.5m（局部 1.775m）混凝土；边界 1.1m 混凝土	土壤
		西墙	2.15m 混凝土	治疗室 4 基坑
		东墙	2.8m 混凝土	土壤
		底板	1.37m 混凝土	土壤
	地下一层	北墙	1.68m 混凝土	输运线隧道区
		南墙	迷道内墙 2.0m（局部 2.8m）混凝土；迷道外墙 1.145m 混凝土	治疗室控制室、迷道入口、更衣室、治疗计划计算机用房
		西墙	2.15m 混凝土	治疗室 4
		东墙	2.8m 混凝土	质子科学实验室
	地上一层	北墙	1.68m 混凝土	国产线转运大厅
		南墙	2.0m 混凝土	空调机房
		西墙	2.15m 混凝土	治疗室 4 上空
		东墙	2.8m 混凝土	不上人屋面
		顶板	2.74m 混凝土	不上人屋面
质子科学实验室		北墙	2.2m 混凝土	土壤、院内道路
		南墙	4.0m 混凝土	电梯厅、客梯、实验准备洁净空间

场所名称	位置	屏蔽体厚度	周围环境
	西墙	2.8m 混凝土	治疗室 5
	东墙	2.2m 混凝土（局部 3.2m 混凝土）	土壤、院内道路
	顶板	2.0m 混凝土	不上人屋面
	底板	1.25m 混凝土	土壤

4.1.4 人身安全联锁系统

4.1.4.1 进口质子治疗系统

4.1.4.1.1 设计原则

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

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

（2）硬件最可靠：重要的位置把最大的信赖寄托在“硬件”上；

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

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

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

4.1.4.1.2 系统结构和功能

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

（2）安全联锁系统是一个专用的全部用硬件连接的系统，将质子治疗建筑、

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

a. 切断离子源供电电源，阻止在加速器中产生质子；

b. 切断加速器高频调制器，停止质子加速，是阻止切断质子产生的冗余措施；

c. 关闭能量选择系统入口处的束流闸，阻止束流通过；

d. 关闭能量选择系统出口处的束流闸，阻止束流通过；

e. 关闭治疗室入口处的束流闸，若安全条件不满足，即阻止束流进入治疗室；

f. 关闭治疗室的马达、旋转机架的转动，若安全条件不能满足，即阻止一切机械动作。

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

治疗安全系统（TSS）由一系列叫做安全冗余控制单元（SRCU）的独立控制单元组成，每个 SRCU 保证一个指定区域的人员安全：其中，控制加速器区的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCU0（由主控室操控），治疗室的安全系统可编程逻辑控制器为 SRCUX（X 为治疗室号，以 3 个治疗室为例，X 从 1 到 3）。各区域的硬安全联锁信号都接入各自的 SRCU，形成一个软安全联锁系统。SRCU 既是硬安全联锁系统的一个冗余安全系统，以备硬安全联锁失效时起到安全联锁作用，又能对所有硬安全联锁信号状态进行监测和显示。

（4）除硬安全联锁和软 SRCU 安全联锁系统外，系统本身还设有一个安全应用程序，一旦上述多重安全联锁都失效时，该程序能立即切断质子束流。

4.1.4.1.3 系统组成

进口质子治疗装置的人身安全联锁系统主要由钥匙控制、门磁系统、清场搜索按钮、急停按钮、声光报警器等组成，安全联锁设施具体点位如图 4-16 和图 4-17 所示，具体数量见表 4-3。

4.1.4.1.3.1 钥匙控制

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

主控钥匙转换开关有“ON”和“OFF”两种转换状态，用于控制束流的开启和停止。在加速器停机期间进入加速器大厅或治疗室内的工作人员，应先登记然后从相应区域的控制室，将主控钥匙旋转至“OFF”状态，使得加速器停机，切断束流，并拔下钥匙随身携带，防止他人误操作；从该区域出来后，在所有清场搜索按钮以及门磁系统等都建好联锁后，只有当主控制钥匙插入并转到“ON”的状态，才能最终给出允许开机信号。主控制钥匙未归位时，各辐射区均无法出束。

此外，加速器大厅迷道入口的门设有 3 把钥匙，两名加速器运行维护人员各持有一把。另一把为备用钥匙，平时不使用，放入保险柜中，由加速器负责人保管。钥匙由专人负责管理，实行领用登记制度。

4.1.4.1.3.2 门磁系统

门磁系统设置在加速器大厅和各治疗室出入口处，用于控制加速器的束流输出，其中加速器大厅的门磁系统包括：

（1）门禁卡

人员进入加速器大厅内需刷门禁卡。

（2）门限位开关

门限位开关的作用是保证防护门一旦离开固有位置则会自动启动联锁系统，

切断装置出束。主要是迷宫门与各质子加速器离子源高压联锁，保证在门打开的瞬间加速器瞬间退高压关机以保证进入人员的安全。其安装点位如图 4-16 所示。

4.1.4.1.3.3 清场搜索按钮

清场搜索是在开机前执行一套特定的安全搜索程序完成清场和建立联锁，联锁完成信号作为开机的必要前提条件之一，从而确保在开机前无人员滞留在里面。清场搜索按钮分布于加速器大厅、束流线和各治疗室内部四周沿途一定距离、一定高度的墙壁上，具体点位如图 4-16 和图 4-17 所示。

搜索按钮带有指示灯，当前等待按下的搜索按钮的指示灯会一直闪烁，当被按下时，指示灯会变成常亮。每个搜索子区设搜索时间窗限制和搜索顺序，超出搜索时间或违反搜索顺序需重新进行清场。清场搜索共分为加速器大厅区域（含加速器区及束流线区）以及 3 间治疗室共计 4 个区域，每个区域的清场搜索系统是相互独立的。其中加速器大厅区域又分为束流线区（子区 1）和加速器区（子区 2）共 2 个子区；每间治疗室分为机架基坑区（子区 1）和治疗区（子区 2）共 2 个子区。每个子区也是相互独立的。

加速器区域和治疗区域的清场搜索逻辑如图 4-11 所示，清场搜索路线见图 4-16 和图 4-17，具体流程如下：

每天首次治疗开始前，由当天现场负责的工作人员在规定的时间按照规定的路线，对质子治疗区清场搜索。通常的清场搜索顺序为：加速器大厅区域（子区 1→子区 2），治疗室 1~3 室（子区 1→子区 2）。工作人员确定该被搜索区域无除治疗室内患者以外的人员停留后按下“清场搜索按钮”，当清场搜索按钮被按下后时，该区的声光报警装置发出声、光报警信号，提醒人员离开该区域。通常加速器大厅区域在每次开机前进行一次清场搜索；各治疗室则在每次治疗前进行一次清场搜索。任一子区的清场状态被破坏（如门打开或清场搜索按钮未按下），都需要对该子区重新进行清场。

只有当清场搜索完成、质子治疗区所有区域的联锁门都已处于关闭状态、医生工作台束流控制设备处于允许状态，质子治疗系统才满足供束条件。

清场人员确认所有清场搜索按钮全部按下后，并将主控钥匙插回主控室的

控制台上，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。

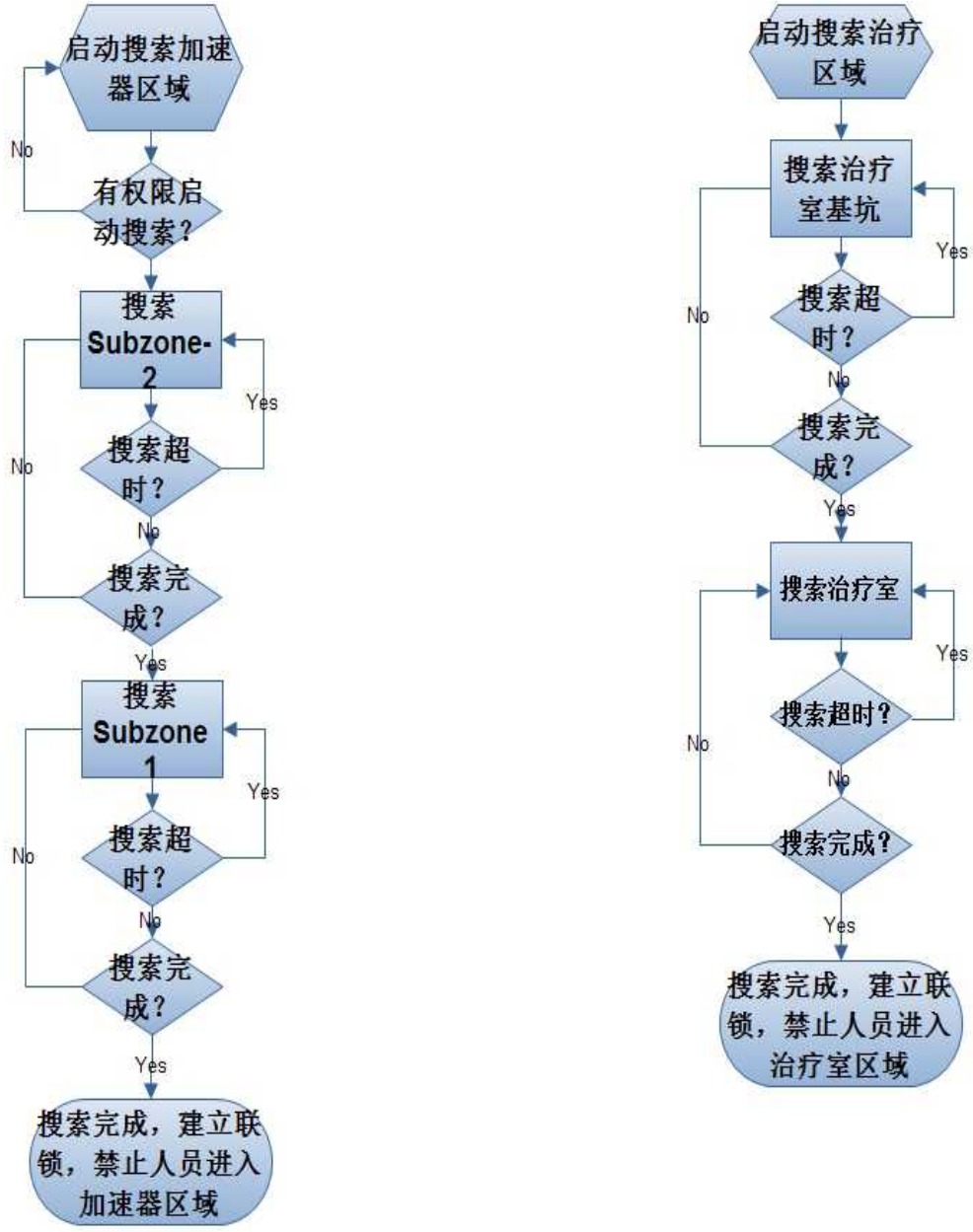


图 4-11 进口质子治疗系统清场搜索逻辑图

4.1.4.1.3.4 紧急停机

加速器大厅、各治疗室以及这些区域的控制室内均安装若干紧急停机按钮，如图 4-16 和图 4-17 所示。若装置开机后仍有人员滞留在这些区域内，可就近按下该区域出口处的紧急停机按钮切断加速器运行。待确认控制区内无工作人员并将急停按钮复位后可重新开机操作。

4.1.4.1.3.5束流监控装置

（1）束流闸

进口质子治疗系统在由能量选择系统引出至各治疗室的分支束线上设有束流闸，束流闸按照“失效保护”的原则设计，其材质为铝或铜。只有当安全联锁逻辑中所有条件都成立时，束流闸方可打开，束流方可进入下游区域。安全联锁逻辑中任意条件被破坏，束流闸均不能打开。束流闸安装点位如图 4-12 所示。

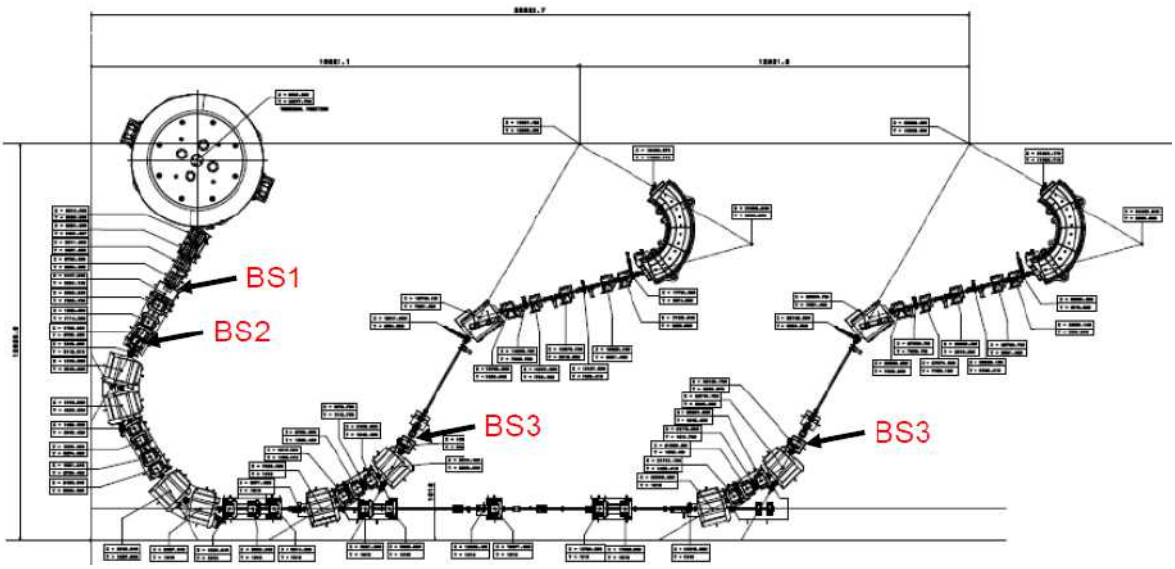


图 4-12 进口质子治疗系统束流闸安装点位示意图

（2）束流监测

质子治疗系统在其输运线和治疗室的治疗头内均设置了束流监测系统，监测设备都由人身安全联锁系统监控，一旦监测到不应该出现束流之处有束流，会立刻中断束流。

（3）束流安全设备

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

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

因此，通过控制这些安全设备的启停状态可以控制束流的分布区域以及定位系统的开关状态。辐射安全联锁系统对是否允许安全设备工作进行控制。如果联锁系统不允许安全设备工作，则安全设备处于停止状态。如果联锁系统允许安全设备工作，则由束流和定位安全控制系统对安全设备的启停进行控制。

4.1.4.1.3.6状态指示及监控（声光报警装置）

（1）状态指示

回旋加速大厅、输运线隧道入口和内部四周沿途一定距离处以及各治疗室入口处，安装有束流状态指示灯、警铃警灯等，具体点位如图 4-16 和图 4-17 所示。根据不同区域的束流状态，质子治疗系统设施三种类型的束流状态指示灯，具体如图 4-13~图 4-15 所示。



图 4-13 回旋加速器区域束流状态指示灯示意图

（区域 1、2 分别指束流输运线区、回旋加速器区）



图 4-14 治疗室束流状态指示灯示意图

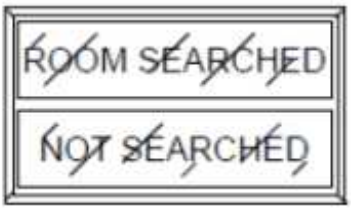


图 4-15 治疗室状态指示灯示意图

（2）状态监控

状态监控包括 LED 显示屏和动态监测组件，用于确保辐射防护人员在中央监控室能掌握安全联锁系统的现场实时状态。

LED 显示屏分布于加速器大厅和各治疗室迷宫出入口处，能够实时显示安全联锁系统的逻辑状态。动态监测组件设在加速器大厅和治疗室的迷宫通道内，当监测到有活动对象进入时，会禁止加速器开机出束。

4.1.4.1.3.7 其他

质子治疗区还设置有烟雾报警器。

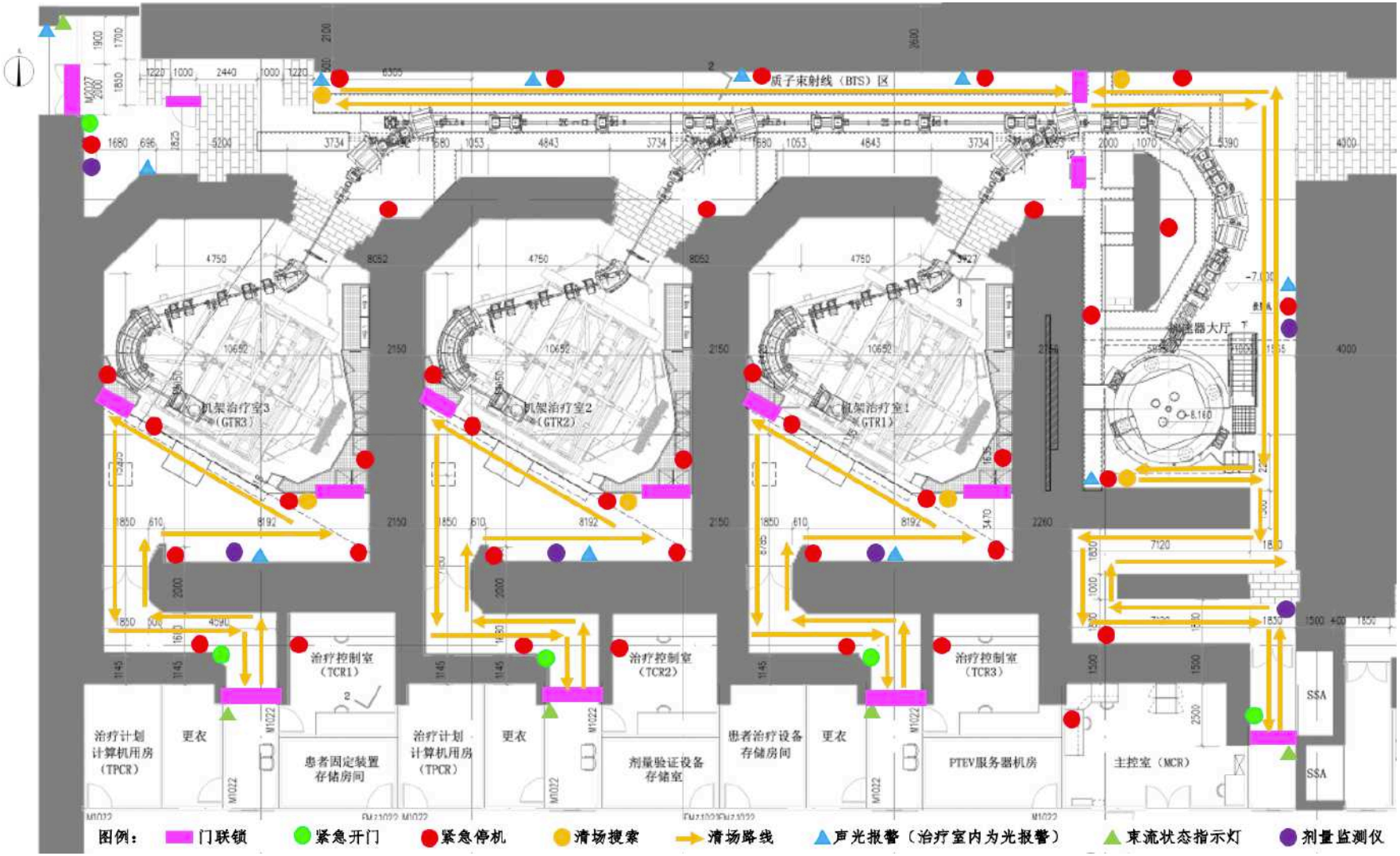


图 4-16　进口质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（地下一层）

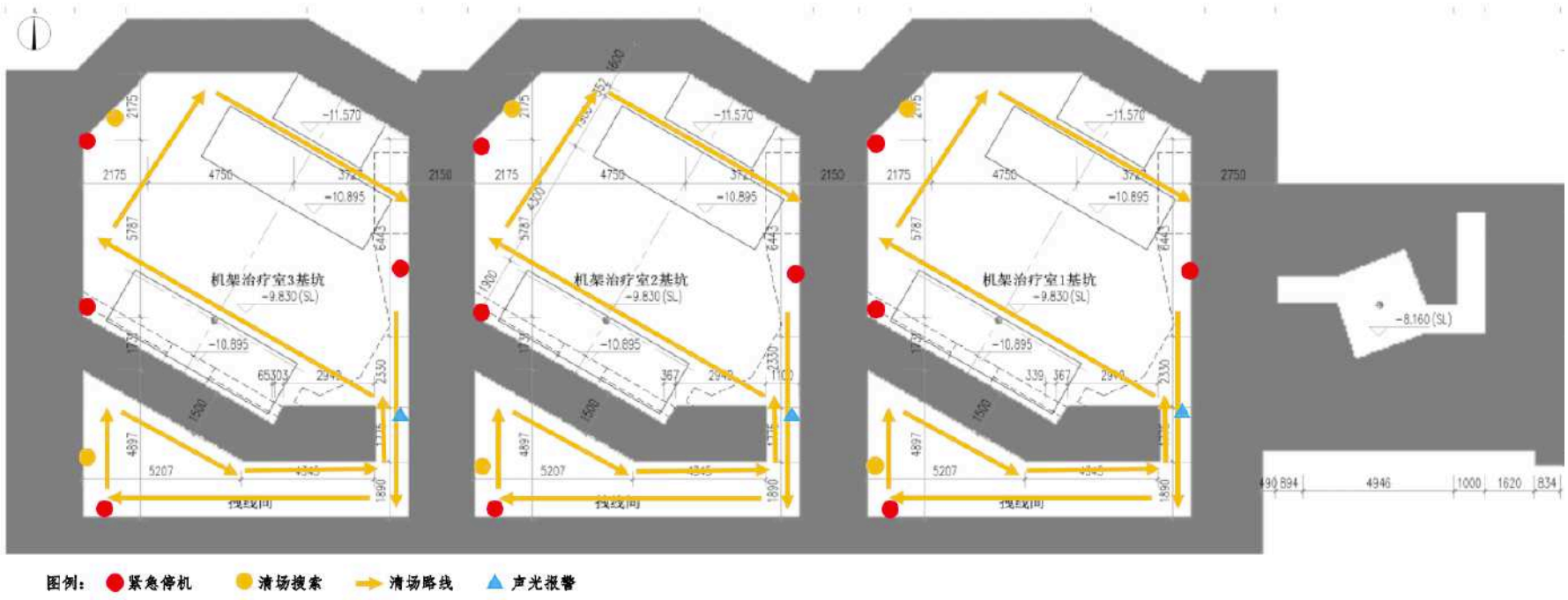


图 4-17 进口质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（基坑层）

表 4-3 进口质子治疗系统安全联锁设备数量表

区域		设备名称	设备数量，个
地下一层	加速器大厅	联锁门	1
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	6
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	2
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 2 台
	能选系统及束流运输线	联锁门	4
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	8
		清场搜索按钮	1
		声光报警装置	6
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗室 1	联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	7
		清场搜索按钮	1
		声光报警装置	1
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗室 2	联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	7
		清场搜索按钮	1
		声光报警装置	1
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗室 3	联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	7
		清场搜索按钮	1
		声光报警装置	1
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	加速器主控室	紧急停机按钮	1
	治疗室 1 控制室	紧急停机按钮	1
	治疗室 2 控制室	紧急停机按钮	1
	治疗室 3 控制室	紧急停机按钮	1

基坑层	治疗室 1	紧急停机按钮	4
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	1
	治疗室 2	紧急停机按钮	4
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	1
	治疗室 3	紧急停机按钮	4
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	1

4.1.4.1.4 安全联锁逻辑

进口质子治疗系统安全联锁系统逻辑图见图 4-18，系统允许开机的逻辑图见图 4-19。

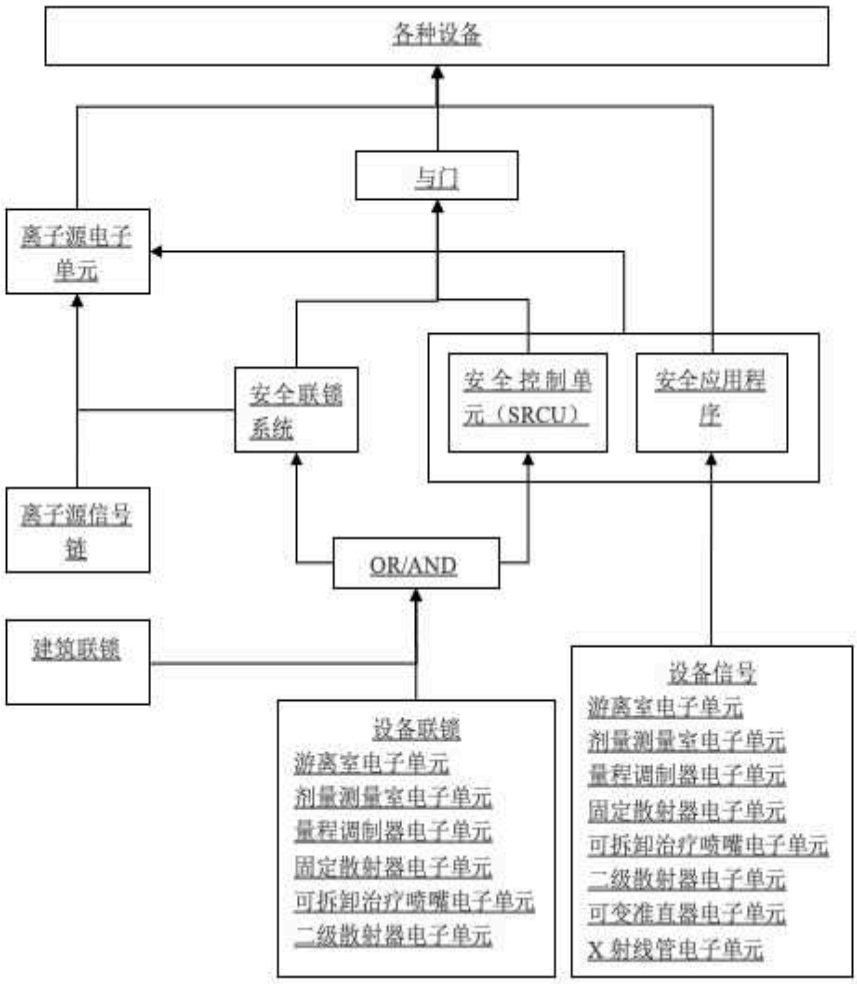


图 4-18 进口质子治疗系统安全联锁逻辑图

允许开机出束的逻辑如下：

（1）加速器大厅和需要使用的治疗室内清场搜索按钮按一定顺序全部按下；

（2）加速器大厅和需要使用的治疗室内的急停按钮全部复位；

（3）加速器大厅控制室内钥匙面板上的主控钥匙全部归位并旋转至“ON”。

（4）控制区出入口的门全部处于关闭状态；

（5）获得治疗室内医生发出的允许开机的指令。

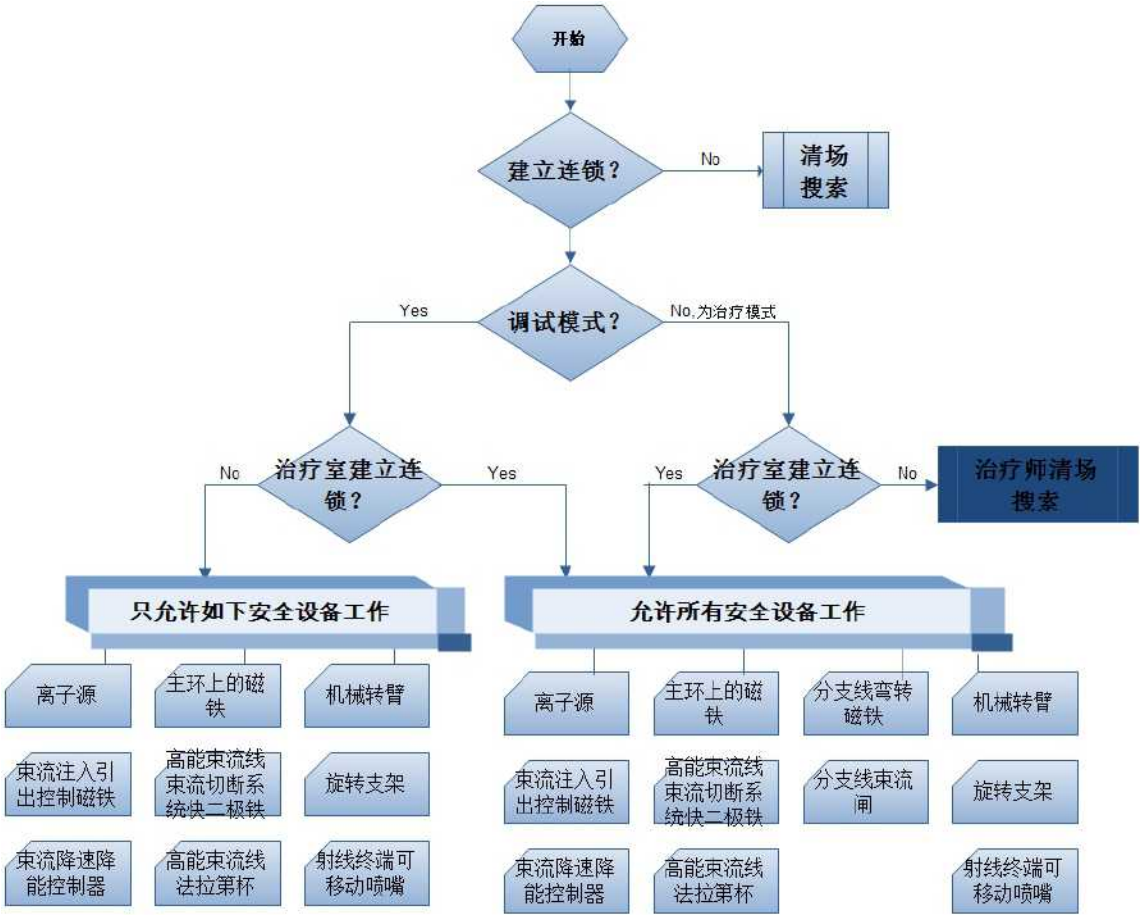


图 4-19 进口质子治疗系统允许开机的逻辑图

4.1.4.1.5 工作流程

4.1.4.1.5.1进入加速器大厅和治疗室的流程

（一） 进入加速器大厅的流程

本项目辐射工作人员不会进入加速器大厅，只有进口加速器系统的厂家工程师方可进入。厂家工程师进入回旋加速器区的流程如下：

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

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

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

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

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

（二）进入治疗室流程

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

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

（3）根据之前设定的治疗计划，治疗结束后，治疗头内的束流闸自动落下，切断束流。

（4）根据质子治疗装置自身系统设置，各治疗室之间相互独立，即当某一个治疗室正在治疗期间，其他治疗室人员的进出不会对该治疗室的束流造成影响。

4.1.4.1.5.2维修维护流程

进口质子治疗系统的维护维修工作由厂家工程师负责，医院不参与维护维修工作。相关内容在厂家销售（含建造）和使用质子治疗系统的环评文件中描述并评价，本章节仅做简要介绍。

维修维护阶段的安全联锁设计与质子设备开机启动前的安全联锁检查流程相同。在维修维护阶段，设备切换到维修模式，厂家工程师拔走加速器主控室钥匙，设备无法出束。若出现故障，可由系统自动或工作人员手动触发安全联锁。根据离子源信号与安全联锁系统所有的建筑联锁、设备联锁、设备信号、安全控制单元、安全应用程序相连，任何联锁均可直接触发离子源控制单元，离子源被切断，设备无法出束。维修完毕后按照启动流程，重新进行清场搜索，搜索完所有区域，再将系统切换到正常模式，方可重新治疗。

质子治疗系统维修的主要内容如下：

（1）设备维修时，厂家工程师应严格遵守操作系统屏幕提示，按照设备维修调试规程中的步骤进行操作；

（2）厂家工程师到现场进行维修服务时，首先与操作人员进行现场沟通，了解故障现场，初步判断故障类型和原因；

（3）初步判断故障原因后，厂家工程师在控制室的监控计算机上进入操作系统内，调出操作日志文件，参照日志文件中的报错信息，确定故障位置和故障原因。常见的故障包括软件故障和硬件故障，如通讯故障、软件冲突、水冷过温、水压不足、机器无法出束、束流状态监视器无数据等。

（4）厂家工程师针对故障种类和出现故障的区域，制定维修方案：

① 初步判断能够通过远程解决的问题。设备操作系统包括自动模式和“Service 模式”，自动模式即正常的治疗模式，Service 模式是仅允许被授权的人员进入维修的模式。厂家工程师通过 Service 模式进入操作系统后台，进行软件的调试或对系统局部进行操作，确认设备恢复正常后返回自动模式。

② 对于不可远程解决的问题，厂家工程师需进行现场检修。厂家工程师在现场维修时，当需要进入加速器大厅或治疗室内部时，厂家工程师应告知厂家现场负责人，由厂家现场负责人安排相关人员切断该区域的束流或停机后，且满足下述“准入条件后”， 厂家工程师方可按照人员出入流程进入加速器大厅或治疗室内部，进入控制区必须佩戴个人剂量报警仪。

a. 对于加速器大厅，当不需要打开加速器上、下盖进行检修时，加速器停机通风至少 1h 后，且根据实时剂量率监测数据判断大厅内辐射剂量率水平低于 100μSv/h，方可进入加速器大厅内部进行工作；当需要打开加速器上、下盖进行检修时，或其他涉及辐射水平较高区域的工作，如准直器维修，动量、能量限制器的维修，电离室更换，降能器维修和更换等，应确保加速器停机冷却 24 小时，停机后至少通风 1h 后，利用便携式 X-γ 剂量率仪对加速器内部设备表面的剂量率水平进行监测，确保其低于 1mSv/h 后方可进入工作。若监测结果高于 1mSv/h，则对热点区域采用加盖铅块等措施，直至热点区域周围剂量率低于 1mSv/h 后，方可进入工作。

b. 对于治疗室，一般在束流切断 5min 后，治疗室内剂量率水平低于 5μSv/h 后方可进入工作。

③ 维修过程中需要更换备件时，厂家工程师直接与厂家技术专家联系，并由公司售后服务部通过公司内部通讯系统发送备件申请至总部，最终确认所需要的备件。备件送到后，由医院按照装置的报关和运输程序直接送至使用现场。维修过程中更换下的旧备件由医院统一进行处理。

（5）维修完成后的临床调试验证

a. 对于软件、电路板、水冷系统、空气管路等的故障维修，维修完成后，厂家工程师在控制室内开机，切断高压出束，检查机器无报错信息后，交付医

院使用；

b. 对于降能器、束流聚焦、束流调节等方面的故障维修，维修完成后，经“清场搜索”程序确认相应控制区内无人停留后，厂家工程师在控制室内开机并出束，检查机器无报错信息后，交付医院使用。

4.1.4.2 国产质子治疗系统

4.1.4.2.1 设计原则

国产质子治疗装置人身安全联锁系统设计时，遵循以下原则：

（1）对人员的保护动作基于区域的状态；

（2）安全系统是与中央控制系统相对独立的，是冗余和失效安全的；

（3）对工作人员的剂量管理和人身保护。

4.1.4.2.2 系统结构和功能

安全联锁系统主要由控制器、现场设备和网络通信部分组成。其中控制器是实现联锁逻辑的核心部分，完成通道门与挡束设备以及各种现场报警装置的联锁控制。并能可靠及时的与加速器控制系统、现场剂量监测设备进行通讯。

安全联锁系统的目的是为了避免人员接近工作中的回旋加速器和束流管线，或者避免在这些区域有人时，给这些区域提供束流；即使在加速器停止供束期间，如果该区域辐射剂量超标，也不允许人员进入。

该系统由现场层、可编程控制器和上位计算机等主要设备组成，与剂量监测以及厂房安全门等系统配合形成典型的三层监控系统，见图 4-20。

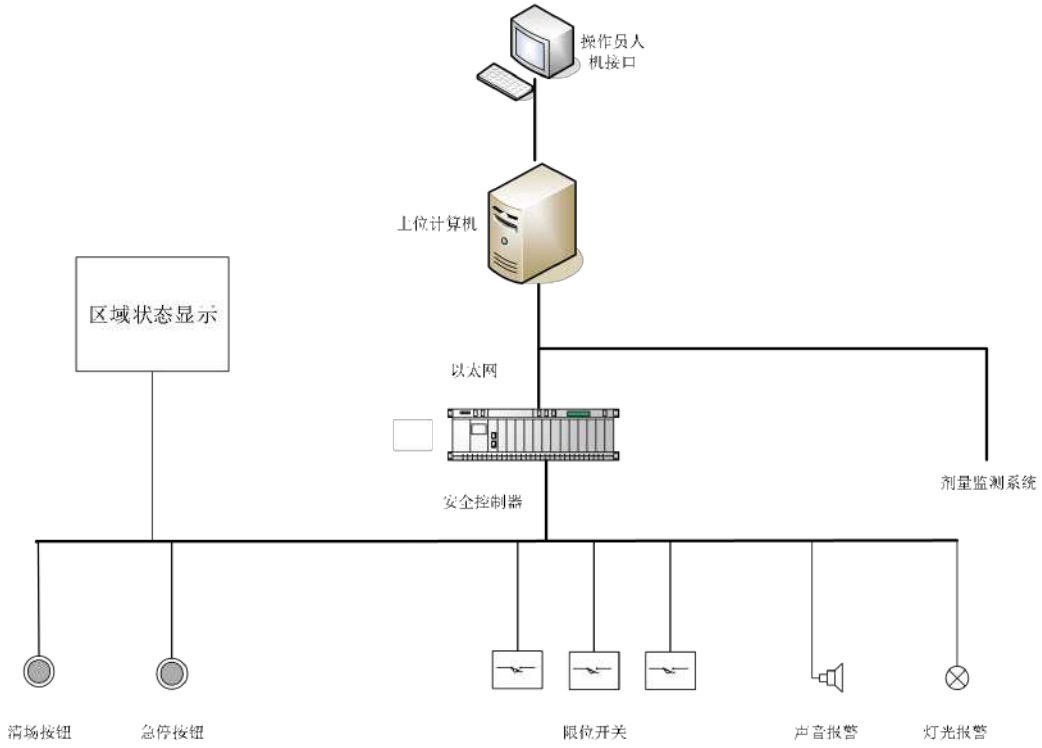


图 4-20 国产质子治疗系统安全联锁系统示意图

4.1.4.2.3 系统组成

国产质子治疗装置的人身安全联锁系统主要由钥匙系统、门限位开关、急停按钮、紧急开门按钮、清场搜索按钮、声光报警器等组成，安全联锁设备的布置点位及清场搜索路线见图 4-21 和图 4-22，具体数量见表 4-4。

4.1.4.2.3.1 钥匙系统

钥匙系统包括安全锁和安全钥匙。安全锁安装在防护门或者联锁门上，安全锁配合安全钥匙完成区域的进出控制，安全锁通常是机械或者机械-电子混合装置，具备锁定、内部释放等功能。

安全钥匙包括两类：

（1）一类钥匙在控制台使用，为加速器主控联锁钥匙。该联锁钥匙在加速器停机时锁住控制装置，避免未授权的人员开机运行。控制台钥匙面板设置“开”和“关”两种状态，在控制台上必须将该钥匙授权，将加速器钥匙设置到“开”的状态下安全系统才能允许开机。

（2）另一类钥匙是维修钥匙——在加速器厅入口处有钥匙交换箱，交换箱上有若干把维修钥匙。

当加速器停机后工作人员需进入加速器机房内部工作时，需先将加速器主控钥匙旋转至“关”的状态，拔下加速器主控钥匙后，用该钥匙取出交换箱中的一枚维修钥匙打开机房联锁门。工作完成从机房出来后，只有当所有的维修钥匙都插回钥匙箱中，加速器主钥匙插回控制台上，并旋转至“开”的状态后，才能允许出束。同时在中央监控计算机上显示主钥匙的位置信息。主控钥匙可由国产质子设备安全员保管，仅授权给有权限的人员使用。

4.1.4.2.3.2门限位开关

回旋加速器联锁门上安装有安全门限位开关两个，只有当两个位置开关全部到位，才能确认门的位置。门位置信息通过安全 PLC 送入终端监控计算机中显示。门限位开关的作用是保证防护门一旦离开关闭位置就切断束流。

4.1.4.2.3.3急停按钮

急停按钮设计为红色且位置比较醒目，在加速器和输运线隧道区、主控室、2 间治疗室及其控制室、质子科学实验室均设有急停按钮，发生紧急情况时，可按下急停按钮切断束流。正在运行的质子治疗装置内任意一个急停按钮被按下时将停止束流，同时将信号传送至安全 PLC，安全 PLC 将切断其他束流控制设备，并通过声光报警装置和上位界面通知运行人员，提醒危险区域内的人员能及时退出该机房。急停按钮具有明确的操作位置和可动复位功能，在未经手动复位时，在其他地方无法复位此处被按下的急停按钮，也不能在控制台复位。只有当所有引发急停事件的按钮被复位后，才有可能使加速器运行。

4.1.4.2.3.4紧急开门按钮

在加速器机房的迷道出入口防护门内、2 间治疗室的迷道出入口防护门内、质子科学实验的出入口防护门内设置紧急开门装置，如果在清场完成后仍有工作人员滞留在厅内，可通过该装置紧急打开防护门，离开危险区域。

4.1.4.2.3.5声光警示灯

在加速器大厅、2 间治疗室和质子科学实验室内均设置声光报警装置，一旦有人员按下急停按钮，发生紧急停机事件，红色警报灯亮起，同时蜂鸣器发出警报声（开机警告和急停警告为长鸣）。

加速器启动出束前，如果清场程序开始，加速器门口和机房内报警灯亮起（报警灯呈现红色表示加速器运行禁止进入），同时报警扬声器持续长鸣一段时间，提示附近的工作人员该机房内准备开机或出束。

4.1.4.2.3.6摄像头和对讲装置

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

每间治疗室内设置双向患者监测对讲系统，即在治疗室内设语音激活或连续接通的对讲机，控制室的控制台上设有对讲按钮，确保治疗期间，控制室内的医护人员可通过该对讲按钮与治疗室内的患者进行实时交流。

4.1.4.2.3.7清场搜索

每次开机前，如果加速器机房已经打开，工作人员需要对加速器机房进行清场，防止有人员滞留在机房内。工作人员需要按照事先设定的清场顺序在规定的时间内依次按下清场搜索按钮，确定机房内没有人员滞留后，退出机房，关闭联锁门，完成清场流程。控制台显示终端界面处显示“已清场”状态。对于完成清场后一直保持“已清场”状态的机房，在下次出束调试前不用再进行清场搜索。

装置共设置 8 个控制子区，其中：

（1）加速器和输运线隧道设置 1 个子区，包括基坑区和地下一层的加速器和输运线隧道区；

（2）治疗室 4 和治疗室 5 个分别设置 3 个子区，即基坑区、地下一层治疗区和设备检修区；

（3）质子科学实验室设置 1 个子区，即地下一层实验区。

上述 8 个子区的清场状态相互独立，每个子区设搜索时间窗限制和搜索顺序，如在清场过程中相邻按钮按下的间隔超过时限，或整个区域的清场超出时限，则本次清场失效，清场人员必须重新开始进行清场。其中：

（1）加速器和输运线隧道区的清场搜索从加速器主入口进入，工作人员需要按照事先设定的数字顺序（①至⑨）在规定的时间内依次按下清场搜索按钮，确定机房内没有人员滞留后，退出机房，关闭联锁门，完成清场流程。具体的清场搜索按钮设置和清场路线见图 4-21 和图 4-22。

（2）治疗室 4 和治疗室 5 分别设置 3 个子区，清场搜索统一从治疗室入口进入，清场搜索顺序遵循从基坑区至治疗区至检修区顺序，工作人员需要按照事先设定的数字顺序（①至④）在规定的时间内依次按下清场搜索按钮。具体的区域划分、清场搜索按钮设置见图 4-21 和图 4-22。

（3）质子科学实验室的清场搜索从实验室入口进入，工作人员需要按照事先设定的数字顺序（①至④）在规定的时间内依次按下清场搜索按钮。具体的清场搜索按钮设置和清场路线见图 4-21 和图 4-22。

4.1.4.2.3.8 束流中断系统

束流中断系统包括离子源垂直偏转板、高频系统和输运线上法拉第筒，当不满足出束条件时，安全联锁系统禁止输出，这些设备阻挡或者停止束流。

4.1.4.2.3.9 其他

质子治疗区还设置有烟雾报警器，一旦检测到有烟雾产生立即发出警报，报警时主控制系统有声光提示，提醒人员尽快采取相关措施并撤离现场。

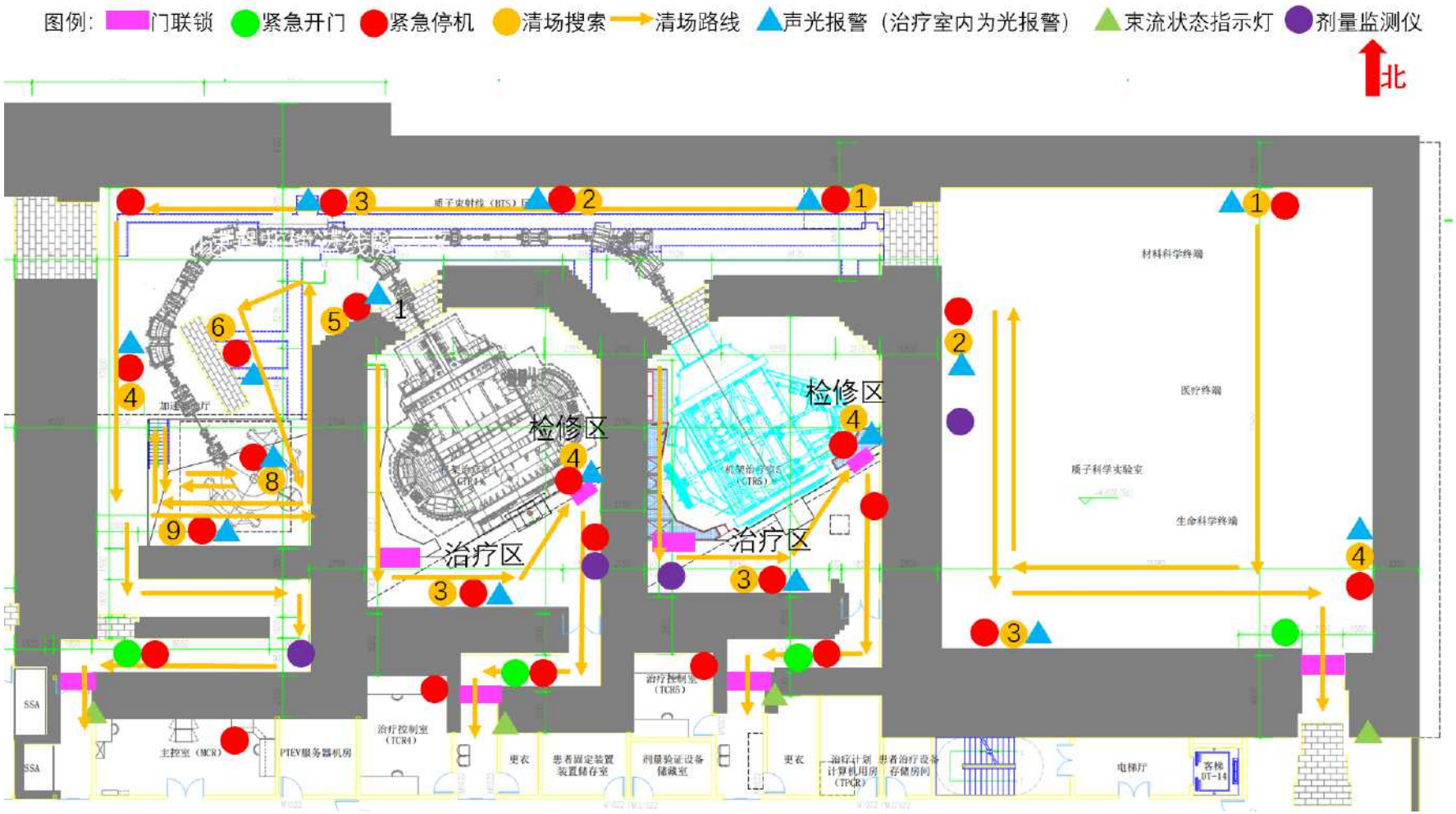


图 4-21 国产质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（地下一层）

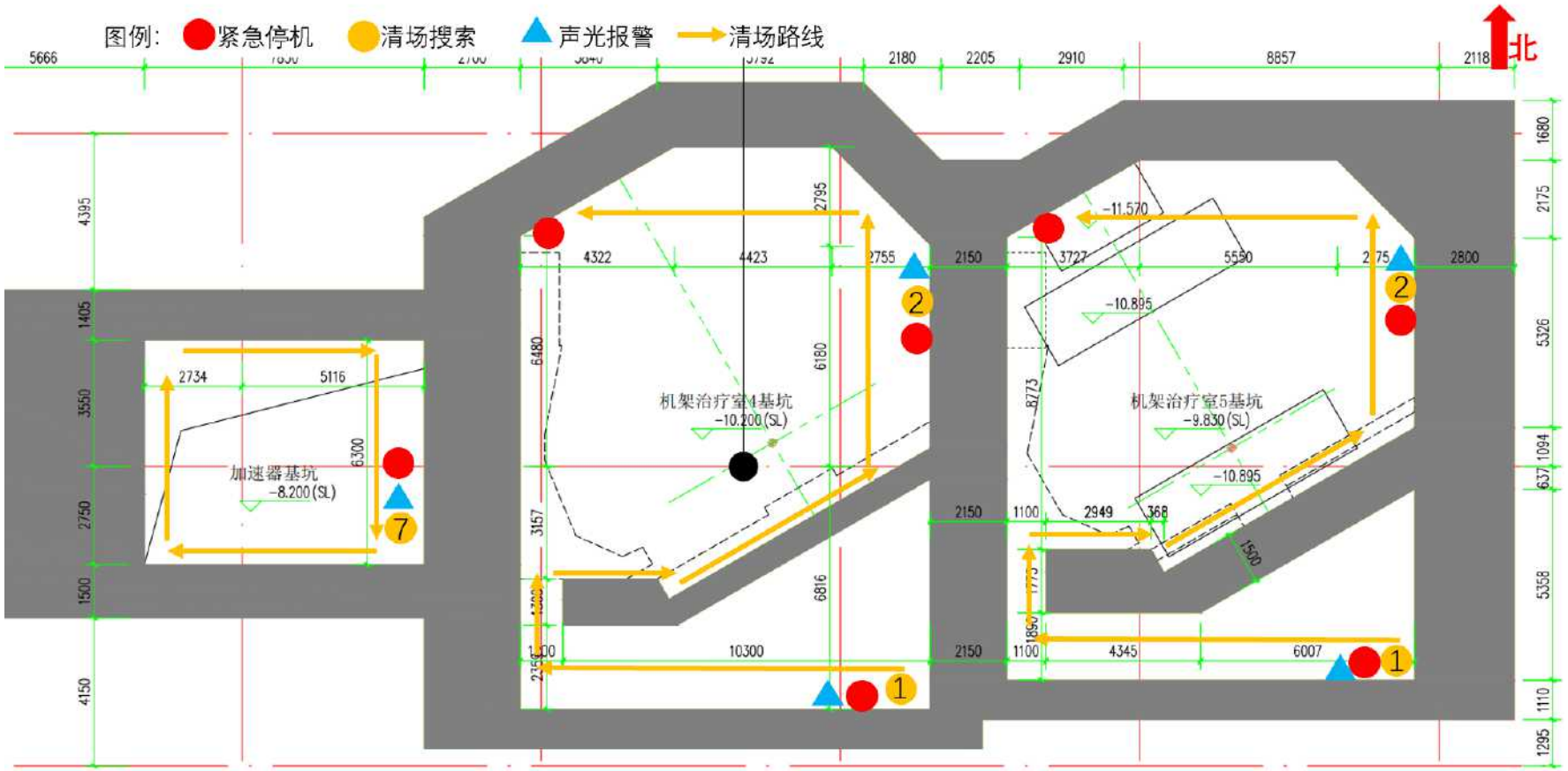


图 4-22 国产质子治疗系统安全联锁设施分布点位及清场搜索路线示意图（基坑层）

表 4-4 国产质子治疗系统安全联锁设备数量表

区域		设备名称	设备数量，个
地下一层	加速器大厅及束流输运线	联锁门	1
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	10
		清场搜索按钮	8
		声光报警装置	8
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗室 4	联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	4
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	2
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	治疗室 5	联锁门	3
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	4
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	2
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	质子科学实验室	联锁门	1
		紧急开门按钮	1
		紧急停机按钮	4
		清场搜索按钮	4
		声光报警装置	4
		束流状态指示灯	1
		γ 探测器及中子探测器	各 1 台
	加速器主控室	紧急停机按钮	1
	治疗室 4 控制室	紧急停机按钮	1
	治疗室 5 控制室	紧急停机按钮	1
基坑层	加速器	紧急停机按钮	1
		清场搜索按钮	1
		声光报警装置	1
	治疗室 4	紧急停机按钮	3
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	2
	治疗室 5	紧急停机按钮	3
		清场搜索按钮	2
		声光报警装置	2

4.1.4.2.4 安全联锁逻辑

（1）开门流程

开门流程指的是加速器在开机或者停机情况下，所有进入加速器厅的门都在关闭情况下，工作或者运行人员进入该区域时，引发系统或者设备的动作，见图4-23。

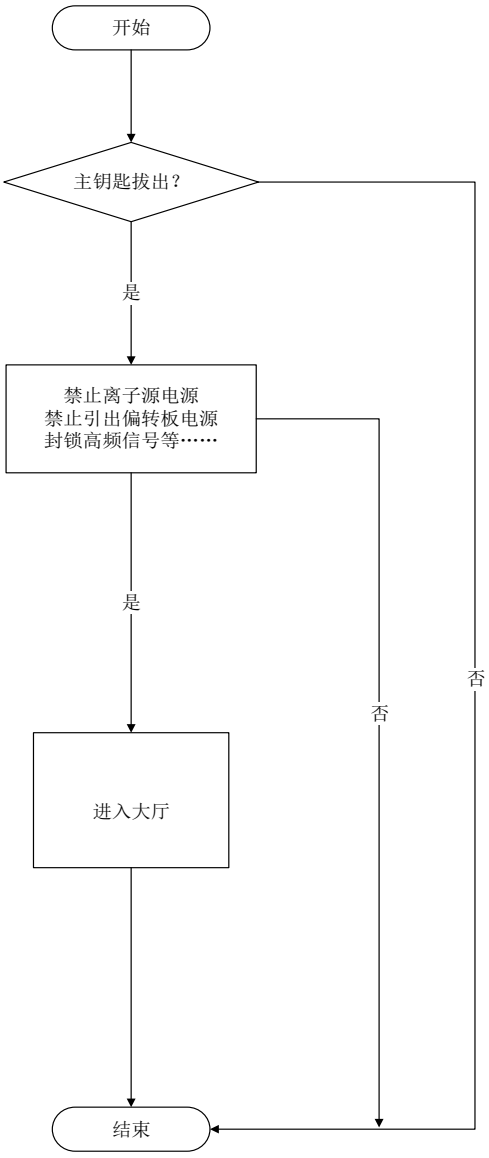


图 4-23 国产质子治疗系统开门流程图

在加速器停机后，人员进入大厅之前，首先拔出主钥匙，加速器无法供束。运行人员持有主控钥匙后，在要进入大厅的门口，置换出维修钥匙后，用维修钥匙打开防护门，进入该区域。

（2）清场关门流程

在运行人员在厅内完成维修工作后，要进行清场巡视，必须在本区域完成清场工作，才能为本区域供束或者开机。

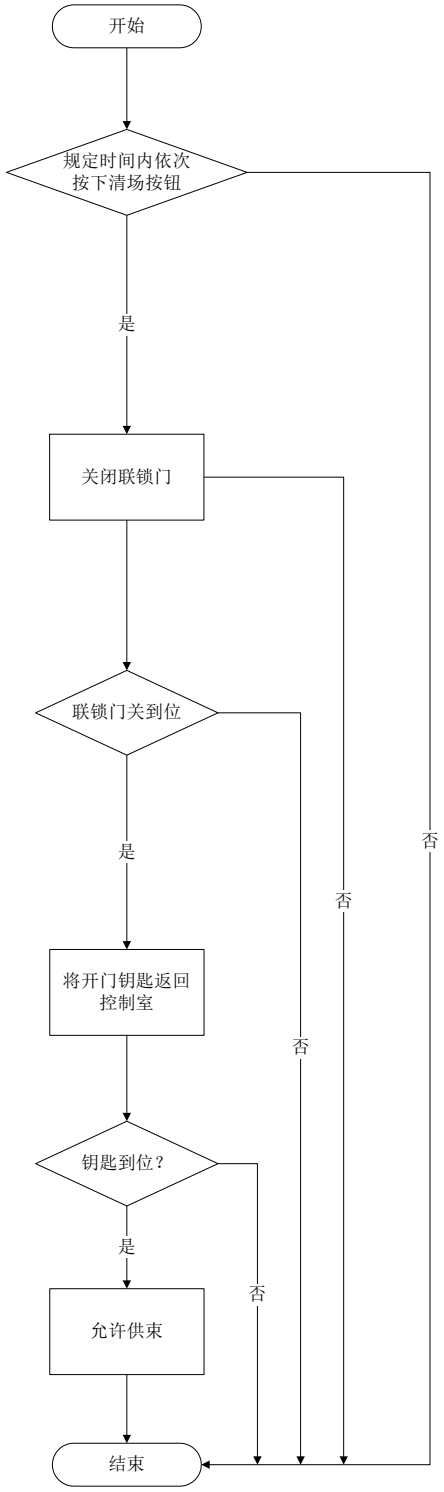


图 4-24 国产质子治疗系统清场逻辑图

只有在清场流程完成后，该区域才具备供束条件，如果未供束时，人员进入了该区域，则需要重新进行清场。清场完毕后，在门口显示屏上显示当前状态。

（3）急停流程

当运行人员在控制室或者大厅内按下紧急停机按钮后，将触发一系列动作，停止该厅内的束流供应。

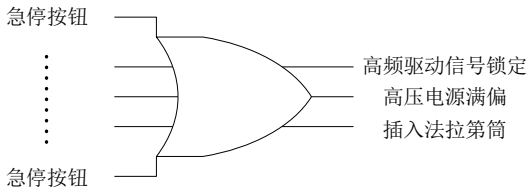


图 4-25 急停按钮工作关系图

在急停按钮被拔起后，必须经过操作人员确认，经过清场后，才能继续给该区域进行供束，并在服务器内记录该事件。

4.1.5 场所辐射监测系统

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、安全冗余控制单元、内部局域网、监控计算机、中心管理计算机组成，如图 4-26 所示。探测器用于测量辐射水平；安全冗余控制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；中心管理计算机即为中央控制室，用于实在对整个辐射监测系统进行实时数据观测、控制。

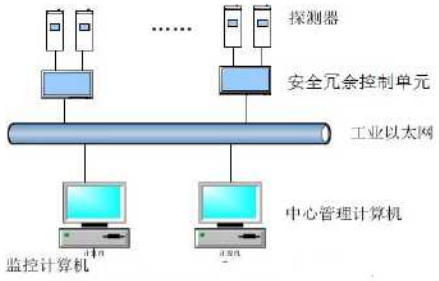


图 4-26 质子治疗系统辐射监测系统结构

固定安装的探测器的安装位置一般在质子治疗系统安装完成后，根据实际的剂量水平确定。一般分布在加速器厅的入口、治疗室迷道等人员常驻区域，同时在设备周围设置若干监测点位，以监测周围环境辐射水平变化。场所辐射监测点位如图 4-16 及图 4-21 所示，每个监测点由一台中子探测器和 γ 探测器组成，控制室内设置监测剂量数值显示装置。根据各监测点剂量水平和中子能量选择不同灵敏度的辐射探测器。主要功能是确定参考点的辐射水平，测定加速器的工作场所和周围环境中的辐射水平，保证工作人员和公众的安全，验证屏蔽措施的可靠性，防止辐射泄漏造成环境污染。

4.1.6 通风系统

质子治疗区的回旋加速器区、束流输运区、各治疗室和质子科学实验室均设计了通风系统。通风系统采用直接数字式监控系统（DDC），由中央电脑及终端设备加上若干 DDC 控制盘组成，在空调控制中心能显示空调、通风等各系统设备的运行状态及主要运行参数，并进行集中远距离控制和程序控制。各区域通风管道的布局如图 4-28~图 4-32 所示，通风系统的设计参数见表 4-5。各治疗室换气次数均大于 4 次/h，符合 GBZ 121-2020 的相关要求。质子治疗各区域的感生放射性气体通过排风系统统一通过屋顶总排风口排放到室外，正常运行情况下不会对室内人员造成明显的辐射影响。

（1）进口质子治疗系统

进口加速器区和束流传输区连通，为一个区域，每个治疗室均为一个区域。二层南侧空调机房负责加速器区、束流传输区和治疗室的送风。进口质子治疗区的排风机设置于门诊楼的楼顶，见图 1-7，排风高度约为 15m。

在紧急情况下，工作人员若要进入加速器大厅，进入之前加速区和束流传输区的通风系统换气次数切换到 12 次/h，同时加速器控制室可以监测通风系统运行状态，待满足通风时间要求后方可进入加速器大厅。

（2）国产质子治疗系统

国产加速器区和束流传输区连通，为一个区域，治疗室 4、治疗室 5 和质子科学实验室分别为独立的区域，以上 4 个区域分别设置新风空调，均位于质子中

心地上一层的空调机房内，国产加速器区和束流传输区、治疗室 4 和治疗室 5 的送风管和排风管均采用从迷道吊顶层接入的方式引入各机房。

国产加速器区和束流传输区、治疗室 4 和治疗室 5、质子科学实验室的排风机房位于质子中心地上二层的排烟机房，排风管道在该机房汇总后，经风井至实验楼屋顶高空排放，见图 1-7，排风口距地面约 17m。

在紧急情况下，工作人员若要进入加速器大厅，进入之前加速区和束流传输区的通风系统换气次数切换到 12 次/h。

通风管道穿墙采用 S 型曲路，均采用不锈钢套管包裹，避免了直穿，能有效控制通风管道孔的辐射泄漏，示意图见图 4-27。

不同工况均保证每个治疗室、加速器大厅、质子科学实验室的总排风量大于总新风量。质子治疗区气流组织形成有序的压力梯度，保证气流满足下列流向：质子工艺区外内走道→治疗室治疗区→治疗室机架区；质子工艺区外内走道→加速器大厅；实验准备洁净空间→质子科学实验室。

表 4-5 质子治疗区通风系统设计参数

区域名称		通风方式	气流走向	体积，m^3	送风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/h
进口加速器大厅和束流传输区		空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	1050	6700	7200	正常：6 应急：12
国产加速器大厅和束流传输区		新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	1610	9300	9700	正常：6 应急：12
治疗室1~3	治疗区	空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	175	1700	1400	8
	机架区	空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	1340	1500	2100	1
治疗室4	治疗区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	187.5	2200	1900	10
	机架区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	2175	2500	3100	1
治疗室5	治疗区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	187.5	1700	1400	8
	机架区	新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	1435	1500	2100	1
质子科学实验室		新风机送风+排风机排风	顶送风底排风	2665	3000	3400	1.3

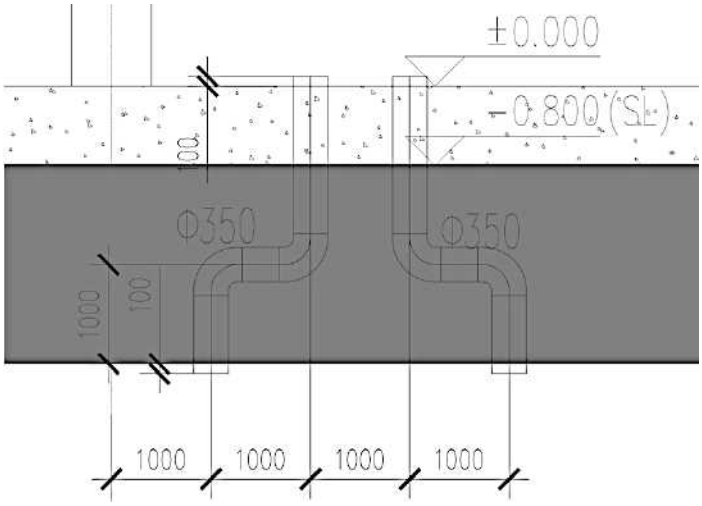


图 4-27 质子治疗系统风管穿墙示意图

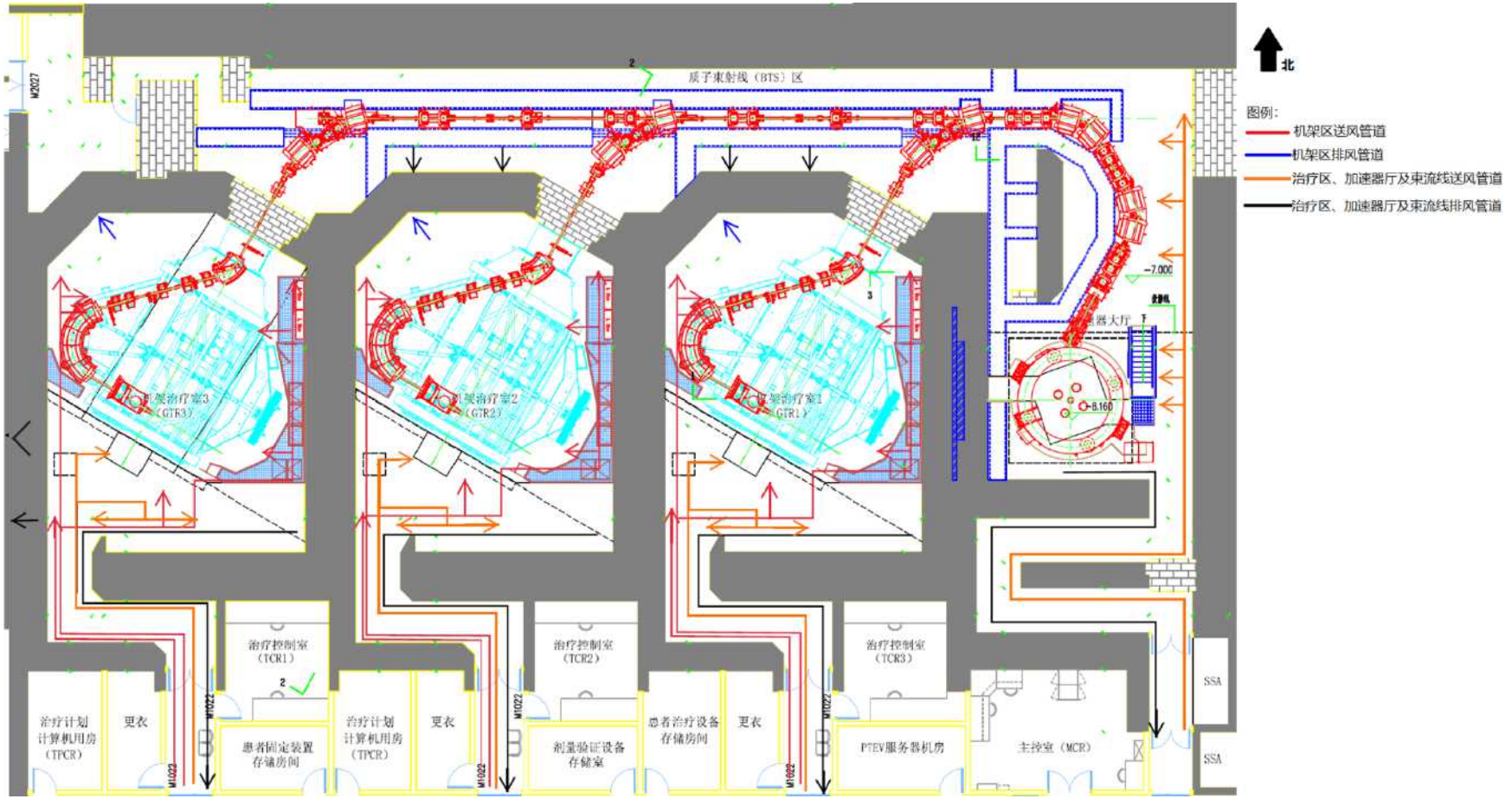


图 4-28 进口质子治疗系统送、排风管道走向示意图（地下一层）

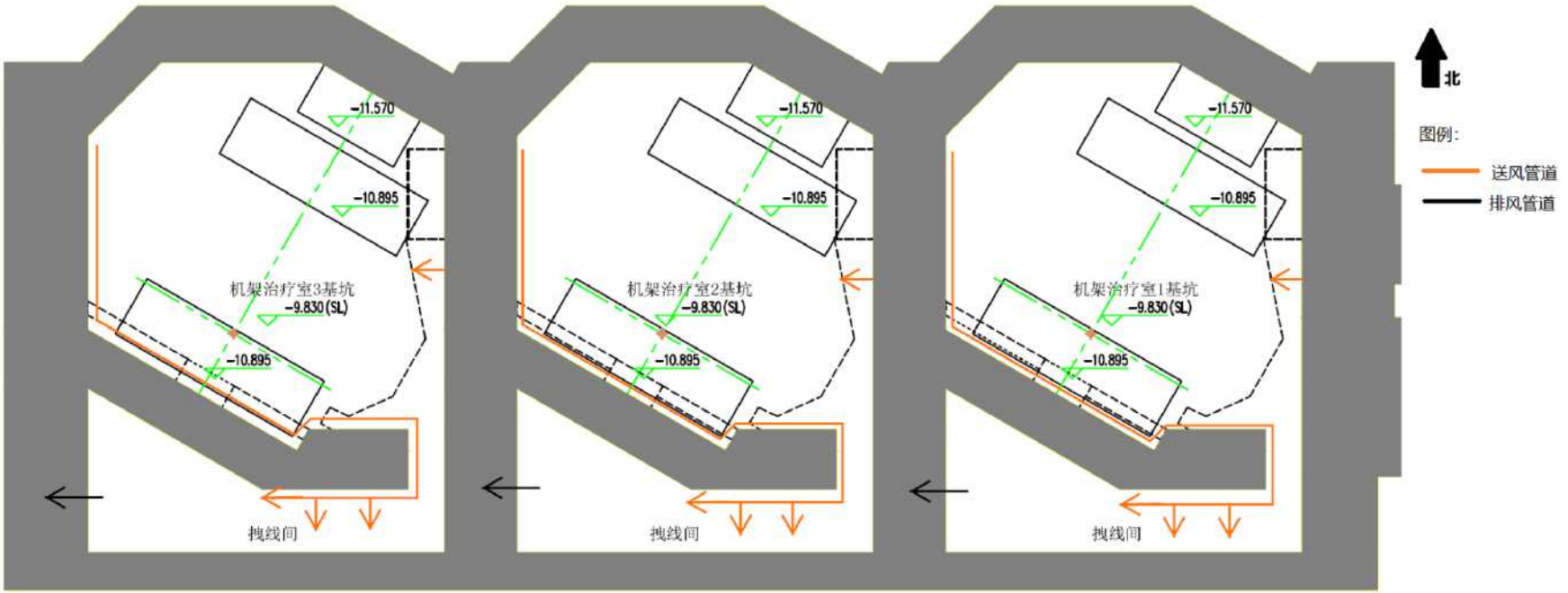


图 4-29 进口质子治疗系统送、排风管道走向示意图 （基坑）

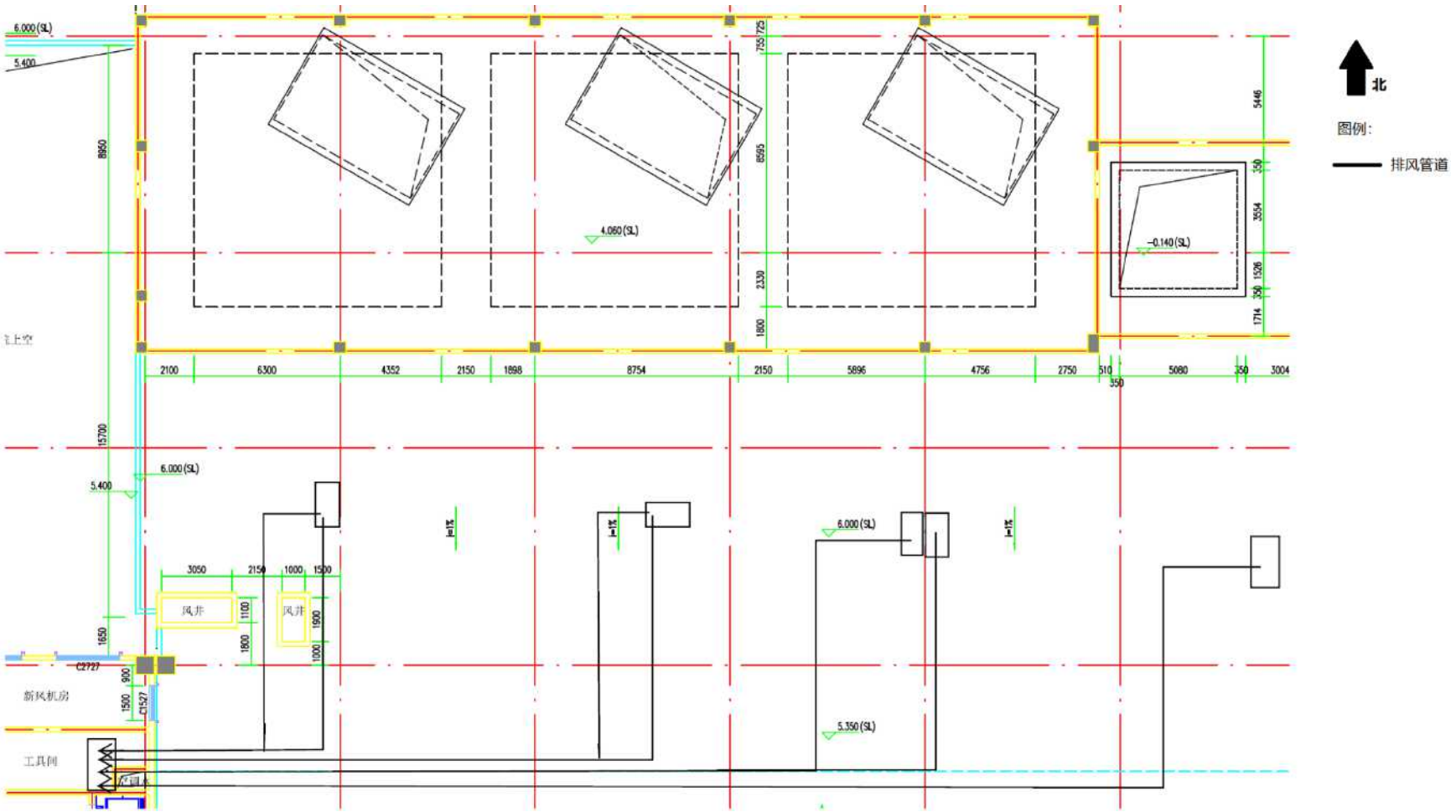


图 4-30 进口质子治疗系统送、排风管道走向示意图 （二层）

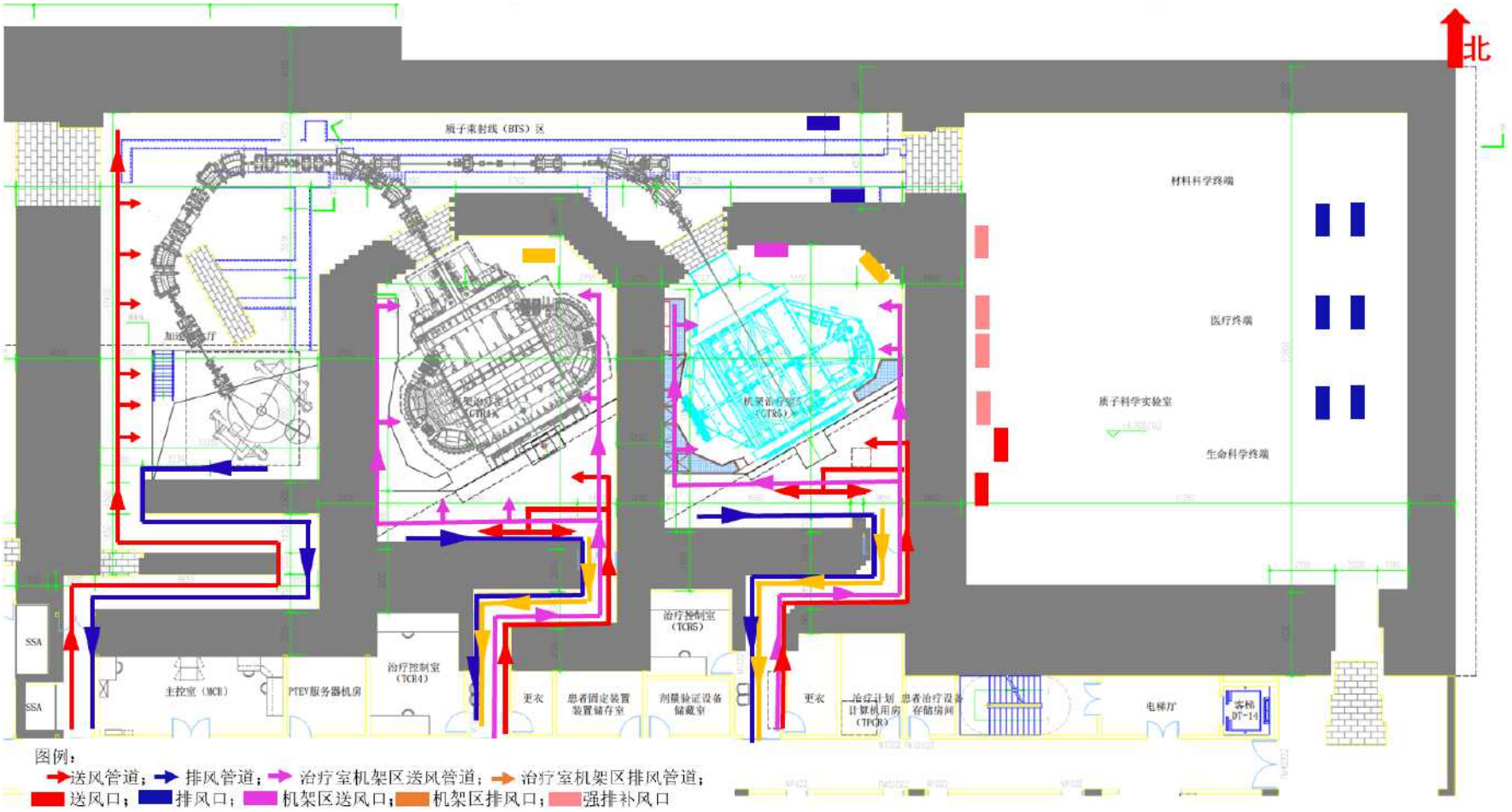


图 4-31 国产质子治疗系统送、排风管道走向示意图 （地下一层）

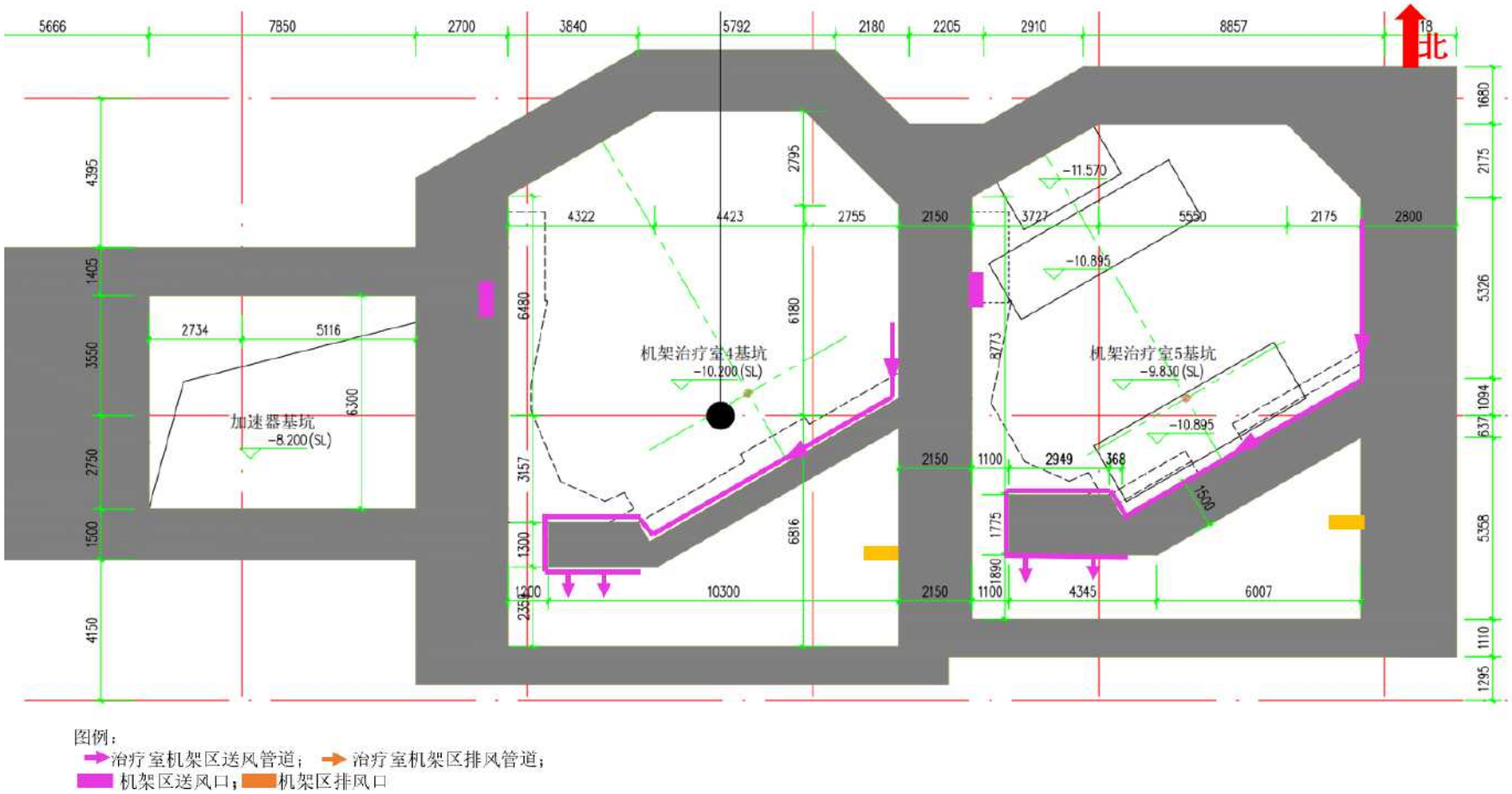


图 4-32 国产质子治疗系统送、排风管道走向示意图 （基坑区）

4.1.7 放射性三废处理

4.1.7.1 放射性废气来源及处理措施

（1）来源

根据第三章的分析，质子治疗系统运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为 ^{13}N（$T_{1/2}[^{13}N]$=9.965min）、^{15}O（$T_{1/2}[^{15}O]$=2.037min）、^{11}C（$T_{1/2}[^{11}C]$=20.39min）和 ^{41}Ar（$T_{1/2}[^{41}Ar]$=1.8h），产生量见表 3-25。

（2）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。质子治疗机房的治疗室和设备区均设有排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体由各区域屋面排入环境，年排放速率见表 3-28。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。

4.1.7.2 放射性废液来源及处理措施

（1）来源

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 3-29。除 ^{7}Be、^{3}H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变到较低的活度浓度水平。根据表 3-31 的计算结果，活化冷却水的饱和活度远低于表 1-11 中所列的相关核素豁免水平。

（2）处理措施

质子治疗装备运行期间，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修时才会排放，每年排放次数最多一次，排放的冷却水总体积为：进口质子区 4.95m^3、国产质子区 3.5 m^3。

控制区内部设置了若干地漏和集水坑，集水坑通过管道与地漏相连，用于暂存因检修排放或泄漏的活化冷却水。集水坑的总容积为：进口质子区 14 m^3、国产质子区 10m^3，因此质子治疗区集水坑的设置能够满足活化冷却水的暂存要求。集水坑具体情况见表 4-6、图 4-33 和图 4-34。

表 4-6 质子区集水坑设置情况表

区域	集水坑编号	集水坑有效容积，m^3	集水坑位置
进口质子区	集水坑 1	3	束流传输区西侧转运大厅
	集水坑 2	2	治疗室 2 北墙外
	集水坑 3	2	治疗室 1 北墙外
	集水坑 4	3	回旋加速器大厅
	集水坑 5	2	治疗室 3 机架区
	集水坑 6	2	治疗室 1 机架区
	总计	14	——
国产质子区	集水坑 7	3	回旋加速器大厅
	集水坑 8	3	治疗室 4 北墙外
	集水坑 9	2	治疗室 4 机架区
	集水坑 10	2	治疗室 5 机架区
	集水坑 11	2	质子科学实验室
	总计	10	——

每个集水坑上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.4.2 节”所列中放射性废水排放标准，方可排放。集水坑设有管道与医院污水管网相连，且配备手动启动的排水泵，需要排放时手动开启排水泵，通过管道将冷却水排入医院污水管网，经污水处理站处理后排入市政污水管网。每次排放需记录存档，记录废水来源、排放量、活度浓度监测结果、排放去向等信息。

综上所述，质子治疗系统正常运行时不会产生放射性废液，检修或发生泄漏的情况下可能排放的冷却水活度远低于排放限值。因此，放射性废液对环境的影响很小。

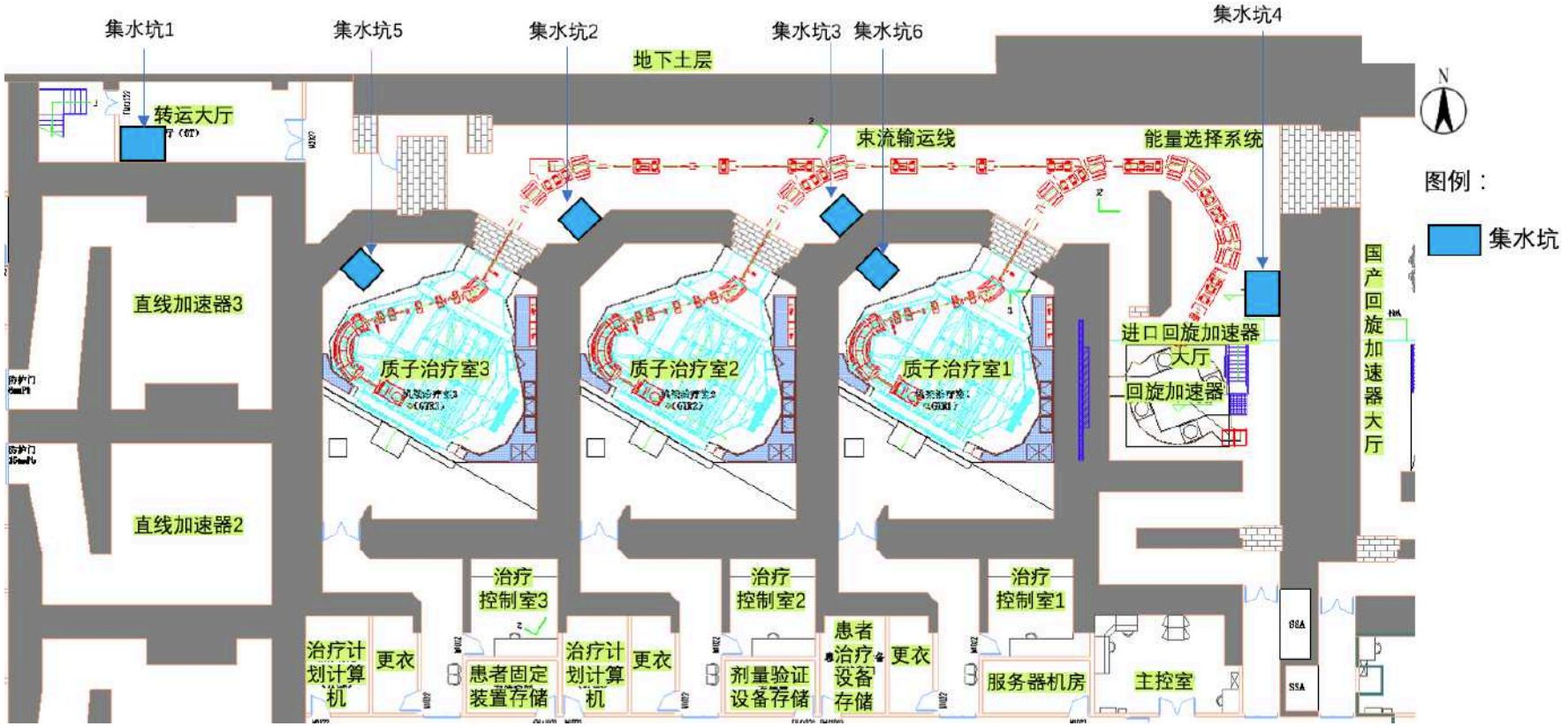


图 4-33 进口质子治疗系统集水坑位置示意图

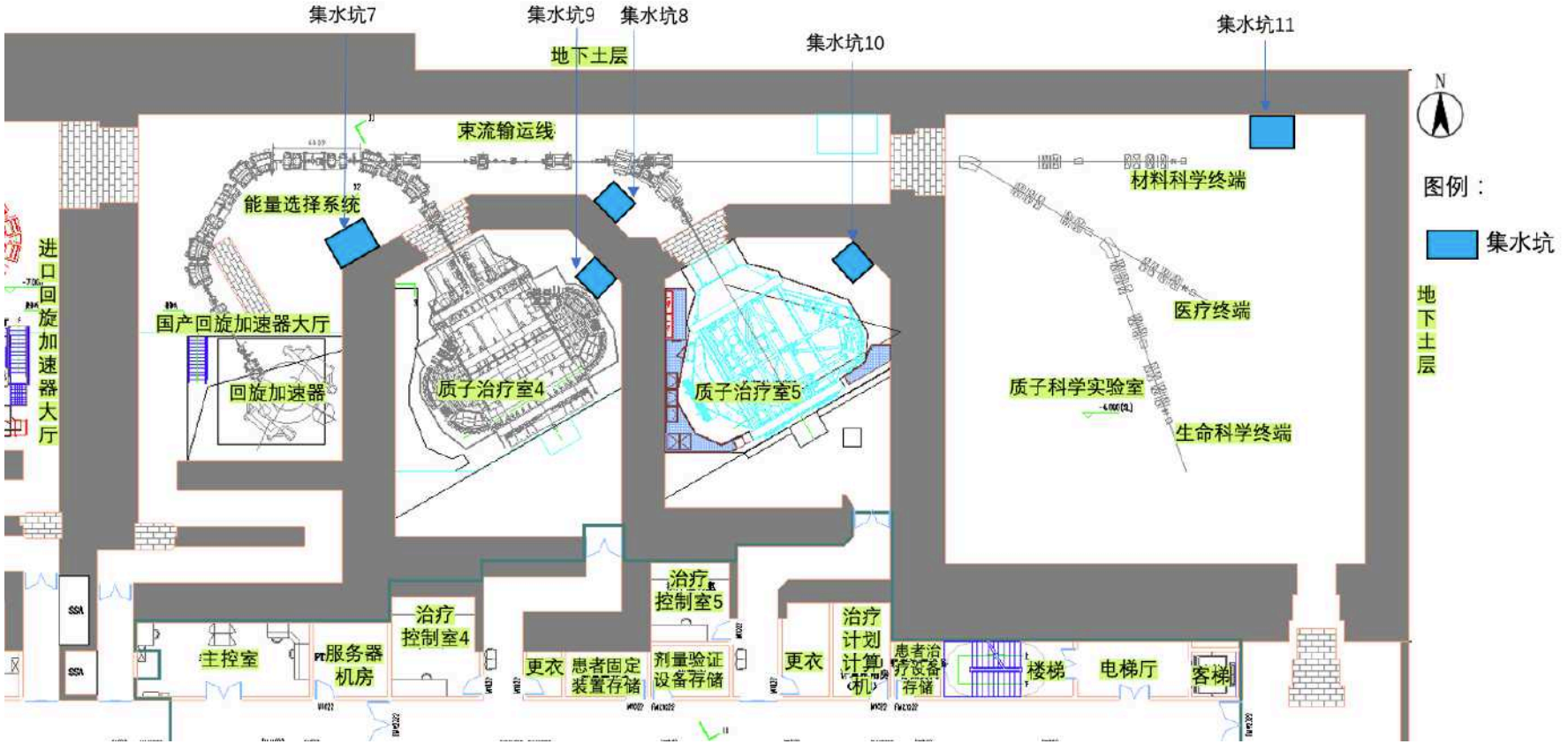


图 4-34 国产质子治疗系统集水坑位置示意图

4.1.7.3 放射性固体废物来源及处理措施

（1）来源

参照国外同类型质子治疗系统的运行经验，质子治疗系统产生的放射性固体废物主要为维护维修环节更换下来的一些易损易活化的结构部件。进口质子治疗系统产生的放射性固废为含感生放射性的结构部件、冷却水废离子树脂、加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等，为低放射性固废。按预计，含感生放射性的结构部件每年产生量小于 $1m^3$；冷却水废离子树脂每年产生量小于 $3m^3$；加速器检修维护时的手套、棉纱和口罩等每年产生量小于 $2m^3$。国产质子治疗系统主要的结构部件包括弯转磁铁、真空管壁及束流闸等，主要材质为铁和铜。在装置运行期间，这些结构部件会被活化，参考同类加速器运行情况，预计每年放射性固体废物产生量约为 $1m^3$。

产生的放射性固体废物的主要材料是钢、碳和镍，其主要的感生放射性核素及其半衰期列于表 4-7。停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是主要是 ^{54}Mn、^{51}Cr、^{52}Mn、^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。

表 4-7 活化结构部件主要感生放射性核素及其半衰期

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

（2）处理措施

医院对质子治疗系统产生的放射性固体废物分类收集和包装，结构部件的放射性活度浓度一般高于豁免水平，需要对拆卸下来的部件加强管理，进行辐射水平监测、登记，暂存在固体废物暂存桶中，经铅屏蔽容器转运至地下一层设备区的放射性固废暂存间暂存，具体位置见图 4-35，该房间作为控制区管理，设置门禁和摄像头监控，门口张贴电离辐射警告标志，禁止无关人员进入。

当储存间内废物暂存量接近容积的2/3时，由医院委托有资质单位进行检测分析：

1）对于满足“1.4.4.3 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，解控后冷却水去离子树脂按危险废物处理，其余按一般废物处理。

2）对于不满足“1.4.4.3 节”所列解控标准的，由医院委托有资质单位处理。

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



图 4-35 放射性固废暂存间位置示意图

4.2直线加速器

4.2.1 辐射工作场所分区

本项目在地下一层放射治疗区西北侧建设 3 间直线加速器机房，其辐射工作场所按控制区、监督区进行管理。其中加速器机房（含迷道）为控制区，机房控制室及四周相邻场所为监督区，如图 4-36 所示。

控制区管理要求：控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志，入口门和装置出束状态联锁，装置运行期间禁止进入。停机后进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

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

4.2.2 布局合理性分析

直线加速器机房所在的放疗中心集中设置于整个质子治疗大楼的地下一层西北角，机房地下为土层，周围无儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域或人员流动性大的商业活动区域。放疗机房均设置有迷道，控制室与机房分开，机房四侧屏蔽墙体及防护门外、屋顶上方无人员常居留场所。放疗中心除了直线加速器机房外还设置有制模室、模具室、质控室等功能用房，满足放射治疗的需求。该区域整体设置了物理隔离及相对独立的人员通道，防止无关人员进入，有利于辐射安全防护。该区域功能布局紧凑、动线合理、辐射屏蔽防护满足相关要求，总体布局是合理的。

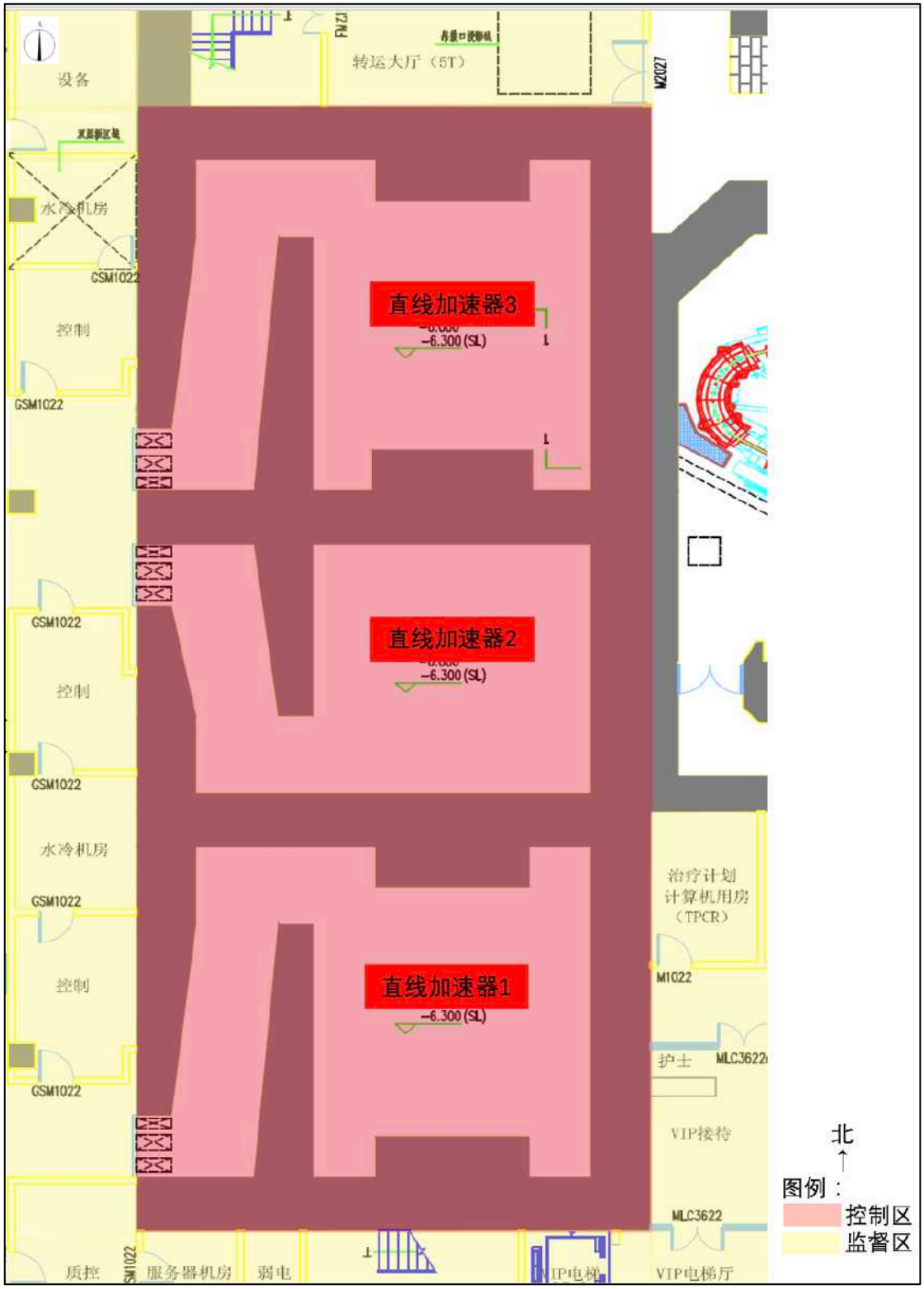


图 4-36 直线加速器机房辐射工作场所分区图

4.2.3 辐射屏蔽设计方案

本项目直线加速器机房的辐射屏蔽设计方案见表 4-8。

表 4-8 直线加速器机房的屏蔽设计及周围环境

机房名称	机房面积，m^2	位置	屏蔽设计	周围环境
直线加速器机房 1	84.8（不含迷道）	北墙	主屏蔽墙：3m 厚、4.4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器机房 2
		南墙	主屏蔽墙：3m 厚、4.4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	服务器机房、弱电间、楼梯间、电梯间
		西墙	迷道内墙：1.0m ~1.7m 混凝土 迷道外墙：1.0m ~1.7m 混凝土	水冷机房、控制室、走廊
		东墙	1.7m 混凝土	治疗计划计算机用房、走道、VIP 接待
		顶板	主屏蔽墙：3m 厚、4.4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	内庭院
		底板	0.8m 混凝土	土层
		防护门	15mm 铅	走道
直线加速器机房 2	63.7（不含迷道）	北墙	主屏蔽墙：3m 厚、4.6 m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器机房 3
		南墙	主屏蔽墙：3m 厚、4.4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器机房 1
		西墙	迷道内墙：1.0m ~1.7m 混凝土 迷道外墙：1.0m ~1.7m 混凝土	走廊、控制室、水冷机房
		东墙	2.5m 混凝土	质子治疗室 3
		顶板	主屏蔽墙：3m 厚、4.4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	内庭院
		底板	0.8m 混凝土	土层
		防护门	15mm 铅	走道
直线加速器机房 3	84.8（不含迷道）	北墙	主屏蔽墙：3m 厚、4.4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	转运大厅
		南墙	主屏蔽墙：3m 厚、4.6m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	直线加速器机房 2
		西墙	迷道内墙：1.0m ~1.7m 混凝土 迷道外墙：1.0m ~1.7m 混凝土	水冷机房、控制室、走廊
		东墙	2.5m（局部 1.7m）混凝土	质子输运线、质子治疗室 3
		顶板	主屏蔽墙：3m 厚、4.4m 宽混凝土 次屏蔽墙：1.7m 混凝土	内庭院
		底板	0.8m 混凝土	土层
		防护门	15mm 铅	走道

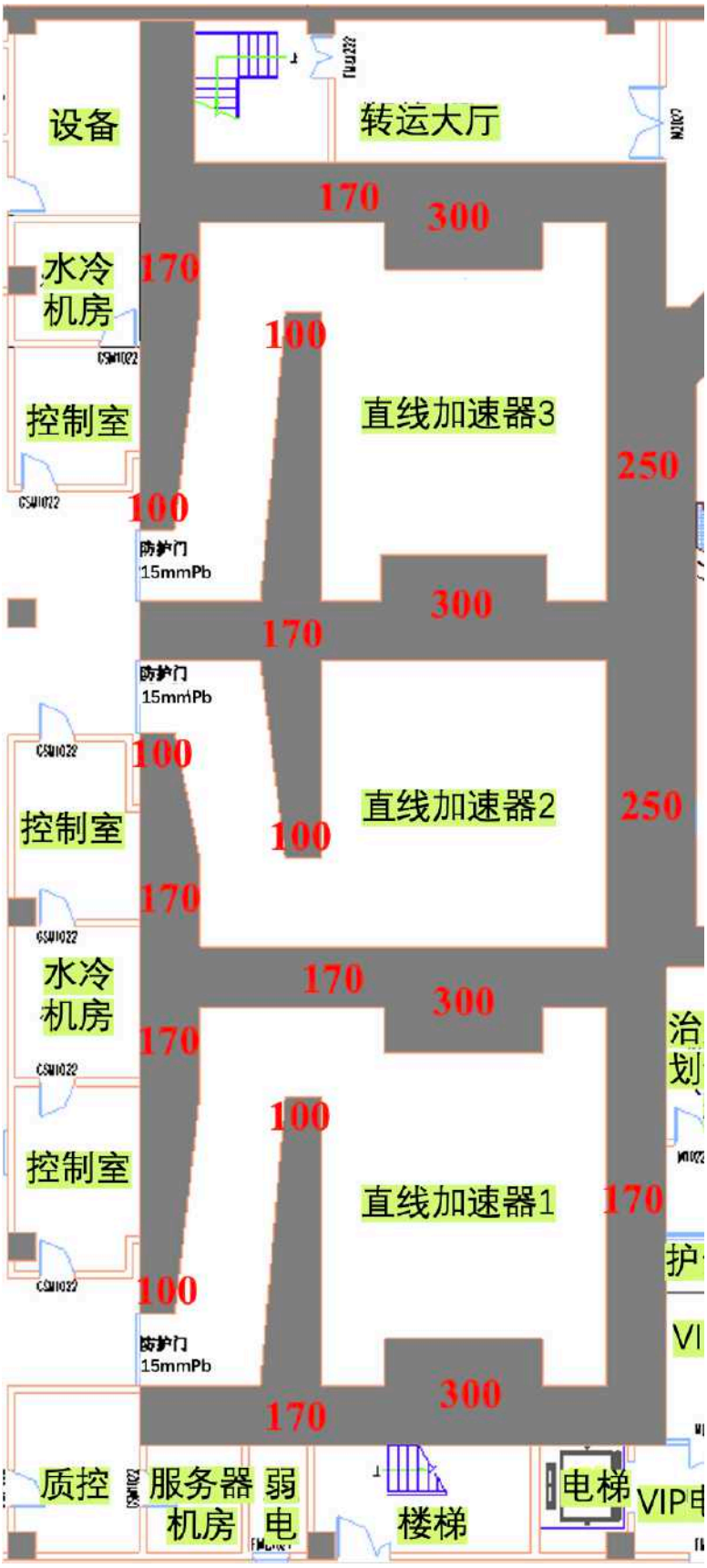


图 4-37 直线加速器机房屏蔽方案平面示意图（单位：cm）

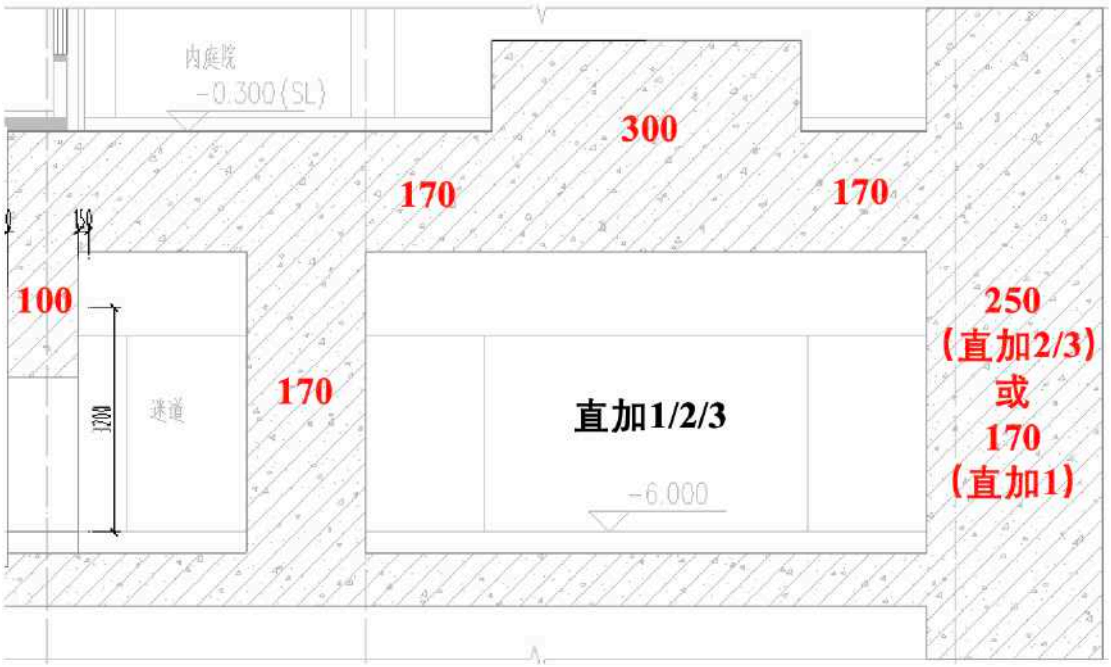


图 4-38 直线加速器机房屏蔽方案剖面示意图（单位：cm）

4.2.4 辐射安全与防护措施

直线加速器机房拟采取的辐射安全防护措施如下：

4.2.4.1 设备安全功能

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

4.2.4.2 钥匙控制

控制台设专用钥匙控制。只有通过专用钥匙才能使加速器出束。钥匙由专人

保管，工作人员离开控制室进入机房时，拔下专用钥匙随身携带，以防止他人误操作。

4.2.4.3 联锁系统

机房设置多重联锁装置，以保证人员和设备安全，防止意外事故。门机联锁：采用电动、手动一体化防护门，与设备启动电路实行门机联锁方式，即防护门未关闭前，加速器无法启动。系统联锁：当出现控制台计算机故障、加速管真空故障等情况时，设备会自动出现系统联锁，无法出束。

4.2.4.4 紧急开门按钮

在防护门外旁侧和控制室内安装开、关门按钮，另外还在防护门内侧墙上安装 1 个紧急开门按钮，并有明显标志。当遇到意外情况，可随时按动紧急开门按钮，打开防护门，切断设备高压，停止出束。

4.2.4.5 急停按钮

急停按钮安装在控制室的操作台上（1 个）、加速器设备（依设备型号而定，通常不少于 1 个）、治疗床（依设备型号而定，通常不少于 1 个）、机房的墙壁上（4 个）和迷道内 1 个，并有明显标志。当遇到意外情况，可随时按动急停开关，切断设备高压，停止出束。紧急停止开关必须采用手动方式才能复位。

4.2.4.6 视频监控对讲系统

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

4.2.4.7 警告标志及工作状态指示

机房防护门外设立电离辐射警告标志和中文警示说明，安装工作状态指示灯，

不同颜色显示和加速器运行状态关联。

4.2.4.8 固定式辐射剂量监测仪

机房内安装带有报警功能的固定式辐射监测仪，每间机房设 1 台，用于监测机房内的辐射水平并在控制室内显示，安装点位具体见图 4-40。

4.2.4.9 其他

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

2）电动防护门具有防夹人功能，停电时能够手动开启，使患者安全转移。

3）治疗室安装应急照明装置，设火灾自动报警装置等。

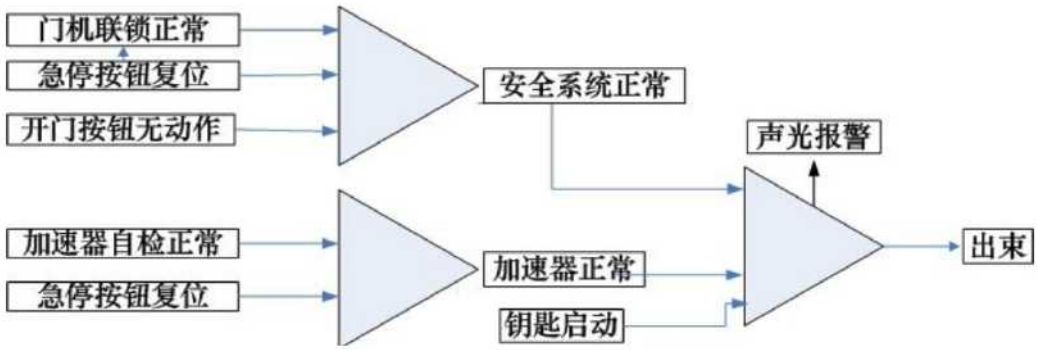


图 4-39 加速器安全联锁逻辑图

加速器机房拟采取的安全与防护设施设计方案见表 4-9，安全与防护设施点位如图 4-40 所示。

表 4-9 每间直线加速器机房的安全与防护设施情况表

序号	项目	内容	本项目	备注
1	A 控制台及安全联锁	防止非工作人员误操作的锁定开关	√	控制台钥匙控制
2		控制台有紧急停机按钮	√	1 个
3		电视监控与对讲系统	√	1 套
4		治疗室门与束流联锁	√	门机联锁
5		治疗室内准备出束声音提示	√	蜂鸣音
6	B	入口电离辐射警告标志	√	设置在防护门外

7	警告标志	入口有加速器工作状态显示灯	√	设置在防护门外
8	C 照射室紧急设施	紧急开门按钮	√	防护门内侧 1 个
9		紧急照明或独立通道照明系统	√	1 套
10		治疗室内有紧急停机按钮	√	墙壁 4 个，迷道 1 个
11		治疗床有紧急停机按钮	√	至少 1 个
12	D 监测设备	治疗室内有固定式剂量率仪	√	1 台固定式 γ 剂量率仪
13		便携式辐射监测仪器仪表	√	共用 1 台便携式 γ 剂量率仪
14		个人剂量报警仪	√	2 台
15		个人剂量计	√	1 支/人
16	E 其他	治疗室门防夹人装置	√	具有防夹功能和停电手动开启动能
17		通风系统	√	设有通风系统，换气次数 12 次/h
18		火灾报警仪	√	治疗室内房顶设火灾报警器
19		灭火器材	√	——

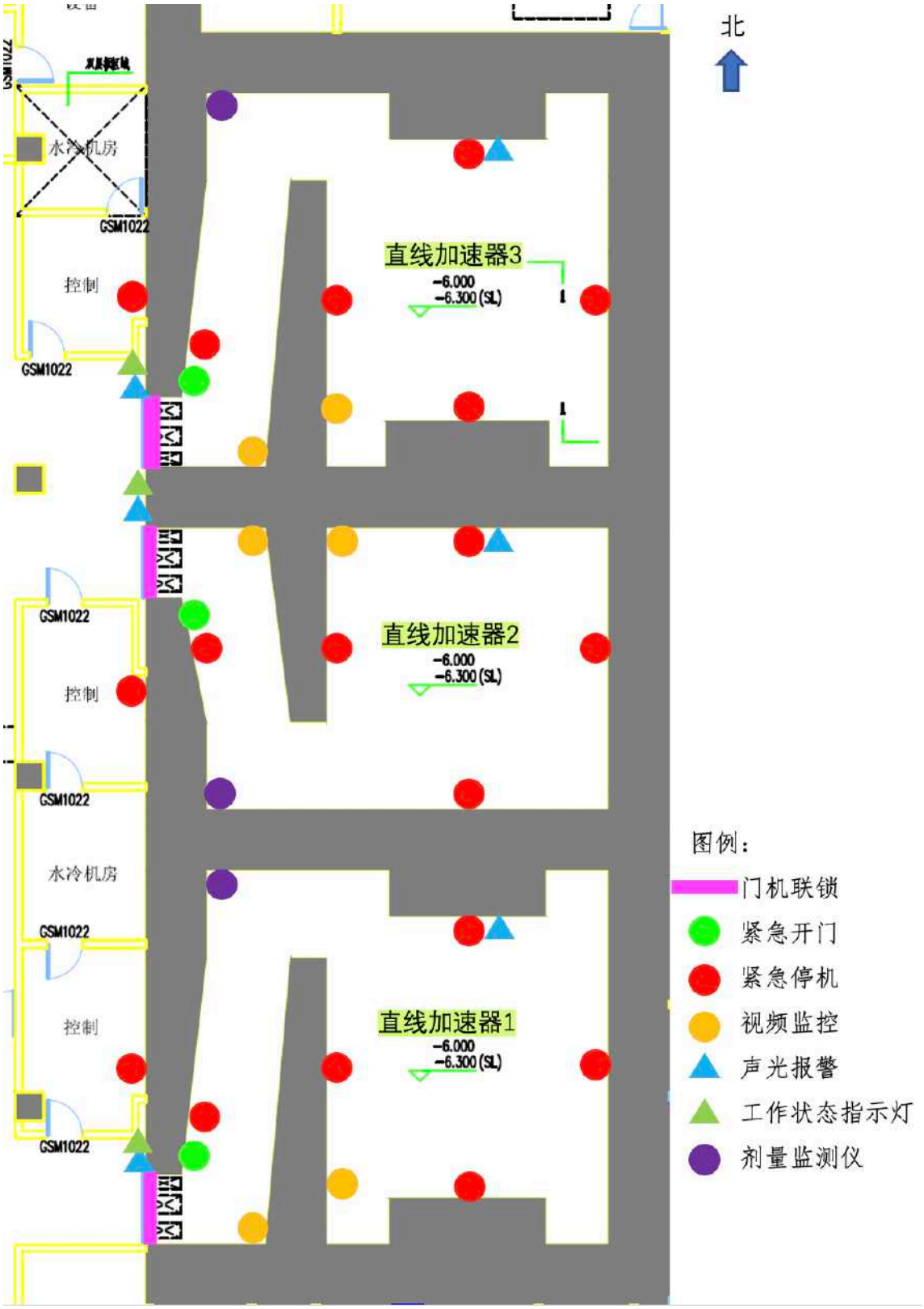


图 4-40 直线加速器机房安全设施分布点位

4.2.5 通风系统

直线加速器机房通风系统采用空调机送风、排风机排风的方式，通风管道走向见图 4-42。送排风采用“上进下出、对角布置” 的方式：送风口设置在机房顶部，距离地面高度不低于 3m；排风口设置在机房底部，距离机房地面高度 30cm。室内通风系统送风口设有除尘过滤装置。排风管道汇总到直线加速器机房 2 西侧的排风井后引至高于屋顶处排放，排风口位置见图 1-7。通风管道穿墙方式示意图见图 4-41，进风管道与排风管道穿墙方式均采用 S 型曲路，避免了直穿，能有效控制通风管道孔的辐射泄漏。

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

表 4-10 直线加速器机房通风系统参数表

机房名称	通风方式	气流走向	新风量，m^3/h	排风量，m^3/h	最大换气次数，次/h
直线加速器机房 1	空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	3200	3800	12
直线加速器机房 2	空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	3200	3800	12
直线加速器机房 3	空调机送风+排风机排风	顶送风底排风	3200	3800	12

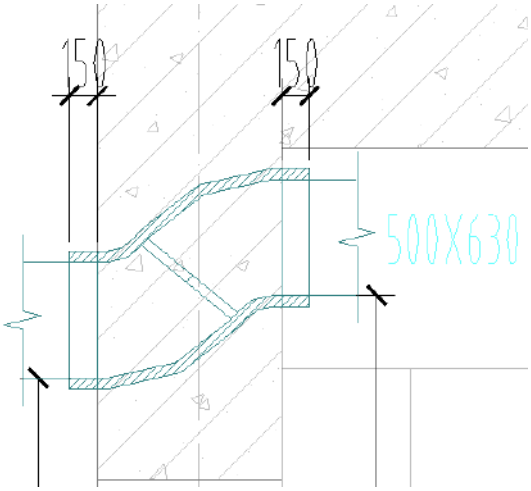


图 4-41 直线加速器机房通风管道穿墙示意图

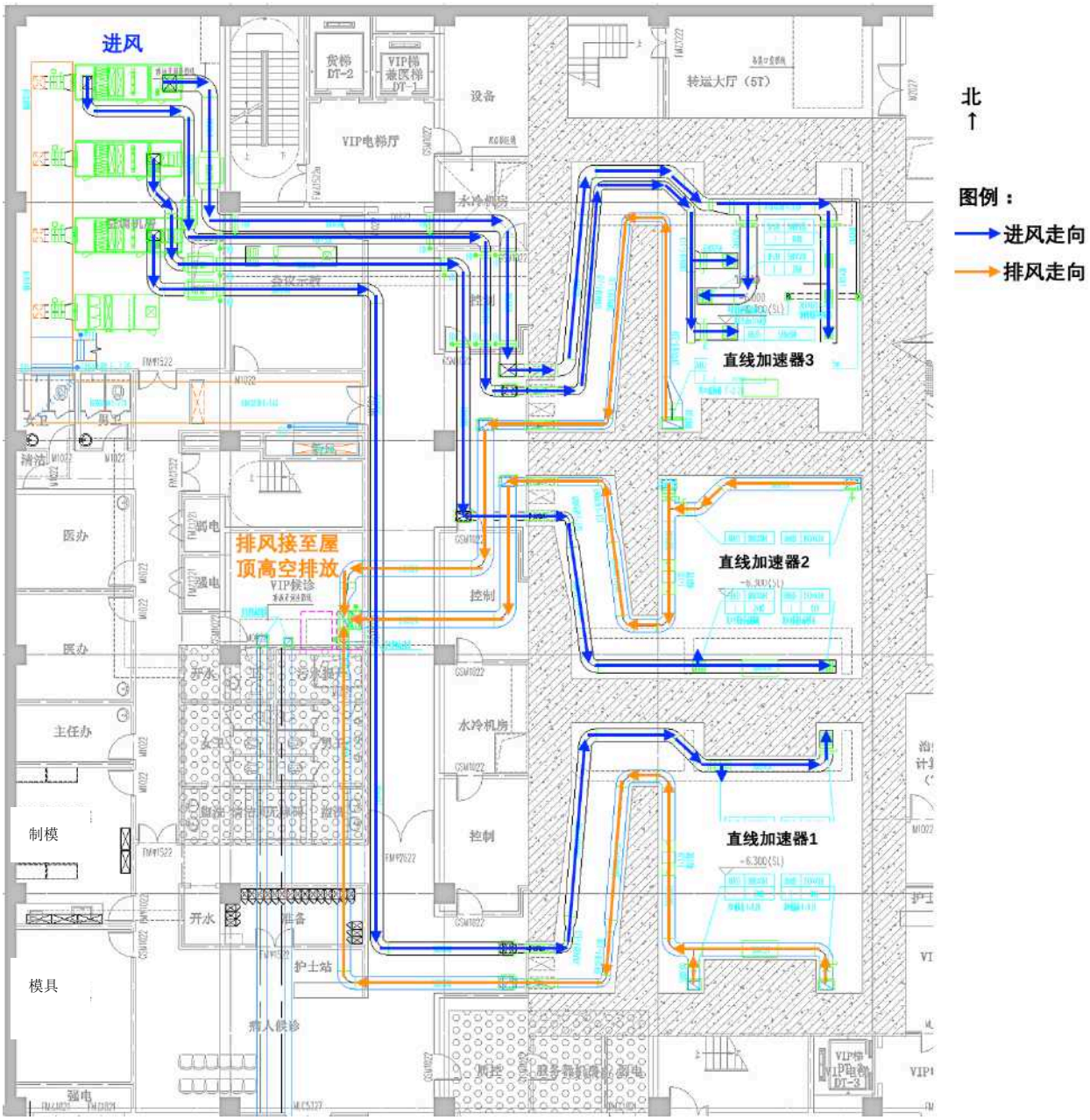


图 4-42 直线加速器机房进风、排风管道走向示意图

4.2.6 放射性三废处理

本项目电子直线加速器 X 射线的最高能量均为 10MV，不需考虑感生放射性，其运行期间不产生放射性三废。

4.3 Ⅲ类射线装置

4.3.1.1 辐射工作场所分区

影像中心拟使用 2 台模拟 CT、1 台大孔径 CT、2 台 DR 和 1 台钼靶共 6 台Ⅲ类射线装置，另外质子中心还拟使用 1 台 PET/CT 用于治疗验证。上述Ⅲ类射线装置的辐射工作场所分区情况见表 4-11 和图 4-43、图 4-44。

核医学拟使用 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT，其辐射工作场所分区情况将统一在后文核医学的“4.4.1 小节 辐射工作场所分区”进行分析评价。

表 4-11 影像中心Ⅲ类射线装置、质子中心 PET/CT 机房辐射工作场所分区

机房	控制区	监督区
模拟 CT 1	机房内部	控制廊、设备间、候诊区、补风机房、走廊
模拟 CT 2	机房内部	控制廊、候诊区、更衣间、走廊、大孔径 CT 机房
大孔径 CT	机房内部	控制廊、设备间、候诊区、模拟 CT 2 机房
DR1	机房内部	控制廊、候诊区、DR 2 机房、钼靶机房及其控制室
DR2	机房内部	控制廊、候诊区、DR 1 机房、更衣间、注射室
钼靶	机房内部	控制室、候诊区、DR 1 机房、卫生间
质子中心 PET/CT	机房内部	控制室、设备间、走廊、楼梯

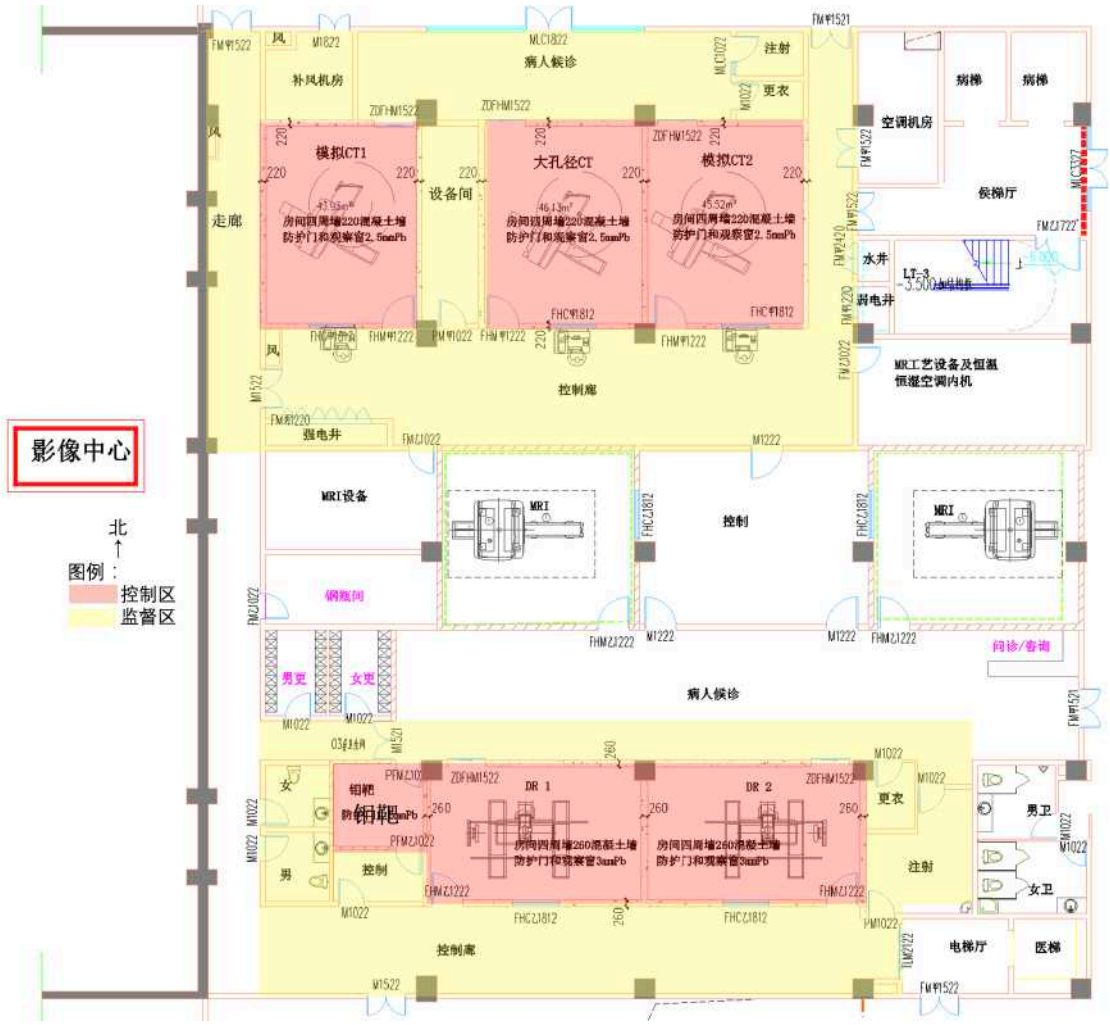


图 4-43 影像中心III类射线装置辐射工作场所分区图

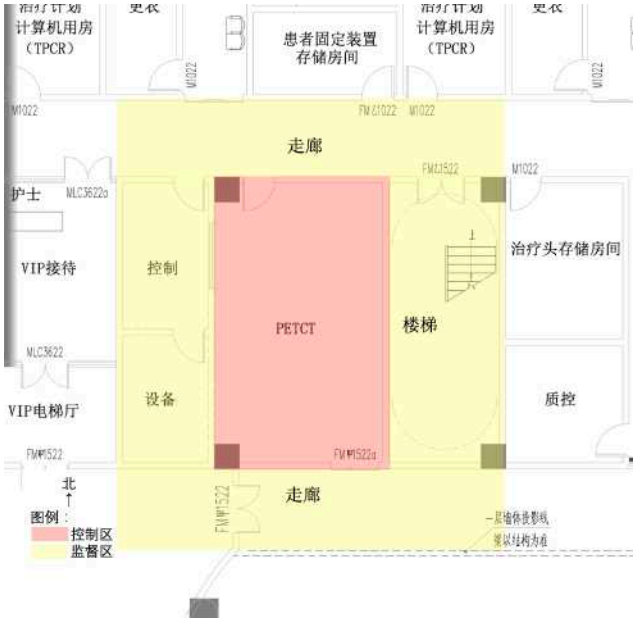


图 4-44 质子中心 PET/CT 机房辐射工作场所分区图

4.3.1.2 辐射屏蔽设计方案

影像中心 6 台Ⅲ类射线装置、质子中心 PET/CT 机房、核医学 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT 的具体屏蔽设计及机房周围环境分布情况见表 4-12。机房尺寸和面积与标准要求对照情况见表 4-13。

表 4-12 III 类射线装置机房屏蔽设计和周围环境分布情况

机房名称	位置	周围环境	屏蔽设计	等效铅当量/mmPb
模拟 CT 1	西墙	走廊	220mm 混凝土	2.5
	东墙	设备间		
	北墙	补风机房、候诊区		
	南墙	控制廊		
	顶板	一层室外	220mm 混凝土	2.5
	底板	土壤	220mm 混凝土	2.5
	防护门	控制廊、候诊区	2.5mmPb	2.5
	观察窗	控制廊	2.5mmPb	2.5
模拟 CT 2	西墙	大孔径 CT 机房	220mm 混凝土	2.5
	东墙	走廊		
	北墙	更衣室、注射间、候诊区		
	南墙	控制廊		
	顶板	休息室、走廊	220mm 混凝土	2.5
	底板	土壤	220mm 混凝土	2.5
	防护门	控制廊、候诊区	2.5mmPb	2.5
	观察窗	控制廊	2.5mmPb	2.5
大孔径 CT	西墙	设备间	220mm 混凝土	2.5
	东墙	模拟 CT 2		
	北墙	候诊区		
	南墙	控制廊		
	顶板	库房	220mm 混凝土	2.5
	底板	土壤	220mm 混凝土	2.5
	防护门	控制廊、候诊区	2.5mmPb	2.5
	观察窗	控制廊	2.5mmPb	2.5
DR1	西墙	钼靶机房及控制室	260mm 混凝土	3
	东墙	DR2 机房		
	北墙	候诊区		
	南墙	控制廊		
	顶板	接诊大厅	260mm 混凝土	3
	底板	土壤	260mm 混凝土	3
	防护门	控制廊、候诊区	3mmPb	3
	观察窗	控制廊	3mmPb	3

机房名称	位置	周围环境	屏蔽设计	等效铅当量/mmPb
DR2	西墙	DR1 机房	260mm 混凝土	3
	东墙	更衣间、注射室		
	北墙	候诊区		
	南墙	控制廊		
	顶板	接诊大厅	260mm 混凝土	3
	底板	土壤	260mm 混凝土	3
	防护门	控制廊、候诊区	3mmPb	3
	观察窗	控制廊	3mmPb	3
钼靶	东墙	DR1 机房	260mm 混凝土	2.5
	西墙	卫生间	150mm 实心砖	1.5
	北墙	候诊区		
	南墙	控制室		
	顶板	接诊大厅	200mm 混凝土	2
	底板	土壤	200mm 混凝土	2
	防护门	控制室、候诊区	1.5mmPb	1.5
质子中心 PET/CT 机房	西墙	控制室、设备间	220mm 混凝土	2.5
	东墙	楼梯间		
	北墙	走廊		
	南墙	走廊		
	顶板	空调机房	220mm 混凝土	2.5
	底板	土壤	220mm 混凝土	2.5
	防护门	走廊	2.5mmPb	2.5
	观察窗	控制室	2.5mmPb	2.5
核医学 PET/CT	东墙	SPECT 机房	220mm 混凝土	2.5
	西墙	PET/CT 设备间		
	南墙	控制廊		
	北墙	患者通道		
	顶棚	户外区域	220mm 混凝土	2.5
	底板	土壤	220mm 混凝土	2.5
	防护门	患者通道、控制室	8mmPb	8
	观察窗	控制室	8mmPb	8
核医学 SPECT/CT	东墙	空调补风机房	220mm 混凝土	2.5
	西墙	PET/CT 机房		
	南墙	控制廊		
	北墙	患者通道		
	顶板	户外区域	220mm 混凝土	2.5
	底板	土壤	220mm 混凝土	2.5
	防护门	患者通道、控制室	6mmPb	6
	观察窗	控制室	6mmPb	6

备注：表中混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，实心砖密度不低于 1.65 g/cm^3，铅密度 11.3 g/cm^3。

表 4-13 III 类射线装置机房最小单边长度和最小有效使用面积对标评价情况

装置名称	机房设计		标准要求		是否满足标准要求
	最小单边长度，m	最小有效使用面积，m^2	最小单边长度，m	最小有效使用面积，m^2	
模拟 CT1	5.8	44.1	4.5	30	是
模拟 CT2	6.0	45.6	4.5	30	是
大孔径 CT	6.0	45.6	4.5	30	是
DR1	5.1	41.3	4.5	30	是
DR2	5.1	41.5	4.5	30	是
钼靶	3.2	11.2	2.5	10	是
质子中心 PET/CT	5.3	46.6	4.5	30	是
核医学 PET/CT	7.0	58.8	4.5	30	是
核医学 SPECT/CT	8.2	68.9	4.5	30	是

由上表可知， 影像中心 6 台Ⅲ类射线装置、质子中心 PET/CT、核医学 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT 的屏蔽铅当量厚度、机房最小单边长度及最小有效使用面积均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关要求，可推知机房屏蔽体外剂量率水平也能满足相关标准要求。

4.3.1.3 辐射安全与防护措施

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的相关要求，影像中心 2 台模拟 CT、1 台大孔径 CT、2 台 DR、1 台钼靶、质子中心 1 台 PET/CT、核医学 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT 拟采取的安全防护措施如下：

（1）机房设有观察窗或摄像监控对讲装置，位置便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

（2）机房设有机械通风系统，保持良好的通风。

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

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

（5）配备足够数量的个人防护用品与辅助防护设施。

综上，本项目III类射线装置的辐射安全与防护措施均能满足相关标准要求。

4.3.1.4 放射性三废处理

本项目III类射线装置正常运行期间主要的放射性污染物为开机出束时产生的 X 射线外照射，不产生放射性废液、废气和固体废物。

4.4 核医学

4.4.1 辐射工作场所分区

核医学辐射工作场所分区具体如下，具体分区布局见图 4-45。

（1）控制区，包括：注射室、固废间、储源间、SPECT 注射后候诊室、PET 注射后候诊室、VIP 注射后候诊室、SPECT/CT 扫描室、PET/CT 扫描室、PET/MR 扫描室、SPECT 留观室、PET 留观室、抢救室、患者通道、衰变池等；

（2）监督区，包括：卫生通过间、控制廊、设备间、医护通道、主任办公室、医生办公室、技师办公室、读片室、污物电梯、楼梯间等。

4.4.2 布局合理性分析

本项目核医学科仅涉及门诊诊断场所，集中设置于门诊楼地下一层西南角。核医学设置了屏蔽墙体作为物理隔离，屏蔽墙边界的北侧和东侧均为走廊，将核医学与北侧的影像中心及东侧的后勤区间隔开，核医学南侧为地下停车场，西侧及底板下方为土层。核医学设置了单独的人员、物流通道。地上一层单独设置核医学门厅，并配备安保措施，核医学人员、物流可通过该门厅经核医学专用电梯或楼梯前往地下一层的核医学科，可避免与无关人员交叉。

地下一层核医学控制区集中布置，控制区出入口均设置单向门禁，储源间及注射室集中在一端。工作场所设有相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开，减小了给药后患者对其他人员的

照射。控制区的出入口设有卫生缓冲区，控制区内设有给药后患者的专用卫生间。

综上，本项目核医学科布局合理。

4.4.3 工作场所分级、分类

（1）非密封放射性物质工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002），按最大工作负荷，计算出本项目核医学科放射性同位素日等效最大操作量见表 4-14。

表 4-14 核医学科日等效最大操作量计算结果

序号	核素	状态	日最大操作量/Bq	日等效最大操作量/Bq	年最大操作量，Bq/a	用途	操作方式	操作因子	毒性因子	使用场所	贮存方式与地点
1	^{18}F	液体	1.48E+10	1.48E+07	2.96E+12	显像	很简单操作	10	0.01	地下一层核医学科	核医学科储源间
2	^{18}F[1)]	液体	1.48E+10	1.48E+06	——	贮存	源的贮存	100	0.01		
3	^{99m}Tc	液体	2.78E+10	2.78E+07	5.55E+12	显像	很简单操作	10	0.01		
小计				4.40E+07	8.51E+12	——					

注：1）由于 ^{18}F 半衰期较短，因此送药量按给药量的 2 倍考虑，多于实际使用的量按源的贮存考虑。

由表 4-14 可知，核医学科的日等效最大操作量为 4.40E+07Bq，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002），该区域为乙级非密封放射性物质工作场所。

（2）临床核医学工作场所分类

根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020），应根据计划操作最大量放射性核素的加权活度对开放型放射性核素工作场所进行分类管理。本项目核医学工作场所分类计算结果见表 4-15。

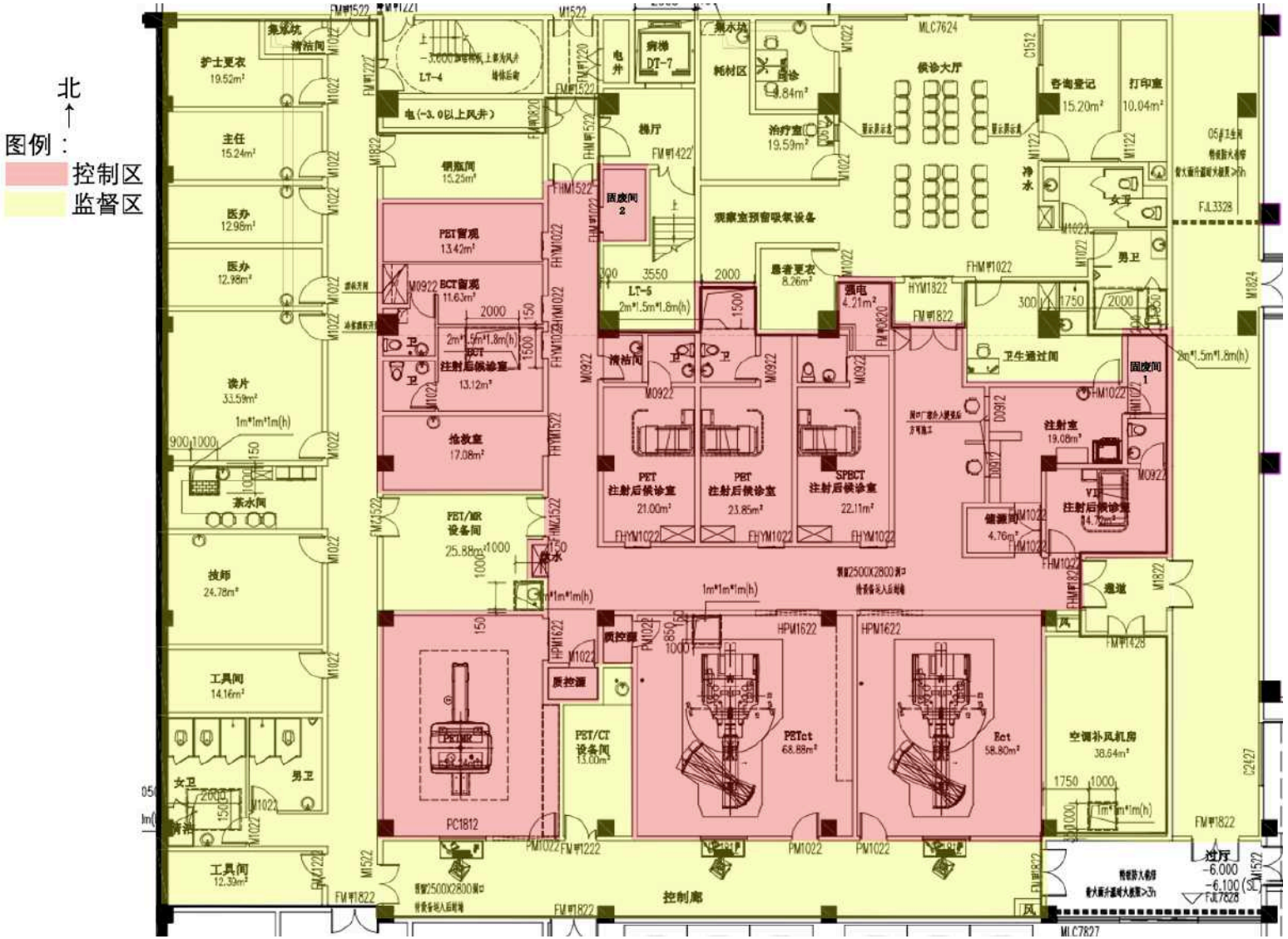


图 4-45　核医学辐射工作场所分区图

表 4-15 核医学工作场所分类计算结果

序号	工作场所	核素	日最大操作量，MBq	毒性权重因子	操作性质修正因子	日操作量加权活度，MBq	总加权活度，MBq	分类
1	注射室	^{18}F	14800	1	1	14800	42600	II
		^{99m}Tc	27800	1	1	27800		
2	储源间	^{18}F	14800	1	100	148	426	II
		^{99m}Tc	27800	1	100	278		
3	VIP 注射后候诊室	^{18}F	14800	1	10	1480	4260	II
		^{99m}Tc	27800	1	10	2780		
4	SPECT 注射后候诊室	^{99m}Tc	27800	1	10	2780	2780	II
5	PET 注射后候诊室	^{18}F	14800	1	10	1480	1480	II
6	SPECT 留观室	^{99m}Tc	27800	1	10	2780	2780	II
7	PET 留观室	^{18}F	14800	1	10	1480	1480	II
8	抢救室	^{18}F	14800	1	1	14800	42600	II
		^{99m}Tc	27800	1	1	27800		
9	PET-CT 扫描室	^{18}F	11100	1	10	1110	1110	II
10	PET-MR 扫描室	^{18}F	3700	1	10	370	370	II
11	SPECT-CT 扫描室	^{99m}Tc	27800	1	10	2780	2780	II

由表 4-15 可知，本项目核医学科房间均为Ⅱ类场所，需满足《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中对Ⅱ类核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求，见表 4-16。

表 4-16 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求

种类	分类		
	I	II	III
结构屏蔽	需要	需要	不需要
地面	与墙壁接缝无缝隙	与墙壁接缝无缝隙	易清洗
表面	易清洗	易清洗	易清洗
分装柜	需要	需要	不必须
通风	特殊的强制通风	良好通风	一般自然通风
管道	特殊的管道	普通管道	普通管道
盥洗与去污	洗手盆和去污设备	洗手盆和去污设备	洗手盆

4.4.4 辐射屏蔽设计方案

核医学辐射工作场所屏蔽设计具体见表 4-17。防护材料中，混凝土密度不小于 2.35g/cm^3，实心砖密度不小于 1.65g/cm^3，铅板密度不小于 11.3g/cm^3。

表 4-17 核医学辐射屏蔽设计方案

房间	屏蔽体	具体描述	设计方案
核医学整体区域（PET/CT、SPPET/CT机房除外）	顶棚	顶部楼板	200mm混凝土
	底板	底部楼板	200mm混凝土
手套箱分装柜	柜体	前后左右上下六面	50mmPb
	观察窗	分装柜正面	50mmPb
^{18}F注射窗	窗体	正面和两侧	50mmPb
	观察窗	观察窗正面	50mmPb
	注射套	^{18}F注射套	10mmPb
^{99m}Tc注射窗	窗体	正面和两侧	20mmPb
	观察窗	观察窗正面	20mmPb
	注射套	^{99m}Tc注射套	5mmPb
储源箱	六面屏蔽体	六面屏蔽体	40mmPb
注射室	墙体	四周墙体	200mm实心砖
	防护门	通向卫生通过间	8mmPb
		通向固废间	8mmPb
		通向储源间	8mmPb
储源间	墙体	四周墙体	200mm实心砖
	防护门	通向患者通道	8mmPb
		通向注射室	8mmPb
固废间1	墙体	四周墙体	200mm实心砖
	防护门	通向注射室	8mmPb
VIP注射后候诊室	墙体	南北西三侧墙体	200mm实心砖
		东侧墙体	350mm实心砖
	防护门	通向患者通道	8mmPb
SPECT注射后候诊室1	墙体	四周墙体	200mm实心砖
	防护门	通向患者通道	6mmPb
SPECT注射后候诊室2	墙体	东南西三面墙体	200mm实心砖
		北墙	100mm实心砖
	防护门	通向患者通道	6mmPb
PET注射后候诊室1、2	墙体	四周墙体	200mm实心砖

房间	屏蔽体	具体描述	设计方案
	防护门	通向患者通道	8mmPb
SPPET/CT扫描室	墙体	四周墙体、顶棚、底板	220mm混凝土
	观察窗	朝向控制廊	6mmPb
	防护门	通向患者通道	6mmPb
		通向控制廊	6mmPb
PET/CT扫描室	墙体	四周墙体、顶棚、底板	220mm混凝土
	观察窗	朝向控制廊	8mmPb
	防护门	通向患者通道	8mmPb
		通向控制廊	8mmPb
PET/MR扫描室	墙体	四周墙体	240mm实心砖
	观察窗	朝向控制廊	8mmPb
	防护门	通向患者通道	8mmPb
		通向控制廊	8mmPb
PET/CT质控源间	墙体	四周墙体	240mm实心砖
	防护门	朝向PET/CT扫描室	8mmPb
PET/MR质控源间	墙体	四周墙体	240mm实心砖
	防护门	通向患者通道	8mmPb
SPECT留观室	墙体	东西墙体	200mm实心砖
		南墙	100mm实心砖
		北墙	200mm实心砖
	防护门	通向患者通道	6mmPb
PET留观室	墙体	东西北三侧墙体	200mm实心砖
		南墙	200mm实心砖
	防护门	通向患者通道	8mmPb
抢救室	墙体	四周墙体	200mm实心砖
	防护门	通向患者通道	8mmPb
固废间2	墙体	四周墙体	200mm实心砖
	防护门	通向患者通道	8mmPb
控制区出入口	防护门	患者入口	8mmPb
		患者出口	8mmPb
		通向东侧走廊	8mmPb
		通向PET/MR设备间	8mmPb

4.4.5 人流、物流

核医学科的人流包括患者路线、医护路线，物流包括放射性药物路线、放射性固体废物路线，人流、物流见图 4-46，具体描述如下：

（1）患者路线

①SPECT/CT 患者路线：候诊大厅的患者经患者入口单向门通过缓冲区进入控制区，经语音提示及地面导识线至专用注射窗，注射含 ^{99m}Tc 的放射性药物，随后进入 SPECT 注射后候诊室候诊，根据语音提示进入 SPECT/CT 机房进行扫描检查，如需留观则至 SPECT 留观室，之后通过患者出口单向门离开。

②PET/CT 患者路线：候诊大厅的患者经患者入口单向门通过缓冲区进入控制区，经语音提示及地面导识线至专用注射窗，注射含 ^{18}F 的放射性药物，随后进入 PET 注射后候诊室候诊，根据语音提示进入 PET/CT 机房或 PET/MR 机房进行扫描检查，如需留观则至 PET 留观室，之后通过患者出口单向门离开。

（2）医护人员路线

①护士路线：护士经卫生通过间进入注射室进行药物分装和注射，工作完成后进行表面污染监测，符合要求后经卫生通过间离开。

②技师路线：技师从医护通道进入控制廊进行设备操作，如需摆位则通过各机房南侧防护门进入机房为患者摆位，工作结束后原路返回。

③医生抢救路线：医生从医护通道经 PET/MR 设备间进入抢救室进行抢救，抢救结束后原路返回。

（3）放射性药物路线

放射性药物由送药公司人员经核医学专用电梯厅进入地下一层，依次经核医学北侧通道、东侧通道进入控制区，在储源间与医院工作人员进行交接。考虑到放射性药物路线与患者路线有部分交叉，医院拟采取时间管理的方式，运送药物时间避开核医学接诊时间，尽量减少所运送药物对人员和环境的影响。

（4）放射性固体废物路线

暂存在固废间1、固废间2的放射性固体废物，满足解控要求后，从固废间1、固废间2运至核医学专用电梯，送至医院医疗废物暂存库统一处理。考虑到固体废物运输通道与患者通道有部分交叉，医院拟采取时间管理的方式，避免人员的交叉，即接诊结束，待医护人员及患者都离开后由专人负责固体废物的清运和转移。

由上可知，本项目核医学工作场所设置了患者路线、医护路线、放射性药物路线、放射性固废路线，在空间/时间上相对独立，避免了交叉，并在通道的出、入口设计了单向门禁，无关人员不得入内，患者也不能随意离开控制区，可保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射。注射室设置了卫生通过间，患者出入口设置了缓冲区，注射后候诊室、留观室设置有卫生间，控制区设有清洁间，便于放射性污染的清理、清洗。

综合考虑，本项目核医学工作场所布局及人流、物流路线基本合理。

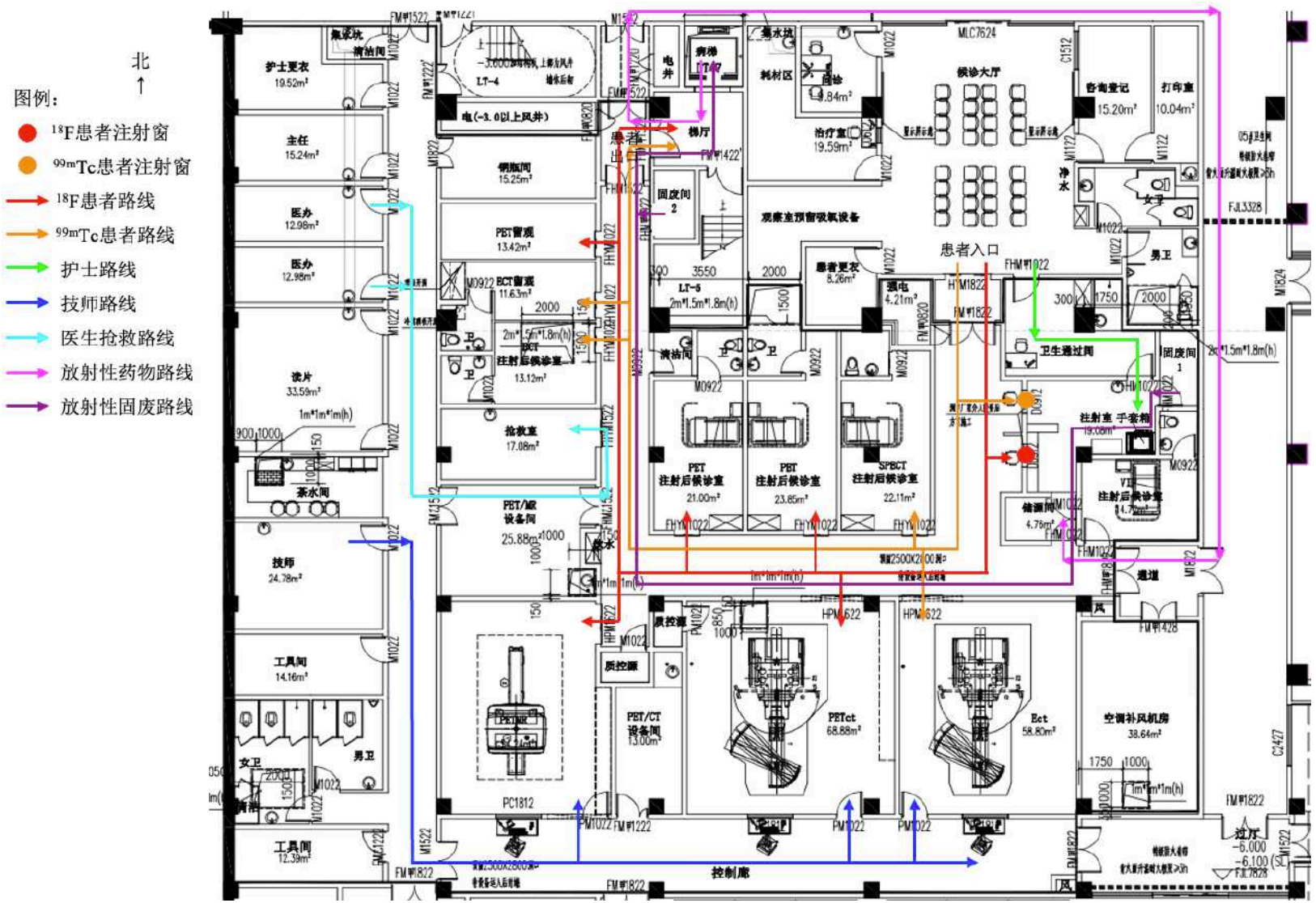


图 4-46 核医学人流、物流示意图

4.4.6 辐射安全防护措施

①PET/CT、SPECT/CT 机房门外设置电离辐射警告标志，机房门上方设置工作状态指示灯，灯箱上设置警示标语，设置门灯联锁；候诊区设置放射防护注意事项告知栏。

②PET/CT 机房及 SPECT/CT 机房与控制室之间、控制室和候诊区之间设置视频监控和对讲系统，患者通道、候诊室、留观室等处设置视频监控系统，便于观察和管理患者活动。

③PET/CT 机房及 SPECT/CT 机房的电动推拉门设置防夹装置，平开机房门设有自动闭门装置。

④PET/CT 机房及 SPECT/CT 机房为受检者提供铅橡胶性腺防护围裙或方巾、铅橡胶颈套等个人防护用品。

⑤放射性表面污染控制措施：注射室、储源间、固废间、扫描室、候诊室、留观室和控制区走廊地面等处铺装硬质无缝 PVC 地板革，墙面装防水易清洁装饰层，便于去污。放射性药物操作台面采用易去污材料（如不锈钢板），配置托盘、吸水纸等物品。手套箱工作台面选用表面光洁、耐腐蚀、防渗漏、易去污的材料。

⑥储源间、质控源间安装防盗门、视频监控和防盗警戒系统，实行“双人双锁”管理，落实放射源安全防范要求，严防放射性药物或质控源丢失。

⑦医院拟配个人防护用品和应急及去污用品，详见表 4-18。

表 4-18 核医学个人防护用品和应急及去污用品配置一览表

序号	防护用品名称	使用场所	数量	铅当量/mmPb
1	储源箱	储源间	1 个	40
2	PET 手套箱分装柜	注射室	1 个	50
3	PET 注射防护台	注射室	1 个	50
4	PET 注射防护套	注射室	5 个	10
5	SPECT 注射防护台	注射室	1 个	20
6	SPECT 注射防护套	注射室	5 个	5
7	废物桶（10L）	注射室	1 个	20
8	废物桶（30L）	固废间 1、固废间 2	4 个	20
9	铅橡胶衣	注射室、扫描机房	5 件	正面 0.5 背面 0.25

序号	防护用品名称	使用场所	数量	铅当量/mmPb
10	铅橡胶围脖	注射室、扫描机房	5 件	0.5
11	铅玻璃眼镜	注射室、扫描机房	5 件	0.25
12	口罩、手套、帽子、吸水滤纸、纱布等一次性用品	注射室	若干	/
13	应急及去污用品（一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂、电离辐射标志及其它工具）	卫生通过间	若干	/

4.4.7 放射性三废来源及处理措施

4.4.7.1 放射性废气

4.4.7.1.1 来源

核医学的放射性废气主要来自放射性药物分装、注射过程中挥发出的极少量含放射性物质的气溶胶。考虑到该区域内操作的放射性药物不易挥发，且部分药物不需自行分装，直接由供货商送货，即使分装也是在带有通风的密闭手套箱内进行，放射性废气产生量极少。

4.4.7.1.2 处理措施

核医学科设计了专用的通风系统，排风管道走向具体见图 4-47，排风口位置见图 1-7。

核医学科共设置了 5 套独立的排风管路与 2 套多室共用的排风管路。

5 套独立的排风管路分别连接手套箱、注射室、储源间、固废间 1 和固废间 2，每套独立的通风管路均在前端设置活性炭过滤器，手套箱的风速不小于 0.5m/s，将废气接至屋顶排放。

2 套多室共用的排风管路，1 套主要负责患者给药后所在房间卫生间的排风，另 1 套主要负责各扫描显像机房、患者通道、注射后候诊室、留观室、抢救室、卫生通过间等区域的排风，将废气接至屋顶经活性炭过滤后排放。

核医学排风系统设置止回阀，防止气流倒吸，排风口位置高于屋顶。活性炭按厂家推荐定期更换，更换的活性炭将按照放射性固体废物的要求暂存。

核医学工作场所的气流流向遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向，保持工作场所的负压和各区之间的压差，防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。用于分装放射性药物的手套箱设计有单独的排风管道，并在其顶壁安装有活性炭过滤装置。放射性固体废物暂存间也安装有通风换气装置。通风系统排气口高于建筑屋顶，排风口位置见图 1-7。

综上，核医学的通风设计满足相关标准要求。

4.4.7.2 放射性废液

4.4.7.2.1 来源

核医学的放射性废液主要来自注射后患者的排泄物、护士的清洗水、控制区的清洁用水等。根据表 3-16 核医学的工作负荷预计，考虑 PET/MR、PET/CT 和 SPECT/CT 设备各 1 台的配置量，放射性废液的排放量具体见表 4-19。

核医学工作场所清洁工作宜采用擦拭方式，并尽量使用一次性试管等，尽量减少放射性废水排放。

表 4-19 核医学放射性废液排放量

用水类别	用水定额	用水规模	日排放量（L/d）	月排放量（m^3/m）	年排放量（m^3/a）	去向
门诊患者	6L/人次·d	140 人次/d	840	17.6	210	核医学衰变池
护士清洗水	15L/人班	2 人班/d	30	0.6	7.5	
清洁用水	30L/次	1 次/d	30	0.6	7.5	
应急淋浴	100L/次	1 次/月	——	0.1	1.2	
不可预见水量按以上水量 10%计			90	1.9	22.8	
合计			990	20.9	249	
注：（1）用水定额参照《建筑给排水设计规范》（GB50015-2019），并类比同类型医院考虑。（2）月工作时间按 21 天计，年工作时间按 250 天计。						

4.4.7.2.2 处理措施

在核医学南侧的地下设置衰变池，核医学放射性废液统一经专设管道排入衰变池内，位于吊顶层的放射性废液排水管道外包 5mm 厚的铅，可保证其外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。放射性废液管道走向见图 4-48，衰变

池位置见图 4-49，设计方案见图 4-50、图 4-51。

衰变池前端设有化粪池。衰变池按三格并联槽式衰变池设计，分为 1#、2#和 3#，每格有效容积为 27.8 立方米。衰变池整体采用混凝土浇筑，并做防渗透处理，顶盖、底板、四周墙体均为 30cm 混凝土，每格均设检修口。顶盖 30cm 混凝土可保证顶盖上方 30cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。

正常工作时，核医学废液先排至化粪池，化粪池设有切割式潜水泵，待废液累积到设定水位时，由潜水泵将废水泵入 1#衰变池。当 1#衰变池的液位达到报警液位后，1#衰变池的进水阀门关闭，废水排入 2#衰变池。3#衰变池备用。3 个格子“1 用、1 存、1 备”。

根据 HJ 1188-2021 的规定，对于槽式衰变池贮存方式，所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放。本项目核医学科使用的放射性核素为 ^{18}F、^{99m}Tc，半衰期均小于 24 小时。根据表 4-19，放射性废液每月排放量为 20.9 立方米。可见衰变池的容积（27.8 立方米）能够满足放射性废液暂存 30 天的要求。放射性废液暂存时间超过 30 天后，直接解控排放至医院污水管网。

4.4.7.1 放射性固体废物

4.4.7.1.1 来源

核医学的放射性固体废物主要来自分装注射产生的一次性注射器、针头、手套、擦拭巾、药瓶以及通风系统的废活性炭滤芯等，预计产生量见表 4-20。

表 4-20 核医学放射性固体废物产生量

来源	废物类型	产污系数	数量	年产生量	处理方式
分装注射	注射器、针头、手套、药瓶、擦拭巾等	50g/人次	17500 人次/年	875kg/年	按核素、收储日期分类暂存在固废间内，满足解控水平经解控后按一般医疗废物处理。
通风系统	废活性炭滤芯	1kg/套	5 套	5kg/年	暂存于固废间内，满足解控水平经解控后按危险废物处理。

4.4.7.1.2 处理措施

放射性固体废物收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶中。废物桶内放置专用塑料袋直接收纳废物。若含尖刺及棱角的放射性废物，将预先进行包装处理，再装入废物桶，防止刺破废物袋。放射性废物每袋重量不超过 20kg。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至固废间 1 或固废间 2 贮存。注射室东侧的固废间 1 主要用于暂存带放射性污染的医疗废物；患者出口附近的固废间 2 主要用于暂存给药后患者产生的放射性固废。固废间 1 及固废间 2 均设有独立的排风管道，门口设置电离辐射警告标志。固废间 1 及固废间 2 内设置若干废物桶盛放固体放射性废物，不同类别废物应分开存放。容器表面应注明废物所含核素的名称、废物的类别、入库日期等信息，并做好登记记录。

固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息。

根据 HJ 1188-2021，所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天后，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平，α 表面污染小于 0.08 Bq/cm^2、β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。本项目核医学科使用的放射性核素为 ^{18}F、^{99m}Tc，半衰期均小于 24 小时。因此，放射性固体废物在暂存时间超过 30 天后，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平、β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 后，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理。

4.5 服务期满后的环境保护措施

根据《建设项目分类管理名录（2021 年版）》，乙级非密封放射性物质工作场所，使用 I 类、II 类射线装置（X 射线装置和粒子能量不高于 10 兆电子伏的电子加速器除外）存在污染的，退役阶段应编制相应的环境影响报告表。本项目核医学科乙级非密封放射性物质工作场所以及质子治疗系统（若退役阶段存在污染）在服务期满后，应按照相关法规规定完善退役环保手续，确保放射性废物与放射性药物得到安全、妥善处理。

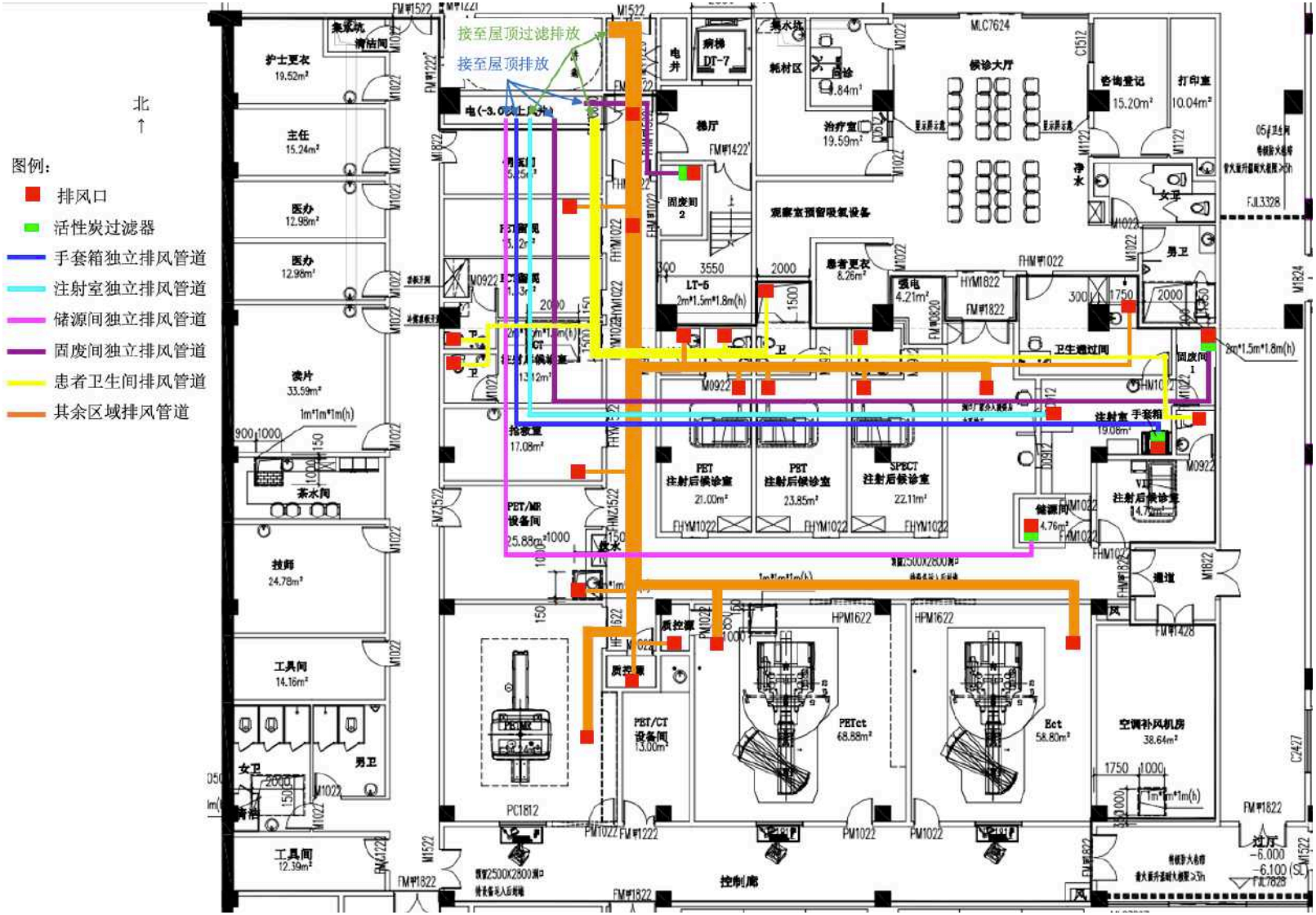


图 4-47 核医学排风管道示意图

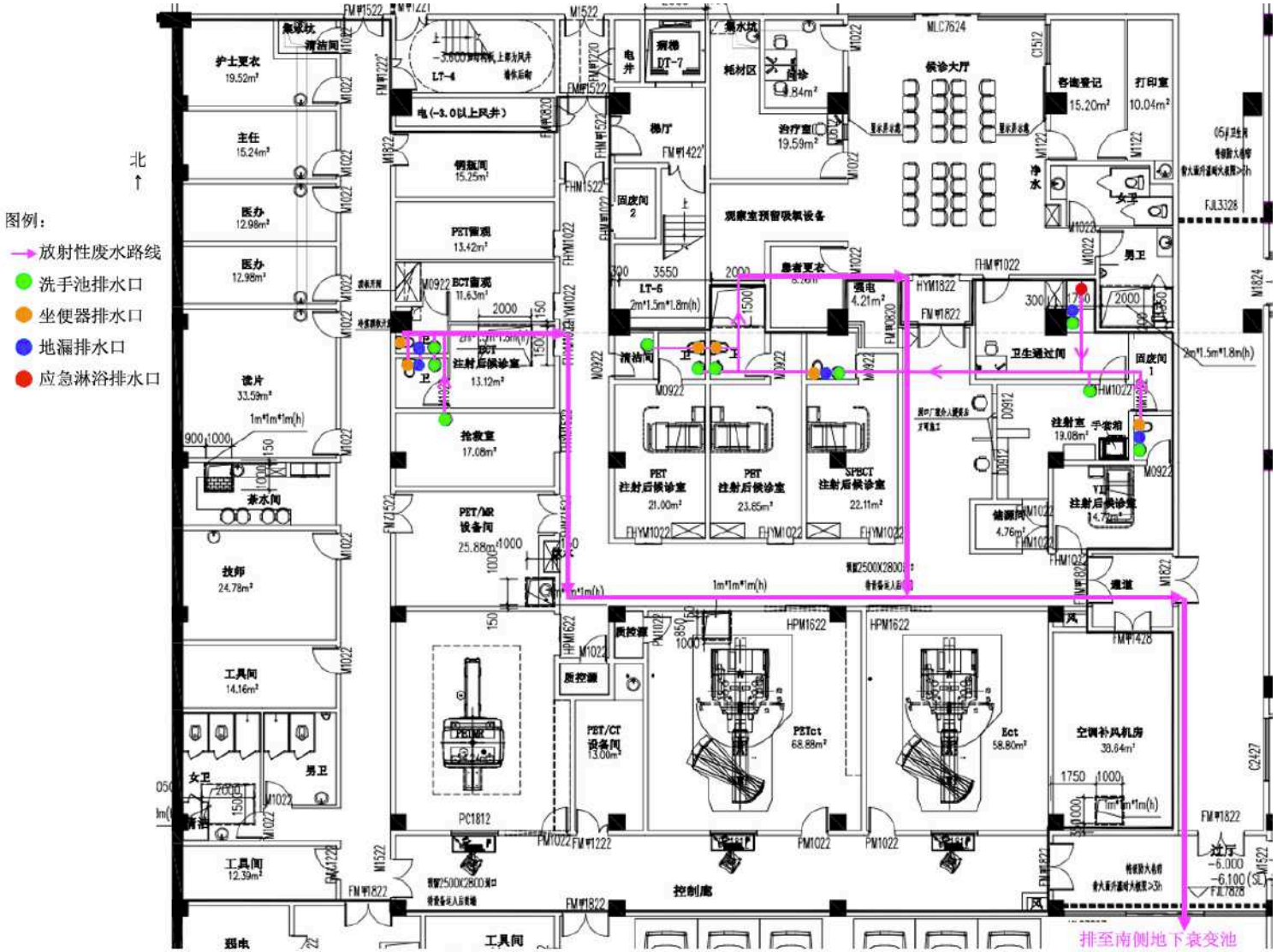


图 4-48 核医学域废液收集管道示意图

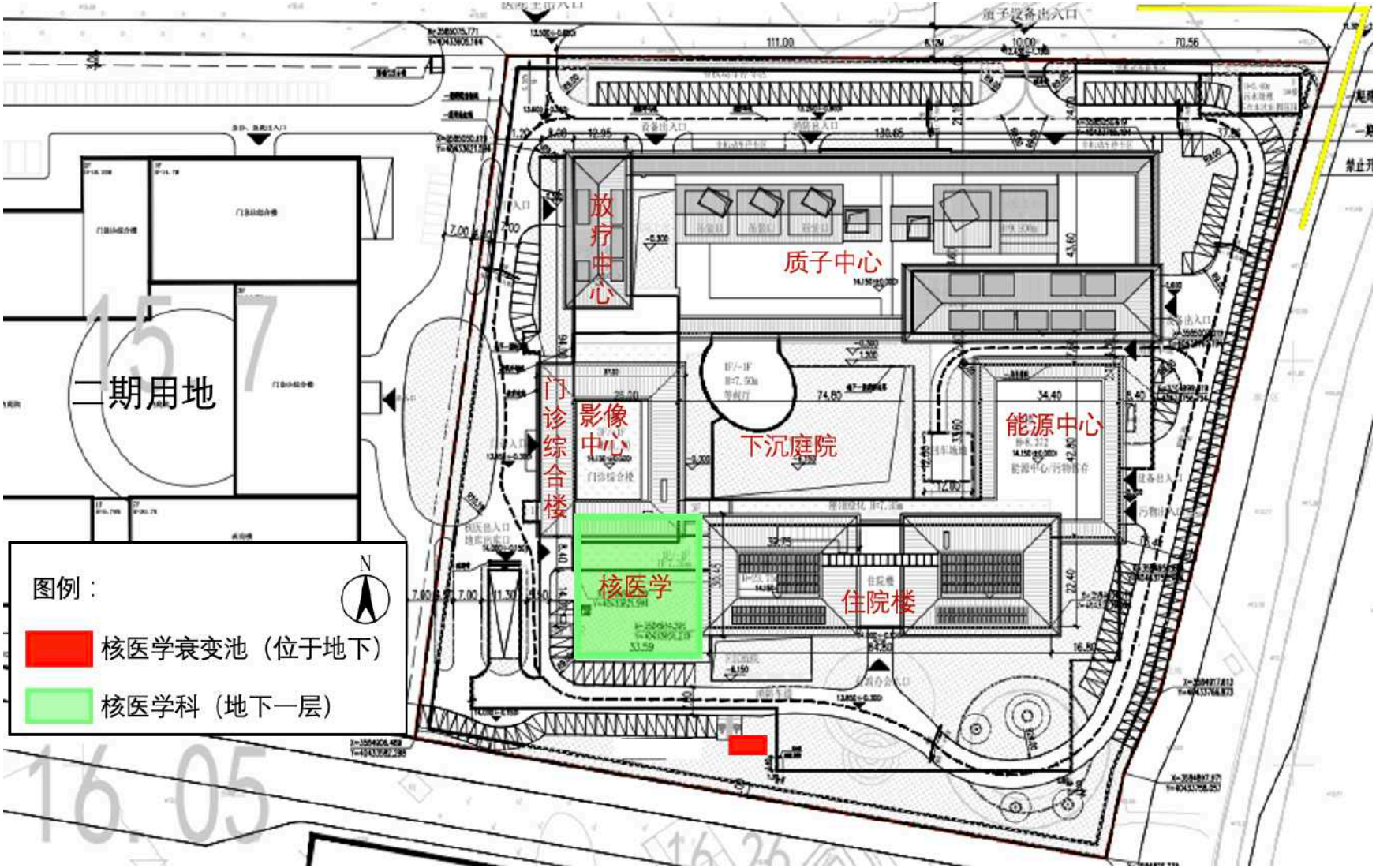


图 4-49 核医学衰变池位置示意图

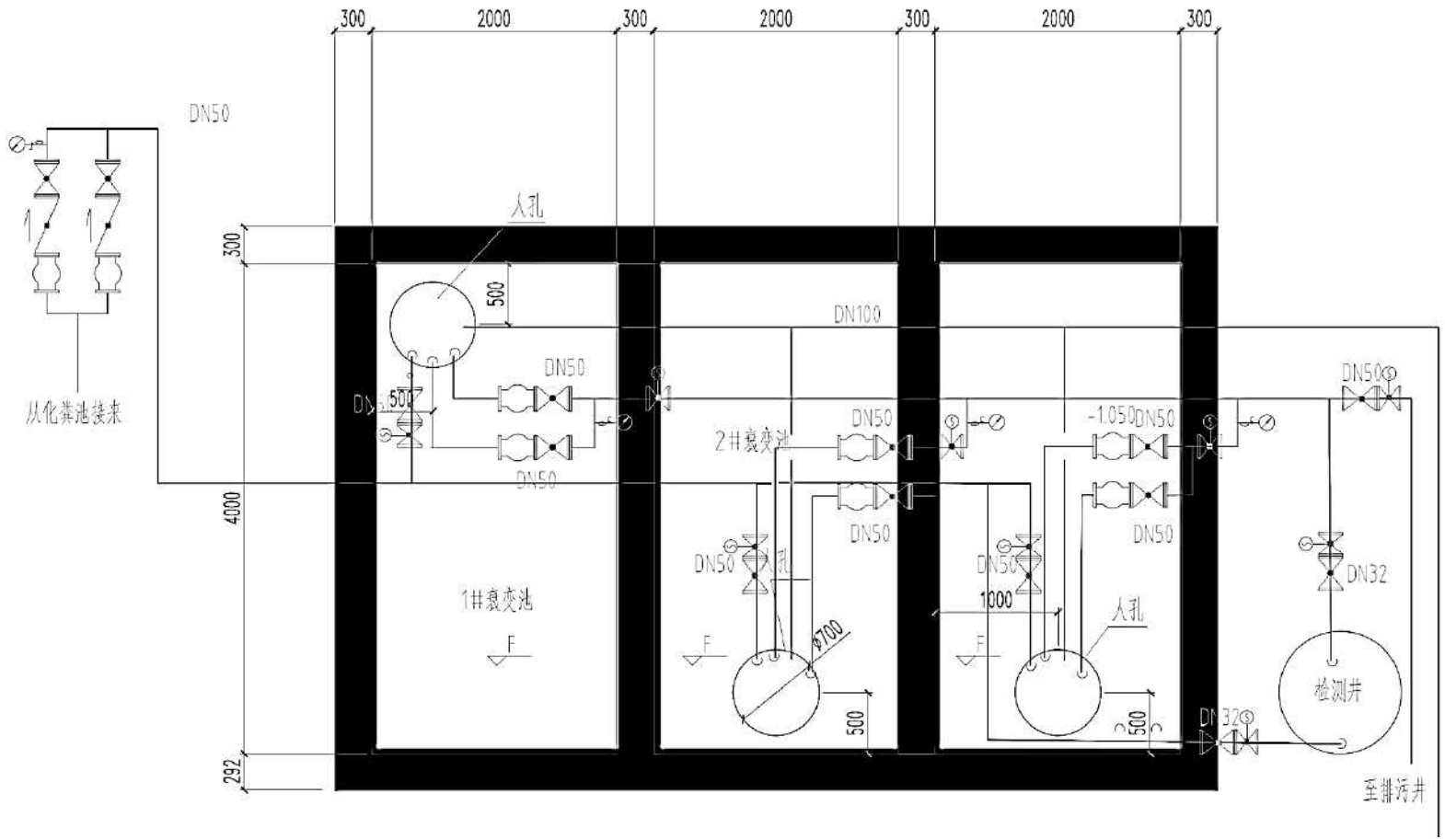


图 4-50 核医学科衰变池设计图

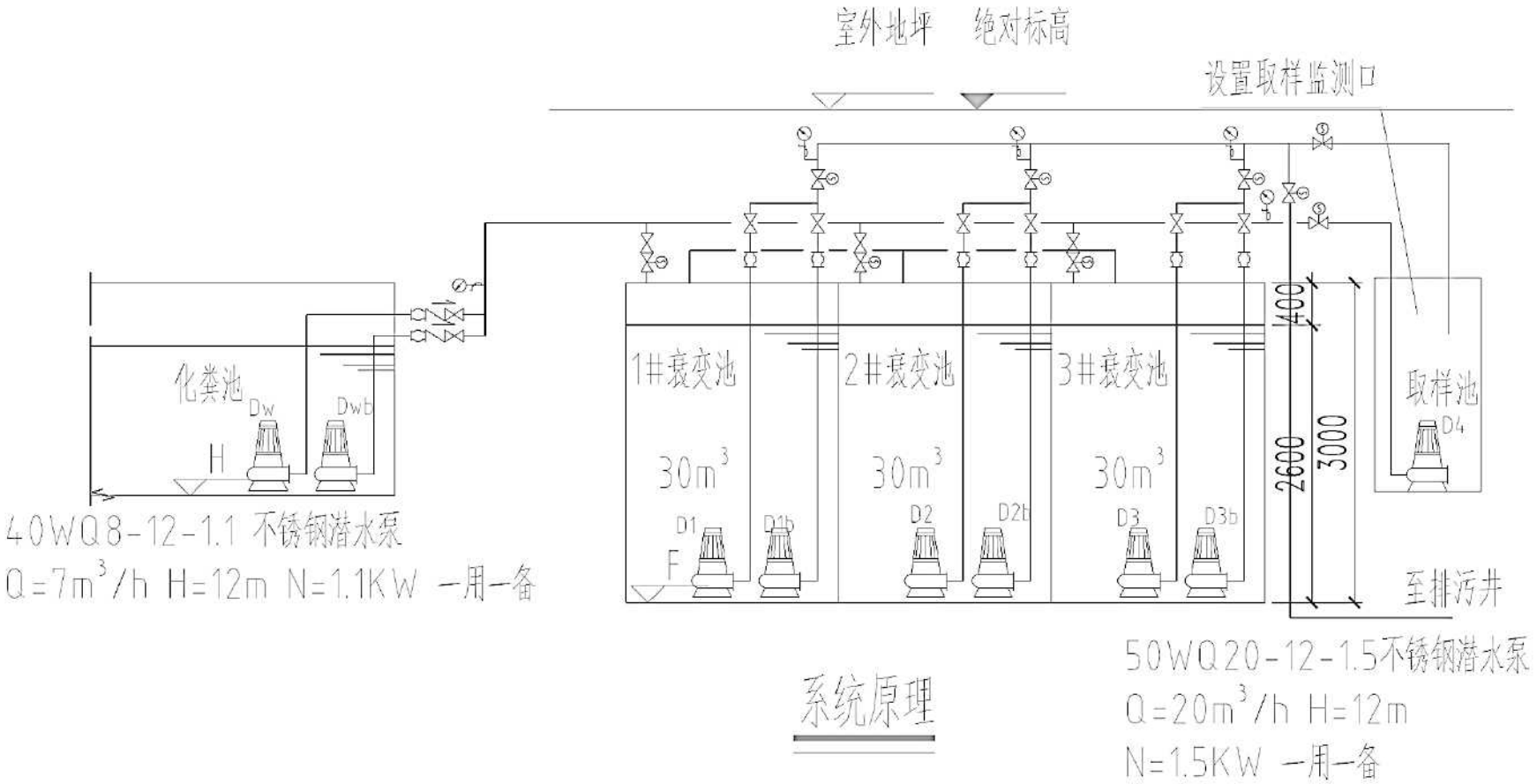


图 4-51 核医学科衰变池系统原理图

5 辐射环境影响分析

本项目建设阶段主要为建筑施工、装修以及设备安装等，该阶段无辐射环境影响，主要的污染因子为施工场地扬尘、施工机械噪声、施工废水、工作人员的生活污水及施工过程产生的建筑垃圾、生活垃圾等，《扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目环境影响报告表》已进行相关分析评价，本章节不再进行分析。

5.1 质子治疗系统

5.1.1 正常运行环境影响分析

5.1.1.1 质子治疗系统屏蔽体外剂量率计算

5.1.1.1.1 计算方法

本次评价采用目前国内外通用的 FLUKA 程序计算质子治疗系统屏蔽体外剂量率水平，计算的相关参数介绍如下：

（1）输运过程考虑的参数：计算考虑了电子/光子（EMF）的耦合输运；粒子（除中子外）的输运阈值为 100eV；中子的输运阈值达到热中子（1e-5eV）。

（2）模拟粒子数为 5 百万个粒子；

（3）采用自定义源项，对多个位置，多能量质子束的联合模拟。

（4）采用栅元权重偏倚减方差方式计算射线的深穿透输运。

（5）残余辐射计算中考虑了重核碎片的输运，以保证活化产物的准确性。

（6）屏蔽材料采用了标准 portland 混凝土配比，容重为 2.3t/m^3。

计算依据的束流损失参数见表 3-18、表 3-19、表 3-20，屏蔽体厚度见表 4-1、表 4-2，建立的计算模型见图 5-1~图 5-4。

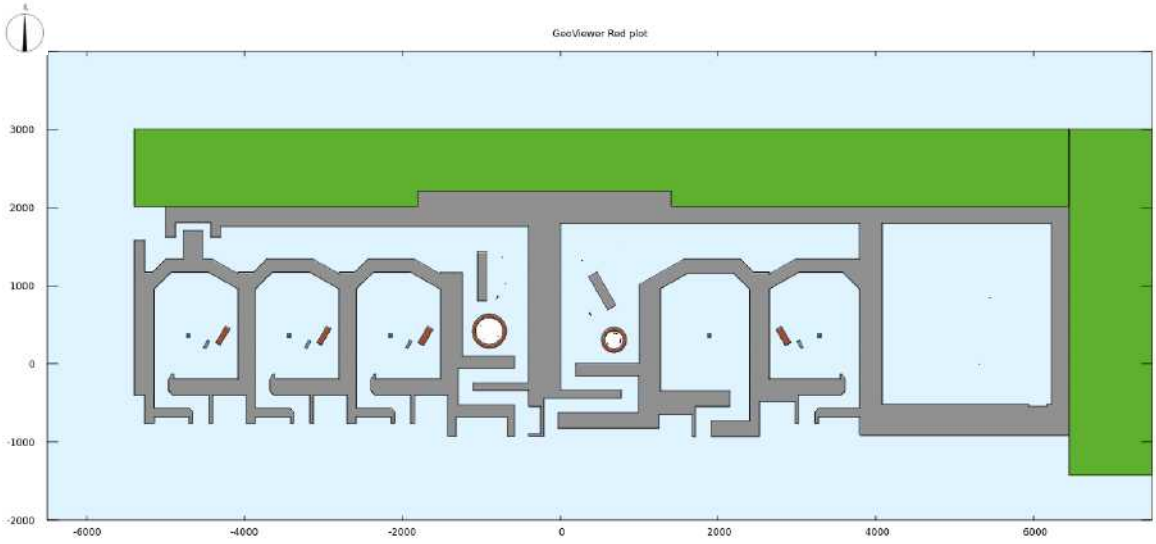


图 5-1 本项目质子治疗系统屏蔽计算建模总体俯视图

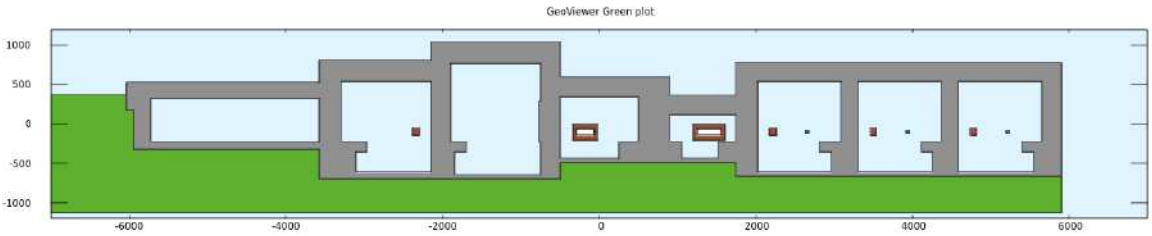


图 5-2 本项目质子治疗系统屏蔽计算建模总体侧视图

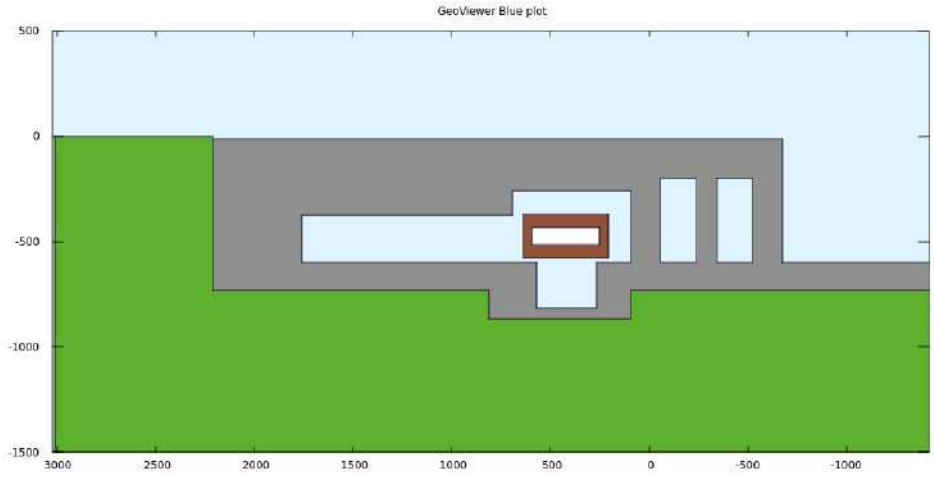


图 5-3 进口质子治疗系统加速器区建模侧视图

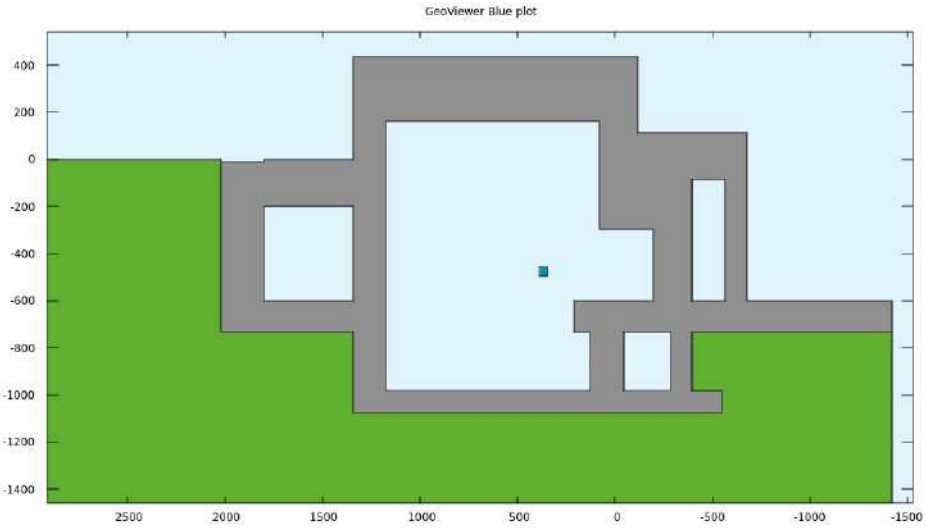


图 5-4 进口质子治疗系统治疗室机架区建模侧视图

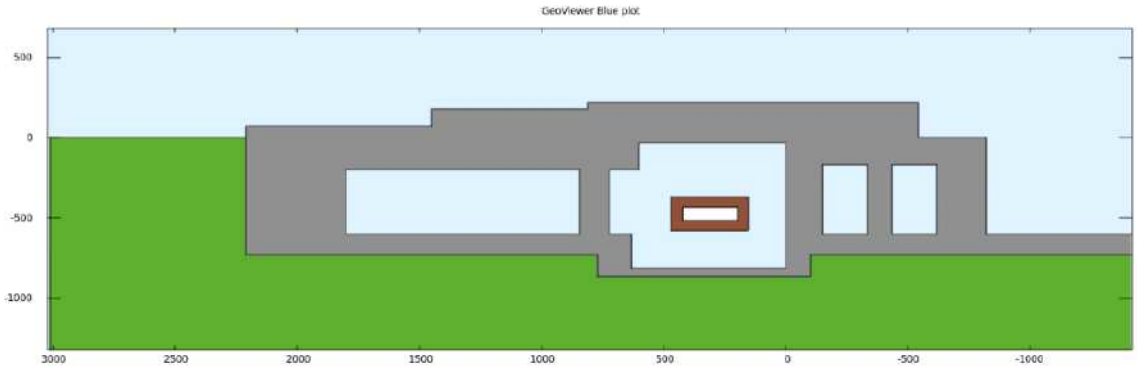


图 5-5 国产质子治疗系统加速器区建模侧视图

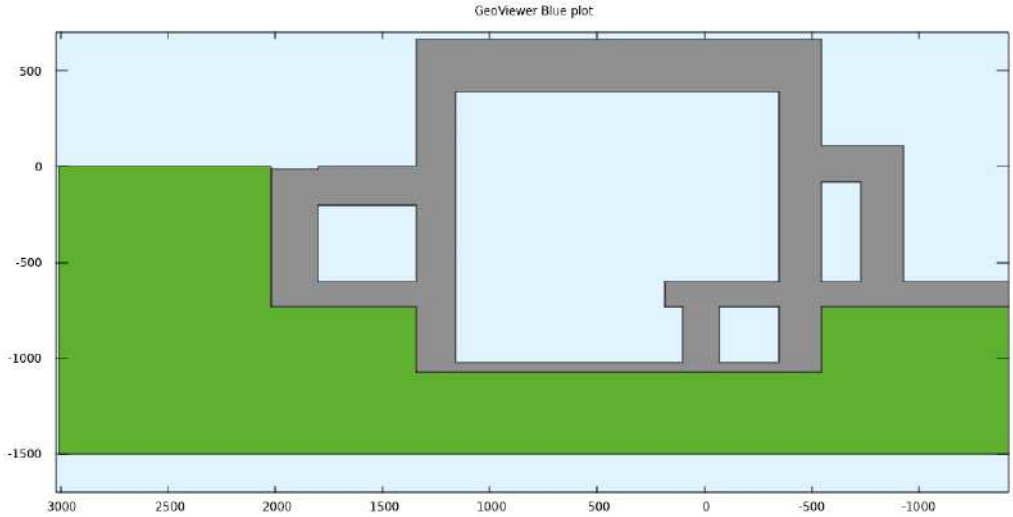


图 5-6 国产质子治疗系统治疗室机架区建模侧视图

5.1.1.1.2 关注点设置

根据质子治疗机房的平面布局及周围环境情况设置了关注点，关注点周围环境及剂量率控制水平见表 5-1，各关注点位置示意图见图 5-7~图 5-12。

表 5-1 质子治疗系统屏蔽体外关注点及其剂量率控制水平

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	H_c，μSv/h
进口质子加速器大厅及束流输运线	B1	进口回旋加速器大厅迷道口	10
	B2	进口回旋加速器主控室	2.5
	B3	质子治疗室 1 机架区	10
	B4	质子治疗室 1 工作区	6.2
	B28	进口回旋加速器大厅外走道	0.8
	B29	质子供应商办公室	2.5
	B30	男卫	3.1
	B31	维护室	10
	B42	束流运输线西侧迷道口	10
	B43	进口回旋加速器大厅东墙外国产加速器大厅	10
	U1*	回旋加速器大厅顶板上方（屋面）	100
	U2	回旋加速器大厅迷道顶板上方（水冷机房）	10
	U3	能量选择系统顶板上方（钢瓶间）	10
	U7	束流输运区顶板上方（设备零件储藏间）	10
	U4*	回旋加速器底板下方（土壤）	5000
	U5*	能选系统底板下方（土壤）	5000
	B44*	束流运输线北墙外偏西（土壤）	5000
	B45*	束流运输线北墙外中部（土壤）	5000
	B46*	束流运输线北墙外偏东（土壤）	5000
质子治疗室 1	B7	治疗控制室 1	2.5
	B8	服务器机房	10
	B9	质子治疗室 1 迷道口	10
	B10	患者治疗设备存储室	10
	B11	质子治疗室 1 外走道	2.3
	B12	质子治疗室 2 机架区	10
	B13	质子治疗室 2 工作区	10
	B32	抢救室	10
	B33	医生办公室	2.5
质子治疗室 2	B5	质子治疗室 1 机架区	10
	B6	质子治疗室 1 治疗区	10
	B16	治疗控制室 2	2.5
	B17	剂量验证设备存储室	10
	B18	质子治疗室 2 迷道口	10
	B19	治疗计划计算机房	10

	B20	质子治疗室 2 外走道	2.3
	B21	质子治疗室 3 机架区	10
	B22	质子治疗室 3 工作区	10
	B34	等候区	9.3
	B35	治疗头存储室	10.0
	U6*	质子治疗室 2 顶板上方（屋面）	100
	U8	质子治疗室 2 迷道顶板上方（电源间）	10.0
	U9*	质子治疗室 2 底板下方（土壤）	5000
质子治疗室 3	B14	质子治疗室 2 机架区	10
	B15	质子治疗室 2 治疗区	2.5
	B23	治疗控制室 3	2.5
	B24	患者固定装置存储室	9.3
	B25	质子治疗室 3 迷道口	10
	B26	治疗计划计算机房	2.5
	B27	质子治疗室 3 外走道	2.3
	B36	PET/CT 机房	0.5
	B37	PET/CT 控制室	3.7
	B38	VIP 接待室	0.5
	B39	直线加速器机房 3	3.7
	B40	直线加速器机房 2	3.7
	B41	直线加速器机房 1	3.7
国产质子加速器大厅及束流输运线	A1	国产回旋加速器主控室	2.5
	A2	回旋加速器大厅迷道入口	10
	A3	质子治疗室 4 机架区	10
	A4	进口回旋加速器大厅	10
	A5	站点经理办公室	2.5
	A27	回旋加速器顶板上方（空调机房）	10
	A32	回旋加速器顶板上方（高频房间）	10
	A38	回旋加速器顶板上方（走廊）	0.8
	A39*	回旋加速器顶板上方（封闭空间）	100
	C1*	束流传输线北墙外（土壤）	5000
	C4*	回旋加速器底板下方 （土壤）	5000
质子治疗室 4	A6	更衣室	10
	A7	治疗控制室 4	2.5
	A8	质子治疗室 4 迷道入口	10
	A9	服务器机房	10
	A10	患者固定装置储存室	10
	A11	质子治疗室 5 机架区	10
	A12	等候区	10

	A28	束流输运线顶板上方（电源间）	10
	A30	质子治疗室 4 南墙外上方（空调机房）	10
	A40*	质子治疗室 4 顶板上方（不上人屋面）	100
	C5*	质子治疗室 4 底板下方（土壤）	5000
质子治疗室 5	A13	治疗控制室 5	2.5
	A14	质子治疗室 5 迷道入口	10
	A15	更衣室	10
	A16	治疗计划计算机房	10
	A17	剂量验证设备存储室	10
	A18	质子科学实验室	10
	A19	质子治疗室 4 治疗区	10
	A20	医生办公室	2.5
	A29	束流输运线顶板上方（转运大厅）	10
	A31	质子治疗室 5 南墙外上方（空调机房）	10
	A41*	质子治疗室 5 顶板上方（屋面）	100
	C6*	质子治疗室 5 底板下方（土壤）	5000
质子科学实验室	A21	电梯厅	10
	A22	楼梯	10
	A23	患者治疗设备存储室	10
	A24	机架治疗室 5 治疗区	10
	A25	质子科学实验室迷道入口	10
	A26	质子供应商办公室	2.5
	A33	地上一层科研办公室	0.3
	A34	地上一层货梯	10
	A35	地上一层楼梯	10
	A36	质子科学实验室北墙斜上方（院内道路）	10
	A37	质子科学实验室东墙斜上方（院内道路）	10
	A42*	质子科学实验室顶板上方（屋面）*	100
	C2*	质子科学实验室北墙外（土壤）	5000
	C3*	质子科学实验室东墙外（土壤）	5000
	C7*	质子科学实验室底板下方（土壤）	5000

*备注：1. 根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5mSv/h”作为各辐射工作场所地下区域屏蔽体外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。2. 根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021），对于不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房外表面 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 100μSv/h 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。

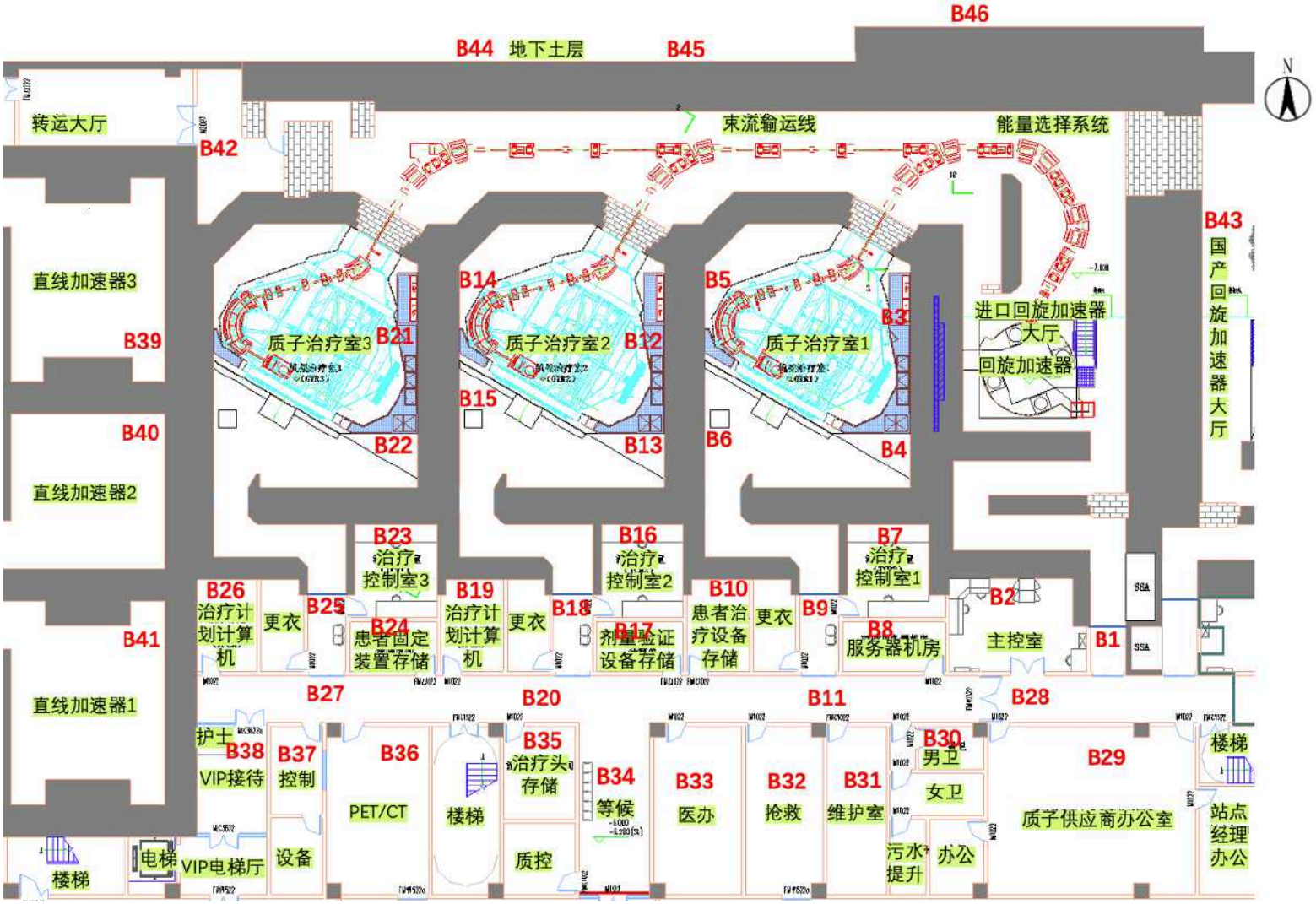


图 5-7 进口质子治疗区关注点平面示意图

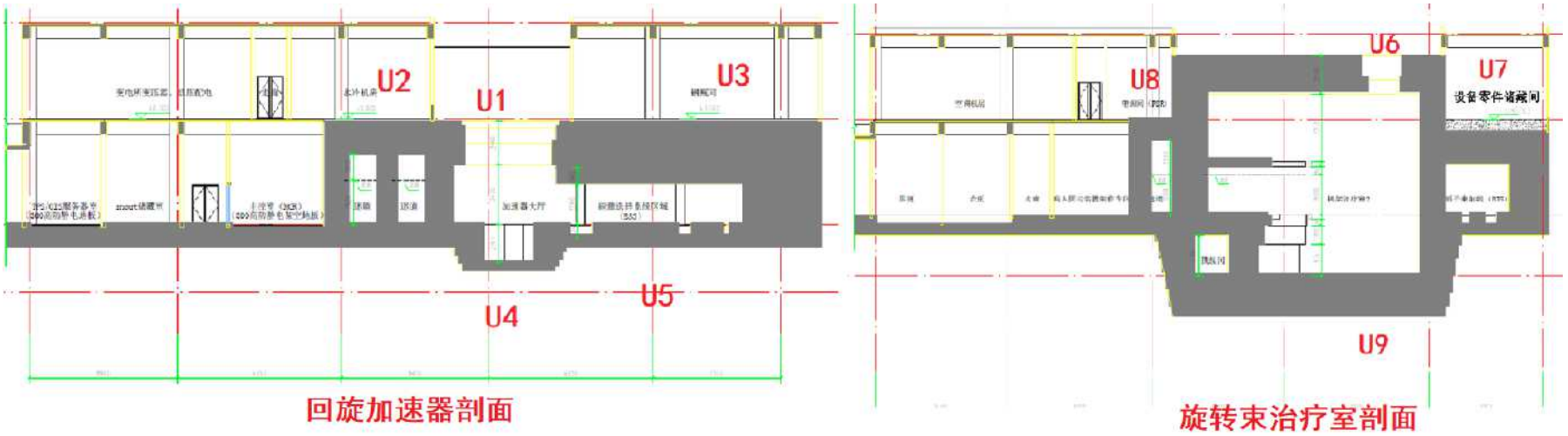


图 5-8 进口质子治疗区关注点剖面示意图



图 5-9 国产质子治疗区关注点平面示意图（地下一层）

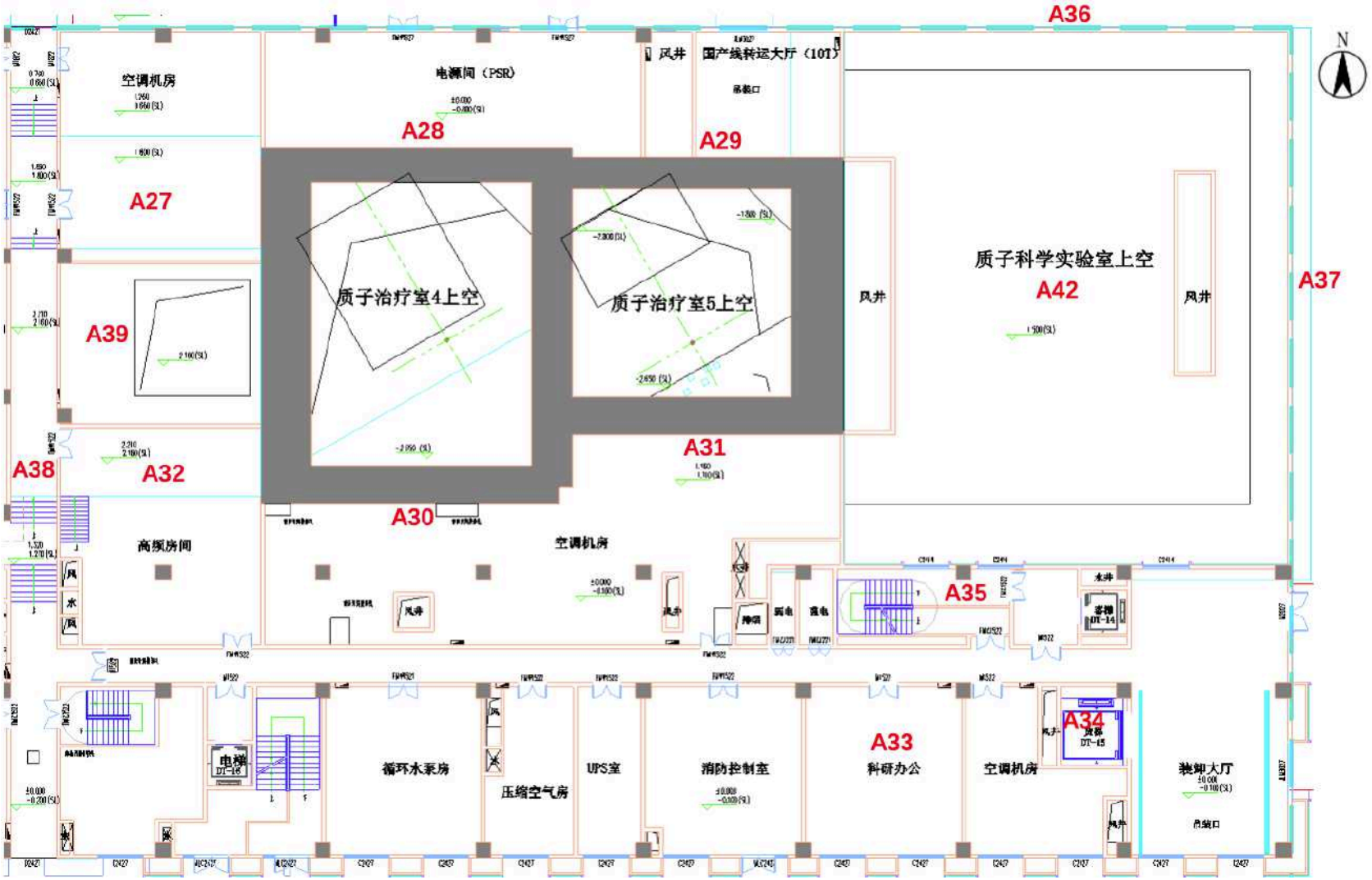


图 5-10 国产质子治疗区关注点平面示意图（地上一层）

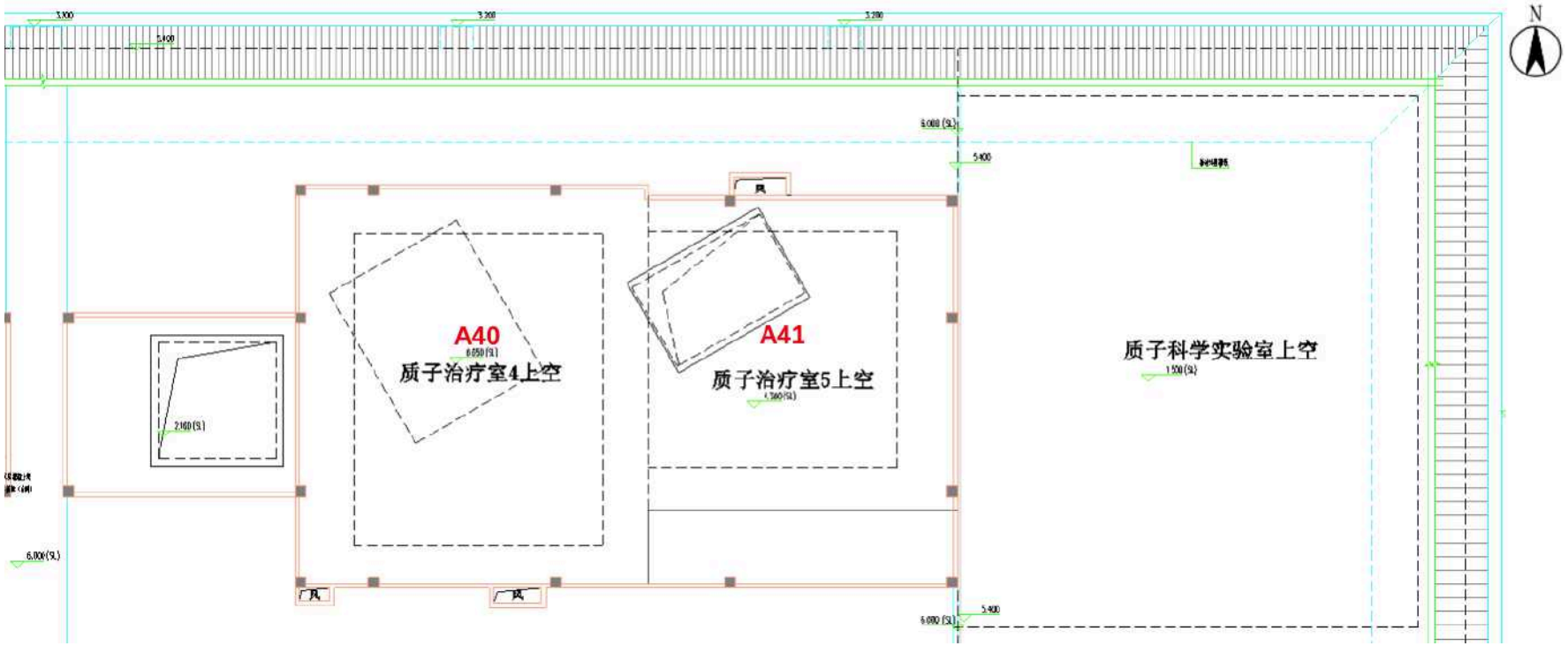


图 5-11 国产质子治疗区关注点平面示意图（屋顶层）

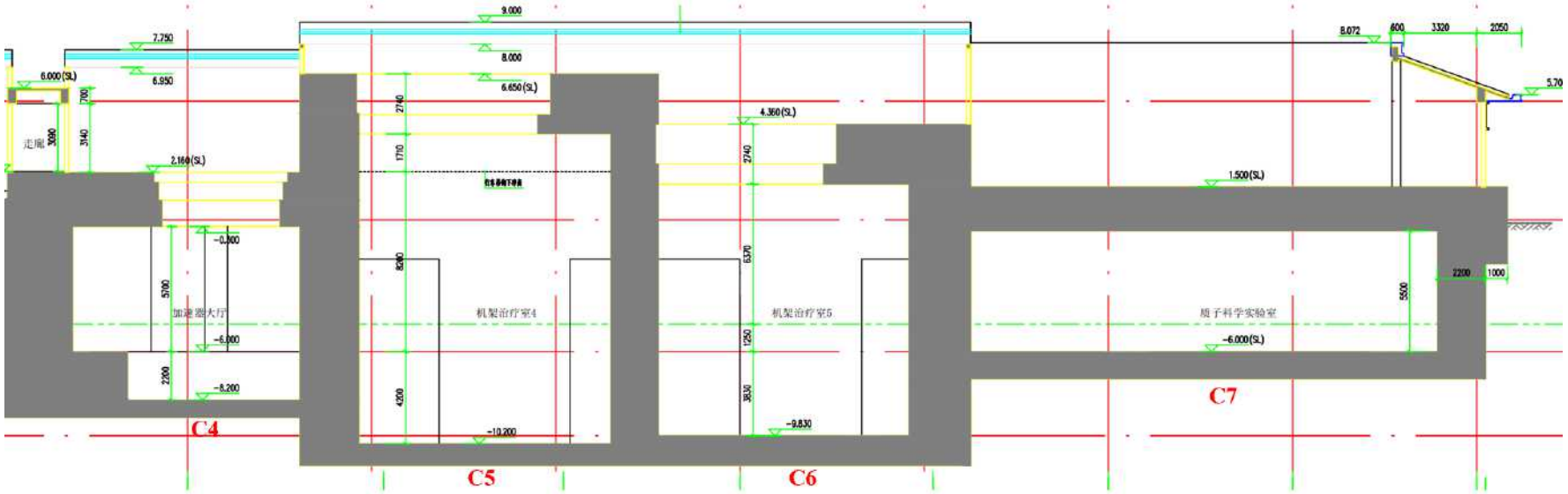


图 5-12 国产质子治疗区关注点剖面示意图

5.1.1.1.3 计算结果

根据 FLUKA 程序的计算结果，将两套质子治疗系统屏蔽体外各关注点处的剂量率计算结果汇总见表 5-2，模拟得到的剂量率分布图见图 5-13~图 5-37。

表 5-2 质子治疗机房屏蔽体外关注点剂量率模拟计算结果汇总

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	模拟结果，μSv/h	剂量率限值，μSv/h
进口加速器大厅及束流输运线（出束工况束损参数见表 3-18）	B1	进口回旋加速器大厅迷道口	2.3（叠加 A5 结果前） 2.35（叠加 A5 结果后）	10
	B2	进口回旋加速器主控室	0.001	2.5
	B3	质子治疗室 1 机架区	10	10
	B4	质子治疗室 1 工作区	2	6.2
	B28	进口回旋加速器大厅外走道	0.01	0.8
	B29	质子供应商办公室	0.001	2.5
	B30	男卫	0.001	3.1
	B31	维护室	0.001	10
	B42	束流运输线西侧迷道口	0.1	10
	B43	进口回旋加速器大厅东墙外（国产回旋加速器大厅）	0.5	10
	U1*	回旋加速器大厅顶板上方（屋面）	0.2	100
	U2	回旋加速器大厅迷道顶板上方（水冷机房）	0.005	10
	U3	能量选择系统顶板上方（钢瓶间）	0.5	10
	U7	束流输运区顶板上方（设备零件储藏间）	0.1	10
	U4*	回旋加速器底板下方（土壤）	500	5000
	U5*	能选系统底板下方（土壤）	500	5000
	B44*	束流运输线北墙外偏西（土壤）	0.001	5000
	B45*	束流运输线北墙外中部（土壤）	0.001	5000
	B46*	束流运输线北墙外偏东（土壤）	0.1	5000
质子治疗室 1（出束工况束损参数见表 3-19）	B7	治疗控制室 1	2	2.5
	B8	服务器机房	0.1	10
	B9	质子治疗室 1 迷道口	0.1	10
	B10	患者治疗设备存储室	0.05	10
	B11	质子治疗室 1 外走道	0.001	2.3
	B12	质子治疗室 2 机架区	8	10
	B13	质子治疗室 2 工作区	2	10

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	模拟结果，μSv/h	剂量率限值，μSv/h
	B32	抢救室	0.001	10
	B33	医生办公室	0.001	2.5
质子治疗室 2（出束工况束损参数见表 3-19）	B5	质子治疗室 1 机架区	0.5	10
	B6	质子治疗室 1 治疗区	1	10
	B16	治疗控制室 2	2	2.5
	B17	剂量验证设备存储室	0.1	10
	B18	质子治疗室 2 迷道口	0.1	10
	B19	治疗计划计算机房	0.05	10
	B20	质子治疗室 2 外走道	0.01	2.3
	B21	质子治疗室 3 机架区	8	10
	B22	质子治疗室 3 工作区	2	10
	B34	等候区	0.001	9.3
	B35	治疗头存储室	0.001	10.0
	U6*	质子治疗室 2 顶板上方（屋面）	1.8	100
	U8	质子治疗室 2 迷道顶板上方（电源间）	0.5	10.0
	U9*	质子治疗室 2 底板下方（土壤）	10	5000
质子治疗室 3（出束工况束损参数见表 3-19）	B14	质子治疗室 2 机架区	0.5	10
	B15	质子治疗室 2 治疗区	1	10
	B23	治疗控制室 3	2	2.5
	B24	患者固定装置存储室	0.1	10
	B25	质子治疗室 3 迷道口	0.1	10
	B26	治疗计划计算机房	0.05	10
	B27	质子治疗室 3 外走道	0.01	2.3
	B36	PET/CT 机房	0.001	10
	B37	PET/CT 控制室	0.001	2.5
	B38	VIP 接待室	0.001	0.5
	B39	直线加速器机房 3	2.3	10
	B40	直线加速器机房 2	0.01	10
	B41	直线加速器机房 1	0.001	10
国产加速器大厅及束流输运线（出束工况束损参数见表 3-20）	A1	国产回旋加速器主控室	0.02	2.5
	A2	回旋加速器大厅迷道入口	0.05（叠加 B1 结果前） 2.35（叠加 B1 结果后）	10
	A3	质子治疗室 4 机架区	10	10
	A4	进口回旋加速器大厅	4	10
	A5	站点经理办公室	0.001	2.5
	A27	回旋加速器顶板上方（空调机房）	2.3	10
	A32	回旋加速器顶板上方（高频房间）	0.1	10
	A38	回旋加速器顶板上方（走廊）	0.5	0.8

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	模拟结果，μSv/h	剂量率限值，μSv/h
	A39*	回旋加速器顶板上方（封闭空间）	5	100
	C1*	束流传输线北墙外（土壤）	1	5000
	C4*	回旋加速器底板下方 （土壤）	3000	5000
质子治疗室 4（出束工况束损参数见表 3-20）	A6	更衣室	0.5	10
	A7	治疗控制室 4	0.2	2.5
	A8	质子治疗室 4 迷道入口	1	10
	A9	服务器机房	0.03	10
	A10	患者固定装置储存室	0.008	10
	A11	质子治疗室 5 机架区	9	10
	A12	等候区	0.01	10
	A28	束流输运线顶板上方（电源间）	1	10
	A30	质子治疗室 4 南墙外上方（空调机房）	2.2	10
	A40*	质子治疗室 4 顶板上方（不上人屋面）	3	100
	C5*	质子治疗室 4 底板下方（土壤）	1500	5000
质子治疗室 5（出束工况束损参数见表 3-20）	A13	治疗控制室 5	0.7	2.5
	A14	质子治疗室 5 迷道入口	1	10
	A15	更衣室	0.1	10
	A16	治疗计划计算机房	0.05	10
	A17	剂量验证设备存储室	0.1	10
	A18	质子科学实验室	2.5	10
	A19	质子治疗室 4 治疗区	2	10
	A20	医生办公室	0.01	2.5
	A29	束流输运线顶板上方（转运大厅）	2.2	10
	A31	质子治疗室 5 南墙外上方（空调机房）	2.5	10
	A41*	质子治疗室 5 顶板上方（屋面）	2.5	100
	C6*	质子治疗室 5 底板下方（土壤）	400	5000
质子科学实验室（出束工况束损参数见表 3-20）	A21	电梯厅	2.5	10
	A22	楼梯	0.5	10
	A23	患者治疗设备存储室	0.005	10
	A24	机架治疗室 5 治疗区	0.001	10
	A25	质子科学实验室迷道入口	1	10
	A26	质子供应商办公室	0.005	2.5
	A33	地上一层科研办公室	0.001	0.3
	A34	地上一层货梯	0.001	10
	A35	地上一层楼梯	0.001	10
	A36	质子科学实验室北墙斜上方（院内道路）	0.5	10
	A37	质子科学实验室东墙斜上方（院内道路）	0.9	10
	A42*	质子科学实验室顶板上方（屋面）	8.7	100

辐射源项所在区域	关注点	周围环境	模拟结果，μSv/h	剂量率限值，μSv/h
	C2*	质子科学实验室北墙外（土壤）	10	5000
	C3*	质子科学实验室东墙外（土壤）	1000	5000
	C7*	质子科学实验室底板下方（土壤）	2000	5000

由上表可知，质子治疗机房屏蔽体外各关注点剂量率模拟计算结果均不超过其剂量率控制水平。

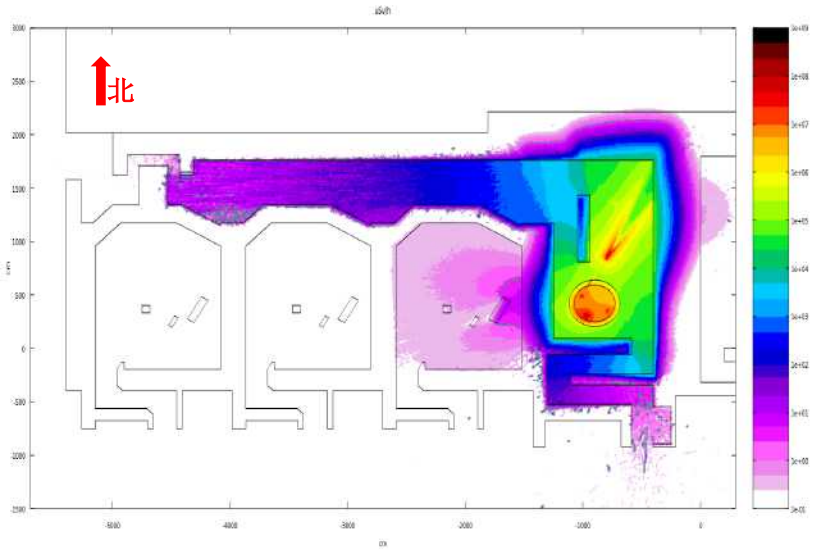


图 5-13 进口质子治疗系统加速器大厅剂量率分布图（平面）

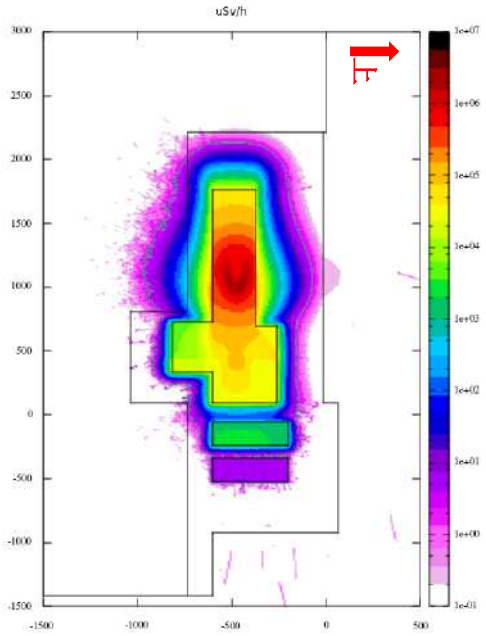


图 5-14 进口质子治疗系统加速器大厅剂量率分布图（剖面）

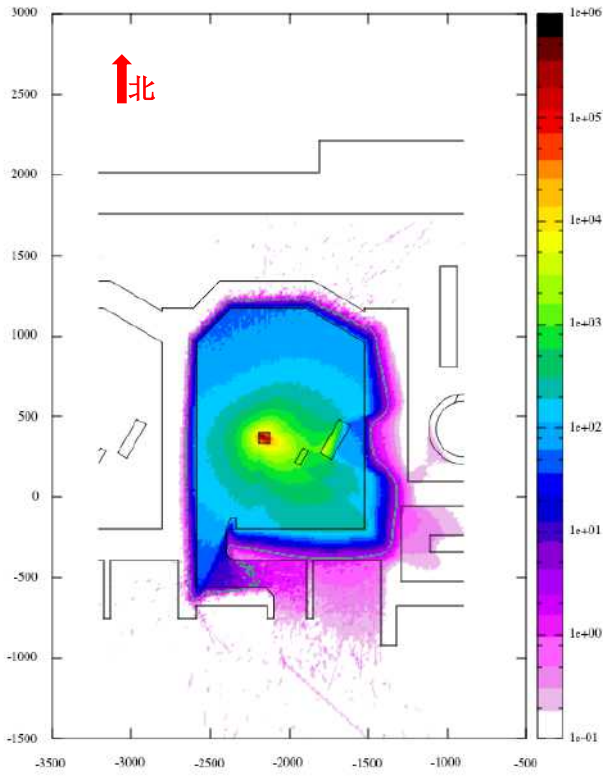


图 5-15 进口质子治疗室 1 剂量率分布图（平面，0° 向东照射）

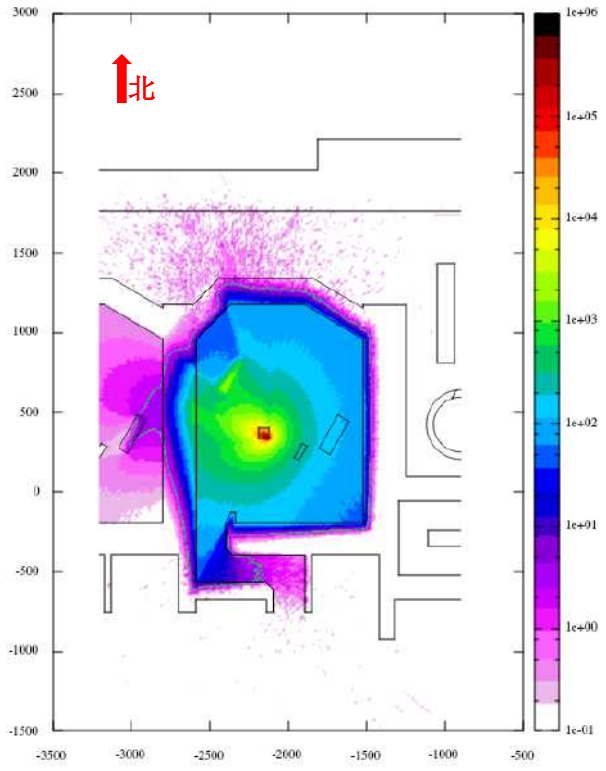


图 5-16 进口质子治疗室 1 剂量率分布图（平面，180°向西照射）

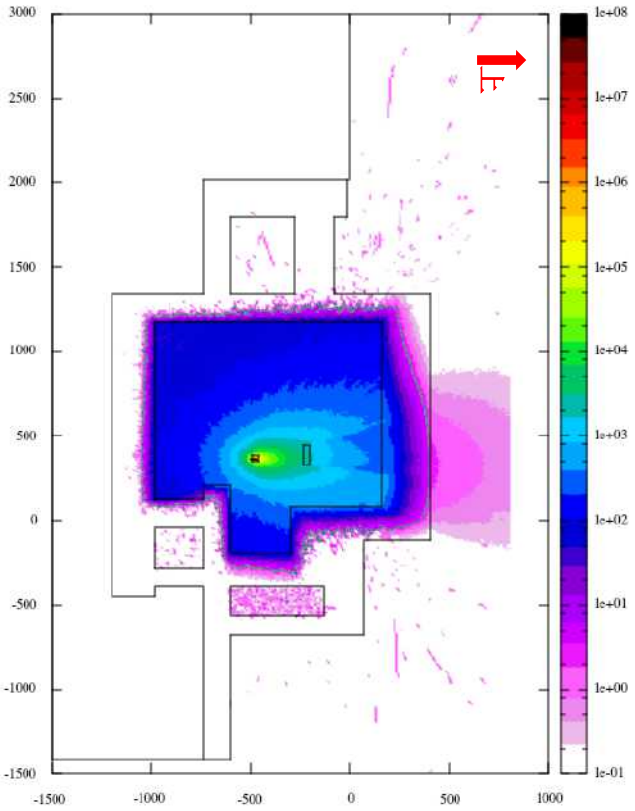


图 5-17 进口质子治疗室 1 剂量率分布图（剖面，270° 向上照射）

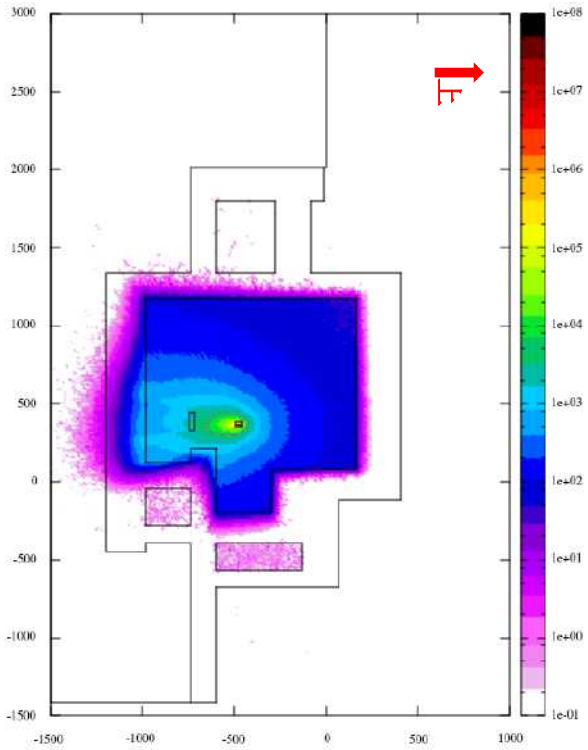


图 5-18 进口质子治疗室 1 剂量率分布图（剖面，90°向下照射）

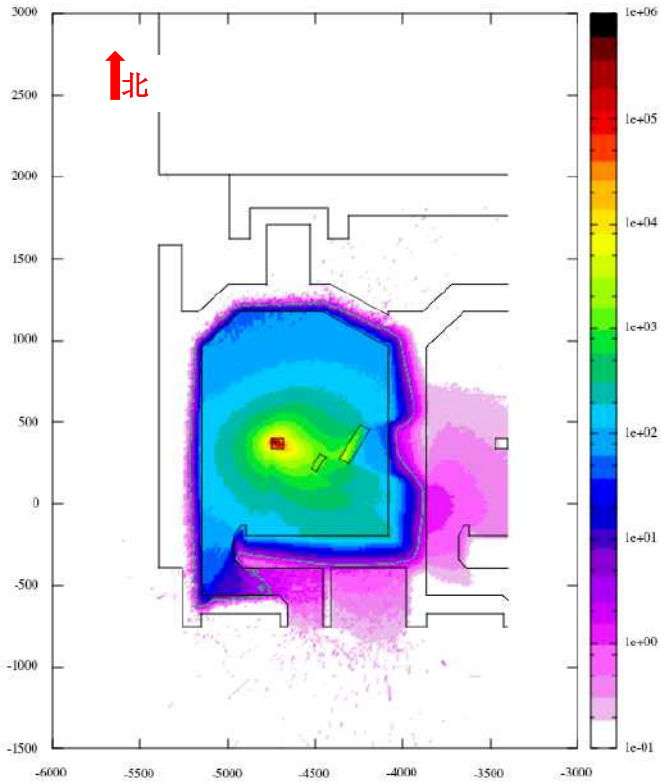


图 5-19 进口质子治疗室 3 剂量率分布图（平面， 0°向东照射）

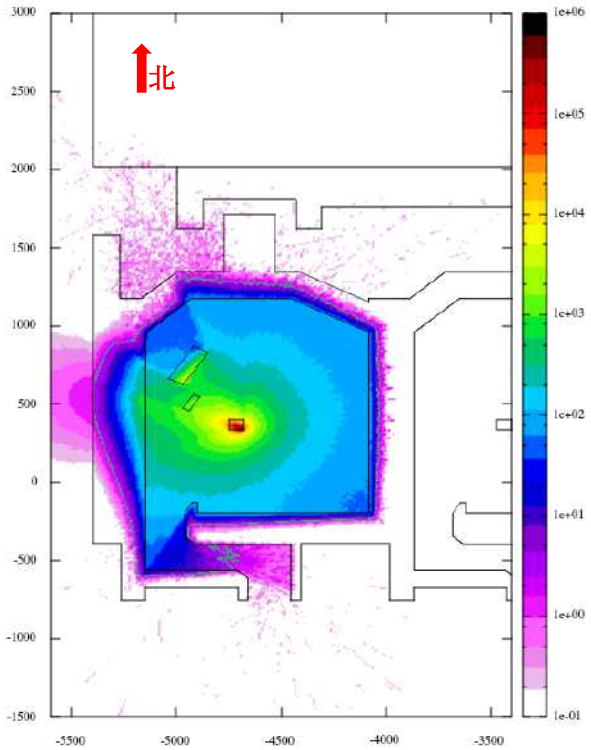


图 5-20 进口质子治疗室 3 剂量率分布图（平面， 180°向西照射）

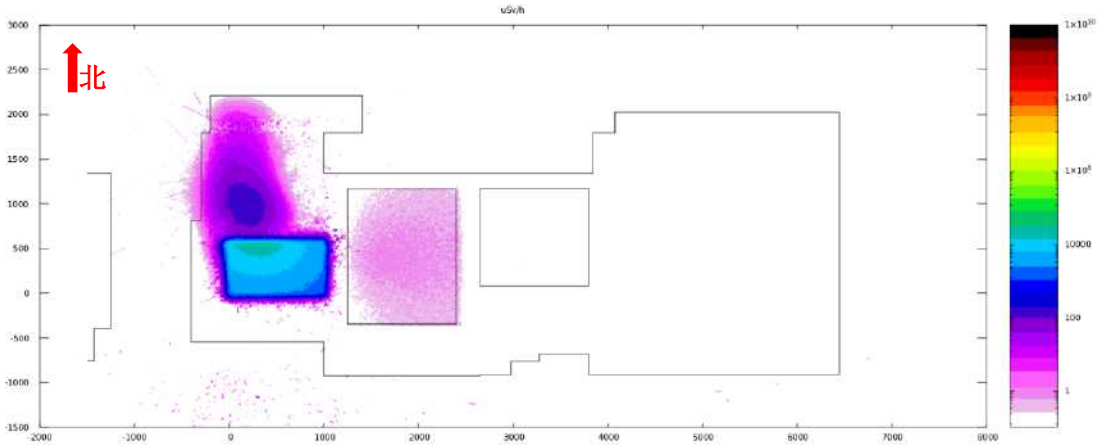


图 5-21 国产质子治疗系统加速器大厅剂量率分布图（基坑层平面）

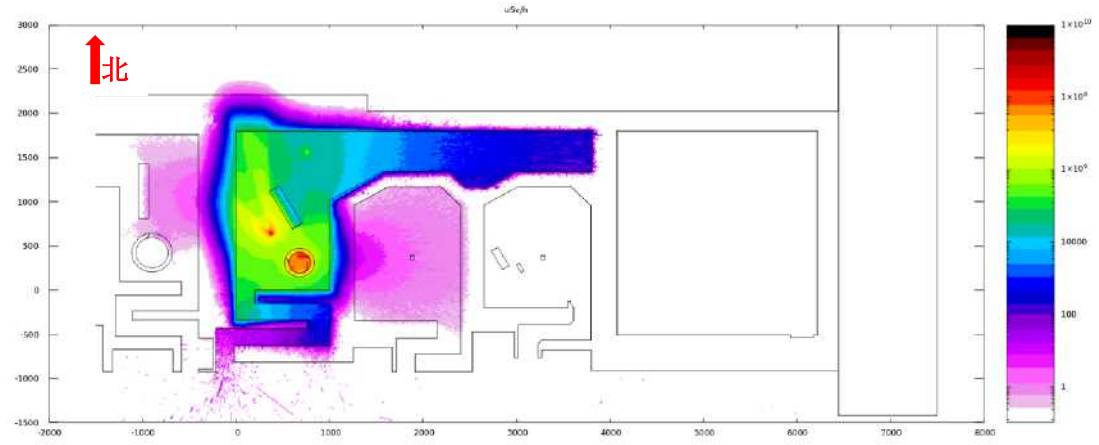


图 5-22 国产质子治疗系统加速器大厅剂量率分布图（地下一层平面）

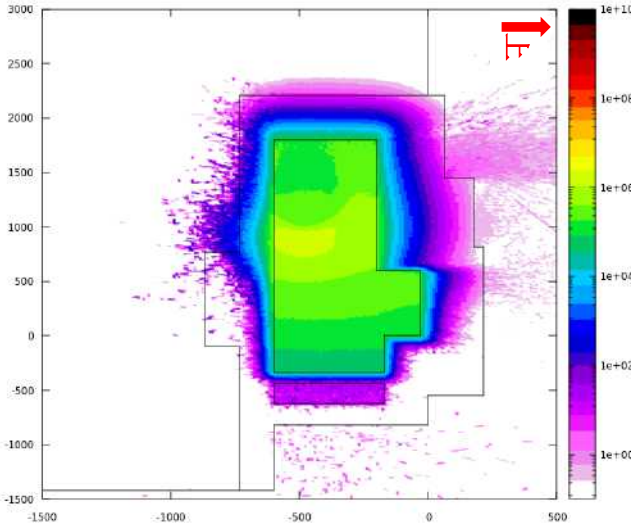


图 5-23 国产质子治疗系统加速器大厅剂量率分布图（剖面）

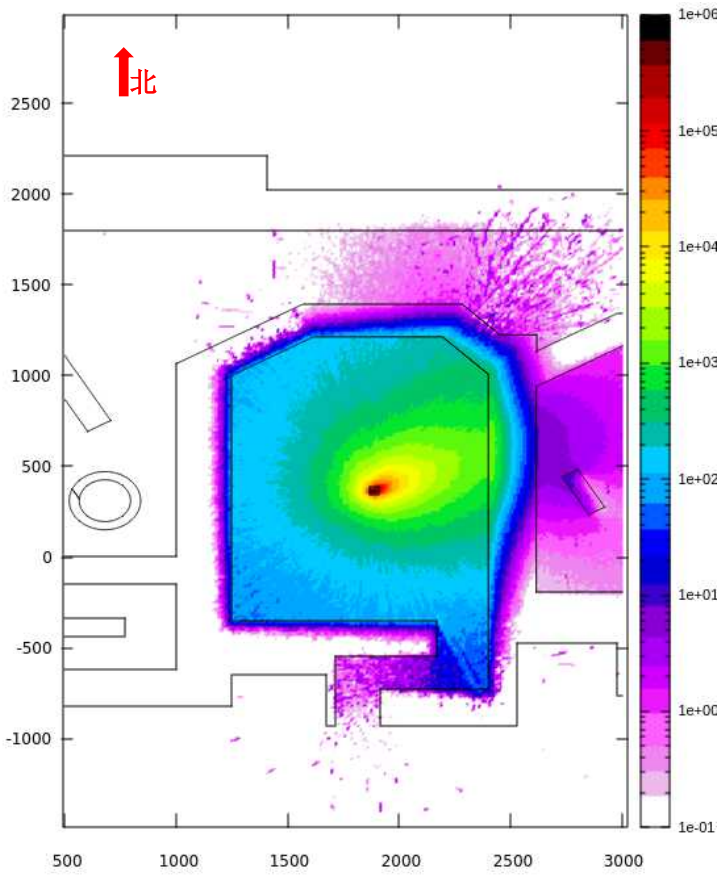


图 5-24 国产质子治疗室 4 剂量率分布图（平面，0°向东照射）

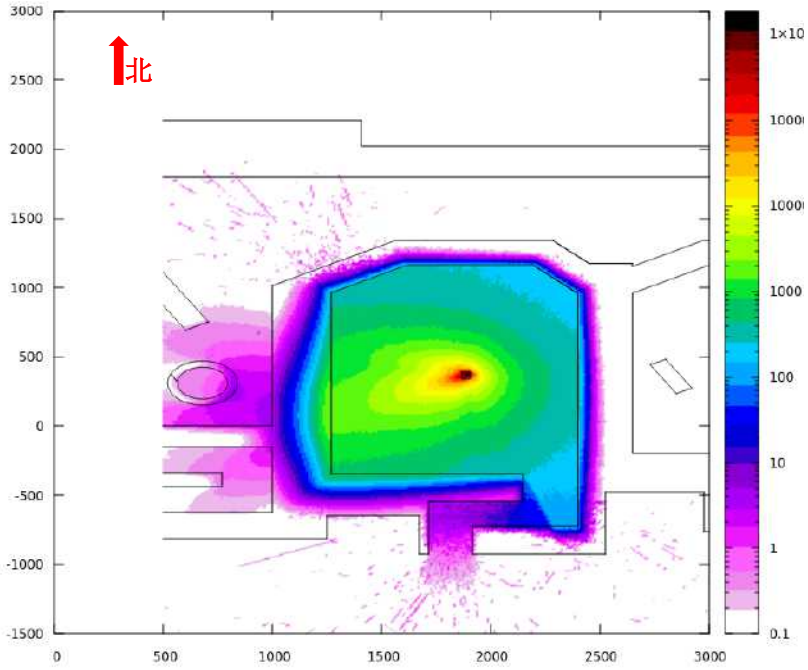


图 5-25 国产质子治疗室 4 剂量率分布图（平面，180°向西照射）

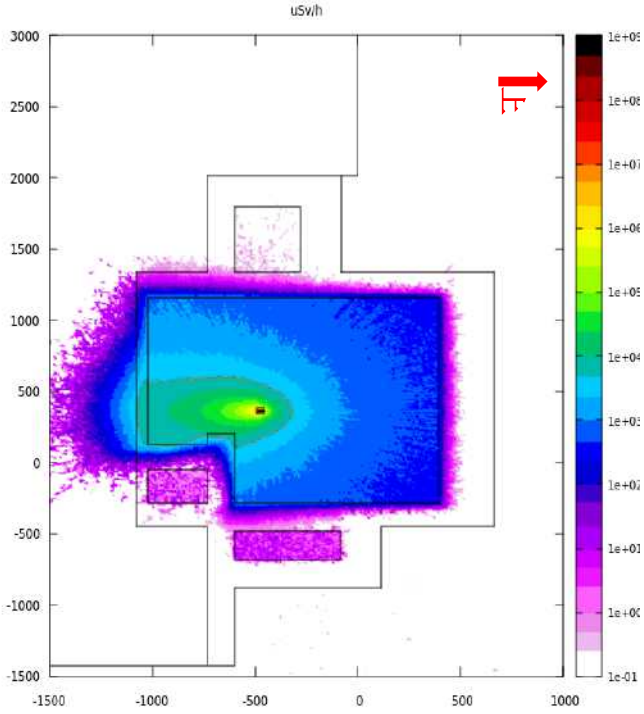


图 5-26 国产质子治疗室 4 剂量率分布图（剖面，90° 向下照射）

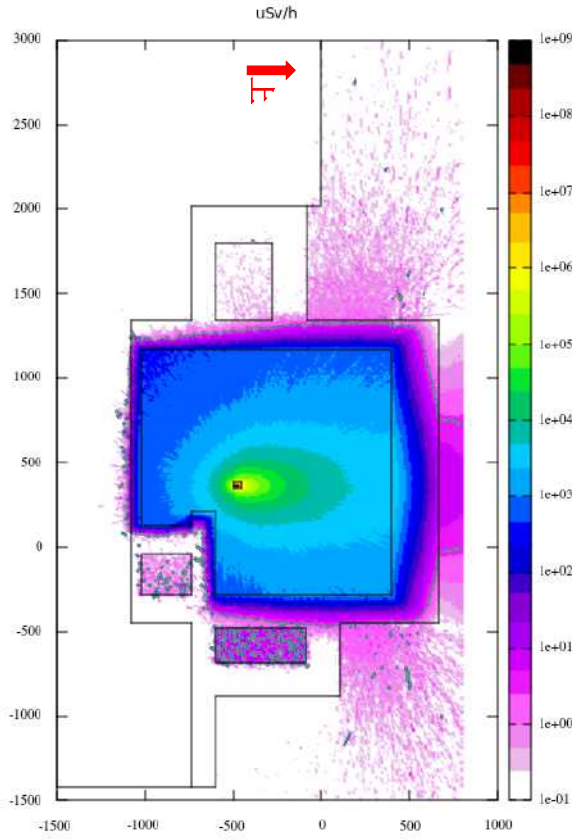


图 5-27 国产质子治疗室 4 剂量率分布图（剖面，270° 向上照射）

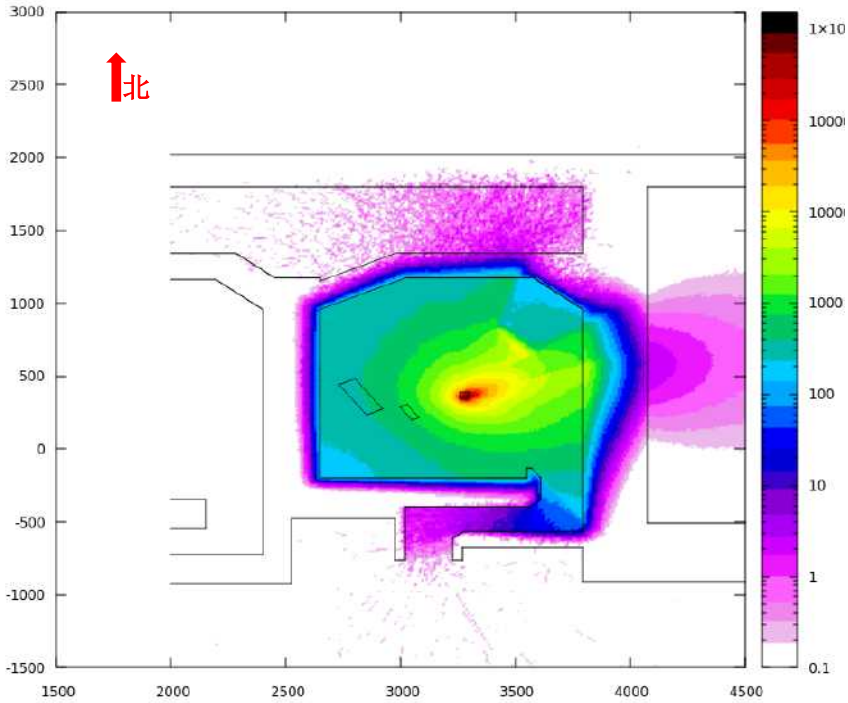


图 5-28 国产质子治疗室 5 剂量率分布图（平面， 0°向东照射）

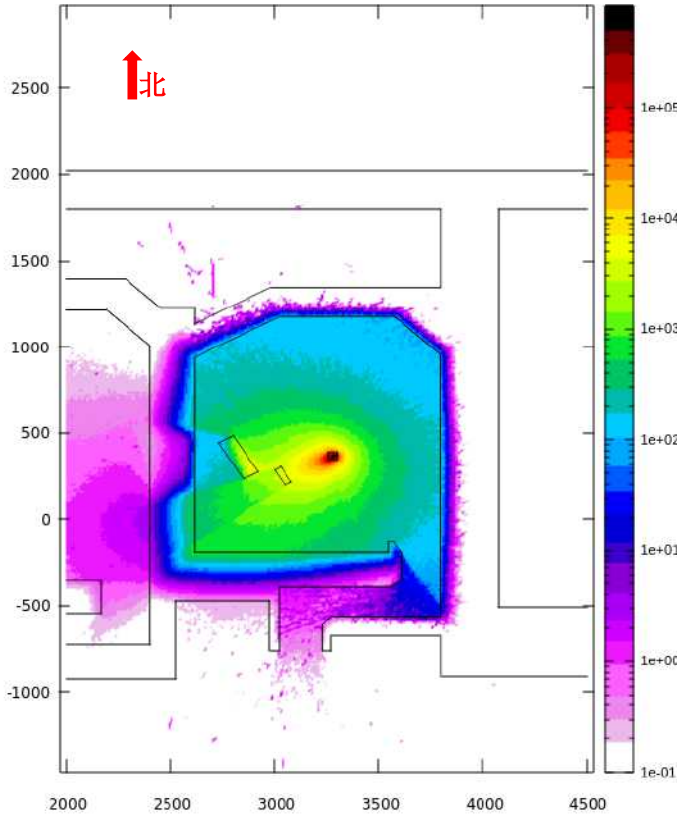


图 5-29 国产质子治疗室 5 剂量率分布图（平面，180°向西照射）

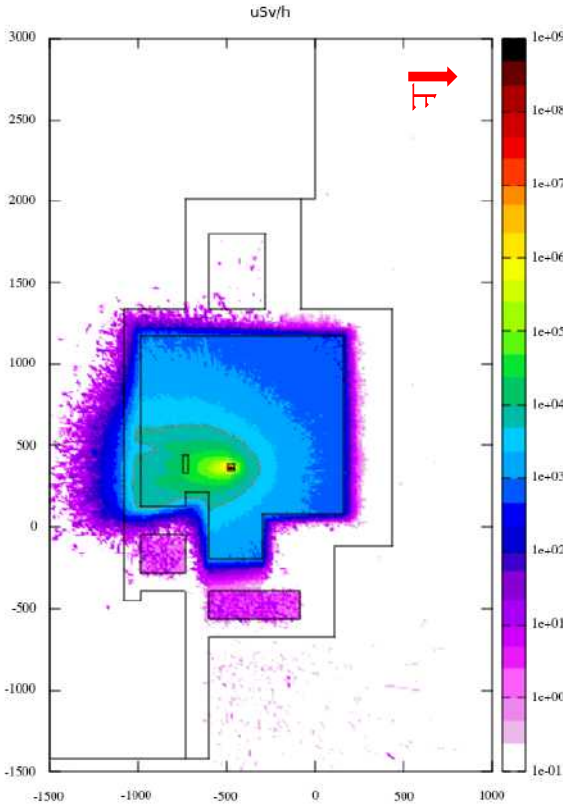


图 5-30 国产质子治疗室 5 剂量率分布图（剖面，90° 向下照射）

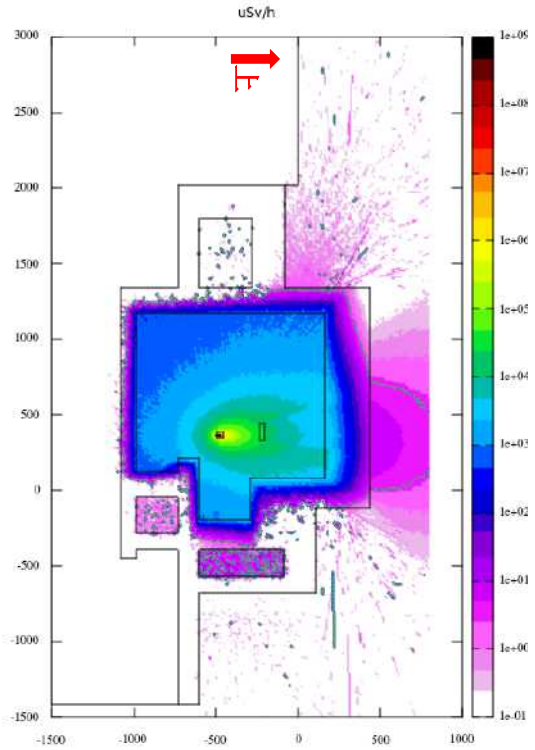


图 5-31 国产质子治疗室 5 剂量率分布图（剖面，270° 向上照射）

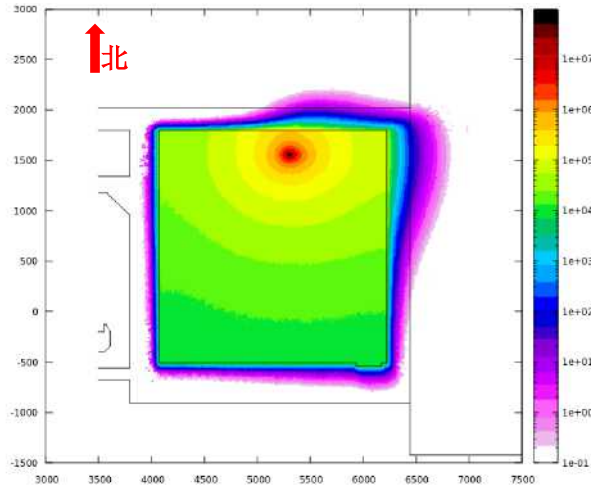


图 5-32 质子科学实验室材料终端出束时剂量率分布图（平面，地下一层）

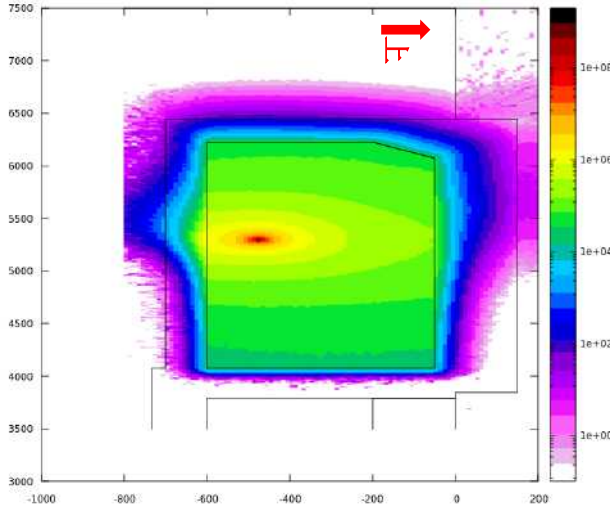


图 5-33 质子科学实验室材料终端出束时剂量率分布图（剖面）

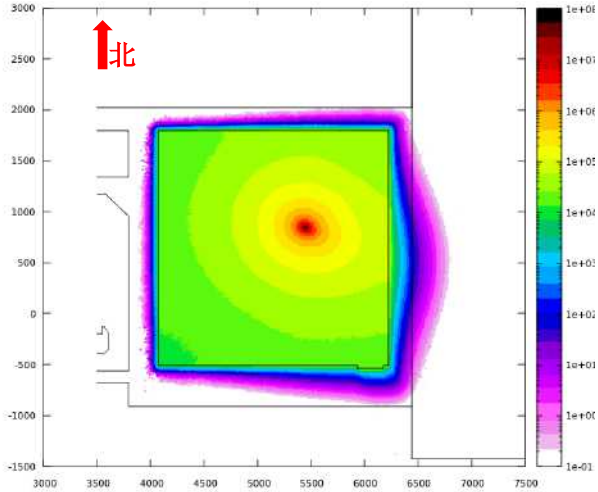


图 5-34 质子科学实验室医疗终端出束时剂量率分布图（平面，地下一层）

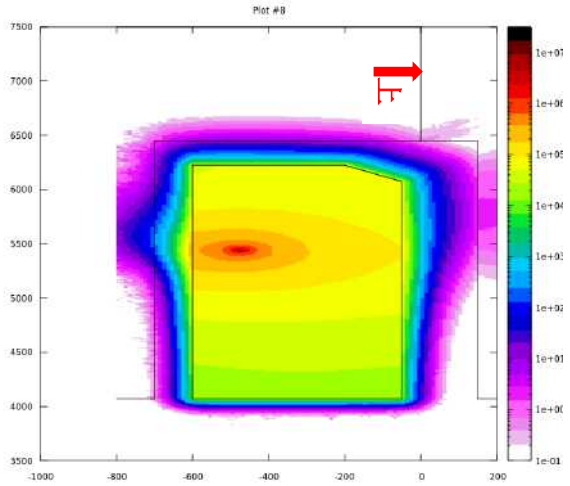


图 5-35 质子科学实验室医疗终端出束时剂量率分布图（剖面）

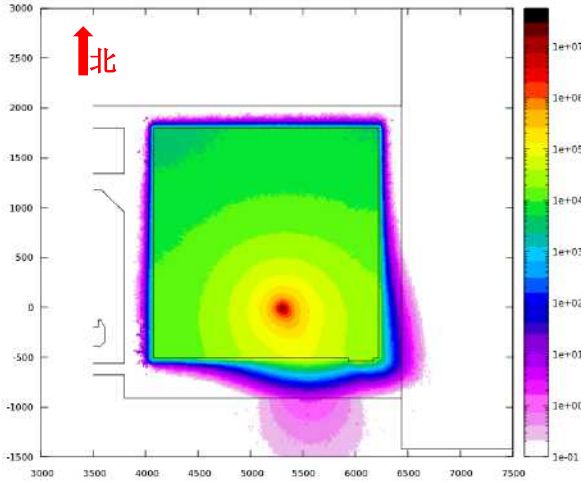


图 5-36 质子科学实验室生命科学终端出束时剂量率分布图（平面，地下一层）

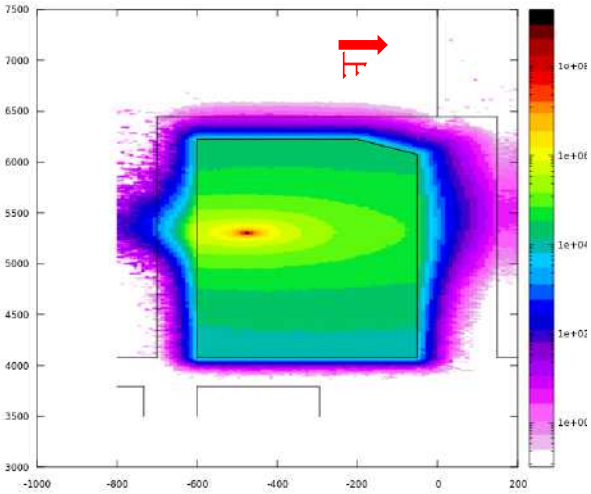


图 5-37 质子科学实验室生命科学终端出束时剂量率分布图（剖面）

5.1.1.2 质子治疗系统年使用规划

2 套质子治疗装置的年使用规划列于表 5-3、表 5-4。

表 5-3 进口质子治疗系统的年使用规划

序号	内容	单位	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3	3	3
2	每室每天治疗时间	h/d/室	8	8	8
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	24	24	24
4	每室每年治疗天数	d/a/室	250	250	250
5	每室每年治疗人数	人/a/室	250	250	250
6	每人平均治疗次数	次/人	24	24	24
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	6000	6000	6000
8	每人次治疗平均出束时间	min/人次	5	5	5
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	2	2	2
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	500	500	500
11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	40	40	40
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	10.8	10.8	10.8
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	540	540	540
14	年总出束时间	h/a	1620		

表 5-4 国产质子治疗系统的年使用规划

序号	内容	单位	治疗室 4	治疗室 5	质子科学实验室
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3	3	/
2	每室每天治疗时间	h/d/室	6	6	/
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	18	18	/
4	每室每年治疗天数	d/a/室	250	250	/
5	每室每年治疗人数	人/a/室	225	225	/
6	每人平均治疗次数	次/人	20	20	/
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	4500	4500	/
8	每人次治疗平均出束时间	min/人次	5	5	/
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	1.5	1.5	/
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	375	375	/
11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	35	35	/
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	8.2	8.2	/
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	410	410	/
14	质子科学实验室每天出束时间	h/d	/	/	3.2
15	质子科学实验室每周出束时间	h/w	/	/	16

16	质子科学实验室每年工作天数	h/d	/	/	250
17	质子科学实验室每年出束时间	h/d	/	/	800
18	年总出束时间	h/a	1620		

5.1.1.3 模拟 CT、质子中心 PET/CT 机房屏蔽体外剂量率估算

由于本项目模拟 CT、质子中心 PET/CT 的厂家型号未定，故本次评价参考西门子的 CT 设备在 140kV 工况下周围剂量率分布曲线数据：1m 处的杂散辐射为 0.052μGy/mAs（垂直）和 0.051μGy/mAs（水平），CT 扫描通常不超过 300mA，故 1m 处的杂散辐射剂量率最高约 56.16mGy/h。其它厂家的剂量率分布曲线类似，杂散辐射水平相近，故以此为例评价模拟 CT、质子中心 PET/CT 运行时的附加辐射影响。

本项目模拟 CT、质子中心 PET/CT 机房四周墙体及顶板为 220mm 混凝土，墙体、防护门及观察窗的等效铅厚度不低于 2.5mmPb，根据 GBZ 130-2020 附录 C 的公式（C.1）可算得 140kV 下的衰减因子约为 3.43E-04。上述 CT 出束时屏蔽体外剂量率计算结果见表 5-5，最大为 1.92μGy/h，满足剂量率控制水平。

表 5-5 模拟 CT、质子中心 PET/CT 出束时屏蔽体外剂量率计算结果

机房	关注点位置	1m 处杂散辐射剂量率，mGy/h	衰减因子 B	距离，m	屏蔽体外剂量率，μGy/h
模拟 CT1	东西墙外	56.16	3.43E-04	3.41	1.66E+00
	南北墙外	56.16	3.43E-04	4.32	1.03E+00
	顶板上方	56.16	3.43E-04	6.00	5.35E-01
模拟 CT2	东西墙外	56.16	3.43E-04	3.51	1.57E+00
	南北墙外	56.16	3.43E-04	4.32	1.03E+00
	顶板上方	56.16	3.43E-04	6.00	5.35E-01
质子中心 PET/CT	东西墙外	56.16	3.43E-04	3.17	1.92E+00
	南北墙外	56.16	3.43E-04	4.92	7.96E-01
	顶板上方	56.16	3.43E-04	6.00	5.35E-01

5.1.1.4 工作人员受照剂量估算

质子治疗系统正常运行期间，对辐射工作人员的辐射影响主要来自装置开机出束以及治疗室出束治疗时产生的瞬发辐射照射。X-γ 射线产生的外照射剂量可按公式 5-1 计算。

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

式中，

H 为外照射所致人员年有效剂量，mSv/a；

$\dot{H}$ 为关注点剂量，mSv/h；

T 为居留因子；

t 为年受照时间，h/a。

进口、国产质子治疗系统的年使用规划及出束时间分别见表 3-7、表 3-8。

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、工程师和实验人员，如表 5-6 所示。

表 5-6 质子治疗系统工作人员岗位规划

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医生办公室、抢救室	20	每天两班，每班 8h
物理师	制定并验证治疗计划、质控等	治疗计划室、物理师办公室、治疗室、治疗控制室	20	每天两班，每班 8h
治疗技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	CT 模拟定位机房及其控制室、质子治疗室及其控制室、技师办公室	20	每天两班，每班 8h
护士	治疗准备、注射、护理等	注射室、质子治疗室及其控制室、护士站	10	每天两班，每班 8h
工程师	水电、暖通、网络等的日常运维	设备间、工程师办公室等	6	每天两班，每班 8h
实验人员	质子科学实验	质子科学实验室、加速器主控室、科研办公室	6	每天一班，每班 8h

5.1.1.4.1 医生

质子治疗科室医生的工作地点主要在医生办公室内，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时可能进入治疗室内部，每名医生在治疗室内部的工作时间最多 30h/年，则质子科室医生年受照剂量估算结果列于表 5-7。

表 5-7 质子科室医生年受照剂量估算结果

工作区域	辐射来源	剂量率水平[1]，mSv/h	年受照时间[2]，h	受照剂量，mSv/a
医生办公室	瞬发辐射	1.00E-05	1590	1.59E-03
治疗室	相邻治疗室瞬发辐射	3.00E-03	30	9.00E-02
	患者感生放射性	3.10E-02		9.30E-01
总计	——	——	1620	1.04E+00
注：1. 瞬发辐射保守取表 5-2 中相关关注点的较高值进行计算；患者感生放射性保守取表 3-36 停机 1min 的数值； 2. 进口、国产质子治疗系统年总出束时间均为 1620h，由于医生只为进口或国产质子治疗系统的其中一套工作，因此医生在办公室和治疗室的年受照时间总和取 1620h。				

5.1.1.4.2 治疗技师

根据质子治疗的流程，治疗技师的工作内容主要包括在治疗前的模拟定位、在控制室内操作质子治疗系统以及在治疗机房内给患者摆位并操作定位 X 射线管等工作。其受照途径主要考虑外照射。

5.1.1.4.2.1 在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用模拟 CT 对其进行治疗前的模拟定位，在影像中心的模拟 CT 机房 1 或模拟 CT 机房 2 内进行。根据表 5-3、表 5-4，本项目质子治疗每年总治疗人数共为 1200 人。

每次模拟定位期间，按在模拟 CT 机房内摆位 5min、在控制室内操作模拟 CT 出束 1min 考虑，每年进行模拟定位次数为 1200 次。每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目共配备 20 名治疗技师轮班，则每名治疗技师每年参与模拟定位的次数约为 120 次。模拟 CT 机房屏蔽体外剂量率计算结果见表 5-5。由此可计算得出每名技师从事模拟定位工作期间的受照剂量，列于表 5-8。

表 5-8 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平，mSv/h	年受照时间，h	受照剂量，mSv/a
模拟 CT 机房内	1.57E-03	10	1.57E-02
模拟 CT 控制位	1.03E-03	2	2.06E-03
总计	——	——	1.78E-02
注：（1）由于模拟 CT2 与其西侧的大孔径 CT 机房相邻，因此在模拟 CT2 机房内工作可			

能受到大孔径 CT 出束的辐射影响；大孔径 CT 与模拟 CT2 的机房尺寸相同、最大管电压相同，因此大孔径 CT 机房屏蔽体外剂量率可参考模拟 CT2 的计算结果；因此模拟 CT 机房内的剂量率取表 5-5 中模拟 CT2 东西墙外的计算结果，即 1.57E-03mSv/h。
（2）模拟 CT 控制位在机房南侧，剂量率取表 5-5 中模拟 CT 机房南墙外的计算结果，即 1.03E-03 mSv/h。

5.1.1.4.2.2 在质子治疗室内进行 X 射线精确定位

患者在治疗前需要利用质子治疗系统配备的 X 射线管进行精确的位置验证，此操作由治疗技师在机房内完成，单次工作时间约为 5min，其中 X 射线管的出束时间约为 30s。由此可计算得出每名治疗技师操作 X 射线定位的年工作量列于表 5-9。

表 5-9 每名治疗技师操作 X 射线定位时受相邻治疗室照射时间

区域	单次操作 X 射线定位时长，min	年治疗总次数	操作 X 射线定位年总时长，h	每名治疗技师操作 X 射线定位年总时长，h
进口质子系统	5	18000	1500	125
国产质子系统	5	9000	750	94

表 5-10 每名治疗技师操作 X 射线定位时受 X 射线出束照射时间

区域	单次操作 X 射线定位出束时间，min	年治疗总次数	操作 X 射线定位年总出束时间，h	每名治疗技师操作 X 射线定位年受照时间，h
进口质子系统	0.5	18000	150	12.5
国产质子系统	0.5	9000	75	9.4

由此可计算得出治疗技师在操作 X 射线定位期间的年受照剂量列于表 5-11。

表 5-11 每名治疗技师在治疗室内进行 X 射线定位工作的年受照剂量

工作区域	辐射来源	剂量率水平[1]，mSv/h	年受照时间[2]，h	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	相邻治疗室瞬发辐射	1.00E-03	125	1.25E-01
	X 射线管瞬发辐射	2.50E-03	12.5	3.13E-02
	总计			1.56E-01
国产质子治疗系统	相邻治疗室瞬发辐射	3.00E-03	94	2.82E-01
	X 射线管瞬发辐射	2.50E-03	9.4	2.35E-02
	总计			3.06E-01

注：1. 相邻治疗室瞬发辐射保守取表 5-2 中相关关注点的较高值进行计算；
2. X 射线管操作间屏蔽体厚度为 2.75mm 铅当量，观察窗厚度为 4.6mm 铅当量，能确保操作间内剂量率水平低于 2.5μSv/h，X 射线管出束所致操作台的剂量率水平保守取 2.5μSv/h。

5.1.1.4.2.3在治疗室内摆位/解除摆位

治疗技师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。质子治疗共配备 20 名技师，技师的工作机制为两班倒，每班次每间治疗室共 2 名技师。根据表 5-3、表 5-4，每名治疗技师在机房内摆位的年工作量列于表 5-12。

表 5-12 每名治疗技师在机房内摆位/解除摆位的年工作量

工作区域	每年治疗前摆位次数	单次治疗前摆位时间，min	年治疗前摆位总时间，h	单次解除摆位时间，min	年解除摆位总时间，h
进口质子治疗系统	3000	5	250	1	50
国产质子治疗系统	2250	5	187.5	1	37.5

（1）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相邻机房的照射，计算结果列于表 5-13。

表 5-13 每位治疗技师因患者治疗前摆位所致的年受照剂量

工作区域	辐射来源	瞬时剂量率，mSv/h	年摆位时间，h	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	相邻机房瞬发辐射	1E-03	250	2.50E-01
国产质子治疗系统	相邻机房瞬发辐射	3E-03	187.5	5.63E-01

（2）治疗后解除摆位

每次治疗结束后，治疗技师在治疗室接触的是受照后的患者。此时，患者自身由于受到质子束流的照射会产生感生放射性。通常情况下，患者单次治疗结束停机 5min 后，治疗技师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距离约为 0.5m。根据表 3-36 计算结果，保守取最大治疗条件 230MeV-0.47nA 连续治疗 5min、停机 5min 后距离患者 50cm 处的剂量率 6.6μSv/h 作为每次治疗技师解除摆位时所在区域的剂量率水平，可计算得出每名治疗技师由于解除摆位所致的年受照剂量，结果见表 5-14。

表 5-14 每位治疗技师因患者治疗后解除摆位所致的年受照剂量

工作区域	辐射来源	瞬时剂量率，mSv/h	年解除摆位时间，h	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	相邻机房瞬发辐射	1.00E-03	50	5.00E-02
	患者感生放射性	6.60E-03	50	3.30E-01
	总计			3.80E-01
国产质子治疗系统	相邻机房瞬发辐射	3.00E-03	37.5	1.13E-01
	患者感生放射性	6.60E-03	37.5	2.48E-01
	总计			3.60E-01

每名治疗技师因摆位/解除摆位所致的年受照剂量计算结果列于表 5-15。

表 5-15 每位治疗技师因摆位/解除摆位所致的年受照剂量汇总

工作区域	来源	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	摆位	2.50E-01
	解除摆位	3.80E-01
	总计	6.30E-01
国产质子治疗系统	摆位	5.63E-01
	解除摆位	3.60E-01
	总计	9.23E-01

5.1.1.4.2.4 在质子治疗控制室内操作系统出束

质子治疗系统共 20 名治疗技师，分为两班，每间治疗室每班 2 名。根据表 5-3、表 5-4，进口和国产质子治疗装置每室每年治疗的出束时间分别为 500h、375h，那么每名技师在控制室内的受照时间分别为 250h、187.5h。则质子治疗系统出束期间，治疗技师在治疗室控制室内工作期间的受照剂量估算结果见表 5-16。

表 5-16 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[1]，mSv/h	年受照时间，h	受照剂量，mSv/a
进口治疗室控制室	2E-03	250	5.00E-01
国产治疗室控制室	5E-04	187.5	9.38E-02
注：1. 根据表 5-2，取剂量率较高的值进行计算。			

5.1.1.4.2.5 质子中心 PET/CT 治疗后精确度验证

治疗后精确度验证在质子中心的 PET/CT 机房进行，治疗技师主要的操作是为患者摆位、在控制室内操作设备照射，摆位 5min/人次，照射 1min/人次。按每名患者均进行一次治疗后精确度验证考虑，则每年共 1200 次，共 20 名技师分担，则治疗技师在质子中心 PET/CT 机房工作期间的受照剂量估算结果列于表 5-17。

表 5-17 治疗技师在质子中心 PET/CT 机房工作期间的受照剂量估算结果

工作内容	辐射来源	剂量率，mSv/h	年受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
摆位	患者感生放射性 [1]	4.30E-03	5	2.15E-02
	质子治疗室瞬发辐射 [2]	1.00E-06	5	5.00E-06
照射	PET/CT 瞬发辐射 [3]	1.92E-03	1	1.92E-03
	质子治疗室瞬发辐射 [4]	1.00E-06	1	1.00E-06
总计	——	——	——	2.34E-02
注：1. 根据表 3-36，取最大治疗条件 230MeV-0.47nA 连续治疗 5min、停机 10min 后距离患者 50cm 处的剂量率； 2. 取表 5-2 关注点 B37 的计算结果； 3. 取表 5-5 PET/CT 机房西墙外（控制位）剂量率计算结果； 4. 取表 5-2 关注点 B37 的计算结果。				

5.1.1.4.2.6 治疗技师年受照剂量小结

每位治疗技师年总受照剂量计算结果列于表 5-18。

表 5-18 每位治疗技师年总受照剂量

工作区域	来源	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位	1.78E-02
	在质子治疗室内进行 X 射线精确定位	1.56E-01
	在质子治疗室内进行摆位/解除摆位	6.30E-01
	在质子治疗控制室内操作系统出束	5.00E-01
	质子中心 PET/CT 治疗后精确度验证	2.34E-02
	总计	1.33E+00
国产质子治疗系统	在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位	1.78E-02
	在质子治疗室内进行 X 射线精确定位	3.06E-01
	在质子治疗室内进行摆位/解除摆位	9.23E-01
	在质子治疗控制室内操作系统出束	9.38E-02
	质子中心 PET/CT 治疗后精确度验证	2.34E-02
	总计	1.36E+00

5.1.1.4.3 物理师

物理师的受照剂量主要来自治疗计划制定、治疗计划验证和 QA 工作期间。

（1）治疗计划制定

本项目治疗计划制定主要在治疗计划计算机用房内进行，主要考虑北侧的相邻治疗室出束对物理师的影响。治疗计划计算机用房的剂量率保守取表 5-2 中的最大值 0.05μSv/h，受照时间按每天 2h、每年 500h 考虑，则每名物理师每年因在治疗计划计算机用房内进行治疗计划制定的受照剂量计算结果列于表 5-19。

表 5-19 物理师进行治疗计划制定期间的年受照剂量

工作内容	剂量率，mSv/h	年工作时间，h	年受照剂量，mSv/a
治疗计划制定	5E-05	500	2.50E-02

（2）治疗计划验证

本项目共配备 20 名物理师，假设每次工作由 2 名物理师共同完成。每位患者需要物理师做一次治疗计划验证，则根据表 5-3、表 5-4，每年治疗计划验证总次数为 1200 次，则每名物理师每年进行治疗计划验证的次数按 120 次计。物理师操作一次治疗计划验证的过程与技师操作一次正式的治疗过程基本一致，只是把患者换成了固体水模体，因此可按每次治疗计划验证期间物理师的受照剂量与每次治疗期间技师的受照剂量一致考虑。保守取表 5-18 国产质子治疗系统治疗技师年受照剂量 1.35mSv 除以其年治疗次数 2250，可推知每名物理师每次治疗计划验证的受照剂量约为 6E-04mSv/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 5-20。

表 5-20 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	6E-04	120	7.20E-02

（3）QA

QA 期间，物理师的工作地点包括机房内部和控制室。每名物理师在机房内部工作的时间按每年 125h 考虑。根据表 5-3、表 5-4，进口和国产质子治疗系统的 QA 年总出束时间分别为 120h、70h。共 20 名物理师，分两班，每次 QA 工

作由 2 名物理师共同完成。则物理师 AQ 工作期间的年受照剂量估算结果列于表 5-21。

表 5-21 物理师 QA 工作期间年受照剂量算结果

工作区域	工作地点	剂量率，mSv/h	年工作时间，h	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	质子治疗机房内	1.00E-03	125	1.25E-01
	控制室	2.00E-03	60	1.20E-01
	总计			2.45E-01
国产质子治疗系统	质子治疗机房内	3.00E-03	125	3.75E-01
	控制室	5.00E-04	35	1.75E-02
	总计			3.93E-01

（4）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 5-22。

表 5-22 物理师的年受照剂量

工作区域	工作内容	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	治疗计划制定	2.50E-02
	治疗计划验证	7.20E-02
	QA	2.45E-01
	总计	3.42E-01
国产质子治疗系统	治疗计划制定	2.50E-02
	治疗计划验证	7.20E-02
	QA	3.93E-01
	总计	4.90E-01

5.1.1.4.4 护士

根据质子治疗流程，护士在治疗前模拟 CT 定位和治疗室内 X 射线精确定位期间，在技师操作模拟 CT 和 X 射线管定位时，根据工作需要为患者注射造影剂。模拟 CT 定位时，护士在模拟 CT 机房东北侧的注射室留针，然后在控制廊远程操作注射造影剂；X 射线管定位时，护士进入治疗室内留针，然后在治疗室内的 X 射线控制间内远程操作注射造影剂。每年的操作总次数按模拟 CT 定位和 X 射线精确定位次数的 1/10 考虑，分别为 120 次、2700 次。留针的时间按 1min/次考虑，注射造影剂的时间按 1min/次考虑。共 10 名护士，则每名护士的年受照剂量计算结果列于表 5-23。

表 5-23 护士年受照剂量计算结果

工作区域		剂量率，mSv/h	年受照时间，h	受照剂量，mSv/a
治疗前模拟CT定位	注射室[1]	1.03E-03	0.2	2.06E-04
	模拟CT控制位[2]	1.03E-03	0.2	2.06E-04
治疗前X射线精确定位	质子治疗机房[3]	3.00E-03	4.5	1.35E-02
	X射线控制间[4]	2.50E-03	4.5	1.13E-02
总计	——	——	——	2.52E-02
注：1.注射室位于模拟CT2机房北侧，此处剂量率保守取表 5-5 中模拟CT2机房北墙外剂量率计算结果，1.03E+00μSv/h； 2. 取表 5-5 中模拟CT机房南墙外控制廊的剂量率计算结果，1.03E+00μSv/h； 3. 根据表 5-2，取质子治疗室内剂量率最高值进行计算； 4. 保守按照X射线管出束时操作台处剂量率为2.5μSv/h考虑。				

5.1.1.4.5 工程师

工程师的主要工作内容为质子治疗区的水电、暖通、网络等日常基础维护保养，根据建设单位提供的资料，工程师每年在治疗室内的工作时间不超过200h，由此可计算得出工程师的年受照剂量，列于表 5-24。

表 5-24 工程师的年受照剂量

工作区域		剂量率，mSv/h	受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
进口质子治疗系统	治疗室	1E-03	200	2.00E-01
	工程师办公室	1E-06	1420	1.42E-03
	总计			2.01E-01
国产质子治疗系统	治疗室	3E-03	200	6.00E-01
	工程师办公室	5E-06	1420	7.10E-03
	总计			6.07E-01

5.1.1.4.6 实验人员

实验人员的工作地点主要在国产质子治疗系统主控室、质子科学实验室、实验准备洁净间及科研办公室内。根据表 5-4 的工作负荷，质子科学实验室每年出束时间为800h，实验人员在质子科学实验室内的工作时间按每年500h考虑，在实验准备洁净间的工作时间按每年500h考虑，在科研办公室的工作时间按每年250h考虑则每名实验人员的年受照剂量估算结果列于表 5-25。

表 5-25 实验人员的年受照剂量

工作区域	剂量率，mSv/h	年受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
国产质子主控室[1]	2.00E-05	800	1.60E-02
质子科学实验室[2]	1.30E-03	500	6.50E-01
实验准备洁净间[3]	1.00E-03	500	5.00E-01
科研办公室[4]	1.00E-06	250	2.50E-04
总计			1.17E+00
注：1. 剂量率取自表 5-2 关注点 A1；2. 剂量率取自表 5-2 关注点 A18； 3. 剂量率取自表 5-2 关注点 A25；4. 剂量率取自表 5-2 关注点 A33。			

5.1.1.4.7 工作人员受照剂量汇总

本项目质子治疗系统工作人员的最大年受照剂量汇总如下表 5-26 所示。由结果可知，治疗技师年受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 1.36mSv，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-26 质子治疗系统工作人员受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量，mSv/a
医生	1.04E+00
治疗技师	1.36E+00
物理师	4.90E-01
护士	2.52E-02
工程师	6.07E-01
实验人员	1.17E+00

5.1.1.5 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。

5.1.1.5.1 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，主要为位于质子治疗区的医护人员中的非辐射工作人员、患者陪诊人员以及质子治疗楼建筑外的公众。其中：

（1）非辐射工作人员主要为不涉及放射性工作的护士，其工作场所主要为质子治疗区的护士站；

（2）患者陪诊人员主要位于等候区，保守按每名患者每年接受 20 次治疗计，则患者陪诊人员每年陪诊 20 次，每次在等候区停留时间按 1h 计；

（3）质子治疗楼建筑外的公众主要考虑近距离范围内的公众。

上述公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果列于表 5-27。

表 5-27 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

公众所在位置	关注点	瞬时剂量率，mSv/h	居留因子	年受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
护士站	B38	1E-06	1	1620	1.62E-03
进口质子治疗系统等候区	B34	1E-06	1	20	2.00E-05
国产质子治疗系统等候区	A12	1E-05	1	20	2.00E-04
建筑外园内道路	A37	9E-04	1/40	1620	3.65E-02

5.1.1.5.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用李红等人在《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》（方栋，李红，辐射防护，2002 年第 22 卷第 6 期）中推荐的简单稀释模式估算质子治疗系统正常运行工况下放射性气态流出物的影响。放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射。计算时主要关注排风口近距离范围内公众的受照剂量。

5.1.1.5.2.1空气浸没外照射

进口质子治疗系统放射性气体排放口位于门诊楼楼顶，排风高度约 15m，国产质子治疗系统放射性气体排放口位于实验楼屋顶，排风高度约 17m。排风口临近最高建筑物为住院部，高度 H_b 为 19m。最靠近关注点的建筑物的最大截面积 A_b 为 600m^2。则可知进口、国产质子治疗系统排风口的高度 $H<2.5H_b$。对于评价范围的公众，根据 IAEA NO.19 号报告，当关注点与排风口的距离 $x\leqslant 2.5\sqrt{A_b}$ =61m 时，关注点地面空气浓度可由公式 5-2 计算：

$$c_{a,i}=\frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \qquad (5\text{-}2)$$

式中，

$C_{a,i}$ 为下风向 x（m）距离处的核素 i 的地面空气浓度，Bq/m^3；

P_p 为一年中风吹向接收点所在扇形方位 p 的时间份额，保守取值 0.25；

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s；见表 3-28。

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。

则关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-28。

表 5-28 关注点处地面空气浓度计算结果

核素	近距离范围内浓度，Bq/m^3
^{11}C	5.21E+00
^{13}N	7.66E+00
^{15}O	9.10E+00
^{41}Ar	9.11E-01

空气浸没外照射剂量可由下式 5-3 计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \qquad (5\text{-}3)$$

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；

S_F 为建筑物屏蔽因子，本次评价取值为 1；

$C_{a\cdot i}$ 为关注点处空气浓度，Bq/m^3；

G_A 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-29，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子，公众取 1/16。

表 5-29 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	——

建筑外道路上公众的空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-30。

表 5-30 空气浸没外照射剂量计算结果

核素	公众空气浸没外照射剂量，Sv/a
^{11}C	5.03E-07
^{13}N	7.40E-07
^{15}O	8.80E-07
^{41}Ar	1.17E-07
总计	2.24E-06

5.1.1.5.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由式 5-4 计算：

$$H_{h\cdot i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \qquad (5\text{-}4)$$

式中：$H_{h\cdot i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a；

t 为受照时间，h/a；

$C_{a\cdot i}$ 为关注点处空气浓度，Bq/m^3；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m^3/h，成人取值 1.2m^3/h；

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

T 为居留因子，公众取 1/16。

建筑外道路上的公众吸入内照射剂量计算结果见表 5-31。

表 5-31 空气吸入内照射剂量计算结果

核素	公众空气吸入内照射剂量，Sv/a
^{11}C	6.17E-08
^{13}N	——
^{15}O	——
^{41}Ar	——
总计	6.17E-08

5.1.1.5.2.3 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 5-32。

表 5-32 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果

核素	建筑外道路的公众		
	空气浸没外照射剂量，Sv/a	吸入内照射剂量，Sv/a	总受照剂量，Sv/a
^{11}C	5.03E-07	9.87E-07	5.64E-07
^{13}N	7.40E-07	——	7.40E-07
^{15}O	8.80E-07	——	8.80E-07
^{41}Ar	1.17E-07	——	1.17E-07
总计	2.24E-06	9.87E-07	2.30E-06

5.1.1.5.3 公众受照剂量汇总

公众受照剂量计算结果汇总见表 5-33，质子治疗系统正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 3.88E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-33 公众受照剂量汇总

公众所在位置	关注点	瞬发辐射所致年受照剂量，mSv/a	放射性气体排放所致年受照剂量，mSv/a	年总受照剂量，mSv/a
护士站	B38	1.62E-03	——	1.62E-03
进口质子治疗系统等候区	B34	2.00E-05	——	2.00E-05
国产质子治疗系统等候区	A12	2.00E-04	——	2.00E-04
建筑外园内道路	A37	3.65E-02	2.30E-03	3.88E-02

5.1.2 事故环境影响分析

质子治疗系统的核心是回旋加速器，其辐射场是瞬发性的，装置一旦停机，能造成环境影响的辐射源立即消失，且不会再引起周边介质的活化。

质子治疗系统运行期间可能发生的事故主要有因安全联锁系统失效、人员误入治疗机房内部或工作人员在机房内工作期间设备出束造成的人员误照射事故和冷却水泄漏事故。

5.1.2.1 人员误照射事故

5.1.2.1.1 事故后果分析

人员误照射事故中，工作人员在机房内工作期间设备出束的情况下，工作人员受照剂量最大，本次评价对该事故期间的人员受照剂量进行估算。

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

电离辐射引起的生物效应包括随机效应和确定性效应。随机效应的发生不存在剂量的阈值，其发生几率与受照剂量的大小有关，如遗传效应和某些躯体效应（即癌症）。确定性效应的发生存在阈值效应，其效应的严重程度随受照剂量的大小而异，剂量愈高则效应的严重程度愈大。根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ 104-2017）和《辐射防护导论》，成人全身受到不同照射剂量的损伤估计情况列于表 5-34。

表 5-34 不同照射量对人体损伤的估计

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

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

结构保持完好，因此该类事故对周围环境不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

5.1.2.1.2 事故防范措施

（1）质子治疗系统设计有功能齐全，具有安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，采用分区控制、清场搜索、声光报警器、视频监控、紧急停机、紧急开门等安全设备和措施，确保当治疗机房内有束流时，各区域的门无法打开，人员无法进入；当治疗机房某一区域有人时，机房内无法出束，能够有效防止误入事故的发生。为防止各项安全联锁硬件设施失效，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程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）辐射工作人员加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。

（4）做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

5.1.2.2 冷却水泄漏事故

5.1.2.2.1 事故后果分析

冷取水管路上安装有泄漏测量传感器，一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水。根据“3.3.1.3.2 节”的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员造成辐射影响。因此，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

5.1.2.2.2 事故防范措施

定期检查冷却水系统运行情况，确认泄漏测量系统有效性。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 直线加速器

5.2.1 正常运行环境影响分析

5.2.1.1 屏蔽体外剂量率计算

5.2.1.1.1 屏蔽效能核算

5.2.1.1.1.1 计算依据

本次评价取电子直线加速器的最高能量 10MV 和等中心最大输出剂量率 2200 cGy/min 进行计算，见表 5-35。

表 5-35 直线加速器用于屏蔽计算的主要参数

射线装置	X 射线最高能量，MV	等中心点输出剂量率，Gy/min
电子直线加速器	10	22

5.2.1.1.1.2 不同关注点应考虑的辐射种类

①主屏蔽墙：仅考虑有用束的直接照射；

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

③侧屏蔽墙：仅考虑泄漏辐射；

④迷路入口门处：考虑有用束、患者散射、机头泄漏射线的散射、穿过迷路内墙的泄漏辐射（本项目直线加速器 X 射线能量不大于 10MV，因此不需考虑中子、中子俘获γ射线）。

5.2.1.1.1.3 计算方法

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

（1）初级辐射

主屏蔽墙外 30cm 处主要受初级 X 射线的影响，参考 NCRP NO.151 报告 P22 中式 2.1~2.4，初级 X 射线屏蔽可由下式 5-5 和式 5-6 计算得出。

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

$$B_{\mathrm{pri}}=10^{-\{1+[\frac{t_{\mathrm{barrier}}-TVL_1}{TVL_e}]\}} \qquad (5\text{-}6)$$

式中，

H_{pri} 为距离加速器靶 d_{pri} 米处的剂量率，Sv/h；

B_{pri} 为主屏蔽墙的厚度对应的透射因子；

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

U 为使用因子，计算瞬时剂量率时取 1；

T 为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

$t_{barrier}$ 为主屏蔽墙的厚度，m；

TVL_1 为第一个十分之一值层厚度，m；见表 5-36；

TVL_e 为平衡时的十分之一值层厚度，m；见表 5-36；

d_{pri} 为靶点至关注点的距离，m。

表 5-36 X 射线对应不同材料的 TVL 值

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

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

（2）泄漏辐射

根据 NCRP NP.151 报告中 P33 页式 2.8，泄漏辐射屏蔽可由下式 5-7 和式 5-8 计算得出。

$$H_L = \frac{B_L H_0 T}{1000 d_L^2} \qquad (5\text{-}7)$$

$$B_{\mathrm{L}} = 10^{-\{1+[\frac{t_{\mathrm{barrier}}-TVL_1}{TVL_e}]\}} \qquad (5\text{-}8)$$

式中，

H_L 为距离加速器等中心点 d_L 米处的剂量率，Sv/h；

1/1000 为泄漏辐射率，取 0.1%；

B_L 为次蔽墙的厚度对应泄漏辐射的透射因子；

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

T 为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

TVL_1 为泄漏辐射十分之一值层厚度，m；

TVL_e 为泄漏辐射平衡时的十分之一值层厚度，m；

d_L 为靶点距关注点的距离，m。

（3）散射辐射

根据 NCRP NP.151 报告中 P32 页式 2.7，散射辐射可由下式 5-9 和式 5-10 计算。

$$H_{PS} = \frac{B_{PS}\alpha H_0 T \frac{F}{400}}{d_{sca}^2 d_{\mathrm{sec}}^2} \qquad (5\text{-}9)$$

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

式中，

H_{PS} 为距离患者 d_{sec} 米处的剂量率，Sv/h；

B_{PS} 为次蔽墙的厚度对应散射辐射的透射因子；

d_{sca} 为靶点至患者的距离，m；

d_{sec} 为患者至关注点的距离，m；

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

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

T 为居留因子，计算瞬时剂量率时取 1；

TVL_{sca} 为患者散射辐射十分之一值层厚度，m；

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

5.2.1.1.1.4 计算结果

计算时，除关注各机房四周及屋顶屏蔽体外剂量率是否满足剂量率控制水平的要求外，同时结合各机房周围环境分布情况以及后续考虑各机房同时运行时对工作人员和公众的剂量估算，在各机房外设置了若干关注点，见图 5-38、图 5-39。

三间直线加速器机房屏蔽体外各关注点剂量率计算参数和结果见表 5-37、表 5-38、表 5-39。

表 5-37 直线加速器机房 1 关注点剂量率计算结果（10MV、2200cGy/min）

关注点	周围环境	射线类型	透射因子 B	H_0，μGy/h	$t_{barrier}$，cm	$d_{pri}/d_L/d_{sec}$，m	H，μSv/h	合计，μSv/h
a1	直加机房 2	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	8.3	1.92E-01	1.92E-01
a2	楼梯间	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	8.3	1.92E-01	1.92E-01
a3	屋顶内庭院	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	7.0	2.69E-01	2.69E-01
b1、b2	直加机房 2	泄漏	1.59E-07	1.32E+09	186	9.0	2.59E-03	7.01E-03
		散射	2.14E-08	1.32E+09			4.43E-03	
b3、	楼梯间、VIP	泄漏	1.59E-07	1.32E+09	186	9.0	2.59E-03	7.01E-03

b4	电梯厅	散射	2.14E-08	1.32E+09			4.43E-03	
b5、b6	屋顶内庭院	泄漏	1.89E-07	1.32E+09	184	6.1	6.69E-03	1.83E-02
		散射	2.58E-08	1.32E+09			1.17E-02	
c	控制室 1	泄漏	5.52E-09	1.32E+09	260	9.4	5.52E-09	8.25E-05
d	水冷机房	泄漏	1.35E-06	1.32E+09	186	10.3	1.35E-06	1.67E-02
e	质子治疗室 3 外走道	泄漏	4.42E-06	1.32E+09	170	6.0	4.42E-06	1.62E-01

表 5-38 直线加速器机房 2 关注点剂量率计算结果（10MV、2200cGy/min）

关注点	周围环境	射线类型	透射因子 B	H_0，μGy/h	$t_{barrier}$，cm	$d_{pri}/d_L/d_{sec}$，m	H，μSv/h	合计，μSv/h
A1	直加机房 3	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	8.3	1.92E-01	1.92E-01
A2	直加机房 1	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	8.3	1.92E-01	1.92E-01
A3	屋顶内庭院	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	7.0	2.69E-01	2.69E-01
B1、B2	直加机房 3	泄漏	2.66E-07	1.32E+09	180	7.4	6.40E-03	1.80E-02
		散射	3.78E-08	1.32E+09			1.16E-02	
B3、B4	直加机房 1	泄漏	2.66E-07	1.32E+09	180	7.4	6.40E-03	1.80E-02
		散射	3.78E-08	1.32E+09			1.16E-02	
B5、B6	屋顶内庭院	泄漏	1.89E-07	1.32E+09	184	6.1	6.69E-03	1.83E-02
		散射	2.58E-08	1.32E+09			1.17E-02	
C	控制室 2	泄漏	5.52E-09	1.32E+09	260	9.4	5.52E-09	8.25E-05
D	控制室 2	泄漏	4.10E-06	1.32E+09	171	9.5	4.10E-06	6.00E-02
E	质子治疗室 3 治疗区	泄漏	4.42E-06	1.32E+09	170	6.0	4.42E-06	1.62E-01

表 5-39 直线加速器机房 3 关注点剂量率计算结果（10MV、2200cGy/min）

关注点	周围环境	射线类型	透射因子 B	H_0，μGy/h	$t_{barrier}$，cm	$d_{pri}/d_L/d_{sec}$，m	H，μSv/h	合计，μSv/h
a1'	转运大厅	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	8.3	1.92E-01	1.92E-01
a2'	直加机房 2	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	8.3	1.92E-01	1.92E-01
a3'	屋顶内庭院	主束	1.00E-08	1.32E+09	300	7.0	2.69E-01	2.69E-01
b1'、b2'	转运大厅	泄漏	1.59E-07	1.32E+09	186	9.0	2.59E-03	7.01E-03
		散射	2.14E-08	1.32E+09			4.43E-03	
b3'、b4'	直加机房 2	泄漏	1.59E-07	1.32E+09	186	9.0	2.59E-03	7.01E-03
		散射	2.14E-08	1.32E+09			4.43E-03	
b5'、b6'	屋顶内庭院	泄漏	1.89E-07	1.32E+09	184	6.1	6.69E-03	1.83E-02
		散射	2.58E-08	1.32E+09			1.17E-02	
c'	控制室 3	泄漏	5.52E-09	1.32E+09	260	9.4	5.52E-09	8.25E-05
d'	水冷机房	泄漏	1.35E-06	1.32E+09	186	10.3	1.35E-06	1.67E-02
e'	质子治疗室 3 机架区	泄漏	4.42E-06	1.32E+09	170	6.0	4.42E-06	1.62E-01

（3）小结

根据上述计算结果，对照表 1-8 可知，直线加速器机房屏蔽体外剂量率水平均低于其剂量率控制水平。

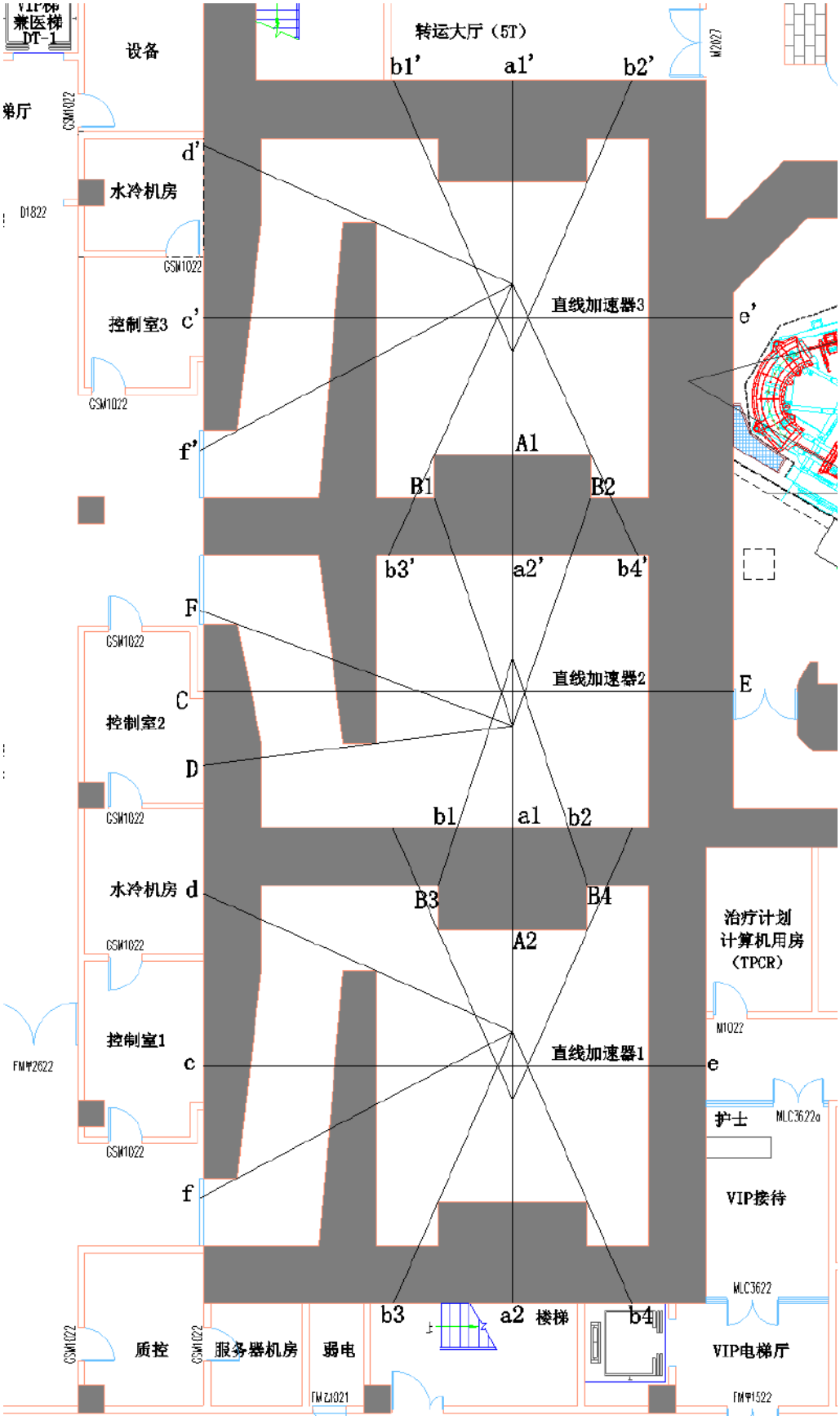


图 5-38 直加机房屏蔽体外关注点示意图（平面）

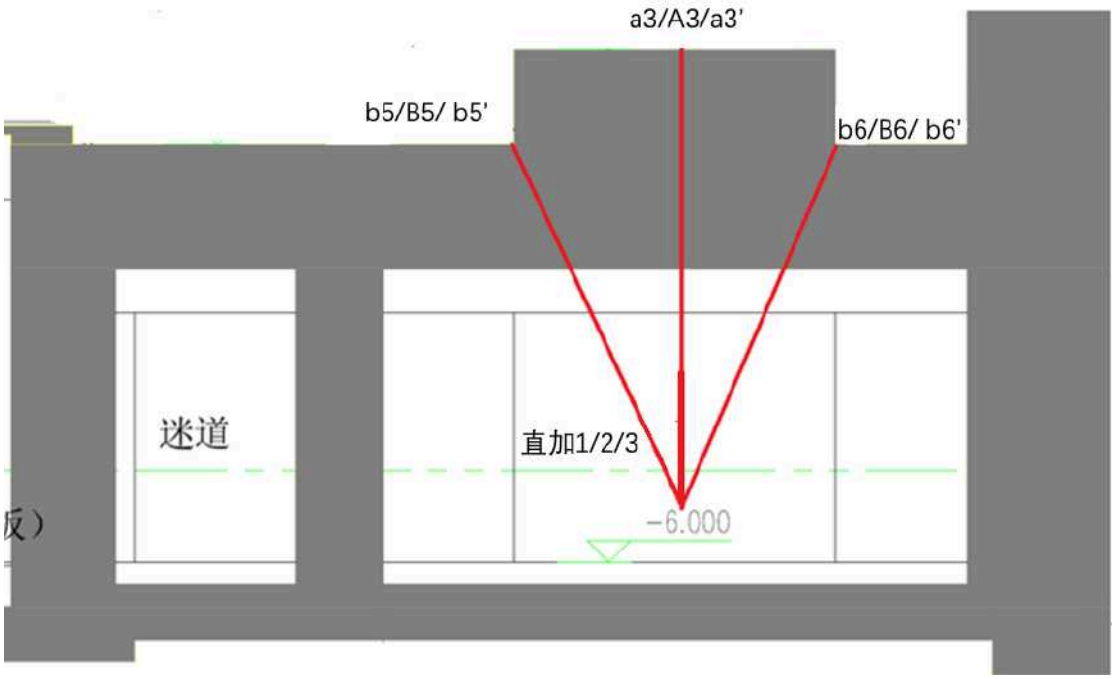


图 5-39 直加机房屏蔽体外关注点示意图（剖面）

5.2.1.1.2 迷路入口剂量率计算

5.2.1.1.2.1计算方法

① H_{PS}（患者散射辐射）

参照 NCRP NO.151 号报告 P38 式 2.11，H_{ps} 可由下式 5-11 计算：

$$H_{PS}=\frac{a(\theta)H_0(\frac{F}{400})\alpha_1 A_1\alpha_2 A_2}{(d_0d_1d_2d_3)^2} \qquad (5\text{-}11)$$

式中，

H_{PS} 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

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

U 为使用因子，取 1；

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

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

α_1 为墙 K 对患者散射辐射的反散射系数；

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

α_2 为墙 P 对患者散射辐射的反散射系数；

A_2 为散射至墙 P 的有效散射面积（A_1 的长度×机房净高），m^2；

d_0 为靶点至患者的距离，m；

d_1 为患者至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_2 为散射体 K 墙到散射体 P 墙迷路中心线的距离，m；

d_3 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

② H_S（墙的散射辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P35 式 2.9，Hs 可由下式 5-12 计算：

$$H_S = \frac{H_0 U \alpha_0 A_0 \alpha_3 A_3 \alpha_4 A_4}{(d_4 d_5 d_6 d_7)^2} \qquad (5\text{-}12)$$

式中：

H_s 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

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

U 为使用因子，取 1；

α_0 为主束散射面 L 墙的反散射系数；

A_0 为等中心 1m 处最大照射野投影在主屏蔽墙 L 上的面积，m^2；

α_3 为主束经迷路外墙 M 第二次散射时的反射系数；

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

α_4 为主束经墙体 P 第二次散射时的反射系数；

A_4 为主束散射到墙体 P 表面的散射面积，m^2；

d_4 为靶点至主束散射面 L 墙的距离，m；

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

d_6 为散射体 K 墙到散射体 P 墙迷路中心线的距离，m；

d_7 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

③ H_{LS}（机头泄漏在墙上的散射辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P37 式 2.10，Hs 可由下式 5-13 计算：

$$H_{LS}=\frac{L_f H_0 U \alpha_5 A_5 \alpha_6 A_2}{(d_8 d_2 d_3)^2} \qquad (5\text{-}13)$$

式中：

H_{LS} 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

L_f 为距靶 1m 处装置头泄漏辐射率，取 0.001；

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

U 为使用因子，取 1；

α_5 为 K 墙对装置头泄漏辐射的第一次反散射系数；

A_5 为装置头泄漏辐射至墙 K 的有效散射面积（A_1 的长度×机房净高），m^2；

α_6 为 P 墙对装置头泄漏辐射的第二次反散射系数；

A_2 为散射至墙 P 的有效散射面积（A_1 的长度×机房净高），m^2；

d_8 为靶至散射体 K 墙迷路中心线的距离，m；

d_2 为散射体 K 墙到入口处的垂直距离，m；

d_3 为散射体 P 墙至迷路入口处的垂直距离，m。

④ H_{LT}（穿过迷道墙的机头泄漏辐射）

根据 NCRP NO.151 号报告 P38 式 2.12，H_{LT} 可由下式 5-14 和式 5-15 计算：

$$H_{LT} = \frac{L_f H_0 U B}{d_L^2} \qquad (5\text{-}14)$$

$$B_{\mathrm{L}} = 10^{-\{1+[\frac{t_{barrier}-TVL_1}{TVL_e}]\}} \qquad (5\text{-}15)$$

式中：

H_{LT} 为关注点的辐射剂量率，Sv/h；

L_f 为距靶 1m 处装置头泄漏辐射率，取 0.001；

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

U 为使用因子，取 1；

B 为迷路内墙对装置头泄露辐射的透射因子；

d_L 为靶经迷路内墙至迷路入口处的距离，m；

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

TVL_1 为十分之一值层厚度，m；

TVL_e 为平衡时的十分之一值层厚度，m。

5.2.1.1.2.2 计算结果

直线加速器机房迷路各路径示意图见图 5-40~图 5-41，迷路入口处的剂量率计算结果列于表 5-40~表 5-43。

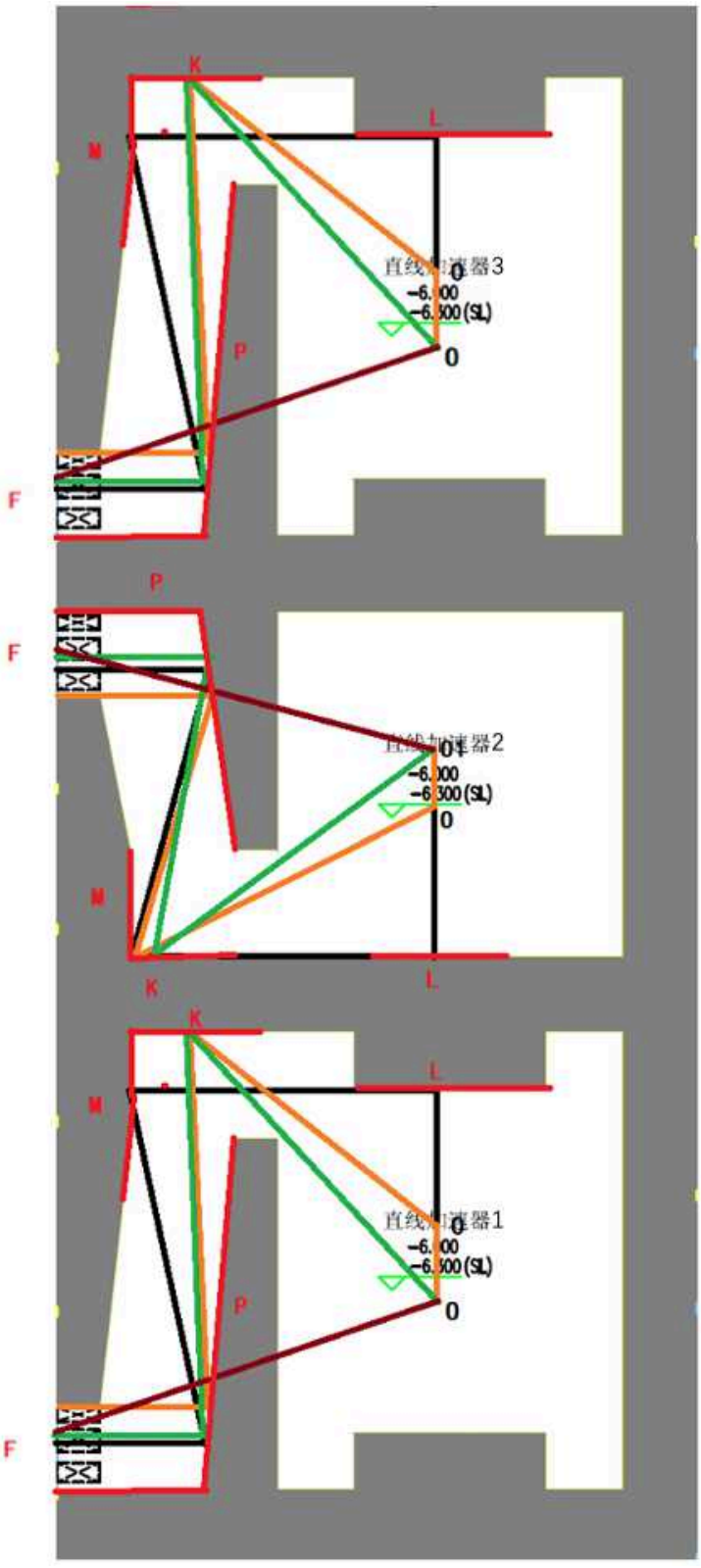
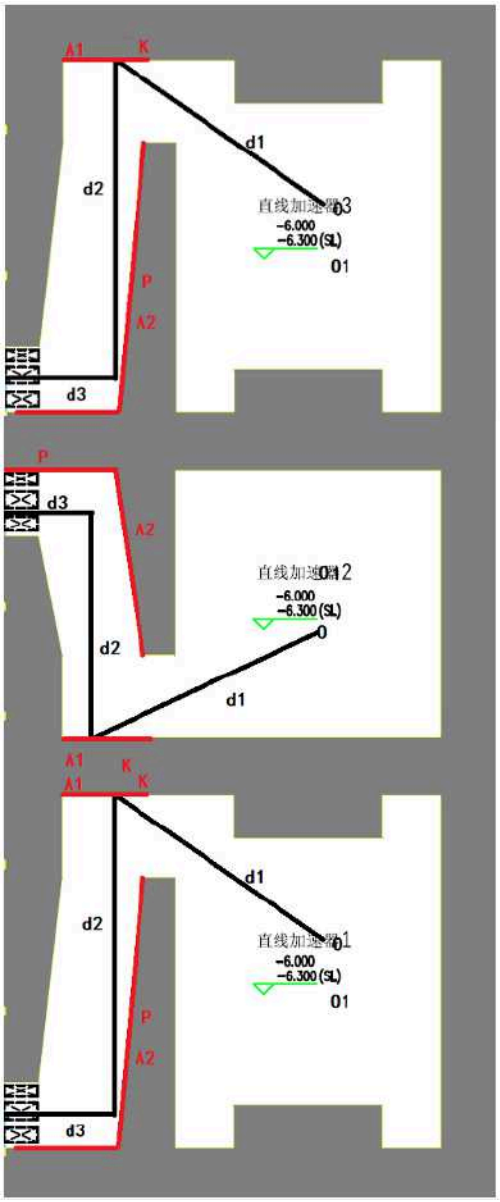
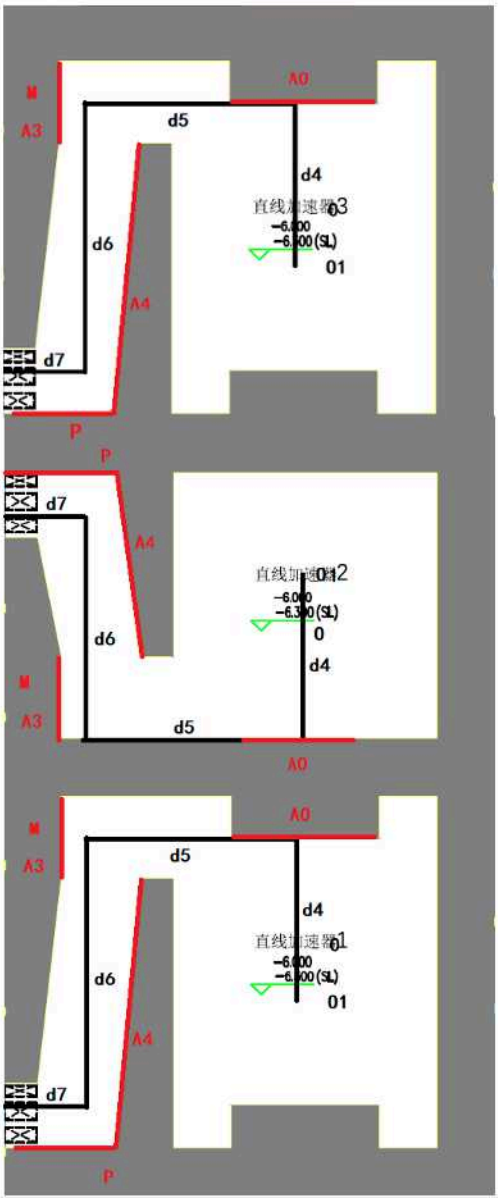


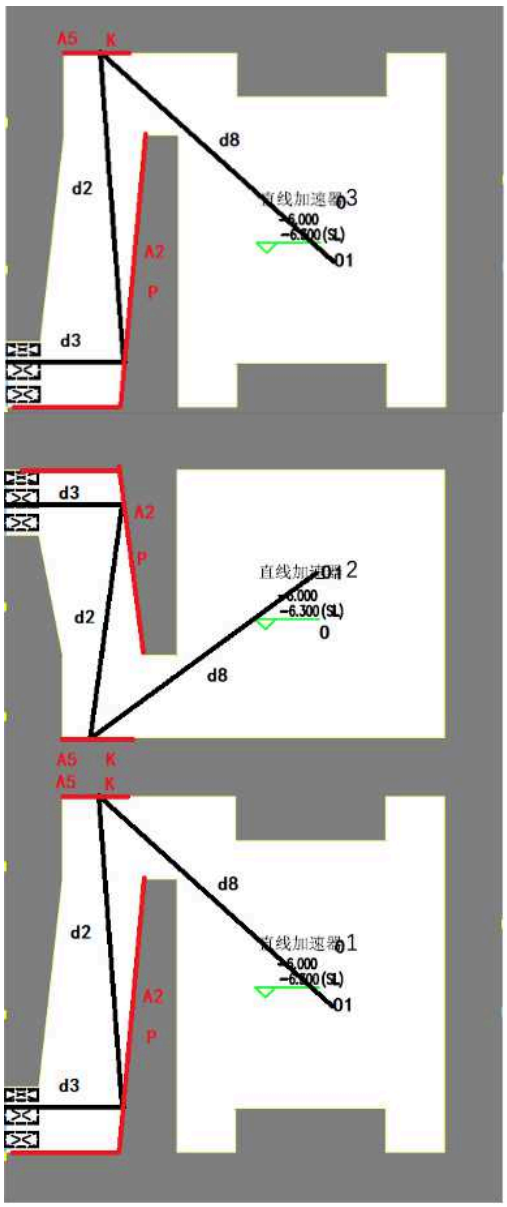
图 5-40 直线加速器机房迷路路径示意图



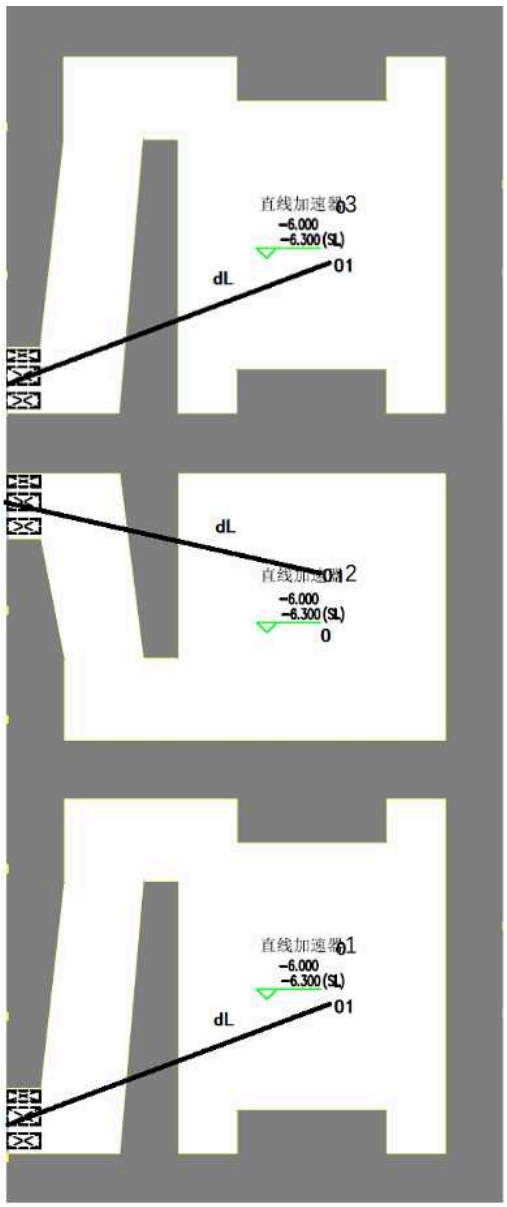
(a)H_{PS} 路径示意图



(b)H_S 路径示意图



(c)H_{LS} 路径示意图



(d)H_{LT} 路径示意图

图 5-41　直线加速器机房迷路路径示意图

表 5-40 H_{PS} 数值计算结果

参数	取值		
	直线加速器 1	直线加速器 2	直线加速器 3
H_{PS}，Sv/h	3.15E-04	1.04E-04	3.15E-04
H_0，Gy/h	1320	1320	1320
U	1	1	1
F，cm^2	1600	1600	1600
a(θ)	1.35E-03	1.35E-03	1.35E-03
α_1	0.022	0.022	0.022
A_1，m^2	22	14.52	22

α_2	0.036	0.036	0.036
A_2，m^2	35.76	46.12	35.76
d_0，m	1	1	1
d_1，m	7.38	8.16	7.38
d_2，m	8	10.6	8
d_3，m	2.01	2.2	2.01

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

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

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

表 5-41 H_S 数值计算结果

参数	取值		
	直线加速器 1	直线加速器 2	直线加速器 3
H_S，Sv/h	1.24E-04	4.5E-05	1.24E-04
H_0，Gy/h	1320	1320	1320
U	1	1	1
α_0	2.1E-03	2.1E-03	2.1E-03
A_0，m^2	17.04	17.08	17.04
α_3	1.3E-03	1.3E-03	1.3E-03
A_3，m^2	20.48	9.04	20.48
α_4	3.6E-02	3.6E-02	3.6E-02
A_4，m^2	33.28	46.12	33.28
d_4，m	4	4	4
d_5，m	6.2	6.2	6.2
d_6，m	7	8.3	7
d_7，m	2.01	2.2	2.01

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

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

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

表 5-42 H_{LS} 数值计算结果

参数	取值		
	直线加速器 1	直线加速器 2	直线加速器 3
H_{LS}，Sv/h	9.96E-06	3.3E-06	9.96E-06
H_0，Gy/h	1320	1320	1320
U	1	1	1
L_f	0.001	0.001	0.001

α_5	6E-03	6E-03	6E-03
A_5，m^2	22	14.52	22
α_6	0.0225	0.0225	0.0225
A_2，m^2	35.76	46.12	35.76
d_8，m	7.38	8.16	7.38
d_2，m	8	10.6	8
d_3，m	2.01	2.2	2.01

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

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

表 5-43 H_{LT} 数值计算结果

参数	取值		
	直线加速器 1	直线加速器 2	直线加速器 3
H_{LT}，Sv/h	3.01E-07	1.04E-07	3.01E-07
B	2.1E-05	8E-06	2.1E-05
H_0，Gy/h	1320	1320	1320
U	1	1	1
Lf	0.001	0.001	0.001
d_L，m	9.6	10.1	9.6

5.2.1.1.2.3 小结

根据上述计算结果，考虑各机房防护门屏蔽后，直线加速器机房迷路入口处的剂量率计算结果列于表 5-44。根据计算结果，对比表 1-8 可知，直线加速器机房迷路防护门外剂量率均低于其剂量率控制水平。

表 5-44 直加机房迷路防护门外剂量率计算结果

路径	参数取值及计算结果		
	直线加速器 1	直线加速器 2	直线加速器 3
患者散射辐射 H_{PS}，Sv/h	3.15E-04	1.04E-04	3.15E-04
墙的散射辐射 H_S，Sv/h	1.24E-04	4.5E-05	1.24E-04
机头泄漏在墙上的散射辐射 H_{LS}，Sv/h	9.96E-06	3.3E-06	9.96E-06
$H_{PS}+H_S+H_{LS}$，Sv/h	4.49E-04	1.53E-04	4.49E-04
铅防护门厚度，mm	15	15	15
TVL_{Pb}，mm	5	5	5
经铅防护门屏蔽后 $H_{PS}+H_S+H_{LS}$，Sv/h	4.49E-07	1.53E-07	4.49E-07
穿过迷道墙的机头泄漏辐射 H_{LT}，Sv/h	3.01E-07	1.04E-07	3.01E-07
散射辐射和泄漏辐射所致总的剂量当量 H_{tot}，μSv/h	7.5E-01	2.56E-01	7.5E-01

5.2.1.1.3 主屏蔽墙宽度核算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011），对主屏蔽墙的宽度利用下式 5-16 和 5-17 计算，计算结果列于表 5-45、表 5-46。

（1）内凸

$$Y=(100+a+X_2)tg14°+30 \qquad (5\text{-}16)$$

式中：

Y 为主屏蔽墙半宽，cm；

a 为等中心点到主屏蔽墙的距离，cm；

X_2 为主屏蔽墙内凸部分的厚度，cm。

表 5-45 直加机房主屏墙内凸部分宽度核算结果

主屏蔽墙位置	a，cm	X_2，cm	主屏蔽宽度计算结果，cm	实际宽度，cm	是否满足
直加机房 1 南北主屏蔽墙	400	130	375	440	是
直加机房 3 南北主屏蔽墙	400	130	375	440	是

（2）外凸

$$Y=(100+a+X_1+X_2)tg14°+30 \qquad (5\text{-}17)$$

式中：

Y 为主屏蔽墙半宽，cm；

a 为等中心点到屏蔽墙内表面的距离，cm；

X_1 为次屏蔽墙的厚度，cm；

X_2 为外凸部分的厚度，cm；

表 5-46 直加机房主屏蔽墙外凸部分宽度核算结果

点位	a，cm	X_1，cm	X_2，cm	主屏蔽宽度计算结果，cm	实际宽度，cm	是否满足
直加机房 2 南北主屏蔽墙	400	170	130	459	460	是
直加机房 1 屋顶主屏蔽墙	270	170	130	395	440	是
直加机房 2 屋顶主屏蔽墙	270	170	130	395	440	是
直加机房 3 屋顶主屏蔽墙	270	170	130	395	440	是

5.2.1.2 各机房同时运行时屏蔽体外关注点剂量率

考虑到 3 间直线加速器机房位于放疗中心的同一区域，各机房彼此相邻，且与进口质子治疗系统相邻。因此需考虑这些射线装置同时运行的工况，对各机房屏蔽体外剂量率进行叠加计算。各关注点剂量率计算结果列于表 5-47，对照表 1-8，均低于其剂量率控制水平。

表 5-47 放射治疗区地下一层所有机房同时运行时各关注点处的剂量率水平

直加关注点	周围环境	叠加的关注点	剂量率，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
a1	直加机房 2	进口质子关注点 B40	2.02E-01	3.7
a2	楼梯间	/	1.92E-01	3.7
a3	屋顶内庭院	/	2.69E-01	1.9
b1	直加机房 2	/	7.01E-03	3.7
b2	直加机房 2	进口质子关注点 B40	1.70E-02	3.7
b3	楼梯间	/	7.01E-03	3.7
b4	VIP 电梯厅	/	7.01E-03	3.7
b5	屋顶内庭院	/	1.83E-02	1.9
b6	屋顶内庭院	/	1.83E-02	1.9
c	控制室 1	/	8.25E-05	1.9
d	水冷机房	/	1.67E-02	10
e	质子治疗室 3 外走道	进口质子关注点 B27	1.72E-01	0.5
f	直加机房 1 防护门外		7.50E-01	10
A1	直加机房 3	进口质子关注点 B39	2.49E+00	3.7
A2	直加机房 1	进口质子关注点 B41	1.93E-01	3.7
A3	屋顶内庭院	/	2.69E-01	1.9
B1	直加机房 3	/	1.80E-02	3.7
B2	直加机房 3	进口质子关注点 B39	2.32E+00	3.7
B3	直加机房 1	/	1.80E-02	3.7
B4	直加机房 1	进口质子关注点 B41	1.90E-02	3.7
B5	屋顶内庭院	/	1.83E-02	1.9
B6	屋顶内庭院	/	1.83E-02	1.9

直加关注点	周围环境	叠加的关注点	剂量率，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
C	控制室 2	/	8.25E-05	1.9
D	控制室 2	/	6.00E-02	1.9
E	质子治疗室 3 治疗区	/	1.62E-01	3.7
F	直加机房 2 防护门外	/	2.56E-01	10
a1'	转运大厅	进口质子关注点 B42	2.92E-01	1.5
a2'	直加机房 2	进口质子关注点 B40	2.02E-01	3.7
a3'	屋顶内庭院	/	2.69E-01	1.9
b1'	转运大厅	/	7.01E-03	1.5
b2'	转运大厅	进口质子关注点 B42	1.07E-01	1.5
b3'	直加机房 2	/	7.01E-03	3.7
b4'	直加机房 2	进口质子关注点 B40	1.70E-02	3.7
b5'	屋顶内庭院	/	1.83E-02	1.9
b6'	屋顶内庭院	/	1.83E-02	1.9
c'	控制室 3	/	8.25E-05	1.9
d'	水冷机房	/	1.67E-02	10
e'	质子治疗室 3 机架区	/	1.62E-01	3.7
f'	直加机房 3 防护门外	/	7.50E-01	10

5.2.1.3 工作量规划

根据表 3-11，本项目直线加速器预计的年工作量列于表 5-48。

表 5-48 直线加速器工作量规划

装置名称	单次治疗出束时间，min/次	调强因子	年治疗人次	年治疗出束时间/h	年 QA 出束时间/h	年总出束时间/h
直线加速器 1	3	5	17500	2625	75	2700
直线加速器 2	3	5	17500	2625	75	2700
直线加速器 3	3	5	17500	2625	75	2700

5.2.1.4 工作人员受照剂量估算

由于本项目直加的 X 射线最大能量不超过 10MV，因此人员受照剂量估算不需考虑感生放射性影响，主要考虑瞬发辐射外照射影响。

放疗中心直线加速器的工作人员主要包括医生、物理师、技师、护士和工程师，见表 5-49。

表 5-49 直线加速器工作人员配置情况

岗位	人数	工作内容	工作地点
医生	12	诊断、放射治疗方案确定、治疗效果评定等	诊室、医生办公室、机房
物理师	6	制定治疗计划、计划验证、QA 等	治疗计划室、物理师办公室、机房及控制室
技师	12	患者摆位、控制室操作等	机房及控制室、技师办公室
护士	6	注射、护理等	注射室、护士站等
工程师	3	水电、暖通、网络等的日常运维	水冷机房、设备间、工程师办公室等

5.2.1.4.1 医生

直加科室医生的工作地点主要在诊室和医生办公室，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内。由于诊室和医生办公室与机房距离较远，根据表 5-47 屏蔽体外剂量率计算结果，考虑距离衰减后，诊室和医生办公室的剂量率将维持在本底水平，因此主要考虑医生进入治疗室内时相邻机房出束对其造成的辐射影响。预计每名医生在治疗室内的工作时间最多不超过 50h/年，则直加医生年受照剂量估算结果列于表 5-50。

表 5-50 直加医生年受照剂量估算结果

岗位	工作地点	剂量率[1]，mSv/h	年受照时间[2]，h	受照剂量，mSv/a
医生	机房内	2.49E-03	50	1.25E-01
注：1.保守取表 5-47 中相关关注点剂量率的最大值进行计算。				

5.2.1.4.2 技师

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

5.2.1.4.2.1 在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用模拟 CT 对其进行治疗前的模拟定位，在影像中心的模拟 CT 机房 1 或模拟 CT 机房 2 内进行。根据表 5-48，本项目直加每年治疗总人次为 52500 人次，按每名患者治疗 20 次估计，则每年技师需要治

疗前模拟定位总次数为2625次。

每次模拟定位期间，按在模拟 CT 机房内摆位 5min、在控制室内操作模拟 CT 出束 1min 考虑，每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目放疗中心共配备 12 名技师轮班，则每名技师每年参与模拟定位的次数约为 438 次。由此可计算得出每名技师从事模拟定位工作期间的受照剂量，列于表 5-51。

表 5-51 每名治疗技师进行治疗前模拟定位期间的年受照剂量估算结果

工作区域	剂量率[1]，mSv/h	年受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
模拟 CT 机房内	1.57E-03	36.5	5.73E-02
模拟 CT 控制位	1.03E-03	7.3	7.52E-03
总计	——	——	6.48E-02
注：（1）由于模拟 CT2 与其西侧的大孔径 CT 机房相邻，因此在模拟 CT2 机房内工作可能受到大孔径 CT 出束的辐射影响；大孔径 CT 与模拟 CT2 的机房尺寸相同、最大管电压相同，因此大孔径 CT 机房屏蔽体外剂量率可参考模拟 CT2 的计算结果；因此模拟 CT 机房内的剂量率取表 5-5 中模拟 CT2 东西墙外的计算结果，即 1.57E-03mSv/h。 （2）模拟 CT 控制位在机房南侧，剂量率取表 5-5 中模拟 CT 机房南墙外的计算结果，即 1.03E-03 mSv/h。			

5.2.1.4.2.2 在机房内摆位/解除摆位

直加每年需摆位/解除摆位的总次数为52500人次。放疗中心共配备12名技师，则每名技师每年最多需摆位/解除摆位 4375 人次。按摆位 5min/人次、解除摆位 1min/人次考虑，则每名技师因在机房内摆位/解除摆位所致年剂量计算结果列于表 5-52。

表 5-52 每名技师在机房内摆位/解除摆位的年工作量

工作区域	剂量率[1]，mSv/h	年受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
机房内	2.49E-03	438	1.09E+00
注：1.保守取表 5-47 中相关关注点剂量率的最大值进行计算。			

5.2.1.4.2.3 在控制室内操作装置出束

根据表 5-48，每台直加每年治疗总出束时间为 2625h（因技师不参与 QA，故不考虑 QA 出束时间）。放疗中心共配备 12 名技师，则每名技师在每间直加控制室内的年受照时间为 219h。则技师在控制室内工作期间的年受照剂量估算结果列于表 5-53。

表 5-53 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[1]，mSv/h	年受照时间，h	受照剂量，mSv/a
控制室	8.25E-08	219	1.81E-05
注：1.取自表 5-47。			

5.2.1.4.2.4 小结

根据上述分析，将放疗中心技师年总受照剂量计算结果列于表 5-54。

表 5-54 放疗中心技师年总受照剂量

工作岗位	工作内容	年受照剂量，mSv/a
放疗中心技师	在模拟 CT 机房进行治疗前模拟定位	6.48E-02
	在机房内摆位/解除摆位	1.09E+00
	在控制室内操作装置出束[1]	1.81E-05
	总计	1.16E+00
注：1.保守取表 5-53 中的最大值。		

5.2.1.4.3 物理师

物理师治疗计划制定主要在办公室内进行，距离机房较远，考虑距离衰减后办公室的剂量率处在本底水平。物理师的受照剂量主要来自治疗计划验证和 QA 工作期间，工作地点在机房和控制室。

（1）治疗计划验证

每位患者需要物理师做一次治疗计划验证，则每年治疗计划验证总次数为 2625 次。放疗中心共配备 6 名物理师，则每名物理师每年进行治疗计划验证的次数为 438 次。按每次治疗计划验证期间物理师的受照剂量与每次治疗期间技师的受照剂量一致考虑，保守取表 5-54 技师年受照剂量 1.16mSv 除以年患者人数 2625，可推知每名物理师每次治疗计划验证的受照剂量约为 4.42E-04mSv/次，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的年受照剂量计算结果列于表 5-55。

表 5-55 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	4.42E-04	438	1.94E-01

（2）QA

QA 期间，物理师的工作地点包括机房内和控制室。每名物理师在机房内工作的时间按每年最多 125h 考虑。根据表 5-48，每台直加的 QA 年总出束时间均为 75h，共 6 名物理师，则物理师 AQ 工作期间的年受照剂量估算结果列于表 5-56。

表 5-56 物理师 QA 工作期间年受照剂量算结果

工作区域	工作地点	剂量率[1]，mSv/h	年工作时间，h	年受照剂量，mSv/a
直线加速器	机房内	2.49E-03	125	3.11E-01
	控制室	8.25E-08	37.5	3.09E-06
	总计			3.11E-01
注：1.取自表 5-47。				

（3）小结

根据上述计算结果，可得出放疗中心物理师的年受照剂量，列于表 5-57。

表 5-57 物理师的年受照剂量

工作岗位	工作内容	年受照剂量，mSv/a
放疗中心物理师	治疗计划验证	1.94E-01
	QA[1]	3.11E-01
	总计	5.05E-01
注：1.保守取表 5-56 中的最大值。		

5.2.1.4.4 护士

根据治疗流程，护士在治疗前模拟 CT 定位期间，在技师操作模拟 CT 时，根据工作需要为患者注射造影剂。护士在模拟 CT 机房东北侧的注射室留针，然后在控制廊远程操作注射造影剂。每年的操作总次数按模拟 CT 定位次数的 1/10 考虑，为 263 次。留针的时间按 1min/次考虑，注射造影剂的时间按 1min/次考虑。共 6 名护士，则每名护士的年受照剂量计算结果列于表 5-58。

表 5-58 护士年受照剂量计算结果

工作区域		剂量率，mSv/h	年受照时间，h	受照剂量，mSv/a
治疗前模拟 CT 定位	注射室[1]	1.03E-03	4.38	4.51E-03
	模拟 CT 控制位[2]	1.03E-03	4.38	4.51E-03

总计	——	——	——	9.02E-03
注：1.注射室位于模拟 CT2 机房北侧，此处剂量率保守取表 5-5 中模拟 CT2 机房北墙外剂量率计算结果，1.03E+00μSv/h； 2. 取表 5-5 中模拟 CT 机房南墙外控制廊的剂量率计算结果，1.03E+00μSv/h。				

5.2.1.4.5 工程师

放疗中心工程师共 3 人，主要工作内容为水电、暖通、网络等的日常基础维护保养，每人每年在机房内的工作时间不超过 100h，由此可计算得出工程师的年受照剂量，列于表 5-24。

表 5-59 工程师的年受照剂量

岗位	工作地点	剂量率[1]，mSv/h	年受照时间，h	受照剂量，mSv/a
工程师	机房内	2.49E-03	100	2.49E-01
注：1.保守取表 5-47 中相关关注点剂量率的最大值进行计算。				

5.2.1.4.6 小结

本项目放疗中心工作人员的最大年受照剂量汇总如表 5-60 所示。由结果可知，在考虑了所有机房同时运行的工况下，技师年受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 1.06mSv，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-60 放疗中心工作人员受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量，mSv/a
医生	1.25E-01
技师	1.16E+00
物理师	5.05E-01
护士	9.02E-03
工程师	2.49E-01

5.2.1.5 公众受照剂量估算

瞬发辐射主要影响对象为放疗中心机房周围近距离范围内的公众。公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果列于表 5-27。放疗中心机房正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 9.29E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-61 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

关注点	周围环境	居留因子	瞬时剂量率，μSv/h	年受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
a2	楼梯间	1/40	1.92E-01	2700	1.30E-02
a3	屋顶内庭院	1/20	2.69E-01	2700	3.63E-02
b3	楼梯间	1/40	7.01E-03	2700	4.73E-04
b4	VIP 电梯厅	1/40	7.01E-03	2700	4.73E-04
b5	屋顶内庭院	1/20	1.83E-02	2700	2.47E-03
b6	屋顶内庭院	1/20	1.83E-02	2700	2.47E-03
e	质子治疗室 3 外走道	1/5	1.72E-01	2700	9.29E-02
A3	屋顶内庭院	1/20	2.69E-01	2700	3.63E-02
B5	屋顶内庭院	1/20	1.83E-02	2700	2.47E-03
B6	屋顶内庭院	1/20	1.83E-02	2700	2.47E-03
a1'	转运大厅	1/16	2.92E-01	2700	4.93E-02
a3'	屋顶内庭院	1/20	2.69E-01	2700	3.63E-02
b1'	转运大厅	1/16	7.01E-03	2700	1.18E-03
b2'	转运大厅	1/16	1.07E-01	2700	1.81E-02
b5'	屋顶内庭院	1/20	1.83E-02	2700	2.47E-03
b6'	屋顶内庭院	1/20	1.83E-02	2700	2.47E-03

5.2.2 事故影响分析

5.2.2.1 事故类型

直线加速器运行期间可能发生的辐射事故中，最严重的为人员误照事故。当加速器正在出束时因门机联锁失效等原因人员误入机房内，或是工作人员在机房内从事摆位、维护维修等工作时加速器开机出束，会造成人员误照。

5.2.2.2 事故后果

保守假设被误照人员位于等中心处，考虑直线加速器等中心最大输出剂量率 22Gy/min 出束 3min，可计算得出直加机房发生该类事故时，人员最大受照剂量为 66Gy/次。

电离辐射引起的生物效应包括随机效应和确定性效应。随机效应的发生不存

在剂量的阈值，其发生几率与受照剂量的大小有关，如遗传效应和某些躯体效应（即癌症）。确定性效应的发生存在阈值效应，其效应的严重程度随受照剂量的大小而异，剂量愈高则效应的严重程度愈大。根据表 5-34 所列不同照射剂量对人体损伤的估计，发生人员误照射事故时，考虑最不利的情况下，将导致受照人员受到严重放射性损伤，甚至导致死亡。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定，该类事故属于较大辐射事故。

5.2.2.3 事故防范措施

（1）直加机房设有声光报警、工作状态指示、门机联锁、视频监控系统、急停按钮、紧急开门按钮等一系列冗余的安全措施，可有效防止该事故发生。此外，辐射工作人员进入机房内工作时，需佩戴个人剂量报警仪。一旦出现误照情况，报警仪会发出报警信号提醒工作人员立即撤出。

（2）此外，为防止人员误留在机房内受到误照射，要求在每次出束前，工作人员在撤离前必须清点人员，按程序对机房进行全视角搜寻，确认无误后，方可出束。

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

（4）定期做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

（5）医院在采购设备时应充分考虑生产厂家的售后产品技术支持，提高产品可靠性。在维护和维修时，不可擅自解除联锁系统。

5.3 核医学科

5.3.1 正常运行环境影响

5.3.1.1 屏蔽体外剂量率计算

（1）计算公式

屏蔽体外剂量率水平可采用以下点源公式 5-18 计算：

$$\dot{H} = \frac{A}{R^2} \times \Gamma \times 0.1^{\frac{d}{TVL}} \qquad (5\text{-}18)$$

式中：$\dot{H}$——关注点剂量率，μSv/h；

A——单次操作最大活度，MBq；

Γ——距源 1m 处的周围剂量当量率常数，μSv·m^2/ h·MBq；

R——计算点与源点的距离，m；

d——屏蔽体厚度，mm；

TVL——十分之一值层厚度，mm。

（2）计算参数及计算结果

主要考虑对核医学控制区内以下房间进行辐射屏蔽计算：注射室、注射后候诊室、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、PET/MR 机房、留观室、抢救室、患者通道等。计算参数见表 5-62、表 5-63，屏蔽体外剂量率计算结果见表 5-64。

表 5-62 放射性核素 1 米处剂量率计算表

序号	核素	用途	单次最大用量，MBq	周围剂量当量率常数，μSv•m^2/MBq•h		1 米处剂量率，μSv/h	
				裸源	人体源	裸源	人体源
1	^{18}F	注射显像	370	0.143	0.092	52.9	34.0
2	^{99m}Tc	注射显像	925	0.0303	0.0207	28.0	19.1
备注：计算参数取自 GBZ 120-2020。							

表 5-63 放射性核素 TVL 参数

核素	TVL，mm		
	混凝土（2.35g/cm^3）	实心砖（1.65g/cm^3）	铅（11.3g/cm^3）
^{18}F	176	263	16.6
^{99m}Tc	110	160	1

本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 机房还需考虑 CT 运行时产生的 X 射线辐射屏蔽影响。根据前文分析可知，本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 机房四周墙体、顶棚、底板、防护门和观察窗采取的辐射屏蔽铅当量厚度均不低于《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）提出的 2.5mm 铅当量的防护要求，最小单边长度及最小有效使用面积也均能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）要求。由此可以预计，PET/CT 和 SPECT/CT 装置运行时，机房周围剂量率水平将符合相关标准要求。

由计算结果及上述分析可知，核医学科屏蔽体外周围剂量当量率均小于 2.5μSv/h，满足辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平的要求。

表 5-64 核医学屏蔽体外剂量率计算结果

场所	辐射源项	1m 处剂量率，μSv/h	屏蔽体	周围环境	屏蔽设计方案	屏蔽透射因子	距离，m	剂量率计算结果，μSv/h
储源间	^{18}F：400mCi 裸源 ^{99m}Tc：750mCi 裸源	^{18}F：2116.4 ^{99m}Tc：840.8	东墙	VIP 注射后候诊室	200mm 实心砖+40mmPb 储源箱	^{18}F：6.76E-04 ^{99m}Tc：5.62E-42	1.9	3.96E-01
			西墙	患者通道			1.9	3.96E-01
			南墙	患者通道			1.35	7.85E-01
			北墙	注射室			1.35	7.85E-01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土+40mmPb 储源箱	^{18}F：2.84E-04 ^{99m}Tc：1.52E-42	6	1.67E-02
			防护门	注射室	8mmPb 门+40mmPb 储源箱	^{18}F：1.28E-03 ^{99m}Tc：1.00E-48	1.35	1.49E+00
				患者通道	8mmPb 门+40mmPb 储源箱		1.35	1.49E+00
注射室	^{18}F：400mCi 裸源 ^{99m}Tc：750mCi 裸源	^{18}F：2116.4 ^{99m}Tc：840.8	东墙	固废间 1、注射后候诊室卫生间	200mm 实心砖 （^{18}F 还考虑 50mmPb 手套箱）	^{18}F：1.69E-04 ^{99m}Tc：5.62E-22	3	3.97E-02
			西墙	患者通道			3	3.97E-02
			南墙	储源间、注射后候诊室			1.95	9.40E-02
			北墙	卫生通过间			1.95	9.40E-02
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土 （^{18}F 还考虑 50mmPb 手套箱）	^{18}F：7.11E-05 ^{99m}Tc：1.52E-22	6	4.18E-03
			防护门	卫生通过间	8mmPb 防护门 （^{18}F 还考虑 50mmPb 手套箱）	^{18}F：3.21E-04 ^{99m}Tc：1.00E-28	1.95	1.78E-01
				固废间			3	7.54E-02
^{18}F 分装位	药物铅罐内 390mCi	2063.5	手套箱、药物铅罐	注射室	50mmPb 手套箱、40mmPb 药物铅罐	3.79E-06	0.5	8.27E-02
	注射套内 10mCi	52.9	手套箱、注射套	注射室	50mmPb 手套箱、10mmPb 注射套	2.43E-04	0.5	
^{18}F 注射位	注射套内 10mCi	52.9	注射窗、注射套	注射室	50mmPb 注射窗、10mmPb 注射套	2.43E-04	0.5	5.14E-02
^{99m}Tc 注射位	注射套内 25mCi	28.0	注射窗、注射套	注射室	20 mmPb 注射窗、5mmPb 注射套	1.00E-25	0.5	1.12E-23
SPECT 注射后候诊室 1（东侧）	1 名 ^{99m}Tc 患者：25mCi 人体源	19.1	东墙	患者通道	200mm 实心砖	5.62E-02	2.25	2.13E-01
			西墙	PET 注射后候诊室 1			2.25	2.13E-01
			南墙	患者通道			4.45	5.44E-02
			北墙	患者更衣室、强电间			4.35	5.69E-02

场所	辐射源项	1m 处剂量率，μSv/h	屏蔽体	周围环境	屏蔽设计方案	屏蔽透射因子	距离，m	剂量率计算结果，μSv/h
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	1.52E-02	6	8.08E-03
			防护门	患者通道	6mmPb 防护门	1.00E-08	4.45	9.67E-07
SPECT 注射后候诊室 2（西侧）	1 名 ^{99m}Tc 患者：25mCi 人体源	19.1	东墙	患者通道	200mm 实心砖	5.62E-02	3.55	8.54E-02
			西墙	医护通道			3.55	8.54E-02
			南墙	抢救室			2.1	2.44E-01
			北墙	SPECT 留观室			2.1	1.03E+00
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	1.52E-02	6	8.08E-03
			防护门	患者通道	6mmPb 防护门	1.00E-06	3.55	1.52E-06
PET 注射后候诊室 1（东侧）	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源	34.0	东墙	SPECT 注射后候诊室	200mm 实心砖	1.74E-01	2.25	1.17E+00
			西墙	PET 注射后候诊室			2.25	1.17E+00
			南墙	患者通道			4.45	2.98E-01
			北墙	患者更衣室			4.45	2.98E-01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	6	6.91E-02
			防护门	患者通道	8mmPb 防护门	3.30E-01	4.45	5.67E-01
PET 注射后候诊室 2（西侧）	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源	34.0	东墙	PET 注射后候诊室	200mm 实心砖	1.74E-01	2.25	1.17E+00
			西墙	患者通道			2.25	1.17E+00
			南墙	患者通道			4.45	2.98E-01
			北墙	清洁间、楼梯间			4.45	2.98E-01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	6	6.91E-02
			防护门	患者通道	8mmPb 防护门	3.30E-01	4.45	5.67E-01
VIP 注射后候诊室（若为 ^{18}F 患者使用）	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源	34.0	东墙	走廊（控制区外）	350mm 实心砖	4.67E-02	2.8	2.03E-01
			西墙	储源间、注射室	200mm 实心砖	1.74E-01	2.8	7.54E-01
			南墙	患者通道、缓冲区			3.05	6.35E-01
			北墙	注射室、固废间			3.05	6.35E-01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	6	6.91E-02
			防护门	患者通道	8mmPb 防护门	3.30E-01	3.05	1.21E+00

场所	辐射源项	1m 处剂量率，μSv/h	屏蔽体	周围环境	屏蔽设计方案	屏蔽透射因子	距离，m	剂量率计算结果，μSv/h
VIP 注射后候诊室（若为 ^{99m}Tc 患者使用）	1 名 ^{99m}Tc 患者：25mCi 人体源	19.1	东墙	走廊（控制区外）	350mm 实心砖	6.49E-03	2.8	1.59E-02
			西墙	储源间、注射室	200mm 实心砖	5.62E-02	2.8	1.37E-01
			南墙	患者通道、缓冲区			3.05	1.16E-01
			北墙	注射室、固废间			3.05	1.16E-01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	1.52E-02	6	8.08E-03
			防护门	患者通道	8mmPb 防护门	1.00E-08	3.05	2.06E-08
PET/CT 机房	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源经候诊 20min 衰变后剩 8.8mCi	30.0	东墙	SPECT 机房	220mm 混凝土	5.62E-02	4.6	7.96E-02
			西墙	PET/CT 设备间			4.6	7.96E-02
			南墙	控制廊			4.7	7.63E-02
			北墙	患者通道			4.7	7.63E-02
			顶棚	户外区域	220mm 混凝土	5.62E-02	6	4.68E-02
			技师摆位处	机房内	0.5mmPb 铅衣	9.33E-01	0.5	1.12E+02
			观察窗	控制台	8mmPb 铅玻璃观察窗	3.30E-01	4.7	4.47E-01
			防护门（北）	患者通道	8mmPb 防护门	3.30E-01	4.7	4.47E-01
			防护门（东）	质控源间	8mmPb 防护门	3.30E-01	4.6	4.67E-01
			防护门（南）	控制廊	8mmPb 防护门	3.30E-01	4.7	4.47E-01
PET/MR 机房	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源经候诊 20min 衰变后剩 8.8mCi	30.0	东墙	PET/CT 设备间	240mm 实心砖	1.22E-01	3.55	2.91E-01
			西墙	医护通道（控制区外）			3.55	2.91E-01
			南墙	控制廊			4.7	1.66E-01
			北墙	PET/MR 设备间			4.7	1.66E-01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	6	6.08E-02
			摆位处	机房内	0.5mmPb 铅衣	9.33E-01	0.5	1.12E+02
			观察窗	控制廊	8mmPb 铅玻璃观察窗	3.30E-01	4.7	4.47E-01
			防护门（东）	患者通道	8mmPb 防护门	3.30E-01	3.55	7.84E-01
			防护门（南）	控制廊	8mmPb 防护门	3.30E-01	4.7	4.47E-01
SPECT/CT	1 名 ^{99m}Tc 患者：	19.1	东墙	空调补风机房	220mm 混凝土	1.00E-02	4	1.20E-02

场所	辐射源项	1m 处剂量率，μSv/h	屏蔽体	周围环境	屏蔽设计方案	屏蔽透射因子	距离，m	剂量率计算结果，μSv/h
机房	25mCi 人体源		西墙	PET/CT 机房			4	1.20E-02
			南墙	控制廊			4.7	8.67E-03
			北墙	患者通道			4.7	8.67E-03
			顶棚	户外区域	220mm 混凝土	1.00E-02	6	5.32E-03
			摆位处	机房内	0.5mmPb 铅衣	3.16E-01	0.5	2.42E+01
			观察窗	控制台	6mmPb 铅玻璃观察窗	1.00E-06	4.7	8.67E-07
			防护门（北）	患者通道	6mmPb 防护门	1.00E-06	4.7	8.67E-07
			防护门（南）	控制廊	6mmPb 防护门	1.00E-06	4.7	8.67E-07
SPECT 留观室	1 名 ^{99m}Tc 患者：25mCi 人体源	19.1	东墙	患者通道	200mm 实心砖	5.62E-02	3.55	8.54E-02
			西墙	医护通道（控制区外）			3.55	8.54E-02
			南墙	SPECT 注射后候诊室 2	100mm 实心砖	2.37E-01	1.5	2.02E+00
			北墙	PET 留观室	200mm 实心砖	5.62E-02	1.5	4.79E-01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	1.52E-02	6	8.08E-03
			防护门	患者通道	6mmPb 防护门	1.00E-06	3.55	1.52E-06
PET 留观室	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源经候诊 20min、扫描 20min 衰变后剩 7.8mCi	26.6	东墙	患者通道	200mm 实心砖	1.74E-01	3.55	3.66E-01
			西墙	医护通道（控制区外）			3.55	3.66E-01
			南墙	SPECT 留观室			1.5	2.05E+00
			北墙	钢瓶间			1.6	1.80E+00
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	6	5.39E-02
			防护门	患者通道	8mmPb 防护门	3.30E-01	3.55	6.95E-01
抢救室（若抢救 ^{18}F 患者）	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源经候诊 20min、扫描 20min 衰变后剩 7.8mCi	26.6	东墙	患者通道	200mm 实心砖	1.74E-01	3.55	3.66E-01
			西墙	医护通道（控制区外）			3.55	3.66E-01
			南墙	PET/MR 设备间			1.9	1.28E+00
			北墙	SPECT 注射后候诊室 2			1.9	1.28E+00
			抢救位	抢救位	0.5mmPb 铅衣	9.33E-01	0.5	9.91E+01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	6	5.39E-02

场所	辐射源项	1m 处剂量率，μSv/h	屏蔽体	周围环境	屏蔽设计方案	屏蔽透射因子	距离，m	剂量率计算结果，μSv/h
			防护门	患者通道	8mmPb 防护门	3.30E-01	3.55	6.95E-01
抢救室（若抢救 ^{99m}Tc 患者)	1 名 ^{99m}Tc 患者：25mCi 人体源	19.1	东墙	患者通道	200mm 实心砖	5.62E-02	3.55	8.54E-02
			西墙	医护通道（控制区外）			3.55	8.54E-02
			南墙	PET/MR 设备间			1.9	2.98E-01
			北墙	SPECT 注射后候诊室 2			1.9	2.98E-01
			抢救位	抢救位	0.5mmPb 铅衣	3.16E-01	0.5	2.42E+01
			顶棚	户外区域	200mm 混凝土	1.52E-02	6	8.08E-03
			防护门	患者通道	8mmPb 防护门	1.00E-08	3.55	1.52E-08
患者通道（按 ^{18}F 患者考虑）	1 名 ^{18}F 患者：10mCi 人体源经候诊 20min、扫描 20min 衰变后剩 7.8mCi	26.6	顶棚	户外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	6	4.70E-02
			侧墙外	楼梯间（控制区外）	200mm 实心砖	1.74E-01	1.5	2.05E+00
			防护门	患者入口	8mmPb 门	3.30E-01	7.5	1.56E-01
				患者出口	8mmPb 门	3.30E-01	6.7	1.95E-01
				东侧出入口	8mmPb 门	3.30E-01	4.1	5.21E-01
				PET/MR 设备间	8mmPb 门	3.30E-01	7.1	1.74E-01

5.3.1.2 辐射工作人员和公众年受照剂量估算

核医学科辐射工作人员主要包括护士 2 名、技师 3 名、医生 4 名，同一岗位的人员共同分担工作，则每名辐射工作人员的年工作负荷见表 5-65。

公众年总受照时间按 2000h 考虑。核医学辐射工作人员年有效剂量计算结果见表 5-66，周围公众年有效剂量计算结果见表 5-67。

表 5-65 核医学科工作负荷一览表

项目	工作人员	工作内容	单次时间，min	年最大工作负荷，次	年受照时间，h
PET/CT PET/MR（^{18}F）	护士	分装	1	5000	83.3
		注射	1	5000	83.3
	技师	摆位	1	1667	27.8
		扫描	10	3333	555.6
	医生	抢救	30	63	31.3
SPECT/CT（^{99m}Tc）	护士	质检	1	3750	62.5
		注射	1	3750	62.5
	技师	摆位	1	1250	20.8
		扫描	10	2500	416.7
	医生	抢救	30	63	31.3

表 5-66 核医学辐射工作人员年有效剂量计算结果

工作岗位	核素/设备	工作内容	所在位置	剂量率，μSv/h	受照时间/h	年受照剂量，mSv	年总受照剂量，mSv
护士（2 人）	^{18}F	分装	注射室	8.27E-02	83.3	6.89E-03	1.12E-02
		注射	注射室	5.14E-02	83.3	4.29E-03	
	^{99m}Tc	质检	注射室	3.36E-17	62.5	2.10E-18	
		注射	注射室	1.12E-23	62.5	7.01E-25	
技师（3 人）	PET/CT PET/MR	摆位	PET/CT 机房	1.12E+02	27.8	3.11E+00	3.87E+00
		扫描	PET/CT 控制位	4.47E-01	555.6	2.48E-01	
	SPECT/CT	摆位	SPECT/CT 机房	2.42E+01	20.8	5.05E-01	
		扫描	SPECT/CT 控制位	8.67E-07	416.7	3.61E-07	
医生（4 人）	^{18}F	急救	抢救室	9.91E+01	31.3	3.10E+00	3.85E+00
	^{99m}Tc	急救	抢救室	2.42E+01	31.3	7.57E-01	

表 5-67 核医学周围公众年有效剂量计算结果

公众位置	源项所在位置	瞬时剂量率，μSv/h	受照时间，h	居留因子	年受照剂量，mSv
候诊大厅	患者入口	1.56E-01	2000	1/20	1.56E-02
核医学区域外东侧通道	VIP 注射后候诊室	2.03E-01	2000	1/5	8.11E-02
核医学区域外北侧通道	患者出口	1.95E-01	2000	1/5	7.80E-02
核医学楼梯间	PET 注射后候诊室	2.98E-01	2000	1/40	1.49E-02
核医学上层户外区域	PET 注射后候诊室	6.91E-02	2000	1/40	3.45E-03

5.3.1.3 小结

由上可知，核医学科辐射工作人员受照剂量最大的为技师，其年最大有效剂量为 3.87mSv/a，不超过本项目辐射工作人员剂量约束值 5mSv/a；公众剂量最大的为核医学区域外东侧通道的公众，其年最大有效剂量为 8.11E-02mSv/a，不超过本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

5.3.2 事故影响分析

5.3.2.1 潜在事故情景分析

本项目核医学科在正常营运情况下，对于公众和周围环境基本是安全的，但如果管理不善发生某些事故，可能对公众和环境造成危害，其潜在的事故情景主要有：

（1）工作人员的撒漏或放射性药物丢失

由于工作人员操作不熟练或其他原因造成工作时放射性药物撒漏以及药物保管不善致使放射性药物在给患者用药之前丢失，可能对公众和周围环境造成辐射污染。

（2）放射性废物管理不善

放射性废液未经足够时间的衰变排放，使排放超出规定的限值，可能对环境或人体造成一定危害。

放射性固体废物未经足够时间的存放衰变，擅自处置，可能对环境造成污

染和对公众造成危害。

（3）屏蔽措施不当

如果对操作放射性核素的场所屏蔽措施不利，可能对环境造成污染和对人员造成不必要的照射。

（4）灾害

火灾、水灾、地震以及其它不可抗力的因素造成的灾害都有可能使放射性核素散落的环境中，造成环境污染和危害人体。

5.3.2.2 事故后果分析

由上述分析可知，发生放射性药物洒落，辐射工作人员进行处理时受到的剂量较大，假设：

1 支 370MBq 的 ^{18}F 注射液在注射过程中出现跌落，药液全部散落在注射台面，工作人员事故处理时间按最长 30min 考虑，与源项的最近距离 1m。

根据以上假设条件，事故工况时，核医学事故处理人员的受照剂量为 26μSv，不会超过辐射工作人员的年剂量约束值。

5.3.2.3 风险防范和处理措施

针对在核医学工作场所运行过程可能出现的事故，应采取一系列预防措施，尽可能减小或控制事故的危害和影响。其中包括：

（1）针对洒落事故，工作人员应立即用吸水纸、纱布等吸水材料对污染台面、地面进行吸附擦拭，直至监测满足辐射工作场所地面、台面的污染水平控制值后，方可结束清理，处理过程中产生的固体废物如吸水纸、纱布、棉签、被粘污的工作服等按放射性固体废物统一收集暂存，满足解控标准后，按一般废物处理。

（2）发生非工作人员误入核医学 SPECT/CT 或 PET/CT 机房时，应立即切断电源，终止射线装置的出束，将误入人员撤离到安全区域，对可能出现的超剂量照射送到指定地点进行救治观察，同时在规定时间内向相应的当地生态环境主管部

门和卫生部门进行报告。

（3）发生放射性药物被盗或丢失，应第一时间向医院辐射事故应急小组及生态环境部门、公安、卫生部门报告。

6 辐射安全管理

本项目由建设单位中核扬州实业发展有限公司负责建设，建成后将由运营单位江苏省人民医院申请辐射安全许可证，因此本章节主要对运营单位省人医的辐射安全管理情况进行相关描述与评价。

6.1 机构与人员

6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构

省人医目前已成立了辐射安全与环境保护管理领导小组，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 医院辐射安全与环境保护管理领导小组成员组成

机构名称	辐射安全与环境保护管理领导小组		
管理人员	名字	职务或职称	专/兼职
组长	唐金海	党委书记	兼职
副组长	王水	副院长	兼职
副组长	顾民	副院长	兼职
成员	汤建平、宋宁宏、朱根、黄如春、高虹、孔祥清、施海彬、孙新臣、包丽华、薛强、陈大伟	院相关各部门领导	兼职
辐射安全负责人	拟招聘	注册核安全工程师	专职

辐射安全与环境保护管理领导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。

本项目的辐射工作人员主要为辐射防护负责人、医生、物理师、技师、护士、工程师以及实验人员，均为新招聘，计划配备情况见表 6-2。

医院制定了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配备情况

岗位类别		人数，人
辐射防护负责人（注册核安全工程师）		1
质子中心	医生	20
	治疗技师	20
	物理师	20
	护士	10
	工程师	6
	实验人员	6
放疗中心	医生	12
	物理师	6
	技师	12
	护士	6
	工程师	3
影像中心	医生	4
	技师	7
	护士	2

核医学科	护士	2
	技师	3
	医生	4
总计	——	131

6.2 辐射安全管理规章制度

为加强辐射安全管理，按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法规的要求，医院目前正在建立一系列辐射安全管理制度，主要内容涵盖《辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全保卫制度》《操作规程》《设备检查与维修制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》等，建成后可满足辐射安全管理要求。

6.3 辐射监测

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，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，监测数据均记录存档。按照HJ 1198-2021、HJ 1188-2021 的相关要求，具体辐射工作场所监测计划见表 6-3。

6.3.2 环境监测

参照《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）表 9、表 11、表 12 的相关规定，并结合本项目主要辐射源项特点及实际情况，本项目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 1 个固定式监测点位，该监测点设固定式中子、γ 探测器各 1 个，用于对环境中子、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 6-3 本项目辐射工作场所监测计划表

辐射工作场所	监测项目	监测类别	监测方式	监测频次	监测点位
质子治疗系统	X-γ 辐射周围剂量当量率 中子辐射周围剂量当量率	自行监测	固定式仪表监测	实时	见图 4-16、图 4-21
			便携式仪表监测	1 次/季度	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、观察窗、门，以及其他关注处点处
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
直加机房	X-γ 辐射剂量率	自行监测	固定式仪表监测	实时	见图 4-40
			便携式仪表监测	1 次/季度	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
影像中心	X-γ 辐射剂量率	自行监测	便携式仪表监测	1 次/季度	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、观察窗、防护门，以及其他关注处点处
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
核医学科	X-γ 辐射剂量率	自行监测	便携式仪表监测	1 次/月	控制区和监督区所有工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的装置/设备表面
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
	β 表面放射性污染	委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等。
		自行监测	便携式仪表监测	每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）	

表 6-4 本项目环境监测计划

辐射工作场所	监测对象	采样（监测）布点	监测项目	监测频次
质子治疗系统	外照射	院区内设置 1 个环境固定辐射监测点位，见图 6-1	γ 辐射空气吸收剂量率 中子剂量当量率	实时
		加速器主体建筑墙外 30cm 开展巡测，选择主体建筑墙外、楼顶及院区相应的关注点开展定点监测		1 次/年
	土壤	医院院区四周，院区外敏感点	^{7}Be、^{22}Na、总 β	1 次/年
	地表水	医院院区周边河流	^{3}H、^{7}Be、^{22}Na、总 β	1 次/年
	循环冷却水	质子治疗区集水坑	^{3}H、^{7}Be、^{22}Na、总 β	1 次/年（排放前）
	固体废物外表面	放射性固废暂存间	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
			感生放射性核素、γ 能谱	收集及送贮时
直加机房	外照射	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
影像中心	外照射	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
核医学科	γ 辐射	核医学辐射工作场所及衰变池周围	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年
	土壤	核医学辐射工作场所半径 50m 以内	^{18}F、^{99m}Tc、总 β	1 次/年
	衰变池废液	衰变池取样口	^{18}F、^{99m}Tc、总 β	1 次/年
	放射性固体废物	固废暂存容器外表面	γ 辐射空气吸收剂量率、β 表面污染	1 次/年



图 6-1 本项目环境固定辐射监测点位示意图

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。质子中心辐射工作人员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，医院为每名辐射工作人员配备了个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 3 个月。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

个人剂量报警仪用于工作人员在治疗机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。医院为进入控制区内工作的人员建立档案，每次在控制区内的工作结束后，由辐射安全专职管理人员负责回收个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，统一汇总在该工作人员个人剂量档案中。

医院安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。

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

6.3.4 监测设备

6.3.4.1 监测设备数量

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式 X-γ 探测器、固定式中子探测器、便携式 X/γ辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式表面污染检测仪、个人剂量报警仪、个人剂量计。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	配置详情	总数，台
1	固定式 X-γ 探测器	进口质子控制区： 6 台 国产质子控制区： 4 台 直线加速器控制区：1 台/间，共 3 台 环境固定辐射监测点位：1 台	14
2	固定式中子探测器	进口质子控制区：6 台 国产质子控制区：4 台 环境固定辐射监测点位：1 台	11
3	便携式 X/γ辐射巡测仪	质子中心：1 台 放疗中心：1 台 核医学科：1 台	3
4	便携式中子辐射巡测仪	质子中心：1 台	1
5	便携式表面污染检测仪	核医学科：2 台	2
6	直读式个人剂量报警仪	进口质子：8 台 国产质子：8 台 直线加速器：2 台/间，共 6 台	22
7	个人剂量计	131 名辐射工作人员：1 支/人	131

6.3.4.2 探测器性能

质子加速器大厅、治疗室内高剂量辐射区域中子探测器的能量响应范围至少应覆盖热中子~14MeV，剂量率范围至少覆盖 100nSv/h~50mSv/h；γ 探测器的能量响应范围至少应覆盖 27keV~2MeV，剂量率范围至少覆盖 0.01mSv/h~100mSv/h。

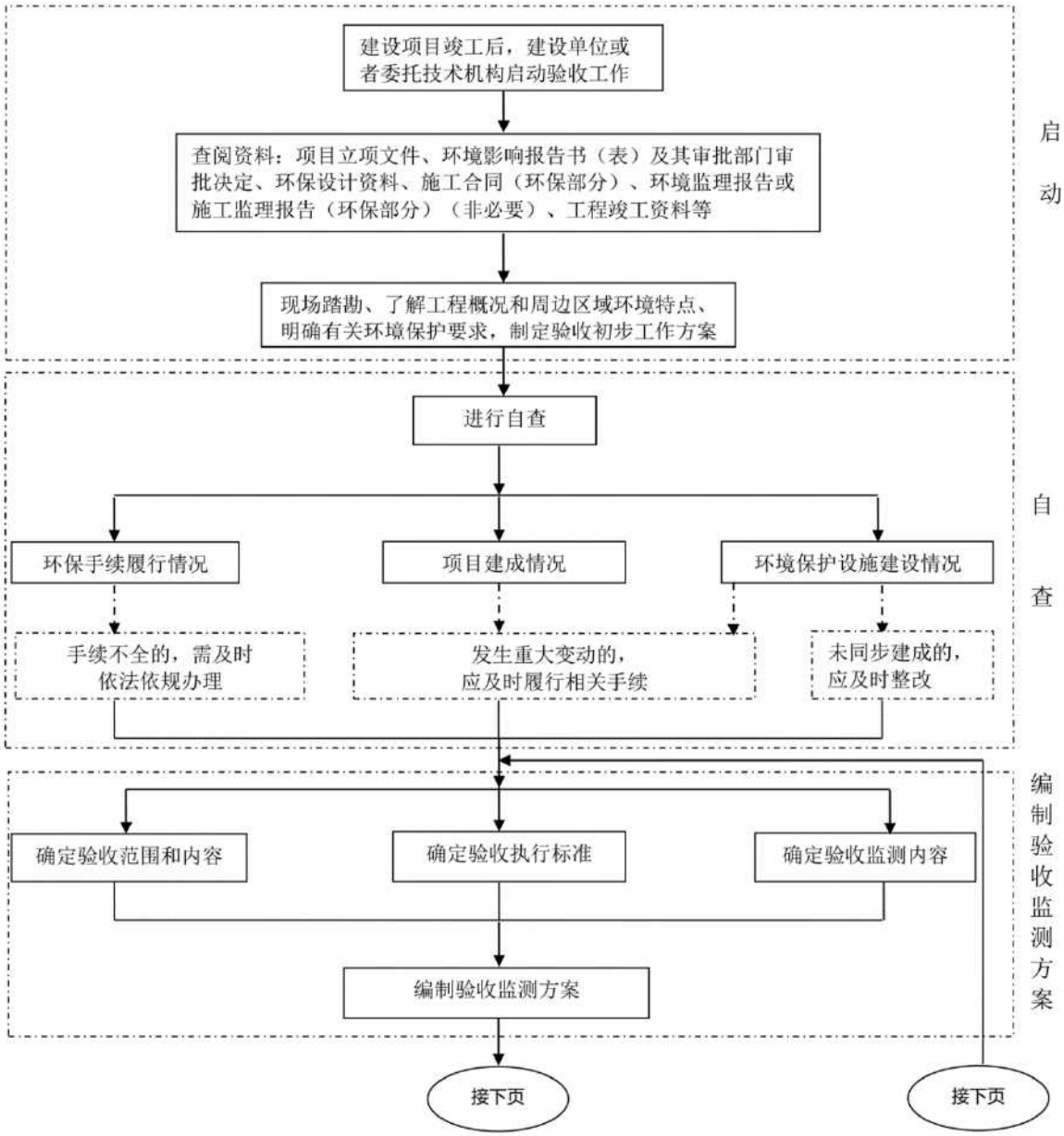
环境固定辐射监测点位中子探测器的能量响应范围至少应覆盖 0.025eV~14MeV，剂量率范围至少覆盖 10nSv/h~50mSv/h；γ 探测器的能量响应范围至少应覆盖 50keV~3MeV，剂量率范围至少覆盖 0.01μSv/h~50mSv/h。

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，建设单位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。若建设单位计划委托技术机构开展验收工作，则技术机构应早期介入，全程实施环保监理。

6.3.5.1 工作流程

建设单位承诺将在射线装置调试阶段委托有资质的检测机构对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。


建设项目竣工后，建设单位或者委托技术机构启动验收工作
查阅资料：项目立项文件、环境影响报告书（表）及其审批部门审批决定、环保设计资料、施工合同（环保部分）、环境监理报告或施工监理报告（环保部分）（非必要）、工程竣工资料等
现场踏勘、了解工程概况和周边区域环境特点、明确有关环境保护要求，制定验收初步工作方案
启动
进行自查
环保手续履行情况
项目建成情况
环境保护设施建设情况
手续不全的，需及时依法依规办理
发生重大变动的，应及时履行相关手续
未同步建成的，应及时整改
自查
确定验收范围和内容
确定验收执行标准
确定验收监测内容
编制验收监测方案
编制验收监测方案
接下页
接下页

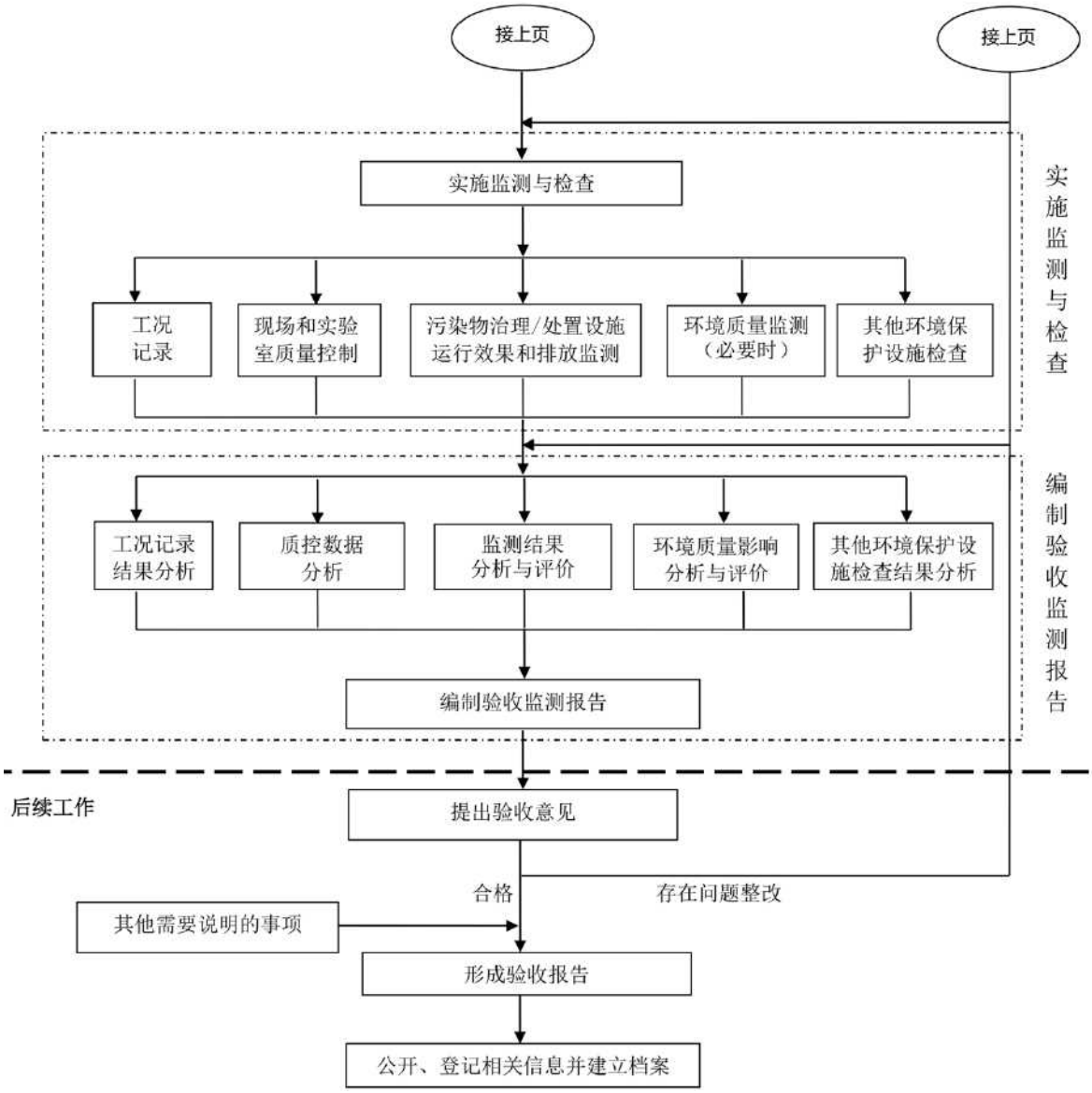


图 6-2 竣工环保验收工作流程

6.3.5.2 验收监测方案

结合项目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

辐射工作场所	监测对象	监测/采样点位	监测项目	监测工况
质子治疗系统	工作场所	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、观察窗、门，以及其他关注处点处	γ 辐射空气吸收剂量率 中子剂量当量率	1、射线装置开机运行； 2、射线装置停机。
	医院内部环境敏感点	在 100m 评价范围内，以机房为中心，东、西、南、北四侧每隔 20m 取一个点位		
	医院外部环境敏感点	医院周边环境敏感点		
	机房内部	迷道口、治疗头等区域		装置连续运行一段时间，停机一段时间后
	冷却水（若有）	集水坑	^{3}H、^{7}Be、总 β 活度浓度	调试、运行期间若有冷却水排放，取样并委托有资质单位监测
	固体废物外表面（若有）	固体废物外表面	γ 辐射空气吸收剂量率	调试、运行期间若有固体废物产生，则监测外表面剂量率
	土壤	质子治疗楼东、南、西、北四侧的土壤	^{7}Be、^{22}Na、总 α、总 β 活度浓度	装置完成调试可正常出束使用一次后
	地表水	医院外部周围河流	^{3}H、^{7}Be、总 β 活度浓度	装置完成调试可正常出束使用一次后
直线加速器	工作场所辐射水平	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、操作位、防护门，以及其他关注处点处	γ 辐射空气吸收剂量率	1、射线装置开机运行； 2、射线装置停机。
	医院内部环境敏感点	在 50m 评价范围内，以机房为中心，东、西、南、北四侧每隔 10m 取一个点位		
	医院外部环境敏感点	医院周边环境敏感点		
核医学科	γ 辐射	核医学辐射工作场所及衰变池周围	γ 辐射空气吸收剂量率	核医学试运行一段时间后
	β 表面污染	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等	β 表面污染	
	土壤	核医学辐射工作场所半径 50m 以内	^{18}F、^{99m}Tc、总 β	
	衰变池废液	衰变池取样口	^{18}F、^{99m}Tc、总 β	
	放射性固体废物	固废暂存容器外表面	γ 辐射剂量率、β 表面污染	

6.4 辐射事故应急

医院应根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）的有关规定，在本项目申请辐射安全许可证前，制定可行的、符合要求的《辐射事故应急预案》，应包括以下内容：

（1）总则。包括编制目的、编制依据、应急原则、应急任务、适用范围等。

（2）辐射事故应急组织机构和职责分工。应明确辐射事故应急组织机构的总指挥、成员及应急技术支持单位的组成，并明确各类人员的主要职责。

（3）辐射事故分级。根据医院可能发生的辐射事故性质、严重程度、可控性和影响范围等，对辐射事故进行分级，通常分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级，并明确各类辐射事故对应的事故情形。

（4）应急响应。根据不同等级的辐射事故，制定具有可操作性的应急响应程序，应急响应程序包括辐射事故的报告程序、报告方式与内容、各部门和机构的应急电话、应急处理措施、应急监测、应急人员和公众的安全防护等内容。

（5）应急终止。应明确应急终止单的额条件和程序、后期处置工作内容、应急终止后的调查与评估。

（6）应急保障。包括资金保障、装备保障、通信保障、人员保障、宣传教育、应急培训、应急演练等内容。

项目运行期间发生辐射事故或可能引发辐射事故的运行故障时，应立即启动应急预案，采取应急措施，并在 2h 内填写《辐射事故初始报告表》，立即向当地生态环境主管部门报告。对于造成或可能造成人员超剂量照射的，还应向当地公安部门、卫生主管部门报告。

6.5 年度评估报告

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环保部第 18 号令）

第十二条的规定，医院应对其放射性同位素和射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向生态环境主管部门提交上一年度的评估报告。评估报告主要包括以下内容：

（1）辐射安全和防护设施的运行与维护情况；

（2）辐射安全和防护制度及措施的制定与落实情况；

（3）辐射工作人员变动及接受辐射安全与防护考核情况；

（4）放射性同位素、射线装置等台账；

（5）场所辐射环境监测和个人剂量监测情况及监测数据；

（6）辐射事故及应急响应情况；

（7）核技术利用项目新建、改建、扩建和退役情况；

（8）存在的安全隐患及其整改情况；

（9）其他有关法律、法规规定的落实情况。

6.6 申请者从事辐射工作能力评价

6.6.1 辐射安全与环境保护管理

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应当设置专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少安排 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

同时，根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40 号）的规定，使用Ⅰ类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。

医院设置了辐射安全与环境保护管理小组，组长由分管安全的医院领导担任，

全面负责辐射防护和安全管理的领导工作；小组成员由医务处、质子治疗科室、核医学科、放疗科等涉及核技术利用工作的科室领导和工作人员组成，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。

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

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

6.6.2 辐射工作人员培训

根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。

医院制定了辐射工作人员培训计划，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。

6.6.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者射线装置使用场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用质子治疗系统、电子直线加速器等医用射线装置以及核医学等用于放射诊疗，经预测分析评价，各区域的辐射屏蔽设计均能确保屏蔽体外剂量率水平满足相关标准的要求。各机房设计了完备的安全联锁系统，通过门-机联锁、门-灯联锁、紧急停机、声光报警、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止工作人员和公众意外照射。本项目的辐射防护设计方案满足辐射防护与安全的要求。

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

6.6.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目拟为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 3 个月。并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。并为每间射线装置机房配备 2 台个人剂量报警仪，用于工作人员在治疗机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目拟在质子治疗机房、直线加速器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。此外，拟配备便携式 X-γ辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式表面污染检测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

医院按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

6.6.5 规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

医院根据本项目使用的射线装置、放射源和放射性同位素情况，正在建立相应的辐射安全管理规章制度，包括《辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全保卫制度》《操作规程》《设备检查与维修制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》等。

在以上制度按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

6.6.6 辐射事故应急预案

医院应根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）的有关规定，在本项目申请辐射安全许可证前，制定可行的、符合要求的《辐射事故应急预案》。

在制定完成后，可符合本项目辐射事故应急的相关要求。

6.6.7 辐射工作能力综合评价

对照根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》最新修订要求，对医院从事申请活动种类（使用 I 类、II 类、III 类射线装置以及放射性同位素）的能力进行综合分析与评价，结果见表 6-6。

表 6-7 建设单位从事辐射活动能力的评价

序号	应具备条件	评价结果
1	使用Ⅰ类、Ⅱ类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	医院按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。
	依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	至少应有 1 名注册核安全工程师，方可满足要求。
2	新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。	医院拟从事辐射工作的人员上岗前需参加并通过辐射安全与防护考核，考核合格后，方可满足要求。
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	设计满足要求。
4	放射性同位素与射线装置使用场所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施	设计满足要求。
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。	设计满足要求。
6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登	规章制度建立完成后，方满足要求。

	记制度、人员培训计划、监测方案等。	
7	有完善的辐射事故应急措施。	辐射事故应急预案建立完成后，方满足要求。
8	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	设计满足要求。

6.7 环保投资一览表

本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表见表 6-8。

表 6-8 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资（万元）
1	辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全防护领导小组	50
		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制度	
		人员培训	
		应急保障	
2	人员考核	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核	-
3	监测仪器防护用品	固定式 X-γ 探测器、固定式中子探测器、便携式 X/γ 辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式表面污染检测仪、个人剂量报警仪、个人剂量计	100
		铅衣、铅围脖、铅眼镜、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）		2800
5	环境影响评价、竣工环保验收		50
	总计		3000

6.8 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，编制相应的验收监测报告。本项目的竣工环保验收内容及要求列于表 6-9。

表 6-9 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和应急预案等。	
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. 所有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	1.质子治疗机房及直加机房屏蔽体外剂量率不高于表 1-6、表 1-7、表 1-8 所列剂量率控制水平； 2.质子治疗室内的 X 射线管出束期间，X 射线管操作台处剂量率水平不高于 2.5μSv/h； 3.PEC/CT、SPECT/CT、模拟 CT 机房出束期间，屏蔽体外剂量率水平不高于 2.5μSv/h； 4.核医学科屏蔽体外剂量率不高于“1.4.2.2 小节”所列剂量率控制水平。	
5	表面污染	核医学科表面污染水平不超过“1.4.3 小节”所列表面污染控制水平。	
6	辐射防护与安全措施	1.辐射工作场所分区：将辐射工作场所按控制区、监督区划分； 2.质子治疗系统人身安全联锁系统：由 PLC、出入管理设备、紧急开门、紧急停机、清场搜索、声光报警器、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，治疗室换气次数不低于 4 次/小时； 4.场所辐射监测系统：质子治疗机房、直加机房设置固定式辐射监测点。	
7	放射性三废处理设施	废气	放射治疗机房及核医学科均设有独立的通风系统，各区域排风管最终引至屋面排放，排放高度高于屋面。
		废水	质子治疗机房设置集水井，用于贮存质子治疗系统产生的活化冷却水；核医学科设置专用的废液收集管道和衰变池。
		固体废物	质子治疗区的东南侧设有固体废物暂存间，用于暂存放射性固体废物。该固废间设有门禁系统，门禁卡由专人负责保管，领用时需登记；核医学科设有固废间，用于暂存产生的放射性固体废物。
8	辐射监测	工作场所监测	制定工作场所监测计划，包括自行监测和委托监测，并按计划的频次开展监测。
		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，并按计划的频次开展监测。
		个人剂量监测	每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过三个月，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。
		监测设备	固定式 X-γ 探测器 14 台、固定式中子探测器 11 台、便携式 X/γ 辐射巡测仪 3 台、便携式中子辐射巡测仪 1 台、便携式表面污染检测仪 2 台、个人剂量报警仪 22 台、个人剂量计 131 支。

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

随着我国社会经济的迅速发展，人民生活水平有了很大提高，医疗卫生条件得到进一步改善。然而，肿瘤（特别是恶性肿瘤）依然是国民健康水平进一步提高的主要障碍。据统计数据，2010 年我国恶性肿瘤新发病例达 220 万人，因恶性肿瘤死亡人数达 160 万人。

随着世界各国治癌技术研究和开发的快速发展，质子治疗肿瘤技术由于具有质子布拉格峰效应带来的深度截止效应，以及更加精准的宽度方向控制，已成为新一代更加有效的放疗技术。临床结果显示，相对于其他放射治疗方法，尤其对于有重要组织器官包绕的肿瘤，质子治疗显示出较大的优势：精确度高、治愈率高、副作用小。质子治疗装置已成为当前国际上肿瘤放射治疗的主流装备。

本项目的建设将具有较好的社会效益和经济效益，具体如下：

（1）本项目的建设是扬州市经济社会发展的需要，是提高现代医疗服务业发展水平、不断满足多层次、多样化医疗服务需求的体现。

（2）本项目建成后，将有力的提升扬州市乃至江苏省的医疗水平，可满足深扬州市及周边乃至全国人员的就医需求，造福于民。

（3）本项目的建设，对促进社会基础设施建设有重要而深远的意义，对江苏的医疗卫生事业的发展也将起到极大的推动作用，从而提高社会效益。

（4）本项目的经济效益主要来自项目运行后的财政收入。收入来源主要为医疗收入、药物收入、其他收入、财政差额拨款等。财务分析计算结果表明，本项目具有较好的经济效益。

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面：本项目总用地面积 34988m^2，总建筑面积 47000m^2，主要建设质子治疗机房、直线加速器机房、核医学科，开展肿瘤放射诊疗。

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方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性物质和有害气体进入大气环境和水环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，给环境带来的这些影响均低于国家标准中规定的限值。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于广大人民。因此，本项目的实施是利大于弊的。

7.3 正当性分析

本项目拟使用各类射线装置和非密封放射性物质均设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响很小，满足国家相关标准要求。本项目对患者和社会所带来的利益（主要是患者的健康有利）是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术应用实施活动是正当的。

8 结论与建议

8.1 项目工程概况

中核扬州实业发展有限公司拟在江苏省扬州市仪征市张集街道-111 号建设“扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目暨江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）项目”。项目总用地面积 34988m^2，总建筑面积 47000m^2。

本项目核技术利用建设内容包括质子中心、放疗中心、影像中心和核医学科。其中，质子中心拟使用 2 套质子治疗系统用于肿瘤放射治疗、10 台 X 射线管用于治疗定位、1 台 PET/CT 用于治疗验证；放疗中心拟使用 3 台电子直线加速器用于放射治疗；影像中心拟使用 2 台模拟 CT 用于放疗前模拟定位，以及 1 台大孔径 CT、2 台 DR、1 台乳腺钼靶用于放射诊断；核医学科拟建门诊诊断场所，使用非密封放射性物质及 1 台 PET/CT 和 1 台 SPECT/CT 用于显像诊断，属乙级非密封放射性物质工作场所。

本项目运行期间的辐射源项主要是使用各类医用射线装置时产生的“瞬发辐射”、装置停机后依然存在的“感生放射性”、核医学的表面沾污，以及运行期间产生的放射性三废。

8.2 辐射安全与防护措施

8.2.1 选址、布局合理性分析

本项目拟建于医院院区内，与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的质子治疗、放射治疗与核医学诊断区域，并设置了物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目布局辐射肿瘤放疗、核医学诊断场所功能需要，便于辐射工作场所的防护管理和安全控制，以及放射性污染的防治。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。

8.2.2 辐射防护措施

（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：射线装置机房均设计了安全、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，以及工作状态指示灯、视频监控以及放射性警告标志和中文警示说明等，可有效防止工作人员和公众受到意外照射。

（3）辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算各辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平。

（4）通风系统：各射线装置使用场所、核医学科均设有通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计均能满足相关标准要求，确保工作场所内部和排放到环境中的污染物浓度能够满足相关标准要求。

（5）工作场所辐射监测系统：放射治疗机房内均设有固定式场所辐射监测仪表，对工作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。

8.2.3 运行期放射性三废的治理和控制

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、直线加速器以及核医学科的运行。

质子治疗机房、核医学科等可能产生放射性废气的场所内均设置了独立的排风系统，其运行期间产生的放射性气体经场所内排风管道引至建筑屋面排放。其中核医学排风系统设置了活性炭过滤，排风口均高出本建筑屋脊。

质子治疗机房、核医学科等可能产生放射性废液的场所，均设计废液暂存容器/衰变池，放射性废液经专用管道排入废液暂存容器/衰变池内，确保其在得到处置前能够安全暂存。经暂存衰变，满足排放要求后排入医院污水管网。

质子治疗机房、核医学科等可能产生放射性固体废物的场所均设计了固体废

物暂存容器/场所，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/医疗废物/危险废物处理或由设备生产商回收，不满足解控要求的委托有资质单位收贮，或由设备生产商回收。

8.2.4 施工期污染防治措施

施工期污染源主要有噪声、扬尘、废水和固体废物等，其中噪声和扬尘为最主要的污染物。施工期这些环境影响都是暂时性的，其对环境的影响将随施工的结束而消失。在采取一系列污染防治措施后，施工期间对环境的影响较小。

8.3 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，辐射工作人员和公众的年最大有效剂量为均低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

8.4 辐射安全管理

医院设置专门的辐射安全管理机构；目前正按照人员岗位职责、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一系列辐射安全管理制度及辐射事故应急预案；制定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；配置一名注册核安全工程师；目前制定的辐射环境及工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

8.5 公众参与

本项目按照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络公示、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，详见本项目《公众参与说明》。

8.6 总结

综上所述，建设单位拟开展的“扬州质子治疗中心及产业项目—质子治疗中心项目暨江苏省人民医院扬州院区（扬州质子治疗中心）项目”在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和环境的影响符合环境保护的要求，该项目对环境的影响是可以接受的。建设单位在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，故从辐射防护和环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。

8.7 建议

（1）建设单位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。建议运行后根据实际工作需要，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）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。

（4）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。